



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

**DAGRI**  
DIPARTIMENTO DI SCIENZE  
E TECNOLOGIE AGRARIE,  
ALIMENTARI, AMBIENTALI E FORESTALI

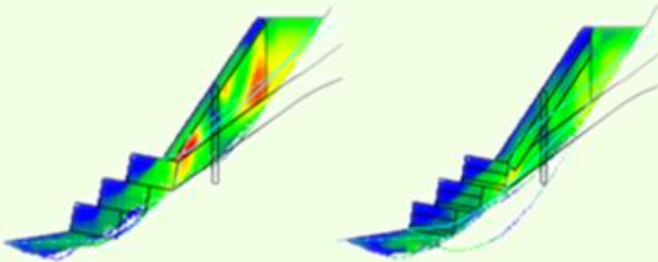


**ASSOCIAZIONE  
ITALIANA  
PER LA  
INGEGNERIA  
NATURALISTICA**



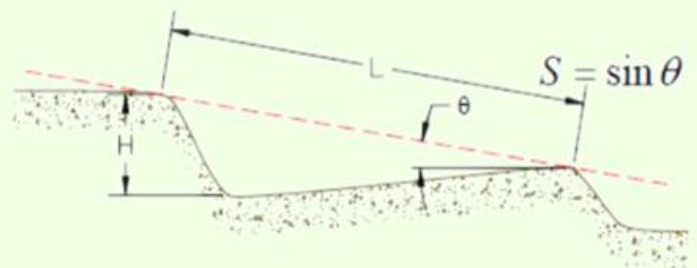
0 anni

25 anni



# IN2.0

## INNOVAZIONI IN INGEGNERIA NATURALISTICA



**COLLANA FIUMI E TERRITORIO**

## **INNOVAZIONI IN INGEGNERIA NATURALISTICA I.N.2.0**

*A cura di:*

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE** – Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali

*Federico Preti - Università degli Studi di Firenze e AIPIN*

*Rossana Saracino - Università degli Studi di Firenze e Tutor Corso di aggiornamento professionale  
“I.N.2.0\_Innovazioni in Ingegneria Naturalistica”*

*Andrea Signorile - Università degli Studi di Firenze e Tutor Corso di aggiornamento professionale  
“I.N.2.0\_Innovazioni in Ingegneria Naturalistica”*

### **Autori:**

*L. BORSELLI - Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), Mexico*

*M. CELLURA - Università degli Studi di Palermo*

*A. CISLAGHI - Università degli Studi di Milano*

*P. CORNELINI – AIPIN*

*C. CROCETTI – AIPIN*

*F. D’ASARO – AIPIN*

*G. DORONZO – AIPIN*

*G. F. RICCI - Università degli Studi di Bari*

*A. FERRARIO – AIPIN*

*V. FERRO – Università degli Studi di Palermo*

*F. GENTILE – Università degli Studi di Bari*

*P. GIACCHINI – AIPIN*

*F. GIADROSSICH – Università degli Studi di Sassari*

*V. LATTEO – AIPIN*

*L. M. FERRARA – AIPIN*

*G. MENEGAZZI – AIPIN*

*F. PALMERI – AIPIN*

*G. PIRRERA – AIPIN*

*F. PRETI – Università degli Studi di Firenze e AIPIN*

*R. SANTOLINI – AIPIN*

*R. SARACINO – Università degli Studi di Firenze*

*A. SIGNORILE – Università degli Studi di Firenze*

*F. TECCHIO – Full Service S.r.l.*

*M. TOGNI - Università degli Studi di Firenze*

*F. VALLONE – AIPIN*

### **Hanno collaborato:**

*G. BAIAMONTE - Università degli Studi di Palermo*

*D. BONI - CNR-IRPI*

*R. CALVO – Università degli Studi di Palermo*

*S. R. LA MANTIA - Università degli Studi di Palermo*

*P. LASSINI – Casa della Agricoltura*

*I. MURGIA - Università degli Studi di Sassari*

*S. S. PALERMO – Università degli Studi di Palermo*

*G. SAULI<sup>†</sup> - AIPIN*

*M. SCHWARZ - Bern University of Applied Sciences*

*M. UZIELLI - Università degli Studi di Firenze*

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

*Coordinamento, redazione ed editing: F. Preti, R. Saracino, A. Signorile*

*Revisione: K. Begliomini, P. Cornelini, C. Crocetti, G. Pirrera, F. Preti, R. Santolini, R. Saracino, A. Signorile*

*Supervisione: F. Preti*

*Immagini copertina: le immagini sono relative all'intervento di sistemazione idraulico-forestale con tecniche di Ingegneria Naturalistica sul torrente Gorgone in Casentino (progetto e direzione lavori DAGRI-UNIFI per conto di Consorzio di Bonifica Alto Valdarno) e ad un esempio di output del software SSAP per l'analisi di stabilità di versante con NBS.*

REGIONE TOSCANA



Consiglio Regionale

*“Stampato dalla tipografia  
del Consiglio regionale della  
Toscana, quale contributo ai  
sensi della l.r. 4/2009”.*



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

**DAGRI**  
DIPARTIMENTO DI SCIENZE  
E TECNOLOGIE AGRARIE  
ALIMENTARI, AMBIENTALI E FORESTALI



**ASSOCIAZIONE  
ITALIANA  
PER LA  
INGEGNERIA  
NATURALISTICA**

## **SOMMARIO**

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>L'INGEGNERIA NATURALISTICA AI TEMPI DI NBS, RIPRESA E RESILIENZA</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1.1</b> | <b>INGEGNERIA NATURALISTICA: UNA FILOSOFIA PROGETTUALE E TECNICHE CONSOLIDATE PER SOLUZIONI ISPIRATE ALLA NATURA (P. Cornelini, F. Preti, G. Sauli<sup>†</sup>)</b> | <b>1</b>  |
| 1.1.1      | Principi, definizioni e metodi dell'Ingegneria Naturalistica; da dove veniamo, dove siamo e dove stiamo andando <sup>1</sup>  |           |
|            | Bibliografia Par. 1.1.1   | 8         |
| 1.1.2      | Nuove conoscenze  | 8         |
|            | Bibliografia Par. 1.1.2   | 11        |
| 1.1.3      | Deontologia Professionale   | 15        |
| <b>1.2</b> | <b>EVOLUZIONE STORICA DELLE TECNICHE DI INGEGNERIA NATURALISTICA (G. Pirrera, L. M. Ferrara)</b>  | <b>18</b> |
| 1.2.1      | Introduzione: i padri dell'Ingegneria Naturalistica   | 18        |
| 1.2.2      | La spinta verso l'I.N. 2.0 e la SWB, Soil & Water Bioengineering  | 20        |
| 1.2.3      | Il Riuso di materiali del luogo nella tradizione italiana e austriaca   | 24        |
| 1.2.4      | La spinta più naturalistica   | 27        |
| 1.2.5      | Le quattro macro-famiglie del riutilizzo nelle tecniche d'Ingegneria Naturalistica  | 29        |
| 1.2.5.1    | Riutilizzo di materiali organici di scarto  | 29        |
| 1.2.5.2    | Riutilizzo di specie alloctone  | 32        |
| 1.2.5.3    | Riuso di rifiuti antropici e di cantiere  | 33        |
| 1.2.5.4    | Tecniche ed innovazioni   | 34        |
|            | Bibliografia Par. 1.2   | 37        |
| <b>1.3</b> | <b>INGEGNERIA NATURALISTICA: NBS PER IL PROGETTO DI PAESAGGIO (F. Vallone)</b>  | <b>39</b> |
| <b>2</b>   | <b>LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA</b>  | <b>43</b> |
| <b>2.1</b> | <b>ANALISI FLORISTICA E VEGETAZIONALE. CRITERI DI SCELTA DELLE SPECIE PER UN INTERVENTO DI I.N. (P. Cornelini, G. Sauli<sup>†</sup>)</b>                            | <b>43</b> |
| 2.1.1      | Introduzione  | 43        |
| 2.1.2      | Metodologia tipo di analisi botanica  | 44        |
| 2.1.3      | Analisi bioclimatica  | 45        |
| 2.1.4      | Analisi botanica: flora e vegetazione   | 45        |
| 2.1.4.1    | Analisi floristica  | 46        |
| 2.1.4.2    | Analisi fitosociologica   | 47        |
| 2.1.5      | Serie dinamica della vegetazione  | 48        |
| 2.1.6      | Cartografia della vegetazione   | 50        |
| 2.1.7      | Il progetto botanico  | 52        |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 2.1.8      | Criteri di scelta delle specie   | 53        |
| 2.1.8.1    | Le specie autoctone  | 54        |
| 2.1.8.2    | Specie a determinati e stadi della serie di vegetazione  | 54        |
| 2.1.9      | Le tipologie vegetazionali di riferimento  | 55        |
| 2.1.9.1    | Le formazioni arboree  | 55        |
| 2.1.9.2    | Le formazioni arbustive  | 55        |
| 2.1.9.3    | Le formazioni erbacee  | 57        |
| 2.1.10     | I monitoraggi  | 59        |
|            | Bibliografia Par. 2.1  | 61        |
| <b>2.2</b> | <b>L'EROSIONE DEL TERRENO E SOLUZIONI TECNICHE (F. Tecchio)</b>                                    | <b>63</b> |
| 2.2.1      | Che cos'è l'erosione idrica del terreno  | 63        |
| 2.2.1.1    | Fattori incisivi   | 63        |
| 2.2.1.2    | Principale causa di dinamica erosiva   | 63        |
| 2.2.1.3    | Fattori concorrenziali   | 63        |
| 2.2.2      | Equazione universale relativa alla perdita di terreno  | 64        |
| 2.2.3      | Azioni di controllo dei processi erosivi   | 64        |
| 2.2.4      | Soluzioni superiori per la protezione del terreno contro l'erosione                                | 65        |
| 2.2.4.1    | Bioreti  | 65        |
| 2.2.4.2    | Biostuoie  | 67        |
| 2.2.5      | Sistema antierosivo a matrice di fibre legate  | 68        |
| 2.2.5.1    | Confronto tra Matrice di Fibre Legate e le tradizionali biostuoie antierosive                      | 68        |
| 2.2.6      | Idrosemina   | 69        |
| 2.2.6.1    | Idrosemina potenziata con mulch  | 71        |
| 2.2.6.2    | Idrosemina a spessore  | 72        |
| 2.2.7      | ABI-Ammendante Biotico Ingegnerizzato  | 72        |
| <b>2.3</b> | <b>PRODUZIONE E IMPIEGO DI FIORUME AUTOCTONO PER INERBIMENTI TECNICI (A. Ferrario, P. Lassini)</b> | <b>76</b> |
| 2.3.1      | Fiorume autoctono: proprietà e tecniche produttive   | 76        |
| 2.3.2      | L'impiego del fiorume nelle opere di Ingegneria Naturalistica                                      | 83        |
|            | Bibliografia Par. 2.3  | 88        |
| <b>2.4</b> | <b>TECNOSUOLI E RECUPERO DELLE TERRE E ROCCE DA SCAVO (G. Pirrera e L. Ferrara)</b>                | <b>89</b> |
| 2.4.1      | Premessa   | 89        |
| 2.4.2      | Componenti dei Tecnosuoli e Cenni Normativa Italiana   | 91        |
| 2.4.3      | Casistica  | 97        |
| 2.4.3.1    | Area archeologica «Le Rocche», Pietraperzia (Enna)   | 97        |
| 2.4.3.2    | Parco sub-urbano Portella del Cerruolo (Trapani)   | 99        |
| 2.4.3.3    | Treebox per deimpermeabilizzazione urbana affidate dal Comune di Palermo ad AIPIN Sicilia          | 103       |
| 2.4.3.4    | Parco della salute (Palermo)   | 104       |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 2.4.3.5    | Giardino storico dell'Hotel Excelsior Palace di Taormina (Messina)  | 107        |
|            | Bibliografia Par. 2.4   | 109        |
| <b>2.5</b> | <b>COMPENDIO DI TECNOLOGIA DEL LEGNO, CON CENNI SU DURABILITÀ E PROPRIETÀ MECCANICHE (M. Togni)</b>   |            |
|            | <b>111</b>  |            |
| 2.5.1      | Introduzione  | 111        |
| 2.5.2      | La materia prima_ il legno  | 112        |
| 2.5.2.1    | Anisotropia   | 112        |
| 2.5.2.2    | Caratteristiche macroscopiche del legno   | 112        |
| 2.5.2.3    | Componenti del fusto legnoso  | 113        |
| 2.5.2.4    | Legno e acqua   | 113        |
| 2.5.2.5    | Proprietà meccaniche del legno  | 115        |
| 2.5.2.6    | Meccanismi di degradamento del legno da attacchi fungini  | 117        |
| 2.5.2.7    | Durabilità del legno  | 120        |
| 2.5.2.8    | Errori e luoghi comuni sul legno  | 122        |
| 2.5.3      | Innovazioni nella progettazione delle opere   | 124        |
| 2.5.3.1    | Ispezioni sul costruito   | 128        |
|            | Bibliografia Par. 2.5   | 130        |
| <b>2.6</b> | <b>BIOTECNICA E BIORIMEDIO IN AREA MEDITERRRANEA (V. Latteo)</b>  | <b>132</b> |
| 2.6.1      | Specie vegetali coinvolte in area mediterranea  | 132        |
| 2.6.1.1    | Database delle specie mediterranee che attivano processi di fitodepurazione   | 132        |
| 2.6.2      | Impianti di fitodepurazione complessi   | 132        |
|            | <b>Bibliografia Par. 2.6</b>  | <b>135</b> |
| <b>3</b>   | <b>GLI STRUMENTI IMPIEGATI IN INGEGNERIA NATURALISTICA</b>  | <b>143</b> |
| <b>3.1</b> | <b>RINFORZO RADICALE – COME SI MISURA E MODELLI DI STIMA</b>  | <b>143</b> |
| 3.1.1      | Impiego di vegetazione autoctona negli interventi di Ingegneria Naturalistica e caratteristiche degli apparati radicali (F. Gentile, G. F. Ricci) | 143        |
|            | Bibliografia Par. 3.1.1   | 155        |
| 3.1.2      | Controllo dell'erosione: Idrosemina e Seed Clay Balls (G. Pirrera, L. M. Ferrara)   | 156        |
| 3.1.2.1    | Introduzione  | 156        |
| 3.1.2.2    | Approcci possibili  | 158        |
|            | Bibliografia Par. 3.1.2   | 179        |
| <b>3.2</b> | <b>IL RUOLO PROTETTIVO DEL BOSCO E LA GESTIONE SELVICOLTURALE (A. Cislaghi)</b>   | <b>181</b> |
| 3.2.1      | Le origini  | 181        |
| 3.2.2      | L'attualità   | 182        |
| 3.2.3      | Funzione protettiva contro le frane superficiali  | 184        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 3.2.3.1    | Effetti idrologici   | 184        |
| 3.2.3.2    | Effetti meccanici  | 187        |
| 3.2.4      | Funzione protettiva contro la caduta massi e le valanghe   | 190        |
| 3.2.4.1    | Effetto barriera   | 190        |
| 3.2.4.2    | Carichi di neve  | 190        |
| 3.2.5      | Funzione protettiva contro le alluvioni  | 191        |
| 3.2.5.1    | La gestione delle foreste di protezione  | 191        |
|            | Bibliografia Par. 3.2  | 193        |
| <b>3.3</b> | <b>NUOVE STRUTTURE ANTIEROSIVE, STABILIZZANTI E CONSOLIDANTI</b>   | <b>199</b> |
| 3.3.1      | Evoluzione delle tecniche consolidanti di Ingegneria Naturalistica (P. Cornelini)  | 199        |
| 3.3.1.1    | Introduzione   | 199        |
| 3.3.1.2    | La statica   | 200        |
| 3.3.1.3    | La palificata viva "Roma"  | 204        |
| 3.3.1.4    | La palificata viva latina  | 206        |
| 3.3.1.5    | La palificata viva loricata, opera di consolidamento di Ingegneria Naturalistica a struttura metallica   | 210        |
|            | Bibliografia Par. 3.3.1  | 217        |
| 3.3.2      | Rinforzo del rinforzo radicale ( $R^3$ ) (F. Preti)  | 217        |
| 3.3.2.1    | Strutture prefabbricate, pieghevoli e trasportabili (Preti)  | 219        |
|            | <b>Bibliografia Par. 3.3.2</b>   | <b>224</b> |
| 3.3.3      | Le rotofascine modulari (RFM): un esempio di economia circolare nell'Ingegneria Naturalistica (F. D'Asaro, R. Calvo, G. Pirrera, S.S. Palermo, G. Baiamonte) | 224        |
| 3.3.3.1    | Premesse   | 224        |
| 3.3.3.2    | Il brevetto di opera di stabilizzazione  | 226        |
| 3.3.3.3    | Realizzazione dei prototipi  | 229        |
| 3.3.3.4    | Conclusioni  | 243        |
|            | Bibliografia Par. 3.3.3  | 243        |
| <b>3.4</b> | <b>CENNI SUL DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA (G. Menegazzi, F. Palmeri)</b>  | <b>245</b> |
| <b>3.5</b> | <b>IL CRITERIO DELLA MASSIMA APPLICABILITÀ DELL'INGEGNERIA NATURALISTICA E LA NORMATIVA (G. Doronzo)</b>   | <b>247</b> |
|            | Bibliografia Par. 3.5  | 259        |
| <b>3.6</b> | <b>TRASFERIBILITÀ DELL'INGEGNERIA NATURALISTICA IN PAESI A BASSO REDDITO: ESPERIENZE NELLE ANDE TROPICALI (C. Crocetti, F. Preti)</b>                        | <b>263</b> |
| 3.6.1      | Trasferibilità dell'Ingegneria Naturalistica nei paesi a basso reddito   | 263        |
| 3.6.2      | Trasferibilità dell'Ingegneria Naturalistica in Centro e Sud America   | 264        |
| 3.6.2.1    | Analisi di trasferibilità in Centro e Sud America  | 264        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 3.6.3      | Esperienze nell'area andina tropicale  | 266        |
| 3.6.3.1    | Area in esame  | 269        |
| 3.6.3.2    | Fase di progettazione  | 271        |
| 3.6.3.3    | Fase di costruzione  | 273        |
| 3.6.4      | Conclusioni  | 276        |
|            | Bibliografia Par.3.6   | 279        |
| <b>4</b>   | <b>L'INGEGNERIA NATURALISTICA E LE ACQUE</b>   | <b>283</b> |
| <b>4.1</b> | <b>IL DIMENSIONAMENTO IDRAULICO DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA (V. Ferro)</b>                     | <b>283</b> |
| 4.1.1      | Introduzione   | 283        |
| 4.1.2      | Influenza della vegetazione in alveo   | 284        |
| 4.1.2.1    | Studio del comportamento idraulico degli elementi di vegetazione   | 284        |
| 4.1.2.2    | Resistenze al moto in presenza di vegetazione  | 287        |
| 4.1.3      | Opere in massi   | 293        |
| 4.1.3.1    | Briglie in massi   | 293        |
| 4.1.3.2    | Rampe in massi   | 295        |
|            | Bibliografia Par. 4.1  | 302        |
| <b>4.2</b> | <b>DESERTIFICAZIONE 1981-2021 (G. Pirrera, L. M. Ferrara)</b>  | <b>307</b> |
| 4.2.1      | Generalità   | 307        |
| 4.2.2      | Le metodologie di approccio  | 309        |
| 4.2.2.1    | GOALS 2030   | 309        |
| 4.2.2.2    | MEDALUS (1999)   | 310        |
| 4.2.3      | UN DLDD (Desertification Land Degradation & Drought,2007)  | 312        |
| 4.2.4      | La segregazione del carbonio   | 313        |
| 4.2.5      | Il check europeo   | 316        |
| 4.2.6      | Il rischio desertificazione in Sicilia   | 321        |
| 4.2.7      | Caso Studio: Parco sub-urbano Portella del Cerriolo (Custonaci, Trapani)                                   | 324        |
| 4.2.8      | Caso Studio: Area archeologica «Le Rocche», Pietraperzia (Enna)  | 325        |
| 4.2.9      | Riflessioni e conclusioni dall'Oreto all'Alcantara: una involuzione o una evoluzione?                      | 325        |
|            | Bibliografia Par.4.2   | 327        |
| <b>4.3</b> | <b>AREE UMIDE QUALE COMPENSAZIONE AMBIENTALE PER IL RISCHIO DESERTIFICAZIONE: CASI STUDIO (G. Pirrera)</b> | <b>329</b> |
| 4.3.1      | Perché le Nature Based Solutions (NBS) consentono di contrastare la desertificazione con aree umide        | 329        |
| 4.3.2      | Generalità sulla depurazione naturale  | 331        |
| 4.3.2.1    | Meccanismi di trattamento dei contaminanti   | 332        |
| 4.3.2.2    | Tipologie di sistemi di fitodepurazione  | 333        |



|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 4.3.2.3    | La vegetazione  | 334        |
| 4.3.3      | Restauro ecologico e ricostruzione di aree umide a obiettivo multipli: CASI STUDIO  | 337        |
| 4.3.3.1    | Conservazione e Capitale Naturale   | 337        |
| 4.3.3.2    | Restauro fluviale e fitorimedio   | 347        |
| 4.3.3.3    | Ecologia industriale  | 355        |
|            | Bibliografia Par. 4.3   | 364        |
| <b>5</b>   | <b>LA MANUTENZIONE ED IL MONITORAGGIO DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA</b>   | <b>366</b> |
| <b>5.1</b> | <b>MONITORAGGI IN ITALIA SU OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA</b>   | <b>366</b> |
| 5.1.1      | Il monitoraggio della componente viva (P. Cornelini)  | 366        |
| 5.1.1.1    | Gli interventi in ambito idraulico  | 368        |
| 5.1.1.2    | Gli interventi in ambito di versante  | 375        |
| 5.1.1.3    | Risultati conclusivi del monitoraggio   | 380        |
| 5.1.2      | Il caso della Gola del Furlo (PU) (P. Giacchini)  | 383        |
| 5.1.2.1    | La Riserva Naturale Statale Gola Del Furlo (PU)   | 383        |
| 5.1.2.2    | Metodologia   | 384        |
| 5.1.2.3    | Il monitoraggio   | 387        |
| 5.1.2.4    | Esempio - Palificata Roma   | 387        |
| 5.1.2.5    | Esempio - Palificata Roma   | 393        |
| 5.1.2.6    | Parametri del monitoraggio  | 397        |
| 5.1.2.7    | Conclusioni   | 401        |
| <b>6</b>   | <b>LA PIANIFICAZIONE DEL VERDE ED INTERVENTI DI INGEGNERIA NATURALISTICA</b>  | <b>403</b> |
| <b>6.1</b> | <b>ECOSISTEMI E IL VALORE ECOLOGICO DEGLI INTERVENTI DI INGEGNERIA NATURALISTICA, ESEMPI DI VALUTAZIONE DEI SERVIZI ECOSISTEMICI (R. Santolini)</b> | <b>403</b> |
| 6.1.1      | Introduzione  | 403        |
| 6.1.2      | Gli ecosistemi  | 405        |
| 6.1.3      | Funzioni ecologiche e servizi ecosistemici  | 406        |
| 6.1.4      | Il valore e la valutazione  | 408        |
| 6.1.5      | Considerazioni conclusive   | 412        |
|            | Bibliografia Par. 6.1   | 413        |
| <b>6.2</b> | <b>STOCCAGGIO DELLA CO<sub>2</sub> (M. Togni)</b>   | <b>416</b> |
|            | Bibliografia Par. 6.2   | 418        |
| <b>6.3</b> | <b>LIFE CYCLE ASSESSMENT DELLE OPERE A VERDE (M. Cellura, S.R. La Mantia)</b>   | <b>419</b> |
| 6.3.1      | Introduzione  | 419        |
| 6.3.2      | La metodologia LCA  | 420        |

|              |  |            |
|--------------|--|------------|
| 6.3.3        | La LCA applicata alle opere a verde  | 421        |
| 6.3.3.1      | Approcci metodologici  | 426        |
| 6.3.4        | Ecoprofili degli interventi di Ingegneria Naturalistica  | 426        |
| <b>6.3.5</b> | <b>Prospettive e conclusioni</b>   | <b>430</b> |
|              | Bibliografia Par. 6.3  | 431        |
| <b>6.4</b>   | <b>I.N. E CAM PER IL VERDE E LA SOSTENIBILITÀ IN AMBITO URBANO (F. Vallone)</b>  | <b>433</b> |
| 6.4.1        | Criteri Ambientali Minimi (CAM)  | 433        |
| 6.4.1.1      | CAM per il verde pubblico  | 433        |
| <b>7</b>     | <b>SOFTWARE DI SUPPORTO AD INTERVENTI DI I.N.</b>  | <b>439</b> |
| <b>7.1</b>   | <b>SOSlope e SlideforNET (F. Giadrossich, I. Murgia e M. Schwarz)</b>  | <b>439</b> |
| 7.1.1        | SOSlope  | 439        |
| 7.1.2        | SlideforNET  | 440        |
|              | Bibliografia Par. 7.1  | 442        |
| <b>7.2</b>   | <b>STRUMENTI E SOFTWARE INNOVATIVI PER LA VALUTAZIONE DI STABILITÀ DI VERSANTI VEGETATI : SSAP-<br/>Slope Stability Analysis Program (L. Borselli, F. Preti, M. Uzielli, D.Boni)</b> | <b>444</b> |
| 7.2.1        | SSAP- Slope Stability Analysis Program ( <a href="http://www.ssap.eu">www.ssap.eu</a> )  | 444        |
| 7.2.1.1      | Storia e obiettivi del codice SSAP   | 444        |
| 7.2.1.2      | Caratteristiche del software SSAP  | 446        |
| 7.2.1.3      | Esempi di Applicazioni in Ingegneria Naturalistica: ciglionamenti rinforzati da supporto radicale  | 451        |
| 7.2.1.4      | Esempi di Applicazioni in Ingegneria Naturalistica: applicazione in Nature Based Berlinese   | 456        |
| 7.2.1.5      | Conclusioni  | 460        |
|              | Bibliografia Par.7.2   | 461        |

## **INTRODUZIONE**

Il presente *Volume* è il frutto del *Corso di aggiornamento professionale “L.N. 2.0\_ Innovazioni in Ingegneria Naturalistica”* organizzato nel 2021 dal *Prof. Federico Preti* presso l’*Università degli Studi di Firenze – Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali*, in collaborazione con l’*Associazione Italiana per l’Ingegneria Naturalistica AIPIN*.

Gli Autori principali, riportati nell’*Indice*, sono stati principalmente docenti del *Corso*, che hanno interagito interdisciplinariamente tra loro, con il coordinamento di *F. Preti, R. Saracino e A. Signorile*, ma rimangono responsabili dei contenuti dei testi.

Il *Volume* segue i precedenti, della *Collana Fiumi e Territorio*, dal titolo “*Principi e linee guida per l’Ingegneria Naturalistica*” e redatti nei primissimi anni 2000, i quali hanno gettato le basi per una trattazione riguardante le tematiche interdisciplinari dell’*Ingegneria Naturalistica* approfondendo gli sviluppi e le applicazioni in Toscana.

Questo lavoro si configura come il continuum editoriale dei primi volumi, ma soprattutto nasce con l’obiettivo di approfondire e divulgare le innovazioni tecniche e tecnologiche dell’*Ingegneria Naturalistica*, secondo il programma del *Corso* di aggiornamento professionale.

Il *Volume* non può essere esauriente nella trattazione di tutti i nuovi argomenti che permeano l’*Ingegneria Naturalistica* ad oggi e vi si trovano tematiche maggiormente approfondite rispetto ad altre. Ad esempio, la trattazione delle nuove soluzioni tecniche e delle nuove strutture antierosive, stabilizzanti e consolidanti non può essere esaustiva, ma esemplificativa.

Al presente *Volume*, in previsione, seguirà in previsione una successiva pubblicazione, prettamente operativa, riguardante l’approfondimento di interventi in Toscana mediante l’utilizzo di tecniche innovative di *Ingegneria Naturalistica*. Attualmente, queste “*schede descrittive di interventi di Ingegneria Naturalistica*” possono essere consultate sul sito ufficiale di *AIPIN* <http://www.aipin.it/database-best-practices-i-n/>.

Per ulteriori riferimenti ed approfondimenti si rimanda allo stesso sito ed al sito [www.efib.org](http://www.efib.org) della *Federazione Europea delle Associazioni per l’Ingegneria Naturalistica*.

Nel primo capitolo “*L’Ingegneria Naturalistica ai tempi di NBS, ripresa e resilienza*” si evidenzia il percorso di innovazione della disciplina avvenuto negli ultimi venti anni: dalle basi dell’*Ingegneria Naturalistica* fino alle nuove opportunità previste con il *PNRR* ed i *PSR*.

In questo capitolo vengono descritte alcune tecniche già consolidate, e quindi non puramente innovative, ma risulta interessante sottolineare proprio questo percorso di evoluzione avvenuto nel tempo, dal 2000 (al tempo dei primi *Volumi*) fino ad oggi.

Si evidenzia inoltre l'importanza dell'Ingegneria Naturalistica (*Soil and Water Bioengineering*), in quanto *Nature Based Solutions (NBS)*.

Nel secondo capitolo **“La componente viva e gli inerti delle opere di Ingegneria Naturalistica”** vengono trattate tematiche inerenti la vegetazione da un punto di vista botanico, con un *focus* sulla tecnologia del legno ed i campi di applicazione nelle opere di Ingegneria Naturalistica. In particolare, si affrontano le metodologie utilizzate per creare delle strutture vegetate e come la vegetazione può fornire un biorimediazione in caso di recupero di suoli degradati.

Si approfondisce, inoltre, l'aspetto riguardante gli inerti con particolare accenno ai tecnosuoli e al recupero delle terre e rocce da scavo.

Il terzo capitolo **“Gli strumenti impiegati in Ingegneria Naturalistica”** riguarda in una prima parte il ruolo della vegetazione e dei suoi apparati radicali negli interventi di Ingegneria Naturalistica.

A ciò si aggiunge la descrizione dello sviluppo di alcune tecniche e strutture antierosive, stabilizzanti e consolidanti, come *NBS* e basate su un'*economia circolare locale*.

Un aspetto in costante sviluppo e quindi sempre fonte di *innovazione* è quello della *trasferibilità dell'Ingegneria Naturalistica Senza Frontiere* in paesi extra-europei.

Nel quarto capitolo **“L'Ingegneria Naturalistica e le acque”** si fa riferimento al dimensionamento idraulico di opere di Ingegneria Naturalistica.

Si affrontano inoltre questioni relative alla desertificazione e di come le *Nature Based Solution* siano in grado di contrastare questo processo nelle aree umide.

Il capitolo cinque **“La manutenzione ed il monitoraggio delle opere di Ingegneria Naturalistica”** riporta alcune esperienze pratiche di monitoraggio di opere e della loro evoluzione temporale.

Nel sesto capitolo **“La pianificazione del verde ed interventi di Ingegneria Naturalistica”** viene evidenziata l'importanza degli ecosistemi ambientali e di come l'Ingegneria Naturalistica possa essere in grado di fornire un valido contributo per il ripristino e la riqualificazione ambientale a seguito di disturbi di varia natura. Si approfondisce l'attuale aspetto riguardante lo stoccaggio della CO<sub>2</sub> da parte delle opere di Ingegneria Naturalistica.

A tal proposito, viene esposta la metodologia del *Life Cycle Assessment (LCA)* applicata alle opere vive.

Inoltre, è trattata la tematica dei *Criteri Ambientali Minimi (CAM)*, con particolare riferimento al verde pubblico e di come questo approccio verta su obiettivi di sostenibilità ambientale e dunque risulta in linea con i principi dell'Ingegneria Naturalistica.

Nel settimo capitolo “*Software di supporto ad interventi di I.N.*” si fa riferimento a programmi che possono trovare applicazioni in ambito di Ingegneria Naturalistica e che fungono da vere e proprie innovazioni tecnologiche in grado di fornire supporto in fase progettuale.

*R. Saracino*

*A. Signorelli*

# **1 L'INGEGNERIA NATURALISTICA AI TEMPI DI NBS, RIPRESA E RESILIENZA**

## **1.1 INGEGNERIA NATURALISTICA: UNA FILOSOFIA PROGETTUALE E TECNICHE CONSOLIDATE PER SOLUZIONI ISPIRATE ALLA NATURA (P. Cornelini, F. Preti, G. Sauli<sup>†</sup>)**

### **1.1.1 Principi, definizioni e metodi dell'Ingegneria Naturalistica; da dove veniamo, dove siamo e dove stiamo andando**

*L'Ingegneria Naturalistica* (I.N.) è una disciplina tecnica che utilizza le piante vive autoctone negli interventi antierosivi e di consolidamento in genere in abbinamento con altri materiali (paglia, legno, pietrame, reti metalliche, biostuoie, geotessuti, ecc.).

I campi di applicazione sono vari e spaziano dai problemi classici di erosione dei versanti, alle frane, alle sistemazioni idrauliche in zona montana, a quelli del reinserimento ambientale delle infrastrutture viarie (scarpate stradali e ferroviarie), alle cave e discariche, alle sponde dei corsi d'acqua, ai consolidamenti costieri, a quelli dei semplici interventi di rinaturalizzazione (già denominata anche rinaturazione) e ricostruzione di elementi delle reti ecologiche.

Le finalità degli interventi di Ingegneria Naturalistica (I.N.) sono storicamente quattro:

- naturalistiche, in quanto non semplice copertura a verde ma ricostruzione o innesco di ecosistemi paraturali mediante impiego di specie autoctone;
- tecnico-funzionali, per esempio antierosive, stabilizzanti e di consolidamento di una sponda o di una scarpata stradale;
- paesaggistiche, di "ricucitura" al paesaggio naturale circostante;
- economiche, in quanto strutture competitive e alternative ad opere tradizionali (ad esempio muri di controripa sostituiti da palificate vive).

In questa congiuntura storica è importante non dimenticare la nostra storia dell'Ingegneria Naturalistica e le nostre "radici" (fuor di metafora).

Oggi tutti parlano di *Nature Based solutions* (NBS), ovvero di "azioni per proteggere, gestire in modo sostenibile e ripristinare gli ecosistemi naturali o modificati, che affrontano le sfide della società in modo efficace e adattivo, fornendo contemporaneamente benefici per il benessere umano e la biodiversità".

Già nei Manuali curati per la Regione Toscana e la Regione Lazio (Sauli et al., 2005) abbiamo riportato notizie storiche risalenti a oltre 2000 anni fa, come riportato in Figura 1.1 e ripreso nel trattato nel paragrafo seguente, ma oggi dobbiamo anche approfondire il nexus “I.N. vs NBS”, per far capire da dove siamo partiti, che percorso è stato fatto finora e che opportunità/sfide abbiamo ora di fronte (ai tempi di strumenti quali Green New Deal, PNRR, PSR, etc.).

NBS è un concetto “ombrello” che abbraccia diversi concetti che implicano il lavoro con la natura per ottenere benefici per la società, mentre altri termini che sono stati introdotti sono i seguenti (Figura 1.1): Sviluppi a basso impatto - LID, migliori pratiche di gestione – BMP, progettazione urbana sensibile all'acqua – WSUD, infrastrutture verdi – GI, sistemi di drenaggio urbano sostenibili – SuD,, adattamento basato sull'ecosistema – EbA, riduzione del rischio basata sull'ecosistema– Eco-DRR – e infrastruttura blu-verde – BGI,

Tuttavia, non erano stati condotti confronti diretti tra le definizioni I.N. e NBS, per capire fino a che punto si sovrappongono in termini di obiettivi e applicazioni, il che non è importante solo per comprendere le sovrapposizioni, ma anche quando e come le definizioni sono collegate a legislazioni e meccanismi di finanziamento. È risultato estremamente necessario, pertanto, condurre un confronto strutturato di terminologie e obiettivi (Preti et al., 2022).

Sebbene parte della recente letteratura su I.N. faccia riferimento a NBS, in Figura 1.1 si osserva come non compaia il termine I.N., sostituito da altri acronimi “nuovi”, a volte non chiari o non necessari (Preti et al., 2022).

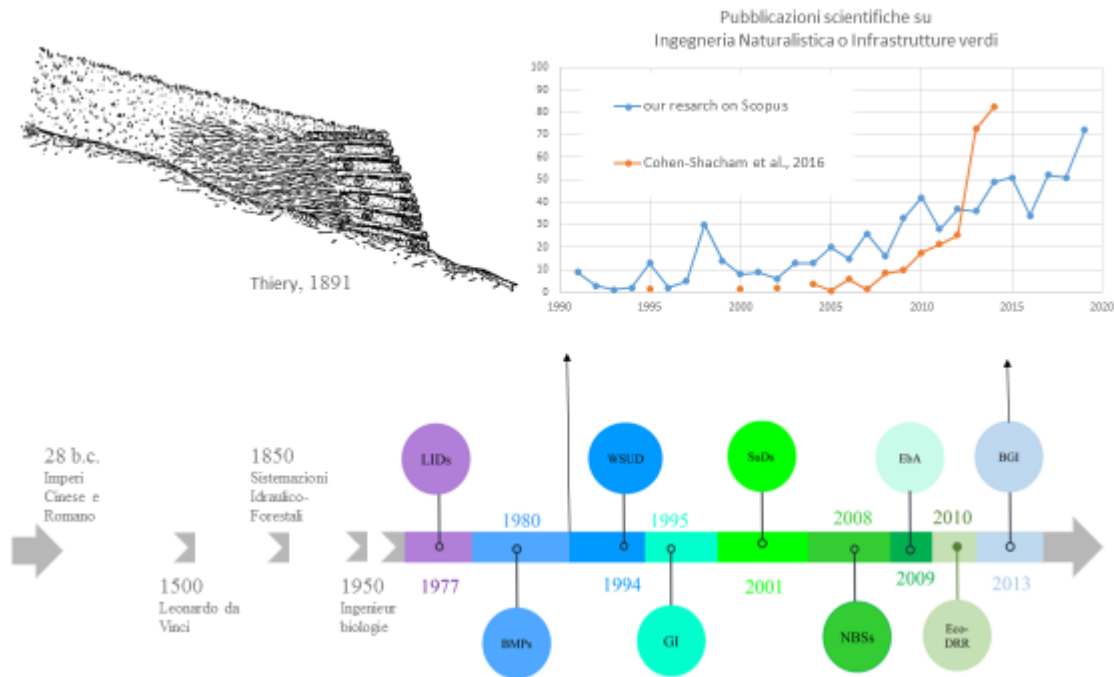


Figura 1.1 (modificato da Preti et al., 2022): in basso, una cronologia delle pietre miliari storiche per l'Ingegneria Naturalistica (Thiery, 1891, Hofman, 1936; Evette et al., 2009; Bresci e Preti, 2010; Stokes et al., 2010, Preti, 2021) e anno di origine di ciascuna Nature Based Solutions con relativo acronimo, in base alla loro comparsa nelle pubblicazioni (Ruangpan et al. 2020); in alto a sinistra, un esempio di applicazione di un intervento di Sistemazioni Idraulico-Forestali della fine dell'800 (Thiery, 1891); in alto a destra, il confronto tra andamento delle pubblicazioni internazionali (fonte Scopus) su "SOIL" e "BIOENGINEERING" (dove il picco del 1998 è di origine statunitense) e andamento delle pubblicazioni su "infrastrutture verdi e naturali" di Cohen-Shacham et al. (2016)

Il confronto tra I.N., NBS e relative terminologie, è stato effettuato creando una matrice, dove ogni riga della matrice rappresenta ciascuno dei 3 aspetti principali delle pratiche I.N. (ovvero "scopi principali", "campi di applicazione" e "altri obiettivi, come da Statuto AIPIN e in EFIB, 1996; Sangalli et al., 2021), mentre le colonne della stessa designano tutte le altre terminologie, associando ad essi le corrispondenze e i riferimenti trovati nella letteratura scientifica o tecnica, con particolare attenzione ai rapporti dell'UE per la loro importanza a livello normativo e di finanziamento (Figura 1.2).



| da Statuto AIPIN       |   | le nuove terminologie** |     |     |    |    |    |     |    |       |
|------------------------|---|-------------------------|-----|-----|----|----|----|-----|----|-------|
|                        |   | WM                      | NBS | GI  | UF | ES | EE | EC  | OH | E DRR |
| FINALITÀ               | Tecnico-funzionali ( <u>antierosive</u> , stabilizzanti, di consolidamento)   | XXX                     | X   | X   |    | X  | XX | XXX | X  | XX    |
|                        | <u>Naturalistiche(o ecologiche*)</u> di ricostruzione di ecosistemi <u>paranaturali</u>   |                         | XX  |     |    | X  |    | X   | X  |       |
|                        | Paesaggistiche di ricucitura al paesaggio naturale circostante  |                         | XX  |     | X  |    | X  | X   | X  |       |
|                        | Socioeconomiche per uno sviluppo ecocompatibile e per l'aumento dell'occupazione  | XX                      | X   |     |    | X  |    | XXX | X  | X     |
| ... si occupa anche di | <u>deframmentazione</u> di habitat faunistici mediante impiego di materiali, anche solo inerti e infrastrutture ed altri provvedimenti volti a fornire condizioni favorevoli alla vita di specie animali  |                         | XX  |     |    | X  | XX |     | X  |       |
|                        | <u>tecniche</u> di rinaturalizzazione finalizzate alla realizzazione di ambienti idonei a specie o comunità vegetali e/o animali  |                         | XX  |     |    | X  | XX |     | X  |       |
| SETTORI                | <u>della tutela *</u> del suolo ( <u>territorio*</u> ) ( <u>mitigazione del rischio idrogeologico*</u> , sistemazioni idraulico forestali, sistemazione idrogeologica dei bacini, sistemazione dei versanti in erosione e in frana superficiale, sistemazioni idrauliche dei corsi d'acqua naturali e dei canali di bonifica, rinaturalizzazione dei corsi d'acqua, sistemazioni delle coste e dei fondali) | XXX                     | XX  | XX  |    | X  | XX | X   | X  | XXX   |
|                        | <u>della rivegetazione</u> e consolidamento di scarpate in ambito di infrastrutture, <u>riqualificazione ambientale*</u> (strade, ferrovie, metanodotti, elettrodotti, cave, discariche)  |                         | X   | X   |    | X  | XX | X   | X  | X     |
|                        | <u>delle coperture a verde pensile</u> , degli ecosistemi filtro e depurazioni naturali in genere, e dei settori precedenti anche in ambiti urbani ed industriali   |                         | XX  | XXX |    |    | X  | XX  | X  | X     |

Figura 1.2 Matrice del nexus I.N. vs NBS

Legenda:

X = una certa corrispondenza

XX = corrispondenza media

XXX = corrispondenza elevata

Watershed Management (WM = Sistemazioni Idraulico-Forestali), Nature Based Solutions (NBS), Green Infrastructures (GI), Urban Forestry (UF), Ecosystem Services (ES), Ecological Engineering (EE, Journal of Economia Circolare (EC), One Health (OH), Ecological Disaster Risk Reduction (EDRR)

Sintetizzando i principali risultati ottenuti, si può affermare che:

- Per quanto riguarda gli “Scopi principali I.N.”, essi sono in comune con tutti i nuovi termini
- I “Campi di applicazione I.N.” hanno il maggior numero di corrispondenze con Ecological Engineering (EE)
- Tutti e 3 gli aspetti principali sono coperti dalla definizione NBS

In conclusione:

- IN è ed è sempre stata NBS
- NBS è un concetto unificante che dà priorità alla natura per integrare gli sforzi di adattamento, mitigazione e riduzione dei disastri ai cambiamenti climatici, abbracciando anche molti aspetti delle applicazioni I.N.
- Una P(NR)rovocazione: si potrebbe passare dalla denominazione AIPIN, sigla per Associazione Italiana per l'Ingegneria Naturalistica, a quello di Associazione Italiana (per/di) Ingegneria Naturalistica (e/per) Nature based solutions?

Ciò che principalmente contraddistingue l'intervento di Ingegneria Naturalistica da quello tradizionale è:

- l'esame delle caratteristiche topoclimatiche e microclimatiche di ogni superficie di intervento;
- l'analisi del substrato pedologico con riferimento alle caratteristiche chimiche, fisiche ed idrologiche del suolo in funzione degli ammendanti e correttivi da impiegare;
- l'esame delle caratteristiche geologiche e geomorfologiche;
- le verifiche geotecniche e idrauliche;
- la valutazione delle possibili interferenze reciproche con l'infrastruttura. Ad esempio, per una strada: la presenza di sali antigelo, l'interferenza della vegetazione con la sagoma limite, il possibile indotto e/o interferenze faunistiche;
- la base conoscitiva, floristica e fitosociologica con particolare riferimento alle serie
- dinamiche degli ecosistemi interessati per l'efficace utilizzo delle caratteristiche biotiche di ogni singola specie;
- l'utilizzo degli inerti tradizionali ma anche di materiali di nuova concezione quali le stuoie e i geotessuti sintetici in abbinamento a piante o parti di esse;
- la selezione delle miscele di sementi delle specie erbacee in funzione dell'efficacia antierosiva, dei processi di organicazione dell'azoto, della progressiva sostituzione delle specie impiegate con le specie selvatiche circostanti;

- l'accurata selezione delle specie vegetali da impiegare con particolare riferimento a: specie arbustive ed arboree da vivaio, talee, zolle erbose da trapianto, utilizzo di stoloni o rizomi. Vengono utilizzate le specie autoctone derivate da materiale di propagazione locale;
- l'abbinamento della funzione antierosiva con quella di reinserimento ambientale e naturalistico;
- il miglioramento nel tempo delle due funzioni sopra citate a seguito dello sviluppo delle parti epigee e ipogee delle piante impiegate, con il mascheramento delle componenti artificiali dell'opera.

Si tratta chiaramente di una serie di tecniche “*trasversale*” che fa capo a vari settori tecnico-scientifici di cui si utilizzano, a fini applicativi, dati sintetici di analisi e di calcolo.

Le tecniche di Ingegneria Naturalistica sinora applicate nel Centro Europa si possono distinguere (*Schiechl H.M., 1992*) nelle seguenti categorie di interventi:

- 1) **di rivestimento** o antierosivi (tutti i tipi di semina, stuoie, materassini seminati, ecc.);
- 2) **stabilizzanti** o di rinforzo radicale del terreno (quali ad es. messa a dimora di arbusti, talee, fascinate, gradonate, cordonate, viminate, ecc.);
- 3) **combinati di consolidamento** o di sostegno (come palificate vive, grate vive rinverdite, muri a secco con talee, cuneo filtrante, gabbionate e materassi verdi, terre rinforzate rinverdite, ecc.)
- 4) **particolari** o per altre funzioni (barriere antirumore e paramassi, opere frangivento, ecc.).

Si tratta, dunque, di effettuare soprattutto la stabilizzazione ed il consolidamento superficiale e profondo e il contemporaneo reinserimento naturalistico di versanti franosi, sistemazioni montane nonché di scarpate e superfici instabili abbinate alla realizzazione e gestione di infrastrutture (strade, ferrovie, cave, opere idrauliche, ecc.), in base ad una esigenza di riqualificazione dell'ambiente ormai universalmente riconosciuta.

A livello nazionale vi è ormai un grosso fermento di acquisizione di strumenti tecnici e normativi nei settori della rinaturalizzazione e dell'Ingegneria Naturalistica, sia da parte dei professionisti, e dei pubblici funzionari, sia da parte delle imprese.

È questo un settore ormai largamente affermato in Italia, sull'esempio del resto d'Europa dove la disciplina vanta ormai molti decenni di anzianità. La società tedesca (*Gesellschaft für Ingenieurbiologie*) opera dal 1980, ma interventi sistematici di Ingegneria Naturalistica vennero realizzati in Austria, Germania e Svizzera già nel dopoguerra.

Il successo raggiunto recentemente in Italia dal settore è dovuto in generale ad una sensibilità generalizzata per i problemi ambientali ed è in particolare collegata all'affermarsi a tutti i livelli amministrativi delle procedure di *Valutazione di Impatto Ambientale*. Gli interventi di Ingegneria Naturalistica, infatti, rientrano nel filone degli interventi di mitigazione che fanno ormai parte integrante delle progettazioni infrastrutturali e del territorio. Semplificando al massimo, difatti, gli Studi di Impatto portano a due ricadute principali:

- 1) di tutela preventiva dei beni ambientali coinvolti dall'opera progettata, mediante selezione dell'alternativa di progetto a minore impatto;
- 2) di mitigazione e compensazione degli impatti residui inevitabilmente connessi con qualsiasi intervento sul territorio.

Questa seconda attività è per buona parte legata alla progettazione degli interventi di “ricucitura” del territorio attraversato, in particolare nei settori infrastrutturali e produttivi (strade, ferrovie, cave, discariche, ecc.) per i quali i metodi dell'Ingegneria Naturalistica forniscono delle notevoli possibilità di abbinamento della funzione tecnica (consolidamento di scarpate) con quella naturalistica di ricostruzione del verde.

Si parla di verde, ma in realtà sarebbe più esatto parlare di ricostruzione di ecosistemi paranaturali riferiti agli stadi della serie dinamica naturale (potenziale) della vegetazione delle aree di intervento. In ciò l'Ingegneria Naturalistica si differenzia dalle normali pratiche di giardinaggio ornamentale o architettonico legate in genere alle zone urbanizzate.

La realtà territoriale italiana è talmente varia da consentire praticamente l'impiego di quasi tutte le tecniche citate. Ciò nonostante, in sede progettuale ed esecutiva andrà effettuato un grosso sforzo di traduzione e adattamento sia per quanto riguarda le specie da impiegare e gli ecosistemi di riferimento, sia di conseguenza per le tecniche ed i materiali.

All'interno del filone dell'Ingegneria Naturalistica si delineano tre principali settori, spesso collegati in sede operativa:

- 1) la “rinaturalizzazione” vera e propria cioè la ricostruzione di biotopi o ecosistemi paranaturali, non collegata ad interventi funzionali anche se talvolta realizzata quale opera “compensatoria”. Ad esempio, la realizzazione di un biotopo umido o di un'area boscata realizzati in zona agricola nell'ambito del progetto di una nuova infrastruttura viaria;
- 2) l'Ingegneria Naturalistica in senso stretto cioè la realizzazione di sistemi antierosivi, stabilizzanti o di consolidamento realizzati con piante vive abbinate ad altri materiali, talvolta alternativi ad opere cosiddette “in grigio” cioè realizzate in calcestruzzo;

- 3) i provvedimenti per la fauna (Wild Life Management), e in particolare quelli per garantire la continuità degli habitat (rampe di risalita per pesci, sottopassi per anfibi, sottopassi e sovrappassi per ungulati ecc.).

### ***Bibliografia Par. 1.1.1***

Bresci, E., & Preti, F. , 2010, An historical survey on the evolution of some forest watershed management techniques (part ii: stream channel works). *Journal of Agricultural Engineering*, 41, 13-22. <https://doi.org/10.4081/jae.2010.3.13>

EFIB , 1996, Statutes of the European Federation of Soil and Water Bioengineering, UBO register, Vienna-Austria [www.efib.org](http://www.efib.org)

Hofmann, A., 1936, *La sistemazione idraulica-forestale dei bacini montani*. UTET, Torino

Preti F., Capobianco V., Sangalli, P., 2022, Soil and Water Bioengineering (SWB) is and has always been a Nature-Based Solution (NBS): a reasoned comparison of terms and definitions, *Ecological Engineering*,

Ruangpan, L., Vojinovic, Z., Sabatino, S. D., Leo, L. S., Capobianco, V., Oen, A. M., ... & Lopez-Gunn, E., 2020, Nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction: A state-of-the-art review of the research area. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(1), 243-270. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-243-2020>

Sangalli, P., Fernandes, J. P., & Tardío, G., 2021, Soil and Water Bioengineering as Natural-Based Solutions. In *Urban Services to Ecosystems* (pp. 317-332). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-75929-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-75929-2_17)

Sauli G., Cornellini P., Preti F., 2005 , *Manuale di Ingegneria Naturalistica. Sistemazione dei versanti*. Volume 3, Capitoli 1-7, Regione Lazio, 223 pages

Thiery E., 1891, *Restauration des montagnes. Correction des torrents. Reboisement*. Baudry

### ***1.1.2 Nuove conoscenze***

Nel corso degli anni 2000 la conoscenza dei processi territoriali che riguardano l'I.N. hanno visto significativi avanzamenti.

Ad esempio, attraverso l'utilizzo di modelli idrologico-idraulici e geotecnici è possibile stimare l'effetto del bosco sui deflussi di piena (ad es. Vazken, 2004; Preti et al., 2011; Hofmann e Preti,

2019; Bathurst et al., 2020) e sulla probabilità di rischio da frana considerando il contributo della vegetazione alla stabilità dei pendii (ad es. Arnone et al., 2016).

Modelli per la stima del rinforzo radicale sono stati sviluppati sempre di più negli anni 2000 migliorando i primi lavori pioneristici di Wu and Waldron (WWM) fino a quelli tipo *Fiber Bundle Model* (Preti, 2006; Schwarz et al. 2013, Mao, 2021), anche su base eco-idrologica (Preti et al., 2010; Gonzalez-Ollauri et al., 2021) e con metodi indiretti non-invasivi (Giambastiani et al. 2021). In Figura 1.3 si può osservare come è possibile stimare l'andamento dell'area radicata alla profondità  $z$ , proporzionale alla coesione aggiuntiva offerta dalle radici. In tal modo è possibile valutare la stabilità dei versanti vegetati, nelle diverse condizioni gestionali (Dani e Preti, 2015), o sistemati con tecniche di Ingegneria Naturalistica (Preti, 2006).

Per l'analisi di stabilità dei versanti un valido strumento ad uso libero è il SSAP - Slope Stability Analysis Program (<https://www.ssap.eu/> ; Borselli et al. 2021), che verrà descritto nel seguito e che è stato di recente adattato per applicazioni di IN. (Boni. 2022)

Attraverso modelli digitali del terreno e modelli della superficie forestale, è possibile infatti determinare l'efficacia protettiva della foresta e analizzare ipotesi gestionali di lungo periodo (e.g. Preti, 2013; Dani e Preti, 2015; Cohen and Schwarz, 2017, van Zadelhoff et al., 2021), con strumenti come SOSlope (<https://www.ecorisq.org/ecorisq-tools>, trattato nel seguito).

In ambiente montano la sistemazione ed utilizzazione dei terreni o la viabilità silvo-pastorale producono effetti significativi sugli assetti idro-morfologici del territorio con conseguenze sui processi erosivi e franosi (Borga et al., 2004; Borga et al., 2005).

L'alterazione dei deflussi idrici da parte delle strade forestali, ad esempio, ha come potenziale conseguenza l'innescò di erosioni superficiali e di fenomeni di dissesto, sia alla scala del singolo segmento stradale sia a quella di versante e di bacino idrografico, con conseguente incremento del livello di pericolosità a cui vengono esposti eventuali insediamenti, infrastrutture ed attività antropiche (Tarolli et al., 2011). È quindi di grande rilevanza poter individuare le aree soggette, o potenzialmente soggette, a tali processi di instabilità ed intervenire o per mitigare il rischio o in modo preventivo per evitarne il manifestarsi in futuro.

Con metodi di analisi basati sulla determinazione di indicatori della concentrazione del deflusso (*flow accumulation*) o di alterazione del deflusso mediante la comparazione dell'area drenata post e pre- alterazione antropica (*relative path index* - RPII), a partire da Modelli Digitali del Terreno (DTM) ad alta risoluzione, è possibile analizzare gli effetti di gradonamento, fossi di guardia, strade forestali e compattazione del suolo dovuta alle utilizzazioni (Borga et al., 2004; Preti, 2020; Cambi et al., 2015; Cambi et al., 2021; Calvani, 2019; Pijil et al., 2020), come rappresentato in Figura 1.4 e Figura 1.5.

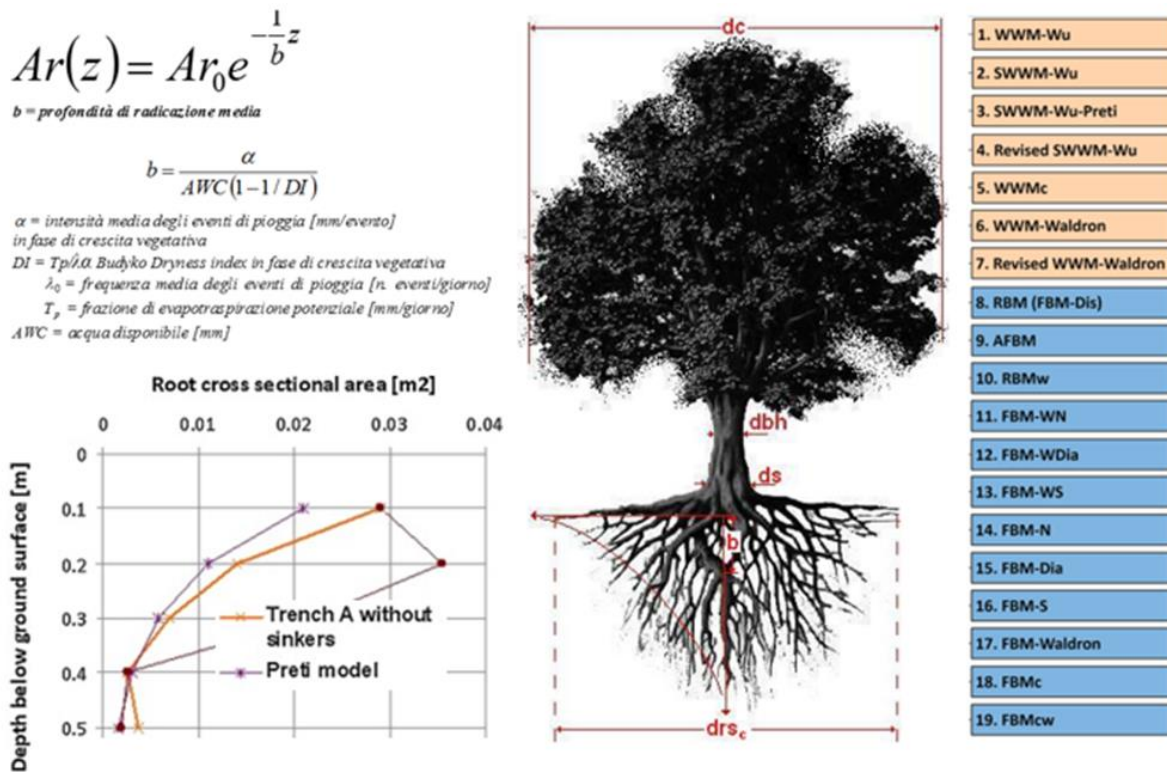


Figura 1.3 A sinistra e al centro: schemi e parametri eco-idrologici e validazione dei modelli per la stima del profilo delle radici ( $Ar(z)$  è l'area radicata alla profondità  $z$ , proporzionale alla coesione aggiuntiva offerta dalle radici) (Preti et al., 2010; Gonzalez-Ollauri et al., 2021); a destra: evoluzione dei modelli di rinforzo radicale (Preti, 2006; Mao, 2021), con notevole sviluppo recente (interesse crescente verso le NBS-Nature Based Solutions).

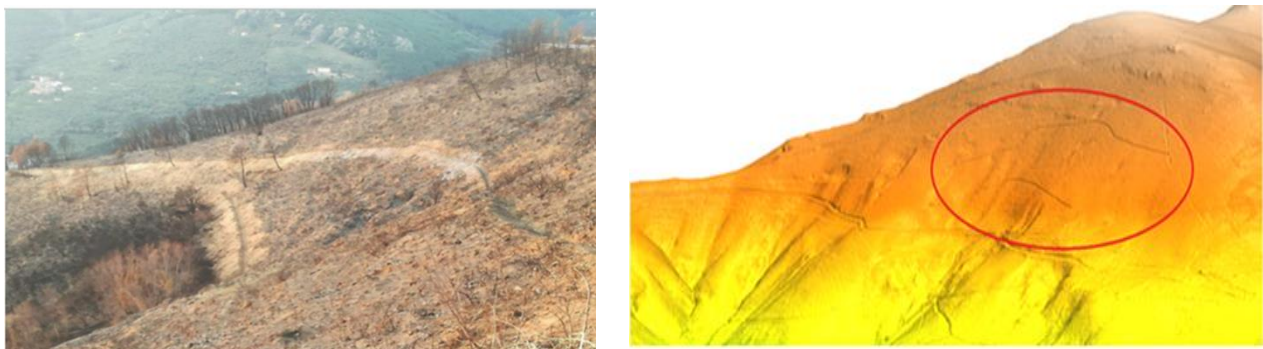
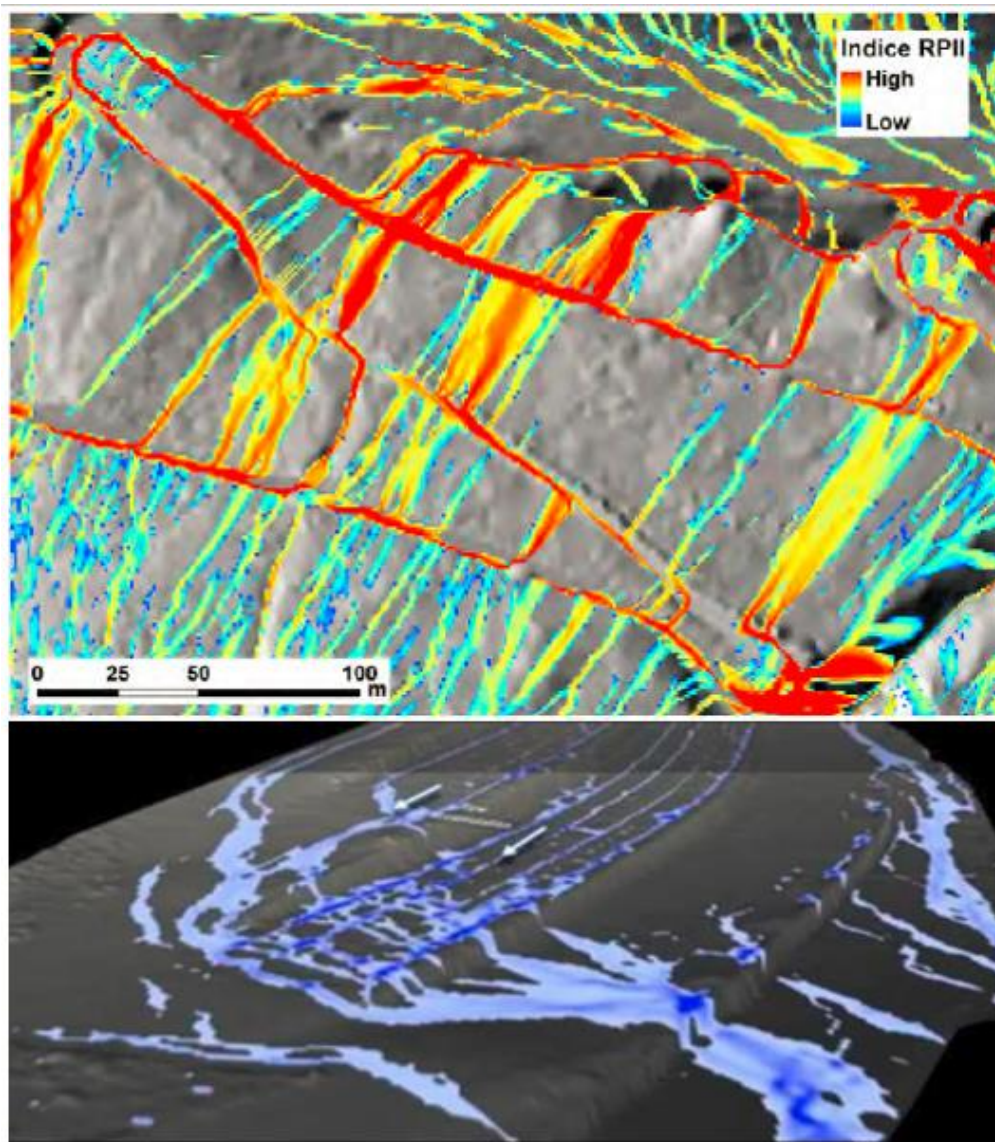


Figura 1.4 A sinistra: fossi di guardia realizzati sui Monti Pisani dalla Regione Toscana per regimare le acque e ridurre l'erosione dopo l'incendio del settembre 2018; a destra: elaborazione del DTM da Lidar per l'analisi modellistica della loro efficacia (Calvani, 2019).



*Figura 1.5 Elaborazioni di DTM per l'analisi modellistica degli effetti della presenza di sentieri o strade forestali e simulazione delle concentrazioni di deflusso ed erosione determinati da gradonamenti o terrazzamenti (modificato da Tarolli et al., 2011 e da Pijil et al., 2020).*

### **Bibliografia Par. 1.1.2**

Arnone, E., D. Caracciolo, L. V. Noto, F. Preti, and R. L. Bras, 2016 - Modeling the hydrological and mechanical effect of roots on shallow landslides, *Water Resour. Res.*, 52, doi:10.1002/2015WR018227.

Boni, 2022, Analisi comparativa di stabilizzazione dei pendii con soluzioni convenzionali, naturali e combinate, Tesi di Laurea Magistrale in ingegneria per la Tutela dell'Ambiente e del Territorio, Scuola di Ingegneria, Università di Firenze



Bathurst, J.C., Fahey, B., Iroumé, A., Jones, J., 2020, Forests and floods: Using field evidence to reconcile analysis methods. *Hydrological Processes*. 2020; 34: 3295– 3310. <https://doi.org/10.1002/hyp.13802>

Borga, M., Tonelli, F., and Salleroni, J. (2004), A physically based model of the effects of forest roads on slope stability, *Water Resour. Res.*, 40, W12202, doi:10.1029/2004WR003238.

Borga, M., Fabrizio Tonelli, Giancarlo dalla Fontana, Federico Cazorzi, 2005, Evaluating the influence of forest roads on shallow landsliding, *Ecological Modelling*, Volume 187, Issue 1, 2005, Pages 85-98, ISSN 0304-3800, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.01.055>

Borselli, L. G., Castelli, G., Secchi, J. M. V., Nsabiyumva, F., Preti, F. Optimal design of terraced landscapes: sensitivity analysis of geomechanical and bio-mechanical parameters, LASOSU 2021, International Forum on Land Degradation, Soil Conservation and Sustainable Development; Session SS7, Dalian, China, 21-23 August 2021,

Cambi, M., Certini G., Neri F., Marchi E., 2015, The impact of heavy traffic on forest soils: A review, *Forest Ecology and Management*, Volume 338, 2015, Pages 124-138, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>.

Cambi, M.; Giambastiani, Y.; Giannetti, F.; Nuti, E.; Dani, A.; Preti, F. Integrated Low-Cost Approach for Measuring the State of Conservation of Agricultural Terraces in Tuscany, Italy. *Water* 2021, 13, 113. <https://doi.org/10.3390/w13020113>

Calvani, S., 2019, Alterazione dei processi idrologici ed erosivi a seguito di incendio sui Monti Pisani e monitoraggio della funzionalità degli interventi di salvaguardia a scala di versante, Tesi di Laurea Magistrale, Università di Firenze. a.a. 2018-19

Dani A., Preti F., 2015 – Evoluzione temporale della stabilità di versante a seguito di trattamenti selvicolturali. in: *Atti del II Congresso Internazionale di Selvicoltura. Progettare il futuro per il settore forestale*, Firenze, 26-29 novembre 2014. Firenze: Accademia Italiana di Scienze Forestali. Vol. 1, p. 469-475. ISBN 978-88-87553-21-5. <http://dx.doi.org/10.4129/2cis-ad-evo>

Di Tella G., 1910 - Il bosco contro il torrente. Milano, T. C. I.

Falciai M, Ghinassi G, Trucchi P., 2001 - Deflussi superficiali stagionali da un ceduo di faggio sottoposto a trattamenti selvicolturali. *Quaderni di Idronomia Montana*.

Giacomin A, Trucchi P., 1992 - Rainfall interception in a beech coppice (Acquerino, Italy). *Journal of Hydrology* 137: 141-147. - doi: 10.1016/0022-1694(92)90052-W.

Giambastiani, Y., A. Errico, F. Preti, E. Guastini, G. Censini, 2021, Indirect root distribution characterization using electrical resistivity tomography in different soil conditions, *Urban Forestry & Urban Greening*, 127442, ISSN 1618-8667, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127442>.

Gonzalez-Ollauri, A., Hudek, C., Mickovski, S. B., Viglietti, D., Ceretto, N., & Freppaz, M. (2021). Describing the vertical root distribution of alpine plants with simple climate, soil, and plant attributes. *Catena*, 203 doi:10.1016/j.catena.2021.105305

Hofmann A.A., 2011 – Il bosco dopo l'Unità d'Italia. La difesa dell'assetto idrogeologico: dal vincolo della prima legge forestale del 1877 alla riforma del r.d. 3267/1923. *Atti del Convegno "L'evoluzione giuridica della tutela del bosco dall'Unità d'Italia ai giorni nostri"*, Firenze Castello, Villa Medicea La Pietraia, 10 settembre 2011. [www.agronomiforestalifi.it/Documenti/atti\\_10\\_09\\_2011-v.02.pdf](http://www.agronomiforestalifi.it/Documenti/atti_10_09_2011-v.02.pdf): p.10-21 di 42.

Hofmann A.A., Preti F., 2019, Politiche di promozione del potere regimante del bosco, *Quaderno CESBIM n. 5 Il ruolo della copertura forestale dei versanti nella mitigazione del rischio idraulico e idrogeologico*

Iovino F., 2017 - Gestione forestale e tutela dal dissesto idrogeologico nei territori montani, *Georgofili*. [www.georgofili.it/detail.asp?IDN=1647&IDSezione=4](http://www.georgofili.it/detail.asp?IDN=1647&IDSezione=4).

Iovino F, Borghetti M, Veltri A, 2009 - Foreste e ciclo dell'acqua. *Forest@* 6: 256-273 [online: 2009-06-30] URL: <http://www.sisef.it/forest@/>.

Mao, Z. (2022). Root reinforcement models: Classification, criticism and perspectives. *Plant and Soil*, doi:10.1007/s11104-021-05231-1

Pijl, A., Reuter L.E.H., Quarella E., Teun A., Vogel, T.A., Paolo Tarolli, P., 2020, GIS-based soil erosion modelling under various steep-slope vineyard practices, *CATENA*, Volume 193, 2020, 104604, ISSN 0341-8162, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104604>

Preti F. et al., 2002, L'idea PAST – Presidio Ambientale e Socio-economico del Territorio, *Atti del Convegno Nazionale del C.N.R. "La Difesa della Montagna"*, Assisi, 11-12 dicembre 2002

Preti F., 2006. Stabilità dei versanti vegetati. in: Sauli G, Cornellini Preti F., (eds). *Manuale 3 Ingegneria Naturalistica Sistemazione dei versanti*. Regione Lazio (in Italian), Cap. 10, pp. 137–168

Preti, F., Dani, A., Noto, L. V., & Arnone, E. (2022). On the Leonardo's rule for the assessment of root profile. *Ecological Engineering*, 179 doi:10.1016/j.ecoleng.2022.106620

Preti, F., Dani, A., and Laio, F., 2010. Root profile assessment by means of hydrological, pedological and above-ground vegetation information for bio-engineering purposes. *Ecological Engineering*, 36, 305-316.

Preti, F., Forzieri, G., Chirico, G.B., 2011 - Forest cover influence on regional flood frequency assessment in Mediterranean catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 3077–3090, <http://dx.doi.org/10.5194/hess-15-3077-2011> [www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/3077/2011](http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/3077/2011).

Preti F., 2013 - Forest protection and protection forest: Tree root degradation over hydrological shallow landslides triggering. *Ecological Engineering* 61P : 633– 645.

Preti, F., 2020, Il territorio terrazzato: punti di forza e criticità, atti del Convegno “Il Futuro dei terrazzamenti sul territorio del Montalbano tra criticità e sviluppo”, Villa medicea di Cerreto Guidi, febbraio 2020

Piussi P. e Puglisi F., 2012 - Copertura forestale e Franosità, Accademia Nazionale dei Lincei, XII Giornata Mondiale dell'Acqua, incontro – dibattito, Cosa non funziona nella difesa dal rischio idrogeologico nel nostro paese? Analisi e rimedi, Roma, 23 marzo 2012.

Puglisi S., 1996 - Introduzione alla Sessione Le Scienze Forestali contro le alluvioni, in Atti del Convegno scientifico in occasione del trentennale dell'alluvione di Firenze, a cura di M. Falciai e F. Preti.

Tarolli, P., S. Calligaro, F. Cazorzi, G. Dalla Fontana, 2011, L'alterazione dei deflussi idrici superficiali da parte dei segmenti viari e dei sentieri: l'efficacia della topografia ad alta risoluzione, Convegno di Medio Termine dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria, Belgirate, 22-24 settembre 2011

Schwarz, M., Giadrossich, F., & Cohen, D. (2013). Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(11), 4367-4377.

Tardío G., Alejandro González-Ollauri, Slobodan B. Mickovski, 2016. A non-invasive preferential root distribution analysis methodology from a slope stability approach, *Ecological Engineering*, 97, 46-57, issn 0925-8574, doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.08.005

Vazken A., 2004 - Waters and forests: from historical controversy to scientific debate- Journal of Hydrology, 291: 1–2.

van Zadelhoff, F. B., Albaba, A., Cohen, D., Phillips, C., Schaepli, B., Dorren, L. K. A., & Schwarz, M. (2021). Introducing SlideforMap; a probabilistic finite slope approach for modelling shallow landslide probability in forested situations. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 1-33.

### 1.1.3 Deontologia Professionale

Come in tutte le discipline, anche nell'Ingegneria Naturalistica si stanno affermando alcune regole comportamentali di riferimento per i professionisti, i funzionari e gli imprenditori che si occupano degli interventi di I.N.

Si riportano in tal senso, in estratto, alcuni articoli del *Codice Deontologico dell'Associazione Italiana per l'Ingegneria Naturalistica AIPIN*<sup>1</sup>.

#### *Premessa*

Il termine Ingegneria Naturalistica viene inteso come equivalente del tedesco “*Ingenieurbiologie*”.

Per Ingegneria Naturalistica si intende la disciplina tecnico-Naturalistica che utilizza:

- tecniche di rinaturalizzazione finalizzate alla realizzazione di ambienti idonei a specie o comunità vegetali e/o animali;
- le piante vive, o parti di esse, quali materiali da costruzione, da sole o in abbinamento con altri materiali;
- materiali, anche solo inerti, infrastrutture ed altri provvedimenti volti a fornire condizioni favorevoli alla vita di specie animali.

Vengono impiegati i termini: “Ingegneria” in quanto si utilizzano dati tecnici e scientifici a fini costruttivi, di consolidamento ed antierosivi; “Naturalistica” in quanto tali funzioni sono legate ad organismi viventi, in prevalenza piante di specie autoctone, con finalità di ricostruzione di ecosistemi tendenti al naturale ed all’aumento della biodiversità.

[...]

#### *Principi di base*

*Art. 4* Il socio AIPIN si adopera in tutte le sedi e in particolare in quella progettuale per la priorità delle finalità naturalistiche degli interventi. L’impiego di tecnologia e materiali non naturali è possibile nei casi di necessità strutturale e/o funzionale normalmente in abbinamento con

---

<sup>1</sup> CODICE DEONTOLOGICO E FORME DI TUTELA PROFESSIONALE DELL'ASSOCIAZIONE ITALIANA PER L'INGEGNERIA NATURALISTICA (Approvato dall'Assemblea generale ordinaria del 21 febbraio 1997)

materiale vivente. Deve comunque essere adottata la tecnologia meno complessa a pari risultato, considerando anche l'ipotesi del non intervento.

Art. 5 Il socio AIPIN deve agire sempre con integrità scientifica, diligenza ed onestà riconoscendo nella caratterizzazione interdisciplinare dell'I.N., i limiti della propria competenza professionale, ricorrendo all'altrui competenza nelle attività professionali che la richiedono. In tali casi deve risultare chiaramente l'apporto di ciascuno.

[...]

Vale il principio di adottare nelle scelte di progetto le tecniche a minor livello di energia (complessità, tecnicismo, artificialità, rigidità, costo) a pari risultato funzionale / biologico come rappresentato per maggior chiarezza nello schema che segue (Figura 1.6).

Va da sé che nelle aree protette devono essere impiegate solo specie autoctone e materiali naturali o biodegradabili. Si ammette l'uso di materiali artificiali solo per la soluzione di problemi geotecnici ed idraulici per la protezione diretta di infrastrutture o insediamenti.

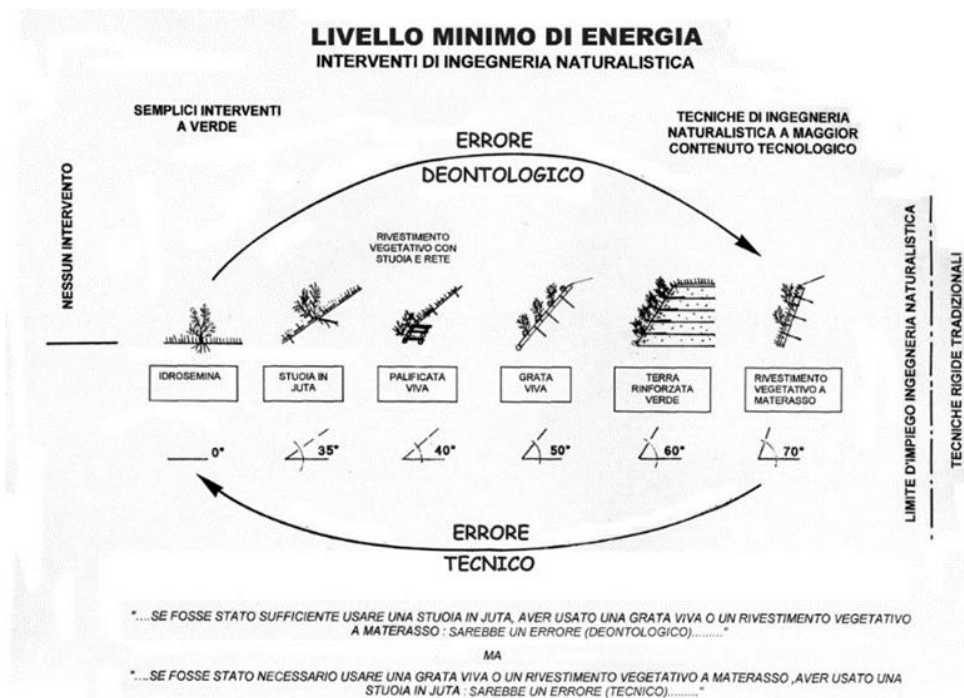


Figura 1.6 Livello minimo di energia.

Nelle aree agricole, di parchi e giardini, urbane, industriali è invece ammesso l'uso di specie naturalizzate anche se è sempre preferibile usare le specie autoctone. L'uso dei materiali è indifferente.

Per quanto riguarda, infatti, la selezione delle specie e dei materiali da impiegare nelle tecniche di I.N., il concetto generale è quello di utilizzare il più possibile materiali naturali e specie autoctone. L'Associazione Italiana per l'Ingegneria Naturalistica (AIPIN), data la complessità e molteplicità delle situazioni in cui vengono spesso a trovarsi i professionisti del settore, ha fatto un tentativo di schematizzare la graduatoria di preferibilità e liceità di impiego di specie e materiali nei vari possibili ambiti territoriali di impiego (Tabella 1.1).

Tabella 1.1\_ Preferibilità/liceità d'impiego dei materiali vivi e morti per le tecniche di Ingegneria Naturalistica<sup>2</sup>.

|   |   | PIANTE                  |     |   | MATERIALI UTILIZZABILI  |    |    |                  |
|---|---|-------------------------|-----|---|-------------------------|----|----|------------------|
|   |   | ← NATURALITA' CRESCENTE |     |   | ← NATURALITA' CRESCENTE |    |    |                  |
| 1 | 2 | 3                       | 4   | 5 | 6                       | 7  | 8  |                  |
|   |   |                         |     |   |                         |    |    | PIANTE AUTOCTONE |
|   |   | AREE PROTETTE           | XXX | - | -                       | XX | XX | -1               |
|   |   | AREE NATURALI           | XXX | - | -                       | XX | XX | X                |
|   |   | AREE AGRICOLE           | XX  | X | -                       | XX | XX | X                |
|   |   | PARCHI E GIARDINI       | XX  | X | X                       | X  | X  | X                |
|   |   | AREE URBANE             | XX  | X | X                       | X  | X  | X                |
|   |   | AREE INDUSTRIALI        | XX  | X | X                       | X  | X  | X                |

XXX

*Impiego esclusivo*

XX

*Impiego preferenziale*

X

*Impiego in funzione delle scelte progettuali*

-

*Incompatibilità assoluta*

(1)

*Utilizzo solo per la soluzione di problemi geotecnici ed idraulici per la protezione diretta di edifici o infrastrutture esistenti*

<sup>2</sup> Nelle categorie "materiali: naturali, biodegradabili, artificiali" si fa riferimento a quelli strutturali e non ai componenti (es. chiodo in ferro acciaioso nella palificata viva in legno).

## **1.2 EVOLUZIONE STORICA DELLE TECNICHE DI INGEGNERIA NATURALISTICA (G. Pirrera, L. M. Ferrara)**

### **1.2.1 Introduzione: i padri dell'Ingegneria Naturalistica**

Il termine Ingegneria Naturalistica viene inteso in origine come l'equivalente del tedesco "Ingenieurbiologie", e in inglese "Soil Bioengineering". La definizione classica è quella di una "disciplina tecnico-naturalistica che utilizza le piante vive autoctone, o parti di esse, come materiale da costruzione, da sole o in abbinamento a materiali inerti tradizionali e non". Sebbene sin da tempi antichi l'uomo si sia avvalso dell'utilizzo di questo tipo di materiali per diverse funzioni, soltanto verso gli inizi degli anni '90 si è cercato di trasporre questo tipo di conoscenze all'interno di un approccio più scientifico ed ingegneristico per una materia che altrimenti appariva quasi un ossimoro. Il padre dell'Ingegneria Naturalistica come disciplina scientifica, Hugo Meinhard Schiechl (1922-2002) (Figura 1.7), botanico e pittore di piante austriaco, ha gettato quindi le basi per un approccio che superasse le diffidenze per una materia altrimenti intesa come strettamente empirica. Questo grazie alla sua pluriennale attività di ricerca e progettazione nei campi della geobotanica, della ricostruzione dei torrenti di montagna, delle scarpate distrutte da frane e valanghe, ma anche della gestione del paesaggio e della conservazione della natura. La sua esperienza, unita a quella del naturalista sudtirolese Florin Florineth (Figura 1.7), che ne ha raccolto poi l'eredità scientifica e didattica in Austria quale oggi Professore emerito dell'Università di Vienna BOKU, ove ha fondato e diretto l'Istituto di Ingegneria Naturalistica, sono state di fondamentale importanza nel definire e classificare le tecniche "tradizionali" di bioingegneria del suolo.



*Figura 1.7 Florin Florineth (a sinistra) ed Hugo Schiechl (a destra).*

Le tecniche sono basate sulla gestione del suolo e delle foreste, con particolare riguardo alla gestione delle piante autoctone e alloctone, pensate ad un tempo come risorsa naturale in termini di biodiversità e come materiale vivo o morto di cui servirsi per rafforzare la dominanza delle specie autoctone, per stabilizzare terreni, aree boschive o fluviali, e ancora per costruire attrezzature usufruibili da parte

dell'uomo. Instancabile ricercatore, tra le tante pubblicazioni, la più nota è il libro “Piante al posto del cemento” adottato in molte Università europee.

In Italia il contributo fondamentale è stato quello di Giuliano Sauli (Figura 1.8), botanico triestino prematuramente scomparso nel 2019 e fondatore dell'AIPIN, il quale, dopo gli incontri con Florineth e Schiethcl, si è rivelato un instancabile divulgatore della necessità di utilizzare le capacità biotecniche delle piante per interventi di difesa del suolo e di sistemazioni idraulico-forestali.

La sua visione multidisciplinare associava quindi le esigenze tecniche per mitigare il dissesto idrogeologico a quelle di riqualificazione e valorizzazione del paesaggio naturalistico. Ma la storia dell'AIPIN si fonda, pur derivando dalle tecniche di ingegneria forestale riportate e ricordate da Salvatore Puglisi, professore di idraulica dell'Università di Bari, su un'altra figura di rilievo nell'ambito dell'Ingegneria Naturalistica: Gioacchino Lo Re (Figura 1.8), architetto e urbanista dell'Università di Palermo, scomparso nel 2018 e cofondatore dell'Associazione. Egli era particolarmente attento ai temi del paesaggio e della pianificazione strategica. Un antesignano della considerazione secondo cui l'Ingegneria Naturalistica è uno strumento utile per il miglioramento della Qualità del Paesaggio. Alla sua memoria è stato così istituito nel 2009 dall'AIPIN (Associazione Italiana Per l'Ingegneria Naturalistica) il “*Premio Gino Lo Re per la Qualità del Paesaggio Mediterraneo*”, divenuto internazionale dalla V edizione e che si è affiancato al “Premio Hugo Schiethcl di Ingegneria Naturalistica”.

Al passo con l'avanzamento tecnologico, le tecniche di Ingegneria Naturalistica si sono evolute nel corso del tempo. Contributo importantissimo in senso più attento alla vegetazione è quello di Bernard Lachat (Figura 1.8), biologo ed ecologo svizzero del cantone Jura, tra i massimi esperti europei nella rinaturalizzazione dei corsi d'acqua ideatore della “*génie végétal*”, ossia tutto quell'insieme di tecniche che unendo conoscenze provenienti dalla botanica, dalla meccanica del suolo e dall'idraulica, tentano di assumere un approccio quanto più naturale possibile alle questioni dell'erosione del suolo e della stabilizzazione di sponde e argini.





*Figura 1.8 Giuliano Sauli (a sinistra) e Gioacchino Lo Re (al centro) Bernard Lachat (a destra).*

### ***1.2.2 La spinta verso l'I.N. 2.0 e la SWB, Soil & Water Bioengineering***

Già nel novembre del 2020 si sente l'esigenza di raccogliere l'eredità di Giuliano Sauli con la consapevolezza che si potesse andare oltre (I.N. 2.0) la messa in sicurezza dei siti a rischio idrogeologico con le tecniche "classiche". La definizione della materia si arricchisce aggiungendo a "disciplina tecnico-naturalistica che utilizza le piante vive autoctone, o parti di esse, come materiale da costruzione, da sole o in abbinamento a materiali inerti tradizionali e non" *"per la riqualificazione di ecosistemi degradati per cause naturali o antropiche, favorendo la dinamica dei processi naturali (vegetazionali e/o morfologici) per la conservazione e l'aumento della biodiversità"*. La materia guardava già più attentamente alle acque ed infatti in campo internazionale era già più modernamente definita SWB: *Soil and Water Bioengineering*).

Non a caso nel 2020 è stato istituito il Premio Internazionale di Ingegneria Naturalistica "Giuliano Sauli" per premiare enti o professionisti che si sono particolarmente distinti nello sviluppo e la promozione della materia. E, non a caso, la prima edizione annovera tra i premiati proprio Florin Florineth e Bernard Lachat ed anche Paola Sangalli (Figura 1.9), biologa e paesaggista italiana residente in Spagna, vicepresidente AEIP (*Asociación Española de Ingeniería del Paisaje*) e della EFIB (*European Federation Bioengineering*), fautrice di questa nuova visione di SWB che si allarga al paesaggio e alla partecipazione social ed anche geograficamente oltre oceano, soprattutto in America Latina.



Figura 1.9 Paola Sangalli.

L'Ingegneria Naturalistica che ricade nella ampia categoria delle *NBS (Nature Based Solutions)*, permette inoltre l'implementazione dei servizi ecosistemici e il rafforzamento del Capitale Naturale. L'approccio contemporaneo si evolve da questi studi, e tende ad elaborare le *NBS, Nature Based Solutions*, ossia delle “azioni mirate alla protezione, alla gestione sostenibile e al restauro di ambienti naturali e alterati, che affrontino con efficienze e flessibilità le questioni sociali, procurando allo stesso tempo benefici per l'uomo e per l'ambiente in termini di biodiversità” (IUCN, 2006). L'Ingegneria Naturalistica rientra a pieno titolo tra quelle che sono *NBS*, ma, al contempo, amplia gli orizzonti applicativi di quanto in origine era vocata principalmente alla difesa idrogeologica. Oggi le declinazioni delle tecniche di SWB, in quanto *NBS*, sono sempre più di ampio respiro, permettendo una efficiente risoluzione delle problematiche di gestione agricola o anche del recupero delle cave dismesse e aree degradate.

Altro concetto da tenere in considerazione è quello dell'**economia circolare**.

In tal senso alcune tecniche più tradizionali contemplavano già l'impiego di materiali locali, anche vegetali, o di riutilizzo, ad esempio fiorume, fascine, trapianto zolle, talee, alberi grezzi, suolo locale. Oggi la tendenza delle nuove tecniche di SWB è quella di riutilizzare quanto più possibile quello che la natura offre, dando anche una nuova destinazione a quelli che sono considerati scarti o rifiuti da smaltire.



Figura 1.10 Esempio di dicotomia dell'IN: Utilizzo di legname scortecciato, di difficile reperibilità specialmente in ambito mediterraneo, all'impiego di legname irregolare da recupero in loco.

La Figura 1.11 mostra la dicotomia dell'IN: da una parte l'utilizzo di legname scortecciato e trattato, costoso e di difficile reperibilità specialmente in ambito mediterraneo; dall'altra l'esigenza di economia circolare che induce all'impiego di legname irregolare da recupero in loco sfruttando degli interventi di manutenzione del bosco. Peraltro, la durabilità del legno è in genere ben superiore alle necessità del consolidamento garantite dagli apparati radicali per le opere di I.N. ben realizzate. L'economia circolare viene tradizionalmente applicata nell'Ingegneria Naturalistica nelle tecniche di controllo dell'erosione, di drenaggio e di stabilizzazione e che utilizzano fiorume, fascine, trapianti di zolle, talee ed alberi grezzi. In pratica nel rispetto dei Goals 2030 dell'ONU e guardando ai servizi ecosistemici.



Figura 1.11 Tendenza all'economia circolare e nuove tecniche di SWB che prevedono il riutilizzo di materiali di scarto, sia organici che inerti

Una tra le ultime frontiere è il riuso di materiale organico di scarto per la creazione di **tecnosuoli**. Si tratta di suoli che derivano dalla miscela di più componenti opportunamente trattate, quali scarti di vegetazione, biomassa piaggiata, terre di scavo, etc. per l'impiego in aree degradate e povere di suolo

Lo schema di seguito riportato (Figura 1.12) mostra l'evoluzione storica dell'Ingegneria Naturalistica in 3 fasi per effetto della presa di consapevolezza che occorre ragionare in termini di NBS.

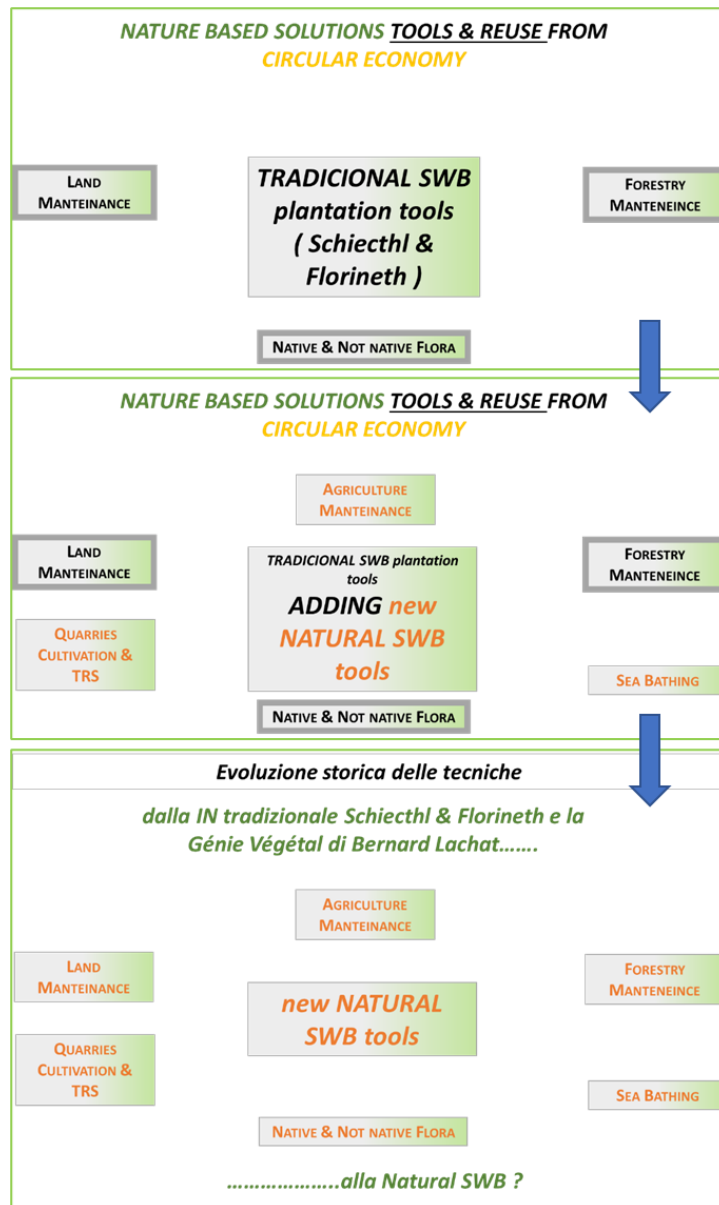


Figura 1.12 Evoluzione storica dell'Ingegneria Naturalistica.

Nella prima fase, quella di fondazione dovuta a Schiechtl e perseguita da Florineth, gli ambiti applicativi erano inizialmente legati alla conservazione del suolo e delle aree boschive, con l'impiego di specie preferibilmente autoctone con tolleranza per quelle non native, purché avessero caratteristiche biotecniche adeguate, e materiali anche non naturali. È il momento chiave della divulgazione e della consapevolezza sviluppata attraverso la basilare era dei manuali ad opera soprattutto di Giuliano Sauli, Federico Preti e Paolo Cornelini.

Nella seconda, che potremmo dire di transizione, grazie allo stesso Florineth e con le maggiori influenze internazionali (in “arancio”) ad opera della nuova guida EFIB, ci si è aperti ad altri settori in cui entrasse maggiormente l’interesse verso la *bioremediation* (acque e suoli), scarti di vegetazione, mare, paesaggio e partecipazione sociale.

Nella terza fase propria di, questa di I.N. 2.0 e della ormai maturata Soil & Water Bioengineering, tutto diviene “arancio”, anche i settori tradizionali.

### ***1.2.3 Il Riuso di materiali del luogo nella tradizione italiana e austriaca***

Sin dalle prime produzioni della materia, le tecniche di I.N. prevedevano il riuso di materiali del luogo a dimostrazione che non sempre è necessario utilizzare legno di qualità.

Dai testi di Schiechtl, e successivamente di Florineth ritroviamo ben 15 tecniche:

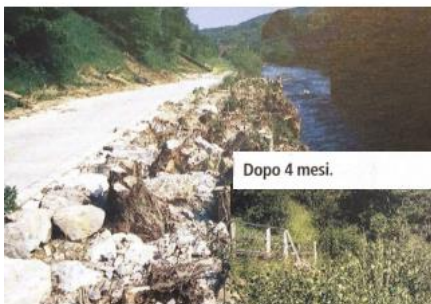
- 1) Talee e astoni
- 2) Scogliere spondali
- 3) Murature ciclopiche
- 4) Pennelli e altri interventi fluviali
- 5) Fascine
- 6) Copertura diffusa
- 7) Piantagioni di Elofite cespi rizomi,
- 8) Trapianti di zolle
- 9) Riuso ceppaie
- 10) Alberi grezzi
- 11) Recinzione di interrimento
- 12) Drenaggio con ramaglia
- 13) Consolidamento di fossi e di solchi
- 14) Cespugliamento solchi con ramaglia
- 15) Cespugliamento di solchi e fossi con opere trasversali

Alcuni esempi:



Figura 1.13 Recinzione di interrimento fonte Florineth F. (2007).

Ceppaie vive per la riqualificazione di una sponda, appena ultimata, nel cantiere sperimentale lungo il torrente Vienna.



Dopo 4 mesi.



Inserimento di ceppaie come elemento di strutturazione della sponda, lungo il torrente Liesing presso Kledering/Bassa Austria.



Figura 1.14 Uso di ceppaie fonte Florineth F. (2007).

L'I.N. può essere utilizzata anche a fini di incremento della biodiversità: un caso faunistico particolare esempio è quello del riuso delle ceppaie sviluppato è quello nell'Oasi WWF Bosco di Vanzago dove sono stati usate piantandole al rovescio, “a fungo”, le ceppaie per creare delle mini-isole in acqua a beneficio dell'avifauna.



Figura 1.15 A sinistra, cespugliamento solchi con ramaglia viva e morta presso Campo (Canton Ticino, Svizzera). I solchi sono dei fossi di dimensioni ridotte, profondi e larghi fino ad 1 metro. Fonte Florineth F. (2007) A destra, consolidamento di solchi minori mediante la palizzata viva. Intervento sulla frana di Thankot in Nepal dopo due mesi dall'ultimazione. Fonte Florineth F. (2007)



Figura 1.16 Alberi grezzi utilizzati anche come opere di difesa spondale. In foto un esempio nel greto del torrente Vizze presso San Giacomo (Alto Adige). Fonte Florineth F. (2007).



Figura 1.17 Tronchi e legname in loco da impiegare per il contenimento dei fenomeni di dissesto idrogeologico- Parco dei Monti Sibillini (2021).

A queste tecniche di piena economia circolare che si associano ad approvvigionamenti di materiali derivanti dalla manutenzione di ciò che si ritrova nell'intorno dell'opera, la materia divulgava l'utilizzo di legname di qualità e diametro consistente per le tradizionali opere di consolidamento (palificate vive) e di stabilizzazione (grata viva). Tuttavia, le stesse opere sono state realizzate (es: Santo Stefano di Quisquinia) utilizzando legno non trattato con risultati comunque buoni.

#### ***1.2.4 La spinta più naturalistica***

Con Bernard Lachat si adotta una visione che, al riuso di materiali del luogo, aggiunge delle regole molto rigorose dal punto di vista naturalistico che possono così sintetizzarsi:

1) Prevalenza delle piante:

- Uso esclusivo delle autoctone e lotta alle invasive.

2) Abbandono di geometrie ingegneristiche.

3) Solo scavi (ad esempio Scavi fuori alveo a scacchiera romboidale per rinaturalizzare canali).

4) Riuso materiali organici.

5) Riuso pietra:

- muri a secco;
- scogliere spondali e murature ciclopiche;
- pennelli e altri interventi fluviali.

6) Riuso piante del sito:

- fascine, copertura diffusa;
- piantagioni di elofite, cespi rizomi zolle;
- talee (origine I.N.);
- stratificazione e margotte;
- pettini e pigne;
- fascine di elofite.



Alcuni esempi di tecniche meno diffuse nella tradizione:

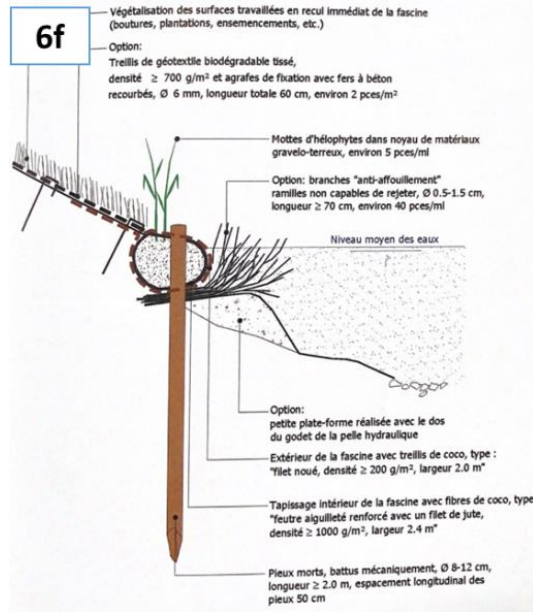


Figura 1.18 Fascine di elofite\_Tecniche e dettagli costruttivi. Fonte Lachat B.

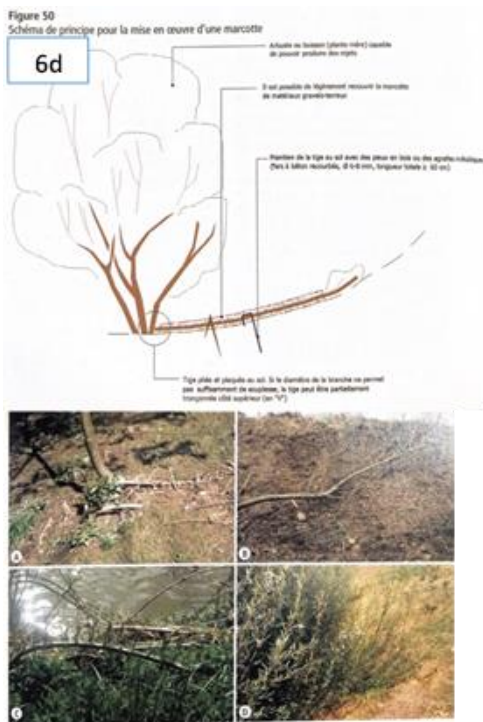


Figure 52 Peigne végétal en cours de finition (image de gauche, novembre 1984) et développement végétal du même ouvrage sept ans après (image de droite, juin 1991)

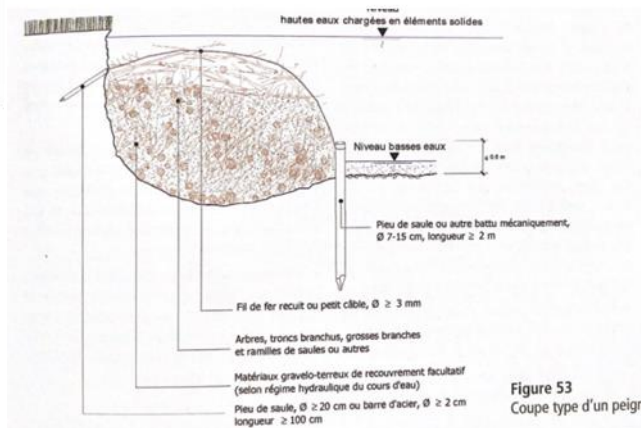


Figure 53 Coupe type d'un peigne

Figura 1.19 Stratificazioni con margotte\_Tecniche e dettagli costruttivi. Fonte Lachat B.

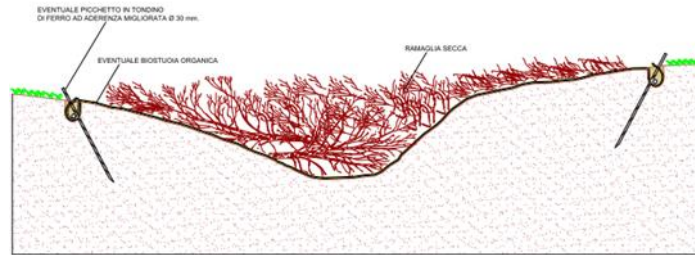


Figura 1.20 Pettini e Pigne.

### 1.2.5 Le quattro macro-famiglie del riutilizzo nelle tecniche d'Ingegneria Naturalistica

A partire dagli insegnamenti dei maestri europei oggi possiamo individuare i seguenti 4 famiglie gruppi di riuso riguardanti:

- 1) Riuso di materiali organici
- 2) Riuso di specie autoctone ed anche con estrema attenzione di quelle alloctone
- 3) Riuso di rifiuti antropici e del sito
- 4) Nuove Tecniche e innovazioni.

#### FOUR FAMILIES



Figura 1.21 Le quattro famiglie.

#### 1.2.5.1 Riutilizzo di materiali organici di scarto

##### **Hydromulching con *Posidonia oceanica* spiaggiata**

Rivestimento di superfici estese più o meno acclivi su terreni molto poveri di sostanza organica a granulometria variabile, mediante spargimento per via idraulica di una apposita miscela formata da acqua, collanti ed alti tenori di sostanza organica, suolo o tecnosuolo. L'hydromulching si prevede soprattutto per le aree più povere di suolo.

Si rimanda al paragrafo 0 su Tecnosuoli.



Figura 1.22 Residui di *Posidonia oceanica* spiaggiata (Parco Portella del Cerriolo, Custonaci 2014).

### **Biorulli con potatura di viti e ulivi**

I biorulli sono da considerarsi un'evoluzione della fascina; realizzate con materiale vegetale di recupero (come sarmenti di vite e ulivo), materiale da taglio da potature, materiale eroso e intasate con humus di lombrico e pre-seminate con semi da germoplasma locale. Si realizzano avvolgendoli in un telo di rete di fibre naturali, provenienti da potature di viti e/o ulivi e poi ricoperti da terra. Nel caso specifico mostrato in figura è stato impiegato un tecnosuolo prodotto in loco a partire dal riutilizzo di FOS (Frazione Organica Stabilizzata) di *Posidonia oceanica*.

È importante sottolineare che da questa tecnica sono derivate le Rotoballe che recentemente hanno vinto un Award EcoTechGreen per il Progetto RiVite.

Si rimanda al paragrafo su Tecnosuoli.



Figura 1.23 Realizzazione di biorulli, posa in opera e successivo inverdimento. (Parco Portella del Cerriolo, Custonaci 2014).

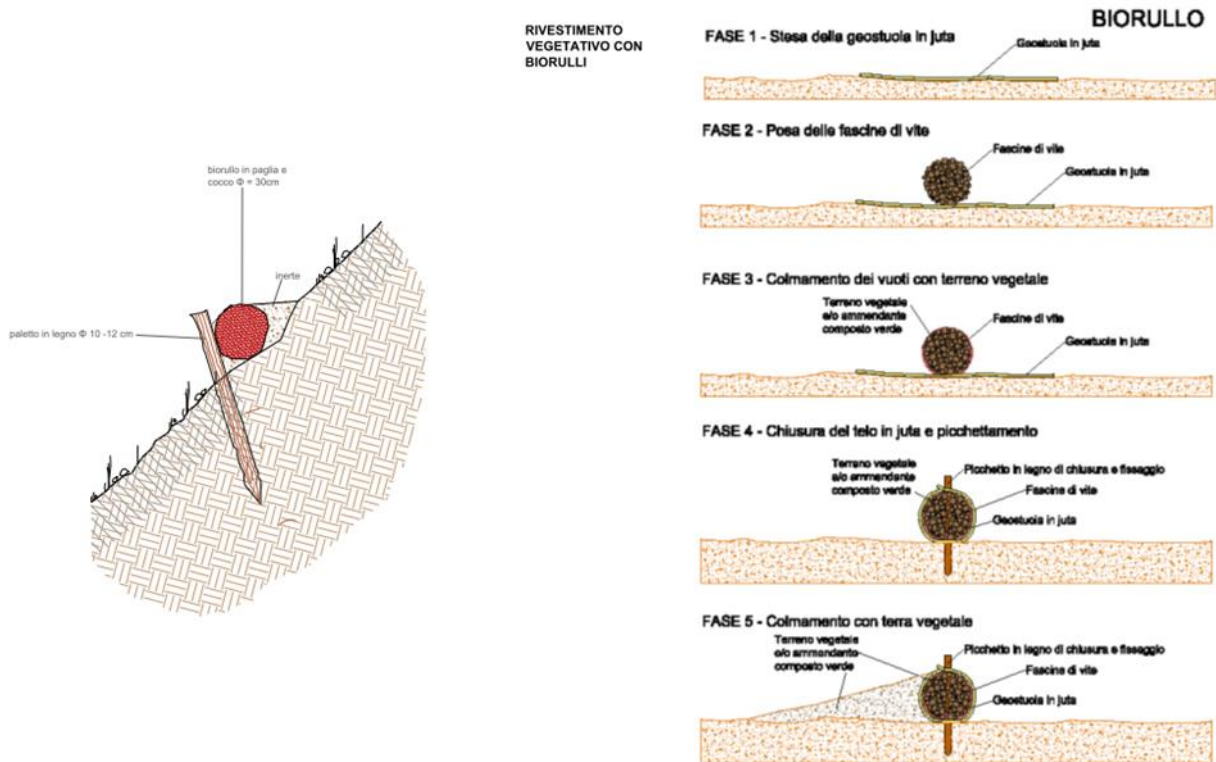


Figura 1.24 Biorulli.

### Riutilizzo di tronchi d'albero

Ripresa ed efficientamento di una tecnica tradizionale, quale la palificata, utilizzando niente di più che tronchi legnosi impilati come sostegno strutturale. Tale tecnica naturalmente è da impiegare in modo appropriato al sito di realizzazione.



Figura 1.25 Riutilizzo di tronchi (Monte Pellegrino, Palermo, 2021).

### Alberi per il consolidamento fluviale e dei pendii

Stabilizzazione di solchi e frane mediante il cespugliamento di alberi grezzi da taglio, e potature di fronde, che vengono poste a dimora singolarmente, a fascine. Gli alberi dovranno essere legati e/o picchettati con paletti in ferro, o legno, con diametro inferiore a 12 cm e lunghi almeno 1,5m, e posti con fronde e punta verso valle. È preferibile coprire la ramaglia messa a dimora con terra, proveniente

dallo stesso sito; il riempimento dovrà procedere dal basso verso l'alto dovendo ben incastrare la punta dell'albero nell'albero precedente.



Figura 1.26 Oasi di Piana degli Albanesi, 2007 - Foto Pirrera (a sinistra), Oasi Fluviale del Morello, 2007 - Foto Pirrera (a destra).

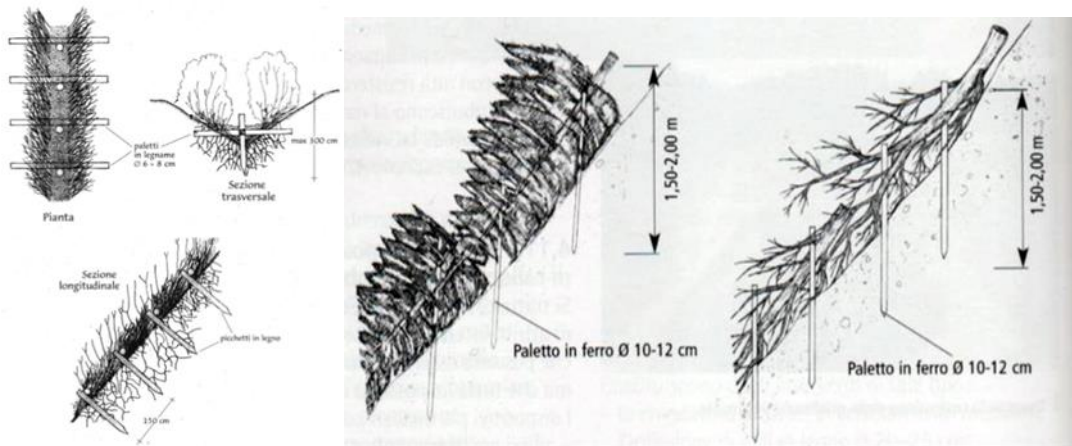


Figura 1.27 Alberi per il consolidamento fluviale e dei pendii (disegni F. Florineth).

#### 1.2.5.2 Riutilizzo di specie alloctone

##### Acqua da cladodi di fico d'india (*Opuntia ficus-Indica*)

Utilizzo in fase di messa a dimora di cladodi (detti comunemente "pale"), spezzettati e/o interi all'interno della fossa. Questi, grazie alla loro capacità di conservare l'acqua a lungo, cederanno umidità al terreno tenendolo più a lungo fertile. A disidratazione avvenuta si composteranno naturalmente e forniranno quindi sostanza organica alla pianta.

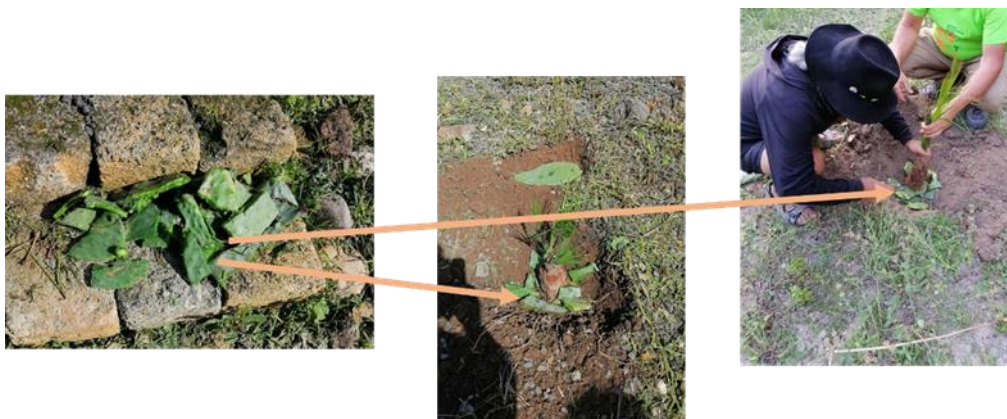


Figura 1.28 Impiego di cladodi di fichi d'india per la messa a dimora di *Chamerops humilis* durante l'Antica Trasversale Sicula (Calascibetta, 2019).

### **Legname da specie alloctone**

Un esempio è l'uso che viene fatto del bambù, specie invasiva non autoctona e quindi da sradicare nelle aree di diffusione incontrollata. Esso è ricco di fibre, che ne determinano la resistenza e la durezza. Le fibre sono delle piccolissime aste tubolari cave, con diametro pari a 0,03 mm, lunghezza massima di 3,5 mm e spessore della parete di 0,006 mm. La parete della fibra è costituita da una serie di strati, dette lamelle. Nel legno comune sono presenti solo 3 lamelle, contro le 6 del bambù. Questa caratteristica peculiare rende questa pianta perfetta per creare una serie di infrastrutture (come quella in foto) che potranno perdurare nel tempo.



Figura 1.29 Riutilizzo di tronchi di bamboo. Cantiere didattico AIPIN Sicilia e Piemonte (Luserna -S. Giovanni 2016).

### **1.2.5.3 Riuso di rifiuti antropici e di cantiere**

#### **Riutilizzo di imballaggi**

Riutilizzo di materiale di scarto da cantiere, come ad esempio imballaggi del geocomposito bentonitico nel caso in foto, per la realizzazione di passaggi per la fauna.



Figura 1.30 Riutilizzo di imballaggi. Bosco WWF di Vanzago ZSC/ZPS IT2050006 (Milano 2015-2019).

### **Riutilizzo di materiale di scarto antropico**

Recupero di materiale di scarto (pietrame, pallet, etc.) per la realizzazione di sentieristica etc. Si rimanda al paragrafo 6.3. al caso studio del Parco della salute di Palermo.



Figura 1.31 Recupero «basole» stradali abbandonate lungo la linea di costa e una grossa corda marina («gomena») per delimitare la sentieristica. (Parco della salute, Palermo 2020).

#### **1.2.5.4 Tecniche ed innovazioni**

Inoculazione con batteri e micorrize: sfrutta una tipologia di simbiosi che già in natura esiste normalmente, e che si instaura tra l'apparato radicale delle piante e i funghi, i quali forniscono alla pianta dei micronutrienti che sono difficili da reperire, ed in cambio la pianta dona al fungo zuccheri, proteine e altre sostanze nutritive. La tecnica dell'inoculo quindi mira alla formazione di queste simbiosi, che consentono alla pianta di sviluppare un apparato radicale ben più sviluppato di un organismo vegetale che ne è privo. In interventi di questo tipo è necessario mettere a contatto le spore fungine con l'apparato radicale delle piante, mischiandole a terricci di radicazione, il fungo in questo modo potrà legarsi facilmente all'organismo ospite, instaurando la simbiosi in tempi rapidi.

Inizialmente l'IN se ne è servita per usi più legati alla conservazione (es: da Eolife 99 sono state usate per il Re-enforcement di specie prioritarie prodotte in laboratorio tramite micropropagazione). dal 2015 sono state utilizzate in combinazione con tecniche più tradizionali (es. idrosemine), alle

produzioni di piante per l'I.N. con particolare riferimento alla prevenzione rischio desertificazione (cfr. Progetto LIFE *Climate Change Adaptation* etc.) e per le Seed Balls (es. Pomaia. Cfr paragrafo 3.1.2)



Figura 1.32 Micorrize impiegate per la produzione di piante Fonte: Progetto LIFE *Climate Change Adaptation*

**Micropropagazione:** tecnica che permette di ottenere un clone della pianta stessa, e quindi un insieme di individui tutti identici dal punto di vista del patrimonio genetico. Tale pratica permette quindi di ottenere numerosi individui a partire da esigui materiali d'origine, ma soprattutto individui che sono esenti da infezioni batteriche e virali. La micropropagazione ha inizio con la scelta del materiale vegetale che dev'essere propagato, spesso vengono adoperate le gemme, ma anche antere e polline. Successivamente il materiale dev'essere sterilizzato e posto su un terreno di coltura contenente solitamente saccarosio, citochinine e ormoni della crescita, come auxina. Nel momento in cui l'apparato radicale comincia a crescere e diventare abbastanza grande, è possibile procedere alla fase di espanto da ambiente in vitro ad ambiente in vivo, su terreno.



Figura 1.33 Produzione di Caryophyllaceae - Progetto EOLIFE99

**Semina con fiorume:** tecnica che riguarda interventi antierosivi e di rivestimento, che prevedono appunto l'uso di fiorume, ovvero miscuglio naturale di sementi e relativi steli derivanti da fienagione, il quale viene applicato su superfici piane o con pendenze minore di 20°. Questa tecnica non è adatta a terreni poveri di suolo o soggetti a frequente dilavamento, se non affiancata da altre tecniche. Mentre



la definizione storica sopra esposta ha trovato evoluzioni con le esperienze lombarde, un utilizzo più “di campagna” è ormai diffuso, dopo le prime esperienze in Sicilia (Custonaci con recupero di *Artemisia arborescens* e all’interno dei biorulli, e arricchendo miscele di idrosemina Termini Imerese) e come sperimentazione di campo raccogliendo i semi in purezza.



Figura 1.34 Idrosemina naturalistica con semi ad alto valore biotecnico (Discarica di Termini Imerese, Palermo. 2015) a sinistra, fiorume di *Artemisia arborescens* (Custonaci, 2014) a destra.

**Serbatoi organici d’acqua:** questa tecnica innovativa è stata proposta all’interno del progetto LIFE, The Green Link: “Ripristinare le aree desertificate con un metodo innovativo di arboricoltura oltre il confine del Mediterraneo per aumentare la resilienza”. Un metodo di coltivazione innovativo per ripristinare le aree desertificate. Sostituendo le tradizionali tecniche di irrigazione con il Cocoon, un prodotto ad alta efficienza idrica, biodegradabile al 100%. Sono state effettuate sei prove in tre diversi Paesi del Mediterraneo colpiti dalla desertificazione, compresa la Sicilia.

**TECHNIQUES AND INNOVATIONS**

**9. ORGANIC WATER TANKS**



**LIFE The Green Link “Restore desertified areas with an innovative tree growing method across the Mediterranean border to increase resilience”**

An innovative growing method to restore desertified areas. Replacing traditional irrigation techniques with the **Cocoon**, a water-efficient, 100% biodegradable. Six trials in three different Mediterranean countries suffering from desertification, including Sicily






**Servizi ecosistemici**








Pre-conference courses 3rd September 2021



12<sup>th</sup> SERE CONFERENCE online 7<sup>th</sup> – 10<sup>th</sup> SEP 2021



Gianluigi Pirra [www.aipn.it](http://www.aipn.it) [www.biocityzri.com](http://www.biocityzri.com) 41

Figura 1.35 Serbatoi organici d’acqua \_progetto Life.

### **Attecchimento forzato**

Immissione in profondità (L<1,5 metri, foro da 32-40 mm da eseguire per perforazione con trapano) di torba additivata con concime granulare a lenta cessione tipo osmocote contenente Magnesio e Ferro o altro concime granulare a lenta cessione in quantità e qualità indicate da agronomo o direttore lavori in funzione della profondità del suolo e delle caratteristiche pedologiche del terreno. Per aumentare ulteriormente l'efficacia della tecnica, si potrà impiegare humus di lombrico e micorrize.

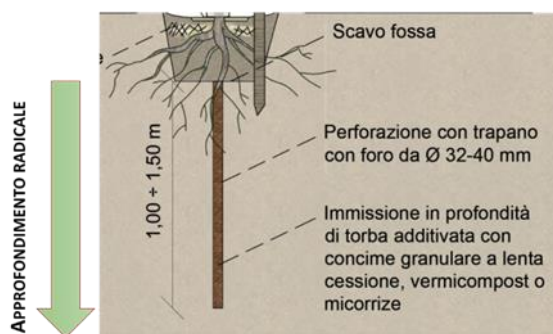


Figura 1.36 Schema della messa a dimora con la tecnica dell'attecchimento forzato.

### **Metodi derivanti dalle teorie del botanico e filosofo giapponese Masanobu Fukuoka**

Si tratta di tecniche di semine che derivano dall'agricoltura naturale e da antiche tradizioni.

Per esse si rimanda al paragrafo 3.1.2). dove viene anche trattato un approfondimento sul caso studio di Pomaia.



Figura 1.37 Realizzazione di Seedballs (Pomaia, 2021) a sinistra, Masanobu Fukuoka a destra.

### **Bibliografia Par. 1.2**

FLORINETH F. (2007) "Piante al posto del cemento" Il Verde Editoriale, ISBN-10 : 8886569262

PIRRERA G., FRECCERO C. (1-5 luglio 2019) University of Milano-Bicocca, Milano "Ecological restoration of a quarry and spiritual landscapes in motion for a Buddhist monastery", Nature and

society facing the Anthropocene challenges and perspectives for landscape ecology, 10th World Congress of the International Association for Landscape Ecology, SIEP IALE

PIRRERA G., SAULI G., CALVO R., AMATO F., D'ASARO F. (2016) "*Idrosemina naturalistica*" XXXV Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche IDRA 16 atti web [http://amsacta.unibo.it/5400/1/ATTI\\_IDRA16](http://amsacta.unibo.it/5400/1/ATTI_IDRA16) ISBN 9788898010400 p.833-836

PIRRERA G., SAULI G., AMATO F., CAMARDA R., D'ASARO F., CALVO R., BENFRATELLO R. (2015), *Idrosemina con specie autoctone* ACER PARCHI VERDE ATTREZZATO RECUPERO AMBIENTALE N° 6/15, IL VERDE EDITORIALE, MILAN, PP.43-48

Progetto LIFE *Climate Change Adaptation* [www.desert-adapt.it/index.php/it/casi-studio/12-111-ream-a-t-it](http://www.desert-adapt.it/index.php/it/casi-studio/12-111-ream-a-t-it)

Progetto LIFE The Green Link "*Restore desertified areas with an innovative tree growing method across the Mediterranean border to increase resilience*" [thegreenlink.eu/en/home/](http://thegreenlink.eu/en/home/)

Progetto LIFE99 NAT/IT/006217 "*EOLIFE99 - Tutela delle specie vegetali prioritarie delle Isole Eolie*" [web.tiscali.it/ecogestioni/eolife/](http://web.tiscali.it/ecogestioni/eolife/)

### 1.3 INGEGNERIA NATURALISTICA: NBS PER IL PROGETTO DI PAESAGGIO (F. Vallone)

Progettare con la Natura è obiettivo global sempre più diffuso, supportato anche dalle *Nature Based Solutions* (NBS) quale approccio culturale ancor prima che tecnico-progettuale, per attivare la resilienza dei nostri paesaggi e realizzare nuove opere, anche integrate a infrastrutture verdi e blu, reti ecologiche, rigenerazione di aree degradate. L'Ingegneria Naturalistica (NBS per eccellenza) si pone quindi come tecnica fondamentale non solo per il consolidamento di versanti e sponde, ma anche per l'attivazione di nuovi habitat e nuovi paesaggi sia in contesti naturalistici che antropizzati (agricoltura, città, infrastrutture, ecc.) per esempio anche per modellare attrattivi *roadscape*s come fece la Francia oltre 30 anni fa per la costruzione sostenibile di 40 nuove autostrade con il paesaggista Bernard Lassus.

Progettare con la Natura anche sfruttando appieno i molteplici tools oggi disponibili tra obiettivi, norme, regolamenti e risorse economiche (PNRR in primis). E poi competenze transdisciplinari di progettisti e tecnici, approfondimenti scientifici, tecniche innovative e “pacchetti” pronti all'uso (dai *tetti verdi* ai *rain gardens*) sempre e comunque da impiegare *ad hoc*. Impossibile insomma non aderire al nuovo paradigma culturale e finalmente guardare con concreta fiducia alla riconversione dell'errato modello di sviluppo antropico che ci ha insipientemente condotti all'*antropocene* e relative crisi globali, dal cambiamento climatico, alle diseguaglianze sociali, alla sesta estinzione.

Tra consumo di suolo, perdita di habitat e di specie, innalzamento delle temperature e alluvioni, da tempo il mondo ha condiviso obiettivi di sostenibilità ambientale e rigenerazione ecosistemica, riconoscendo obbligatorio e urgente ricucire il rapporto Uomo-Natura e riconoscere nel **Paesaggio** - che è sistema di ecosistemi vivente e reattivo- la soluzione alle nostre necessità. Certamente non escludendo la tecnologia e la *tecnosfera*, ma tornando a “sfruttare” anche l'ecosfera e le potenti interazioni Uomo-Natura che abbiamo dimenticato e che invece si chiamano **Servizi Ecosistemici**, i quali gratuitamente, possono generare, se tutelati e correttamente sostenuti, molteplici vantaggi. Nel 2015 il *Ministero dell'Ambiente* li ha stimati di valore complessivo pari a circa 338 miliardi di euro (23 % del PIL).

Sin dal 2015 i 17 *Global Goals* condivisi da 193 stati membri ONU hanno chiaramente indicato il da farsi entro il 2030, così come anche il successivo *Next generation EU* (2019) che impegna l'Europa ad azioni coordinate e accelerate (entro il 2026) anche sostenute da ingenti risorse economiche (oltre 800MLD di euro) come mai prima stanziata. La sola Italia ne ha richieste e ottenute circa un quarto del totale EU (191,5 MLD) poi incrementate sino ad oltre 248MLD con ulteriori stanziamenti del governo.

Tre i pilastri fondamentali del *NGEU* e quindi anche del nostro PNRR:

- 1) *sostegno agli Stati membri per investimenti e riforme;*
- 2) *rilanciare l'economia dell'UE incentivando l'investimento privato;*
- 3) *trarre insegnamento dalla crisi.*

Sono sei le missioni tra cui *la Rivoluzione verde e transizione ecologica* cui destinare non meno del 37% delle risorse complessive. A questi si sono poi aggiunti ulteriori più recenti step quali le *Linee guida del MIMS (Ministero Infrastrutture)* per la progettazione sostenibile degli interventi pubblici; e, nel febbraio 2022, l'inserimento di *Ecosistemi e Biodiversità* in Costituzione accanto al *Paesaggio*, come realtà fondamentali da tutelare.

In questo panorama l'**Ingegneria Naturalistica** riveste ruolo centrale quale **NBS** per eccellenza e da lunga data, antica quanto l'uomo proprio in quanto utile alle necessità del suo vivere (abitare, produrre, ... spostarsi, la così detta **colonizzazione antropica**) e relative necessità di trasformazione del contesto ambientale. Un tempo, infatti, come ancora oggi nei cosiddetti "paesi emergenti", l'uomo utilizzava quanto disponibile in loco (legno, piante, pietrame, ...) poi via via sostituito dai materiali e tecnologie sempre più innovative progressivamente resi disponibili dalla ricerca, dalla mobilità e da scelte e stili di vita *global*. Un processo di sviluppo antropico con effetti pervasivi e ad elevata capacità di interferenza sui sistemi ambientali, cui oggi si cerca di porre rimedio.

E quindi sviluppando processi adattativi, in grado di incorporare i disturbi e sviluppare resilienza, come i sistemi di drenaggio urbano sostenibile, dai *rain gardens* ai *tetti verdi* alle *sponge cities*, dove il cosiddetto **verde tecnico** (che rientra nell'*Ingegneria Naturalistica*) svolge ruolo primario).

Come anche nei progetti di deframmentazione e ricucitura del paesaggio (*ecodotti*) anche a favore della fauna (sottopassi, scale di risalita pesci), nuovi habitat (foreste, biotopi umidi...), come ben rappresentato nella vasta manualistica I.N. prodotta sin dagli anni Novanta anche con il contributo di *AIPIN- Associazione Italiana per l'Ingegneria Naturalistica*.

*Ingegneria Naturalistica* quindi non solo per interventi a valle di eventi emergenziali (alluvioni, frane, smottamenti,...), ma anche preventivi per la **cura del paesaggio**, quindi da impiegare diffusamente come richiamato in normativa internazionale e italiana attinente *Biodiversità, Capitale Naturale, Spazi verdi Urbani, ...* e i relativi molteplici campi applicativi, dalle aree naturalistiche ai contesti urbani e rurali, costieri, fluviali, montani, dove non solo conseguire compatibilità e sostenibilità ambientale per le nuove opere ma anche generare occasioni di resilienza e "*remise en forme*" di sistemi ambientali compromessi. E contestualmente divenire volano di rigenerazione paesaggistica anche a vantaggio delle comunità locali, partecipando alla valorizzazione del *genius loci* nella sua dimensione trasversale *Uomo-Ambiente Paesaggio-Comunità- One Health*.

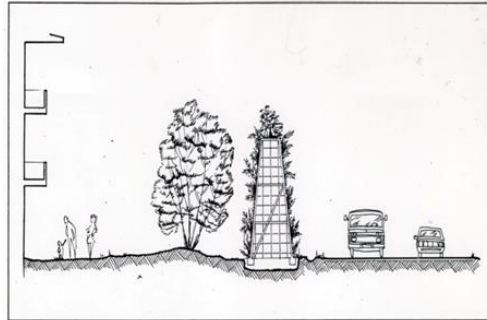


Fig. 23 - Barriere antirumore in elementi metallici

Figura 1.38 Barriera antirumore tangenziale est Milano (F. Vallone).



Figura 1.39 Rinaturazione torrente in ambito urbano (F. Vallone).



*Figura 1.40 Argine in rilevato con pista ciclabile (F. Vallone).*



*Figura 1.41 Drenaggio urbano sostenibile (foto F. Vallone) (in alto) e isole galleggianti per la fauna (foto F.Vallone) (in basso).*

## 2 LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA

### 2.1 ANALISI FLORISTICA E VEGETAZIONALE. CRITERI DI SCELTA DELLE SPECIE PER UN INTERVENTO DI I.N. (P. Cornelini, G. Sauli <sup>†3</sup>)

#### 2.1.1 Introduzione

In un intervento di Ingegneria Naturalistica che intende riproporre ecosistemi con funzioni tecniche i fattori sui quali il progetto può incidere riguardano le specie e le tipologie vegetazionali unitamente alla morfologia ed alla scelta dei suoli.

Nel caso della palificata viva, ad esempio, l'opera ha lo scopo di garantire il consolidamento del piede di una scarpata in alternativa ad un muro di sostegno, ma, poiché in tal caso le piante non sono in grado, da subito, di garantire il consolidamento, unitamente ad esse, viene utilizzato un cassone di tronchi in legno chiodati tra loro che, modificando la morfologia, consente al suolo di essere in equilibrio e, quindi, di consentire lo sviluppo delle piante. Con la decomposizione del legno nel tempo gli arbusti e/o le talee cresciuti sia nella parte aerea che nell'apparato radicale formeranno un cespuglieto e consolideranno il cuneo di terra con il raggiungimento delle finalità tecniche, naturalistiche e paesaggistiche tipiche dell'Ingegneria Naturalistica.

La finalità progettuale viene, quindi, affidata, alle piante vive, delle quali è essenziale conoscere, per il successo dell'intervento l'ecologia, e la modalità di colonizzazione negli ambienti degradati di intervento tramite un accurato studio floristico e vegetazionale (analisi botanica). Lo studio ha il compito di individuare nella stazione di intervento con determinate caratteristiche ecologiche (altitudine, esposizione, morfologia, suolo, luce, umidità, etc.) le specie e le tipologie di progetto (prato, cespuglieto, bosco od una loro combinazione), unitamente al pattern della loro distribuzione che consentano, nel tempo, un processo dinamico di recupero verso la vegetazione naturale potenziale.

---

<sup>3</sup> Estratto da: Cornelini P., Sauli G., 2015\_ "Compendio di Ingegneria Naturalistica per docenti e professionisti: analisi, casistica ed elementi di progettazione" a cura di Regione Lazio Assessorato alle Infrastrutture, Politiche Abitative e Ambiente



### **2.1.2 Metodologia tipo di analisi botanica**

Lo studio va eseguito, generalmente, secondo le seguenti fasi:

- raccolta ed analisi dei dati bibliografici relativi all'area di studio;
- esame delle cartografie e delle foto aeree;
- esame dei vincoli territoriali;
- reperimento e interpretazione dei dati climatici esistenti;
- inquadramento vegetazionale di area vasta e individuazione della vegetazione potenziale;
- indagini floristiche ai fini del censimento delle specie vegetali presenti nell'area di studio;
- indagini vegetazionali ai fini della individuazione delle tipologie vegetazionali e del pattern distributivo nell'area di studio nonché della serie dinamica della vegetazione;
- report fotografico delle fitocenosi rivenute (almeno una foto per rilievo);
- definizione delle condizioni ecologiche microstazionali e dei fattori limitanti (spessore e tipo di suolo, aridità, insolazione, etc.);
- redazione della carta fisionomico-strutturale della vegetazione;
- definizione delle specie e delle tipologie vegetazionali di progetto e del pattern distributivo.

Nel caso di interventi in aree altamente antropizzate la metodologia resta valida, in quanto si farà riferimento agli ambiti di vegetazione naturale presenti in prossimità.

La biodiversità floristica è uno degli obiettivi di un progetto di Ingegneria Naturalistica raggiungibile con una attenta scelta delle specie e delle tipologie vegetazionali (*Figura 2.1*).



*Figura 2.1 Biodiversità floristica (foto Cornelini P.)*

### 2.1.3 Analisi bioclimatica

L'analisi botanica va sempre accompagnata da uno studio sui lineamenti climatici della zona di intervento, in quanto la distribuzione della vegetazione sul territorio dipende principalmente dai parametri climatici temperatura e precipitazioni. La *Fitoclimatologia* o *Bioclimatologia* studia le relazioni tra la distribuzione della vegetazione e le variazioni di temperatura e precipitazioni.

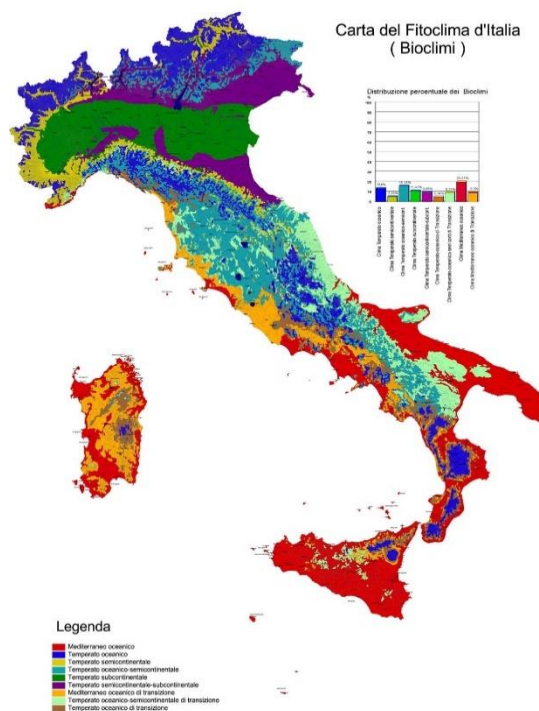


Figura 2.2 Carta del Fitoclima d'Italia

### 2.1.4 Analisi botanica: flora e vegetazione

Nell'analisi botanica vengono normalmente effettuati due tipi di indagine di campagna, quella floristica e quella vegetazionale o fitosociologia, la prima, più speditiva, e la seconda più completa e impegnativa. Tali analisi normalmente sono svolte insieme e si integrano tra loro, ma esistono situazioni progettuali di interventi semplici, di limitata estensione e caratteristiche ecologiche omogenee, ove le dettagliate informazioni provenienti da una analisi vegetazionale possono essere sovradimensionate per i fini progettuali; in questi casi è sufficiente elaborare i dati floristici.

Contestualmente alle analisi floristiche e vegetazionali di campagna dell'area di intervento è necessario un inquadramento della vegetazione a livello di area vasta, per una conferma delle analisi di campo e per la individuazione della vegetazione potenziale.

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Nel caso di un territorio di studio altamente antropizzato, unitamente alle informazioni bibliografiche di area vasta, sono necessarie anche indagini di campagna estese alle formazioni vegetazionali autoctone presenti al di fuori dell'area di intervento. Per un inquadramento speditivo, ma efficace dell'area vasta si può fare riferimento alle serie della vegetazione italiana di GIS Natura o alla Carta delle serie di vegetazione d'Italia (Blasi C., et al., 2010).

### *2.1.4.1 Analisi floristica*

L'analisi floristica si basa sulla determinazione delle entità floristiche presenti con il riconoscimento delle loro preferenze ecologiche (*indici di Ellenberg*), della struttura (*forme biologiche*) e della distribuzione biogeografia (*tipi corologici*).

Gli *indici di Ellenberg* (1974) che descrivono le esigenze ecologiche delle piante (luce, temperatura, umidità, etc.) costituiscono un utile strumento di utilizzo delle informazioni floristiche per comprendere le caratteristiche ecologiche del territorio di studio. *“Ogni volta che una pianta, per cause naturali, si trova a vegetare in un determinato sito, questo è una prova che il sito è compatibile con le sue esigenze ecologiche: dalla sua presenza si possono dunque ricavare informazioni sulle caratteristiche ecologiche del sito stesso. La vegetazione si può pertanto interpretare come un segnale, che fornisce informazione sulle condizioni ecologiche dell'ambiente”* (Pignatti, 1980).

*“I valori di bioindicazione costituiscono la valutazione numerica del segnale che ciascuna specie fornisce, sull'incidenza dei principali fattori ecologici nel determinare le caratteristiche del sito: si tratta di una valutazione soggettiva, ma che tiene conto di una grande quantità di fatti obiettivi: distribuzione geografica e topografica della specie, misure sperimentali in campo, paragoni con altre specie”* (Pignatti S., 2005).



Figura 2.3 Analisi stazionale botanica sulle rupi del Circeo (LT) (foto Cornelini P.)

#### 2.1.4.2 Analisi fitosociologica

Tale analisi da impiegarsi, unitamente a quella floristica, nelle situazioni più estese e complesse è quella che fornisce le informazioni più complete nella decodifica del messaggio che la copertura vegetale fornisce al progettista.

La fitosociologia è la branca della botanica che studia le comunità vegetali con un'analisi che esce dal puro ambito qualitativo e approda ad un'analisi qualitativa-quantitativa, che consente un confronto oggettivo tra situazioni fisionomicamente simili o diverse.

Il metodo messo a punto da *J. Braun Blanquet* negli anni '20 del secolo scorso si basa sul riconoscere la vegetazione formata da unità discrete caratterizzate da una certa composizione floristica: le associazioni.

L'associazione vegetale è definita da *J. Braun Blanquet* come “*un aggruppamento vegetale più o meno stabile ed in equilibrio con l'ambiente, caratterizzato da una composizione floristica, in cui alcune specie vegetali, che si rinvergono quasi esclusivamente in questo popolamento, rilevano con la loro presenza, un'ecologia particolare ed autonoma*”.

A partire dalle associazioni costituenti le unità di base, è possibile riconoscere delle unità sintassonomiche superiori comprendenti la vegetazione di territori sempre più estesi, secondo un sistema gerarchico di categorie.

L'elemento operativo fondamentale nell'indagine fitosociologica è il rilievo consistente nel censimento delle specie vegetali di una stazione opportunamente scelta all'interno di una zona fisionomicamente omogenea, accompagnato da una valutazione quantitativa sull'abbondanza di ogni

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

specie, nonché dalle principali caratteristiche ecologiche e strutturali della stazione stessa (altitudine, inclinazione, esposizione, stratificazione, etc.).

Per la stima della copertura vegetale nei rilievi effettuati si usa normalmente la scala di *Braun Blanquet*.

I rilievi vanno effettuati nei popolamenti elementari presenti correlati con i fattori ambientali per definire le tipologie vegetazionali e la struttura delle formazioni con riferimento alle formazioni arboree arbustive ed erbacee sia in ambito terrestre che idraulico. Tali indagini sono fondamentali per definire le tipologie vegetazionali di progetto.

L'analisi fitosociologica è, quindi, uno strumento fondamentale nello studio di un territorio e nella progettazione degli interventi di recupero ambientale, in quanto consente di classificare la vegetazione di una zona in unità organizzate gerarchicamente in relazione ai parametri ambientali e di individuare la serie dinamica evolutiva o regressiva di una comunità vegetale, ottenendo elementi di previsione del suo sviluppo nel tempo.

### **2.1.5 Serie dinamica della vegetazione**

Negli interventi di Ingegneria Naturalistica è indispensabile considerare la comunità vegetale nella sua dimensione dinamica.

La vegetazione, infatti, non è un sistema statico, ma vivente variabile con il tempo. Tale evoluzione, osservabile, ad esempio, nella capacità di un bosco di riconquistare un campo abbandonato dalle coltivazioni, procede, nel tempo, molto schematicamente dalle forme più semplici erbacee verso quelle legnose strutturalmente più complesse:

*Prato* → *Prato* → *Cespuglieto* → *Cespuglieto* → *Bosco*  
*cespugliato* *arborato*

La conoscenza della serie dinamica della vegetazione o *sigmetum* costituisce, quindi, un elemento fondamentale nella scelta delle tipologie progettuali per il recupero ambientale.

La serie di vegetazione è l'insieme degli aggruppamenti vegetali che costituiscono i diversi stadi dinamici tendenti ad un solo aggruppamento maturo (vegetazione naturale potenziale), presenti all'interno di un territorio sufficientemente omogeneo dal punto di vista litogeomorfologico e bioclimatico (*Filesì L., 2006*) (Figura 2.4)<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> Regione Lazio, 2006. "Manuale di Ingegneria Naturalistica" \_ Volume 3

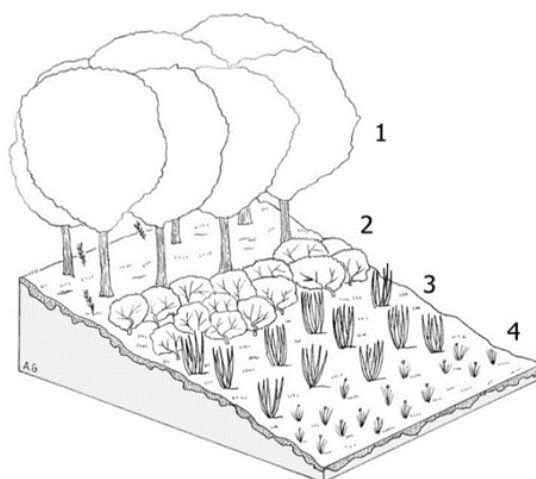


Figura 2.4 *Roso sempervirentis-Querceto pubescentis sigmetum*.

- 1) *Bosco di roverella (Roso sempervirentis-Quercetum pubescentis)*
- 2) *Cespuglieto (Roso sempervirentis-Rubetum ulmifolii)*
- 3) *Ampelodesmeto (Psoraleo – Ampelodesmetum)*
- 4) *Pratello emicriptofitico (Galio lucidi – Brachypodietum rupestris)*

Dalle analisi floristiche e vegetazionali effettuate nell'area e dall'analisi della tabella strutturata dei rilievi è possibile mettere in evidenza le tipologie vegetazionali indagate in chiave applicativa di relazioni dinamiche riferite agli stadi della serie terrestre o igrofila per ricavare le specie, le tipologie, il *pattern* e lo stadio dinamico di riferimento per il progetto botanico.



Figura 2.5 *Processi dinamici di colonizzazione di una falda di detrito da parte della vegetazione mediterranea nella maremma grossetana, nella fase del cespuglieto rado (foto Cornelini P.)*

Accanto alla serie di vegetazione climacica correlata prevalentemente con le precipitazioni medie, possono svilupparsi una o più serie edafile (Biondi e Blasi, 2004) distinte in serie edafoigrofile,

## I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

caratterizzate da una maggiore umidità nel suolo corsi d'acqua, base dei versanti, ecc.), e serie edafoxerofile, caratterizzate da una maggiore aridità rispetto alle condizioni medie locali (versanti più inclinati, rocce affioranti, ecc., - Manuali e *Linee Guida ISPRA n.65/2010*).

Di seguito, un esempio di *geosigmeto* del settore collinare anconetano, costituito da tre serie di vegetazione: una serie edafo-xerofila (A) sui substrati arenacei, una serie climacica (B) sui versanti pelitico-arenacei, una serie edafo-igrofila (C) sui terrazzi alluvionali recenti (*Biondi E. e Allegrezza M., 1996*).

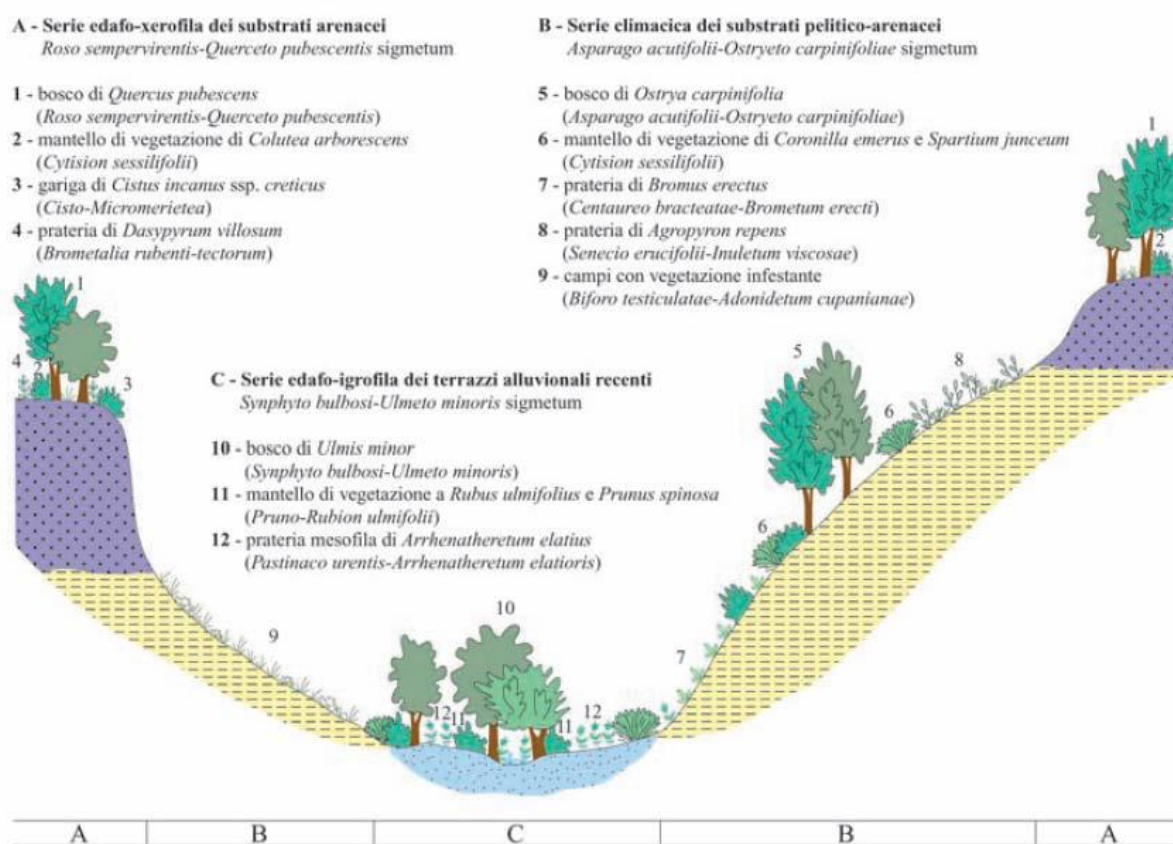


Figura 2.6 Esempio di geosigmeto

### 2.1.6 Cartografia della vegetazione

La redazione della carta della vegetazione costituisce la graficizzazione della sua distribuzione sul territorio secondo i fattori ambientali e consente di avere informazioni sulle caratteristiche ecologiche e strutturali delle varie fitocenosi, nonché sul dinamismo in atto.

Le principali tipologie di carte vegetazionali sono:

- la carta fisionomica strutturale che riporta le analisi di tipo fisionomico strutturale della vegetazione naturale e semi-naturale nonché delle aree artificiali e agricole con una legenda che, generalmente, fa riferimento a quella del programma europeo CORINE Land Cover (APAT, 2005);
- la carta fitosociologica che si ottiene se la descrizione delle tipologie vegetazionali di una carta fisionomica viene approfondita con i riferimenti sintassonomici del sistema gerarchico fitosociologico;
- la carta delle serie di vegetazione che rappresenta le varie serie della vegetazione presenti sul territorio per la quale può fare riferimento alla cartografia recentemente prodotta per conto del Ministero dell'Ambiente (*Blasi C., 2010*) (Figura 2.7).



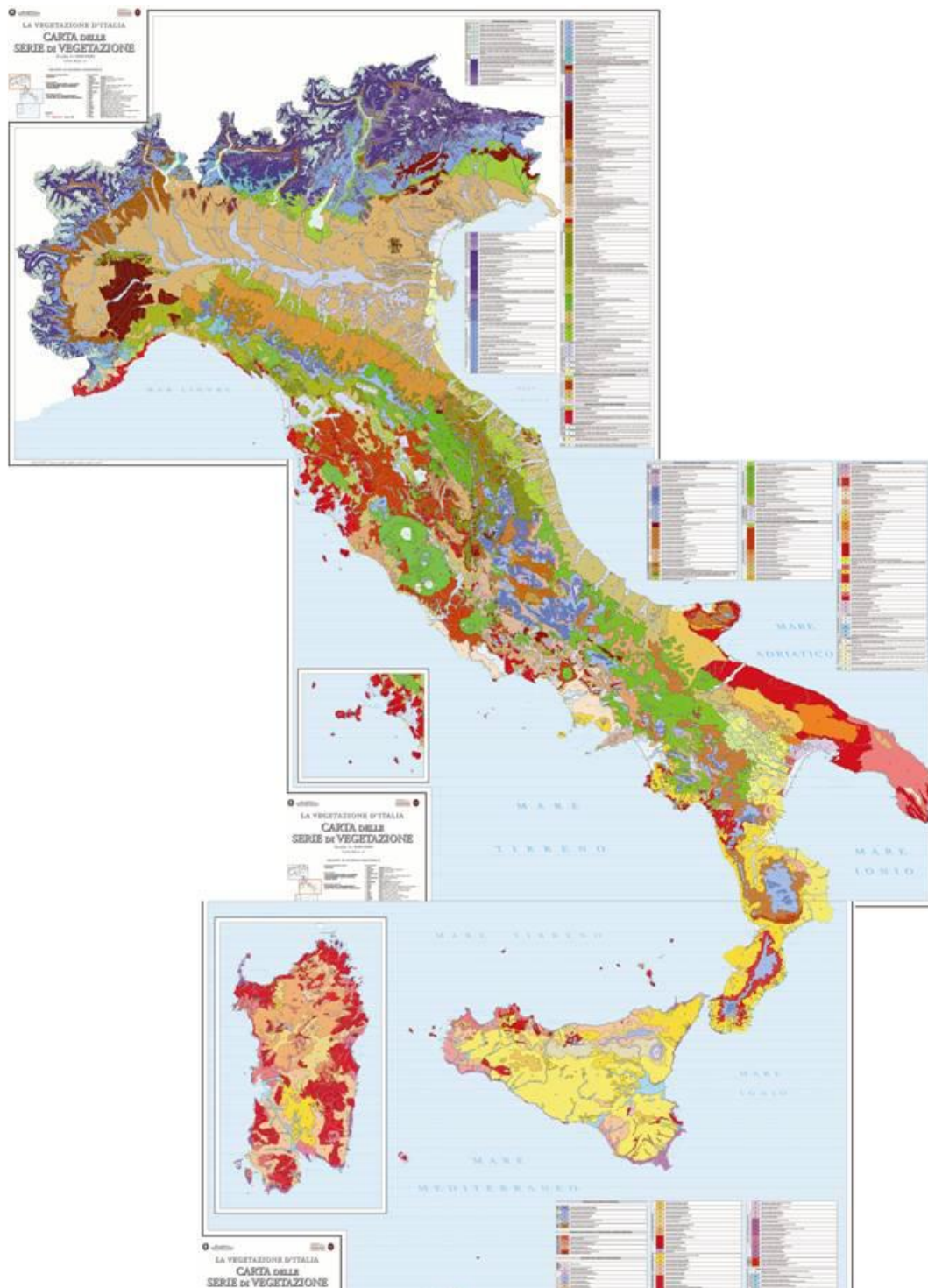


Figura 2.7 Carta delle Serie di vegetazione d'Italia (Blasi C. et al., 2010, in Manuali e Linee Guida ISPRA n.65/2010)

### 2.1.7 Il progetto botanico

Il progetto botanico deve individuare, a seguito delle analisi topografiche, geomorfologiche, geotecniche, idrauliche, floristiche e vegetazionali, con riferimento ai parametri ecologici stazionali dell'area di intervento, la lista con le quantità delle specie di progetto, le tipologie vegetazionali di

progetto coerenti con il territorio ed affini a stadi della serie della vegetazione autoctona e i *patterns* di distribuzione.

In un intervento di I.N., dato che è molto raramente è possibile prevedere la vegetazione più evoluta (il bosco), a causa delle limitazioni ecologiche stazionali (pendenze elevate, spessore ridotto del suolo, aridità, etc.), va individuato lo stadio dinamico di riferimento compatibile con la situazione morfologica ed ecologica reale; nella consapevolezza che se è possibile imitare e accelerare i processi naturali, non è comunque possibile forzarli oltre un certo limite: ad esempio, si può proporre un prato cespugliato ed aspettare una evoluzione spontanea verso tipologie strutturalmente più complesse.

L'obiettivo è di proporre fitocenosi coerenti con la vegetazione autoctona, realizzando impianti pionieri successionali capaci di attivare il recupero naturale della vegetazione locale con riduzione notevole dei costi per l'acquisto delle piante e per gli interventi di manutenzione.

### **2.1.8 Criteri di scelta delle specie**

Nelle aree con vegetazione autoctona, attraverso le analisi floristiche e vegetazionali è possibile individuare le specie e le tipologie vegetali coerenti con i caratteri stazionali del sito di intervento, mentre in aree molto antropizzate, si dovrà fare riferimento alla vegetazione naturale potenziale individuata dalle indagini di area vasta.

In sintesi, le specie vanno scelte in base ai seguenti i criteri:

- coerenza con la vegetazione locale autoctona (numero di specie, pattern naturale, ecc.) e con le caratteristiche fitoclimatiche e fitogeografiche dell'area;
- compatibilità ecologica con i caratteri stazionali (clima ed eventualmente microclima, substrato, morfologia, ecc.) dell'area di intervento; può risultare molto utile l'uso degli indicatori ecologici di Ellenberg (*Pignatti et al., 2005*);
- appartenenza ad uno stadio della serie della vegetazione autoctona, scelto come il più evoluto possibile, anche in funzione delle condizioni ecologiche artificialmente realizzate dall'intervento (ad esempio con rimodellamenti morfologici, riporto di suolo, impianto di irrigazione, ecc.);
- caratteristiche biotecniche;
- facilità di approvvigionamento nei vivai locali;
- facilità di attecchimento e ridotta manutenzione.

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

L'affinità degli impianti con la vegetazione reale e con la complessità della serie di vegetazione determina habitat di particolare valore anche per la componente faunistica, di norma strettamente collegata con le caratteristiche cenologiche delle comunità vegetali.

Negli interventi di recupero ambientale in ambito infrastrutturale la vegetazione messa a dimora può assumere anche il ruolo di compensazione delle emissioni di CO<sub>2</sub> dovute al traffico veicolare delle fasi di costruzione e di esercizio.

### *2.1.8.1 Le specie autoctone*

La necessità di utilizzare specie autoctone per gli interventi di recupero ambientale e di Ingegneria Naturalistica è un criterio fondamentale da adottare per riproporre fitocenosi coerenti con la vegetazione autoctona e per scongiurare il pericolo di introduzione di specie esotiche, con le possibili conseguenze (inquinamento floristico, inquinamento genetico dovuto a varietà o *cultivar* di regioni o nazioni diverse, etc.).

Una ricerca per individuare le specie arboree e arbustive autoctone comuni della flora italiana di potenziale impiego negli interventi di rinaturalizzazione e di Ingegneria Naturalistica (*Cornellini et al., 2002*) ha dimostrato che, per quanto riguarda le specie arboree, la maggioranza è disponibile sul mercato, mentre per gli arbusti, l'offerta vivaistica è più ridotta, con le carenze più vistose per alcune specie dei generi *Salix*, *Calicotome*, *Cytisus* e *Lonicera*.

Per una maggior conoscenza delle specie esotiche, da evitare comunque, si può fare riferimento alla banca dati nazionale *Non-native flora of Italy* che include 1023 specie (*Celesti-Gradow et al., 2010*).

### *2.1.8.2 Specie a determinati e stadi della serie di vegetazione*

La conoscenza delle serie di vegetazione e dei singoli stadi che le compongono, consente l'individuazione dello stadio dinamico di riferimento per il progetto, con la previsione della sua evoluzione nel tempo anche tramite i necessari interventi di manutenzione.

A seconda degli obiettivi di progetto si potranno, di volta in volta, privilegiare le comunità che rappresentano gli stadi iniziali della serie (generalmente erbacee), quelli intermedi (generalmente arbustive), o gli stadi maturi (generalmente forestali). Per raggiungere l'obiettivo progettuale, nella maggior parte delle situazioni, si utilizzano specie caratteristiche degli stadi pionieri o intermedi, capaci di innescare processi evolutivi e portare al progressivo insediamento di formazioni più complesse.

### 2.1.9 Le tipologie vegetazionali di riferimento

#### 2.1.9.1 Le formazioni arboree

Le comunità arboree rappresentano lo stadio strutturale più complesso delle tipologie vegetazionali negli interventi di recupero delle aree stabili. Gli alberi vengono piantati ove la morfologia e i vincoli connessi alla distanza di sicurezza lo consentono. Le stazioni con caratteristiche morfologiche ed ecologiche difficili, quali ad esempio le scarpate instabili con suoli poco evoluti o assenti sono, in genere, poco idonee all'impianto degli alberi, che richiedono condizioni più favorevoli e, comunque, con il loro peso possono creare problemi di instabilità.

La maggior parte delle specie arboree possono essere, quindi, utilizzate solo qualora l'intervento interessi ambiti forestali preesistenti in cui le attività di cantiere prevedano la conservazione in condizioni adeguate del suolo asportato.

Alcune specie arboree come *Quercus pubescens*, *Q. cerris*, *Fraxinus ornus* e *Ostrya carpinifolia* mostrano una buona capacità di attecchimento anche su suoli post-agrari. Tali specie, nelle opportune condizioni, possono facilmente concorrere alla creazione di fasce arborate molto importanti negli interventi di mitigazione e nella creazione di corridoi ecologici.

#### 2.1.9.2 Le formazioni arbustive

Le specie più adatte per gli interventi di stabilizzazione e consolidamento sono gli arbusti pionieri autoctoni, in quanto, in genere, non si usano gli alberi, che richiedono condizioni più favorevoli, e che, comunque, possono creare problemi di instabilità.

Gli arbusti pionieri autoctoni possiedono apparati radicali in grado di stabilizzare, in media, fino ad uno spessore di circa 0,3-0,6 metri di substrato; a tale azione va, comunque, unita un'azione di protezione antierosiva areale tramite inerbimento. Ne risulta che le tipologie vegetazionali di riferimento nelle sistemazioni dell'Ingegneria Naturalistica possono ricondursi, in sintesi, alle formazioni arbustive e a quelle erbacee o ad una loro combinazione.

Negli interventi di Ingegneria Naturalistica gli arbusti autoctoni (camefite, nanofanerofite e fanerofite cespitose) rappresentano i principali materiali vivi per il raggiungimento degli obiettivi progettuali, impiegati sia da soli, sia in abbinamento con i materiali morti negli interventi stabilizzanti (vimate vive, fascinate vive, palizzate vive, etc.) e consolidanti (palificate vive, grate vive, etc.).

Per quanto riguarda le opere stabilizzanti, basate sull'impiego di arbusti radicati o talee, da soli o, con un supporto di legno morto (ad esempio nella viminata), il loro campo di applicazione, secondo i monitoraggi effettuati, andrebbe esteso, in molti casi, a scarpate sistemate con soli interventi antierosivi (idrosemine, biostuoie, etc.), giudicate stabili dal punto di vista geotecnico, ma con processi erosivi in atto.

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

I cespuglieti e le siepi assumono inoltre un ruolo importante nella funzionalità delle reti ecologiche, soprattutto in ambienti agricoli. Possono attirare animali insettivori che controllano le specie dannose all'agricoltura e rappresentare zone di rifugio per gli animali che frequentano i campi coltivati.

In ambito mediterraneo vanno inoltre tenuti in considerazione i fattori limitanti dovuti a:

- la presenza di un periodo estivo xerico con stress idrico, che determina una serie di adattamenti biologici (sclerofillia, tomentosità, spinosità, ecc.);
- la presenza di un periodo di riposo vegetativo più breve di quello delle regioni montane, con conseguente periodo più breve per l'utilizzo delle specie con capacità di riproduzione vegetativa, quali i salici o le tamerici, il cui utilizzo ottimale è legato al periodo di riposo vegetativo;
- la difficile reperibilità delle talee e del materiale vivaistico autoctono, sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo.

Ne deriva la necessità di maggiori accorgimenti, con idonee analisi floristiche e vegetazionali, nella scelta delle specie, in quanto le specie autoctone di comune impiego e maggiormente reperibili nei vivai non sempre sono coerenti con le serie di vegetazione della biocora mediterranea.

Emerge, quindi, l'esigenza di una attenta individuazione e reperimento delle specie mediterranee che vale ancor più per le aree naturali e protette ove va garantita la provenienza del materiale vivaistico per il pericolo dell'inquinamento genetico dovuto a varietà o cultivar di regioni o addirittura nazioni diverse.



*Figura 2.8 Sviluppo degli arbusti della foto accanto dopo 3 anni (foto Cornelini P.)*



Figura 2.9 Inserimento di arbusti autoctoni in una palificata latina. Cà i Fabbri (PU) 2007 (foto Cornelini P.)

Alcune specie arbustive, quali la leguminosa *Spartium junceum*, favoriscono l'accumulo di suolo e l'arricchimento di azoto ed accelerano lo sviluppo delle plantule di alberi come *Fraxinus ornus* e *Quercus pubescens*; ne va, tuttavia, limitata la percentuale tra le specie di progetto, per la tendenza a dominare nella copertura a scapito degli altri arbusti e quindi della diversità di specie.

#### 2.1.9.3 Le formazioni erbacee

L'intervento d'inerbimento sulle scarpate, sui rilevati e sulle superfici messe a nudo dai lavori svolge le seguenti funzioni:

- biotecnica: protezione del terreno dall'erosione superficiale e stabilizzazione con l'azione degli apparati radicali;
- vegetazionale ed ecosistemica: impedire la crescita e lo sviluppo di specie invadenti sinantropiche che abbasserebbero la qualità ambientale e favorire la creazione di habitat adatti allo sviluppo della microfauna;
- paesaggistica.

È fondamentale prevedere l'accantonamento degli strati fertili di suolo per riposizionarli sulle scarpate al termine dei lavori favorendo così la colonizzazione naturale da parte dei semi nel suolo. Nei casi in cui il suolo sia assente o molto primitivo, va previsto l'impiego di miscele di inerimento ricche in leguminose (limitatamente a quelle presenti nell'area di intervento) che provocano l'arricchimento del suolo e lo sviluppo degli stadi più evoluti della serie di vegetazione.



*Figura 2.10 Interventi di idrosemina sulle scarpate della DD Roma-Firenze (AR) 1989. Dal Monitoraggio (1988-2001) degli interventi di idrosemina è emerso come l'inerbimento iniziale a leguminose ha consentito la successione dinamica e la dominanza della vegetazione autoctona (Cornelini, 2001).*

L'intervento di inerimento viene eseguito, nelle situazioni più comuni con un miscuglio a dominanza di graminacee e leguminose che hanno caratteristiche biotecniche complementari: le prime con radici fasciolate che formano un feltro vivo e le seconde con apparati fittonanti che lo fissano con chiodi vivi.

La composizione della miscela e la quantità sono stabilite in funzione delle caratteristiche geolitologiche, pedologiche, microclimatiche, floristiche e vegetazionali della stazione; dovranno essere certificati la provenienza delle sementi, la composizione della miscela, il grado di purezza ed il grado di germinabilità.

La tecnica migliore prevede l'uso del fiorume raccolto in loco, oppure, trattandosi di intervento costoso, si può ricorrere a semine di copertura con specie a rapida scomparsa, quali ad esempio, loglio e trifoglio, per lasciare il campo alla colonizzazione spontanea delle specie autoctone.



*Figura 2.11 La miscela delle sementi dell'idrosemina viene definita, in base alla capacità di formare un rivestimento rapido e continuo e di migliorare il terreno, in attesa che le specie spontanee dell'area colonizzino le superfici. Intervento di idrosemina su terra rinforzata stradale. Atina (FR) 2001 (foto Cornelini P.). A destra intervento dopo 1 anno.*

Per i miscugli erbacei si registra attualmente una carenza relativamente alla disponibilità delle specie locali delle cenosi prative. La maggior parte dei miscugli in commercio è, infatti, composta da miscugli di specie foraggere a larga distribuzione, che nelle situazioni ecologiche più semplici (rilevati stradali o ferroviari) possono anche andar bene in quanto fermano l'erosione superficiale e preparano la colonizzazione delle specie autoctone delle zone circostanti, ma nelle situazioni ecologiche e morfologiche difficili (scarpate instabili, microclimi estremi, ecc.) sono destinate al fallimento. Va quindi, in questi casi, curata particolarmente, tramite accurate indagini botaniche, la scelta delle specie e la loro provenienza geografica per evitare, oltre all'insuccesso dell'inerbimento, l'inquinamento genetico ad opera di cultivar non autoctoni.

#### **2.1.10 I monitoraggi**

Per una corretta impostazione dei progetti di Ingegneria Naturalistica risultano fondamentali le informazioni provenienti dal monitoraggio ex post sulla componente viva degli interventi realizzati, in quanto la vegetazione è l'indicatore fondamentale per verificare il successo degli interventi. Vengono presentati i risultati sintetici del monitoraggio di circa 20 anni di rilievi floristici e vegetazionali su interventi di Ingegneria Naturalistica.

I monitoraggi eseguiti hanno confermato il successo degli interventi di Ingegneria Naturalistica con una evoluzione floristica e strutturale della vegetazione secondo la serie dinamica autoctona.



Sono emersi alcuni insegnamenti per migliorare le realizzazioni e per risparmiare risorse economiche:

### **Interventi antierosivi**

- Nelle scarpate non in roccia, stabili, non sottoposte a erosione superficiale e situate in un bacino biogeografico di buona qualità ambientale (aree naturali) vale l'ipotesi del non intervento, in quanto la colonizzazione spontanea dall'ambiente circostante favorisce fitocenosi erbaceo arbustive appartenenti alla serie della vegetazione climacica;
- Nelle scarpate non in roccia, stabili, non sottoposte a erosione superficiale, ma situate in un bacino biogeografico di scarsa qualità ambientale (aree antropizzate) bisogna intervenire con una idrosemina (e piantagione di arbusti autoctoni), con funzione tampone verso le specie sinantropiche ed esotiche, in quanto l'evoluzione spontanea può portare facilmente a fitocenosi di scarsa qualità ambientale (*Arundo donax*, *Rubus ulmifolius*, *Robinia pseudacacia*, etc.);
- Nelle scarpate non in roccia, stabili, ma sottoposte a erosione superficiale, situate in un bacino biogeografico sia di buona che di scarsa qualità ambientale bisogna intervenire con una idrosemina (e piantagione di arbusti autoctoni), per la protezione antierosiva del suolo;
- In ambito mediterraneo, se si vuole favorire una elevata qualità ambientale sulle scarpate di neoformazione, al fine di ottenere fitocenosi affini a quelle dei prati xerici e non a quelle delle formazioni ruderali sinantropiche, va ridotto l'apporto di terreno vegetale, in quanto così si creano le condizioni ecologiche ottimali per l'attecchimento delle specie dei *Therobrachypodietea*.

### **Interventi stabilizzanti**

Su versanti collinari e montani in aree con tipologie vegetazionali autoctone, ove si riesce a ottenere la stabilizzazione superficiale con regimazioni idrauliche e opere stabilizzanti, anche non vive, il risultato della colonizzazione spontanea delle specie arbustive autoctone può essere migliore, per materiale genetico, della piantagione di specie da vivaio, con notevole risparmio di risorse economiche.



Figura 2.12 Sistemazioni stabilizzanti vive a Pizzoli (L'Aquila) dopo 3 anni. (Foto L. Sacchetti 2006)

### **Interventi consolidanti**

- È fondamentale, nelle grate e palificate, l'attecchimento delle specie arbustive autoctone che vanno selezionate, dopo analisi botanica, tra quelle con le migliori caratteristiche biotecniche;
- La vitalità delle opere realizzate è dimostrata dalla comparsa di plantule di specie legnose spontanee provenienti dalle aree circostanti;
- Nelle stazioni su versanti in ombra si verifica, dopo poco tempo, la scomparsa delle talee di salice, per cui vanno inseriti gli arbusti autoctoni della serie terrestre;
- Va sottolineata l'importanza della manutenzione con la possibilità di intervenire con la messa a dimora di nuove piante in periodi più favorevoli di quelli della piantagione, per sostituire le fallanze;
- È importante l'ammendamento del terreno di riempimento.

### **Bibliografia Par. 2.1**

BIONDI E, ALLEGREZZA M. 1996., "Inquadramento fitosociologico di alcune formazioni prative del territorio collinare anconetano". *Giorn Bot Ital* 130(1): 117–135.

BLASI C. (ed.), 2010. "La Vegetazione d'Italia". Palombi & Partner Srl, Roma.

BLASI C. et al., 2010, "Analisi e progettazione botanica per gli interventi di mitigazione degli impatti delle infrastrutture lineari" In ISPRA - CATAP, Ambiente, paesaggio e infrastrutture. Volume I, Manuali e Linee Guida n.65/2010, ISPRA

*I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

CELESTI-GRAPPO L., PRETTO F., CARLI E., BLASI C. (eds.), 2010. “Flora vascolare alloctona e invasiva delle regioni d’Italia.” Casa Editrice Università La Sapienza, Roma.

CORNELINI P., 2001. “Monitoraggio e sperimentazione di interventi di rivegetazione di scarpate in ambito mediterraneo.” Atti convegno EFIB AIPIN “Interventi di rivegetazione e Ingegneria Naturalistica per infrastrutture lineari”, Tarvisio 14-16 giugno 2001.

CORNELINI P., PALMERI F., SAULI G., 2002. “Le specie autoctone da impiegare negli interventi di Ingegneria Naturalistica.” *Acer* n.6.

FILESI L., 2006, “Generalità sulla vegetazione reale e sulle principali serie dinamiche del Lazio in Manuale di Ingegneria Naturalistica applicata alle sistemazioni di versante” Regione Lazio

PIGNATTI S., MENEGONI P., PIETROSANTI S., 2005. “Valori di biondicazione delle piante vascolari della Flora d’Italia.” *Braun-Blanquetia*, 39: 3-97.

## 2.2 L'EROSIONE DEL TERRENO E SOLUZIONI TECNICHE (F. Tecchio)

### 2.2.1 Che cos'è l'erosione idrica del terreno

L'erosione idrica del suolo è un processo naturale di dilavamento e asportazione delle particelle terrigene che formano il terreno vegetale ad opera delle acque meteoriche. Spesso il processo di erosione è aggravato dalle opere dell'uomo, in quanto peggiorano le condizioni del terreno.

#### 2.2.1.1 Fattori incisivi

I fattori che maggiormente incidono sull'attività erosiva sono:

- l'impatto da pioggia;
- tessitura, struttura e contenuto di materia organica del terreno;
- il deflusso delle acque sui pendii;
- altri processi, quali ad esempio l'azione del vento (erosione eolica).

#### 2.2.1.2 Principale causa di dinamica erosiva

Il fenomeno di maggior rilievo è di origine idrica, classificabile in quattro tipologie che si differenziano tra loro per le specifiche strutture erosive:

- 1) Erosione da impatto (*splash*): impatto dovuto alle gocce di pioggia;
- 2) Erosione superficiale (*sheet*): presenza di suolo saturo, che impedisce all'acqua di infiltrarsi creando così un deflusso superficiale;
- 3) Erosione a rigagnoli (*rill*): rilievo topografico aumentato, velocità di deflusso più elevate e prime incisioni del suolo con formazioni di microreticoli idrografici (Figura 2.13);
- 4) Erosione per fossi (*gully*): flusso concentrato, erosione fluviale retrograda, tasche di erosione molto profonde e tendenzialmente permanenti (Figura 2.14).

#### 2.2.1.3 Fattori concorrenziali

Molteplici sono i fattori che concorrono a condizionare le dinamiche erosive:

- Fattori climatici: legati all'azione erosiva delle precipitazioni e alla temperatura del suolo;
- Fattori geologici: legati al grado di permeabilità del suolo, alla tessitura e al grado di erodibilità;
- Fattori geomorfologici: in funzione alla lunghezza e pendenza delle scarpate a rischio erosione;
- Protezione vegetale: in funzione del grado di copertura vegetativa;

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

- Pratica di conservazione dei suoli: controllo del grado di erosione attraverso una corretta gestione del territorio.



*Figura 2.14 Gully.*



*Figura 2.13 Rill.*

### **2.2.2 Equazione universale relativa alla perdita di terreno**

Sviluppata negli Stati Uniti, consente di stimare l'erosione in termini di terreno e può dare un'indicazione in merito al contributo specifico di ognuno dei fattori sopra esposti.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

*A = Velocità annuale di erosione in t/ha x anno*

*R = Fattore relativo alle precipitazioni (varia tra 50 – 600)*

*K = Erodibilità del suolo (varia tra 0,05 – 0,7)*

*L = Lunghezza del pendio*

*S = pendenza scarpate*

*L x S = varia tra 1 e 40 passando da scarpate lunghe 3m e 16% di pendenza a scarpate lunghe 100m e pendenze del 100%*

*C = Indice di Copertura (varia tra 1 e 0,003 passando da assenza di vegetazione a copertura del 100%)*

*P = Indice relativo alla Pratica di Conservazione (varia da 1 a 0,5)*

### **2.2.3 Azioni di controllo dei processi erosivi**

Dall'equazione universale è possibile estrapolare che, nel momento in cui è necessario ridurre gli effetti dell'erosione superficiale e sviluppare un'azione di controllo, è indispensabile agire direttamente:

- sull'energia delle scarpate (rapporto tra L ed S);

## LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA

- sviluppando un'attività volta a migliorare la conservazione del suolo, attraverso l'Ingegneria Naturalistica (P);
- ricostituendo la copertura vegetale (migliorando il parametro C).

Confrontando tra loro i diversi parametri su cui è possibile agire, si evidenzia che i maggiori benefici si traggono dalla copertura vegetale, che pesa in modo determinante sull'abbassamento della velocità annuale di erosione nel medio-lungo periodo.

Nel breve periodo si può intervenire con tecniche quali: biostuoie o idrosemine potenziate con *mulch*, in grado di sviluppare un effetto protettivo temporaneo sui terreni fino alla crescita vegetativa.

A titolo esemplificativo e per dare un ordine di grandezza è possibile indicare i seguenti valori numerici:

*Tabella 2.1 Confronto tra metodi superiori contro l'erosione.*

| TIPOLOGIA INTERVENTO                 | VALORE INDICATIVO DI C | RIDUZIONE EROSIONE |
|--------------------------------------|------------------------|--------------------|
| Biostuoia                            | 0,3                    | 70%                |
| Idrosemina a mulch                   | 0,5                    | 50%                |
| Idrosemina a matrice di fibre legate | 0,005                  | 99,5%              |

### **2.2.4 Soluzioni superiori per la protezione del terreno contro l'erosione**

#### **2.2.4.1 Bioreti**

Le bioreti sono realizzate in fibre naturali, generalmente di cocco, juta o sisal, intrecciate in modo da formare una struttura a maglia aperta, capace di adattarsi al terreno e favorire la crescita della vegetazione. Inoltre, la loro struttura permette di ottenere diverse coperture a seconda del loro peso per m<sup>2</sup>, nello specifico: 400 – 500 – 700 e 900 g/m<sup>2</sup>.

Al fine di garantire un rapido insediamento della vegetazione sarà necessario un intervento di idrosemina post-installazione.



Figura 2.15 A sinistra biorete in fibre di juta, al centro biorete in fibre di cocco 400 gr/m<sup>2</sup>, a destra biorete in fibre di cocco 700 gr/m.

### Caratteristiche delle bioreti

Le bioreti sono biodegradabili ed ecocompatibili al 100%, assorbono l'acqua creando un microclima ideale per la germinazione del seme e dopo la biodegradazione aumentano la fertilità del suolo. Si distinguono dalle coperture sintetiche per la loro naturale resistenza ai raggi UV e permettono di risolvere i più gravi problemi di controllo dell'erosione grazie alla lunga durata e resistenza alla trazione.

La composizione chimica delle fibre naturali varia molto a seconda del materiale, in quanto ne determinando le proprietà fisiche e meccaniche. Un esempio sono le fibre di cocco, la cui resistenza e longevità funzionale saranno di un livello superiore rispetto alla juta, grazie al contenuto di lignina presente.

### Indicazioni di utilizzo

La scelta della biorete dipende soprattutto dal gradiente di pendenza della scarpata e le relative resistenze richieste:

Tabella 2.2 Confronto tra bioreti.

| <b>TIPO MATERIALE</b> | <b>PENDENZE</b> | <b>RESISTENZA ALLA TRAZIONE SECCA<br/>LONGITUDINALE/TRASVERSALE</b> |
|-----------------------|-----------------|---|
| BIORETE BIONET J500   | Fino a 3:1      |   |
| BIORETE COCCO C400    | Fino a 2:1      | LONG: 5.9 kN/m<br>TRASV: 4.4 kN/m                                   |
| BIORETE BIONET C700   | Fino a 1:1      | LONG: 14.4 kN/m<br>TRASV: 10.68 kN/m                                |

#### 2.2.4.2 Biostuoie

Costituita da fibre naturali fissate meccanicamente a una retina naturale o sintetica fotodegradabile. Rispetto alle bioreti, le biostuoie hanno una struttura chiusa, perfetta per la stabilizzazione dei pendii e per il rinforzo della vegetazione.

#### *Caratteristiche tecniche delle biostuoie*

I materiali più comuni con cui vengono realizzate le biostuoie sono: paglia e cocco, cocco (Figura 2.16), legno o paglia (Figura 2.17). Si tratta di un prodotto 100% biodegradabile, la cui decomposizione impiega dai 6 ai 24 mesi e grazie al quale vengono migliorate le condizioni del terreno. Inoltre, le **biostuoie pre-seminate** e **pre-concimate** sono un'ottima alternativa per tutti quei terreni dove non è possibile effettuare l'idrosemina.



*Figura 2.16 A sinistra biostuoia in fibre di paglia e cocco, a destra in fibre di cocco.*



*Figura 2.17 A sinistra biostuoia in fibre di legno ed a destra biostuoie in fibre di paglia.*



### 2.2.5 Sistema antierosivo a matrice di fibre legate

Rivestimento di una superficie attraverso l'applicazione di una matrice antierosiva miscelata ad altri prodotti naturali a copertura e aderenza totale al terreno per il rinverdimento, in condizioni particolarmente critiche, in alternativa ad una biostuoia (Figura 2.18).

Idrosemina MFL è efficace subito dopo l'applicazione (Figura 2.18) e non è richiesta alcuna preparazione particolare del terreno, portando così a notevoli risparmi di tempo e denaro.

Inoltre, garantisce un maggior controllo dell'erosione rispetto alle tradizionali biostuoie.



Figura 2.18 MFL Matrice Fibre Legate e sua applicazione.

#### 2.2.5.1 Confronto tra Matrice di Fibre Legate e le tradizionali biostuoie antierosive

La stesura e il fissaggio della biostuoia richiedono un intenso e oneroso impegno di manodopera, superfici irregolari, piante e detriti non ne permettono una perfetta aderenza, causando rigonfiamenti e possibili ruscellamenti sotterranei.

La Matrice di Fibre Legate MFL fornisce una copertura completa in un unico e semplice passaggio, la matrice aderisce perfettamente al suolo impedendone il dilavamento e attutisce l'impatto della pioggia, inoltre, agendo come idroretentore, la rilascia lentamente migliorando la germinazione.

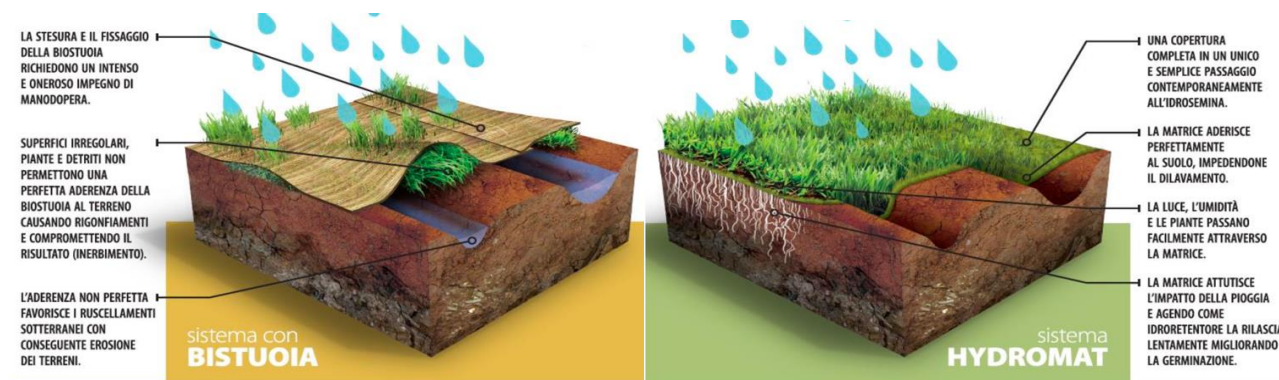


Figura 2.19 Confronto MFL e biostuoie.

### **Voce di capitolato**

Idrosemina mediante applicazione della **Matrice di Fibre Legate** (M.F.L.) effettuata in un uno o più passaggi, con macchina idroseminatrice con agitatore interno a pale ed ugelli appositamente strutturati ed approvati dalla D.L. che permettano una perfetta miscelazione e distribuzione di tutte le componenti del prodotto.

La **Matrice di Fibre Legate** dovrà essere così composta: 82% in peso di fibre di legno con oltre il 50% delle fibre di lunghezza media di 10 mm, prodotte per sfibramento termo-meccanico; 10% in peso di collante premiscelato polisaccaride ad alta viscosità, con capacità di creare legami stabili tra le fibre ed il terreno per un periodo di almeno 4-6 mesi e di non dilavarsi se ribagnato; 5% in peso di fibre sintetiche grimpanti fotodegradabili per aumentare la resistenza della matrice, 3% di agenti umettanti

La MFL sarà consegnata in sacchi da 25 kg e con ognuno si copriranno ca. 60 m<sup>2</sup>;

La miscela da applicare sulla superficie dovrà contenere le seguenti quantità minime di componenti per metro quadrato:

- 7-8 l di acqua
- 40 g/m<sup>2</sup>. di semente adatto al sito
- 150 g/ m<sup>2</sup>. di concime organico e minerale
- 400 g/ m<sup>2</sup>. di prodotto secco di **Matrice di Fibre Legate**,
- 6 g/ m<sup>2</sup>di biostimolatore del terreno.

### **2.2.6 Idrosemina**

Per “idrosemina” s’intende il rivestimento della superficie del terreno con una miscela complessa (costituita da: semi, collanti, concimi, mulch e additivi, quali biostimolatori della crescita, correttivi del terreno, idroritettori), distribuita per via idraulica a mezzo di idroseminatrice a pressione (Figura 2.20).

La miscela dev’essere applicata in maniera uniforme così da mantenere la composizione omogenea e l’idroseminatrice dev’essere dotata di un agitatore meccanico interno e di apposite lance per l’applicazione del prodotto. L’idrosemina può essere applicata in luoghi come: cavi, scarpate autostradali, parchi pubblici e giardini privati, aeroporti e potenzialmente qualsiasi area da seminare.



*Figura 2.20 Distribuzione idrosemina ed applicazione.*

### ***Finalità***

Lo scopo principale dell'idrosemina è inerbire superfici di terreno nudo soggette o meno a fenomeni erosivi. Nella maggior parte dei casi la presenza di tali fenomeni comporta la necessità di una protezione meccanica temporanea, che consenta alla vegetazione di svilupparsi ed assumere il ruolo antierosivo che le compete.

Oltre a questa protezione, in molte situazioni è necessario correggere condizioni pedologiche difficili o mitigare condizioni climatiche che renderebbero difficoltoso, se non impossibile, l'inerbimento.

Per queste ragioni le miscele per l'idrosemina si differenziano molto tra loro, variando la complessità in ragione delle funzioni che saranno tenute a svolgere.

### ***Vantaggi***

I vantaggi dell'idrosemina sono i seguenti:

- la miscela di semi, fertilizzanti, collanti e additivi crea sulla superficie un perfetto letto di semina;
- lo spargimento uniforme dato dall'acqua funge da veicolante e apporta una prima irrigazione;
- la vegetazione crescerà più velocemente e in maniera più uniforme grazie alla precisione dell'idrosemina.

### ***Individuazione del tipo di percorso***

Per fare la scelta corretta sul tipo di idrosemina da utilizzare è necessario valutare diversi aspetti:

- Geotecnici;
- Pedologici (composizione e granulometria del letto di semina);
- Altezza e pendenza dei siti;
- Climatici e altimetrici, inclusa epoca di semina;

- Accessibilità dei mezzi;
- Grado di efficacia richiesto;
- Disponibilità economiche;
- Aspettative del committente, calibrate con il giusto equilibrio tra sostenibilità tecnica ed economica.

### 2.2.6.1 Idrosemina potenziata con mulch

Questo sistema consiste nell'effettuare l'applicazione in un unico passaggio attraverso l'irrogazione di una miscela completamente naturale comprensiva di mulch in fibre di legno. È utilizzabile su superfici con pendenze non superiori a 30°, dove la semina semplice non può garantire risultati accettabili (Figura 2.22).

#### *Voce di capitolato*

Fornitura e posa di idrosemina potenziata a mulch in un passaggio, eseguita con idonea macchina idroseminatrice con miscelatore interno a pale, costituita da miscela di acqua, sementi, collanti, concimi e con miscela di fibre vegetali "Mulches".

La dose di sementi scelte certificate per provenienza e germinabilità (graminacee e leguminose) in condizioni normali sarà di almeno 50 g/m<sup>2</sup>; la concimazione di base con prodotto organo-minerale e microelementi, sarà di almeno 80-100 g/m<sup>2</sup>.; il colloide ad alta viscosità di origine naturale di ca. 8-10 g/m<sup>2</sup> per pendenze fino a 2:1; il mulch, composto da 100 % di fibra vergine di legno, lunga (10 mm min. sul 25% del totale) sfibrate termicamente, sarà di ca. 200 g.



*Figura 2.21 Applicazione idrosemina potenziata.*



*Figura 2.22 Copertura terreno idrosemina potenziata.*

### *2.2.6.2 Idrosemina a spessore*

Consente l'inerbimento su superfici anche di elevata pendenza e comunque in ambienti caratterizzati da condizioni generali critiche, Il sistema consiste nell'effettuare l'applicazione delle componenti in vari passaggi (almeno due).

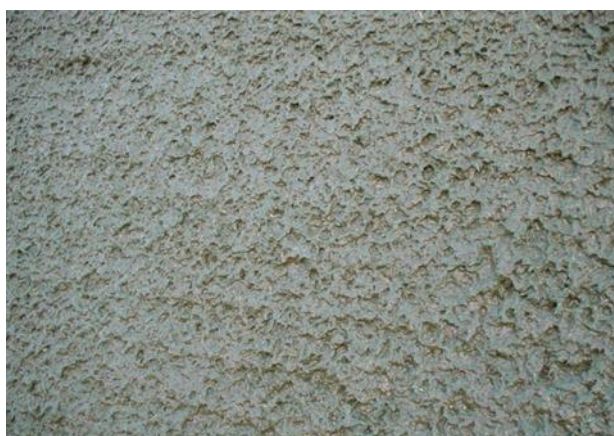
Il sistema di idrosemina a spessore permette di risolvere i problemi legati alla sterilità del terreno e su terreni privi di substrato attivo inoltre consente di ridurre o eliminare la necessità di riporto di terreno vegetale sulle scarpate oggetto dell'intervento.

#### *Voce di capitolato*

Fornitura e posa di idrosemina a spessore in due o più passaggi eseguita con idonea macchina idrosemnatrice con miscelatore interno a pale, costituita da miscela di acqua, sementi, concimi, collanti, humus vagliato, biostimolatori e idroretentori e con miscela di fibre vegetali "Mulches". Il totale dei prodotti applicati a non potrà essere inferiore a 1000 g m<sup>2</sup>. La dose di sementi scelte certificate per provenienza e germinabilità (graminacee e leguminose) in condizioni normali sarà di almeno 50 g/ m<sup>2</sup>; la concimazione di base con prodotto organo-minerale bilanciato e microelementi, sarà di almeno 150 g/m<sup>2</sup>; il colloidale ad alta viscosità di origine naturale di ca. 10-12 g/m<sup>2</sup> per pendenze fino a 1,5:1; idroretentori e biostimolatori, il mulch, composto da 100% di fibra vergine di legno, lunga (10 mm min. sul 25% del totale) sfibrate termicamente, sarà di ca. 400 g.



*Figura 2.23 Applicazione idrosemina a spessore secondo passaggio.*



*Figura 2.24 Particolare copertura.*

### **2.2.7 ABI-Ammendante Biotico Ingegnerizzato**

*ABI (Ammendante Biotico Ingegnerizzato)* è stato concepito appositamente come alternativa al topsoil/riporto di terreno: accelera lo sviluppo di terreni o substrati impoveriti, con poca materia organica, bassi livelli di nutrienti e limitata attività biologica. Infatti, terreni e substrati associati ai

## *LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA*

siti denudati da costruzioni, miniere, cave e altre attività antropiche sono intrinsecamente carenti di materia organica, nutrienti e attività biologica essenziali per l'insediamento vegetativo sostenibile.

### ***Vantaggi di ABI***

Ammendante Biotico Ingegnerizzato offre un elevato risparmio di tempo e denaro, infatti: 65 camion è l'enorme quantità necessaria a trasportare il terriccio o topsoil utile a coprire 1 ettaro di superficie con 10 cm (circa 15 m<sup>3</sup> per camion) e 4 giorni il tempo di lavorazione con escavatore.

D'altro canto, invece, 5000 kg di ABI forniscono la stessa quantità di componenti organici e nutrienti per il terreno: per l'applicazione basteranno solamente 10 idroseminatrici da 6000 litri con pompa volumetrica e un solo 1 giorno lavorativo.

Questo sistema è, inoltre, un'ottima soluzione qualora i terreni siano troppo umidi o impossibili da scavare, difficili da trasportare o spargere.

### ***Caratteristiche tecniche***

Ammendante Biotico Ingegnerizzato viene prodotto in modo sostenibile, evitando lo sfruttamento e lo spostamento di terreno vegetale;

Contiene elementi biologici chiave per dare il via a un'attività vegetativa vigorosa permettendo il corretto sviluppo delle radici e l'insediamento della vegetazione. Al tempo stesso avvia il ciclo dei nutrienti necessari per il rigenerarsi dei terreni impoveriti

Su terreni leggermente inclinati il rischio di erosione è basso, è per cui sufficiente applicare solo ABI.

In caso di scarpate più ripide, dove il potenziale d'erosione è più elevato in combinazione con ABI, l'applicazione della Matrice di Fibre Legate fornirà un controllo perfetto dell'erosione, con una maggiore longevità funzionale.

### ***Componenti***

ABI è composto da un blend di prodotti provenienti da fonti rinnovabili e contiene elementi biologici chiave per dare il via ad un'attività vegetativa vigorosa, permettendo il corretto sviluppo delle radici e l'insediamento della vegetazione e, al tempo stesso, avviando il ciclo dei nutrienti necessari per il rigenerarsi di terreni impoveriti.

ABI non è tossico ed è composto da fibre di legno che sono fitosanitizzate per eliminare potenziali semi di infestanti e agenti patogeni e da una miscela di sostanze umiche, amminoacidi, bio stimolatori, micorrize, biochar, tutti prodotti derivanti da fonti rinnovabili.



*Figura 2.25 Applicazione ABI su scarpata con idonei ugelli a “V”.*



*Figura 2.26 Dettaglio contenuto ABI – Ammendante Biotico Ingegnerizzato.*

*Voce di capitolato ABI – Ammendante Biotico Ingegnerizzato*

Ammendante Biotico Ingegnerizzato, progettato come alternativa al terriccio per accelerare lo sviluppo di suoli / substrati impoveriti con bassa materia organica, bassi livelli di nutrienti e attività biologica limitata. Prodotto utilizzando fibre di legno fitosanizzate ed una miscela brevettata di componenti per la costruzione del suolo che include biopolimeri polisaccaridici colloidali ad alta viscosità, biochar, estratto di alghe, acido umico, endomicorrize, amminoacidi e batteri benefici per il terreno.

Dopo l'applicazione ABI forma un legame con la superficie del terreno e crea una copertura continua, porosa, assorbente e flessibile che consente una rapida germinazione e una crescita accelerata delle piante. In base alle condizioni climatiche ABI può necessitare di 10-20 ore perchè sia perfettamente funzionale.

Quantità non inferiore a 500 g m<sup>2</sup>, 1 sacco per ca 40 m<sup>2</sup>.

*LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA*

L'applicazione dovrà avvenire con macchina idroseminatrice dotata di agitatore interno a pale e tramite ugelli appositamente strutturati e approvati dalla D.L. che permettano una perfetta miscelazione e distribuzione di tutte le componenti del prodotto.



### **2.3 PRODUZIONE E IMPIEGO DI FIORUME AUTOCTONO PER INERBIMENTI TECNICI (A. Ferrario, P. Lassini)**

#### **2.3.1 Fiorume autoctono: proprietà e tecniche produttive**

L'impiego delle specie erbacee autoctone negli interventi di Ingegneria Naturalistica spesso è condizionato dalla forte limitazione dell'offerta di mercato delle materie prime. Per quanto riguarda le specie forestali autoctone, sono stati fatti enormi passi in avanti negli ultimi decenni per realizzare un'offerta ampia di ecotipi locali, lo stesso passaggio non è avvenuto per i miscugli di specie erbacee autoctone locali. Di fatto, sul mercato si ha la disponibilità generalizzata di miscele di specie erbacee esotiche, selezioni agronomiche e, nel migliore dei casi, ecotipi di specie autoctone ma provenienti da situazioni ambientali molto lontane e differenti da quelle di impiego.

L'interesse per la ricostituzione di cenosi erbacee con materiali di provenienza locale si sta manifestando solo negli ultimi anni, nonostante tecniche di produzioni sono ormai note da tempo, ma il mercato italiano è rimasto notevolmente silente su questo tema.

Per far fronte alla necessità di disporre di sementi di piante erbacee per la realizzazione di inerbimenti, una soluzione ampiamente riconosciuta ma ancora oggi poco utilizzate è relativa all'impiego del fiorume.

La mancanza di una filiera produttiva e commerciale ampia che renda disponibile la grande varietà delle nostre specie erbacee è dovuta a vari motivi:

- ridotta divulgazione e conoscenza delle numerose ricerche e sperimentazioni già effettuate e consolidate;
- culturali e di non conoscenza delle specie autoctone locali e dei loro vantaggi;
- contrattuali, per la assenza di richieste vincolanti da parte degli enti appaltanti;
- commerciali, per il maggior costo delle sementi autoctone sia come miscele, semi in purezza e fiorume (giustificato del resto dai migliori risultati ottenibili oltre che dalla qualità);
- normativi, la legislazione non è chiara sia nelle prescrizioni progettuali che nella gestione completa della filiera commerciale.

Il risultato è che ad oggi la presenza sul mercato di fiorume e di seme autoctono in purezza è garantita da qualche ditta per quantità molto ridotte rispetto alle reali potenzialità produttive.

Il fiorume risulta essere il materiale più adeguato agli inerbimenti tecnici, in quanto:

- può essere prodotto tramite una filiera corta;
- può essere conservato per un certo numero di anni;
- può essere sottoposto ad una caratterizzazione standardizzata;

- permette di ricostituire comunità vegetali ricche di specie e coerenti con il contenuto ecologico locale.

Le sementi in purezza (in particolar modo di specie dicotiledoni) restano comunque sempre fondamentali per l'arricchimento floristico del fiorume, in particolare quando viene raccolto a quote basse e quindi costituito principalmente da specie graminoidi.

### ***Il fiorume***

Il termine fiorume è legato tradizionalmente ai residui di paglia e semi raccogliabili sul fondo dei fienili e il suo uso nel passato era limitato all'interno del ciclo aziendale. Oggi si intende come fiorume il miscuglio di sementi raccolto direttamente dalle praterie naturali con mezzi meccanizzati e poi migliorato con la trinciatura o selezione della componente inerte.

Dagli anni Ottanta del XX secolo, la nascita di una nuova sensibilità ai recuperi ambientali e all'utilizzo di materiale vegetale di propagazione autoctono, insieme alla diffusione dell'Ingegneria Naturalistica, promuovono vari progetti di sperimentazioni e ricerca, pervenendo ad una buona conoscenza scientifica e operativa dell'utilizzo del fiorume. Già a partire da questo periodo diversi autori (*Florineth, 1982; Spatz et al., 1987; Urbanska, 1990*) hanno messo in evidenza che, per la buona riuscita degli inerbimenti al di sopra del limite del bosco e su piste da sci, è fondamentale l'impiego di un miscuglio idoneo di sementi e, se è il caso, di piante alpine coltivate. L'uso del fiorume con approccio moderno è stato sperimentato con successo nel nuovo secolo, sia in Lombardia che in altre regioni del Nord Italia, pur su scale locali e ridotte.

Alcune regioni e enti hanno incentivato e si sono occupati particolarmente dell'impiego del fiorume. In Regione Lombardia sono stati realizzati, a partire dal 2008, una serie di progetti per lo sviluppo delle tecniche di produzione e impiego del fiorume, fino alla costituzione di una vera e propria filiera commerciale corta, grazie a finanziamenti di fondi PSR e di Fondazione Cariplo. In tutti i progetti il Centro Flora Autoctona della Regione Lombardia (in seguito CFA) ha avuto un ruolo determinante per mantenere una continuità sulla sperimentazione e la definizione della filiera finale (*Lassini e Ferrario, 2018; Ceriani et al., 2021*).

Altri progetti e iniziative avviate a livello regionale, relative all'uso del fiorume, sono stati realizzati, o sono in corso, in Valle d'Aosta, Piemonte, Veneto, Friuli-Venezia Giulia e Liguria.

In alcune nazioni europee il fiorume è molto più diffuso, è ben disponibile, regolamentato ed oggetto di ampia commercializzazione, così avviene in Germania e Austria.

Nonostante i progetti realizzati e la conferma operativa dell'utilizzo del fiorume, di fatto solo in tempi recenti si è avviata una filiera economica locale del fiorume, in particolare in Lombardia occidentale, e quindi una sua reale disponibilità sul mercato dei recuperi ambientali e delle rinaturalizzazioni. I

fattori ancora limitanti sono normativi e culturali. Normativi in quanto l'Italia e le Regioni hanno solo in parte adottato la deroga comunitaria che permette l'attuazione di una filiera semplificata rispetto alla complessa normativa dei prodotti sementieri di largo consumo. Culturale perché l'utilizzo delle specie erbacee autoctone non è ancora percepito nella sua importanza, analogamente a quanto viceversa avvenuto per le specie forestali arboree e arbustive.

### La filiera produttiva del fiorume

La definizione di una filiera chiara e trasparente (Figura 2.27a) è il presupposto per consentire di realizzare un'offerta di mercato il più possibile adeguata alla reale necessità di materiali per gli inerbimenti svolti annualmente. Di seguito vengono descritte le fasi principali.

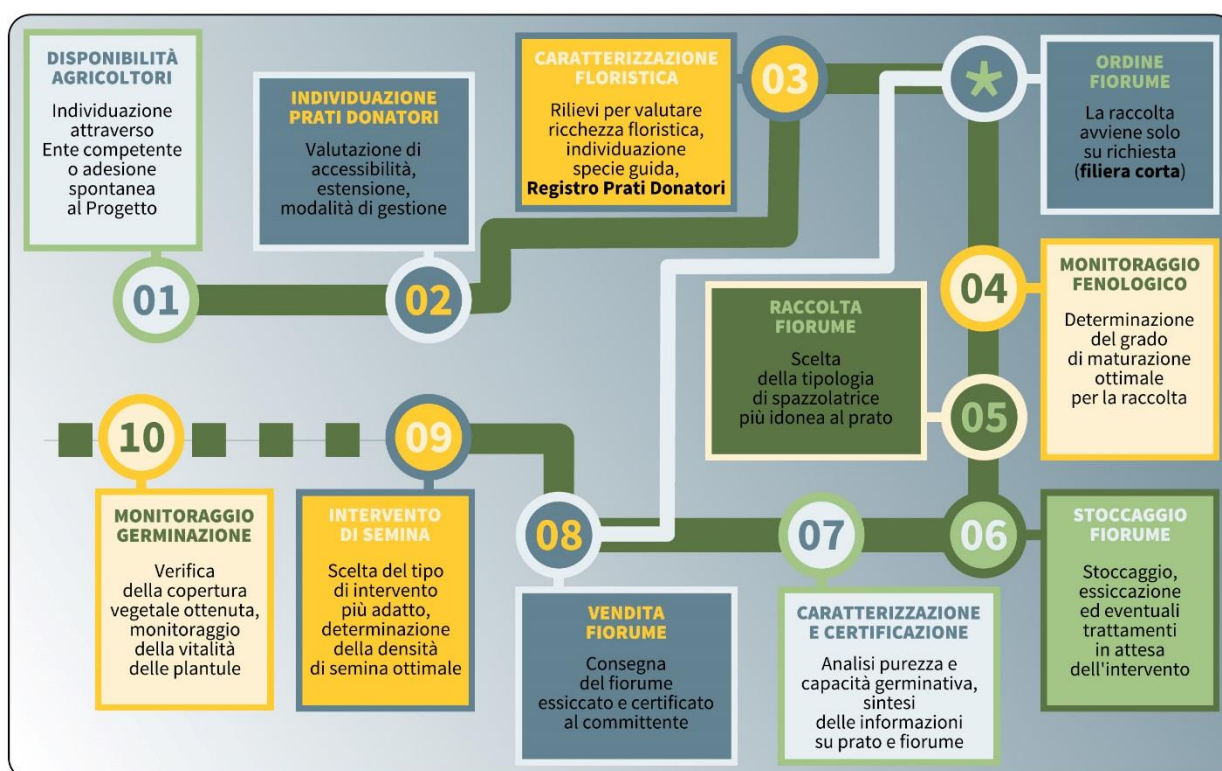


Figura 2.27a Schema della filiera del fiorume per una produzione su ampia scala (fonte Ceriani et al., 2021).

### I prati donatori, raccolta e trasformazione del fiorume

Il punto di partenza per produrre fiorume di qualità è l'individuazione di prati adatti a tale scopo. La vegetazione reale del sito donatore del fiorume deve essere corrispondente alla vegetazione potenziale del prato recettore, così come devono essere simili le condizioni stazionali di entrambi.

Per individuare adeguatamente un sito donatore, oltre alla vegetazione, si devono monitorare le caratteristiche stazionali relative al sito. Mediante rilievi floristico-vegetazionali, eseguiti in campo, il prato donatore viene attribuito ad una classificazione vegetazionale riconosciuta adottando i codici

## *LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA*

della Direttiva Habitat (92/43/CEE - Allegato I), individuando le specie guida (specie con la copertura maggiore nel periodo di raccolta), così da stimare preventivamente la composizione floristica e le proporzioni dei semi di ogni specie che costituiranno il fiorume raccolto. Nella maggior parte dei casi le raccolte vengono realizzati in prati riferiti come tipologia di vegetazione agli Arrenatereti (codice Habitat 6510 e 6520) e ai Brometi (codice Habitat 6210).



*Figura 2.28 Rilievo vegetazionale per la caratterizzazione del prato donatore (foto C. Mangiagalli).*

L'Università degli Studi dell'Insubria, in collaborazione con il CFA (Cerabolini, 2015), ha definito un Indice di Qualità (IQ) della vegetazione del prato che prevede sei classi crescenti, da pessimo a ottimo, in funzione dell'idoneità del prato alla raccolta di fiorume in relazione alle caratteristiche ecologiche lombarde. In tal modo è possibile dare un giudizio oggettivo e speditivo per valutare la qualità del prato donatore. Questo modello può essere adattato e replicato in altri contesti regionali. Per ogni prato donatore si definisce il periodo di raccolta ottimale privilegiando le specie più adatte all'inerbimento da realizzare e quindi controllando periodicamente lo stato di sviluppo dei loro semi in modo da avviare la raccolta nel momento di massima maturazione.

Il prato donatore deve:

- essere ubicato in zone compatibili per l'accesso dei macchinari per la raccolta;
- essere soggetto a modalità di gestione note;
- avere una composizione floristica tale da consentire lo sviluppo della vegetazione target (habitat);

### *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

- essere ricco in specie autoctone di pregio dal punto di vista ecologico ed eventualmente produttivo, con totale o ridotta presenza di infestanti;
- essere privo di specie esotiche e/o con loro presenza contenuta e localizzata o comunque non in grado di disseminare durante le fasi di raccolta del fiorume.

Il periodo di raccolta di ogni prato donatore si individua in modo da favorire la presenza nel fiorume dei semi delle specie più adatte all'inerbimento da realizzare (specie guida o target) e pertanto si monitora periodicamente lo stato di sviluppo dei loro semi in modo da avviare la raccolta nel momento di massima maturazione.



*Figura 2.29 Differenti stadi fenologici di Anthoxanthum odoratum (foto A. Ferrario).*

La quantità e qualità del fiorume raccolto sono correlate, alle caratteristiche della vegetazione e anche al periodo e alle modalità di raccolta.

Il fiorume viene raccolto con diverse tipologie di macchine con spazzole rotanti, trainate da un piccolo trattore o mezzo analogo. Le dimensioni delle macchine variano in funzione delle dimensioni dei campi di raccolta e della loro morfologia.

In situazioni di difficoltà di lavoro per la pendenza e/o o difficoltà di accesso, si impiegano spazzolatrici a spalla con rese inferiori. Più comunemente viene invece realizzata la raccolta con macchine spazzolatrici trainate. Il loro funzionamento consiste nello spazzolare l'apice degli steli delle piante che vengono raccolti in un cassone, la rotazione della spazzola crea anche una aspirazione che permette la raccolta anche dei semi più piccoli. Da un'analisi di dati ricavati da prati donatori lombardi di diverse tipologie, dai brometi agli arrenatereti, si perviene una resa media di circa 60 kg/ha. Questo valore è condizionato da una forte variabilità, con picchi massimi fino a 130 kg/ha.

## LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA

Sul mercato esistono diversi modelli di macchine spazzolatrici, acquistabili da diverse nazioni (Canada e Gran Bretagna). In Italia non esiste ancora un fornitore con una produzione industriale. Tuttavia, negli ultimi anni sono stati realizzati dei primi prototipi italiani per soddisfare le specifiche richieste delle aziende agricole che hanno dato avvio alla filiera commerciale, in particolare nell'area della Lombardia occidentale - Piemonte.



Figura 2.30 Raccolta con macchina spazzolatrice a spalla (a sinistra) e raccolta con macchina spazzolatrice trainata (a destra) (foto A. Ferrario).

Della biomassa complessiva raccolta, si ottiene una purezza in termini di peso di semi che varia dal 30 al 45 %. La resa (kg di fiorume/ha) è fortemente influenzata dal periodo di raccolta, con una resa significativamente maggiore nella 1° prima raccolta. La 2° seconda raccolta deve essere attivata solo in casi particolari e ad integrazione della prima, in relazione all'arricchimento con specie dicotiledoni. Il taglio del fieno dopo la raccolta di fiorume deve essere effettuato in senso opposto rispetto a quello di raccolta: utilizzando sfalciatrici rotanti non si hanno particolari difficoltà.

Dopo la raccolta è necessario far essiccare il materiale fino al raggiungimento di un livello basso di umidità, utile per la conservazione per più anni (Scotton *et al.*, 2012). La soluzione più comune è la stesura del materiale per alcuni giorni in un'area asciutta e ventilata, coperta e chiusa almeno su tre lati. Normalmente non è necessario né opportuno setacciare il fiorume per separare i semi dai residui vegetali e dal fieno: l'esperienza maturata ha infatti dimostrato che in realtà ciò che sembra "scarto" viene poi spesso aggiunto sotto forma di paglia, od altro additivo, alle miscele di semina per aumentare le probabilità di successo. Per cui la biomassa presente non vitale, viene definita *inerte*, viene mantenuta e, insieme alla porzione di semi fertili, costituisce il fiorume pronto per l'impiego. Solo in determinati casi si può valutare una setacciatura grossolana del raccolto.

Una volta essiccato, è opportuno effettuare la trinciatura del fiorume con carro miscelatore, o macchinari simili, per ridurre le dimensioni degli steli e omogeneizzare il tutto per favorire le modalità di semina. Il prodotto si conserva in sacchi, anche per lungo tempo (almeno 3-4 anni), in un luogo fresco e asciutto.



Figura 2.31 Essiccazione ed eventuale setacciatura grossolana del fiorume (foto A. Ferrario).

Talvolta, occorre arricchire il fiorume con semi di altre specie, poiché la raccolta diretta non sempre permette di ricostruire la complessa biodiversità del prato donatore. Può essere molto utile l'integrazione del fiorume con altro seme locale derivante da produzione *ex situ* in purezza e/o da una seconda raccolta (specie non comuni e/o interventi contenuti).

La quantità di semi di ciascuna specie dovrebbe essere selezionata in modo da promuovere un buon rapporto tra Poaceae e Fabaceae che hanno caratteristiche sinecologiche e autoecologiche complementari (Baldiraghi *et al.* 2009).



Figura 2.32 Filare per la produzione in purezza di Anthemis tinctoria (Foto A. Ferrario).

### ***La caratterizzazione e la commercializzazione***

Prima della commercializzazione, si procede alla caratterizzazione del prodotto. La caratterizzazione speditiva del fiorume, messa a punto e svolta in Lombardia, dal Centro Flora Autoctona (*Ceriani et al., 2021*), sulla base dei protocolli ISTA (*International Seed Testing Association*) per le sementi in purezza, definisce le seguenti caratteristiche:

- *Purezza*: contenuto in semi in termini di peso (% semi);
- *Contenuto in semi per unità media*: la quantità in termini numerici di semi effettivamente presenti in un grammo di fiorume (espresso in n° di semi/g di fiorume)
- *Germinabilità*: capacità del fiorume analizzato di produrre un certo n° di plantule trascorsi 30 giorni dalla semina (espresso il n° di plantule/m<sup>2</sup>). In funzione del dato ottenuto si calibra la densità di semina ottimale per il fiorume analizzato al fine di ottenere 8.000 plantule/m<sup>2</sup>, valore di riferimento per ottenere un inerbimento di successo (*Florineth, 2007*).

Questi parametri, insieme ai dati descrittivi dei prati dove è stato raccolto il fiorume, consentono di redigere una specifica scheda di caratterizzazione e certificazione per ogni lotto prodotto per il mercato. Attualmente solo il CFA è in grado di rilasciare tale attestazione.

Il prezzo di mercato del fiorume è definito in alcune aree da prezzari forestali locali, ad esempio in Regione Lombardia e in Provincia di Trento, con prezzi variabili da 10 a 35 €/kg. Il prezzo è variabile in funzione delle caratteristiche dei prati donatori che direttamente influenzano la qualità del materiale commercializzato. Tuttavia, per una corretta conoscenza delle modalità di impiego del fiorume acquistato, è importante poter disporre dei dati di caratterizzazione del fiorume venduto.

### ***2.3.2 L'impiego del fiorume nelle opere di Ingegneria Naturalistica***

Il ruolo della vegetazione erbacea nella Ingegneria Naturalistica è quello di “*starter*” per l'avvio del nuovo ecosistema che si vuole formare, per favorire le successive successioni vegetazionali, siano esse ancora erbacee o arbustive-arboree.

L'impiego corretto delle specie autoctone è essenziale per la formazione di nuove cotiche erbose, siano esse destinate al recupero ambientale, ad opere di Ingegneria Naturalistica o sistemazioni idraulico forestali, prati rustici, prati naturali, prati fioriti, verde urbano, rinaturalizzazione diffusa sulle capezzagne, rive dei fossi, bordi di strada.

Il modello vegetazionale a cui riferirsi deve essere la vegetazione reale e potenziale dell'area da rinverdire tenendo presente anche esigenze specifiche quali: la scelta di specie capaci di formare molta lettiera e sostanza organica, con diversi tipi di apparati radicali, e migliorare l'impatto visivo, con ciclo vegetativo lungo e copertura vegetale sempre presente durante tutto l'arco dell'anno o per lo meno per la maggior parte.



## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Nel recupero di aree vaste si dovrebbe tendere alla ricreazione di un mosaico di comunità vegetali, ambienti e fitocenosi rispettando le diverse situazioni e microhabitat stazionali spontaneamente presenti o ricreabili nell'area oggetto di recupero (*Baldiraghi et al. 2009*).

Un ruolo importante svolgono le fitocenosi erbacee che spesso vengono sottovalutate nella loro potenzialità naturalistica: prati permanenti soggetti a sfalci periodici, prati seminaturali, pascoli. Anche un terreno arido può essere valorizzato con un opportuno recupero.

La pianificazione degli interventi deve prevedere fin dall'inizio l'impiego di materiali autoctoni e di fiorume in particolare per consentire voci di spesa adeguate e l'ordinazione tempestiva del fiorume, non sempre disponibile per tempo. Ancora oggi i prezzari pubblici e privati in genere non espongono esplicitamente materiale di propagazione vegetale autoctono e non ne indicano il costo.

La maggior parte delle specie considerate è caratterizzata da semi che maturano in estate o in autunno. La semina autunnale, dopo le prime piogge autunnali, favorisce lo sviluppo delle graminacee con germinazione veloce, che consolidano il terreno mentre la semina primaverile favorirà le Fabacee e altre specie, con un'azione di arricchimento in azoto, che per rompere la dormienza necessitano di escursioni di temperatura e umidità che si hanno dopo le prime grandi piogge autunnali.

Inoltre, la semina in autunno o prima dell'inizio delle piogge è preferibile in zone calde e aride, mentre la semina primaverile consente di limitare i danni dalle gelate tardive. Per interventi in alta quota è preferibile intervenire durante la stagione estiva.

La densità di semina del fiorume deve essere valutata in funzione delle caratteristiche del fiorume e delle caratteristiche stazionali del sito ricevente: è consigliata una densità da 20-30 a 40-50 g/m<sup>2</sup>. La densità varia in base al contenuto in semi e alla germinabilità di ogni singolo lotto di fiorume, per cui è importante caratterizzare il fiorume da impiegare per non incorrere in densità di semina eccessive, con conseguente spreco e incremento dei costi, o scarse, quindi non in grado di garantire una copertura adeguata nelle prime fasi di crescita.

Negli interventi di recupero ambientale e nelle rinaturalizzazioni, il fiorume è utilizzabile per semina a spaglio o con idrosemina.

### ***Semina a spaglio manuale***

Il fiorume deve essere distribuito facendo attenzione ad usare in maniera omogenea il materiale all'interno del sacco, dato che per gravità tende ad avere più fibra nella porzione superiore del sacco e più seme nella porzione terminale dello stesso. Una maggiore uniformità di distribuzione si ottiene percorrendo l'area in due passaggi perpendicolari e dedicando metà del fiorume disponibile per ogni passaggio. La semina può essere seguita da una copertura di paglia a culmo medio (3-4 cm), o reti a scopo protettivo per evitare il dilavamento e favorire l'ombreggiamento iniziale.

### *Idrosemina*

L'intervento più usato per l'impiego del fiorume è l'idrosemina che in condizioni disagiate e di degrado permette di ottenere risultati migliori che con la distribuzione manuale. Essa consiste nella distribuzione a pressione di una miscela complessa formata da semente, mulch – fibra organica di paglia, torba, sfarinati etc., collante a base di amido, concime organico e/o inorganico e acqua. Attraverso un unico intervento il terreno viene seminato, fertilizzato, stabilizzato e il seme mantenuto umido dalle fibre della pacciamatura.

Attraverso l'apporto di fertilizzanti, ammendanti e mulch contemporaneo alla semina vera e propria, si riduce l'impatto delle acque meteoriche, si trattiene l'acqua e se ne favorisce l'infiltrazione; inoltre, si migliorano le condizioni stazionali formando un microclima ideale per la germinazione dei semi nel periodo più idoneo.



*Figura 2.33 Inerbimento di scarpata in cava con idrosemina di fiorume (foto A. Ferrario).*

In fase di semina, o immediatamente dopo, può essere aggiunta anche una copertura con paglia (meglio se trinciata), che aiuta a ridurre l'escursione termica e previene il disseccamento superficiale del suolo. Simili pacciamanti costituiscono inoltre un'efficace protezione del suolo dalla pioggia battente, sono in grado di prevenire l'erosione superficiale e il dilavamento dei semi.

Se la semina è finalizzata al controllo dell'erosione deve essere associata a sistemi per la regimazione delle acque superficiali (canalette, viminate, ecc).

L'inerbimento può essere abbinato ad altri interventi, quali rimboschimenti, gradonate, viminate, fascinate, cordonate, palificate, grate vive e terre rinforzate.

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Attraverso il monitoraggio dell'area da ripristinare può essere utile combinare sulla stessa superficie il processo di colonizzazione spontanea nelle aree più favorevoli e la semina nelle aree più difficili al rinnovamento e all'evoluzione naturale.

Secondo il CFA (*Ceriani et al., 2021*) si possono così sintetizzare alcuni dati sperimentali relativi agli interventi con fiorume monitorati:

- negli interventi con fiorume la densità ottimale è risultata per il 75% dei lotti inferiore ai 50g/m<sup>2</sup>, con una media pari a 20 g/m<sup>2</sup>;
- per inerbire artificialmente 1 ha attraverso l'impiego del fiorume occorre, in media, la raccolta derivante da 3 ha di prato donatore;
- in siti di pianura a un anno dalla semina viene rilevato circa il 25% delle specie presenti nel prato donatore (tasso di trasferimento);
- gli interventi ben riusciti comportano anche la scomparsa di specie sinantropiche e invasive indesiderate, tra le quali *Ambrosia artemisiifolia*;
- con il passare degli anni, si nota un progressivo e spontaneo ingresso delle specie presenti nella vegetazione circostante, con arricchimento floristico e maturazione del prato.

Inoltre, secondo Caccianiga (2016), monitoraggi a lungo termine hanno dimostrato che anche quando la composizione floristica del nuovo prato non raggiunge pienamente l'obiettivo originario, l'impiego di fiorume porta all'evoluzione di una situazione alternativa, nella quale le funzioni ecologiche si sono comunque ristabilite ed è in atto un corretto funzionamento dell'ecosistema.

### ***Le cure colturali***

Le cure colturali dopo l'impianto, da attuarsi a seguito di un costante monitoraggio, consistono principalmente in irrigazioni di soccorso, sfalci e risemie di rinforzo, quando necessario. Questi interventi sono fondamentali nei primi 3-5 anni per una buona affermazione della vegetazione e il riavvio dei cicli biologici, anche in relazione alla individuazione di motivi di stress localizzati causati da una pedologia differenziata, erosioni, danni da fauna, andamento climatico anomalo.

È opportuno che le cure colturali, per 3-5 anni, siano previste e parte integrante del progetto esecutivo di recupero ambientale, in modo da scongiurare ogni contenzioso tra diverse ditte incaricate e la conseguente interruzione delle cure stesse.

Le **irrigazioni** possono interessare almeno i primi due anni, in particolare nei terreni esposti a sud e poveri, in occasione di siccità tardo primaverile-estiva e devono essere programmate in relazione al fabbisogno di acqua del terreno ed al regime annuale di precipitazioni.

Gli interventi di **sfalcio** sono maggiormente necessari nei terreni fertili e con buona umidità rispetto ai terreni poveri. Lo sfalcio si inizia (eventualmente nel rispetto di buone pratiche faunistiche, per

## LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA

non danneggiare una eventuale nidificazione) quando la vegetazione copre integralmente il terreno e può richiedere 1-2 tagli/anno. Lo sfalcio nei primi anni non danneggia le specie introdotte e deprime in genere le infestanti. L'eventuale sviluppo dominante delle leguminose nel lungo periodo non impedirà lo sviluppo delle associazioni vegetali proprie dell'area. Lo sfalcio consuetudinario per la fienagione a regime è utile per la conservazione del prato e il mantenimento di una buona biodiversità. L'eventuale gestione con pascolo deve rispettare le buone pratiche tradizionali, in particolare per quanto riguarda il carico animale sopportabile.

Nelle aree in cui l'intervento non ha dato risultati adeguati di copertura si provvede a delle *risemine*, valutando la opportunità di lavori di miglioramento del terreno. Con le *trasemine*, effettuabili anche 3-4 anni dopo la semina, previo sfalcio e arieggiamento del terreno, si inseriscono specie erbacee mancanti per una composizione floristica ottimale, senza tuttavia danneggiare lo strato erbaceo esistente.



*Figura 2.34 Scarbate ripristinate dopo 4 anni dall'intervento di inerbimento con fiorume, mantenuta con un intervento di sfalcio all'anno. Si rileva una ricca presenza di specie tipiche dei prati locali con abbondante fioritura di Anthyllis vulneraria in primo piano (foto A. Ferrario).*

Le condizioni iniziali potrebbero favorire l'insediamento di specie esotiche indesiderate e per il loro contenimento si deve perseguire la piena affermazione e copertura del terreno con le specie autoctone, lasciando l'uso di prodotti fitosanitari a casi eccezionali e a seguito di attenta valutazione.

Il nuovo habitat potrebbe favorire inizialmente il prevalere massivo di alcune specie animali, quali arvicole e conigli, che tuttavia sono destinate a riequilibrarsi nel tempo con l'evoluzione della vegetazione e l'arrivo di specie concorrenti e rapaci. Un bioindicatore ottimale per valutare il successo

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

dell'inerbimento è il monitoraggio dei Lepidotteri ropaloceri, particolarmente legati agli habitat prativi.

L'inserimento della fauna locale e non invasiva può essere aiutato con opere di incentivazione della fauna selvatica, quali piccole pozze di acqua, nidi artificiali, posizionamento di ramaglia.

### ***Bibliografia Par. 2.3***

Baldiraghi R., Milanesi A., Allegrini A., Piccio A., Meisina C., Rossi G., Dominione V., Bogliani G., Gaiani G., Notti D., Fumagalli C., Mocchi F., Mondoni A. 2009. *Linee guida per il recupero ambientale delle aree di cava in Provincia di Pavia*. Provincia di Pavia, Settore Tutela Ambientale. 211 pagine. Pavia.

Caccianiga M., 2016. *Implementazione di strategie ex situ per la conservazione di specie della flora autoctona lombarda*. Università degli Studi di Milano. 92 pagine.

Cerabolini B.E.L., Bottinelli A., 2015. *Progetto POA – Produzione Ottimizzata Autoctone (Produzione di fiorume autoctono certificato da prati ad alta biodiversità)*. Relazione finale. Università degli Studi dell'Insubria.

Ceriani R.M., Bellingardi J., Ferrario A., Merati M., Cerabolini B.E.L., 2021. *Fiorume. Guida alla raccolta*. Parco delle Orobie Bergamasche.

Florineth F., 1982. Begrünungen von Erosionszonen im Bereich und Über der Waldgrenze. *Zeitschrift für Vegetationstechnik* 5: 20-24.

Florineth F., 2007. *Piante al posto del cemento*. Il Verde Editoriale. 280 pagine. Milano.

Lassini P., Ferrario A., 2018. A servizio del territorio. *Acer* 3/2018: 61-63.

Scotton M., Kirmer A., Krautzer B., 2012. *Manuale pratico per la raccolta di seme e il restauro ecologico delle praterie ricche di specie*, Cooperativa Libreria Editrice Università di Padova. 131 pagine. Padova.

Spatz G., Park G.J., Weis G.B., 1987. Untersuchungen zur Einwanderung autochthoner Arten auf planierten und begrunten Schipisten in der subalpinene und alpinen Stufe. *Natur und landschaft* 62: 293-295.

Urbanska K.M., 1990. Standortgerechte Skipistenbegrünung in hochalpinen Lagen. *Zeitschrift für Vegetationstechnik* 13: 75-78.

## 2.4 **TECNOSUOLI E RECUPERO DELLE TERRE E ROCCE DA SCAVO (G. Pirrera e L. Ferrara)**

### 2.4.1 **Premessa**

In un'epoca, dominata dai disastri per il *Climate Change*, sarebbe riduttivo e fuorviante immaginare di poter risolvere i problemi della siccità semplicemente guardando alla piovosità e all'accumulo e alla rigenerazione delle acque. Intervenire sulle piante è fondamentale, proprio per intervenire sul Clima, ma occorre sempre ricordare che le piante, per crescere, necessitano di suolo, oltre che di acqua di suolo. Proprio quei suoli che si perdono nelle aree a rischio desertificazione e che l'erosione si controlla tramite le tecniche antierosive di Ingegneria Naturalistica. Ricaricare i terreni fertili perduti, le terre agrarie, non più risorse illimitate, ed anche i *topsoils* sugli strati delle serie geologiche, diviene così azione fondamentale da associare alla ricarica delle falde.

Anche le Amministrazioni Pubbliche e le Aree di Sviluppo Industriale devono adottare un approccio diverso per la gestione del verde e del paesaggio urbano in un'ottica di economia circolare recuperando dai costi di smaltimento dei rifiuti che comunque dovrebbero affrontare a vantaggio della qualità della vita e per la riduzione del degrado urbano dei centri storici con ancora segni di bombardamenti del secolo scorso (Palermo ad esempio), delle aree di margine e delle aree industriali impermeabilizzate ed a volte abbandonate per i sogni industriali degli anni '60 miseramente falliti. Dopo gli esempi virtuosi spagnoli (Vitoria Gasteiz, Città del Verde Europea 2012) di ormai un decennio fa, adesso anche in Italia, finalmente alcune Città, come Torino, cominciano ad occuparsene. In pratica, si prende consapevolezza che non si possono sprecare le potature e gli scavi. Occorre trovare substrati di coltivazione alternativi alle terre agrarie e a tutte le terre necessarie per le opere di stabilizzazione (es: grate vive) e consolidamento (es: palificate vive doppie) tipiche dell'Ingegneria Naturalistica.

I tecnosuoli rappresentano infatti una soluzione non solo per le Città e soprattutto per “*ripristinare le terre degradate comprese quelle colpite da desertificazione, siccità e inondazioni*”, come previsto nel sub-obiettivo 15.3 dell'OSS (*Sustainable Development Goals SDGs* di cui Agenda 2030 dell'ONU), oltre che nell'obiettivo 12 “Consumo e produzione sostenibili”, 13 “Agire per il clima” e in ambiti più antropizzati gli obiettivi 3 “Garantire una vita sana e promuovere il benessere di tutti a tutte le età” e 11 “Rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, duraturi e sostenibili”.

La desertificazione è ormai intesa in modo più ampio come DLDD (*Desertification Land Degradation & Drought*) ed include concetti relativi a pressioni migratorie, biodiversità, servizi ecosistemici, conflitti sulle scarse risorse naturali, stabilità socio-economica e sviluppo sostenibile (UNCCD, *United Nations Convention to Combat Desertification*, 1996). Infatti, la necessità di fornire notevoli volumi di suolo per azioni di recupero ambientale efficaci (oltre all'impiego di specie

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

autoctone con caratteristiche biotecniche idonee e a rapido sviluppo) in un'ottica di economia circolare, impone il ricorso ai tecnosuoli quali recupero e trattamento di risorse, altrimenti sprecate per esser smaltite come rifiuti. Il riutilizzo come tecnosuoli, oltre che valorizzare materie prime seconde, influisce sulla riduzione economica, ma anche dell'impronta ecologica (*Carbon FootPrint*) per la riduzione dei costi dei trasporti delle merci e delle forniture di suoli agrari ma anche dell'impronta ecologica (*Carbon FootPrint*) che depaupererebbero altri siti di prelievo. L'approccio alle *Nature Based Solutions NbS*, si concretizza in azioni che favoriscono processi naturali in un'ottica di economia ecologica rispetto all'uso di materiali ottenuti più ecosistemicamente, ispirato sotto forma di "aiuti" da parte della natura: dal mare quali i (residui di biomasse spiaggiate, come *Posidonia oceanica*), dagli animali (cavalli, mucche, lombrichi, etc.), dall'agricoltura (sfalci, sarmenti di vite e ulivo), dalla città (FORSU Frazione Organica del Rifiuto Solido Urbano, scarti organici dalla manutenzione del verde, etc), dall'industria dell'energia (digestato liquido) e dalle cave (Terre e rocce da scavo).

Questa visione di riutilizzo è peraltro conforme alle linee guida del principio DNSH (*Do No Significant Harm*) per il quale tale pratica diviene a tutti gli effetti un "investimento sostenibile" nel rispetto delle linee guida recentemente emesse<sup>5</sup>.

Alle esigenze del riuso e dell'economia circolare, l'approccio olistico non può trascurare l'approccio pedologico per gli adattamenti alle singole esigenze delle produzioni o delle piante per usi paesaggistici.

Le filiere ne traggono vantaggio con sinergie interdisciplinare per il coinvolgimento di diversi operatori economici, pubblici e privati, dei settori dell'edilizia, delle cave, dei trasporti e naturalmente

---

<sup>5</sup> Nuovo strumento di valutazione ambientale dalle enormi potenzialità ma anche dai notevoli rischi, nella cornice del suo principale ambito di applicazione atteso, il PNRR (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza) e la sua attuazione (misure, investimenti, progetti). Il principio **DNSH** (Do No Significant Harm) è previsto dal Regolamento (UE) 2020/852, del 18 giugno 2020, relativo all'istituzione di un quadro che favorisca gli investimenti sostenibili (cosiddetto Regolamento Tassonomia), definendo "**investimento sostenibile**" le attività economiche che contribuiscono a raggiungere un obiettivo ambientale e/o un obiettivo sociale, a condizione però che tali investimenti "non arrechino un danno significativo" a nessuno di questi obiettivi. Tenuto conto del ciclo di vita dei prodotti e dei servizi forniti da un'attività economica, questa non deve arrecare un danno significativo ai sei obiettivi ambientali contemplati nel regolamento Tassonomia, ovvero: a) alla mitigazione dei cambiamenti climatici; b) all'adattamento ai cambiamenti climatici; c) all'uso sostenibile e alla protezione delle acque e delle risorse marine; d) all'economia circolare, compresi la prevenzione e il riciclaggio dei rifiuti; e) alla prevenzione e alla riduzione dell'inquinamento dell'aria, dell'acqua o del suolo; f) alla protezione e al ripristino della biodiversità e degli ecosistemi. Con riferimento ai PNRR (Piani Nazionali di Ripresa e Resilienza) dei Paesi dell'Unione Europea, il 12 febbraio 2021 è stato emanato uno specifico documento "**Orientamenti tecnici sull'applicazione del principio "non arrecare un danno significativo" a norma del regolamento sul dispositivo per la ripresa e la resilienza**" (COMUNICAZIONE DELLA COMMISSIONE (C(2021) 1054 final). In esso, e nei rispettivi Allegati, vengono ripresi gli obiettivi ambientali sopra enunciati dal Regolamento Tassonomia e vengono proposti gli approcci secondo i quali deve essere applicato il principio DNSH nel contesto del dispositivo per la ripresa e la resilienza (*Recovery and Resilience Facility*, RRF), ovvero nell'attuazione delle misure in esso previste e contenute.

dei rifiuti. Indispensabile però considerare che non è necessario realizzare prodotti commerciali standard che necessitano di spazi ampi per aree di selezione e stoccaggio ed impianti costosi (tramogge, vagli, etc.), ma è invece indispensabile per ogni cantiere e per ogni opera di manutenzione ipotizzare riusi possibili di rifiuti che altrimenti sarebbero costi che paga la comunità.

Primi riusi in ambito urbano sono stati fatti anche per il verde pensile a Torino ed in Sicilia sfruttando le pomice laviche associate ai terreni commerciali. Diverse sono le sperimentazioni già attuate in aree siciliane per contrastare il rischio desertificazione e non solo: dalle aree archeologiche di Pietraperzia (Enna), alle aree di cava del Parco sub urbano Portella del Cerriolo a Custonaci (Trapani), fino al verde urbano con il Parco della Salute, i *tree box* della sede AIPIN Sicilia e Calabria a Palermo e il Parco storico dell'Hotel Excelsior Palace. Queste esperienze hanno confermato la possibilità di intervenire, efficacemente e a costi contenuti, con suoli artificiali, anche nelle le opere di Ingegneria Naturalistica (SWB) e nella successiva manutenzione delle stesse con risultati naturalistici sorprendenti.

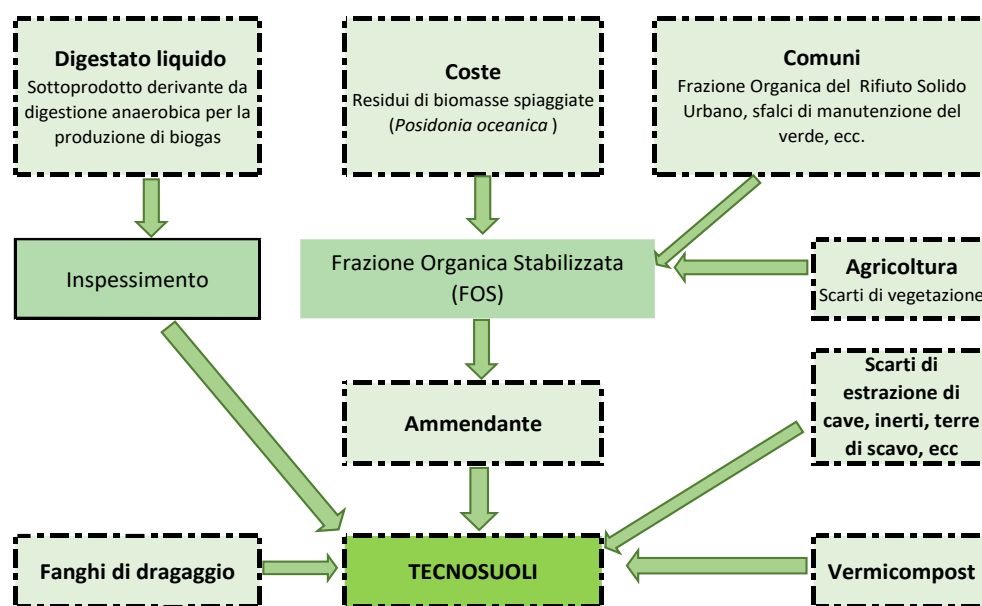


Figura 2.35 Schema dei possibili componenti per la realizzazione di tecnosuoli

#### 2.4.2 Componenti dei Tecnosuoli e Cenni Normativa Italiana

I tecnosuoli sono quindi dei suoli di origine antropica, derivanti dalla miscela di più componenti, quali scarti di vegetazione, biomasse spiaggiate (in genere in percentuali non inferiori al 5-20%) e terre e rocce da scavo e inerti strutturanti per la costituzione dello scheletro del suolo, le cui composizioni variano a seconda dell'uso (agricoltura, ricarica dei terreni, bonifiche, etc.) e delle disponibilità di pezzature degli inerti, e formulazione chimico-fisica complessiva della miscela.



## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Le esigenze delle piante possono indurre ad una insufficiente miscelazione di potature cippate con terre e rocce da scavo, ma aggiungere ammendanti, eventualmente provenienti da compostaggi del verde, più difficilmente da quelli dei rifiuti organici. Tra questi, certamente tutti gli invenduti dei compost che non rientrano nelle tabelle normative per essere commercializzati, composti azotati, o del fosforo o del potassio, per un necessario bilanciamento dei nutrienti NPK e persino, per particolari necessità agronomiche, con additivazione, nelle buche delle piantagioni agricole, di inoculi di biostimolanti microbici a base di micorrize per favorire gli sviluppi radicali.

Senza necessità specifiche di piante la miscelazione porta comunque a *proto-suoli* che nel tempo diverranno tecnosuoli agrari specie se agevolati da piante, leguminose in particolare.

A livello normativo mancano ancora degli standard in Italia, al contrario che in alcuni paesi europei quali la Spagna, la Germania e l'Inghilterra ("British Standard"). Tuttavia, rare eccezioni regionali, il Piemonte tra queste, aiutano ad incoraggiare gli Enti pubblici, ma al contempo limitano concentrazioni eccessivi potenzialmente pericolose (Cromo, Nichel, Cobalto, Boro). È per questo che, oltre che l'art. 184 bis del D.Lgs. 152/2006, le norme sul riuso delle terre e rocce da scavo devono esser un punto di riferimento indispensabile per le Concentrazioni limite.

Segue una breve analisi delle principali componenti ed eventuali riferimenti di carattere legislativo, che in alcuni casi ne regola le modalità e le quantità di utilizzo.

### ***Terre e rocce da scavo***

Per «terre e rocce da scavo» si intende: *il suolo escavato derivante da attività finalizzate alla realizzazione di un'opera, tra le quali: scavi in genere (sbancamento, fondazioni, trincee); perforazione, trivellazione, palificazione, consolidamento; opere infrastrutturali (gallerie, strade); rimozione e livellamento di opere in terra. Le terre e rocce da scavo possono contenere anche i seguenti materiali: calcestruzzo, bentonite, polivinilcloruro (PVC), vetroresina, miscele cementizie e additivi per scavo meccanizzato, purchè le terre e rocce contenenti tali materiali non presentino concentrazioni di inquinanti superiori ai limiti di cui alle colonne A e B, Tabella 1, Allegato 5, al Titolo V, della Parte IV, del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, per la specifica destinazione d'uso.*

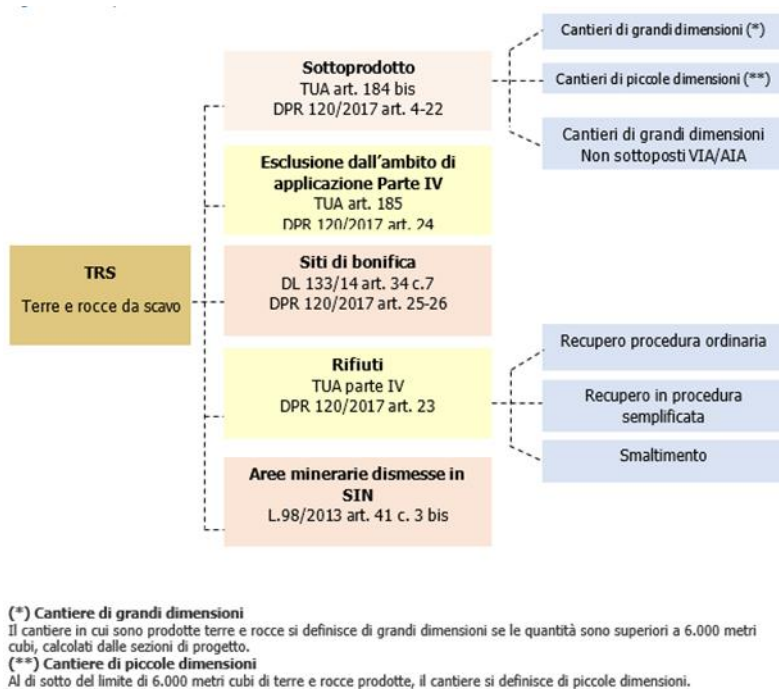


Figura 2.36 Schema gestione delle terre e rocce da scavo secondo il D.P.R. 13 giugno 2017, n. 120.

Sono soprattutto quelle a matrice terrosa e ghiaiosa che derivano da opere infrastrutturali che sono idonee anche perché, a differenza dei pietrischi hanno una più difficile probabilità di riuso in edilizia e per opere stradali e quindi sono le prime a prestarsi ad un riutilizzo per i tecnosuoli in alternativa a rifiuti onerosi da smaltire ed ingombranti. La gestione delle terre e rocce da scavo e dei materiali derivanti da costruzioni e demolizioni è attualmente regolata dal **D.P.R. 13 giugno 2017, n. 120**. **In generale, ove sussistano i requisiti di legge, si persegue l'obiettivo di reimpiegare la totalità delle terre, inquadrandoli non come rifiuti, ma come sottoprodotti delle attività lavorative, in accordo con le disposizioni di cui all'art. 184-bis del Dlgs 152/2006 e ss.mm.ii.**

Secondo la normativa vigente (Allegato IV DPR 120/2017), il rispetto dei requisiti di qualità ambientale dei materiali da scavo è garantito quando il contenuto di sostanze inquinanti all'interno del materiale stesso sia inferiore alle Concentrazioni Soglia di Contaminazione (CSC) di cui alla Tabella 1 allegato 5, al Titolo V parte IV del decreto legislativo n.152 del 2006 e s.m.i., con riferimento alla specifica destinazione d'uso urbanistica, o ai valori di fondo naturali

L'esperienza acquisita sui tecnosuoli ed i suoli tecnogenici ci porta a considerare la possibilità di utilizzare direttamente come "substrato di coltivazione" per l'agricoltura, e con maggior sicurezza per gli interventi di recupero ambientale, ciò che dagli scavi profondi riesce a rientrare, per separazione le sabbie e le argille eventualmente presenti. Infatti, in base a quanto previsto nell'Allegato 4 del D.lgs 75/2010 "Riordino e revisione della disciplina in materia di fertilizzanti, a norma dell'articolo 13 della legge 7 luglio 2009, n. 88", sono definibili come "substrato di coltivazione" preparando le matrici minerali delle argille e delle sabbie, aggiungendo degli

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

ammendanti (che potranno essere compost verde prodotto in loco a partire dalla cippatura di sfalci, o compost misto con altri materiali organici).

Si consideri infine che gli impianti di recupero veri e propri con vagli, mezzi meccanici etc. facilmente riescono a reimpiegare i sopravvagli per l'edilizia. Per cui comunque si riesce a riutilizzare sia la parte a favore dei tecnosuoli e lo scarto percentuale che diviene anch'esso una risorsa.

### ***Posidonia oceanica***

*Posidonia oceanica* è una fanerogama marina endemica del Mar Mediterraneo. Si tratta di una pianta dalla spiccata importanza ecologica. Le ampie foreste sottomarine, popolate dalle più svariate specie animali, sono riserve O<sub>2</sub> e baluardi naturali contro l'arretramento della linea di costa.



*Figura 2.37 Banquettes di Posidonia oceanica presso la baia di Cornino (TP).*

Le foglie trasportate dalle mareggiate, specialmente durante il periodo autunnale e invernale, si accumulano lungo la linea di costa, formando le cosiddette *banquettes*, delle strutture caratteristiche a gradino, che proteggono la costa dall'erosione. Benché lo spiaggiamento di tali residui abbia un importante ruolo nell'ecosistema costiero, non irrilevanti sono le problematiche derivanti dalla loro gestione. Nelle zone molto frequentate dai bagnanti, specialmente con l'approssimarsi della stagione estiva, la pubblica amministrazione e i gestori degli stabilimenti balneari spesso sono costretti ad intervenire rimuovendo i residui. Questi residui sono in realtà ricchi di sostanza organica e se opportunamente trattati, sono una risorsa importante da poter impiegare nell'ambito delle opere di Ingegneria Naturalistica. La normativa italiana ha abrogato con il D. lgs. 75/2010 il divieto di utilizzare la Posidonia spiaggiata come matrice compostabile, concedendone l'uso nel limite del 20% in peso della miscela iniziale previa separazione della frazione organica dalla eventuale presenza di sabbia.

### Vermicompost

Il vermicompost è un ammendante derivante dall'azione digestiva dei lombrichi del substrato di partenza (che può essere sia scarti vegetali sia stallatico), di pezzatura fine, simile alla torba, microbiologicamente stabile e attivo, con un basso rapporto C/N, un'elevata porosità ed elevata capacità di ritenzione idrica, contenente molti elementi nutritivi per le piante, in forme facilmente reperibili per la loro nutrizione. Si tratta di un ammendante di ottima qualità in quanto migliora le caratteristiche chimico-fisiche del terreno; contiene sostanze ad azione fitormonale per la crescita delle piante e l'attecchimento radicale; riduce dello shock da trapianto; trova impiego in agricoltura biologica e migliora le potenzialità agronomiche di compost e derivanti da materiali organici e no. È possibile l'utilizzo solo per prodotti certificati dal *Ministero dell'Agricoltura*; in Figura 2.38 viene riportata, ad esempio, una composizione di un prodotto certificato.

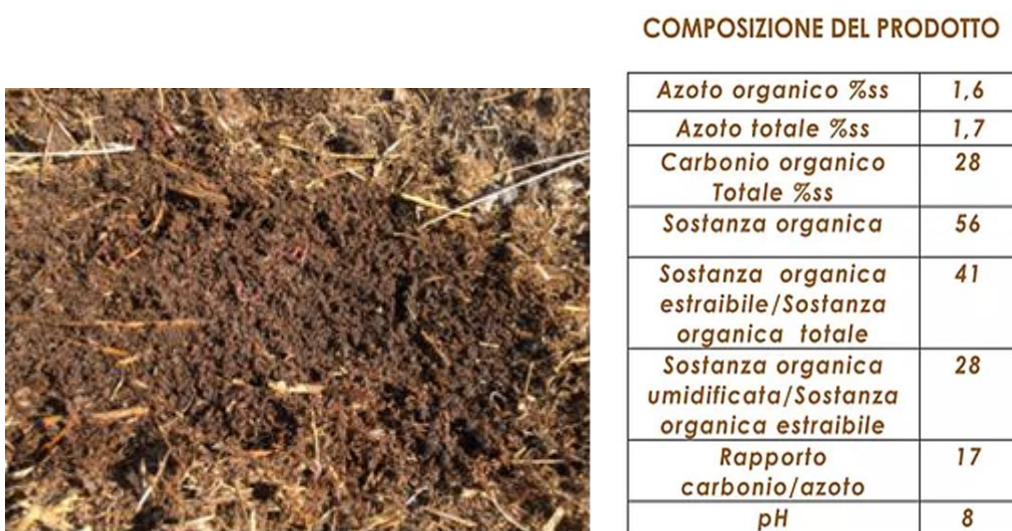


Figura 2.38 Vermicompost da stallatico equino.

### Digestato solido e liquido

Oltre che i rifiuti organici solidi, anche quelli in fase liquida possono esser riutilizzati per arricchire i tecnosuoli. Il digestato è un sottoprodotto derivante dai processi di digestione anaerobica di stallatico, scarti alimentari, rifiuti organici solidi di varia provenienza per la produzione di biogas e ammendante.

Rispetto alle biomasse di partenza, si presenta omogeneo, con un tenore di umidità più elevato perché parte della sostanza organica è stata degradata biologicamente. La sostanza organica che rimane risulta più stabile e contiene **elementi, quali azoto, fosforo e potassio**, che possono tornare al suolo per fornire nutrimento alle colture. L'utilizzo agronomico del digestato come fertilizzante **garantisce l'apporto di elementi nutrizionali in sostituzione dei concimi di sintesi**, per di più in forma già facilmente utilizzabili dalle piante ( $\text{NH}_3$  piuttosto che  $\text{NO}_x$ ). Il digestato in uscita dall'impianto viene

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

solitamente sottoposto ad una (o più) separazione solido-liquida che porta alla produzione di due frazioni: una solida (**palabile**), perfettamente sostituibile al letame, e una liquida (**chiarificata**), assimilabile ad un concime ammoniacale minerale.



*Figura 2.39 Prove sperimentali di ispessimento del digestato liquido (Biocity Engineering 2018).*

### ***Fanghi di dragaggio***

Il dragaggio è l'operazione di escavo e/o pulizia dei fondali marini, lacustri, dei canali navigabili o irrigui, dei bacini idrici, eseguita mediante draghe (macchine scavatrici) per asportare sabbia, ghiaia e detriti da un fondo subacqueo poco profondo. I sedimenti possono essere impiegati per ricavare materiale da utilizzare per il recupero di terra dal mare o per altri scopi edilizi. Fino a tempi abbastanza recenti, tuttavia, la metodologia privilegiata è stata quella dell'immersione in mare. Nel primo caso è necessario che i materiali dragati soddisfino una serie di requisiti e siano utilizzati in conformità a determinate condizioni, ossia che non superino i valori delle concentrazioni soglia di contaminazione e non costituiscano rischi per le matrici ambientali interessate, specie relativamente alla contaminazione delle acque sotterranee e superficiali (cfr. art. 184-quater del D. Lgs. n. 152/2006). L'immersione in mare, teoricamente diviene autorizzante solo quando è dimostrata, nell'ambito della relativa istruttoria, l'impossibilità tecnica o economica del loro utilizzo ai fini di ripascimento o di recupero oppure del loro smaltimento alternativo.



*Figura 2.40 Campioni di sedimento prelevato per analisi chimiche batteriologiche ed ecotossicologiche.*

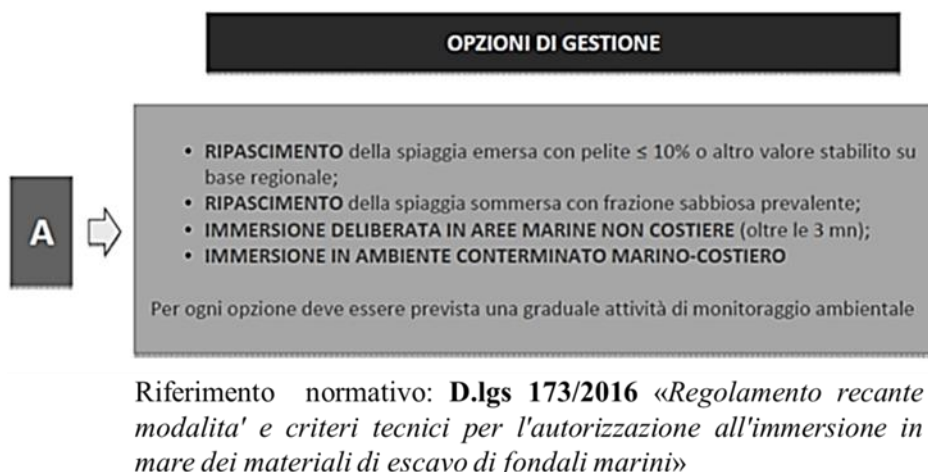


Figura 2.41 Opzioni di gestione dei sedimenti classificati - Riferimento normativo: D.lgs 173/2016 «Regolamento recante modalita' e criteri tecnici per l'autorizzazione all'immersione in mare dei materiali di escavo di fondali marini»

### 2.4.3 Casistica

#### 2.4.3.1 Area archeologica «Le Rocche», Pietraperzia (Enna)



Figura 2.42 Ortofoto dell'insediamento di Le Rocche (rilievo aerofotogrammetrico a cura di Arkeos - volo UAV del 91/07/2014).

Nel 2014, in occasione intervento di prevenzione rischio desertificazione in area archeologica (Le Rocche) a Pietraperzia, è stato impiegato un tecnosuolo costituito da terre di scavo e FOS di scarti di vegetazione.

In particolare, nell'area sono stati effettuati i seguenti interventi: semine a spaglio e con fiorume, muretti a secco e lunette con muretti a secco, terrazzamenti, cuscini organici, stuoie organiche in juta, grata viva, messa a dimora di specie ad elevata capacità biotecnica, messe a dimora di lecci e querce, microbriglie con fascine di ramaglia. Molta attenzione è stata data alla scelta delle specie da

## I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

impiegare, sia per aspetti legati al paesaggio antico, essendo in area archeologica, sia per le caratteristiche biotecniche per consentire il consolidamento dei terreni.



Figura 2.43 Realizzazione grata viva e produzione di tecnosuolo (2014).

Oltre all' olivastro, mandorlo (cresce in terreni completamente nudi), quercia e fico, ma anche il carrubo, il sorbo, il pero selvatico, il rosmarino, l'origano e soprattutto il timo, molto ben caratterizzante il territorio delle "Rocche". Solo pochi esemplari di ginestra e rovi, perché possono divenire invasivi. Particolare attenzione per le semine, compreso il finocchio selvatico anche perché su alcune di queste si è certezza d'uso sin da epoca preistorica in Sicilia, e quindi anche a Pietraperzia.

Tra le altre specie utilizzate: *Ampelodesmos mauritanicus*, *Asparagus acutifolius.*, *Asparagus albus.*, *Asphodelus microcarpus*, *Capparis spinosa*, *Cistus spp.pl.*, *Euphorbia dendroides*, *Ficus carica.*, *Pistacia terebinthus*, *Pistacia lentiscus*, *Pistacia vera*, *Smilax aspera*, ecc., *Teucrium fruticans*, *Urginea maritima.*, *Verbascum sinatum*.

Il progetto è stato occasione per condurre studi e ricerche sulle caratteristiche biotecniche degli apparati radicali delle graminacee mediterranee.



Figura 2.44 Messe a dimora anno 2014 (a sinistra), stato dei luoghi anno 2019 (a destra).

#### 2.4.3.2 Parco sub-urbano Portella del Cerriolo (Trapani)

Il Parco sub-urbano Portella del Cerriolo si trova a Custonaci (Trapani), il secondo Comune a maggior rischio desertificazione della Sicilia. Abitato sin dalla preistoria, ha oggi una fisionomia del paesaggio vegetale e una composizione floristica profondamente influenzate dalle attività antropiche: in particolare agricoltura ed estrazione di marmo. Inoltre, il litorale è interessato da notevoli spiaggiamenti a banchi di posidonia che sono un fattore positivo per la difesa naturale contro l'erosione costiera, dall'altro ma che rappresentano un problema per la balneazione e conseguenti onerose rimozioni, spostamenti temporanei e smaltimenti. Il caso studio, anche per la vicinanza della Riserva Monte Cofano, è importante per la conservazione della biodiversità floristica e vegetazionale della provincia di Trapani.

Nell'ambito del progetto *“Primi interventi finalizzati a contenere il fenomeno della desertificazione nel Parco sub-urbano Portella del Cerriolo”*, realizzati negli anni 2014-2015, con finanziamento PO- FERS 2007-2013, si sono eseguite delle opere di Ingegneria Naturalistica al fine di ridurre l'elevato rischio desertificazione che caratterizzava l'area.



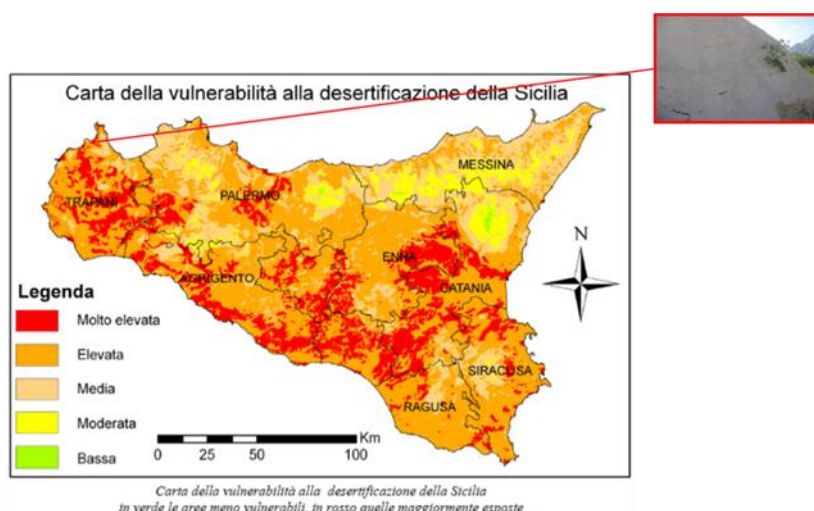


Figura 2.45 Carta della vulnerabilità alla desertificazione della Sicilia.

Nel Parco si sono effettuate opere di stabilizzazione delle scarpate, aumento delle coperture vegetali, miglioramento della regimazione delle acque, in particolare semine e idrosemine, realizzazione terrazzamenti mediante gradonate e cordonate vive, messa a dimora di arbusti autoctoni, formazione di cuscini organici, biorulli, etc.



Figura 2.46 Biorulli (sinistra), realizzazione di tecnosuolo (a destra).

Tali interventi sono stati caratterizzati per la prima volta dal primoimpiego sperimentale di compost di *Posidonia oceanica*, proveniente dalla vicina spiaggia di Cornino, stoccata localmente dal 2014 e dilavata naturalmente per azione delle piogge.

Il riutilizzo degli scarti vegetali compostati, congiuntamente alle terre di scavo, rappresenta quindi il recupero di una risorsa utile per il controllo dell'erosione nell'intero territorio ed una riduzione dei costi di smaltimento per l'Amministrazione Comunale e privati cittadini. Al fine di ammortizzare i costi di manutenzione sono stati utilizzati gli sfalci di potatura, il materiale vegetale derivante dalla raccolta differenziata e *Posidonia oceanica* per produrre compost verde. L'ammendante compostato

## LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA

è stato successivamente miscelato con del terreno di scarto, per produrre un tecnosuolo elementare poi impiegato per la ricarica di terreno nelle aree ad alto rischio desertificazione e nelle opere di Ingegneria Naturalistica realizzate. Con l'obiettivo di ottimizzare il processo di compostaggio, è stata realizzata la preliminare triturazione ed omogeneizzazione del materiale vegetale in ingresso, in modo tale da renderlo maggiormente utilizzabile da parte dei ceppi batterici, responsabili del processo di stabilizzazione. Durante il processo di stabilizzazione, i microorganismi degradano la massa in ingresso in un mese circa, producendo un substrato stabilizzato (FOS).



*Figura 2.47 Area di progetto (in alto) e sperimentazione con FOS (in basso).*

Si tratta di un processo fortemente esotermico, pertanto, laddove le temperature dovessero essere superiori rispetto a quelle ottimali di esercizio, si procederà al rivoltamento del substrato, avente il duplice effetto di dissipare calore ed ossigenare la massa vegetale. Considerati i limitati volumi di materiale vegetale in ingresso, il processo biologico è stato realizzato disponendo il substrato in cumuli rivoltabili. L'umidità dei cumuli è stata monitorata in continuo e controllata mediante processi di umettamento della massa vegetale. Per l'utilizzo come tecnosuolo è stata miscelata la FOS prodotta con terre di scavo. È stato così prodotto un suolo artificiale in cui le terre di scavo rappresentavano lo scheletro, mentre la sostanza organica stabilizzata rappresentava la frazione utile per la vegetazione.

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Nel caso di *Posidonia oceanica* è necessario per legge che il suo contenuto in peso non superi 1/5 della massa complessiva del tecnosuolo prodotto ai sensi del D.lgs 75/2010.

La perdita di suolo, valutata tramite l'impiego del modello USLE (*Universal Soil Loss Equation*), si è ridotta al punto da far ricadere l'area nella classe di rischio più bassa. L'efficacia degli interventi di inverdimento realizzati ha generato anche dei benefici dal punto di vista ecologico, infatti, l'utilizzo di specie rigorosamente autoctone ha consentito l'innescarsi di fenomeni di evoluzione vegetazionale verso comunità spontanee. L'idrosemina ha giocato un ruolo fondamentale nell'aumento della fertilità del suolo, che ha favorito la propagazione sia delle specie originariamente presenti nell'area, sia di specie invasive.



*Figura 2.48 Idrosemina e Hydromulching.*

Da un punto di vista globale le opere di Ingegneria Naturalistica hanno avuto un'ottima riuscita, come si evince dalle immagini sottostanti, soprattutto per la riduzione delle pendenze con i muri ciclopici e per una riattivazione floristica soprattutto a partire dalle fascine e dai biorulli organici e per diffusione del germoplasma raccolto attraverso semina e trapianti di cespi di graminacee.

Il monitoraggio multidisciplinare è stato redatto predisposto da un'equipe da diversi professionisti (geologi, biologi, ingegneri, naturalisti, agronomi) ed ha riguardato le opere di Ingegneria Naturalistica, l'ecologia e la botanica, la pedologia, l'idraulica e il rischio erosione. Esso è stato articolato in tre fasi durate quattro anni, dal 2014, anno di realizzazione delle opere, sino al 2017. È iniziato nel periodo tra aprile e ottobre 2014, in una fase durante la quale con i lavori erano ancora in corso, mentre dal V monitoraggio con i lavori conclusi. Un ulteriore sopralluogo tecnico conclusivo è stato effettuato nel settembre 2018.

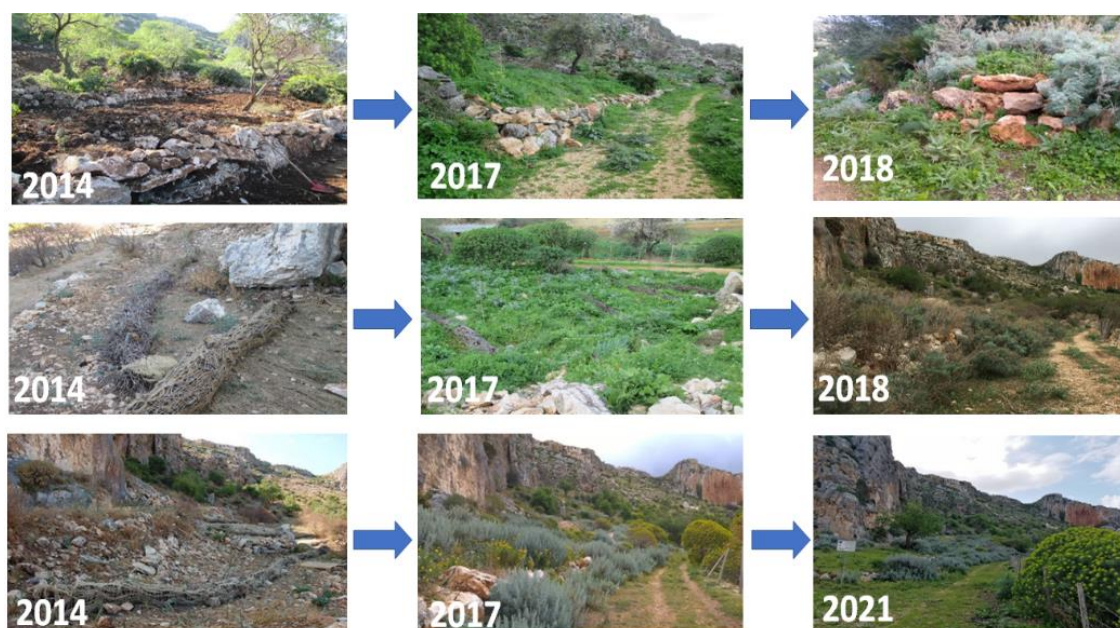


Figura 2.49 Foto monitoraggio dal 2014 al 2021.

Il progetto ha ricevuto il premio internazionale ECOMED nell'ambito della X Conference AEIP-APENA-ECOMED, Bioengineering in the Mediterranean Area, che si è tenuta il 21, 22, 23 Novembre 2018 a Madrid ed è stato menzionato come “buona pratica” dalla Corte dei Conti Europea nella Relazione speciale n.33 2018 - Combattere la desertificazione nell’UE: di fronte a una minaccia crescente occorre rafforzare le misure.

#### 2.4.3.3 *Treebox per deimpermeabilizzazione urbana affidate dal Comune di Palermo ad AIPIN Sicilia*

Nel 2015 AIPIN Sicilia ha preso in affidamento la gestione dell’area a verde in via Enrico Albanese 90 a Palermo. Riconoscendo la grande importanza degli alberi per il drenaggio delle acque piovane e per l’invarianza idraulica, richiesta dal Piano Regionale Rischio Alluvioni, l’AIPIN Sicilia prende in affidamento le tre aiuole per promuovere la campagna di de-impermeabilizzazione urbana.

La caduta di tre alberi ha dato l’occasione di trasformare le aiuole esistenti in superfici drenanti tramite *tree box*. L’aumento della superficie a verde migliora la capacità di infiltrazione dell’acqua e l’invarianza idraulica.

La tecnologia utilizzata adotta soluzioni altamente efficaci per il drenaggio meteorico e per la suzione. Gli alberi sono messi a dimora all’interno di “*tree box*”, con una stratigrafia che fa uso di lapilli e massi lavici etnei, per aumentare proprio la capacità drenante. I tre esemplari di Ginkgo vengono sorretti da tre tutori per il supporto degli alberi giovani, scelti con tre tipologie differenti a scopo didattico.



Figura 2.50 A sinistra, treebook con i Ginkgo Biloba messi a dimora. A destra, tre tipologie differenti di tutori utilizzati a scopo didattico per supportare la crescita dei giovani alberi di Ginkgo biloba.

È stata l'occasione per sperimentare anche in ambito urbano l'efficacia dei tecnosuoli e l'impiego di FOS (Frazione Organica Stabilizzata) di *Posidonia oceanica* spiaggiata (la stessa impiegata a Custonaci di cui al paragrafo precedente).

Si prevede la sostituzione della pavimentazione esistente con tipologia drenante per l'aumento dell'infiltrazione delle acque.

#### 2.4.3.4 Parco della salute (Palermo)

Inaugurato il 18 dicembre 2016, il Parco della Salute, è un centro aggregativo che prevede lo svolgimento di attività ed eventi divulgativi e per l'erogazione di servizi di assistenza socio-sanitaria.

Il progetto ha riqualificato un tratto di costa urbana di Palermo che da anni versava in condizioni di degrado, anche perché occupata da residui da bombardamenti, restituendolo alla collettività.



Figura 2.51 Parco della Salute.

Il progetto, estremamente semplice nelle sue scelte distributive si connota come un intervento a volumetria zero ed è stato realizzato grazie all'impegno concreto di un partenariato pubblico privato e al concreto impegno di tante associazioni e privati e ciascun attore coinvolto ha dato il proprio contributo. Questo spazio pubblico è caratterizzato dall'ideale prosecuzione, verso il mare, del Cassaro. A questo asse centrale si "appendono" i vari spazi verdi tematici che ospitano campi attrezzati, giochi inclusivi e percorsi sensoriali. Le attività favoriscono l'integrazione culturale per il rafforzamento di una società multietnica. Il parco dispone di percorsi dedicati alla educazione ambientale, come "il giardino delle alofite mediterranee", un giardino botanico unico nel suo genere che riproduce un impianto di macchia mediterranea a due passi dal mare, e che prosegue sulla scogliera, con scopi divulgativi e educativi. Il progetto ha visto inoltre la riqualificazione e consolidamento di una scogliera (circa 290 mq) di detriti da bombardamenti all'interno del Parco della Salute, tramite il recupero di materiale locale (pietrame prelevato dal fondo marino, "basole" stradali in pietra abbandonate in loco, gomene) e la realizzazione di "verde tecnologico" tramite cuscini organici in juta riempiti da tecnosuolo, derivato da un mix costituito da terriccio vulcanico etneo, scarti di invenduto di vivai, il tutto organicamente arricchito la vermicompost derivato da stallatico equino. Tali interventi sono stati associati allo spargimento di fiorume e semi di specie già presenti all'interno del Parco e messe a dimora di gran parte delle specie del "giardino delle alofite" e quindi coerenti con l'area fruibile del Parco, come *Atriplex alimus*, *Tamarix africana*, *Phillyrea angustifolia*, *Juniperus phoenicea*, *Olea oleaster*, *Rosmarinus officinalis*, *Crithmum maritimum*, *Limonium* spp.

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Particolare attenzione è stata posta all'espianto di specie alloctone e/o invasive, l'esclusione di specie storicizzate (fico d'india) ed anche di un *Ficus* sp., che è stato espantato e reimpiantato in un'altra posizione più idonea all'interno del Parco. L'idea, al fine didattico e conoscitivo della scogliera riqualificata, è quella di creare, all'interno del parco della salute, un erbario in cui siano raccolte le specie alofite del sito, in primis la consociazione *Chritmo-Limonieto* ed altre tipiche del paesaggio in esame così che la scogliera funga come una sorta di "orto botanico".

Per avviare il ripristino dell'area, è stata effettuata, preliminarmente, ad opera di volontari e scolaresche in data 31/10/2019, una raccolta e rimozione dei rifiuti depositati nella scogliera. Sono seguite poi due giornate di manutenzione e monitoraggio e un cantiere didattico gratuito di manutenzione e monitoraggio a cura della Sezione Interregionale AIPIN Sicilia Calabria, partner del Parco, in data 26 febbraio 2020.



*Figura 2.52 Cantiere didattico AIPIN Sezione Interregionale Sicilia Calabria 26 febbraio 2020.*

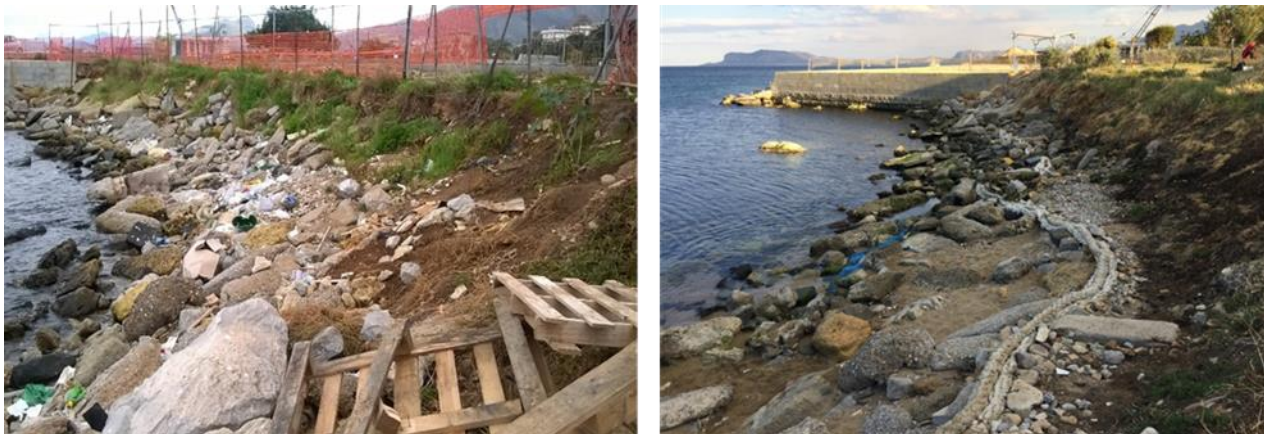
*Nature Based Solution* da Economia circolare:

- Recupero terreni di scarto vivaismo per la realizzazione di 12 m<sup>3</sup> di "verde tecnologico" ed in particolare di tecnosuoli
- Recupero «basole» stradali abbandonate lungo la linea di costa e una grossa corda marina («gomena») per delimitare la sentieristica;
- Rinvenimento di spiaggetta per estrazione pietrame dal fondalemarino;
- Recupero di germoplasma (cespi e semi) all'interno del parco di specie alofile e a bassa manutenzione in grado di colonizzare rapidamente il suolo.

Tutti i lavori sono stati realizzati in economia, senza nessun finanziamento, grazie alle donazioni pervenute al Parco e con la collaborazione di volontari, scolaresche, stagisti italiani, africani e polacchi nell'ottica dell'inclusività (altro obiettivo perseguito dai *Goals* dell'Agenda 2030

## LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA

Il Parco ha ottenuto la SEGNALAZIONE per la Sezione “Verde Urbano” del Premio “*La Città per il Verde*” edizione 2020 per la 5a Categoria – Enti pubblici, Strutture private a finalità pubblica, Associazioni di volontariato.



*Figura 2.53 Confronto ante e post operam.*

### 2.4.3.5 Giardino storico dell’Hotel Excelsior Palace di Taormina (Messina)

Dal 1904, anno di realizzazione dell’Hotel Excelsior Palace di Taormina, è trascorso oltre un secolo che nel Giardino storico dell’Hotel Parco si manifesta tra le tante piante centenarie (Cipressi, Dracene, Ficus, Pini), di cui ben 5 sono state riconosciute dal Ministero come Monumentali ed inserite nell’Elenco Nazionale<sup>6</sup>.



*Figura 2.54 Hotel Excelsior Palace di Taormina (Messina).*

Il Parco è, infatti, da un paio d’anni desideroso di affermarsi come Giardino Storico secondo la Carta di Firenze del 1981, perché impiantato parallelamente a quel 1904 in cui fu edificato l’Hotel più

---

<sup>6</sup> D.M. N.9022657 del 24/07/2020 - Terzo aggiornamento dell’elenco nazionale degli Alberi Monumentali



## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

antico di Taormina. La proprietà della famiglia Bottari, la cui signora era legata sentimentalmente a Venezia, determinò uno stile moresco e Liberty *art nouveau*, in cui si inseriscono le stelle ebraiche dell'antico quartiere di Taormina. Il Parco che si gode dalle camere e che hanno visto soggiornare ospiti illustri, si è sviluppato su un lungo promontorio di circa 310 metri, con una larghezza variabile tra i 25 ed i 30 metri, e che guarda l'Etna, il teatro greco, il golfo di Naxos, Castelmola e Madonna della Rocca. Dall'alto trionfano i grandi cipressi che svettano sugli ampi ficus coevi.



*Figura 2.55 Ficus macrophylla inserito nell'Elenco Nazionale degli Alberi Monumentali del Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali presso il Giardino storico dell'Hotel Excelsior Palace di Taormina (Messina).*

Grande è la storia testimoniata da questi alberi monumentali che oggi si vuol valorizzare con l'intero patrimonio del verde, ricco di centinaia di specie e con criteri di sostenibilità (recupero degli scarti di vegetazione, dei vecchi tronchi e una fertilizzazione esclusiva di vermicompost certificato).

Obiettivi degli interventi:

- rifacimento aree verdi sotto conifere con fertilizzazione con vermicompost.;
- ricostituzione Parco sensoriale con sentieri e percorsi multisensoriali olfattivi, tattili, visivi e didattici, di piante officinali e aromatiche siciliane;
- miglioramento aree inutilizzate del parco.

Nel corso dei lavori di valorizzazione è stato redatto un primo elenco floristico con le specie censite nel parco. Sono state riscontrate vegetazioni con specie mediterranee e ornamentali e anche invasive. Le specie censite sono in totale 135, e sono state suddivise in mediterranee (a loro volta suddivise in erbacee, arbustive e arboree), alloctone invasive e ornamentali e storicizzate.

Le specie storicizzate sono quelle come il fico d'india, l'agave, l'aloè, etc. Esotiche, seppur naturalizzate da così tanto tempo da essere ormai considerate tipiche del paesaggio siciliano.

**Bibliografia Par. 2.4**

Pirrerà G., Ferrara L.M. (2019) University of Milano-Bicocca, Milano “*Technosoils as an help from Nature & Anthropocene Activities to ecological restoration*”, Nature and society facing the Anthropocene challenges and perspectives for landscape ecology, 10th World Congress of the International Association for Landscape Ecology, SIEP IALE

Pirrerà G., Ferrara L.M. (2018) – “*New Scenarios From Ecological Restoration Work to contain the Risk of Desertification in Custonaci*” X AEIP-APENA-EFIB-ECOMED conference: Soil and Water Bioengineering in the Mediterranean ecoregion. ECOMEDBIO EFIB Award-European Soil and Water Bioengineering for “Better communication in the congress”, Madrid Spain

Pirrerà G. (2018) - “*Recupero di Materiali di Scarto per la Prevenzione del Rischio Desertificazione a Custonaci (Trapani – Sicilia)*”, Affrontare la desertificazione nel Mediterraneo col Cocoon, Roma

Pirrerà G., Calvo R., D’asaro F., Ferrara L.M., Lo Nardo C. (2017) “*Technosoils for the prevention of desertification risk*” - L’Ingegnere Italiano - n. 3/2017 - Edizione Speciale World Engineering Forum 2017 PAG.57, 59

Pirrerà G. (2017) “*Acqua&Suolo: la rinaturazione come motore di sviluppo*” - Sicily: Landscape in motion. Lo sviluppo del paesaggio nelle strategie di sostenibilità, Giarre, Catania, Italia.

Pirrerà G., Ferrara L.M. (2017). “*Utilizzo di frazione organica stabilizzata da scarti di vegetazione e di vermicompost per i tecnosuoli*” 3rd International Symposium of Soil and Water Bioengineering - Materials and Techniques in Ecological Restoration, Sant’Agata di Militello, Messina, Italia

Pirrerà G., Ferrara L.M. (2017) “*Recupero di scarti di vegetazione e ammendanti compostati per la prevenzione del rischio desertificazione*” Convegno Ingegneria Naturalistica in Ambito Mediterraneo, Roma, Italia

Pirrerà G., Ferrara L.M. (2017). “*Applications of woosworms and materials for prevention the desertification risk and technosoils*” International Symposium on Soil and Water Bioengineering in a Changing Climate, Glasgow, Scotland, UK.

Ferrara L.M. (2017). “*Effetti del vermicompostaggio su residui di Posidonia oceanica*” Tesi di laurea, Università degli Studi di Palermo

*I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Calvo R. Pirrera G., D'Asaro F. (2016) "*Materiale orgánicos de reúso para las obras de Bioingeniería del Paisaje*" IX Congreso Internationale Bioingeneria del paisajie EFIB San Sebastian Donostia

## 2.5 COMPENDIO DI TECNOLOGIA DEL LEGNO, CON CENNI SU DURABILITÀ E PROPRIETÀ MECCANICHE (M. Togni)

### 2.5.1 Introduzione

Il legno è da annoverare tra i più moderni materiali per qualsiasi tipo di impiego. Questa materia prima è infatti assai innovativa in quanto racchiude in sé tutte quelle proprietà che caratterizzano i materiali frutto delle tecnologie più avanzate. Ecco elencate le più importanti:

- **Naturale:** prodotto con "sistemi non inquinanti", in quanto frutto della coltivazione del bosco. Al contrario di quanto avviene per tutti gli altri materiali, i siti di produzione della "materia prima" forniscono un notevole contributo positivo alla conservazione dell'ambiente e della biodiversità,
- **Sostenibile:** è possibile ottenere la materia prima legno senza alcun impatto negativo sull'ambiente, prelevandola da siti di provenienza certificati, che consentano l'accertamento della corretta gestione forestale, del rispetto della natura, dell'ambiente e degli abitanti,
- **A basso consumo energetico:** il legno è prodotto e lavorato con un bassissimo consumo di energia, incomparabilmente inferiore rispetto ad altri materiali,
- **Deposito di Carbonio:** è uno dei pochi materiali naturali, il più importante, a fungere da *carbon sink* ovvero da deposito di carbonio, per un tempo pari alla durata utile del manufatto. Ogni metro cubo di legno di conifera blocca circa 800-900 chilogrammi di CO<sub>2</sub> equivalente,
- **Potenzialmente a 'chilometro zero',** dato che elementi lignei per opere di IN (Ingegneria Naturalistica) si possono ricavare direttamente dai soprassuoli prossimi al luogo in cui gli interventi vengono effettuati,
- **Meccanicamente molto efficiente:** ha un ottimo rapporto delle prestazioni meccaniche (resistenza e rigidità in direzione assiale) rispetto alla densità, comparabile e in certi casi assai migliore di altri materiali,
- **Semplice da lavorare,** da unire e da assemblare,
- **Di facile dismissione:** lo smaltimento è assai agevole dopo l'impiego, attraverso il riciclo ad esempio tramite il reimpiego in pannelli di particelle, a fine vita, con impatto ambientale nullo per lo smaltimento se lasciato nell'ambiente (anzi produce humus), o a bilancio energetico positivo se convertito in energia a fine vita,
- **Sicuro:** ha un comportamento sicuro e prevedibile, non soggetto a sorprese, di fronte a tutte le situazioni e condizioni a cui può trovarsi sottoposto,
- **Piacevole alla vista:** con colori gradevoli appena messo in opera, che si trasformano gradualmente con l'esposizione all'ambiente e in esso si inseriscono ed integrano

pienamente.

### 2.5.2 *La materia prima\_ il legno*

Una conoscenza basilare del legno è un fattore indispensabile per il suo corretto impiego, anche nelle opere di Ingegneria Naturalistica. Tale conoscenza si rende particolarmente necessaria data la grande variabilità del legno, che deve essere tenuta in conto per ottimizzarne l'impiego. Tale variabilità si declina a diversi livelli sia in funzione della specie legnosa considerata che nell'ambito della stessa specie, in funzione della provenienza geografica (fattori climatici, stagionali, ereditari, ecc.), della stazione di crescita (fertilità, quota, esposizione, ecc.), della posizione sociale dell'individuo (albero) nel bosco, da caratteri ereditari. Non è da trascurare la variabilità che si trova nell'ambito dello stesso individuo, dovuta alla posizione del legno nel tronco, alle modalità di crescita variabili da periodo a periodo della vita dell'albero, alla porzione del fusto (durame e alburno), ecc.

Trattate in modo schematico e sintetico, ai seguenti paragrafi si trovano le nozioni essenziali necessarie per approcciarsi correttamente alla progettazione con questa materia prima di origine naturale. Si rimanda ai testi di riferimento per approfondimenti (*Giordano 1981, Giordano et al. 1999, Zanuttini 2014, Bonamini e Uzielli 2021*).

#### 2.5.2.1 *Anisotropia*

Il legno ha caratteristiche e proprietà, comprese quelle meccaniche, altamente variabili in funzione della direzione considerata rispetto alla forma tridimensionale dell'albero. Tra le proprietà che variano in base alla direzione considerata abbiamo i ritiri, i rigonfiamenti, la resistenza, la rigidità, il modulo di *Poisson*, la permeabilità, la resistività, ecc.

Nella direzione **assiale** (ovvero lungo l'asse del fusto legnoso e quindi del tronco o del toppe) si sviluppano gli elementi cellulari longitudinali, che costituiscono la gran parte delle cellule legnose. Lo sviluppo dimensionale di queste cellule legnose viene espresso con il termine di "fibratura" del legno.

Le direzioni del legno vengono quindi distinte in **longitudinale** (o assiale) indicata con L, **radiale** con R e **tangenziale** con T. Per il legno in dimensioni d'uso queste ultime due direzioni anatomiche R e T, pur avendo caratteristiche abbastanza differenti, possono essere riassunte in modo sufficiente con il termine di "direzione trasversale", che le rappresenta entrambe, data la difficoltà di avere un allineamento preciso degli elementi anatomici con gli assi di riferimento del manufatto.

#### 2.5.2.2 *Caratteristiche macroscopiche del legno*

Il legno è frutto della crescita naturale dell'albero e come tale risente di tutte quelle caratteristiche che consentono alla pianta di crescere e svilupparsi nel bosco. Alcune di queste proprietà possono

influire sugli aspetti fisici e su quelli meccanici del legno e quindi ripercuotersi sulle prestazioni richieste nella loro funzione resistente. Ad esempio, la presenza di nodi e la loro dimensione, di danni meccanici al fusto dovuti a organismi superiori (ad es. ungulati), dello sviluppo irregolare degli elementi cellulari longitudinali che comportino una deviazione della fibratura, ecc., produce un effetto sulle capacità resistenti dell'elemento ligneo. La casistica è assai ampia e variegata e la combinazione dei fattori e l'identificazione di queste caratteristiche fa parte delle pratiche applicate per la classificazione del legno, sia in base all'aspetto che in base alla resistenza.

#### *2.5.2.3 Componenti del fusto legnoso*

Percepibile a occhio nudo è la suddivisione del legno del fusto in **alburno** e **durame**. L'alburno costituisce una corona circolare nella parte esterna del fusto legnoso, più o meno spessa in funzione della specie legnosa e dell'età dell'albero. Il durame (o duramen) è presente nella parte più interna del tronco e più vecchia in riferimento alla vita dell'albero. Occupa una porzione cilindrica centrata rispetto al midollo, il quale costituisce il primo anello annuale di crescita dell'albero nel punto considerato. In base alla specie legnosa il durame può essere obbligatoriamente **differenziato** dall'alburno, assumendo varie tonalità di colore più o meno scure, oppure essere indifferenziato, mantenendo le stesse colorazioni biancastre dell'alburno (comprese tra bianco, giallo e marrone chiaro). In rari casi è presente un durame facoltativo, ovvero che si colora diversamente dall'alburno solo in determinate condizioni di crescita del fusto, mentre nella maggior parte del legno della specie non vi sono tonalità diverse di colore tra i due. A volte sui topi di legno ricavati da alberi appena abbattuti è visibile una differenziazione di tonalità di colore che porta a distinguere l'alburno dal durame anche se la specie è a durame indifferenziato. Tali tonalità dipendono da umidità del legno assai differenti tra alburno e durame e dalla conseguente diversa riflessione della luce (legno molto umido assorbe maggiore quantità di energia luminosa e appare più scuro).

#### *2.5.2.4 Legno e acqua*

Il legno è un materiale assai affine all'acqua, sia in forma liquida che in forma di vapore acqueo. Se posto in contatto diretto con l'acqua si imbibisce grazie anche alla forte capillarità. Il fusto legnoso appena abbattuto può avere umidità assai differenti in base alla specie e al sito di crescita. Tali umidità, sempre superiori al 30-40%, possono assumere valori anche molto elevati, superiori al 100%. Una volta lasciato esposto all'aria libera la sua umidità scende fino a raggiungere un equilibrio con l'umidità dell'ambiente circostante. Il raggiungimento di tale equilibrio può avvenire in tempi anche molto lunghi in funzione di una complessa serie di fattori (specie e relativa permeabilità, quantità di alburno o durame, dimensioni, direzioni anatomiche, presenza o assenza di corteccia, se legno tondo o squadrato su 2 o 4 lati, temperature esterne, ventilazione, ecc.). Il legno completamente sommerso

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

dal terreno oppure a contatto continuo con acqua liquida non perderà umidità, al contrario tenderà ad assorbirne per capillarità fino a riempire completamente ogni spazio disponibile interno al legno (umidità di massima imbibizione). Il legno lasciato asciugare all'aria libera all'aperto, nel corso del tempo, giungerà a umidità inferiori al 30-40% e comprese in un intorno tra il 14 e il 18% in base alle condizioni di esposizione. Per il legno "l'umidità normale" si fa corrispondere al valore del 12%<sup>7</sup>. Al di sotto del 30%, circa avranno inizio i fenomeni di ritiro del legno che in virtù dell'anisotropia, comportano una serie di conseguenze inevitabili, tra cui la principale è l'apertura di fessurazioni da ritiro. La posizione di tali fessurazioni è spesso favorita qualora siano presenti lavorazioni meccaniche come fori, realizzati sul legno fresco. Ad esempio, i sistemi di connessione utilizzati nell'I.N., come bulloni e spinotti, possono facilitare l'apertura di cretti da ritiro del legno, esattamente in loro corrispondenza. Quindi le fessurazioni, pur naturali e inevitabili perché connaturate all'anisotropia del legno, possono essere proprio innescate dalla ferramenta inserita. Il fenomeno del ritiro del legno è reversibile, in particolare il legno riduce le proprie dimensioni seguendo l'anisotropia quando si asciuga, e si rigonfia se l'umidità è tale da re-imbibire il legno al 30% e oltre.

In relazione alla tenuta della ferramenta nelle opere di I.N. è opportuno ricordare gli effetti che può avere il fenomeno dei ritiri e rigonfiamenti del legno, in particolare sul serraggio dei dadi. Di fatto un dado serrato su legno umido risulterà lasco una volta che il legno si sarà essiccato per effetto dei ritiri. Similmente un bullone ben serrato su legno già stagionato, dopo una serie di cicli di asciutto/bagnato dell'elemento ligneo, ritornerà ad essere lasco in quanto:

- dopo il primo rigonfiamento il legno sottostante il bullone, risulterà schiacciato (a compressione trasversale) per il fenomeno del rigonfiamento impedito che porta a stati di coazione,
- una volta deformato in modo irreversibile, al successivo ritiro del legno si libererà nuovamente spazio tra legno e dado.

Il problema si risolve utilizzando rondelle e/o molle capaci di recuperare lo spazio che si genera tra dado e legno, mantenendo la sollecitazione circa costante nel tempo e al variare dell'umidità.

### ***Umidità del legno e misure con igrometri elettrici***

L'umidità del legno si determina in laboratorio con un metodo detto **gravimetrico** o della **doppia pesata**.

---

<sup>7</sup> Più correttamente viene definita umidità normale quella che raggiunge un pezzo di legno messo in ambiente nelle "condizioni normali" ovvero a una temperatura T di 20° e una umidità dell'aria UR del 65%. A tali valori il legno si equilibra tendenzialmente a una umidità u del 12%.

Attraverso questo sistema si determina l'umidità del legno con la seguente formula:

$$u = \frac{P_u - P_0}{P_0} \cdot 100$$

Con  $P_u$  peso del legno tal quale e  $P_0$  peso dello stesso pezzo di legno anidro (disidratato in stufa ventilata a 103°C).

Il metodo è applicabile a qualsiasi umidità del legno, anche su legname appena abbattuto, ma implica la necessità di effettuare un campionamento (ad esempio l'estrazione di un pezzo di legno da un tronco, in modo che ne rappresenti l'umidità), e le determinazioni di laboratorio descritte sopra.

Il contenuto idrico esprime un dato diverso da quello dell'umidità. Normalmente si indica con "w" ed è calcolato con la seguente formula (i dati di partenza sono gli stessi):

$$w = \frac{P_u - P_0}{P_u} \cdot 100$$

Strumenti comuni per la stima dell'umidità del legno sono gli igrometri elettrici, piccole attrezzature adatte alle operazioni di cantiere. Sono dotati di una coppia di chiodi che si infiggono nel legno e attraverso i quali se ne misura la resistività. Tali strumenti offrono una certa precisione nella stima dell'umidità ( $\pm 1\%$ ) nell'intervallo di umidità del legno compreso tra il 7% e il 30%. Al di sopra del 30% il valore che restituisce lo strumento non è un valore significativo, ma fornisce l'indicazione qualitativa, ovvero che il legno ha umidità comunque superiore al 30% e quindi è molto umido. Tale limite rende ardua la stima della quantità di acqua contenuta in un elemento ligneo allo stato fresco, necessaria per determinate procedure.

#### 2.5.2.5 Proprietà meccaniche del legno

Tutte le caratteristiche meccaniche del legno sono fortemente dipendenti dall'anisotropia ovvero dalla direzione anatomica considerata. Il legno esprime il massimo delle sue proprietà meccaniche nella direzione longitudinale, ovvero lungo il fusto del tronco. Quindi lungo la fibratura del legno si hanno i valori più alti della resistenza alle varie sollecitazioni normali (flessione, compressione e trazione), della rigidezza e della durezza.

A **trazione assiale** i nodi del legno hanno una resistenza molto bassa sia perché sollecitati trasversalmente rispetto alla loro direzione della fibratura, sia per l'inclinazione della fibratura nel loro intorno. Ciò porta a un comportamento spiccatamente fragile del legno (passaggio brusco dal campo elastico alla rottura). Valori medi indicativi riportati in letteratura sono i seguenti: tensione di rottura 15÷40 N/mm<sup>2</sup> e rigidezza 8000÷13000 N/mm<sup>2</sup>

A **compressione assiale**, malgrado la presenza di difetti, il legno strutturale ha un comportamento resistente elastico-lineare a cui segue nella fase di rottura un certo comportamento plastico non presente in altri tipi di sollecitazione. Valori medi orientativi riportati di letteratura sono tensione di



rottura compresa nell'intervallo  $25\div 40$  N/mm<sup>2</sup> e rigidezza  $8000\div 13000$  N/mm<sup>2</sup>.

A **flessione** il comportamento meccanico degli elementi lignei è fortemente condizionato dai nodi e dagli altri difetti influenti sulla resistenza che sono presenti. Essi tipicamente innescano la rottura nella zona tesa dell'elemento inflesso, impedendo di giungere a fenomeni di plasticizzazione nella zona compressa che si potrebbero verificare a elevate sollecitazioni. Perciò si conferma un comportamento di tipo fragile. Qualora il lembo teso sia esente da difetti si potrebbe giungere a un comportamento di tipo plastico grazie alla deformazione nel lembo compresso dell'elemento ligneo. Ma i codici di calcolo per la verifica delle sezioni ipotizzano sempre e comunque un comportamento a flessione di tipo fragile, ovvero elastico-lineare fino a rottura. I valori medi indicativi riportati in letteratura sono: tensione di rottura  $15\div 40$  N/mm<sup>2</sup> e rigidezza  $8000\div 13000$  N/mm<sup>2</sup>.

La resistenza a **taglio**, anch'essa fortemente dipendente dall'anisotropia, vede il suo valore minimo su piani del legno paralleli alla fibratura (in particolare tangenzialmente agli anelli). A volte alcuni difetti del legno comportano effetti positivi su questa sollecitazione, ma su tali aspetti è necessaria molta cautela e un'approfondita conoscenza della materia prima. È, comunque, abbastanza chiaro che la presenza di determinati difetti come le fessurazioni da ritiro, se allineate con il piano di sollecitazione allo scorrimento, possono ridurre i suoi valori di resistenza. I valori medi indicativi per il taglio sono intorno ai  $2\div 4$  N/mm<sup>2</sup>.

Trasversalmente alla fibratura il comportamento meccanico esprime una modesta frazione di quello nella direzione assiale: la rigidezza scende a un intervallo di valori compreso tra  $1/15$  e  $1/30$  del modulo elastico assiale, la resistenza a compressione si può considerare virtualmente intorno a  $1/10$  rispetto alla longitudinale, la resistenza a trazione ortogonale (perpendicolare alla fibratura) vale circa un  $1/30 \div 1/50$  della relativa resistenza a trazione assiale.

La **trazione ortogonale** alla fibratura sarebbe un tipo di sollecitazione tendenzialmente da evitare nelle opere, poiché alcuni difetti presente sul legno massiccio potrebbero innescare facilmente una rottura. I valori medi indicativi per tale sollecitazione sono: tensione di rottura intorno a  $0,5\div 0,6$  N/mm<sup>2</sup>, e modulo elastico tra  $300\div 500$  N/mm<sup>2</sup>.

A **compressione trasversale** il legno ha tendenzialmente un comportamento plastico non fragile, ovvero si riscontra una deformazione plastica a partire da carichi modesti e che prosegue indefinitamente, con poco rilievo dei difetti presenti. Valori medi indicativi di letteratura sono per la resistenza intorno a  $8\div 10$  N/mm<sup>2</sup> (si tratta di un valore determinato dal superamento della soglia limite di deformazione piuttosto che di una rottura vera e propria), e modulo elastico tra  $300\div 500$  N/mm<sup>2</sup>. Per queste ragioni le strutture di I.N. piuttosto alte e non correttamente dimensionate possono mostrare segni di cedimento degli elementi lignei quando eccessivamente sollecitati in direzione ortogonale alla fibratura (ad esempio nel punto di unione tra i tronchi alle file basali su cui gravano

tutti i carichi superiori).

I dati delle proprietà meccaniche del legno pubblicati nelle tante schede di descrizione delle varie specie legnose (ad es. Nardi Berti 2006), rappresentano tipicamente i valori medi delle proprietà del legno netto, ovvero al netto delle caratteristiche che influiscono sulla resistenza, in condizioni ideali. Tali valori di resistenza sono implicitamente molto superiori ai valori caratteristici di resistenza del legno tondo e segato in dimensione d'uso, che rappresentano valori di sicurezza per l'impiego del legno con funzione strutturale.

### ***Caratteristiche del legno***

Le proprietà meccaniche degli elementi lignei in dimensione di impiego (segati o legno tondo) risentono in modo rilevante delle caratteristiche puntuali esistenti e formatesi già sull'albero. Ad esempio, nodi e loro dimensioni, andamento non regolare della fibratura, ecc., comportano una certa variabilità del comportamento meccanico del legno, a parità di altri fattori.

### ***Legno tondo e segato***

Per le modalità di formazione del legno, gli elementi strutturali, a parità di altre caratteristiche, esprimono le migliori proprietà meccaniche se non hanno subito lavorazioni con utensili taglienti ovvero se il legno è usato come legno tondo. A parità di sezione resistente il legno tondo, senza alcuna lavorazione, resiste il 10 ÷ 30% in più rispetto allo stesso legno segato (*Ranta-Maunus 1999, Togni et al. 2013, Togni 2021*).

### ***Altre variabili influenti***

Tutte le proprietà meccaniche sono tipicamente proporzionali alla densità del legno, mentre hanno proporzionalità inversa con l'umidità al di sotto del 30%, ovvero i valori di resistenza e di rigidità sono tendenzialmente più alti quando le umidità sono più basse (nell'intervallo 0-30%).

### ***Durata dei carichi***

Il legno è un materiale tipicamente viscoelastico che ha un ottimo comportamento meccanico alle sollecitazioni di breve durata mentre risente delle sollecitazioni di lungo periodo, soprattutto se a tassi di carico elevati, ad esempio quando sono superiori al 50% del carico massimo (sollecitazione di rottura) del breve periodo.

#### ***2.5.2.6 Meccanismi di degradamento del legno da attacchi fungini***

Gli attacchi fungini si originano normalmente sfruttando il contenuto delle cellule ricche di sostanze nutritive presenti, per poi propagarsi al resto del legno, per quelle specie fungine in grado di farlo, disgregando cellulosa, emicellulose e lignine, che costituiscono le pareti cellulari. L'alburno viene

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

attaccato per primo, più facilmente e rapidamente rispetto al legno del durame, il quale è meno sensibile alle alterazioni fungine, in particolare, in quelle specie legnose a durame differenziato e scuro, e viene quindi degradato più difficilmente e molto più lentamente. I fattori che controllano lo sviluppo dei Funghi nel legno sono:

- l'umidità del legno: la minima per il loro sviluppo è intorno al 18-20%;
- l'ossigeno (dell'aria): come organismi aerobi necessitano di questo gas per accrescersi. Quando il legno è imbibito completamente di acqua non rimane spazio per l'aria e l'attacco si ferma. Solo alcune specie riescono a svilupparsi con ossigeno estremamente scarso ma con tassi di sviluppo piuttosto lenti;
- il substrato ligneo: le sue proprietà, la costituzione (cellulosa, lignine, emicellulose) e la presenza di estrattivi, condizionano il tasso di sviluppo dei funghi lignivori;
- la temperatura, compresa in determinati campi di variazione, differenti da specie a specie fungina.

Dal punto di vista del legno, i funghi possono essere suddivisi in base al tipo di attacco tra **funghi cromogeni**, che alterano esclusivamente la colorazione del legno (qui non trattati) e **funghi cariogeni** (della carie) che ne provocano il degradamento con peggioramento di tutte le proprietà meccaniche. I Funghi cariogeni degradano i costituenti della parete cellulare, demolendo la cellulosa, le emicellulose e le lignine. L'alterazione da funghi cariogeni comporta una variazione di colore, una riduzione della massa legnosa e delle proprietà meccaniche. L'esito è la *carie* o *marciume del legno*. In base alle modalità di alterazione delle pareti cellulari e alle costituenti che vengono principalmente degradate, i tipi di carie del legno si distinguono in tre forme principali: carie **bruna**, **bianca** e **soffice**.

### ***Carie Bruna***

Nella Carie Bruna i funghi agiscono preferenzialmente sulle conifere e decompongono prevalentemente le componenti cellulosiche del legno (cellulosa ed emicellulose) mentre la lignina, seppur modificata, non viene degradata. Il legno attaccato acquisisce una tonalità di colore più scura, tendente al marrone. Nella prima fase di alterazione del legno la resistenza meccanica viene già profondamente ridotta a causa del processo di depolimerizzazione della cellulosa (ad es. per -1% di massa si ha -10% ÷ -12% di resistenza, con una perdita più che proporzionale). A ciò segue la perdita più cospicua di massa legnosa, dovuta alla distruzione di tutte le cellulose. Il legno alterato è tenero e fragile e si sbriciola letteralmente tra le dita; quando stagiona presenta forti fessurazioni sia in direzione longitudinale che perpendicolarmente alla fibratura quasi a formare un reticolo, da cui la denominazione di "carie cubica". Le specie fungine che generano questo tipo di carie possono agire sul legno umido e non ventilato all'esterno, ancora più se a contatto con il terreno, ma anche in

## LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA

ambienti chiusi dove si verificano opportune condizioni di umidità. I funghi da carie bruna sono da ascrivere al gruppo dei Basidiomiceti; tra le specie più comuni si annoverano *Poria vaillantii*, *Serpula lacrymans*, *Coniophora puteana*, *Gloeophyllum trabeum* e *G. sepiarium*, ecc.

### **Carie Bianca**

Nella Carie Bianca i funghi agenti della carie attaccano di preferenza il legno di latifoglia, mentre agiscono più lentamente in quello di conifera. Le ife fungine (filamenti con cui il fungo si sviluppa, esplora e degrada) emettono sostanze che riescono a disgregare tutte le componenti della parete cellulare, ma con modalità e velocità differenti in base alla combinazione tra specie fungina e legno. In alcuni casi le lignine vengono degradate prima delle cellulose, in altri casi contemporaneamente. Il legno attaccato assume colorazione più chiara rispetto al legno sano, acquisendo un aspetto fibroso. A volte si generano all'interno degli elementi lignei anche cavità come alveoli. Contrariamente alla carie bruna, la riduzione delle proprietà meccaniche del legno attaccato è proporzionale alla perdita di massa. Questo tipo di marciume è generato da specie fungine appartenenti ai Basidiomiceti e ad alcuni funghi imperfetti; tra le specie più diffuse abbiamo *Trametes versicolor*, *Phellinus pini*, *Armillaria mellea*, *Pleurotus* sp. ecc.

### **Carie Soffice**

Nella Carie Soffice i funghi agenti della carie si sviluppano su legni molto umidi, a contatto con il terreno, a contatto con acqua dolce, particolarmente su legno di latifoglie, meno attivamente su quello di conifere. Il legno tende a decolorarsi risultando grigio scuro e ad acquisire una consistenza molle con fessurazioni superficiali a forma di reticolo quando essiccato. Le ife riescono ad agire apparentemente in condizioni di anaerobiosi, riuscendo ad utilizzare l'ossigeno disciolto nell'acqua. Per questa ragione il degrado è limitato alla parte più in superficie del legno, rendendo così l'alterazione molto più lenta e con conseguenze limitate sulle perdite di massa e di prestazioni meccaniche. L'alterazione da carie soffice prevale solo in quelle condizioni che rendono impossibile gli attacchi di specie che generano gli altri tipi di carie. Questo tipo di marciume è generato da specie fungine appartenenti agli Ascomiceti e ad alcuni funghi imperfetti; alcune specie che causano carie soffice sono *Chaetomium globosum*, *Xylaria* sp., *Hypoxylon* sp., *Nectria* sp., *Graphium* sp., ecc.

### **Fasi dell'alterazione**

Il processo di alterazione del legno a carico degli agenti della carie è piuttosto lento ma continuo e inarrestabile, se le condizioni ideali per il degradamento si conservano. Possiamo distinguere una fase **iniziale** con legno ancora sano dove si notano delle alterazioni di colore, senza effetti sulla consistenza. Alla percussione il legno restituisce un suono normale. Una fase **intermedia** in cui il

## I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

marciume risulta incipiente ma il colore è già decisamente alterato. La consistenza del legno è ancora buona, l'infissione del chiodo è agevole e rimane buona la sua tenuta, solo la risposta sonora alla percussione risulta in parte smorzata. Una fase **avanzata** in cui il marciume è conclamato e nella quale il legno ha un colore assai modificato e una consistenza poco solida. Il chiodo si infigge con facilità e ha scarsa tenuta e il legno risponde alla percussione con un suono attutito, quasi sordo.

### 2.5.2.7 Durabilità del legno

Tra le caratteristiche di ciascuna specie legnosa che ne condizionano la sensibilità e l'alterabilità agli agenti fungini vi è la durabilità naturale. Il termine durabilità è svincolato dall'accezione temporale che assume nel linguaggio comune e in altri determinati settori scientifici.

È importante ricordare che il termine "durabilità" può avere differenti valenze in base ai riferimenti e al contesto. Nella progettazione strutturale la durabilità concerne la capacità del costruito di durare nel tempo (NTC 2018).

Nell'ambito delle tematiche di tecnologia del legno riportate in questo testo, il termine tecnico può essere utilizzato con le due seguenti valenze:

- 1) come termine generico che indica la capacità del legno di resistere agli attacchi biotici di Funghi, Insetti e altri organismi che ne possono provocare l'alterazione;
- 2) come termine tecnico specifico, nell'ambito del sistema di classificazione delle specie legnose con il quale vengono raggruppate in base alla capacità di resistere specificamente all'alterazione da funghi xilofagi nelle condizioni di laboratorio previste dalla norma di riferimento (Norma europea UNI EN 350:2016).

La norma EN 350 definisce 5 differenti classi di durabilità naturale delle specie legnose in riferimento al punto 2) indicato sopra, scalate sulla base della difficoltà del legno a essere alterato dalle specie fungine. Le classi di durabilità (DC, *Durability Class*) sono riportate come segue (Tabella 2.3).

Tabella 2.3 Classi di durabilità (EN 350) con esempi di legni

| <b>Classe di durabilità</b> | <b>Definizione</b>     | <b>Esempio di legno nella Classe</b> |
|-----------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| DC 1                        | MOLTO DURABILE         | Azobè (legno esotico)                |
| DC 2                        | DURABILE               | Castagno                             |
| DC 3                        | MODERATAMENTE DURABILE | Cerro                                |
| DC 4                        | POCO DURABILE          | Abete                                |
| DC 5                        | NON DURABILE           | Faggio                               |

Le classi di durabilità si riferiscono esclusivamente al legno del durame dato che l'alburno di quasi tutte le specie legnose può essere classificato in classe di durabilità DC 5 ovvero NON DURABILE.

LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA

La stessa norma individua altri tipi di classificazione per gli altri organismi distruttori del legno. Qui vengono riportate le Classi di durabilità di attribuzione di alcune specie legnose (solo per il durame), così come risultano dalla norma EN 350 (Tabella 2.4).

Tabella 2.4 Classi di durabilità relative al durame di alcune specie legnose (da EN 350)

| Specie legnosa                                  | Classe di durabilità DC | Definizione                                |
|---|-------------------------|--|
| Abete bianco ( <i>Abies alba</i> )              | 4                       | POCO DURABILE                              |
| Abete rosso ( <i>Picea abies</i> )              | 4                       | POCO DURABILE                              |
| Douglasia ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> )      | 3-4                     | tra MODERATAMENTE DURABILE e POCO DURABILE |
| Larice ( <i>Larix decidua</i> )                 | 3-4                     | tra MODERATAMENTE DURABILE e POCO DURABILE |
| Pino marittimo ( <i>Pinus pinaster</i> )        | 3-4                     | tra MODERATAMENTE DURABILE e POCO DURABILE |
| Pino nero ( <i>Pinus nigra</i> )                | 4                       | POCO DURABILE                              |
| Pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> )      | 3-4                     | tra MODERATAMENTE DURABILE e POCO DURABILE |
|   |                         |  |
| Acer ( <i>Acer</i> sp.)                         | 5                       | NON DURABILE                               |
| Castagno ( <i>Castanea sativa</i> )             | 2                       | DURABILE                                   |
| Faggio ( <i>Fagus sylvatica</i> )               | 5                       | NON DURABILE                               |
| Frassino maggiore ( <i>Fraxinus excelsior</i> ) | 5                       | NON DURABILE                               |
| Pioppo ( <i>Populus</i> sp.)                    | 5                       | NON DURABILE                               |
| Cerro ( <i>Quercus cerris</i> )                 | 3                       | MODERATAMENTE DURABILE                     |
| Rovere-Farnia ( <i>Quercus</i> sp.)             | 2-4                     | tra DURABILE e POCO DURABILE               |
| Robinia ( <i>Robinia pseudoacacia</i> )         | 1-2                     | tra MOLTO DURABILE e DURABILE              |

Le specie elencate in tabella mostrano la variabilità di alcuni legnami, riportata con un intervallo di durabilità. Ma non tutti i tipi di legname sono censiti dalla EN 350.

É essenziale rimarcare che la durata di un manufatto ligneo può essere svincolata dalla sua durabilità, in quanto a tal proposito gli ambienti di conservazione sono fortemente condizionanti. Se così non fosse non potremmo avere annoverati tra i manufatti storici appartenenti ai beni culturali tutti quei

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

prodotti realizzati con specie legnose in classe di durabilità 4 e 5. All'opposto non può esistere legno naturalmente immarcescibile, anche se contraddistinto dalla Classe 1 o 2, poiché quando le condizioni ambientali sono idonee agli attacchi fungini, può essere degradato fino alla completa distruzione, trascorso il tempo necessario.

### *2.5.2.8 Errori e luoghi comuni sul legno*

Lo studio scientifico sul legno per approfondirne la conoscenza ha fatto cadere nel tempo molti dei luoghi comuni persistenti tra non addetti e anche tra alcuni operatori. La loro presenza provoca effetti negativi sull'uso del legno in ogni senso: sia quando il legno viene sottovalutato, perciò scartato aprioristicamente in favore di altri materiali, sia quando viene incautamente sopravvalutato, poiché i problemi che ne possono derivare incidono sulla sua considerazione e hanno ripercussioni sui potenziali usi futuri. Elenchiamo di seguito una serie di osservazioni sui luoghi comuni del legno, in parte tratto dal “decalogo degli errori” del Prof. Giordano (Giordano 1984) commessi più frequentemente dagli operatori.

Umidità del legno e contenuto idrico: il legno è soggetto ad attacchi fungini quando l'umidità del legno ( $u$ ) è superiore al 20% (18% di sicurezza). Questa soglia di umidità corrisponde al contenuto idrico ( $w$ ) del 16,7% (15,3% di sicurezza): quindi un manufatto equilibrato al 17% per il contenuto idrico  $w$  non è da considerare al sicuro da attacchi di funghi.

Il divario tra umidità e contenuto idrico cresce in modo geometrico all'aumentare dell'umidità del legno. La formula per il passaggio da umidità a contenuto idrico è la seguente:

$$w = \frac{u}{1 - u}$$

Stagionatura prolungata del legno all'aria: in alcuni professionisti è consolidata l'idea che il legno esposto per lungo o lunghissimo tempo all'aria libera possa essere oramai stagionato definitivamente (secco). Non si considera invece che il legno può riprendere l'umidità perduta nell'evaporazione in ogni momento, a prescindere dal numero di anni di stagionatura all'aria libera.

Il legno e gli ambienti salmastri: l'esposizione del legname in luoghi in prossimità del mare non ne inficia la durata nel tempo, in quanto la salsedine non comporta alcun effetto sul legno, al contrario di ciò che avviene per molti tipi di acciaio. Le condizioni di alterazione che portano al marciume dipendono esclusivamente dall'umidità.

Le deiezioni animali e il legno: il contatto prolungato con deiezioni animali come guano o simili non provoca alcun danno al legno, che, come ripetuto, incontra problemi solo per l'umidità. Ugualmente il contatto accidentale prolungato con agenti chimici (acidi o basici, anche forti) non costituisce un problema al legno.

L'azione disgregatrice dei funghi agenti della carie: non dipende dalla presenza di superfici più o

## *LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA*

meno attaccabili da parte delle ife fungine (zone di presunta debolezza). La presenza di tagli, spaccature, zone in cui l'umidità si mantenga più elevata per lungo tempo, facilita la progressione dell'attacco, che procederebbe comunque qualora l'umidità fosse idonea, anche in assenza di tali zone. Il fatto che in tali punti si trovino i corpi fruttiferi nelle strutture attaccate è il frutto dell'azione disgregatrice e non la causa.

L'esposizione ai raggi solari: la radiazione luminosa solare all'aperto provoca un'alterazione con parziale depolimerizzazione di alcuni componenti della parete cellulare, la quale produce un ingrigimento del legno. Tale alterazione non dà problemi di alcune genere all'opera, in quanto non si approfondisce sotto la superficie per più di qualche frazione di millimetro.

La sigillatura del legno con pellicole non traspiranti: si ritiene che un modo per proteggere il legno dalle alterazioni da funghi sia quello di sigillarlo con materiali diversi (ad es. catramina, materiali isolanti da polimeri sintetici, ecc.) in modo che l'umidità resti fuori e così non faciliti in alcun modo l'attacco. Non si tiene adeguatamente in conto che nel legno esposto agli agenti atmosferici è assai difficile impedire l'ingresso dell'acqua se non impossibile. Qualora il legno sia stato isolato la naturale ventilazione del legno sarà impedita e l'acqua penetrata all'interno non troverà via di uscita, facilitando il suo degradamento.

Gli attacchi di Insetti e Funghi si auto generano: è una credenza popolare assai diffusa che i meccanismi del degrado siano spontanei e che quindi sia sufficiente aspettare un tempo sufficientemente lungo per avere una alterazione del legno. Non si considera che la vita non è in grado di autogenerarsi ma ha bisogno della spora del fungo che possa depositarsi e poi germinare sul legno o ad esempio della femmina che deponga le uova nel caso di attacco di Insetti.

Durabilità del legno e cicli lunari: ancora oggi permane in certe fasce di addetti l'idea che il momento in cui si abbatte l'albero influisca sulle caratteristiche del materiale, in virtù di un certo numero di fattori, tra cui la fase lunare. E di come tali eventi si possano ripercuotere sulle proprietà fisiche e biologiche, come ad esempio sulla combustibilità o sulla durabilità. In qualche sito Internet parascientifico si indicano addirittura i giorni dell'anno in cui gli alberi andrebbero abbattuti per ottenere un materiale migliore. Non vi è alcuna evidenza scientifica che ci siano correlazioni tra le fasi lunari e le proprietà del legno. Questi tipi di relazioni causa - effetto sulle caratteristiche del legno sono da ritenere infondate e non provate scientificamente; esse hanno lo stesso valore delle previsioni dell'oroscopo sui nati nei vari segni zodiacali, ma a volte ...possono servire a far aumentare il costo del legname.

La qualità del legname: frequentemente per le qualità del materiale utilizzato nelle opere si fa riferimento a sistemi di classificazione generici non ben identificati, indicando ad esempio "legname di prima classe", "di classe quarta", ecc. Accanto a ogni classe di qualità è necessario indicare il



## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

sistema di classificazione di riferimento. Inoltre, sarebbe utile che fosse indicata in maniera precisa e inequivocabile la distinzione tra i sistemi di selezione in base alla qualità strutturale, ovvero per quelle caratteristiche che comportano effetti sul comportamento meccanico, rispetto ad altre caratteristiche riguardanti solo l'aspetto.

La densità: è uno dei luoghi comuni sul legno l'idea che ogni specie sia caratterizzata da una ben precisa densità e una sola. Al contrario la densità della materia prima è una di quelle proprietà che risentono fortemente della variabilità descritta in precedenza. Questo aspetto può essere importante ai fini del dimensionamento delle opere visto che la densità stessa è strettamente e direttamente correlata con tutte le proprietà meccaniche.

### ***2.5.3 Innovazioni nella progettazione delle opere***

Le opere di IN sono considerate sempre di tipo provvisoriale, perché da progetto destinate a durare un tempo limitato, grazie al graduale passaggio della funzione portante dal legname ai materiali vivi utilizzati per l'opera. Per la loro complessità nella definizione delle forze in gioco e nello stato dei vincoli, molti dei dati necessari per il dimensionamento delle opere (effettuato di solito con il sistema delle tensioni ammissibili) si basano su rilevazioni dirette sul terreno e su misurazioni scientifiche realizzate sia in opera che su modelli in scala. Tuttavia, esiste oggi la possibilità di progettare gli elementi di legno utilizzati per questo genere di opere in un modo che si potrebbe definire innovativo, sulla base delle regole stabilite dalle Norme Tecniche per le Costruzioni.

Dalla pubblicazione della prima versione delle Norme Tecniche per le Costruzioni con il D.M. 14.1.2008 (entrate in vigore nel 2009) per la prima volta nell'era moderna il nostro Paese si è dotato di un codice di progettazione che considera il legno allo stesso livello di tutti gli altri materiali. Quindi con pari dignità ma con gli stessi obblighi e vincoli. Dopo la prima uscita nel 2005, per breve periodo, in fase sperimentale, a seguito di circa 9 anni di applicazione (dal 2009 al 2017) le stesse sono poi state aggiornate nel 2018 con la nuova versione riveduta e corretta. All'interno della normativa, in relazione alla "vita nominale di progetto", accanto alle opere per prestazioni ordinarie (50 anni) ed elevate (100 anni) esiste una categoria minima per tale vita nominale  $V_N$  pari a 10 anni, che viene prevista per le strutture a carattere temporaneo. Questa condizione presenta un ordine di grandezza temporale più vicino alle effettive esigenze della IN.

Nel 2016 un parere del Servizio Tecnico Centrale (STC), organo del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (CSLLPP), sollecitato da un dipartimento del Comune di Bologna, fornisce delle indicazioni molto precise sul percorso che, secondo l'organo, è necessario intraprendere per la corretta esecuzione delle opere, con riferimento particolare alle opere di sostegno in sicurezza di corpi di terreno.

Senza entrare nel merito degli aspetti giuridici concernenti il parere espresso e tutti gli altri riferimenti di legge che trattano sull'argomento, si riporta uno stralcio del suddetto parere con l'inserimento di

riferimenti numerati come annotazioni, rinviando alla lettura del documento intero per approfondimenti

([https://www.federlegnoarredo.it/ContentsFiles/parere\\_CSLP\\_palificate%20legno.pdf](https://www.federlegnoarredo.it/ContentsFiles/parere_CSLP_palificate%20legno.pdf)):

**“Oggetto: Norme tecniche sulle costruzioni - D.M. 14.1.2008 (NTC 2008). Quesito – Impiego elementi in legno strutturale per palificate/strutture sostegno.”**

Si riscontra la nota PEC in data 29.9.2016 (prot. STC n.8243) con la quale codesto Ufficio ha posto una serie di quesiti riguardanti l’esatto inquadramento normativo di una struttura di contenimento del terreno, costituita, parzialmente o in toto, da “legno strutturale”.

Preliminarmente si rappresenta che il Consiglio Superiore dei LL.PP., in quanto massimo organo tecnico consultivo dello Stato, non può che esprimere il proprio avviso con riguardo a materie inerenti questioni strutturali e limitatamente a problematiche che sottintendono caratteri generali di interpretazione delle norme. Viceversa, istituzionalmente, il controllo della corretta applicazione delle norme medesime e la relativa valutazione dei singoli casi concreti ricadono nell’ambito di competenza degli Uffici territorialmente preposti.

[...]

Innanzitutto, si ha motivo di ritenere che i manufatti in argomento, che nel testo stesso del quesito sono individuati quali opere aventi “*funzione di contenimento del terreno*” e realizzate “*per il rimodellamento di scarpate e versanti*”, concettualmente non possano non trovare adeguato inquadramento nelle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al DM 14.1.2008 (NTC 2008)Ⓞ, con riferimento specifico proprio al capitolo 6.3, che tratta di “*stabilità dei pendii naturali*” e di “*controllo degli interventi di stabilizzazione*”, ed al cap. 6.5, che tratta di “*opere di sostegno*” e degli “*interventi atti a sostenere in sicurezza un corpo di terreno*”.

Ciò posto, tenuto anche conto delle problematiche di sicurezza della pubblica incolumità che con evidenza appaiono sottese al tipo di opere in argomento, non può che derivarne la piena applicabilità delle citate NTC2008Ⓞ e, quindi, l’assimilazione concettuale di dette opere alla definizione di “costruzione”. Ne deriva anche l’applicazione delle procedure tecnico amministrative previste dal vigente DPR 380/2001, tra cui il “deposito” presso i competenti Uffici regionali ed il collaudo statico.

Per quanto riguarda la possibilità di utilizzo a fini strutturali di materiale ligneo per il quale “*non è stata fornita alcuna documentazione riguardo alla procedura di qualificazione seguita*”, innanzitutto si rammenta che le NTC 2008 prevedono che nel nostro territorio nazionale tutti i materiali/prodotti ad uso strutturale (e quindi anche il legno) siano certificati ai sensi del principio generale esposto al p.to 11.1 delle Norme e secondo le indicazioni di

dettaglio fornite nel cap. 11.7 delle stesse Norme①.

② In linea principale, per gli usuali prodotti strutturali in legno è previsto che i materiali base siano dotati di apposita certificazione, o attraverso la marcatura CE, laddove siano state emanate norme europee armonizzate, quali le EN 14080 e le EN 14081, ovvero attraverso la procedura di qualificazione nazionale, di cui al par. 11.7.10 delle NTC 2008.

[...]

In tutti questi casi, quando attraverso una delle modalità sopra evidenziate il prodotto strutturale sia dotato di preliminare certificazione secondo le NTC 2008, esso può essere utilmente impiegato a fini strutturali, sempre che ciò avvenga in piena conformità alle specifiche produttive ed alle caratteristiche dichiarate (ovvero, conformemente a quanto riportato nella dichiarazione di CE, nell'ETA o nella Certificazione di idoneità del Consiglio Superiore). Il p.to 11.1 citato prescrive espressamente, e senza possibilità di deroga, che *“i materiali ed i prodotti per uso strutturale, utilizzati nelle opere soggette alle presenti norme, devono rispondere ai requisiti indicati”*: è, quindi, di tutta evidenza che materiali e prodotti strutturali non identificati e qualificati all'origine dal produttore, non possono essere accettati dal Direttore dei lavori ed incorporati nelle opere. Per tali materiali strutturali non qualificati all'origine, le attuali NTC 2008 non prevedono alcuna possibilità di “sanatoria” a posteriori③, o prove sperimentali che possano surrogare la mancata qualificazione degli stessi da parte del produttore.

Inoltre, per completezza, si rammenta che le NTC 2008 prescrivono che laddove si provveda, in appositi stabilimenti, ad effettuare *“la lavorazione degli elementi base per dare loro la configurazione finale in opera”*, cioè si apportino a tali elementi modifiche consistenti in *“intagli, forature, applicazione di piastre metalliche etc.”*, detti stabilimenti sono da considerarsi a tutti gli effetti come Centri di lavorazione del legno④, e come tali devono obbligatoriamente procedere alla qualificazione prevista dalle NTC 2008, attraverso apposita denuncia di attività da presentare a questo Servizio. Naturalmente, in ogni caso, appurata la qualificazione e la identificazione del prodotto conformemente alle NTC 2008, è poi di primaria importanza che siano pienamente rispettate le modalità di calcolo e verifica ⑤ prescritte dalle NTC 2008. A maggior specificazione di quest'ultimo inciso, si sottolinea che anche il sistema costruttivo realizzato con gli elementi-base *“regolarmente certificati”* dovrà essere sempre progettato attraverso una Relazione di calcolo che da un lato faccia rigoroso riferimento alle caratteristiche dei materiali certificati ed alle relative particolarità costruttive, e che dall'altro risponda in pieno ai livelli di sicurezza ed alle prescrizioni delle Norme Tecniche vigenti sul territorio nazionale (attualmente, le NTC 2008).

Infine, in merito alla parte di quesito che tratta la possibilità di “violazione al DM 14 gennaio 2008”, si osserva che il mancato rispetto dell’obbligo di impiego di elementi strutturali dotati della prescritta qualificazione si configura certamente, dal punto di vista amministrativo, come una mancata applicazione delle prescrizioni contenute nel Regolamento UE n.305/2011 e nel DM 14.1.2008, a loro volta connesse agli adempimenti ed agli obblighi di cui alle leggi n.1086/71 e n.64/74, i quali individuano chiaramente le sanzioni previste, rendendo obbligatorio l’avvio del procedimento sanzionatorio.”

[...]

Annotazioni:

- 1) Il parere è datato 2016 ma nel 2018 è stata pubblicata la nuova versione delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) con D.M. 17 gennaio 2018. Perciò tutti i riferimenti nel testo vanno aggiornati alle NTC 2018.
- 2) Le NTC stabiliscono tutte le procedure per l’identificazione, la qualificazione e la certificazione del legno strutturale. La procedura stabilita dalle norme è in linea con quanto previsto a livello di normativa europea e prescritto dalla C.P.R. (Regolamento Prodotti da Costruzione). Al momento attuale non esistono norme europee armonizzate che consentano di qualificare e marcare CE il legno tondo e non sono previste per l’immediato futuro. Le NTC indicano però la strada che viene dettagliata nella Circolare Ministeriale (CSLLPP 2019) successiva alla pubblicazione delle NTC 2018 la quale indica al § C11.7.2.2 che *“Ai fini della classificazione del materiale, in assenza di specifiche regole (ad. es UNI 11035-3), si potrà fare riferimento a quanto previsto per gli elementi a sezione rettangolare, senza considerare le prescrizioni sugli smussi e sulla variazione della sezione trasversale, purché nel calcolo si tenga conto dell’effettiva geometria delle sezioni trasversali.”*. In altri termini si possono applicare le conoscenze e le informazioni concernenti il legno segato estendendole al legno tondo.
- 3) Il Parere vuole esplicitare che non esistono prove realizzate ex post, fatte direttamente in situ, che consentano di certificare il materiale utilizzato senza certificazione.
- 4) I Centri di lavorazione del legno corrispondono ad aziende che effettuano la lavorazione degli elementi base per dare loro la configurazione finale (intagli, forature, applicazione di piastre metalliche, ecc.) per la produzione di elementi strutturali da mettere in opera. Tali centri devono essere qualificati e registrati presso il STC del CSLLPP dal quale devono avere ricevuto l’Attestato di denuncia di attività e hanno la responsabilità di qualificare materiali e prodotti per uso strutturale e di identificarli univocamente, secondo le procedure applicabili, in modo da garantirne la conformità all’impiego strutturale.
- 5) Il sistema di calcolo e verifica delle strutture portanti lignee è quello semiprobabilistico agli

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

stati limite previsto dalle NTC. Tale sistema, moderno e impiegato in Europa da decenni, è entrato in vigore formalmente in Italia nel 2009, con le prime NTC (2008). Per il legno fa riferimento alle Classi di resistenza e consente di verificare qualsiasi tipo di struttura.

### *2.5.3.1 Ispezioni sul costruito*

Da progetto è previsto che il legname utilizzato nelle opere di I.N. perda gradualmente la sua funzione portante, a causa delle alterazioni fungine, e venga sostituito un po' alla volta nella sua funzione dai materiali vivi che nel frattempo si saranno sviluppati. Può avvenire che lo sviluppo delle piante vive non si realizzi così come progettato oppure che altri eventi franosi costringano a verificare e ricalcolare l'opera o ancora che altre ragioni di sicurezza richiedano il controllo della capacità portante della struttura. In casi come questi potrebbe rendersi necessario controllare lo stato di conservazione degli elementi lignei allo scopo di verificare se siano ancora in grado di assolvere alla loro funzione e in che misura. In tal caso si può applicare il principio dell'ispezione e valutazione tecnologia degli elementi portanti lignei (Bonamini *et al.* 2001), le quali seguono una procedura accettata in sede scientifica e convalidata dall'esperienza e permettono all'esperto di legno strutturale (ad esempio il tecnologo del legno) di stimarne lo stato di conservazione e la funzionalità meccanica nonché di stimare l'efficienza delle unioni fra membrature.

La strumentazione basilare necessaria per l'ispezione strutturale è piuttosto semplice ed è costituita da metri, sia flessibili che a stecca, per le misurazioni (un cavalletto dendrometrico<sup>8</sup> faciliterebbe alcuni rilevamenti), cacciaviti a taglio di dimensioni differenti e un martello, meglio se di gomma, necessari per saggiare la consistenza del legno. Lametta, per mettere alla luce una sottile porzione di legno nuovo, e lente di ingrandimento, per osservarlo, solamente nel caso che occorra identificare la specie di appartenenza del tondame in opera.

La procedura per la valutazione tecnologica di un singolo elemento ligneo portante di I.N. consiste prioritariamente nella valutazione di eventuali alterazioni e danni da agenti biologici o da altre cause subiti dall'elemento ligneo dopo la messa in opera, e conseguentemente nella valutazione della sua sezione resistente attuale. L'indagine deve tenere in considerazione anche la qualità originaria del legno, dato che danni e alterazioni potevano essere già presenti sul tronco e non essere intervenuti successivamente. La fase di ricostruzione logica, successivamente all'ispezione, consiste nell'interpretazione dei risultati, che deve portare a ricostruire virtualmente una o più sezioni resistenti dell'elemento, al netto dell'eventuale presenza di zone di legno alterato, degradato da funghi o attaccato da insetti. La forma e la dimensione della sezione effettivamente collaborante alla funzione

---

<sup>8</sup> Strumento per misurare il diametro dei fusti di alberi in piedi, di pali e di legname tagliato, somigliante a un grosso calibro.

strutturale diviene in tal caso una “sezione residua”, e su questa, e relative dimensioni, potranno essere effettuate le necessarie verifiche del caso.

Sono da tempo disponibili altri strumenti utili ai fini dell’ispezione tecnologica. Ne presentiamo un paio, più adatti alle applicazioni di I.N. Il trapano strumentato: si tratta di speciali trapani (detti anche trapani densitometrici) in grado di rilevare in maniera continuativa le variazioni dei parametri di rotazione della punta e di avanzamento nel legno, i quali risentono della presenza di anomalie e difetti, in presenza dei quali il progresso nel legno può risultare più difficoltoso (ad es. nodi), o incontrare meno resistenza (come ad es. fessure e marciume). In base allo strumento vengono rilevate in alternativa a) la potenza assorbita dal motore, a regime di rotazione e velocità di avanzamento della punta costanti, b) la variazione della rotazione a parità di potenza elettrica erogata, c) il momento torcente sulla punta. L’azione della punta (di solito una punta a lancia) produce tipicamente un foro di 2÷4 mm di diametro. Quello che si ottiene è il grafico di un profilo di misura con le variazioni di resistenza alla foratura normalmente proporzionali alla variazione di densità, da cui dedurre la presenza, l’estensione e il livello di degradamento del legno. La trivella di Pressler: si tratta di una trivella manuale carotatrice caratterizzata da un tubo di acciaio temperato, con un bordo affilato in grado di incidere il legno, provvisto di una filettatura esterna tagliente per consentire alla punta di avanzare all’interno dell’elemento ligneo. Lo strumento serve a ottenere una piccola carota di legno dall’interno degli elementi, da estrarre e valutare. Nata per carotare alberi in piedi, e quindi legno molto umido, è un po’ più complicata da utilizzare su legname stagionato in opera, che risulta più duro. Un altro strumento che può fornire informazioni utili è l’igrometro elettrico (igrometro a elettrodi).

Valutazione a parte deve essere effettuata sulle unioni e sui sistemi utilizzati per attuarle. Spesso i punti di collegamento sono quelli in cui il marciume ha comportato i maggiori effetti, grazie alla disponibilità di punti di accesso per l’acqua (fori, intagli, ecc.) e al suo mantenimento per lungo tempo a causa della scarsa ventilazione (soprattutto nelle superfici di contatto tra legno e legno dei tronchi oppure tra piastre o altri elementi metallici e legno).

I risultati ricercati con l’ispezione svolta da persona esperta del legno, devono condurre alla ricostruzione di una o più sezioni residue di ciascun elemento ligneo, con particolare attenzione agli elementi maggiormente sollecitati (sezioni critiche), e alle zone di collegamento tra membrature. Alle sezioni residue, quindi al netto delle zone ammalorate o in cui la marcescenza è incipiente, possono essere associati i valori di resistenza del legno normale, attraverso cui poter effettuare la verifica strutturale dell’opera e il controllo che la stessa stia in sicurezza.

**Bibliografia Par. 2.5**

BONAMINI G., UZIELLI L. (2021) - Manuale di scienza e tecnologia del Legno. CLUT editrice. ISBN 9788879924405

BONAMINI G.; NOFERI M.; TOGNI M.; UZIELLI L. (2001) - Manuale del legno strutturale - Vol 1 - Ispezione e diagnosi in opera. ROMA: Mancosu, ISBN:88870170108

GIORDANO G. (1984) - IL LEGNO. Vademecum per gli operatori. 1984 VI edizione IL CERILO EDITRICE ISBN 88 - 85048 - 20 – X

GIORDANO G. Tecnologia del legno. Volumi: I (1981), III,2 (1983), III1 (1986), III2 (1988), U.T.E.T., Torino

GIORDANO G., CECCOTTI A., UZIELLI L. (1999) - Tecnica delle costruzioni in legno, V ed. 1999, Hoepli, Milano

NARDI BERTI R. (2006) - La struttura anatomica del legno ed il riconoscimento dei legnami italiani di più corrente impiego (II edizione) – A cura di Berti, Fioravanti, Macchioni. Casa editrice ECOALLECO ISBN: 9788890166006

MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI - Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» [NTC 2018]

Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.

RANTA-MAUNUS A. ET AL., (1999) - Round small diameter timber for construction. Final report of project FAIR CT 95-0091. VTT, publication383 pp:191+19. Espoo, Finland <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/1999/P383.pdf>

TOGNI M. (2021) - Legno tondo. Massime prestazioni con minimi impatti. SHERWOOD. FORESTE ED ALBERI OGGI, vol. 254, pp. 26-26, ISSN:1590-7805 <https://www.rivistasherwood.it/temi-trattati-su-newood>

TOGNI M.; CAVALLI A.; MANNOZZI D. (2013) - Chestnut: from coppice to structural timber. The case study of "Uso Fiume" beams sampled in Liguria. In: Horizons in agricultural, forestry and biosystems engineering, Viterbo, September 8-12, PAGEPress Publications, vol. XLIV s2, pp. 1-4 <https://www.agroengineering.org/index.php/jae/article/view/jae.2013.s2.e1>

*LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA*

UNI EN 350:2016 - Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno - Prove e classificazione della durabilità agli agenti biologici del legno e dei materiali a base di legno

ZANUTTINI R. (a cura di), (2014) - Il legno massiccio. Materiale per un'edilizia sostenibile.

COMPAGNIA DELLE FORESTE S.R.L., ISBN:9788898850013

<https://www.federlegnoarredo.it/it/associazioni/assolegno/attivita-e-servizi-per-i-soci/pubblicazioni/il-legno-massiccio-materiale-per-un-edilizia-sostenibile>



## **2.6 BIOTECNICA E BIORIMEDIO IN AREA MEDITERRRANEA (V. Latteo)**

### **2.6.1 Specie vegetali coinvolte in area mediterranea**

Le applicazioni dell'Ingegneria Naturalistica per la salvaguardia degli ecosistemi e per lo sviluppo sostenibile hanno reso necessario l'approfondimento della biotecnica nella ricerca delle principali specie vegetali in grado di intervenire con meccanismi naturali per la depurazione delle acque e dei suoli.

L'utilizzo di specie vegetali come biorimedio è da tempo applicato per la depurazione naturale degli scarichi tradizionali e deve dipendere non solo dalle esigenze depurative ma anche dalla compatibilità con il paesaggio circostante, soprattutto nelle aree protette, nelle quali è opportuno individuare taxa autoctoni ed idonei (*Amato F., Marino P. & Cucco M., 2011*).

#### *2.6.1.1 Database delle specie mediterranee che attivano processi di fitodepurazione*

Le specie inserite nel Database 1 (riportato in fondo al contributo), per la peculiarità dell'ambiente di appartenenza o per valenza estetica, sono specie vegetali che attivano meccanismi biologici utili ai fini della depurazione delle acque e dei suoli (*Latteo V., 2012*).

Le specie autoctone censite e riportate nel database sono state verificate con il Catalogo delle piante vascolari di potenziale impiego negli interventi di fitodepurazione della Sicilia e il prontuario delle piante spontanee in Sicilia (*Giardina G. et al., 2007*). Inoltre, nel database, sono stati estrapolati alcuni taxa di specie che attivano meccanismi fitodepurativi già noti, ovvero le capacità biotecniche delle piante in riferimento alla matrice ambientale di pertinenza e l'autore coinvolto nel riconoscimento delle stesse.

I processi di depurazione naturale ad opera delle piante riportate in letteratura scientifica permettono la rimozione dei nutrienti, degli elementi traccia presenti sotto forma di fertilizzanti, delle coltivazioni azoto-fissatrici, dei contaminanti, di alcuni elementi traccia e dei radionuclidi.

### **2.6.2 Impianti di fitodepurazione complessi**

Gli impianti di fitodepurazione complessi sono progettati integrando sequenze di sistemi naturali e sono da preferire quando il sistema naturale, che riproduce l'ecosistema delle zone umide naturali, può dare un risultato insoddisfacente e le condizioni pedologiche e climatiche della zona rimangono favorevoli.

La scelta delle tecnologie e delle specie vegetali da impiegare negli impianti di fitodepurazione dipendono dall'efficienza depurativa da raggiungere, dalle caratteristiche pedologiche, climatiche, paesaggistiche del sito e dal tipo di acque da trattare. Il sistema di fitodepurazione complesso richiede

## LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA

una particolare attenzione per la combinazione delle caratteristiche biotecniche delle piante, indispensabili in alcuni luoghi, al fine dell'impiego della giusta tecnica esecutiva.

Per esempio, dal punto di vista biotecnico la *Phragmites australis* (Figura 2.56) ha una certa tolleranza alle condizioni climatiche, la crescita rapida, e 0,6 m di apparato radicale che favorisce la trasmissione di ossigeno nelle parti sommerse al fine di accelerare i processi di rimozione dei composti azotati.

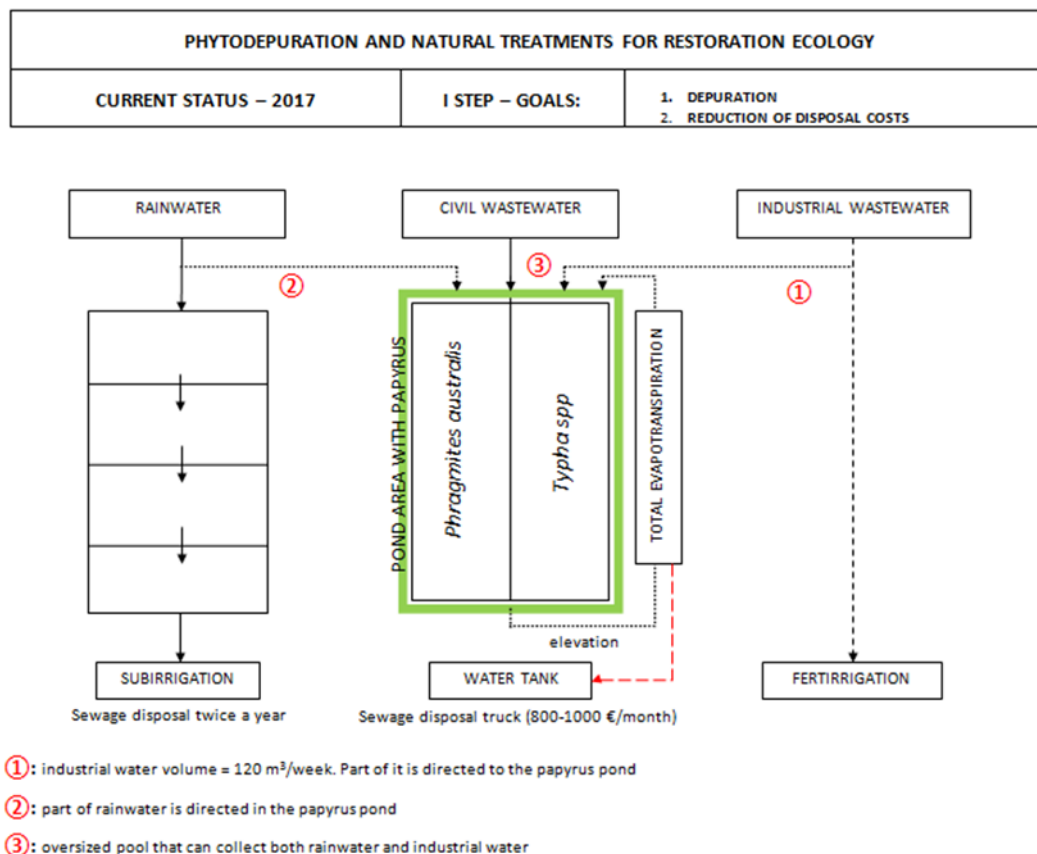


Figura 2.56 Schema di impianto di trattamento dell'acqua a Modica (Ragusa 2017).

L'esperienza ha inoltre riportato una grande risposta da parte del *Cyperus Papyrus var. nana*, messo a dimora nel canale perimetrale dell'impianto, per aumentare il pregio naturalistico dell'intervento in quanto il taxa autoctono appartiene a quei generi idonei alla rimozione dei metalli in soluzione acquosa (Figura 2.57).

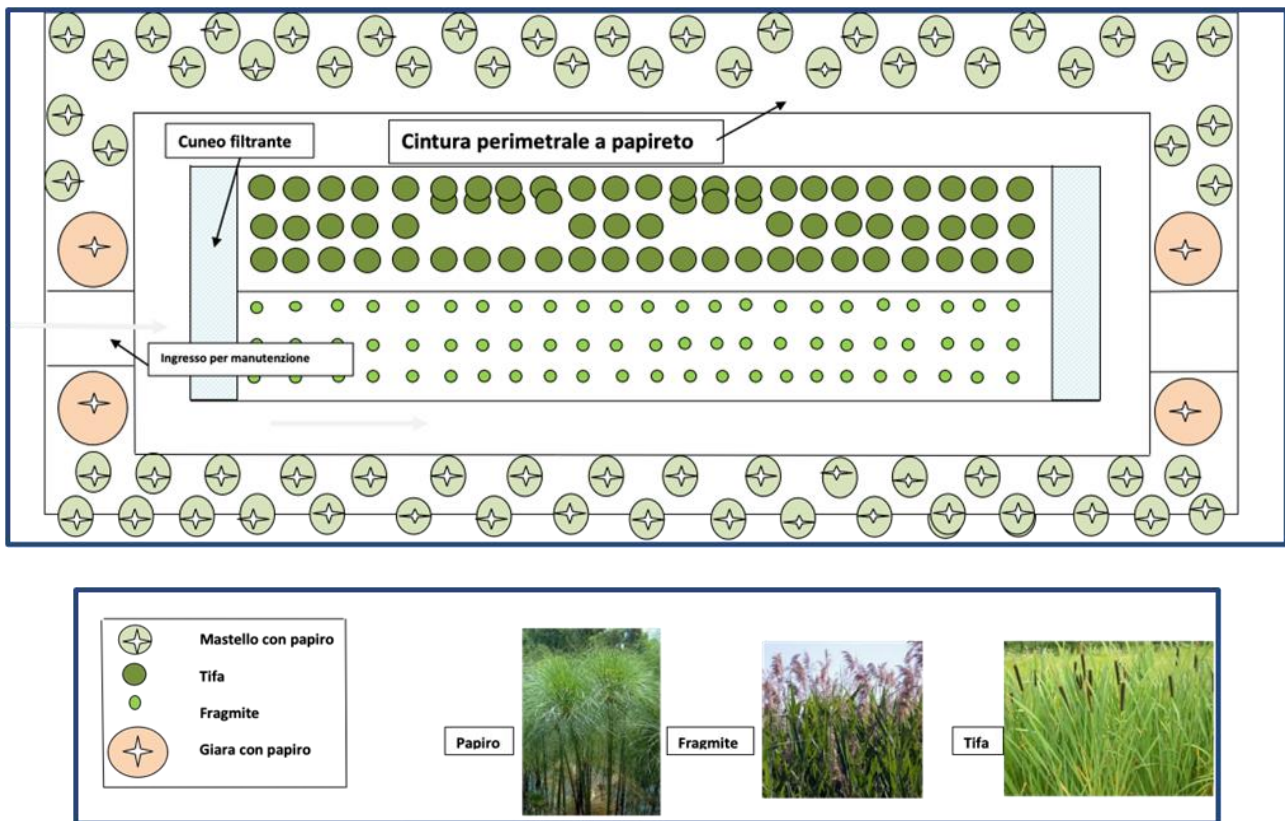


Figura 2.57 Piante utilizzate nell'impianto di trattamento a Modica (Ragusa 2017).

L'impiego della fertirrigazione con acqua proveniente da trattamenti depurativi su oliveti da mensa assume particolare valore sperimentale in quanto viene intrapresa un'analisi della qualità del frutto volta ad accertare eventuali modifiche delle caratteristiche organolettiche e sanitarie.

L'obiettivo di consentire la depurazione naturale associandola al risparmio dei costi di smaltimento e al miglioramento del paesaggio acquatico potrà essere così implementato in un contesto industriale (Pirrerà G. et al., 2017).

Nei casi più complessi di sistemi di impianto di fitodepurazione utilizzato per l'ecologia industriale, i processi depurativi potrebbero essere implementati mediante l'utilizzo di specie vegetali agricole idonee al fine di azzerare gli scarichi dei reflui.

È inoltre possibile considerare l'aspetto olistico, con aspetti di economia circolare dal punto di vista delle risorse impiegate e per il risparmio di acqua e di energia dell'impianto. Infatti, attraverso il biorimediazione da parte delle macrofite acquatiche, dopo aver trattato la frazione organica stabilizzata, si ha una produzione di biomassa che può essere utilizzata per la produzione di bio-fertilizzante per i tecnosuoli. I tecnosuoli, suoli antropici derivati dalla miscela di più componenti, possono essere utilizzati in opere di bioingegneria e ripristino ambientale delle aree dragate.

## LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA

L'eventuale biomassa proveniente dalle specie arboree con alto potere calorifico potrebbe essere utilizzata per il recupero di energia, ottimizzando i costi di manutenzione dell'impianto nell'ottica di attivare aspetti di economia circolare per l'ecologia industriale (Pirrera G. et al., 2017).

Gli elevati rendimenti di rimozione del carico microbiologico ottenibili con i processi di fitodepurazione naturale suggeriscono inoltre che sarà possibile rispettare i limiti di qualità microbiologica che devono avere le acque per poter essere ritenute idonee alla balneazione e all'immissione nei corpi idrici ricettori.

### **Bibliografia Par. 2.6**

Amato F., Marino P. & Cucco M. (2011). *Prospetto delle piante vascolari native di potenziale impiego negli interventi di fitodepurazione in Sicilia. Quad. Bot. Amb. Appl.* 22 – 2011

Latteo V. (2012). *Screening delle specie vegetali idonee in phytoremediation* – Università di Palermo, Tesi Master in Recupero Ambientale e Ingegneria Naturalistica

Giardina G., Raimondo, Spadaro V. *A Catalogue of plants growing in Sicily* (2007)

ISPRA, 2012. *Guida Tecnica per la progettazione e gestione dei sistemi di fitodepurazione per il trattamento delle acque reflue urbane. Manuali e linee guida 81/21 ISPRA.*

Pirrera G., Amato F., Latteo V., Pluchino A. (2017). "Attitudine depurative delle piante per il restauro ecologico" 3rd International Symposium of Soil and Water Bioengineering - Materials and Techniques in Ecological Restoration, Sant'Agata di Militello, Messina, Italia

G. Pirrera, A. Pluchino, V. Latteo, F. Amato, L.M. Ferrara et al. Industrial ecology with phytoremediation by native species, WEF 2017

PLUCHINO A., PIRRERA G., LATTEO V., AMATO F., FERRARA L.M.(2017) "Industrial Ecology With Phytoremediation By Native Species" - L'Ingegnere Italiano - n. 3/2017 - Edizione Speciale World Engineering Forum 2017 PAG.58, 62

[https://www.cni.it/ingegnere-italiano-03-2017#prj\\_592bd727f3364/ingegnereitaliano/5000-01-03/64-65](https://www.cni.it/ingegnere-italiano-03-2017#prj_592bd727f3364/ingegnereitaliano/5000-01-03/64-65)

| Taxa                                     | Dati noti               |                        |            | Elementi traccia | RN | Contaminanti                | Matrice ambientale | Autori   |
|--|-------------------------|------------------------|------------|------------------|----|-----------------------------|--------------------|--|
|  | Famiglia                | Nome vernacolo         | Meccanismo |                  |    |                             |                    |  |
| <i>Alisma plantago-aquatica L.</i>       | <i>Alismantaceae</i>    | Mestolaccia comune     |            |                  |    |                             | Acque              | Borin 2003,Amato F,Marino P.,Cucco M.R. 2011                       |
| <i>Lemna gibba L.</i>                    | <i>Lemnaceae</i>        | Lenticchie d'acqua     | FE         | Cd               |    | Pesticidi                   | Acqua,Sedimenti    | De Busk et al. 1996,Kadlec and Knight 1996                         |
| <i>Lemna minor L.</i>                    | <i>Lemnaceae</i>        | Lemna minor            | FE,FD, RD  | CR,PB            |    | pesticidi, surfattanti, Las | Acqua,Sedimenti    | Rice,Anderson,Coots 1996,GAO 1998,Kadlec and Knight 1996,Salt 1995 |
| <i>Myriophyllum L.</i>                   | <i>Haloragaceae</i>     | Millefoglio d'acqua    | RF         | Cu,Pb            |    | Perclorati, TNT,PC E,HMX    | Acqua,Suolo        | Susarla et al. 1999,Boyd 1998                                      |
| <i>Nymphaea Neck</i>                     | <i>Nymphaeaceae</i>     | Ninfea                 |            |                  |    |                             | Acqua,Sedimenti    | Wetzel 2001, Amato F,Marino P.,Cucco M.R. 2011                     |
| <i>Potamogeton pectinatus L.</i>         | <i>Potamogetonaceae</i> | Brasca delle lagune    | FE         | Se,B             |    |                             | Acqua,Sedimenti    | Glandon and McNabb 1978, CHM2 Hill 2005                            |
| <i>Ranunculus L.</i>                     | <i>Ranunculaceae</i>    | Ranuncolo acquatico    |            |                  |    |                             | Acqua,Sedimenti    | Amato F,Marino P.,Cucco M.R. 2011                                  |
| <i>Ruppia maritima L.</i>                | <i>Potamogetonaceae</i> | Erba da chiozzi comune |            |                  |    |                             | Acqua,Sedimenti    | Amato F,Marino P.,Cucco M.R. 2011                                  |
| <i>Ruppia cirrhosa (Petagna) Grande</i>  | <i>Potamogetonaceae</i> | Erba                   |            |                  |    |                             | Acqua,Sedimenti    | Amato F,Marino P.,Cucco M.R. 2011                                  |
| <i>Bolboschoenus maritimus (L.)Palla</i> | <i>Cyperaceae</i>       | Lisca Marittima        | Fe,FV      | Se               |    |                             | Acqua,Fanghi       | Gao et al.2003   |
| <i>Carex nigra L.</i>                    | <i>Cyperaceae</i>       | Carice fosca           | FE,FS      |                  | x  |                             | Suolo,fanghi       | Lamers,1998,Olsen 1994,Amato F,Marino P.,Cucco M.R. 2011           |

LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA

|  |              |                            |             |                             |  |  |                                 |  |
|--|--------------|----------------------------|-------------|-----------------------------|--|--|---------------------------------|--|
| <i>Hydrocotyle L.</i>                          | Umbelliferae | Soldinella acquatica       | RD,FE,FD    | Al                          |  |  | Suolo,fanghi                    | Salt 1995,Wass Gerke and Associates 2002,Amato F,Marino P.,Cucco M.R. 2011   |
| <i>Juncus communis var. effusus (L.) E.Mey</i> | Juncaceae    | Giunco comune              | FE,Fs       | Ni,Al, Mn, Cu,Cd            |  |  | Acqua                           | Samecka-Cymerman and Kempers 2001,Chague-Goff 2005, Garcia 2006,Boyd 1978,Deng 2004,Kadlec and Knight 1996   |
| <i>Scirpoides holoshoenus (L.)Sojàk</i>        | Juncaceae    | Giunchetto meridionale     |             | As,Pb                       |  |  | Suolo,Acque stagnanti,Sedimenti | H. Freitas, M.N.V. Prasad, J. Pratas, 2003   |
| <i>Scirpus Lacustris L.</i>                    | Cyperaceae   | Giunco di palude           | RF,FE,FS,RD | CO,CU,FE,MN,NI, Cr,Al,Se,Cd |  | pesticidi, fenoli  | Fanghi                          | Kadlec and Knight 1996,Vymazal 1995,Adler 1996,Chandra 1997,Amato 2011, Negri, Hinchman, and Johnson 1998,Pullin and Hammer 1989,George et al 2003, Stearman et al. 2004 |
| <i>Cynodon Dactylon L. Pers</i>                | Graminaceae  | Gramigna rampicante        | FE,FS       | As                          |  |  | Suolo                           | Jonnalagadda and Nenzou, 1997  |
| <i>Arundo collina L.</i>                       | Graminaceae  | Canna di versante          |             |                             |  |  | Suoli                           | Pirrer G.  |
| <i>Arundo donax L.</i>                         | Graminaceae  | Canna comune               | ET          |                             |  |  | Suoli                           | Cirelli G.L.   |
| <i>Phragmites australis (Cav.) Trin.</i>       | Graminaceae  | Canna palustre o cannuccia | FE,RD       | Fe,Al, Mn, Zn               |  | benzene, toluene, clorobenzene, cloroformio, dicloroetano, bromoformio | Acque,suoli umidi               | Mason and Bryant,1975,Muelman et al. 2002,Greenway 2002,Armstrong et al. 1996,Vymazal et al. 2006,Eckhardt 1999,Anderson, Guthrie and Walton 1993                        |

I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

|  |                       |                        |       |                      |   |                        |                           |  |
|--|-----------------------|------------------------|-------|----------------------|---|------------------------|---------------------------|--|
| <i>Typha angustifolia</i> L.                 | <i>Typhaceae</i>      | Lisca a foglie strette | FE    | Al                   |   |                        | Acque affioranti          | Mason and Bryant,1975,Samecka-Cymerman and Kempers 2001, Pullin and Hammer 1989                        |
| <i>Typha latifolia</i> L.                    | <i>Typhaceae</i>      | Biodo, Mazzasorda      | FE    | Pb,Cu, Zn,Cd, Se     | x | Surfattanti-LAS        | Acque affioranti          | Herskovitz 1986,Boyd 1998,shutes 1993,Smith et al. 1988,Gao et al.2003, Mirka et al.1996               |
| <i>Typha spp.</i>                            | <i>Typhaceae</i>      | Tifa,Stiancia          | RD,FS | Pb,Cr,Cu,Mn          |   | pesticidi, Fenoli, Oli | Acque                     | Kadlec and Knight, 1996,Adler 1996,Hansel et al.2002,Anderson, Guthrie, and Walton 199                 |
| <i>Arabidopsis thaliana</i> L. (Heyn)        | <i>Cruciferae</i>     | Arabetta comune        | FV,FE | Hg,As, Zn, Pb,Cu     |   |                        | Suolo e acque sotterranee | Dhankler,2002 Li 2005, Haydon and Cobbett 2007, Xu 2009, Song 2003, Lee 2003,Wu et al.(1996)(salinity) |
| <i>Astragalus</i> L.                         | <i>Leguminosae</i>    | Astragalo              | FE    | Se                   |   |                        | suolo                     | Beath et al. (1937)  |
| <i>Helianthus Annus</i> L.                   | <i>Asteraceae</i>     | Girasole comune        | FE,RF | Ni,U,Cu,Cd,Cr,PB, Mn | x |                        | Suolo                     | Salt et al. 1995,Lewis and MacDonell, 1990, Kumar et al. 1995  |
| <i>Phalaris arundinacea</i> L.               | <i>Graminaceae</i>    | Scagliola              | FD    | AL,Mn, Zn            |   | RDX,Trinitrotoluene    | suolo                     | Vymazal et al.2006,Samecka-Cymerman and Kempers 2001,Behrends  |
| <i>Polygonum hydropiper</i>                  | <i>Polygonaceae</i>   | Poligono peped'acqua   | RF    | Mn,Hg, Ni            |   |                        | Acque                     | Qian et al., 1999  |
| <i>Thlaspi carulescens</i> J.Presl & C.Presl | <i>Cruciferae</i>     | Erba stornalpina       | FE,FS | Zn,Cd, Cu            |   |                        | Suolo                     | Kupper e Kochian 2010,Basic 2006, Salt 1995,Baker &Walker(1990)  |
| <i>Salicornia europaea</i> L.                | <i>Chenopodiaceae</i> | salicornia             | FE    | Ca,Mg, K             |   |                        | Suolo                     | Keiffer, 1996  |

LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA

|   |                 |                    |           |                    |  |  |                       |  |
|---|-----------------|--------------------|-----------|--------------------|--|--|-----------------------|--|
| <i>Spergularia salina</i> J. & C. Presl               | Caryophyllaceae | Spergularia marina | FE        | Mg,K               |  |  | Suolo                 | Keiffer, 1996  |
| <i>Cichorium intybus</i> L.                           | Asteraceae      | Cicoria comune     | FE        | V                  |  |  | Suolo                 | Martin et al. 1996   |
| <i>Hordeum jubatum</i> L.                             | Graminaceae     | Orzo               | FE,FS     | Na,Ba              |  |  | Suolo                 | Cipollini and Pickering 1986   |
| <i>Brassica arvensis</i> L. var. <i>juncea</i> Kuntze | Cruciferae      | Senape bruna       | FS,RF,FE  | Cr,Cu, Cd,Ni,Pb,As |  |  | Acqua,suolo           | Phytotech 1997,Blaylock 1997,Salt 1995-1997,Dushenkov 1995,Kumar 1995,Reisenger 2008,Wangeline 2004    |
| <i>Brassica napus</i> L.                              | Cruciferae      | Cavolo navone      | Fe,FV     | Tl,Se,Ni,As        |  |  | Suolo                 | Banuelos, 1997,Pianelli 2005,Nie 2002,He & Cramer 1993(salinity),Tremel et al.1997                     |
| <i>Agrostis tenuis</i> L.                             | Graminaceae     | Cappellini         | FS        | Cu,Pb,Zn           |  | Diesel                                     | Suolo,Acque stagnanti | Smith and Bradshaw, 1979-Amato   |
| <i>Carex spp</i>                                      | Cyperaceae      | Carice             | FE        |                    |  |  | Suolo,fanghi          | Vashegyi A et al.,Borin 2001   |
| <i>Epilobium hirsutum</i> L.                          | Onagraceae      | Garofano d'acqua   |           |                    |  |  | Acque                 | Amato F,Marino P.,Cucco M.R. 2011  |
| <i>Eupatorium capillifolium</i>                       | Asteraceae      | Canapa acquatica   |           | V                  |  |  | Acqua                 | Martin et al. 1996   |
| <i>Festuca arundinacea</i> (Schreber)                 | Graminaceae     | Festuca fascalon   | FS,FE, RD | Cu                 |  | Antrace ne,benzopirene, IPA, Fluorant hene | Suolo                 | Reilley Banks 1993, Banks and Schwab 1998  |
| <i>Lolium perenne</i> L.                              | Graminaceae     | Loglio comune      | FE,FS, RD | CU,Fe, Al          |  | TNT, Benzopirene,IPA                       | Suolo                 | Ottabong,1990,Siciliano and Greer 2000,Ferro et Al 1999, Kennedy, and Knight 1997,Macklon and Sim 1990 |



I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

|  |                |                    |              |                |  |  |                         |  |
|--|----------------|--------------------|--------------|----------------|--|--|-------------------------|--|
| <i>Medicago Sativa L.</i>                          | Leguminosae    | Erba medica        | RD,FD,FE,    | Pb             |  | IPA,diesel   | Suolo                   | Kumar, 1995- Wiltse 1998,Reilley et al. 1996                                       |
| <i>Schoenus nigricans L.</i>                       | Cyperaceae     | Giunco nero comune |              |                |  |  | suolo,Acque stagnanti   | Amato F,Marino P.,Cucco M.R. 2011  |
| <i>Trifolium repens L.</i>                         | Leguminosae    | Trifoglio ladino   | RD           |                |  |  | Suolo                   | Marilley & Aragno 1999   |
| <i>Mentha aquatica L.</i>                          | Labiatae       | Menta d'acqua      |              |                |  |  | Acqua,Sedimenti         | Amato F,Marino P.,Cucco M.R. 2011  |
| <i>Cyperus spp.</i>                                | Cyperaceae     | Zigolo             | FE           | Al,Ca,Fe, Mn,K |  |  | Acqua                   | Amato F,Marino P.,Cucco M.R. 2011,Keiffer and Ungar 1996                           |
| <i>Schoenoplectus robustus (Pursh) M.T. Strong</i> | Cyperaceae     | Lisca costiera     |              | Se             |  |  | Suolo, Acque stagnanti  | Lin and Terry, 2003, Gao et al. 2003   |
| <i>Alyssum bertolonii Desv.</i>                    | Brassicaceae   | Alisso             | FE           | Ni             |  |  | Suolo                   | Becerra-Castro 2009, Barzanti 2011   |
| <i>Sarcocornia sp.</i>                             | Chenopodiaceae | Sarcocornia        |              |                |  |  |                         | Calheiros et al., 2010   |
| <i>Atriplex prostrata Phil</i>                     | Chenopodiaceae | Atriplice          | FE           | Ca,Mg, K, Na   |  |  | Suolo                   | Keiffer and Ungar, 1996  |
| <i>Tamarix gallica L.</i>                          | Tamaricaceae   | Tamerici           | ET           |                |  |  | Sabbia                  | Woodward 1996  |
| <i>Pinus ponderosa Dougl. ex Laws</i>              | Pinaceae       | Pino               | RD,FD,FE     |                |  | TCE  | Suolo                   | Anderson and Walton 1991, 1992, Entry, Rygielwicz, and Emmingham 1993              |
| <i>Populus Deltoides x Nigra DN34</i>              | Salicaceae     | Pioppo nero        | RD,FE, FV,FS | Pb,Se          |  | Aniline, TCE,PC E,m-Xylene, Pesticidi, Benzene, Erbicidi, BTEX | Suolo,acque sotterranee | Harvey, 1998- Burken and Shnoor 1997,Shnoor et al., 1995; Gatliff, 1994,Black 1995 |

LA COMPONENTE VIVA E GLI INERTI DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA

|                                |                   |                |                |                |  |  |                           |  |
|--------------------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|--|--|---------------------------|--|
| <i>Populus spp.</i>            | <i>Salicaceae</i> | pioppo tremulo | RF,FV,ET,FE,FD | Pb,Zn,Cd,Al,Ni |  | Ticloroetilene, tricloetano, Fenoli, Carbon Tetrachloride, Pesticidi | Suolo, acque sotterranee  | Kadlec and Knight, 1998, Newman 1999, Pierzynski, Kansas   |
| <i>Robinia pseudoacacia L.</i> | Leguminosae       | Robinia        | FD             |                |  |  | Suolo                     | Bailey and McGill 1999   |
| <i>Salix L.</i>                | <i>Salicaceae</i> | Salice         | FE,FS,ET,RD    | Cd,As,Pb,Zn    |  |  | Suolo                     | Hinchman, Negri, and Gatliff 1997<br>Carman, Crossman, and Gatliff 1997, 1998, Kuffner 2010, Frick et al. 1999 |
| <i>Betula nigra L.</i>         | Betulaceae        | Betulla        | ET             |                |  |  | Suolo                     | Woodward 1996  |
| <i>Fraxinus spp.</i>           | Oleaceae          | Frassino       | ET             |                |  |  | Suolo                     | Woodward 1996  |
| <i>Alnus spp.</i>              | Betulaceae        | Ontano         | ET             |                |  |  | Suolo                     | Woodward 1996  |
| <i>Morus rubra L.</i>          | Moraceae          | Gelso rosso    | RD             |                |  | PCB  | Suolo                     | (Fletcher and Hegde, 1995)   |
| <i>Nicotiana L.</i>            | Solanacea         | tabacco        | FE,FS,FV       | Pb,Hg,Cu       |  |  | Suolo e acque sotterranee | Singla-Pareek 2006, Nagata 2006, Heaton 2005, Thomas 2003  |
| <i>Ipomoea L.</i>              | Convolvulaceae    | Campanella     | FE             | Cu,Na          |  |  | Suolo                     | Baker & Walker (1990), Keiffer and Ungar 1996  |
| <i>Spartina spp.</i>           | <i>Juncaceae</i>  | Sparto         | RF,ET          |                |  |  | Sabbia, Suolo             | Negri, Hinchman, and Johnson 1998  |

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Legenda dei meccanismi di fitodepurazione:

FD- Fitodegradazione: l'azione diretta attraverso cui le piante assimilano, degradando, il contaminante o i metalli pesanti.

FE- Fitoestrazione: le piante attraverso le radici estraggono e concentrano, attraverso i nutrienti e all'acqua presente nel suolo anche i metalli.

FD- Fitodegradazione: assorbimento e trasformazione ad opera delle piante.

RD, RF- Rizodegradazione e Rizofiltrazione: degradazione del contaminante ad opera della rizosfera.

RN – Radionuclidi.

FS- Fitostabilizzazione: immobilizzazione per il contenimento dei materiali organici e inorganici tramite fitoaccumulo.

FV- Fitovolatilizzazione: i contaminanti organici e inorganici, se disponibili, sono prelevati dai tessuti della pianta e volatilizzati in atmosfera.

ET- Evapotraspirazione: meccanismi di controllo idraulico per opera delle piante.

### 3 GLI STRUMENTI IMPIEGATI IN INGEGNERIA NATURALISTICA

#### 3.1 RINFORZO RADICALE – COME SI MISURA E MODELLI DI STIMA

##### 3.1.1 Impiego di vegetazione autoctona negli interventi di Ingegneria Naturalistica e caratteristiche degli apparati radicali (F. Gentile, G. F. Ricci)

Nelle opere di Ingegneria Naturalistica le piante assumono il ruolo di materiale da costruzione vivo e con il loro progressivo sviluppo, singolarmente o in unione con materiale da costruzione inerte, permettono un consolidamento duraturo delle opere. Scegliere le giuste specie vegetali diventa fondamentale per la corretta progettazione. L'uso di piante non idonee può comportare l'insuccesso dell'intervento a causa della fallanza delle piante utilizzate, rivelatesi non adatte alle condizioni climatiche e/o pedologiche del sito nel quale si interviene.

Comunemente nelle opere di Ingegneria Naturalistica si privilegia l'uso di piante autoctone, per motivi di carattere tecnico ed ecologico. Spesso le piante locali presentano specifici adattamenti alle condizioni fitoclimatiche e geopedologiche del sito d'intervento, cosa che offre maggiori garanzie di sopravvivenza delle piante nelle fasi di attecchimento e successivo sviluppo. La scelta di piante autoctone consente, inoltre, di non stravolgere ma preservare (o ricostituire) la composizione floristica specifica dell'area d'intervento, scongiurando possibili contaminazioni genetiche ed ecologiche, che possono verificarsi con l'utilizzo di specie alloctone invasive (Lazzaro *et al.*, 2018). Per individuare e selezionare le specie autoctone si deve fare riferimento alle serie dinamiche della vegetazione potenziale naturale degli ecosistemi interessati dai lavori di Ingegneria Naturalistica. Lo studio della vegetazione reale permette di conoscere le specie vegetali che popolano il sito d'intervento e i rapporti fitosociologici che sussistono tra di esse. Se capita di operare in aree prive di associazioni vegetali naturali, lo studio della vegetazione "potenziale" permette di individuare le serie dinamiche più attinenti alle condizioni di campo, mediante lo studio di ecosistemi naturali in aree limitrofe, dove ancora persiste una copertura vegetale naturale.

Il numero di specie che emerge dagli studi di vegetazione può risultare spesso molto alto. La complessità e molteplicità delle situazioni con le quali occorre confrontarsi rende necessario dettagliare ulteriormente i criteri utilizzati per la scelta delle piante nelle opere di Ingegneria Naturalistica. Tra le specie vegetali autoctone si possono distinguere, infatti, gruppi di piante con caratteristiche biotecniche più utili alla realizzazione degli interventi e al loro funzionamento.

I parametri biotecnici delle piante riassumono una serie di caratteristiche biologiche e tecniche, che occorre conoscere per poter progettare al meglio un intervento di Ingegneria Naturalistica. Tali parametri aiutano a comprendere come la pianta si accresce, si riproduce e in che modo essa contribuisce a limitare i fenomeni di erosione e dissesto.

## I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

Le proprietà biologiche sono descrittive delle capacità riproduttive delle piante (riproduzione gamica o vegetativa), del loro adattamento all'ambiente e di ulteriori peculiari caratteristiche (emissione di radici avventizie, resistenza alla sommersione, azotofissazione) utili per progettare specifici interventi. Le proprietà tecniche sono descrittive della capacità delle piante di proteggere e consolidare il suolo e di regolare il bilancio idrologico e lo scorrimento idrico superficiale, grazie agli apparati epigeo ed ipogeo.

Mentre l'apparato epigeo (o aereo) della pianta svolge un ruolo chiave nell'intercettare le precipitazioni, riducendone la forza erosiva, l'apparato ipogeo (o radicale) svolge un ruolo chiave nel consolidare il terreno, specie lungo versanti e sponde dei corsi d'acqua. Nello specifico l'apparato radicale svolge numerose funzioni utili agli obiettivi dell'Ingegneria Naturalistica, tra cui l'ancoraggio degli strati superficiali di terreno agli strati più profondi e l'imbrigliamento del terreno nel fitto intreccio delle radici più piccole, con riduzione dell'erosione e del trasporto solido a valle. Studiando le caratteristiche degli apparati radicali si riesce a comprendere come questi contribuiscano a ridurre i fenomeni di dissesto e in funzione di quali fattori, permettendoci così di selezionare le specie vegetali più adatte a soddisfare gli obiettivi che gli interventi di Ingegneria Naturalistica si prefiggono.

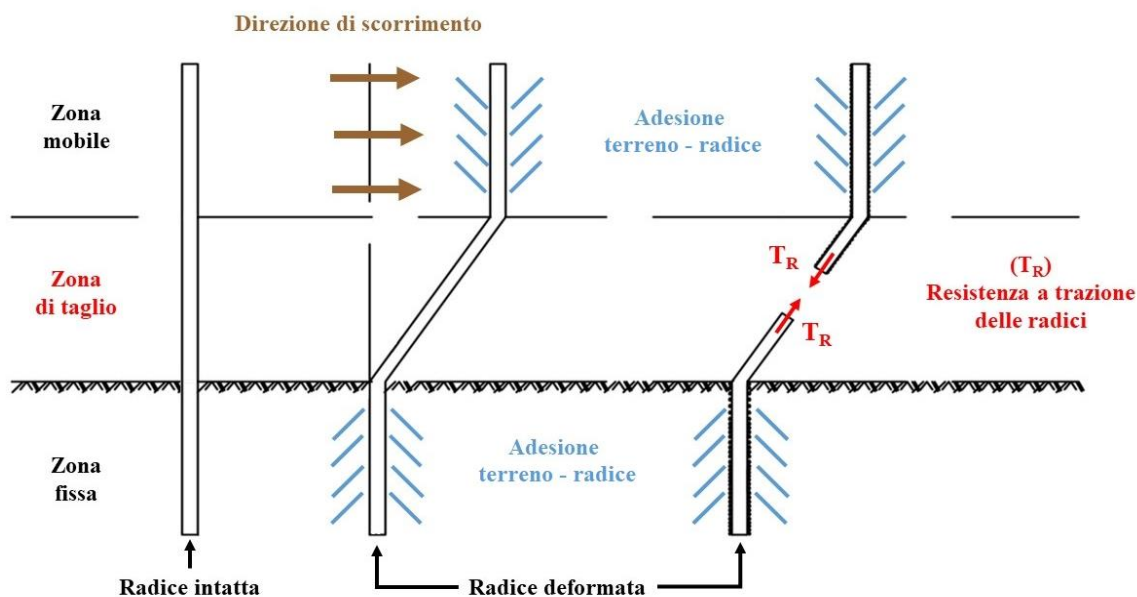


Figura 3.1 Schematizzazione di rinforzo radicale (figura modificata da Gentile et al., 1998)

Il modello descritto da Wu et al. (1979) dimostra come l'interazione meccanica tra radice e terreno contribuisca ad aumentarne la coesione. Il modello fa riferimento a singoli elementi radicali che attraversano una superficie di scorrimento tra due strati di terreno (Figura 3.1). Le radici (considerate perfettamente aderenti al terreno) si oppongono, deformandosi, allo scorrimento dello strato

superficiale su quello profondo. Alla deformazione delle radici corrisponde un aumento delle tensioni interne di trazione ( $T_R$ ), le quali si sviluppano solo nel caso in cui ci sia sufficiente attrito nell'interfaccia tra terreno e superficie della radice e la pressione geostatica sia tale da impedire i fenomeni di sfilamento e strappo.

Quindi, il modello di *Wu et al.* definisce la coesione radicale (1) come l'incremento di resistenza al taglio del terreno dovuto alla resistenza a trazione delle radici e alle forze di attrito e adesione di queste con il terreno:

$$C_R = 1,2 T_R \left( \frac{A_R}{A} \right) \quad (1)$$

dove:

- $T_R$  = resistenza a trazione media delle radici;
- $A_R/A$  = frazione trasversale di terreno occupata dalle radici, definita densità radicale.
- 1,2 o 0,5 ...

L'unica condizione che deve essere rispettata, affinché il modello di *Wu et al.* abbia compimento, è che la radice intercetti la zona di taglio attraversandola. La coesione radicale definita in tale modello fa riferimento al caso in cui tutte le radici che compongono un apparato radicale si rompano contemporaneamente, comportandosi come un corpo unico. Questo porta ad una sovrastima del valore di  $C_R$ , di entità variabile in base alla specie vegetale, come descritto dal *Fiber Bundle Model* (*Pollen & Simon, 2005*).

La resistenza alla trazione media delle radici ( $T_R$ ) rappresenta, quindi, una delle proprietà tecniche che bisogna valutare per individuare le specie vegetali che garantiscono maggiore coesione radicale, utili negli interventi di Ingegneria Naturalistica. Generalmente i valori di resistenza alla trazione delle radici variano tra 10 e 40 MPa, raggiungendo anche 70 MPa (*De Baets et al., 2008*). Numerosi fattori influiscono sulle caratteristiche degli apparati radicali, quali la specie e l'ambiente di crescita, l'età della pianta, le caratteristiche locali del terreno (nutrienti, struttura e tessitura), la profondità della roccia madre e della falda, la presenza di ciottoli di notevole dimensione, la presenza di elementi tossici, le associazioni con altre piante, la presenza di eventuali ostacoli. Questi fattori incidono sul livello generale di sviluppo e conformazione delle singole radici, (quindi di tutto l'apparato radicale) influenzando, ad esempio, il contenuto di lignina e cellulosa (*Genet et al., 2005*) o l'orientamento e dislocazione delle radici nel terreno, con effetti sul valore medio di  $T_R$ .

Numerosi studi hanno inoltre evidenziato come i valori di resistenza a trazione radicale decrescano con l'incremento del diametro delle radici. Le radici più sottili contribuiscono maggiormente a rinforzare il terreno rispetto alle radici più grosse, grazie alla maggiore superficie specifica a parità

## I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

di area radicata rispetto alle radici di maggior diametro. La relazione tra resistenza a trazione ( $T_R$ ) e diametro (D) delle radici viene usualmente espressa attraverso una legge di potenza (2):

$$T_R = aD^b \quad (2)$$

dove a e b sono coefficienti di regressione.

Solo le specie vegetali con apparati radicali sviluppati in profondità possono esercitare un ruolo importante nel consolidare gli strati di suolo più profondi, dove si ha maggiore probabilità di intercettare eventuali superfici di taglio. Per questo, in Ingegneria Naturalistica la selezione delle specie vegetali deve considerare anche la profondità che un apparato radicale può potenzialmente raggiungere.

Tra le specie tipiche delle aree Mediterranee, i valori di profondità radicale tendono ad essere contenuti ai primi orizzonti di suolo. La Tabella 3.1 riporta i valori di profondità radicale di alcune specie abitualmente utilizzate negli interventi di Ingegneria Naturalistica nella regione Mediterranea.

Tabella 3.1 Valori indicativi della profondità dell'apparato radicale di alcune specie impiegabili negli interventi di Ingegneria Naturalistica in ambiente Mediterraneo (Norris et al., 2008).

| SPECIE   | TIPOLOGIA | PROFONDITA' RADICALE (m) |
|--|-----------|--------------------------|
| <i>Lolium multiflorum</i> Lam. <i>ssp. italicum</i>    | Erbacea   | 0.8                      |
| <i>Lolium perenne</i> (L.)                             | Erbacea   | 1.2                      |
| <i>Agropyron repens</i> (L.) Beauv.                    | Erbacea   | 0.8                      |
| <i>Poa pratensis</i>                                   | Erbacea   | 0.65                     |
| <i>Medicago sativa</i> (L.)                            | Erbacea   | 2.5-5                    |
| <i>Festuca rubra</i> (L.) <i>ssp. commutata</i> Gaudin | Erbacea   | 0.5                      |
| <i>Genista tinctoria</i> (L.)                          | Arbustiva | 1                        |
| <i>Cytisus scoparius</i> (L.) Link                     | Arbustiva | 2                        |
| <i>Salix triandria</i> (L.)                            | Arborea   | 2-4                      |

Dal punto di vista morfologico generalmente gli apparati radicali possono essere di tipo *fittonante* o *fascicolato* (Figura 3.2). Nel primo caso la radice principale, situata centralmente, si sviluppa sia in lunghezza (fino a raggiungere talvolta notevoli profondità) che in spessore molto di più di quelle laterali, le quali tendono prima ad accrescersi orizzontalmente per poi incurvarsi verso il basso. Nel sistema radicale fascicolato le radici laterali possono uguagliare, nell'accrescimento, la radice principale ed esplorare più uniformemente il terreno, assumendo valori di resistenza alla rottura più o meno uniformi lungo tutta la singola radice.

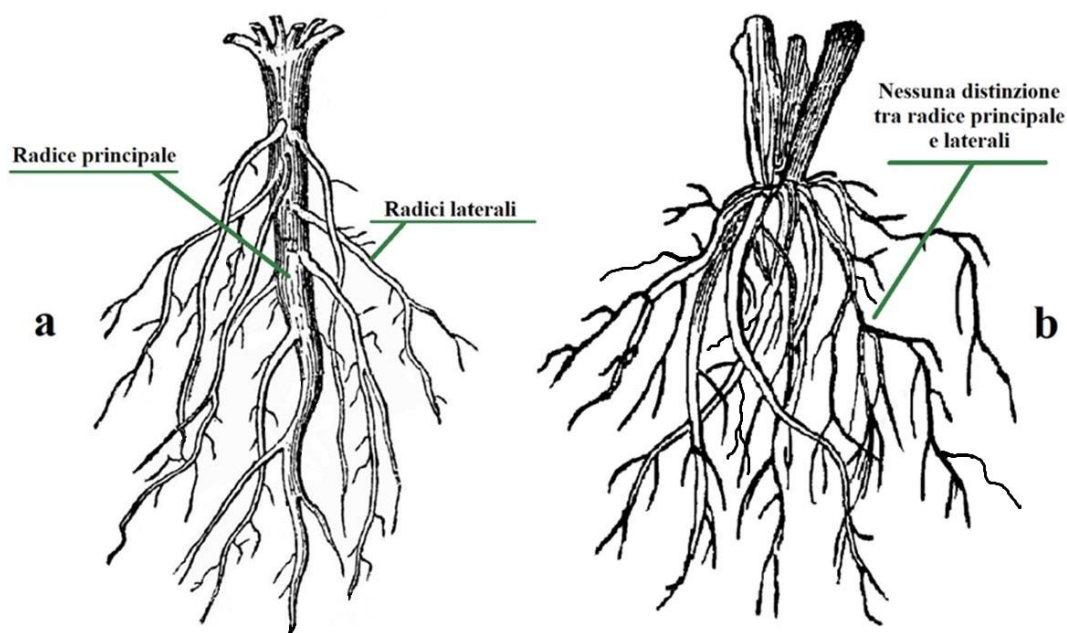


Figura 3.2 Rappresentazione di un apparato radicale a fittone (a) e fascicolato (b) (disegno Parete).

Il contributo meccanico di un apparato radicale fascicolato risulta complessivamente maggiore di quello esercitato da un sistema radicale a fittone. Ciò è dovuto alla presenza di numerose radici affastellate, più o meno sottili, che determina una maggiore coesione del terreno grazie agli alti valori di densità radicale ( $A_R/A$ ) e al più piccolo diametro delle radici che determina maggiore resistenza alla trazione ( $T_R$ ). Dato, però, che apparati radicali fascicolati sono tipicamente associati a monocotiledoni erbacee, spesso questi risultano poco profondi. Piante con apparati radicali a fittone possono presentare (nel caso di alcune specie arbustive ed arboree) fittoni accresciuti a notevole profondità, i quali permettono un robusto ancoraggio della pianta al terreno che favorisce la coesione degli strati più profondi. Pertanto, vantaggiosa può considerarsi la consociazione di piante autoctone con alternanza di specie a radice fittonante e a radici fascicolate.

Un esempio di applicazione di specie autoctone in ambiente Mediterraneo riguarda la sistemazione di aree particolarmente fragili, quali le aree calanchive in Basilicata (Gentile *et al.*, 1996). I calanchi sono solchi profondi, stretti e ripidi, separati da creste sottili a lama di coltello, prodotti da complessi processi erosivi tra i quali particolarmente importanti quelli di tipo gully, innescati dalle acque di ruscellamento nei terreni argillosi ad elevata pendenza.

Gli interventi di sistemazione idraulico-forestale delle aree calanchive, realizzati a partire dagli anni Cinquanta del secolo scorso, furono realizzati con tecniche che oggi potremmo definire di Ingegneria Naturalistica, seppur *ante litteram*, e hanno risposto all'esigenza di ridurre la produzione di sedimento, causa di colate di fango o dell'interrimento di invasi artificiali a valle (Puglisi, 1963). In tali aree si osservò che sui calanchi era sempre presente della vegetazione spontanea la quale, però,



## I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

veniva regolarmente danneggiata dalle colate di fango che si formavano nelle aree contigue. Pertanto, si proposero interventi, basati sull'impiego di piante autoctone, aventi lo scopo di disinnescare o intercettare la formazione delle colate di fango, mettendo al riparo la vegetazione che così poteva svilupparsi spontaneamente.

In una prima fase (Figura 3.3) si realizzavano solchi a spina di pesce diretti dai compluvi verso le creste; successivamente si invertiva l'andamento della spina dai displuvi (creste) verso le "vallecole", dove nel frattempo la vegetazione si era affermata (Puglisi & Trisorio-Liuzzi, 1992).

Mattia et al. (2005), hanno condotto uno studio con riferimento agli apparati radicali di *Lygeum spartum* (L.), specie erbacea, *Atriplex halimus* (L.) e *Pistacia lentiscus* (L.), specie arbustive, ampiamente impiegate negli interventi di sistemazione idraulico-forestale delle aree calanchive (Figura 3.4). Le analisi, effettuate su piante raccolte tramite escavazione in situ, hanno consentito di confermare la relazione (2), come si può osservare in Figura 3.5.

I valori di coesione radicale più elevati sono stati stimati nei primi strati di terreno, dove più alta è risultata la densità degli apparati radicali ( $A_R/A$ ) per tutte e tre le specie oggetto di studio, per poi diminuire abbastanza rapidamente con la profondità nel terreno a causa della presenza di un minor numero di radici. Nel caso dell'apparato radicale fibroso di *Lygeum spartum* (L.), i valori stimati di rinforzo radicale variano da 60 kPa negli strati superiori del terreno fino ad annullarsi alla profondità di 60 cm. Anche per *Pistacia lentiscus* (L.) e *Atriplex halimus* (L.), i valori stimati di rinforzo radicale diminuiscono con la profondità: i valori massimi di rinforzo radicale, rispettivamente per *Pistacia lentiscus* (L.) e *Atriplex halimus* (L.), sono di 20 e 6 kPa rispettivamente nei primi strati di terreno, per diventare pari a 3.5 kPa alla profondità di 70 cm per *Pistacia lentiscus* (L.) ed annullarsi alla profondità di 55 cm per *Atriplex halimus* (L.).

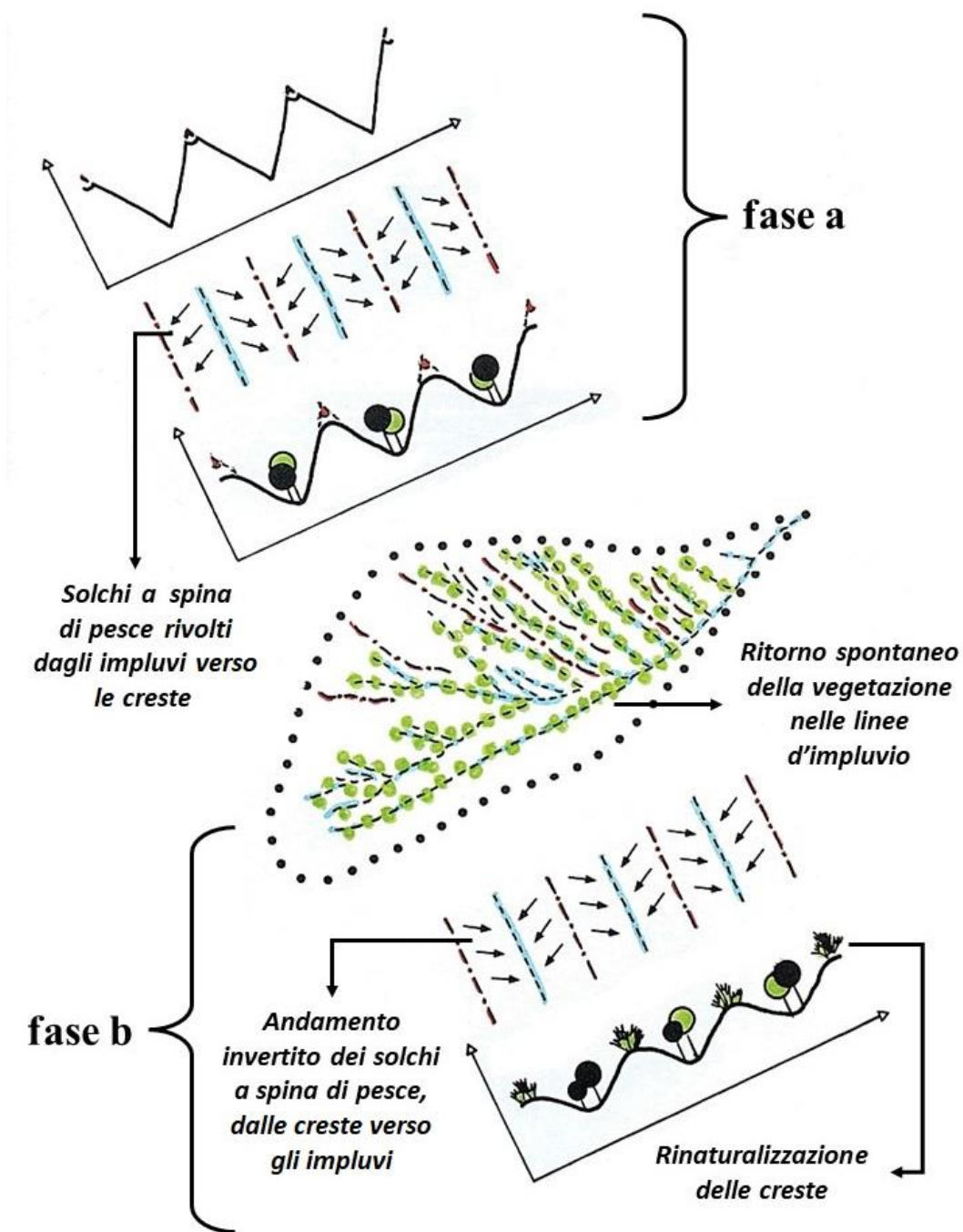


Figura 3.3 Sistemazione dei terreni calanchivi (figura modificata da Puglisi & Trisorio-Liuzzi, 1992)

Nel complesso, i risultati ottenuti da *Mattia et al.* (2005) evidenziano come l'effetto di *Lygeum spartum* (L.), *Atriplex halimus* (L.) e *Pistacia lentiscus* (L.), in termini di rinforzo dei terreni calanchivi, seppur limitato agli strati superiori di terreno, sia comunque comparabile a quello di

alcune specie arboree e arbustive presenti in ambienti con condizioni climatiche più favorevoli (Bischetti et al., 2005; Greenway, 1987).

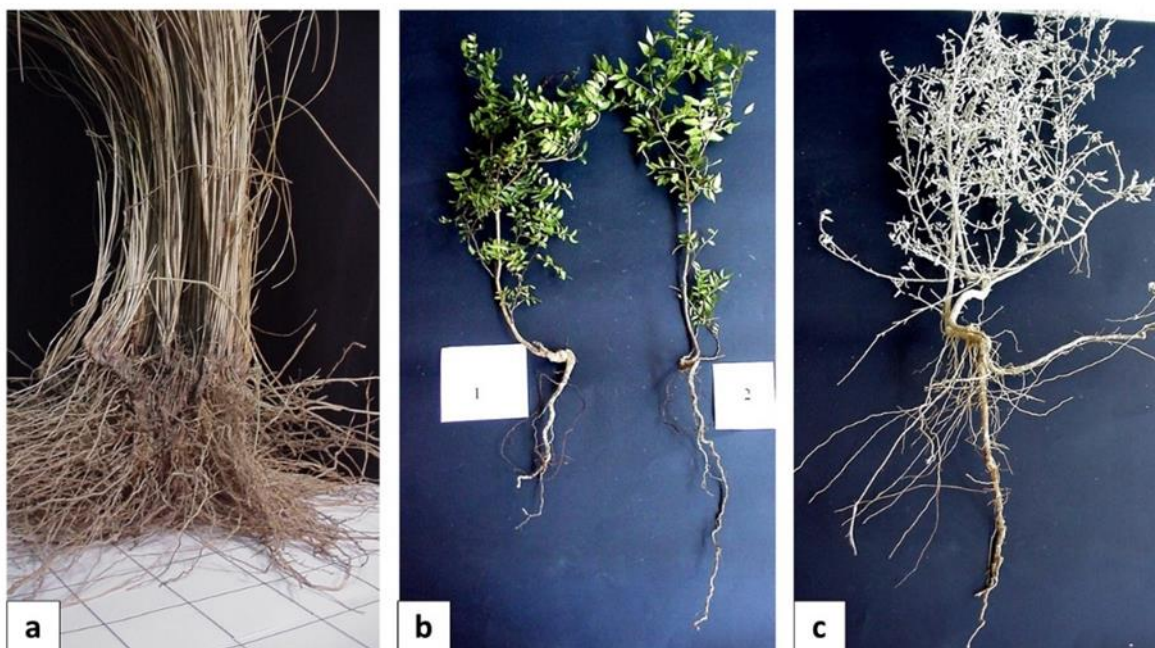


Figura 3.4 Differenze morfologiche tra gli apparati radicali di *Lygeum spartum* (L.) (a), pianta monocotiledone con apparato radicale fibroso denso e liscio, *Pistacia lentiscus* (L.) (b) e *Atriplex halimus* (L.) (c), piante dicotiledoni, con apparato radicale a fitto

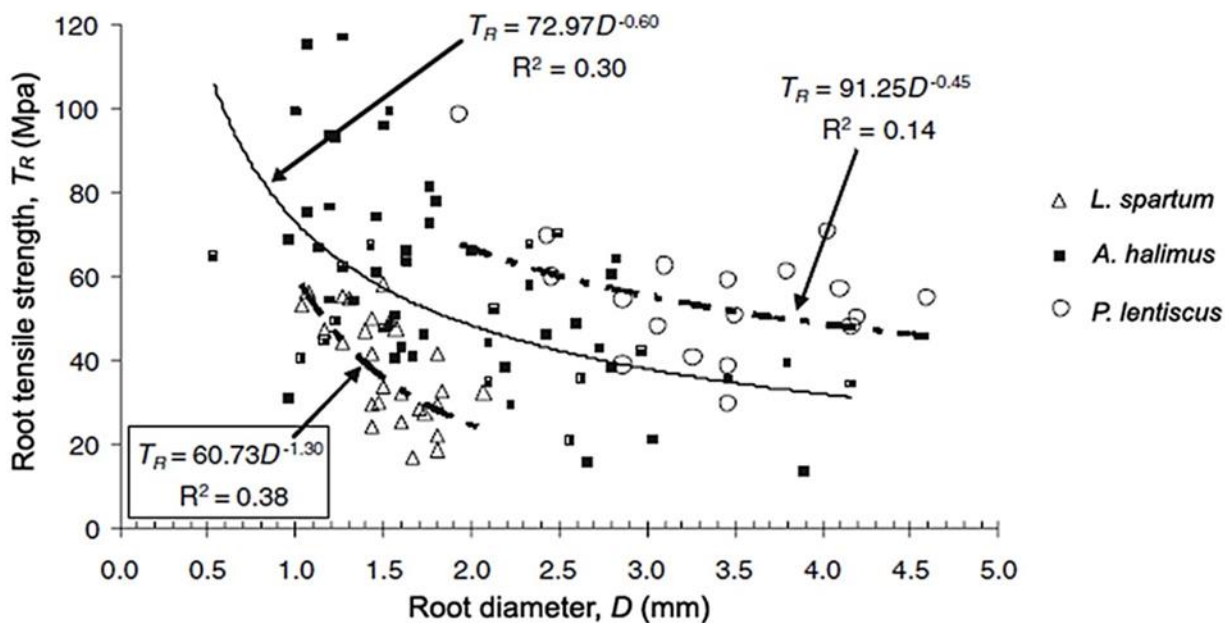


Figura 3.5 Valori di resistenza a trazione in funzione del diametro per *Lygeum spartum* (L.), *Atriplex halimus* (L.) e *Pistacia lentiscus* (L.) (Mattia et al., 2005)

Un altro ambito di applicazione di specie autoctone in ambiente Mediterraneo riguarda le sistemazioni dunali. Ne è esempio l'intervento di Ingegneria Naturalistica realizzato all'interno della Riserva Naturale Stornara (TA) per la protezione di dune minacciate da erosione costiera.

Qui, attraverso uno studio *ante-operam* della vegetazione presente nella zona, sono state individuate 50 specie vegetali autoctone e naturalizzate nell'area, con la presenza di numerose specie erbacee e di elementi alloctoni impiantati in passato. Ad esempio, ai nuclei autoctoni *Pinus halepensis* (L.) si associa la presenza di altre conifere di origine alloctona, quali il *Pinus pinea* (L.) e il *Cupressus sempervirens* (L.), nonché di esemplari di *Eucalyptus camaldulensis* (Dehnh) ed estesi popolamenti di *Acacia saligna* (Labill. H.L. Wendl).

Le specie vegetali da utilizzare nell'intervento di consolidamento dunale (Tabella 3.2), sono quindi state selezionate tra le specie autoctone in possesso di specifiche caratteristiche ecologiche e biologiche in base alla presenza all'interno di consociazioni simili riscontrate in areali limitrofi meno degradati, nonché di caratteristiche tecniche legate in particolare alla conformazione dell'apparato radicale.

Tabella 3.2 Elenco delle specie vegetali impiegate negli interventi di sistemazione delle dune costiere nella Riserva Stornara

| Nome scientifico                             | Nome comune            | Tecnica di propagazione adottata | Rese di propagazione (%) |
|--|------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| <b>Specie erbacee</b>                        |                        |                                  |                          |
| <i>Agropyron junceum</i> (L.)                | Gramigna delle spiagge | Radici con gemme                 | 90                       |
| <i>Ammophila arenaria</i> (L.)<br>Link       | Ammofila               | Radici con gemme                 | 90                       |
| <i>Calystegia soldanella</i> (L.)            | Vilucchio marittimo    | Stoloni                          | 90                       |
| <i>Eryngium maritimum</i> (L.)               | Calcatreppola marina   | Semi                             | 80                       |
| <i>Pancratium maritimum</i> (L.)             | Giglio di mare         | Bulbi                            | > 90                     |
| <i>Sporolobus pungens</i><br>(Schreb.) Kunth | Gramigna pungente      | Radici con gemme                 | 90                       |
| <b>Specie arbustive</b>                      |                        |                                  |                          |

|                                    |                   |                               |            |
|------------------------------------|-------------------|-------------------------------|------------|
| <i>Juniperus macrocarpa</i> (L.)   | Ginepro coccolone | Semi; coltura in vitro        | 35; 20     |
| <i>Juniperus phoenicea</i> (L.)    | Ginepro fenicio   | Semi; talee; coltura in vitro | 35; 10; 20 |
| <i>Phillyrea angustifolia</i> (L.) | Ilatro sottile    | Semi; talee                   | 50; 40     |
| <i>Pistacia lentiscus</i> (L.)     | Lentisco          | Semi                          | 50         |
| <i>Tamarix africana</i> Poir       | Tamerice africana | Talee                         | 80-90      |
| <i>Tamarix gallica</i> (L.)        | Tamerice comune   | Talee                         | 80-90      |

Per la moltiplicazione del materiale vegetale sono state adottate varie tecniche di propagazione sia di tipo gamico che agamico (talee, bulbi, stoloni ecc.), ed è stata utilizzata la coltura in vitro per la propagazione del *Juniperus spp.* Le rese di propagazione più alte (in termini di nuove piante nate dai semi o pianta madre) sono state ottenute per tutte le specie erbacee e per i due esemplari di *Tamarix* propagate per talea (Tabella 3.2).

Durante la fase di crescita delle piante in vivaio, è stato monitorato con continuità l'accrescimento dell'apparato radicale per le varie specie considerate (Figura 3.6). In generale, la lunghezza delle radici ha mostrato valori variabili per le diverse specie considerate. In particolare, i valori misurati per le due specie erbacee, *Ammophila arenaria* (L.) Link (Figura 3.6a) e *Agropyron junceum* (L.) P. Beauv., compresi tra 10,5-16,5 cm. Per quanto riguarda invece le specie arbustive, *Pistacia lentiscus* (L.) (Figura 3.6b) ha mostrato valori compresi tra 10,3-55,2 cm, *Phillyrea angustifolia* (L.) (Figura 3.6c) tra 32,3 e 67,2 cm, *Tamarix gallica* (L.) (Figura 3.6d) e *Tamarix africana* Poir tra 31,3 e 70 cm. Considerando le informazioni botanico-ecologiche e quelle ottenute dallo studio delle modalità di



moltiplicazione e della morfologia e dell'accrescimento dell'apparato radicale, è stato possibile

Figura 3.6 Morfologia degli apparati radicali di alcune delle specie utilizzate nell'intervento di consolidamento dunale nella riserva Statale Stornara: *Ammophila arenaria* (L.) Link (a), *Pistacia lentiscus* (L.) (b), *Phillyrea angustifolia* (L.) (c) e *Tamarix gallica*.

stabilire la miglior consociazione da utilizzare nell'area di intervento tale da ottenere, nel breve periodo, una protezione della superficie della duna.

In Figura 3.7 sono riportate alcune immagini dell'intervento di sistemazione del cordone dunale. Tale intervento ha previsto una operazione di pacciamatura con cippato proveniente dalle operazioni di Figura 3.7b) per il contenimento dell'erosione superficiale e la realizzazione di una barriera basale in viminata viva per la protezione al piede della duna.



Figura 3.7 Operazione di pacciamatura della superficie della duna (a); posa di bioreti (b); esemplari di *Pistacia lentiscus* (L.) messi a dimora su duna (c); sviluppo di *Pancratium maritimum* (L.) ad un anno dal termine dei lavori (d).

La messa a dimora delle piante è stata preceduta da un periodo di adattamento alle condizioni climatiche della zona di intervento. Nel mese di ottobre 2020 tutte le giovani piantine propagate sono state trasferite in un apposito vivaio in prossimità del sito fino alla loro messa a dimora definitiva, eseguita tra i mesi di dicembre e gennaio 2021.

A circa un anno dalla realizzazione degli interventi, la viminata viva è risultata fortemente ancorata agli strati sabbiosi superficiali ed ha contribuito all'innalzamento del profilo dunale, a seguito dell'accumulo di materiale sabbioso incoerente, sia a monte che a valle dell'opera. La stabilità creata dalla viminata ha favorito lo sviluppo e la diffusione delle specie vegetali autoctone utilizzate nell'intervento. Specie erbacee come *Ammophila arenaria* (L.) Link hanno costituito una copertura vegetale quasi completa dell'intero fronte dunale. L'apparato radicale fascicolato, tipico di questa specie, ha contribuito, in tempi relativamente brevi, ad aumentare la coesione superficiale del substrato sabbioso. In aggiunta, la consociazione con specie ad apparato radicale fittonante (*Juniperus*

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

*macrocarpa* (L.), *Tamarix spp.*, *Pistacia lentiscus* (L.) ecc.) si è dimostrata efficace nel consolidare anche strati più profondi.

In relazione all'accrescimento, *Pistacia lentiscus* (L.) (Figura 3.7c), dopo alcune settimane, ha subito un disseccamento diffuso causato dall'aerosol marino e delle basse temperature notturne. Sebbene tale specie sia tipica della macchia mediterranea, risulta più adatta all'ambiente retrodunale in combinazione con altre sclerofille (ISPRA, 2015). Pertanto, al fine di garantire una maggiore sopravvivenza di *Pistacia lentiscus* (L.), prima della sua messa a dimora sarebbe opportuno un periodo di adattamento climatico più lungo nell'area d'intervento. Al contrario, *Ammophila arenaria* (L.) Link e *Pancratium maritimum* (L.) (Figura 3.7d) hanno confermato la loro attitudine di specie vegetali pioniere su suolo dunale. Importanti risultati, in termini di adattamento alle condizioni climatiche e edafiche, si sono ottenuti anche per gli esemplari di *Juniperus macrocarpa* (L.) e *Juniperus phoenicea* (L.).

### ***Considerazioni conclusive***

L'impiego di piante autoctone negli interventi di Ingegneria Naturalistica è raccomandato per ragioni non solo ecologiche ma anche funzionali, legate alla capacità di adattamento delle piante alle condizioni climatiche e geopedologiche dei siti d'intervento. Tale considerazione assume particolare valore in quegli ambienti, come quelli Mediterranei, caratterizzati da condizioni stagionali particolarmente difficili. Le esperienze condotte in contesti tra loro molto differenti, quali gli interventi di sistemazione delle aree calanchive e quelli di consolidamento delle dune costiere, confermano l'utilità di impiegare piante autoctone, ottenendo risultati significativi in termini di efficacia degli interventi. In tali casi un accurato studio botanico dell'area d'intervento è premessa necessario per una corretta scelta delle specie da impiegare, così come un'analisi delle caratteristiche biologiche e tecniche delle piante. A tale riguardo particolare importanza rivestono le caratteristiche degli apparati radicali, in termini di morfologia, profondità, densità e resistenza a trazione. Infine, un ruolo di primo piano riveste la corretta progettazione ed esecuzione degli interventi, che possa garantire le condizioni di stabilità del terreno necessarie affinché la vegetazione d'impianto possa affermarsi e svilupparsi in tempi rapidi.

### ***Ringraziamenti***

Gli autori ringraziano il *Dott. Giuseppe Parete* per il suo prezioso contributo nella stesura del capitolo e nella cura delle immagini.

**Bibliografia Par. 3.1.1**

BISCHETTI G.B., CHIARADIA E.T., SIMONATO T., SPEZIALI B., VITALI B., VULLO P., ZOCCO A., 2005. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy). *Plant Soil* 278, 11 – 22.

DE BAETS S., TORRI D., POESEN J., SALVADOR M.P., MEERSMANS, S.J., 2008. Modelling increased soil cohesion due to roots with EUROSEM. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(13), 1948 – 1963. <https://doi.org/10.1002/esp.1647>

GENET M., STOKES A., SALIN F., MICKOVSKI S.B., FOURCAUD T., DUMAIL J., VAN BEEK R., 2005. The Influence of Cellulose Content on Tensile Strength in Tree Roots. *Plant and Soil* 278, 1 – 9. <https://www.jstor.org/stable/24125296>

GENTILE F., PUGLISI S., TRISORIO-LIUZZI G., 1996. Il controllo dell'erosione gully. *Quaderni di Idronomia Montana*, n. 15, 329 – 354.

GENTILE F., ROMANO G., TRISORIO-LIUZZI G., 1998. L'uso della vegetazione negli interventi di difesa del suolo in ambiente mediterraneo. *Genio Rurale* 2, 42 – 51.

GREENWAY D.R., 1987. Vegetation and slope stability. In *Slope Stability*, Anderson MG, Richards KS (eds). John Wiley & Sons: Chichester; 187 – 230.

ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 2015. Serie Rapporti, 215/2015. Gli habitat delle coste sabbiose italiane: ecologia e problematiche di conservazione. Acosta A.T.R. & Ercole S. (Eds).

LAZZARO L., MAZZA G., D'ERRICO G., FABIANI A., GIULIANI C., INGHILESI A.F., LAGOMARSINO A., LANDI S., LASTRUCCI L., PASTORELLI R., ROVERSI P.F., TORRINI G., TRICARICO E., FOGGI B., 2018. How ecosystems change following invasion by *Robinia pseudoacacia*: Insights from soil chemical properties and soil microbial, nematode, microarthropod and plant communities. *Science of The Total Environment* 622 – 623, 1509 – 1518. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.017>

MATTIA C., BISCHETTI G.B., GENTILE F., 2005. Biotechnical Characteristics of Root Systems of Typical Mediterranean Species. *Plant and Soil* 278, 23 – 32.

NORRIS J.E., DI IORIO A., STOKES A., NICOLL B.C., ACHIM A., 2008. Species selection for soil reinforcement and protection in Norris et al., *Slope stability and erosion control: Ecotechnological solutions*, Springer, chapter 6, 167-210.



POLLEN N. AND SIMON A., 2005. Estimating the Mechanical Effects of Riparian Vegetation on Stream Bank Stability Using a Fiber Bundle Model. *Water Resources Research* 41(7). <https://doi.org/10.1029/2004WR003801>

PUGLISI S., 1963. Esperienze ed orientamenti di tecnica delle sistemazioni calanchive. Ministero dell'Agricoltura e delle Foreste, Collana Verde n. 9, Roma.

PUGLISI S., TRISORIO-LIUZZI G., 1992. La correzione dei torrenti da disfacimento di tipo calanchivo. *Quaderni di Idronomia Montana*, n. 11/12, 219-251.

WU T.H., MCKINNELL III W.P., SWANSTON D.N., 1979. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal* 16(1). <https://doi.org/10.1139/t79-003>

### **3.1.2 Controllo dell'erosione: Idrosemia e Seed Clay Balls (G. Pirrera, L. M. Ferrara)**

#### *3.1.2.1 Introduzione*

Le tradizionali tecniche di controllo dell'erosione si basano sulle semine, evolutesi con le tecniche di idrosemia, ma con un approccio diverso. Declinando le teorie del botanico e filosofo giapponese, pioniere della cosiddetta agricoltura naturale o del non fare, Masanobu Fukuoka espone al paragrafo 4, possono attuarsi in una maniera più appropriata per la Soil & Water Bioengineering, convertendo la semina a spaglio in una vera e propria messa a dimora.

Questo paragrafo, dopo un inquadramento generale dell'erosione, riporta due casi studio per comparare il potenziamento della tecnica più evoluta (idrosemia per la discarica di Termini Imerese in Sicilia) con quella di approccio più olistico, forse antroposofico delle messe a dimora di Seed Balls a Pomaia, in Toscana.

Per la quantificazione e la previsione dell'erosione, espressa in t/ha, si fa ricorso al sempre valido modello USLE, *Universal Soil Loss Equation* (Wischmeier W.H. e Smith D.D., 1978). Tale modello permette di definire nei termini di un'equazione matematica, i parametri che determinano il comportamento di un suolo rispetto all'erosione:

$$E = R * K * L * S * C * P$$

- E è il valore medio annuale delle perdite di suolo (E), in t/ha
- R, rain, rappresenta l'erosività della pioggia (aggressività climatica);
- K indica l'erodibilità del suolo;
- L e S, tengono conto della topografia del terreno;
- C, sintetizza l'effetto delle colture, delle tecniche di coltivazione o della vegetazione;
- P, si riferisce alle pratiche conservative.

L'idrosemina è una tecnica di *reclamation* ecologica che permette di rinverdire in maniera rapida ed efficiente tutte le superfici sulle quali sia necessario ripristinare al più presto una copertura vegetale. Essa si adopera frequentemente: in aree particolarmente impervie e soggette a rischio erosivo, specie se colpite da incendi che compromettono la flora locale; in aree degradate, come nel caso di zone sterrate, miniere dismesse, o scarpate stradali o ferroviarie; infine, in aree urbane estensive dove si intenda dare vita ad un parco o un campo da gioco (es.: golf).

Come suggerisce il nome, l'idrosemina si serve dell'acqua come vettore di lancio per distribuire una miscela omogenea di prodotti che contribuiranno attivamente al rinverdimento e al sostegno strutturale del terreno su cui vengono dispersi. Il punto di partenza è la scelta dei semi, senza dubbio la componente più importante, che verrà poi mescolata con fertilizzanti e biostimolatori, collanti, utili al fissaggio delle sementi contro la forza erosiva degli agenti atmosferici, e materiale organico di varia natura (fiorume, legno sminuzzato), che procureranno ad un tempo biomassa valorizzante il terreno e condizioni microclimatiche ideali di germinazione per i semi. La composizione della miscela varia a seconda delle esigenze e dei risultati da ottenere e tiene generalmente conto dell'esposizione della superficie da inerbire, della natura del terreno, dell'altitudine e della pendenza. Questi stessi parametri influenzano anche la tipologia di semenza, in termini soprattutto di percentuale relativa di leguminose, che fertilizzano il terreno, e graminacee, che, con i loro imponenti apparati radicali, offrono sostegno strutturale. Riconducendoci al modello USLE, possiamo vedere come i due approcci agiscono sui parametri dell'equazione:

- 1) L'idrosemina, in aree svantaggiate per **L** ed **S**, attiva la vegetazione con i semi di specie appropriate (**C**), riducendo l'erosività del suolo (**K**) grazie alla crescita della vegetazione e grazie ai collanti che trattengono il seme sino a germinazione, proteggendolo dalla pioggia battente (**R**).
- 2) Le Seed Balls in aree svantaggiate per **L** ed **S**, invece attiva la vegetazione con i semi di specie appropriate, ma raccolte in loco (**C**), riducendo l'erosività del suolo (**K**) grazie alla crescita della vegetazione, prevalentemente erbacea di specie pioniere e "starter". Non vengono utilizzati collanti, ma rivestimenti protettivi naturali ("cover"), che proteggono l'impasto di argilla, terriccio locali e semi, sino al momento più opportuno di germinazione, che varia nelle singole microaree a seconda dell'esposizione, della pendenza proteggendolo dalla pioggia battente (**R**). In tal modo, si evita anche la dispersione, come spesso accade ai semi tradizionalmente disperso per spagliamento.

***Approccio standard***

L'approccio standard si serve di miscele standardizzate in cui la scelta dei semi e dei materiali sono orientate esclusivamente a ridurre il rischio di erosione, con poco riguardo all'identità delle specie vegetali presenti in loco e introdotte tramite l'idrosemina o la semina a spaglio. I rischi connessi a questo tipo di approccio sono legati alla possibilità di introduzione di specie alloctone invasive e la scarsa riuscita dell'intervento a causa di una bassa adattabilità di alcune specie alle caratteristiche dell'area.

***Approccio ecologico***

La scelta delle miscele e dei semi dipende dal contesto floristico, pedologico, micro-morfologico (erosivo), microclimatico e paesaggistico e dalle caratteristiche biotecniche delle piante. Si utilizzano quindi miscele di sementi autoctone certificate come locali, preoccupandosi di raccogliere campioni di germoplasma locale quando queste non sono disponibili nel mercato. Il valore di interventi di questo tipo è ulteriormente amplificato dall'analisi biotecnica delle specie presenti e da introdurre, per testarne la compatibilità ecologica, nonché dallo studio dei suoli e delle loro caratteristiche salienti, per sviluppare delle tecniche che si intercalino efficacemente nel luogo di destinazione. Questo approccio di idrosemina "applicato" all'area di intervento garantisce una maggiore efficacia sia in termini strutturali sia in termini di tutela della biodiversità e dell'identità paesaggistica<sup>9</sup>.

I punti di debolezza dell'approccio ecologico sono rappresentati dalla reperibilità delle specie sul mercato e dalla non appartenenza di alcune specie autoctone al germoplasma locale.

---

<sup>9</sup> Ogni intervento inizia con l'attuazione di un rilievo floristico ed un'analisi fitosociologica del territorio circostante. Le specie riscontrate vengono successivamente analizzate mediante gli indici di Ellenberg e confrontate con quelle da inserire della miscela di idrosemina al fine di determinare le **specie target e quelle "Starter"**. La bioindicazione secondo Ellenberg consiste in un insieme di valori assegnati a ciascuna specie vegetale che ne quantificano il carattere di indicatore ambientale. Ellenberg con rigorosità e sistematicità propose per 2000 specie vegetali fanerogamiche del Centro Europa un sistema di indicizzazione costituito da 7 indici ecologici. Per ciascuna specie sono riportati sei indici, divisi idealmente in due categorie, espressi numericamente in una scala da uno a nove: L – radiazione luminosa (1-12), T – calore (1-11), C – continentalità del clima (1-9), U – umidità o disponibilità di acqua (1-12), R – reazione del suolo (1-9), N – nutrienti (1-9), (S – salinità, 1-3).



Figura 3.8 Idrosemina naturalistica per il ripristino della discarica di Termini Imerese (Palermo, 2015).

### **Approccio biotecnico**

L'approccio biotecnico coniuga le **proprietà biologiche**, quali la capacità di riproduzione per via vegetativa, la morfologia dell'apparato radicale, la resistenza delle radici alla trazione e la velocità di approfondimento radicale, la capacità di emettere radici avventizie dai fusti interrati, la resistenza alla sommersione anche per periodi prolungati alle **proprietà tecniche** di contrasto all'azione disgregatrice degli agenti atmosferici, tramite azioni di tipo meccanico ed idrologico (stabilizzazione dello strato superiore del suolo ad opera degli apparati radicali, con la riduzione dell'erosione e del trasporto solido a valle, etc.). Le caratteristiche biotecniche che caratterizzano alcune specie vegetali risultano essenziali per il successo degli interventi di ingegneria naturalistica. Di fondamentale importanza quindi la morfologia dell'apparato radicale, la resistenza delle radici alla trazione e la velocità di approfondimento radicale (Indici di Parametrizzazione Sintetica).

Questa metodologia di analisi permette di indagare l'adeguatezza delle specie vegetali ai vari ambienti, definendo il loro "valore biotecnico", ed è perfettamente integrabile con la visione d'insieme applicata all'area di intervento fornita dall'approccio ecologico.

Dalla sintesi dei due approcci è possibile quindi delineare una serie di miscele utilizzabili in relazione al terreno di destinazione:

- Miscela **Standard**: generalista di Semina e Idrosemina.
- Miscela **Starter**: Semina e Idrosemina con miscela semplificata di poche specie (2-10).
- Miscela **Starter Seeds**: Semina e Idrosemina con miscela semplificata di poche specie (2-10) ma con semi autoctoni con certificazione di origine .

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

- Miscela **HY seeds**: Idrosemina (specie > 10) ma con semi autoctoni con certificazione di origine.
- Miscela **HY seeds Soil**: Idrosemina HY seeds + suolo e tecnosuolo + fiorume selezionato e raccolto nelle aree circostante. La miscela floristica sarà esclusivamente, o comunque con prevalenza, di sementi di specie commerciali appartenenti alla flora autoctona del territorio esistenti nell'areale di intervento e di sementi e fiorume provenienti dalla raccolta di germoplasma.
- Miscela **HY seeds Soil plus**: HY seeds o soil con specie autoctone ad alto valore biotecnico particolarmente indicata per il trattamento antierosivo permanente e conseguente rinaturalizzazione di scarpate o rilevati. Consistente nello spargimento omogeneo di suolo e tecnosuolo e di una apposita miscela di sementi di specie erbacee perenni a radicazione profonda, appartenenti alla flora autoctona del territorio e ad elevato valore biotecnico, all'interno di un gruppo di riferimento di almeno 10 specie, di concimi e collanti naturali. L'efficacia antierosiva sarà verificata dalla riduzione effettiva dell'erosione sulla superficie trattata, e dal fatto che le aree a valle (piede della scarpata), delle zone trattate saranno prive di materiale eroso.
- Miscela **HY mulch**: Idrosemina a spessore e Hydromulching con elevati tenori di sostanza organica e/o tecnosuoli. L'hydromulching si prevede soprattutto per le aree più povere di suolo grazie all'elevato apporto di sostanza organica (fino a 400 g/mq. se a doppio passaggio) e una coltre protettiva (fino a 500 g/mq. se a doppio passaggio) composta per il 70% da fibre lunghe di legno e per il 30% da una miscela di fibre vegetali sminuzzate (paglia, cotone, etc.).
- Miscela Semine con **Seed Balls**: Sfere di dimensione compresa tra i 2cm e i 5 cm, realizzate con una miscela di terreno locale (o tecnosuolo), argilla e semi provenienti dalla raccolta del germoplasma locale, o comunque di specie autoctone idonee al sito di impiego, ricoperte da uno strato protettivo (Cover) costituito da ammendanti, fertilizzanti, argilla etc. La messa a dimora può avvenire con interrimento della Seed balls o tramite in semplice posizionamento sul terreno. I semi germoglieranno non appena troveranno le condizioni ambientali favorevoli.

**Ricerche connesse all'approccio biotecnico****Ricerca n.1 - Indagine morfologica e tensionale dell'apparato radicale di *Ampelodesmos mauritanicum*, *Oryzopsis miliacea* e *Hedysarum coronarium***

La ricerca è stata effettuata su campioni estratti durante il ripristino ambientale mediante un intervento di idrosemina della discarica di Termini Imerese (2015, Palermo). Si rimanda al par. 3 per approfondimenti sul caso studio.

Per tre specie di riferimento della idrosemina naturalistica, le graminacee perenni *Ampelodesmos mauritanicum*, *Oryzopsis miliacea* L. e la leguminosa *Hedysarum coronarium* L. (Sulla), è stata condotta una indagine morfologica e tensionale dell'apparato radicale (Tab. 3.1).

*Tab. 3.1 Caratteristiche del prelievo della specie e dati di sintesi del rilievo diametrico e delle prove di trazione a rottura.*

| <b>Grandezza</b>                                | <b>Ampelodesmos</b> | <b>Oryzopsis</b> | <b>Hedysarum</b> |
|---|---------------------|------------------|------------------|
| Diametro/Profondità della zolla di prelievo [m] | 1,90/2,15           | 0,65/0,80        | 0,23/0,45        |
| Altezza/Ampiezza epigea della pianta[m]         | 2,55/2,35           | 1,64/0,75        | 0,54/0,50        |
| Lungh. max radici non rettificata [m]           | 2,15                | 1,45             | 0,40             |
| Diametro del colletto [cm]                      | 27,8                | 25,8             | 2,8              |
| Range dei diametri delle radici rilevate [mm]   | 0,10–2,80           | 0,03-0,97        | 0,03-20,00       |
| Diametro medio radici [mm]                      | 0,85                | 0,35             | 2,32             |
| N° radici (totale campione/test trazione)       | 1041/30             | 211/35           | 137/17           |
| max/min Tr radici [MPa]                         | 85,91/19,57         | 173,08/11,53     | 31,42/3,07       |
| media Tr radici [MPa]                           | 49,65               | 46,54            | 10,89            |
| CV Tr radici                                    | 0,30                | 0,62             | 0,66             |

I blocchi suolo–radici sono stati liberati dal terreno per scuotimento e lavaggio a pressione avendo cura di lasciare integro l'apparato radicale. In laboratorio è stato eseguito un lavaggio di finitura ed un controllo dell'integrità del campione, prima dei rilievi morfologici. Il protocollo seguito ha previsto, subito dopo i rilievi morfologici, la conservazione dell'apparato integro in camera isolata termicamente e l'esecuzione delle prove di trazione entro il terzo giorno dal prelievo. I test di trazione del campione di radici sono stati svolti presso il Dipartimento DICAM (Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali) dell'Università di Palermo con strumentazione Zwick/Roell mod. Z5 con cella di carico da 200 N. Sono stati sottoposti a prova tratti di radici di lunghezza standard pari a 15 cm con diametro quasi uniforme, privi di nodi o anomalie della crescita. Il diametro associato alla prova,  $D_m$  [mm], è stato assunto pari alla media di tre misure prese agli estremi ed al centro del campione radicale. Assunta una velocità di prova di 5 mm/minuto, i valori di resistenza a trazione  $Tr$ , espressi in Mpa, sono stati ottenuti sotto l'ipotesi di sezione circolare della radice, con l'espressione  $Tr = F_{max} / (\pi D_m^2 / 4)$ , dove  $F_{max}$  [N] è il carico massimo, a rottura. Sono state prese in considerazione solo le prove che hanno prodotto curve forza/allungamento continue sempre crescenti senza segni di cedimento dei vincoli di ammassamento e rottura nel tratto intermedio. I campioni di

*Ampelodesmos mauritanicum* e *Oryzopsis miliacea* L., come tutte le monocotiledoni, sono caratterizzati da un apparato radicale omorizzico fascicolato cioè costituito da fitti assi poco ramificati che partendo dalla base dei culmi, a maturità, raggiungono dimensioni poco variabili. In questo caso la caratterizzazione morfologica, di tipo monodimensionale (lungo l'asse della profondità), è consistita nella determinazione della legge di distribuzione dei diametri e del numero di radici a diverse distanze  $z$  dal colletto. Sempre in relazione alla particolare conformazione dell'apparato radicale, il rilievo dei diametri  $D$  è stato eseguito direttamente su campioni di radici a fissata distanza dal colletto mentre la numerosità  $N$  è stata valutata indirettamente dalla misura del volume di porzioni dell'apparato radicale. I valori medi dei diametri,  $D_m(z)$ , hanno mostrato una tendenza a diminuire linearmente con la distanza  $z$  dal colletto mentre poco variabile con la distanza è invece risultato il coefficiente di variazione  $CV$  dei campioni osservati. Da queste evidenze e dalla legge di distribuzione dei diametri, condizionata alla distanza dal colletto, è stato costruito il modello morfologico  $\{D(z), N(D|z)\}$  che ha permesso di stimare le aree  $Ar(z)$  delle sezioni delle radici a fissata profondità e quindi il Rapporto di Area Radicata,  $RAR=Ar(z)/A$ , nell'ipotesi di area radicata cilindrica di diametro pari a quello della zolla estratta. Per le due specie indagate la funzione  $RAR(z)$ , riportata in figura 1a, mostra un andamento analogo in prossimità del colletto, poi condizionato dalla diversa profondità massima delle stesse specie. I dati di sintesi delle prove a trazione per le tre specie sono riportati in Tab. 3.1 mentre nel grafico di Figura 3.9 (b), sono mostrati gli andamenti sperimentali  $Tr(D)$ .

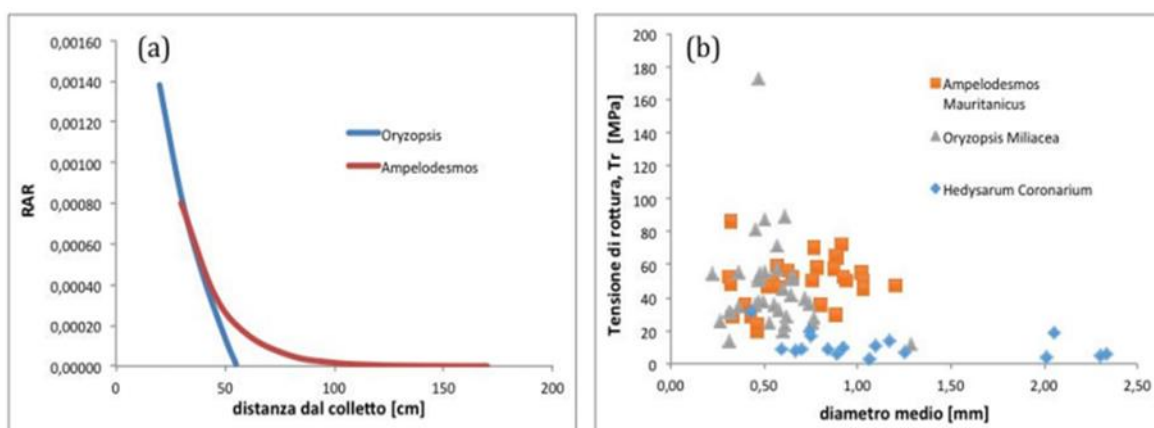


Figura 3.9 (a): andamento del Rapporto di Radicazione ( $RAR$ ) con la distanza dal colletto di due specie analizzate; (b): valori sperimentali delle tensioni di rottura a trazione ( $tr$ ) delle radici in funzione del diametro, per le tre specie di riferimento.

Non si evince una chiara tendenza all'aumento della resistenza al diminuire del diametro mentre è evidente la loro elevata variabilità. Per *Ampelodesmos* e *Oryzopsis* tale comportamento può essere ragionevolmente imputato alla ridotta variabilità dei diametri in gioco. Rilevanti in ogni caso i valori misurati che superano i 60 MPa nel 16% dei casi.



*Figura 3.10 La caratterizzazione morfologica e meccanica delle radici è stata effettuata presso il Laboratorio di Ricerca Sperimentale – Sezioni Materiali e Strutture (Laboratorio Ufficiale dello Stato Italiano art. 20 Legge n.1086 del 05/11/1971) ed è stata certificata (Certificato n 15060XX00003 del 09/11/2015).*

***Ricerca n.2 - Velocità di crescita dell'apparato radicale di *Ampelodesmos mauritanicus****

La ricerca mirata a determinare la velocità di crescita della graminacea perenne *Ampelodesmos mauritanicus* è stata eseguita in un ambiente controllato costituito da cilindri verticali (fitotubi) disposti sia all'aperto (20 cilindri presso i locali della Biocity srl a Palermo), che in serra (20 cilindri presso il Vivaio Savif a Caltanissetta). I fitotubi, di lunghezza pari a 2 m e diametro pari a 19 cm, sono stati realizzati con pannelli di plexiglass trasparente chiusi longitudinalmente posti sopra mastelli in plastica alti 60 cm. Per inibire la crescita di muffe i cilindri sono stati ricoperti con plastica nera. Per valutare l'influenza delle caratteristiche del substrato sulla velocità di crescita radicale, i fitotubi sono stati suddivisi in batterie riempiti con 2 tipologie di substrati: uno tecnogenico, fornito dalla ditta Harpo ed una miscela di lapillo vulcanico, terriccio e torba. Le prove sono state condotte sia a partire da plantule che da giovani cespi di circa 2 mesi. L'irrigazione è stata garantita mediante la realizzazione di un impianto composto da due linee con irrigatori a goccia per ogni cilindro, a profondità diverse. Il rilevamento della crescita è stato eseguito per apertura del fitotubo anche se sono state possibili alcune misurazioni visive, non distruttive (Figura 3.11), grazie alla trasparenza del cilindro. Il risultato parziale ricavato dalle misure di 12 piante in fitotubo posto all'aperto, senza distinzione di substrato, mostra come 2 metri di profondità di radicazione siano stati raggiunti già in otto mesi.



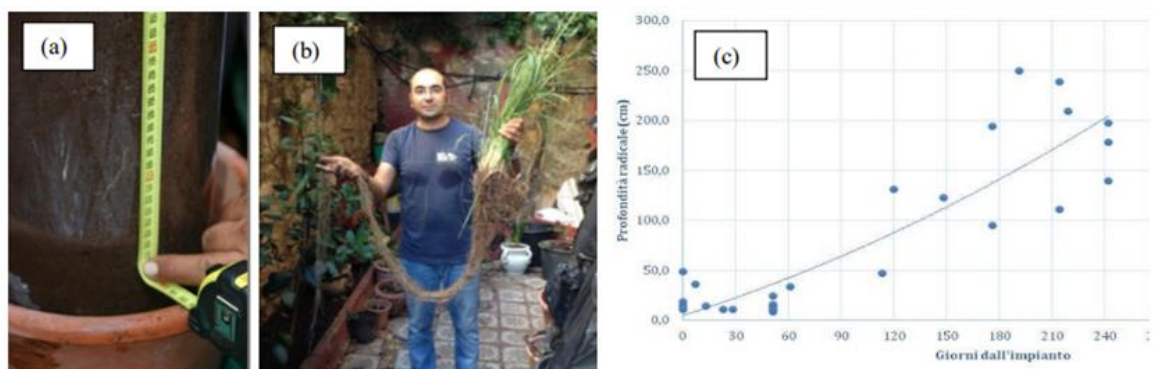


Figura 3.11 (a) Misura visiva non distruttiva su fitotubo, (b) Esemplare estratto dal fitotubo prima della misurazione, (c) Andamento della crescita della lunghezza rettificata dell'apparato radicale di 12 esemplari di *Ampelodesmos mauritanicus* in otto mesi in condizioni sperimentali all'aperto.



Figura 3.12 Prove di accrescimento radicale di *Ampelodesmos mauritanicus*

### **Ricerche connesse ad un approccio maggiormente olistico: Seed Clay Balls**

Un approccio decisamente più olistico, in una direzione quasi antroposofica, è quella che si sta emergendo a partire dalle teorie e dalle esperienze del botanico e filosofo giapponese **Masanobu Fukuoka** (1913 - 2008), pioniere della cosiddetta "agricoltura naturale" o "del non fare", autore di *La rivoluzione del filo di paglia* (The revolution of the straw) e *The Natural Way of Farming*, il quale lasciava che la natura si appropriasse del suo stesso recupero con l'uomo quasi osservatore ad assecondare i risultati che la natura stessa indicava. Le sue teorie erano rivolte principalmente ai problemi della fame nel mondo e quindi, a questo fine, ad un recupero della fertilità dei suoli.

I "principi" dell'agricoltura naturale si basano su 4 pilastri:

Inoltre la messa a dimora delle SCB segue dei 4 criteri fondamentali, che sono:

- 1) *No tillage*, ossia evitare di arare o rivoltare il terreno.
- 2) *No chemical fertilizers*, ossia evitare i fertilizzanti chimici o altri composti.
- 3) *No fertilizer*, né uso di erpici, né erpicatura mista ad erbicidi.
- 4) *No addiction to chemicals*, ossia evitare di aggiungere qualsiasi composto chimico.

Fu quindi l'inventore delle Seed Balls, impasti di semi e argilla a forma di palle di qualche centimetro di diametro, che lanciava, anche dagli aerei, per una germinazione di specie erbacee ed una fruttificazione diffusa.

Le SCB (Seed Clay Balls) furono inizialmente pensate e sviluppate per la coltivazione del riso, dell'orzo e dei vegetali senza bisogno di aratura (*no-till method*). In realtà, attualmente, gli usi sono molteplici e la tecnica risulta particolarmente adatta alla semina aerea per la riforestazione di grandi aree. Le SCB richiedono l'impiego di materiali differenti rispetto a quelli in uso per l'idrosemina classica:

- 1) **Semi** di più varietà (erbacee, alberi, alberi da frutto, arbusti, ortaggi, cereali, funghi utili). 10% di peso combinato.
- 2) **Argilla fine**, come quella usata per i mattoni cotti o la porcellana. In generale, questo dovrebbe costituire cinque volte il peso dei semi, ma la quantità di semi dovrebbe essere presa in considerazione. 50 per cento del peso combinato.
- 3) **“Salamoia” e “Pasta di alghe” (rivestimento)** ovvero il liquido che rimane dopo che il sale è stato rimosso dalla salamoia ottenuta facendo bollire e concentrando l'acqua di mare o dai funghi salmastri naturali sparsi sull'acqua (strato interno) come l'acqua che si trova nel Mar Morto. Dal 10 al 15 per cento del peso combinato, compreso pasta di alghe che costituisce il 5 per cento del peso combinato.
- 4) **Calce spenta** - 10% del peso combinato.
- 5) **Altre Erbe aromatiche:** derris (radice), frutti in polvere e foglie di anice stellato giapponese (*Fillicium anisatum*), andromeda giapponese (*Pieris* spp.), albero della lacca giapponese (*Rhus verniciflua*), albero di perline giapponese (*Melia azedarach*), sommacco. 10% del peso combinato.
- 6) **Acqua** 5-10%.

Alcune proprietà dei materiali utilizzati:

- I semi chiusi negli strati d'argilla otterranno una germinazione e una crescita soddisfacenti con l'aiuto dei funghi utili.
- Impastando insieme al “bittern” e alla pasta di alghe, le sue molecole vengono riorganizzate, così le palline diventano stabili, leggere e dure. Non solo resisteranno alla caduta sulla terra a seguito dell'aereo semina, ma può anche adattarsi alle variazioni di umidità e secchezza legate alle precipitazioni, rimpicciolendosi e solidificandosi. Pertanto, raramente si sbriciolano o si rompono e i semi sono protetti dai danni degli uccelli o di altri animali fino a quando non germogliano.

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

- Molti insetti sono respinti dalla miscela delle erbe aromatiche nello strato esterno, così i semi non vengono mangiati. Nei deserti e nelle savane questa tecnica aiuta a prevenire i danni di topi, capre e, in particolare, di insetti forti come le formiche rosse. Anche i danni degli uccelli possono essere prevenuti semplicemente racchiudendo i semi in pellet. Il metodo qui descritto non solo garantisce la germinazione sicura dei semi nelle aree desertiche senza l'uso di sostanze tossiche, ma consente anche di diffondere indiscriminatamente i semi su un'ampia area.
- Le piante sulla terra esistono in intima connessione con altre piante, animali e microrganismi, e nessuna può svilupparsi e prosperare da sola. Nelle regioni desertiche, in particolare, sono necessari i microrganismi così come una varietà di piante.
- Radice di Derris (usata contro i coleotteri), anice stellato giapponese (capre), andromeda giapponese (mucche), albero di perline giapponese (piccoli insetti), sommacco e così via, proteggeranno i semi nel deserto, prima e dopo la germinazione.

Gli ultimi 10 anni della sua vita li trascorse viaggiando attraverso varie nazioni del mondo (U.S., Iraq, Iran, Thailandia, Malesia, Indonesia, Nepal, Filippine, Europa e Africa) che furono volti allo studio della desertificazione insieme al suo allievo americano Larry Corn. A conclusione del viaggio scrisse un libro (*Sowing Seeds in the Desert*) che si basava sul concetto che “When plants start to grow, their effect on the soil and climate is amazing, green will call more green,

E riguardo alle Seed Balls:

*"The only work on the part of man (in the service of nature) is to collect microorganisms and seeds of various plants and spread them in similar places", "in other words, without asking myself if they are good or bad I will mix a great variety of forest plants, from fruits, vegetables, fertilizer plants and also ferns, mosses and lichens. I will also comprehend soil microorganisms, such as fungi and bacteria".*

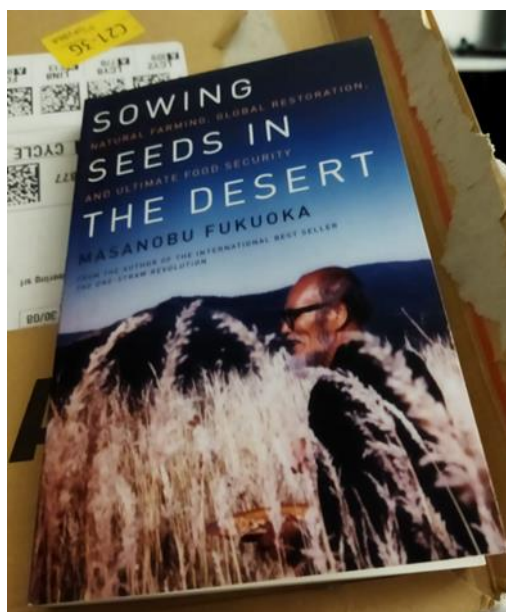


Figura 3.13 Libro *Sowing Seeds in the Desert*.

Un approccio naturale affascinante in cui delle 4 funzioni tipiche dell'Ingegneria Naturalistica, quella Naturalistica diviene non solo preponderante ma “naturale”, in quanto è la Natura che gestisce i tempi giusti: da un punto di vista chimico fisico strutturale (composizione granulometrica, fertilità dei suoli, etc.) e da un punto di vista del clima e del microclima (temperatura, umidità insolazione) per il successo vegetazionale. Ovvio che l'I.N., in una funzione innovativa quale questo momento di I.N. 2.0., dovesse interrogarsi, prima ancora che formulare sperimentazioni più vicine ai temi della difesa naturalistica del territorio, sulla validità del metodo e su una via complementare alle tecniche tradizionali.

La tecnica delle Seed Clay Balls (SCB) è quindi una tecnica innovativa dalle grandi potenzialità. A differenza della semplice idrosemina, in cui i semi vengono inseriti all'interno di una miscela e sparati sulla superficie del terreno di interesse, con eventuali operazioni successive di hydromulching, nel caso delle SCB i semi vengono impastati con altri materiali per formare pellet tondi (2cm) e balls (5 cm) e successivamente posizionate o messe a dimora nel terreno di destinazione.

I semi delle SWB germoglieranno al momento (umidità, temperatura, periodo giusto dell'anno) che la natura stessa deciderà.

Alcune esperienze per l'I.N. sono state attuate con tirocinanti dell'Università di Palermo che hanno impastato semi commerciali utili per l'idrosemina o semi di specie per prati fioriti ma guardando più alle modalità di produzione che ai risultati di germinazione. Presa consapevolezza che il metodo meritasse un approfondimento per il monitoraggio e che questo ponesse delle obiettive difficoltà il metodo fu inizialmente abbandonato. Altre esperienze sono state effettuate nel trapanese, ma più

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

come attività di gioco per i bambini che, piuttosto che lanciare le “bombe” a mano si divertivano, e imparavano, con delle fionde.

Le incognite sono molte e non solo ambientali ma anche sociali e politiche. Le Seed Balls le hanno inventate da sempre gli uccelli migratori, e indubbiamente hanno avuto successo, ma non dovunque e con infinite varianti a seconda delle condizioni climatiche, pedologiche ed antropiche.

Nelle nostre condizioni c'è sempre il rischio che prevalga il successo delle specie aliene a danno di quelle della macchia mediterranea. Ecco perché l'approccio deve basarsi sul vecchio concetto di specie pioniere che derivano dalla analisi del luogo, dagli ambienti di donazione (di germoplasma) delle aree limitrofe e, in pratica di trascurare il mercato delle sementi industriale per trasformarlo in uno di cantiere, sempre più in crescita, di prossimità. Insomma, un approccio economicamente autartico e catartico: le aree buone vicine che donano il proprio sangue genetico per aiutare il parente prossimo malato (pre-desertico o di cava).

Un approccio a mosaico che innesti e favorisca l'autopropagazione ancorandosi al rispetto delle specie.

Da questi primi approcci sperimentale, di certa grande validità per la comprensione della Natura come risanatrice dei mali antropici, l'occasione per un approccio più adatto alla Soil & Water Bioengineering ("mettendole a dimora" al posto della semina in modo che non si disperda la concentrazione di semi) è stata offerta dal Caso *Studio di Pomaia*.

I successi ci sono, occorre però "economizzare" il costo artigianale e di raccolta per rendere estensivo l'intervento.

### ***Caso studio di Termini Imerese (2015)***

La discarica di termini imerese (PA) è un caso esemplare che ben mostra le possibilità di rinverdimento rapido ed efficace offerte dalla tecniche dell'idrosemina.



Figura 3.14 Caso di studio di Termini Imerese.

Il progetto prevedeva un ricoprimento vegetale di 7,4 ha mediante idrosemina direttamente sul terreno di ricoprimento finale con rifiuti spesso a vista e la presenza di specie alloctone invasive quali *Pennisetum setaceum*, *Ricinus communis*, *Datura stramonium*, *Boerhavia repens*.

Nonostante lo stato di evidente degrado paesaggistico, indagini di campo mostrano un elevato livello di biodiversità vegetale, con la presenza di oltre **60** specie, prevalentemente erbacee (soprattutto *Ampelodesmos mauritanicus* e *Hyparrhenia hirta*) e qualche arbustiva o arborea, tutte caratteristiche di praterie steppiche a graminacee perenni.

Tra tutte *Ampelodesmos mauritanicus* è stata selezionata come specie target in virtù delle sue ottime caratteristiche biotecniche, sia morfometriche (apparato radicale esteso e profondo) che di resistenza a trazione delle radici, che la rendono un ottimo alleato per il consolidamento del versante.

La selezione della semenza ha privilegiato un rinfoltimento delle specie appartenenti alla famiglia delle Graminaceae (oltre l'*Ampelodesmo*, *Oryzopsis miliacea*, *Cynodon dactylon*, *Festuca arundinacea*) e delle Fabaceae (*Hedysarum coronarium*, *Lotus corniculatus*, *Medicago sativa*) e altre

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

eccellenti per caratteristiche biotecniche (*Foeniculum vulgare*). La lista iniziale è stata ampliata in seguito ai vincoli imposti dal capitolato d'appalto, tra i quali:

- l'inserimento di almeno 12 specie erbacee perenni (non infestanti, non geneticamente modificate, resistenti al fuoco, resistenti a pH compresi tra 4 e 11 etc...);
- specie aventi velocità di accrescimento radicale di 200cm a 18 mesi;
- sforzi a trazione da rottura minimo delle specie pari a 15MPa;
- sforzi medi della miscela pari a 80MPa
- almeno una specie avente sforzo trazione a rottura superiore a 200 Mpa.

Il vincolo biotecnico è stato subito superato mediante uno studio bibliografico molto ampio.

Le specie sopra elencate costituiscono una miscela ad alto valore biotecnico, per cui è stato necessario adoperarsi alla raccolta di 83 kg di semi.

Oltre alla scelta accurata nelle sementi, sono stati svolti degli **interventi** mirati ad **incrementare la germinazione** dei semi:

- fertilizzazione con stallatico equino fino ad un tenore di 350 g/mq che per proprietà e composizione è ulteriore fonte di semi tipici dei pascoli siciliani;
- inserimento di biostimolatori con batteri della rizosfera e micorrize;
- 2 collanti (organico e sintetico).

### **FASE 1: soddisfacimento capitolato**

Il progetto è iniziato con una prima fase di idrosemina a doppio passaggio (47,3 gr/mq + 6,6 gr/mq) nel mese di marzo. Al fine di massimizzare la probabilità di successo dell'intervento, il terreno è stato preventivamente fertilizzato con stallatico equino fino ad un tenore di 350 g/mq che per proprietà e composizione è ulteriore fonte di semi tipici dei pascoli siciliani. Inoltre sono stati aggiunti alla miscela di idrosemina dei biostimolatori con batteri della rizosfera e micorrize, 2 mulch (fibra di legno e cellulosico) e 2 collanti (organico e sintetico).

Durante il mese successivo si è proceduto con un hydromulching con semi (1,9 gr/mq), per affrontare meglio la stagione estiva.

Tab. 3.2 Composizione della miscela di idrosemina: in (A), la lettera N indica la specie preesistente in discarica; in (B) indicati i risultati del monitoraggio.

| N  | Classe        | Famiglia    | Taxa  | A | B |
|----|---------------|-------------|---|---|---|
| 1  | Magnoliopsida | Apiaceae    | <i>Foeniculum vulgare</i> Mill. subsp. <i>vulgare</i>                       | N | X |
| 2  | Magnoliopsida | Asteraceae  | <i>Artemisia arborescens</i> (Vaill.) L.                                    | N | X |
| 3  | Magnoliopsida | Leguminosae | <i>Lotus corniculatus</i> L.  | N | X |
| 4  | Magnoliopsida | Leguminosae | <i>Medicago lupulina</i> (Guss.) Nyman                                      | N | X |
| 5  | Magnoliopsida | Leguminosae | <i>Medicago sativa</i> L. subsp. <i>sativa</i>                              | N | X |
| 6  | Magnoliopsida | Leguminosae | <i>Hedysarum coronarium</i> (L.) Medik.                                     | N | X |
| 7  | Magnoliopsida | Leguminosae | <i>Trifolium hybridum</i> Huds.   | X |   |
| 8  | Magnoliopsida | Leguminosae | <i>Trifolium pratense</i> L.  | N | X |
| 9  | Magnoliopsida | Leguminosae | <i>Trifolium repens</i> L. (T.bianco)                                       | X | X |
| 10 | Magnoliopsida | Leguminosae | <i>Vicia sativa</i> L. subsp. <i>sativa</i>                                 | N | X |
| 11 | Liliopsida    | Graminaceae | <i>Agropyron repens</i> (L.) P. Beauv.                                      | X |   |
| 12 | Liliopsida    | Graminaceae | <i>Ampelodesmos mauritanicus</i> (Poir.) T. Durand & Schinz.                | N | X |
| 13 | Liliopsida    | Graminaceae | <i>Brachypodium rupestre</i> (Host) Roem. & Schult.                         | X |   |
| 14 | Liliopsida    | Graminaceae | <i>Bromopsis erecta</i> (Huds.) Fourr. ( <i>Bromus erectus</i> )            | X |   |
| 15 | Liliopsida    | Graminaceae | <i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.  | N | X |
| 16 | Liliopsida    | Graminaceae | <i>Festuca ovina</i> L.   | X |   |
| 17 | Liliopsida    | Graminaceae | <i>Lolium multiflorum</i> Lam. (Loietto italico)                            | X |   |
| 18 | Liliopsida    | Graminaceae | <i>Lolium perenne</i> L.  | X |   |
| 19 | Liliopsida    | Graminaceae | <i>Lygeum spartum</i> L.  | N |   |
| 20 | Liliopsida    | Graminaceae | <i>Piptatherum miliaceum</i> (L.) Coss. ( <i>Oryzopsis miliaceum</i> )      | N | X |
| 21 | Liliopsida    | Graminaceae | <i>Schedonorus arund.</i> (Schreb.) Dumort. ( <i>Festuca arundinaceae</i> ) | N | X |

## FASE 2: reinforcement ecologico e di manutenzione

L'attività di monitoraggio dei mesi successivi è stata accompagnata da azioni di reinforcement tramite una nuova fase di idrosemina con fiorume di *Ampelodesmos m.*, *Hypparrenia hirta*, *Dactylis glomerata* e semi di arbustive (ginestra e camedrio) presenti nel sito. In più si è deciso di espianare le specie invasive più pericolose (*Ricinum*, *Pennisetum*, *Nappola*) che ostacolano significativamente la flora locale.



Figura 3.15 Confronto ante operam (2015) e post operam (2016).



### I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

Le attività di monitoraggio sono consistite in sei rilevamenti floristici (maggio 2015-marzo 2016), in cui si sono identificate 5 parcelle di monitoraggio. Nonostante l'intervento sia stato realizzato tardivamente (fine Marzo per ragioni burocratiche), sono stati censiti complessivamente 68 taxa, verificando la germinazione a soli due mesi dall'intervento di ben 10 delle 21 specie impiegate, divenute 13 a marzo 2016. Le specie censite nelle 5 parcelle di monitoraggio presentano una copertura non inferiori al 20% con picchi del 100% per il *Cynodon dactylon*. In 3 delle 5 parcelle sono state raggiunte percentuali di copertura vegetale pari a 90-95% sebbene con prevalenza di poche specie (*Cynodon dactylon*, *Hedysarium conorarium*, *Vicia sativa*). Le specie *Hedysarum c.*, *Medicago*, *Cynodon*, *Vicia s.*, *Artemisia e Oryzopsis*, hanno manifestato ottima attitudine all'impiego sia per quanto attiene la germinabilità che il grado di ricoprimento raggiunto; le altre specie hanno presentato minori o bassi valori di copertura. Il monitoraggio ha permesso di individuare ulteriori 35 specie locali che trovano condizioni favorevoli nelle differenti nicchie presenti nell'area dei lavori: da specie legate alle pozze umide o stagni quali *Typha* e *Scirpoides*, alle abbondanti graminacee perenni legate ai terreni umidi e profondi (*Arundo c.*) o ai prati xerici (*Hyparrhenia*). In occasione del monitoraggio di settembre 2015, è stata osservata la presenza di plantule e piantine di ampelodesma. Questo conferma che a causa della tardiva esecuzione dell'idrosemina, i semi di ampelodesma, non trovando le condizioni ideali per germinare, sono entrati in uno stato di quiescenza per poi germinare a seguito delle prime piogge di fine estate.

A confermare le difficili condizioni ecologiche presenti in un ambiente disturbato di discarica vi è la consistente presenza di specie alloctone o ad elevato grado di invasività. Si tratta di specie ruderali, sinantropiche legate a substrati particolarmente difficili in cui trovano posto neofite invasive quali ad esempio *Ricinus*, *Boerhaavia*, *Pennisetum setaceum e Datura*. Per il *Pennisetum s.* e il *Ricinus* sono state realizzate due campagne di espianto.



Figura 3.16 Parcelle di monitoraggio.

I risultati ottenuti confermano la validità dell'approccio biotecnico qui proposto, rilevando specificatamente la buona attitudine delle specie autoctone a creare un'efficiente copertura vegetale di un'area degradata, quale una discarica RSU con spessore di terreno estremamente esiguo. Peraltro, la

copertura vegetale raggiunta è risultata soddisfacente anche in termini di biodiversità per il rilevante numero di specie attecchite. Ecologicamente la metodologia applicata è preferibile ad una idrosemina tradizionale che usa miscele commerciali, di semi non autoctoni e di provenienza non certa, in quanto permette la ricostituzione ambientale del sito migliorandone il grado di biodiversità. La validità dell'approccio è confermato anche dai buoni risultati biotecnici delle specie di riferimento sia in termini di velocità di accrescimento, che di densità radicale (RAR), che di contributo alla resistenza del terreno attraverso rilevanti valori di tensione di rottura.

Oggi, a distanza di 7 anni, dalle foto sottostanti si può vedere come la copertura vegetale è maggiore nell'area di intervento, rispetto agli ambiti di riferimento a monte e a valle con implementazione dell'autopropagazione della canna di versante, dell'artemisia e delle euforbie. Tuttavia la ripresa delle graminacee perenni originaria continua da esser minacciata dall'invasività del *Pennisetum setaceum*.



Figura 3.17 (1) Area di intervento anno 2022; (2) area a monte anno 2022; (3) area a valle anno 2022.

#### **Caso studio di Pomaia (2021 - 2022)**

Pomaia è un frazione del comune toscano di Santa Luce (PI), in cui ha sede una cava di serpentiniti che in futuro diverrà un monastero in cui il Dalai Lama (2018) ha già piantato semi di mirto.

Il 1 settembre 2021 sono iniziati i lavori dopo una cerimonia con Osel, reincarnazione riconosciuta dal Dalai Lama e con la collaborazione di *Global Tree Initiative* e dei volontari di Sangha Onlus.



Figura 3.18 Area di cava oggetto di intervento.

La scelta del sito è apparsa ottimale perché l'approccio olistico si prestava con gli obiettivi del monastero. Lo stesso Fukuoka, in una delle illustrazioni del suo libro, commentava così il disegno: *The Buddha sits holding a child and a strong tied to a balloon. The balloon represents the human world of relative thinking. The Buddha and child, who are not in the balloon, represent the absolute world of nature.*

*Everything is inside the balloon.*



Figura 3.19 A sinistra: illustrazione tratta dal libro *Sowing Seeds in the Desert* di Masanobu Fukuoka (2013). A destra in alto: messa a dimora di semi di mirto durante la visita del Dalai lama a Pomaia (2014). A destra in basso: inizio dei lavori il 1° settembre 2021 con Osel Hita, reincarnazione riconosciuta dal Dalai Lama e con la collaborazione di Global Tree Initiative e dei volontari di Sangha Onlus.

Nel Settembre 2021 sono iniziati i lavori nella cava di Pomaia che sarà rigenerata con gli stessi semi e piante della macchia mediterranea circostante. Nella giornata di inizio lavori sono stati espianati dal bosco latistante 14 plantule (8 Cisti e 6 Elicrisi), invasati in un vivaio di acclimatamento presso il centro di Pomaia per esser messe a dimora nei mesi successivi con la stessa terra serpentinitica della cava ma mixata con compost prodotto presso l'ILTK Lama Tzong Khapa. Questi si aggiungono a 3 Tamerici e 3 Elicrisi (entrambi di 2 mesi da talee del luogo) e 3 Tamerici di due anni.

La preparazione delle SCB ha seguito il seguente protocollo sperimentale:

- 1) Spargere semi su una vaschetta per ognuna delle tipologie
- 2) Aggiungere argilla e acqua «quanto basta» per impastare pellet tondi (2 cm) e balls (fino a 5 cm.)
- 3) Aggiungere una *cover* di protezione e repellente per insetti
- 4) Lasciare asciugare per indurimento e protezione da impatto spaglio

Le prime 44 SCB sono state messe a dimora in presenza di Osel in una scarpata stradale adiacente alla cava totalmente priva di *top soil*.

- 1) Per stabilizzare l'area di posa della SCB sono state create piccole conche con piccole dighe in terra rinforzate con le stesse pietre;
- 2) Le SCB, oltre ai semi, contenevano top soil proveniente dal sito, povero di materia organica, paglia di scarta del fiorume e terriccio organico
- 3) Il mix è stato sparso sul fondo della conca.
- 4) Posizionamento delle SCB
- 5) Nuova dispersione del mix a copertura della SCB
- 6) Aggiunta di copertura con terriccio del luogo bagnato per compattare il tutto
- 7) Spargimento della paglia per assorbire l'umidità della notte e delle piogge ed eventuale ulteriore terriccio.



| Seed Clay Balls – 1 <sup>st</sup> lotto (September 1 <sup>st</sup> ) |    |   |                      |
|--|----|---|----------------------|
| Type   | n° | Species   | Cover                |
| 1  | 12 | Corbezzolo, Alaterno, Ginestra, Mix erbacee         | No                   |
| 2  | 6  | Cisto, Ginepro, Sulla, Festuca                      | Compost di Posidonia |
| 3  | 8  | Fiorume da fienagione arricchito di Sulla e Festuca | Compost di Posidonia |
| 4  | 10 | Sulla e Festuca                                     | Compost di Posidonia |
| 5  | 8  | Sulla e Festuca                                     | Compost di Posidonia |
| Totale   | 44 | 5 arbustive, 2 erbacee e Fiorume da fienagione      | Repulsione insetti   |

Figura 3.20 Tabella riepilogativa del numero e delle tipologie di Seed Balls realizzate il 1° settembre 2022.

Secondo il principio *No water No till* i semi delle SCB germogliano al momento (umidità, temperatura, periodo giusto dell'anno) che la natura stessa deciderà.

Il 24 e il 25 marzo 2022 in occasione di un cantiere didattico AIPIN, è stata realizzata una Grata viva, delle nuove Seed Balls, trapianti plantule arbustive in vaso e trapianti cespi di Elicriso, messe a dimora di ulivi ed il monitoraggio vegetazionale arbusti e attecchimenti Seed Balls, già messe a dimora a settembre con Osel Hita.

Sono state realizzate complessivamente 66 Seed Balls. A differenza del primo lotto di settembre, dove si sono impiegate delle miscele di sementi, in questo caso sono stati utilizzati diversi semi in purezza (prelevati in loco dai partecipanti) delle specie target del progetto. In particolare: Alisso *Alyssum bertolonii*, Mirto (*Myrtus communis*) e Garofano (*Dianthus* sp.), ma anche Cisto (*Cistus* sp.), Ginepro (*Juniperus oxycedrus*), Elicriso (*Helicrysum italicum*), Viburno (*Viburnum tinus*). I semi sono stati tutti micorrizzati (con micorrize in purezza *Rhizoglomos irregulare* in vermiculite).

Come substrati si sono utilizzati: sola Terra, Mix Terra e argilla e sola Argilla. Per la cover invece sono stati impiegati: Lombricompost, Fertilizzante liquido commerciale, Argilla, Digestato liquido.



*Figura 3.21 Semi in purezza raccolti in situ.*



*Figura 3.22 Realizzazione Seed Balls.*

Le Seed Balls sono state distribuite in 3 stazioni:

**Stazione 1:** implementazione del numero di SB nella scarpata già ospitante il primo lotto di settembre.

Le SB sono state disposte in piccole conche, creando dei microterrazzamenti.



*Figura 3.23 Stazione Seed Balls 1 – Scarpata.*

**Stazione 2:** Grata viva rinverditata con piantine di alaterno, fillirea e lentisco.

Qui sono state disposte le SB, creando una piccola conca e ricoprendole poi con terriccio e residui organici derivanti dalla raccolta dei semi, come pacciamatura.



Figura 3.24 Stazione Seed Balls 2 - Grata viva.



Figura 3.25 Posa in opera Seed Balls - Stazione grata viva.

**Stazione 3:** In questa stazione 3 le Seed Balls sono state marcate con delle messe a dimora con shelter in materiale biodegradabile. Le SCB sono state semplicemente posate sul terreno e circondate da pietrame.



Figura 3.26 Stazione Seed Balls 3. Messe a dimora con Shelter.

Il monitoraggio degli attecchimenti del primo lotto ha già marcato la riuscita di circa il **60%** delle SB. Probabilmente questo è stato inficiato negativamente anche dalle poche piogge di questi mesi. Si sono rilevate alcune plantule (da autopropagazione) di Garofano (*Dianthus sp.*).



Figura 3.27 Monitoraggio Seed Balls stazione 1 (in alto); monitoraggio attecchimento piantine (in basso).

### **Bibliografia Par. 3.1.2**

CORNELINI P., FEDERICO C., PIRRERA, G. (2008) *ARBUSTI AUTOCTONI MEDITERRANEI PER L'INGEGNERIA NATURALISTICA* Primo contributo alla morfometria degli apparati radicali, Azienda Foreste Demaniali Regione Siciliana - Collana Sicilia Foreste, n° 40 2008, Palermo, , ISBN 1972-1641, Capitoli 2,4,5, Pp. 1-6, 37-58, 223-278, 329-331; pagine 331 (recensione a pag. 11 di ACER 6/09)

Fukuoka M. (2013) “*Sowing Seeds in the Desert*” Chelsea Green Pub Co, ISBN-10 : 1603585222

Fukuoka M. (2009) “*The One-Straw Revolution*” New York Review of Books, Inc, ISBN-10:1590173139

PIRRERA G., FRECCERO C. (1-5 luglio 2019) University of Milano-Bicocca, Milano “*Ecological restoration of a quarry and spiritual landscapes in motion for a Buddhist monastery*”, Nature and society facing the Anthropocene challenges and perspectives for landscape ecology, 10th World Congress of the International Association for Landscape Ecology, SIEP IALE



*I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

PIRRERA G., SAULI G., CALVO R., AMATO F., D'ASARO F. (2016) "*Idrosemina naturalistica*"  
XXXV Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche IDRA 16 atti web  
[http://amsacta.unibo.it/5400/1/ATTI\\_IDRA16.pdf](http://amsacta.unibo.it/5400/1/ATTI_IDRA16.pdf) ISBN 9788898010400 p.833-836

PIRRERA G, SAULI G., AMATO F., CAMARDA R., D'ASARO F., CALVO R., BENFRATELLO  
R.(2015), "*Guarda dove sei*" ACER Parchi Verde Attrezzato Recupero Ambientale n° 6/15, Il Verde  
Editoriale, Milan, pp.43-48

Si ringrazia Andrea Monachino, appassionato tirocinante e il Prof. Silvano Riggio per  
l'incoraggiamento.

### 3.2 IL RUOLO PROTETTIVO DEL BOSCO E LA GESTIONE SELVICOLTURALE (A. Cislaghi)

I boschi rappresentano una fonte rinnovabile di risorse sulla terra e svolgono numerose funzioni, tra cui quella ecologica, ambientale, protettiva, economica, socioculturale, e turistica, essenziali per gli interessi e la vita dell'uomo. Fra queste funzioni, quella protettiva è sicuramente fra le più importanti e consiste in tutti quei processi che vanno a ridurre l'incidenza dei pericoli naturali dove è situato il bosco. I boschi, rispetto alle tradizionali strutture ingegneristiche, hanno un impatto ambientale sicuramente inferiore e assicurano una significativa riduzione della spesa grazie a costi di manutenzione relativamente modesti e gestibili nel tempo. Avvalersi di tale funzione, in combinazione o addirittura sostituendo gli investimenti richiesti per opere più espansive, può essere una strategia economicamente sostenibile nel contrasto al dissesto idrogeologico (*Brang et al., 2001*). Per questo motivo, un'adeguata identificazione e gestione pianificata dei boschi, in cui la funzione protettiva è prevalente, deve essere il primo e necessario passo per migliorare la prevenzione e la mitigazione dei pericoli naturali, rendendo gli insediamenti montuosi più sicuri per chi ci vive e per chi li visita (*Sakals et al., 2006*).

#### 3.2.1 Le origini

Fin dal Medioevo, i paesi europei hanno adottato regolamenti e leggi in materia di boschi di protezione specialmente con lo scopo di limitare lo sfruttamento del materiale legnoso. Infatti, la popolazione delle montagne ha sempre sfruttato le enormi disponibilità delle risorse forestali attraverso l'abbattimento sistematico di piante in grandi aree. Ciò ha reso il legname, sempre più, un bene raro e quindi prezioso. Nel contesto europeo, una prima regolamentazione risale al 1385 ed era rivolta alle popolazioni tirolesi sotto il dominio asburgico. Essa chiaramente introduceva rigide norme per la gestione delle risorse dei boschi inclusa la raccolta del legname (*Weiss, 1999*). Nel medesimo periodo, la popolazione di Andermatt (Canton Uri) nella Svizzera Centrale nel 1397 si autoregolamentò vietando tagli indiscriminati nei boschi di conifere circostanti, in particolare quelli situati lungo i ripidi pendii sopra il villaggio riconoscendone una funzione di protezione irrinunciabile (*Brang et al., 2001*). In territorio italiano, una serie di documenti storici databili tra il 1333 e il 1480 testimoniano la redazione di normative locali riferite all'arco alpino nord-occidentale che citano esplicitamente «i boschi sopra i villaggi» (*Gerbore, 1997*). Un altro documento è il «*Coutumier du Duché d'Aoste*», una raccolta scritta di norme e costumi valdostani che nel 1587 reiterava il divieto di taglio degli alberi nei boschi con specifica funzione protettiva. Norme analoghe che limitavano le attività di disboscamento furono ritrovate in documenti e regolamenti della Repubblica di Venezia fin dai primi secoli XIII e XIV (*Bischetti et al., 2009*).

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Solo nella metà del XIX secolo, questi regolamenti furono codificati in vere e proprie leggi nella maggior parte delle nazioni del continente europeo. Una prima legge forestale fu istituita in Baviera nel 1852 introducendo per la prima volta il termine «*foresta di protezione*» («*Schutzwaldungen*») (Brang et al., 2001). Nello stesso anno, l'impero asburgico unificò diversi regolamenti locali (come quelli tirolesi) in un'unica legge («*Reichsforstgesetz*») nota come «*atto forestale liberale*». Questo atto impose un rigoroso controllo da parte dell'amministrazione imperiale sia sui boschi pubblici che su quelli privati in quanto ne riconoscevano l'importanza per la protezione della pianura (Brotto, 2008). Tutt'oggi, si può definire questo codice come il primo vero esempio di «*pianificazione selvicolturale sostenibile*» (Weiss, 1999). Nel 1860, lo stato francese emanò una legge sul rimboschimento delle montagne con lo scopo di ripristinare il territorio dai danni delle estese inondazioni occorse nel decennio precedente (Whited, 2005). Questo fu un primo esempio di attuazione, in stato di emergenza, di una politica ambientale per far fronte a una situazione di dissesto idrogeologico diffuso. Nel 1875, in Prussia furono irrogate una serie di norme, direttive e regolamenti che disciplinavano l'uso pubblico dei boschi attraverso l'introduzione di un codice unico ossia la «*legge prussiana sulla protezione delle foreste*» («*Preußisches Waldschutzgesetz*»). Nel 1876, in Svizzera, l'ente federale promulgò una legge che supportava economicamente il rimboschimento su larga scala ed estendeva il proprio controllo sulle aree coperte da boschi con lo scopo mitigare i pericoli naturali lungo i collegamenti tra altopiano e pianura (Whited, 2005).

Sul territorio italiano, invece, il riconoscimento dell'importanza delle foreste di protezione avvenne all'interno del Regio Decreto n. 3267/1923 «*Riordino e riforma della normativa in materia di boschi e terreni montani*». Tale legge impone di regolamentare gli usi delle risorse forestali e le attività selvicolturali mediante vincoli idrogeologici in quelle aree soggette al rischio idrogeologico, a garanzia dell'interesse pubblico (Agnolotti e Anderson, 2000).

### **3.2.2 L'attualità**

Arrivando ai giorni nostri, la Conferenza ministeriale sulla protezione delle foreste in Europa (MCPFE) ha fornito una definizione specifica per le foreste con funzioni protettive che può essere riassunta nei seguenti punti:

- la gestione è esplicitamente diretta a proteggere il suolo, l'acqua e l'ecosistema forestale, nonché le infrastrutture, le abitazioni e le proprietà dai pericoli naturali;
- i terreni boschivi sono esplicitamente delimitati all'interno dei piani di gestione o in normative di amministrazione locale per svolgere una funzione esclusiva di protezione;

- i terreni boschivi dove qualsiasi operazione o attività possa influire negativamente sulle proprietà del suolo o dell'acqua, sull'ecosistema forestale e sulle caratteristiche del soprassuolo, indispensabili allo scopo di mitigare i pericoli naturali circostanti e di ridurre i possibili danni alle infrastrutture e alle abitazioni.

Questa definizione implica che coesistono due diverse tipologie di protezione: *protezione indiretta* e *protezione diretta* (Meloni et al., 2006). I *boschi con funzione protettiva indiretta* hanno un impatto sul miglioramento della stabilità dei versanti, sulla riduzione del fenomeno erosivo e sulla regolazione dei flussi di sedimento all'interno del bacino idrografico. Il bacino idrografico è l'entità geografica costituita dalla proiezione su un piano orizzontale della superficie scolante sottesa ad una fissata sezione trasversale di un corso d'acqua (Ferro, 2006). Tali boschi non hanno un impatto diretto sulla mitigazione dei rischi naturali a scala locale, ma contribuiscono a controllare i processi idrologici e sedimentologici a scala di bacino o addirittura a scale regionale. Ciò significa che l'impatto protettivo non dipende dalla posizione all'interno del bacino idrografico, ma più dalla sua dimensione. I *boschi con funzione di protezione diretta* hanno la funzione primaria di proteggere le persone, gli insediamenti e/o le infrastrutture da pericoli naturali potenzialmente catastrofici. Brang e altri autori (2001) hanno sintetizzato questa definizione suggerendo il riconoscimento dei boschi di protezione diretta attraverso tre criteri che devono necessariamente coesistere: (i) la presenza di un pericolo naturale e/o la propensione ad eventi naturali che possono causare danni, (ii) la presenza di persone e/o beni che possono subire danni da un evento naturale e (iii) la presenza di un bosco con una concreta possibilità di mitigare i possibili danni causati da un evento naturale (Figura 3.28).



Figura 3.28 Esempio di bosco di protezione diretta presso il comune di Brusio (Canton Grigioni, Svizzera).

Nei paesi europei, come Austria, Svizzera, Francia, Germania e Slovenia, i boschi di protezione sono stati mappati distinguendo *funzioni dirette* o *indirette* e facendo riferimento a diversi pericoli naturali

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

quali valanghe, smottamenti, frane, inondazioni, e processi erosivi dovuti a precipitazioni intense e/o a tempeste. Una restrizione spesso adottata nella maggior parte dei paesi europei è il divieto di raccolta indiscriminata del legname (attraverso l'abbattimento delle piante): infatti, esistono limitazioni significative alle operazioni forestali nonché un obbligo per il proprietario del bosco nel pianificare e programmare un'adeguata gestione selvicolturale a medio-lungo termine.

In Italia, attraverso un processo di decentramento amministrativo, le Regioni hanno adottato diverse norme e regolamenti sia per la definizione che per la delimitazione delle foreste di protezione. In Valle d'Aosta, per esempio, la mappatura dei boschi protettivi è stato il primo passo verso una gestione selvicoltura sostenibile di lungo periodo. Secondo la procedura sviluppata da Meloni e altri autori (2006), i boschi a protezione diretta vengono individuati analizzando alcuni indicatori qualitativi calcolabili partendo dal modello digitale delle quote con una risoluzione di 10 x 10 m (come pendenze, quote ed esposizione), dalle immagini aeree (come uso del suolo o aree ad instabilità diffusa) e dai dati sulla copertura forestale presenti nei piani di assestamento forestale. In Piemonte, gli enti locali hanno classificato come boschi di protezione quelli che potenzialmente e direttamente proteggono insediamenti e/o infrastrutture da pericoli naturali di versante e/o dall'erosione delle zone spondali dei corsi d'acqua. Inoltre, sono state proposte delle linee guida per un approccio selvicolturale sostenibile specifico per quelle aree. In Lombardia, i boschi con funzione protettiva devono essere individuati nei piani di indirizzo forestale definendo una specifica gestione degli interventi forestali attuabili. In Liguria, dove il paesaggio è soggetto a fenomeni di erosione per sua morfologia, i boschi di protezione si distinguono per la loro funzione protettiva contro i processi superficiali di degradazione del suolo.

### **3.2.3 Funzione protettiva contro le frane superficiali**

I boschi mediamente danno un contributo positivo alla stabilità dei versanti in funzione della loro struttura forestale e della loro condizione (Montgomery et al., 2000; Ziemer, 1981). Tale contributo può essere distinto attraverso due tipologie di meccanismi: idrologici e meccanici. A scala di bacino, i meccanismi idrologici controllati dai boschi influenzano la quantità e la velocità dei processi di deflusso. A scala locale, invece, sono i meccanismi meccanici a garantire maggiori benefici nel contrasto delle instabilità dei versanti (Vergani et al., 2017).

#### *3.2.3.1 Effetti idrologici*

Il principale effetto idrologico consiste nel ridurre il contenuto di umidità nel suolo e di ritardare la condizione di saturazione del suolo alle profondità dove generalmente si innescano le frane, ossia tra

0,5 e 2 m (Forbes e Broadhead, 2011). La Figura 3.29 sintetizza quali sono e dove si sviluppano i principali meccanismi idrologici a scala di versante.

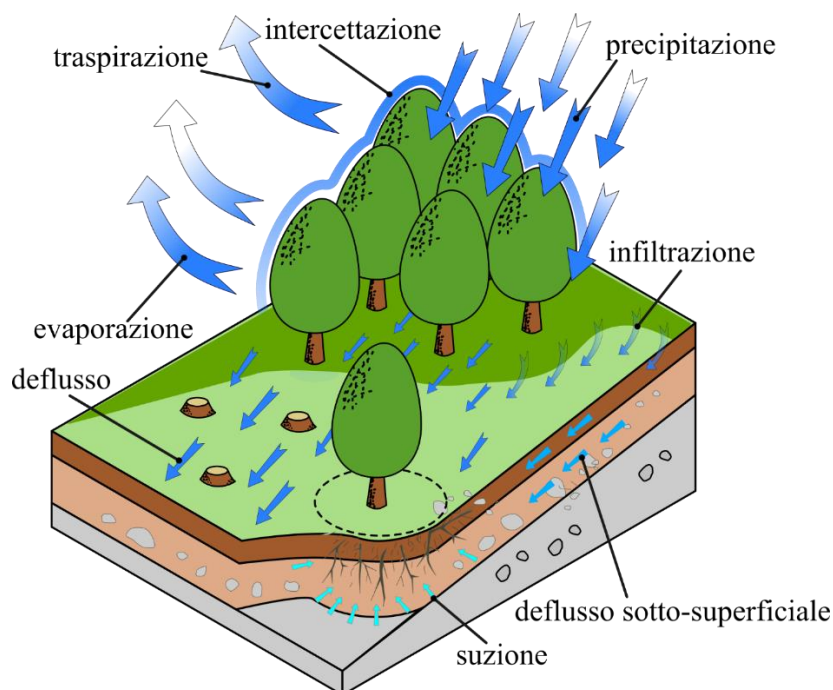


Figura 3.29 Effetti della vegetazione sui processi idrologici (figura tratta da Bischetti et al., 2013).

### ***Intercettazione ed evapotraspirazione***

La presenza della vegetazione a copertura del suolo influenza l'intensità e la distribuzione delle precipitazioni che cadono attraverso la chioma, la struttura legnosa e la lettiera. Questo processo idrologico è noto come *intercettazione*. La chioma e la lettiera riducono e ridistribuiscono la quantità di pioggia che raggiunge la superficie del suolo (Dhakal e Sullivan, 2014; Ghestem et al., 2011; Keim e Skaugset, 2003). Entrambe garantiscono una capacità di accumulo costante dell'umidità che dà un significativo contributo nel controllare il contenuto idrico degli strati più superficiali. D'altra parte, hanno meno influenza sulle dinamiche idrologiche più profonde che modificano la pressione interstiziale nel suolo, spesso causa d'innescio dei movimenti di massa lungo i versanti (Bordoni et al., 2015), specialmente durante periodi umidi prolungati (Sidle e Ziegler, 2017). Rami e tronco, invece, svolgono un ruolo diverso intercettando parte della precipitazione e canalizzandola lungo di essi fino a raggiungere il suolo. Ne risulta che l'acqua piovana si vada a concentrare a valle del tronco, laddove può infiltrarsi con più facilità nel suolo seguendo le vie preferenziali create dagli apparati radicali. In questo modo, l'acqua può raggiungere più rapidamente gli strati profondi con conseguente

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

aumento della pressione dell'acqua interstiziale, degli sforzi destabilizzanti nel suolo e del rischio di innesco di movimenti superficiali (*Liang et al., 2007*).

Sebbene i processi siano abbastanza chiari, molto più complessa è la quantificazione. Da letteratura, l'intercettazione può variare dal 2% al 67,5% delle precipitazioni annuali. Di questa parte, il deflusso lungo il tronco (meglio conosciuto come «*stemflow*») è valutabile tra l'1,3% e il 4,1% delle precipitazioni annuali (*Crockford e Richardson, 2000*). I fattori principali che determinano tale variabilità sono principalmente le caratteristiche forestali (*specie, età e densità del popolamento*) e il regime pluviometrico. Per esempio, è noto che mediamente le conifere intercettano più precipitazione rispetto alle foreste di latifoglie, il 26,15% contro il 19,71% (*Cislaghi, 2018*), in quanto queste ultime mostrano una maggiore variazione della chioma lungo l'arco dell'anno (*Staelens et al., 2008*). Inoltre, l'intercettazione è maggiore nella stagione vegetativa per modesti eventi piovosi, mentre risulta inferiore nella stagione dormiente. Non si può trascurare nemmeno l'effetto delle caratteristiche delle singole precipitazioni come l'intensità e la durata, in quanto hanno un determinante impatto (*Calheiros De Miranda e Butler, 1986*). Infatti, è dimostrato che l'intercettazione diminuisce sia con la durata che con l'intensità del fenomeno meteorico.

### ***Evaporazione e traspirazione***

Gli alberi hanno apparati radicali estesi che possono estrarre acqua dal suolo anche a profondità considerevoli e quindi ridurre i livelli di umidità (e pressioni interstiziali) a distanze anche fino a tre volte il raggio della chioma (*Gray e Sotir, 1996*). Grazie a ciò, l'*evaporazione* e la *traspirazione* possono ridurre l'umidità del suolo prima di un evento piovoso e quindi aumentare la quantità di acqua che può essere immagazzinata nel suolo (*Sidle e Ochiai, 2006*) senza generare un eccessivo aumento della pressione interstiziale. Questi processi idrologici sono più efficaci durante i periodi di siccità, mentre risultano spesso trascurabili quando le precipitazioni superano notevolmente l'evapotraspirazione potenziale come avviene nelle aree con clima freddo e subalpino.

### ***Infiltrazione e flussi sotto-superficiali***

I soprassuoli forestali mediamente hanno alti tassi di infiltrazione in quanto sono presenti macroporosità e percorsi preferenziali sotto-superficiali che si formano sia per la presenza della struttura ipogea della vegetazione che per la fauna edafica. In particolare, l'apparato radicale facilita il flusso sotto-superficiale nei suoli (*Uchida et al., 2001*) attraverso le macroporosità dovute al degrado delle radici più grandi o al turnover delle radici più fini. Nel suolo vegetato, infatti, è più comune che si formino percorsi sotto-superficiali che drenano più velocemente le acque presenti sugli strati superficiali (*Vergani e Graf, 2016*). È anche possibile che l'acqua attraverso un flusso sotto-

superficiale raggiunga le fratture del substrato roccioso per poi causare un aumento delle pressioni interstiziali ed espandere di conseguenza le macroporosità (Ghestem et al., 2011).

### ***Rugosità e flussi superficiali***

In superficie, radici e fusti aumentano la *rugosità* della superficie del terreno e anche la permeabilità del suolo portando contemporaneamente un aumento della capacità di infiltrazione e dei flussi di ritorno verso la superficie (Greenway, 1987). In ambiente forestale, tuttavia, tale argomento è sempre stato di poco interesse scientifico e considerato abbastanza trascurabile in termini di stabilità di versante.

### **3.2.3.2 Effetti meccanici**

I processi meccanici dovuti al soprassuolo boschivo sono oggetto di studio già dalla fine degli anni Sessanta (Burroughs e Thomas, 1977; Endo e Tsuruta, 1969). Le Figura 3.30 e Figura 3.31 mostrano quali sono e dove si sviluppano i meccanismi meccanici a scala di versante.

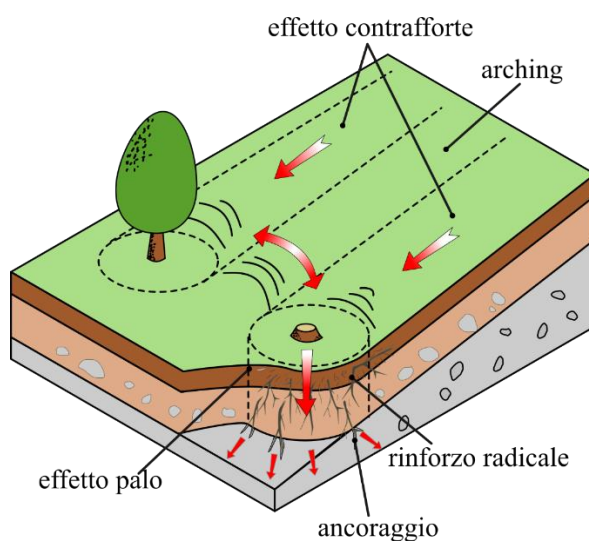


Figura 3.30. Effetti meccanici positivi sulla stabilità dei pendii (figura tratta da Cislaghi, 2018).



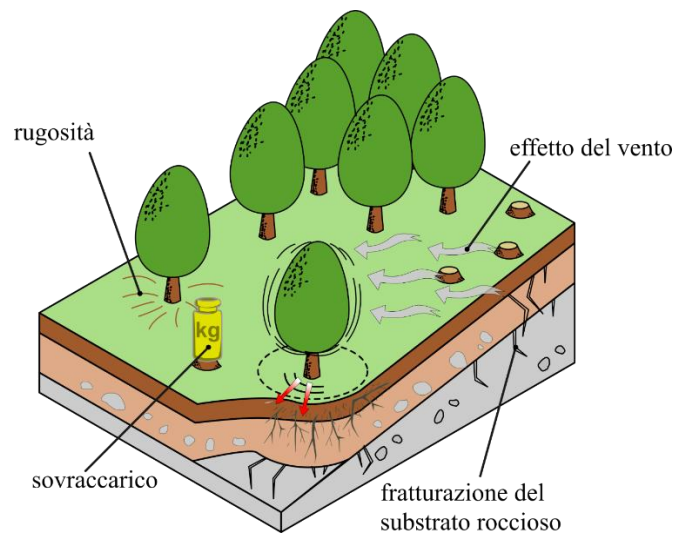


Figura 3.31 Effetti meccanici negativi sulla stabilità dei pendii (figura tratta da Cislaghi, 2018).

### **Rinforzo radicale**

Il rinforzo radicale è il principale contributo delle foreste alla stabilità dei pendii in quanto svolge un ruolo chiave durante l'innescò delle frane superficiali (Cohen e Schwarz, 2017; Schmidt et al., 2001). Le radici, infatti, possono stabilizzare lo strato superficiale del suolo attraverso tre diversi meccanismi.

Il primo è il *rinforzo radicale basale* che agisce laddove le radici raggiungono lo strato stabile sottostante e attraversano la superficie di scivolamento del corpo franoso, ossia l'interfaccia tra uno strato di suolo stabile e uno instabile/mobilizzabile (Wu et al., 1988). Le radici garantiscono una maggiore resistenza a taglio ostacolando l'innescò della formazione di una superficie di scivolamento e quindi del movimento di suolo.

Il secondo è il *rinforzo radicale laterale* che avviene laddove le radici, non espandendosi fino alla superficie di scivolamento, mobilitano la loro resistenza a trazione lungo l'intera superficie laterale del corpo mobilizzabile di frana. Questo meccanismo risulta essere il più significativo in termini quantitative in quanto il suolo ha una trascurabile resistenza a sforzi di trazione. Esso è strettamente influenzato chiaramente sia dalla densità delle radici nel suolo che dalle dimensioni della potenziale frana superficiale (Schwarz et al., 2010).

Il terzo è il *rinforzo radicale a compressione* che consiste nell'aumento di rigidità del suolo quando attraversato dalle radici (Schwarz et al., 2015). Questo avviene ai piedi di un versante oppure in aree con un accentuato e repentino cambio di pendenza.

### **Ancoraggio**

Le radici che raggiungono il substrato roccioso, generalmente più stabile, svolgono un'azione di ancoraggio per l'intero strato superficiale del suolo (Gray e Megahan, 1981). In dettaglio, le radici

più grandi attraversano strati di suolo meno rigidi e potenziali superfici di scivolamento e si fissano nelle fratture del substrato roccioso, mentre le radici più fini forniscono una membrana di rinforzo omogeneo allo strato più superficiale del suolo aumentandone la resistenza al taglio. Questo meccanismo è simile al rinforzo radicale, tranne per il fatto che si verifica su scala più piccola (Greenway, 1987).

#### ***Effetto palo ed effetto contrafforte-arco***

L'*effetto palo* si verifica nel volume del suolo occupato dall'apparato radicale che risulta maggiormente compatto e che agisce localmente come una vera e propria sotto-struttura geotecnica che è in grado di contrastare gli sforzi a taglio che si generano lungo le potenziali superfici di scivolamento (Gray e Sotir, 1996). Inoltre, una coppia di alberi genera un effetto simile, che si estende principalmente nella zona a monte del proprio tronco, ma anche lateralmente creando un arco tra i due. In queste aree coinvolte, la resistenza del suolo alla mobilitazione è notevolmente maggiore (Forbes e Broadhead, 2011). Questo meccanismo è chiamato *effetto contrafforte-arco* e dipende dalla spaziatura, dalla dimensione e dalla forma dell'intero apparato radicale, dallo spessore dello strato superficiale del suolo e dalle proprietà fisiche del suolo.

#### ***Aggregazione suolo***

L'aggregazione del suolo esprime la capacità del suolo di mantenere la propria struttura quando esposto a diverse sollecitazioni. È una caratteristica direttamente correlata alla resistenza al taglio del suolo (Burri et al., 2009; Frei et al., 2003), spesso utilizzata come indicatore per valutare l'efficacia dei metodi di ripristino del suolo (come le tecniche di Ingegneria Naturalistica). L'aggregazione del suolo è dovuta alla presenza delle radici e dalla micorrizza (associazione simbiotica tra fungo e pianta, localizzata nell'ambito dell'apparato radicale) che legano le singole particelle di suolo, riducendo così la suscettibilità all'erosione, al distaccamento delle particelle del suolo in superficie e del conseguente movimento verso valle (Greenway, 1987).

#### ***Sovraccarico del soprassuolo forestale***

È noto che il *sovraccarico del soprassuolo forestale* aumenta con la dimensione dei singoli alberi. Il peso dell'albero aumenta le componenti della forza normale così come le componenti della forza tangenziale, entrambe forze destabilizzanti rispetto all'equilibrio di uno strato superficiale di un versante. Sebbene il meccanismo sicuramente sfavorisca la stabilità, in generale è dimostrato come abbia un ruolo minimo nella stabilità complessiva di un pendio (Stokes et al., 2008). Infatti, si può presumere che l'effetto non influisce sulla stabilità complessiva di un versante, ma possa contribuire all'innescare di movimenti poco profondi e molto localizzati (spesso della stessa dimensione del volume

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

occupato dall'intero apparato radicale). Tale fenomeno è più diffuso laddove lo stato delle piante non è ottimale e la condizione idrologica del suolo è spesso vicina alla saturazione.

### ***Effetto del vento***

La forza esercitata dal vento sulle singole piante o sul popolamento è un elemento aggiuntivo da includere nel bilancio delle forze, ma che, quantitativamente, non porta all'innescò di una frana (*Greenway, 1987*). Il vento, infatti, può causare lo sradicamento di una pianta, che comporta all'interruzione della continuità di copertura. Di conseguenza, avviene una riduzione della coesione del suolo e della resistenza al taglio. Inoltre, il vento ribaltando gli alberi, espone il suolo minerale, generalmente caratterizzato da un tasso di infiltrazione superiore, all'atmosfera. Maggiore area ad alta capacità di infiltrazione significa maggiore quantità di acqua piovana che può immagazzinarsi all'interno del suolo e, di conseguenza quando la precipitazione è prolungata, maggiore pressione interstiziale negli strati più profondi. Questa serie di effetti è certamente a sfavore di stabilità, e crescono di importanza con l'aumentare dell'altezza dell'albero ad alto fusto e/o della dimensione dell'area basimetrica o della ceppaia in aree gestite a ceduo.

### ***3.2.4 Funzione protettiva contro la caduta massi e le valanghe***

#### *3.2.4.1 Effetto barriera*

Gli alberi costituiscono una barriera protettiva naturale contro le valanghe o gli smottamenti di roccia, detriti e suolo (*Cattiau et al., 1995*). Infatti, un popolamento di alberi certamente ostacola il movimento verso valle del materiale superficiale, mobilizzato lungo il versante, o franato da pareti di roccia e svolge un'azione di mitigazione e riduzione dei danni per tutto ciò che sta a valle (*Dorren et al., 2005*). L'effetto barriera dipende dalle caratteristiche del popolamento come larghezza, spaziatura e diametro medio degli alberi, e dalle caratteristiche biologiche (rigidità e resistenza elastica dei materiali legnosi) delle specie arboree (*Stokes et al., 2005*).

#### *3.2.4.2 Carichi di neve*

L'eccessivo carico di neve è spesso causa di innescò di valanghe nelle zone montuose. Le funzioni protettive del bosco in grado di contrastare questi fenomeni sono strettamente influenzate dalla sua struttura. La struttura irregolare del bosco, sia orizzontale che verticale, impedisce lo sviluppo di strati deboli estesi lungo un pendio, inibendo l'innescò di valanghe (*McClung, 2001*). Inoltre, la chioma degli alberi contribuisce a rendere il manto nevoso più eterogeneo ed impedisce un maggiore effetto del trasporto del vento. Si è dimostrato che l'asperità del terreno dovuta al soprassuolo forestale aumenta la stabilità della stratificazione della neve, e di conseguenza aumenta la stabilità dello strato

nevoso riducendo la possibilità di innesco di valanghe (*Frey e Thee, 2002; McClung e Schaerer, 2006*).

### 3.2.5 Funzione protettiva contro le alluvioni

Come già accennato, a scala di bacino idrografico, il soprassuolo forestale influisce fortemente sui percorsi di deflusso dell'acqua e dell'acqua mista a sedimento, e sulla capacità di stoccaggio temporaneo del sedimento mobilizzato lungo il versante. In generale, i boschi svolgono un ruolo importante nell'impedire che un'eccessiva quantità di materiale solido raggiunga il reticolo idrografico durante eventi meteorici importanti (*Sakals et al., 2006*), innescando potenziali colate detritiche.

A scala di bacino idrografico, la presenza della vegetazione può potenzialmente mitigare il pericolo delle inondazioni attraverso un aumento dell'intercettazione (*Robinson et al., 2003*), dell'evaporazione (*Hewlett e Hibbert, 1967*), dell'infiltrazione (*Bracken e Croke, 2007*) e una riduzione del deflusso superficiale (*Broadmeadow e Nisbet, 2010*). Tali effetti aumentano la loro intensità con la maturità del bosco (*Harr, 1986*), ma hanno un modesto effetto quando si tratta di eventi meteorici brevi ed intensi. Questi ultimi risultano essere sempre più frequenti e rappresentano la dinamica delle conseguenze del cambiamento climatico.

A scala di reticolo idrografico, i boschi ripariali influiscono fortemente sulla scabrezza idraulica del letto e delle sponde dei canali e/o dei corsi d'acqua (*Chow et al., 1988*). In particolare, la vegetazione stabilizza le sponde, limita l'erosione degli argini, riduce il trasporto solido, e dissipa maggiore energia durante eventi caratterizzati da portate superiori alla media (*Pollen-Bankhead e Simon, 2010*). Nonostante ciò, non c'è unanime consenso sull'efficacia generale dei boschi ripariali nel mitigare significativamente il rischio da inondazione (*Robinson et al., 2003*), ma il tutto è rimandato allo studio idrologico-idraulico del tratto di corso d'acqua e delle caratteristiche del bacino idrografico di monte.

#### 3.2.5.1 La gestione delle foreste di protezione

L'efficacia e l'affidabilità delle funzioni protettive dipendono fortemente dal pericolo naturale considerato, dalla frequenza e dall'intensità degli eventi scatenanti e dalle condizioni del bosco stesso (*Brang et al., 2006*). Un concetto da chiarire è che i boschi di protezione non possono fornire una protezione completa né da tutti i pericoli naturali né da tutti i possibili danni, poiché esiste sempre un rischio residuo che deve essere valutato ed accettato.

Pianificare e studiare una corretta e sostenibile gestione del bosco è l'unica strategia per massimizzare la funzione protettiva. I boschi di protezione richiedono, infatti, una valutazione in termini di resistenza e resilienza (*Sakals et al., 2006*). Boschi resistenti sono meno suscettibili alla drastica riduzione della loro funzione protettiva in seguito ad un disturbo naturale o artificiale, mentre boschi

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

resilienti hanno la capacità di recuperare rapidamente le proprie caratteristiche ottimali e tornare a svolgere al meglio la propria funzione protettiva.

Questa concezione, tuttavia, si scontra con la condizione media dei boschi italiani (che costituiscono circa il 37% del territorio nazionale) che via via si ritrovano in stato di abbandono in quanto non più, da tempo, fonti primarie di cibo e di legna da ardere e spesso nemmeno fonti di reddito (produzione di legname in particolare). Quindi, si può affermare che l'uomo abbia inesorabilmente delegato la gestione dei boschi alla natura. Sebbene, da un punto di vista ecologico, ciò ha favorito un aumento della complessità della struttura del popolamento e della composizione delle specie (accrescendone la biodiversità), dall'altro qualsiasi disturbo (malattie, colpi di vento o incendi) può improvvisamente ridurre o addirittura annullare la funzione protettiva del bosco. Per questo motivo, è necessario mantenere i boschi sani e ben strutturati attraverso un monitoraggio attivo e continuo e attraverso operazioni selvicolturali che accompagnino la dinamica naturale del bosco, eliminando le piante non più sane e favorendo la crescita di quelle potenzialmente più vigorose (*Berger e Rey, 2004*). Esperienze e studi scientifici hanno evidenziato come alcuni trattamenti assicurino migliori risultati in termini di massimizzazione della funzione protettiva. Per esempio, in popolamenti misti di conifere e latifoglie (spesso monospecifici e risalenti al dopoguerra), il taglio selettivo permette un mantenimento omogeneo della copertura forestale e preserva una struttura multistrato ad alto fusto nel tempo (*Cislaghi et al., 2021; Nascimbene et al., 2007*). Ciò è consigliabile anche per le aree di riforestazione a conifera ad alto fusto, al fine di indirizzare il popolamento verso una struttura più eterogenea e resiliente. Per quanto riguarda la gestione a ceduo, le scelte possono essere diverse. Mediamente, la ceduzione garantisce una copertura continua del suolo e una vitalità costante del bosco. Tuttavia, non possiamo trascurare il fatto che è una pratica selvicolturale in progressivo abbandono in molte aree montane. Ciò comporta generalmente un'evoluzione strutturale del popolamento che può condurre le piante rapidamente a stadi di instabilità in pochi decenni dal mancato turno di taglio (*Motta e Haudemand, 2000*). Sebbene le previsioni sull'andamento della funzione protettiva del bosco in abbandono dalla ceduzione siano un argomento molto complesso, la conversione dei popolamenti cedui ad alto fusto risulta essere una strategia ormai consolidata per aumentare la stabilità della struttura del popolamento e per garantire un ragionevole grado di funzione protettiva (*Dazio et al., 2018*). Per avere maggiori conferme, ulteriori ricerche si stanno focalizzando su appezzamenti permanenti in cui gli effetti dei diversi sistemi selvicolturali sulla funzione protettiva saranno valutati a breve, medio e lungo termine, al fine di perfezionare delle linee guida per una gestione selvicolturale specifica per i boschi di protezione diretta.

**Bibliografia Par. 3.2**

Agnoletti, M., Anderson, S., 2000. Forest history: international studies on socioeconomic and forest ecosystem change: report No. 2 of the IUFRO task force on environmental change. CABI.

Berger, F., Rey, F., 2004. Mountain protection forests against natural hazards and risks: new French developments by integrating forests in risk zoning. *Natural hazards* 33, 395–404.

Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Bassanelli, C., Nicoloso, A., Pividori, M., 2013. Dissesto idrogeologico e copertura forestale: il ruolo dei cedui di castagno abbandonati, Quaderni della Ricerca. Regione Lombardia.

Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Epis, T., Morlotti, E., 2009. Root cohesion of forest species in the Italian Alps. *Plant and Soil* 324, 71–89. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9941-0>

Bordoni, M., Meisina, C., Valentino, R., Lu, N., Bittelli, M., Chersich, S., 2015. Hydrological factors affecting rainfall-induced shallow landslides: From the field monitoring to a simplified slope stability analysis. *Engineering Geology* 193, 19–37. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.006>

Bracken, L.J., Croke, J., 2007. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. *Hydrological Processes* 21, 1749–1763. <https://doi.org/10.1002/hyp.6313>

Brang, P., Schönenberger, W., Frehner, M., Schwitter, R., Thormann, J.-J., Wasser, B., 2006. Management of protection forests in the European Alps: an overview. *Forest Snow and Landscape Research* 80, 23–44.

Brang, P., Schönenberger, W., Ott, E., Gardner, B., 2001. Forests as protection from natural hazards, in: *The Forests Handbook*. pp. 53–81.

Broadmeadow, S., Nisbet, T.R., 2010. Opportunity mapping for woodland to reduce flooding in the Yorkshire & the Humber Region. *Forest Research Monograph* 1.

Brotto, E., 2008. Le organizzazioni forestali nello Stato. Provincia autonoma di Trento. Giunta.

Burri, K., Graf, F., Böll, A., 2009. Revegetation measures improve soil aggregate stability: a case study of a landslide area in Central Switzerland. *Forest Snow and Landscape Research* 82, 45–60.

Burroughs, E.R., Thomas, B.R., 1977. Declining root strength in Douglas-fir after felling as a factor in slope stability, Research Paper INT-190 (p.38). Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Dept. of Agriculture, Ogden, Utah U.S.A.

Calheiros De Miranda, R.A., Butler, D.R., 1986. Interception of rainfall in a hedgerow apple orchard. *Journal of Hydrology* 87, 245–253.

Cattiau, V., Mari, E., Renaud, J.-P., 1995. Forêt et protection contre les chutes de rochers. *Ingénieries: Eau – Agriculture – Territoires* 3, 45–54.

Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1988. *Applied hydrology*. McGraw-Hill Education.

Cislaghi, A., 2018. Assessing shallow landslide susceptibility of vegetated hillslopes through a physically-based spatially-distributed model (*PhD dissertation in Environmental Sciences*). Università degli Studi di Milano, Milan, Italy.

Cislaghi, A., Alterio, E., Fogliata, P., Rizzi, A., Lingua, E., Vacchiano, G., Bischetti, G.B., Sitzia, T., 2021. Effects of tree spacing and thinning on root reinforcement in mountain forests of the European Southern Alps. *Forest Ecology and Management* 482, 118873. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118873>

Cohen, D., Schwarz, M., 2017. Tree-root control of shallow landslides. *Earth Surface Dynamics* 5, 451–477. <https://doi.org/10.5194/esurf-5-451-2017>

Crockford, R.H., Richardson, D.P., 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes* 14, 2903–2920.

Dazio, E.P.R., Conedera, M., Schwarz, M., 2018. Impact of different chestnut coppice managements on root reinforcement and shallow landslide susceptibility. *Forest Ecology and Management* 417, 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.031>

Dhakal, A.S., Sullivan, K., 2014. Shallow groundwater response to rainfall on a forested headwater catchment in northern coastal California: implications of topography, rainfall, and throughfall intensities on peak pressure head generation. *Hydrological Processes* 28, 446–463. <https://doi.org/10.1002/hyp.9542>

Dorren, L.K.A., Berger, F., le Hir, C., Mermin, E., Tardif, P., 2005. Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. *Forest Ecology and Management* 215, 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.012>

Endo, T., Tsuruta, T., 1969. Effects of tree root upon the shearing strengths of soils. Annual Report of the Hokkaido Branch, Tokyo Forest Experiment Station, Annual Report of the Hokkaido Branch, Forest Place Experimental Station 18, 168–179.

Ferro, V., 2006. La sistemazione dei bacini idrografici, 2nd Edition. ed. McGraw-Hill, Milan, Italy.

Forbes, K., Broadhead, J., 2011. Forests and landslides: the role of trees and forests in the prevention of landslides and rehabilitation of landslide-affected areas in Asia. Food and Agriculture Organization of the United Nations (*FAO*), Bangkok.

Frei, M., Böll, A., Graf, F., Heinimann, H.R., Springman, S., 2003. Quantification of the influence of vegetation on soil stability. Lee C. F. and Tham L. G. (*eds*), Hong Kong, China, pp. 872–877.

Frey, W., Thee, P., 2002. Avalanche protection of windthrow areas: A ten year comparison of cleared and uncleared starting zones. *Forest Snow and Landscape Research* 77, 2.

Gerbore, E., 1997. I boschi nel medioevo. Uomini e boschi in Valle d'Aosta.

Ghestem, M., Sidle, R.C., Stokes, A., 2011. The influence of plant root systems on subsurface flow: implications for slope stability. *BioScience* 61, 869–879. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.11.6>

Gray, D.H., Megahan, W.F., 1981. Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho batholith. USDA Forest Service Research Paper INT (*USA*) 271.

Gray, D.H., Sotir, R.B., 1996. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control. John Wiley & Sons.

Greenway, D.R., 1987. Vegetation and slope stability. *Slope stability: geotechnical engineering and geomorphology*/edited by MG Anderson and KS Richards.

Harr, D.R., 1986. Effects of clearcutting on rain-on-snow runoff in Western Oregon - a new look at old studies. *Water Resources Research* 22, 1095–1100.

Hewlett, J.D., Hibbert, A.R., 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. *Forest hydrology* 1, 275–290.



Keim, R.F., Skaugset, A.E., 2003. Modelling effects of forest canopies on slope stability. *Hydrol. Process.* 17, 1457–1467. <https://doi.org/10.1002/hyp.5121>

Liang, W.-L., Kosugi, K., Mizuyama, T., 2007. Heterogeneous soil water dynamics around a tree growing on a steep hillslope. *Vadose Zone Journal* 6, 879. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0029>

McClung, D., Schaerer, P.A., 2006. *The avalanche handbook*. The Mountaineers Books.

McClung, D.M., 2001. Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation caused by logging. *Annals of Glaciology* 32, 223–229.

Meloni, F., Lingua, E., Motta, R., 2006. Analisi della funzione protettiva delle foreste: l'esempio della "Carta delle foreste di protezione diretta della Valle d'Aosta." *Forest@-Journal of Silviculture and Forest Ecology* 3, 420.

Montgomery, D.R., Schmidt, K.M., Greenberg, H.M., Dietrich, W.E., 2000. Forest clearing and regional landsliding. *Geology* 28, 311–314.

Motta, R., Haudemand, J.-C., 2000. Protective forests and silvicultural stability: an example of planning in the Aosta Valley. *Mountain Research and Development* 20, 180–187. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2000\)020\[0180:PFASS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2000)020[0180:PFASS]2.0.CO;2)

Nascimbene, J., Marini, L., Nimis, P.L., 2007. Influence of forest management on epiphytic lichens in a temperate beech forest of northern Italy. *Forest Ecology and Management* 247, 43–47. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.04.011>

Pollen-Bankhead, N., Simon, A., 2010. Hydrologic and hydraulic effects of riparian root networks on streambank stability: Is mechanical root-reinforcement the whole story? *Geomorphology* 116, 353–362. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.11.013>

Preti F., 2013 - Forest protection and protection forest: Tree root degradation over hydrological shallow landslides triggering. *Ecological Engineering* 61P : 633– 645.

Robinson, M., Cognard-Plancq, A.-L., Cosandey, C., David, J., Durand, P., Führer, H.-W., Hall, R., Hendriques, M.O., Marc, V., McCarthy, R., McDonnell, M., Martin, C., Nisbet, T., O'Dea, P., Rodgers, M., Zollner, A., 2003. Studies of the impact of forests on peak flows and baseflows: a European perspective. *Forest Ecology and Management* 186, 85–97. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00238-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00238-X)

Sakals, M.E., Innes, J.L., Wilford, D.J., Sidle, R.C., Grant, G.E., 2006. The role of forests in reducing hydrogeomorphic hazards. *Forest Snow and Landscape Research* 80, 11–22.

Schmidt, K.M., Roering, J.J., Stock, J.D., Dietrich, W.E., Montgomery, D.R., Schaub, T., 2001. The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Canadian Geotechnical Journal* 38, 995–1024. <https://doi.org/10.1139/cgj-38-5-995>

Schwarz, M., Preti, F., Giadrossich, F., Lehmann, P., Or, D., 2010. Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (*Italy*). *Ecological Engineering* 36, 285–291. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.06.014>

Schwarz, M., Rist, A., Cohen, D., Giadrossich, F., Egorov, P., Büttner, D., Stolz, M., Thormann, J.-J., 2015. Root reinforcement of soils under compression. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 120, 2103–2120. <https://doi.org/10.1002/2015JF003632>

Sidle, R.C., Ochiai, H., 2006. Landslides: processes, prediction, and land use. American Geophysical Union.

Sidle, R.C., Ziegler, A.D., 2017. The canopy interception–landslide initiation conundrum: insight from a tropical secondary forest in northern Thailand. *Hydrology and Earth System Sciences* 21, 651–667. <https://doi.org/10.5194/hess-21-651-2017>

Staelens, J., De Schrijver, A., Verheyen, K., Verhoest, N.E.C., 2008. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica L.*) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. *Hydrol. Process.* 22, 33–45. <https://doi.org/10.1002/hyp.6610>

Stokes, A., Norris, J.E., Beek, L., Bogaard, T., Cammeraat, E., Mickovski, S.B., Jenner, A., Iorio, A., Fourcaud, T., 2008. How vegetation reinforces soil on slopes. *Slope stability and erosion control: ecotechnological solutions* 65–118.

Stokes, A., Salin, F., Kokutse, A.D., Berthier, S., Jeannin, H., Mochan, S., Dorren, L.K.A., Kokutse, N., Abd.Ghani, M., Fourcaud, T., 2005. Mechanical resistance of different tree species to rockfall in the French Alps. *Plant and Soil* 278, 107–117. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-3899-3>

Uchida, T., Kosugi, K., Mizuyama, T., 2001. Effects of pipeflow on hydrological process and its relation to landslide: a review of pipeflow studies in forested headwater catchments. *Hydrological Processes* 15, 2151–2174. <https://doi.org/10.1002/hyp.281>

Vergani, C., Giadrossich, F., Schwarz, M., Buckley, P., Conedera, M., Pividori, M., Salbitano, F., Rauch, H.P., Lovreglio, R., 2017. Root reinforcement dynamics of European coppice woodlands and their effect on shallow landslides: a review. *Earth-Science Reviews* 167, 88–102. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.02.002>

Vergani, C., Graf, F., 2016. Soil permeability, aggregate stability and root growth: a pot experiment from a soil bioengineering perspective. *Ecohydrol.* 9, 830–842. <https://doi.org/10.1002/eco.1686>

Weiss, G., 1999. Protective forests in Alpine countries: from commons to the welfare state, in: *Proceeding of the 10th Biennial Conference of the American Society for Environmental History (ASEH)*. Tucson, Arizona U.S.A.

Whited, T.L., 2005. *Northern Europe: an environmental history*. Abc-clio.

Wu, T.H., McOmber, R.M., Erb, R.T., Beal, P.E., 1988. Study of soil-root interaction. *Journal of Geotechnical Engineering* 114, 1351–1375.

Ziemer, R.R., 1981. The role of vegetation in the stability of forested slopes, in: *Proceedings of the 1st Union of Forest Resources Organization*. Div. I, Kyoto, Japan, pp. 297–308.

### 3.3 NUOVE STRUTTURE ANTIEROSIVE, STABILIZZANTI E CONSOLIDANTI

#### 3.3.1 Evoluzione delle tecniche consolidanti di Ingegneria Naturalistica (P. Cornelini)

##### 3.3.1.1 Introduzione

Le palificate vive in legno sono tra le opere più caratteristiche dell'Ingegneria Naturalistica, usate come opere a gravità alternative ai muri in cemento armato, con un campo di applicazione che va dall'ambito terrestre, come opere consolidanti di versante, all'ambito idraulico ove al consolidamento longitudinale delle sponde si aggiunge quello trasversale dell'alveo come briglia in legname e pietrame.

La palificata tradizionale più diffusa, usata da oltre un secolo, è la palificata viva doppia costituita da un cassone di tronchi riempito di terra e di piante (Figura 3.32). La palificata doppia risulta la struttura di Ingegneria Naturalistica più robusta tra le opere di sostegno in legno ed è comunque la più idonea in situazioni ove c'è il rischio di un cedimento della fondazione. La palificata doppia proprio per la sua robustezza richiede molti tronchi di legno e molte chiodature, per cui nelle situazioni ove non sussiste il rischio di un cedimento della fondazione possono essere usate altri tipi di palificate che utilizzano meno legname e meno chiodi, a parità di resistenza alla spinta delle terre; tali situazioni si riscontrano, in genere, alla base di scarpate stradali o di versanti con un terreno di fondazione stabile.

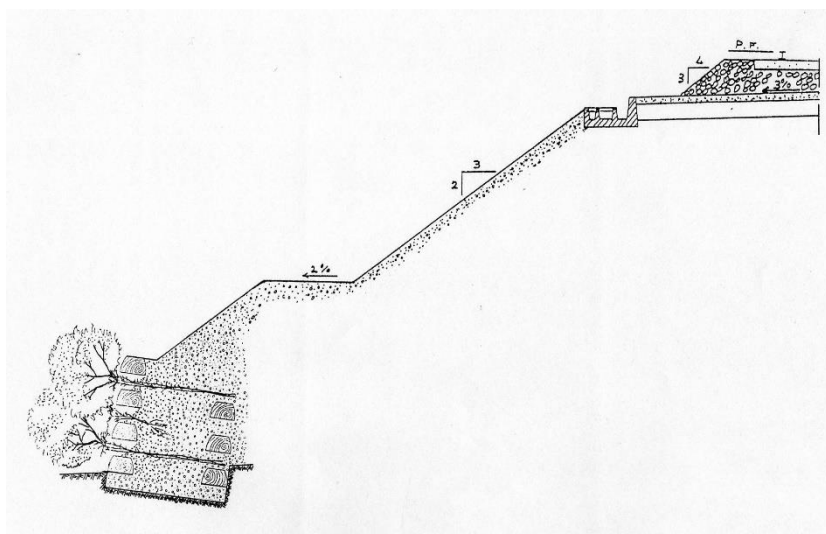


Figura 3.32 Palificata viva doppia al piede di una scarpata ferroviaria.

In questi ultimi anni si è sviluppato in Italia un filone di ricerca per realizzare nuovi tipi palificate vive, con la finalità del risparmio dei materiali e dei tempi di realizzazione, questione fondamentale nel settore delle infrastrutture stradali, ove va limitato al massimo il disagio dei cantieri.

Tali palificate appartengono alle opere di Ingegneria Naturalistica combinate, nelle quali il raggiungimento dell'obiettivo progettuale avviene tramite l'utilizzo, accanto alle piante vive ed alla terra di riempimento, di materiali morti quali i tronchi di legno, le strutture metalliche, ecc. Sono,

### *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

quindi, vicarianti della classica palificata viva a parete doppia, in alternativa ai muri a gravità di altezza di circa due metri, soprattutto sulle scarpate stradali.

La concezione progettuale di tali nuove palificate parte dalla esigenza di sperimentare tipologie di Ingegneria Naturalistica con l'obiettivo di:

- maggior rapidità di realizzazione;
- minore quantità di materiali impiegati;
- completa integrazione con le opere classiche.

Tra le varianti della classica palificata doppia usate in Italia vanno ricordate la palificata *Vesuvio sec. Menegazzi* che funziona come una palificata doppia tirantata, molto usata all'interno del *Parco Nazionale del Vesuvio* e la palificata *Venezia sec. Papa* fondata su pali, usata nelle Marche.

Le quattro palificate presentate di seguito: palificata viva *Roma*, palificata viva *latina*, palificata viva *L'Aquila*, palificata viva *loricata* partono, invece, da un approccio leggermente diverso da quello classico nel considerare la statica ed i componenti della struttura.

#### *3.3.1.2 La statica*

Per quanto riguarda la palificata viva *Roma* e la palificata viva *latina*, queste dal punto di vista statico si considerano sempre opere a gravità che resistono alla spinta delle terre tramite il peso proprio, dovendo soddisfare le classiche verifiche a slittamento, rotazione e schiacciamento della fondazione, oltre alla verifica di stabilità globale del versante.

Va però precisato che mentre nel caso della palificata doppia la spinta delle terre si ipotizza su un cassone di tronchi assimilato ad una scatola di legno piena di terra, cioè sulla parete posteriore della scatola stessa, queste palificate sono essenzialmente prive di parete posteriore e la spinta delle terre si esercita direttamente sul cuneo della terra di riempimento. La caratteristica di tali palificate è il telaio triangolare di pali incernierati, collegato ai tronchi della fondazione ove si scarica il peso stabilizzante del terreno sovrastante, funzionando come un fermalibri a *L* appesantito dai libri stessi. Le palificate, ai fini statici, equivalgono, in pratica, ad una terra rinforzata dai tronchi e dalle piante, ove la funzione della struttura in legno è quella di rendere stabile il fronte anteriore ad una pendenza di 60°.

Alle spinte del versante, a tergo, l'opera resiste a gravità ed è la terra con il suo volume e peso specifico nettamente superiore a quello del legno (terra =  $\gamma t$  circa 1800 Kg/mc, legno =  $\gamma l$  circa 700 Kg/mc), che dà il massimo contributo; ne consegue l'importanza della terra di riempimento e delle sue caratteristiche geotecniche, in particolare della coesione. L'incremento della coesione indotto da una idonea costipazione degli strati, anche semplicemente, con la pressione dei piedi insieme a quello indotto nel tempo dalle radici delle piante basta a giustificare, come risulta da esperienze consolidate, la stabilità della pendenza di un fronte di 60° di altezza limitata, dopo la decomposizione dei tronchi.

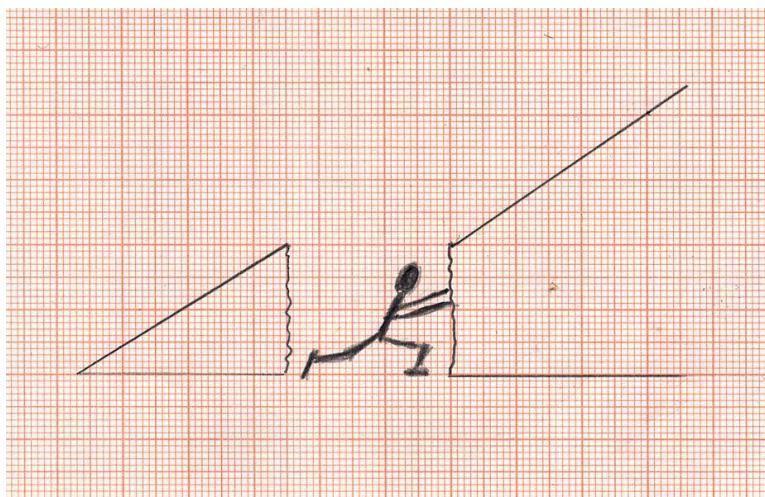


Figura 3.33 L'opera di sostegno a gravità sostituisce, con un minore ingombro, il cuneo di terra asportato.

La struttura a gravità che si oppone alla spinta non è, quindi, un cassone di legno riempito di terra, bensì un cuneo di terra rinforzato dai tronchi e dalle piante, ove la funzione degli elementi in legno è quella di mantenere temporaneamente in equilibrio a 60° il fronte anteriore della terra che senza il loro sostegno si disporrebbe naturalmente a circa 30° (Figura 3.34).

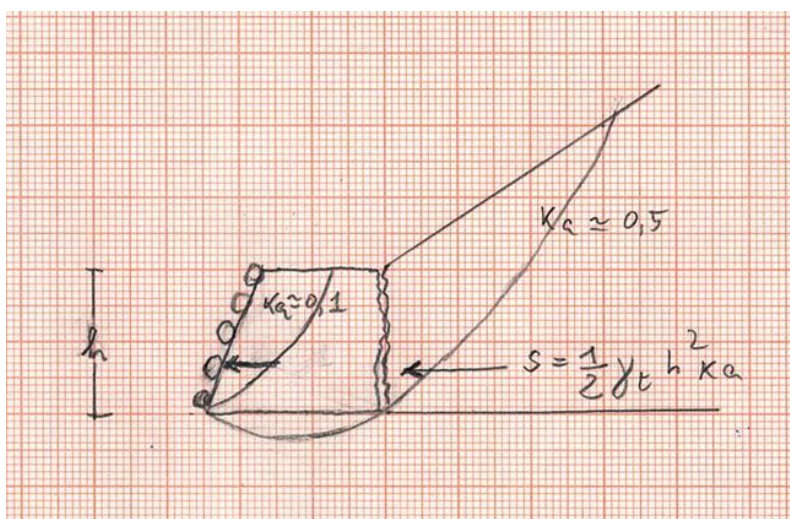


Figura 3.34 Schema statico della palificata con spinte diverse a tergo e sul fronte.

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Ne deriva che la spinta agente sul fronte anteriore in legno delle palificate è comunque inferiore a quella sulla struttura complessiva con una riduzione del fattore  $ka$ , sia per l'inclinazione del fronte a  $60^\circ$  invece che verticale, sia per una superficie superiore piana. A tale riduzione della spinta può dare un notevole contributo la coesione della terra di riempimento della struttura fino a spiegare l'equilibrio di fronti di palificate a tronchi decomposti.

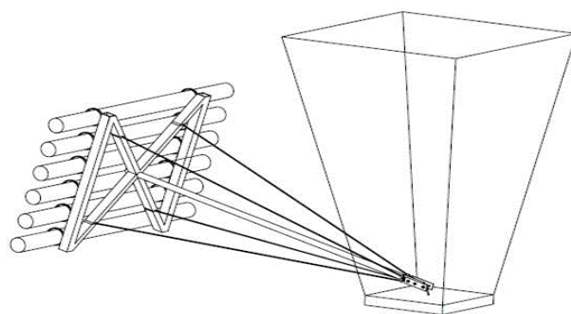
Decenni di esperienze hanno dimostrato come dopo 10-20 anni circa i tronchi si decompongono e come il legno delle piante vive, nel tempo, sostituisce la funzione del legno morto dei tronchi mantenendo il fronte di terra in equilibrio a  $60^\circ$ , grazie alla coesione indotta dallo sviluppo degli apparati radicali ed alla compattazione.

In definitiva, tre sono gli elementi che contribuiscono alla statica delle palificate:

- il terreno di riempimento che forma un cuneo di terra che si oppone alla spinta del versante
- il legno, la cui struttura ha il compito di rendere stabile il fronte anteriore a  $60^\circ$  resistendo a una spinta, comunque inferiore a quella del versante.
- le piante che con lo sviluppo delle radici aumenteranno la coesione interna.

Le verifiche statiche eseguite mostrano un comportamento migliore rispetto alla palificata doppia di analoghe dimensioni in quanto il volume occupato dal legno è minore e la terra ha un peso specifico superiore.

La statica della palificata loricata (Figura 3.35) è completamente diversa dalle altre, in quanto la spinta agisce sul fronte anteriore in legno e non sul cuneo di terra a tergo e viene bilanciata dalla componente dovuta all'attrito del peso della piramide di terra gravante sulla piastra. Il vantaggio di tale schema statico è la possibilità di accostare il più possibile la struttura al versante con uno scavo limitato e concentrato, con un grande risparmio dei movimenti terra, particolarmente apprezzabile sulle scarpate di difficile accesso.



*Figura 3.35 Schema statico della palificata loricata (disegno di Riccardo Di Bella).*

**La struttura: il telaio a triangolo**

L'elemento strutturale innovativo delle quattro palificate rispetto alla palificata doppia basata su una struttura a rettangolo è il telaio a triangolo:

- triangolo verticale con un tirante posteriore nel caso della palificata *Roma*, *L'Aquila e loricata*;
- triangolo orizzontale nel caso della palificata *latina*.

L'obiettivo del risparmio dei materiali viene raggiunto, quindi, con il telaio triangolare e un uso modulare dei tronchi stessi. La lunghezza standard del modulo base è di 4 m con interasse dei telai di 2 m

Il risparmio di legname rispetto alla palificata doppia è valutabile intorno al 15-35%, e quello delle chiodature va dal 20 al 30% (nella loricata non sono previste chiodature dei tronchi).

Rispetto alle tradizionali barre di acciaio ad aderenza migliorata è oggi consolidato l'uso di viti da legno che rendono il lavoro ancora più rapido. Nella palificata *Roma* nelle giunzioni dei tronchi del telaio a triangolo si usano le barre filettate con dadi e rondelle.

La riduzione dei tronchi e delle chiodature comporta una riduzione del costo della manodopera ed una meccanizzazione più spinta dei lavori con riduzione dei tempi morti di utilizzo delle macchine.

Nella tabella sotto sono confrontati i materiali ed i costi rispetto alla palificata doppia (Tabella 3.3).

*Tabella 3.3 Confronti tra le varie palificate per un modulo di 4 m di lunghezza e di 2 m di altezza*

|                                      | <i>Palificata doppia</i> | <i>Palificata Roma</i> | <i>Palificata latina</i> | <i>Palificata loricata (struttura legno-acciaio)</i> |
|--------------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|--|
| <b>Lunghezza (m) tronchi D 20 cm</b> | 64                       | 50                     | 53                       | 24   |
| <b>Numero chiodature</b>             | 38                       | 24                     | 26                       | -  |
| <b>Costi Euro/mc</b>                 | 150                      | 130                    | 120                      | 100  |

*Tabella 3.4 Campi di applicazione ottimali*

|                                | <i>Palificata doppia</i> | <i>Palificata Roma</i> | <i>Palificata latina</i> | <i>Palificata loricata</i> |
|--------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|
| <i>Sistemazioni idrauliche</i> | X                        |                        |                          | X                          |
| <i>Strade in pendenza</i>      |                          |                        |                          |                            |
| <i>Strade in piano</i>         | X                        | X                      | X                        | X                          |
| <i>Base dei Versanti</i>       | X                        | X                      | X                        | X                          |
| <i>Versanti in stabili</i>     | X                        |                        |                          | X                          |



## I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

Di seguito vengono descritti i tre nuovi tipi di palificate.

### 3.3.1.3 La palificata viva “Roma”

La palificata viva tipo *Roma* (Cornelini P., 2001) è la prima delle nuove palificate e rappresenta una elaborazione eclettica della palificata viva a parete doppia, della grata, della palizzata e delle terre rinforzate, con possibili applicazioni didattiche nei corsi di Ingegneria Naturalistica, in quanto:

- equivale alla base di una palificata viva doppia per i primi due ordini di tronchi;
- presenta dei montanti anteriori come una palizzata;
- si configura come una grata togliendo il primo palo infisso anteriormente;
- l'insieme paramento frontale – rete metallica funziona secondo i principi delle terre rinforzate.



Figura 3.37 A sinistra palificata Roma - Urbanizzazione La Leprignano (RM) 2007. A destra sua evoluzione 2009 (foto Cornelini P.).

Grazie al recente utilizzo delle viti da legno al posto delle barre di acciaio ad aderenza migliorata è oggi possibile una versione della palificata *Roma* ancora più semplice e rapida che fa a meno del



Figura 3.36 Palificata Roma senza palo frontale Martinsicuro (TE) (foto Cornelini P.).

montante anteriore e che vede i tronchi correnti anteriori fissati direttamente con le viti e sul montante posteriore (Figura 3.36).



Figura 3.38 Modello palificata Roma, Corso Università Tuscia, 2008 (foto Cornelini P.).

#### **Voce di capitolato della palificata viva Roma**

Consolidamento di pendii franosi o sponde in erosione con palificata in tondami di castagno o larice  $\varnothing 20 \div 25$  cm posti a formare una struttura triangolare in legname, con i montanti, i tiranti ed i traversi di  $L = 2,50 \div 3,00$  m e fissati tra di loro con tondini e barre filettate in acciaio con dadi e rondelle  $\varnothing 14$  mm; la palificata andrà interrata con una pendenza del  $10 \div 15$  % verso monte ed il fronte avrà una pendenza di circa  $65^\circ$  per garantire la miglior crescita delle piante; una fila di pali infissi potrà ulteriormente consolidare la palificata alla base; sui trasversi di base sarà posata una rete in acciaio zincata e plastificata di maglia  $6 \times 8$  cm., per la ripartizione del carico del terreno di riempimento sulla fondazione. Sarà effettuato l'inserimento di pietrame di pezzatura superiore al diametro del trasverso nelle camere al di sotto del livello medio dell'acqua sul fronte esterno ed un riempimento con inerte nella zona retrostante; analogamente sarà effettuato l'inserimento di fascine vive (di diametro superiore allo spazio tra i tronchi correnti) e talee di salici, tamerici od altre specie con capacità di propagazione vegetativa, nonché di piante radicate di specie arbustive pioniere nelle camere al di sopra del livello medio dell'acqua e riempimento con inerte nella zona retrostante fino a completa copertura dell'opera e riprofilatura di raccordo con la scarpata di sponda.

Rami e piante dovranno sporgere circa 10 cm dalla palificata ed arrivare nella parte posteriore sino al terreno naturale.

La palificata potrà essere realizzata per singoli tratti non più alti di  $1,8 \div 2$  m.

#### 3.3.1.4 La palificata viva latina

La palificata viva *latina* (Cornelini P., 2008) a cassone triangolare è una elaborazione della palificata doppia e della palificata semplice ottenuta tramite l'allungamento e la congiunzione a triangolo nella parte posteriore dei trasversi della palificata semplice

Rispetto alla palificata viva doppia non si presenta come una struttura omogenea a cassone continuo, ma con tratti rinforzati: i cassoni triangolari, collegati dai correnti anteriori, come le torri di guardia di una fortificazione collegate dalle mura.

La palificata viva *latina* presenta i seguenti vantaggi funzionali:

- è facilissima da realizzare per chi conosce la palificata semplice o doppia, senza bisogno di particolare formazione delle imprese in quanto è una via di mezzo tra le due tipologie;
- è modulare con i correnti di lunghezza di 4 m, interasse dei trasversi di 2 m e lunghezza dei trasversi di 2 o 2,5 m, a seconda dell'altezza, con semplificazione sia del calcolo dei materiali che della realizzazione;
- comporta, rispetto alla palificata doppia, un risparmio del legno intorno al 25 % e delle chiodature del 45% circa, che, unitamente al risparmio di tempo per la realizzazione, si traduce in risparmio di costi e di energia;
- è molto rapida per il ridotto uso di chiodature.

Inoltre, per la modularità costruttiva, il corrente da 4 m appoggia solo su due trasversi di interasse di 2 m, ed, quindi, stabile, mentre, nel caso comune di tre punti di contatto del corrente sui tre trasversi sotto si deve spesso intervenire per ristabilire il contatto continuo del corrente con il terzo trasverso o con la motosega o aggiungendo zeppe sugli appoggi intermedi presenti; tale vantaggio si traduce in una ottimizzazione dei materiali e nella possibilità di sfruttare al massimo l'attrito del contatto corrente-trasverso.

La modularità realizzativa è massima, essendo un modulo di 4 m ripetibile per  $n$  volte; per lunghezze che non sono multiple di 4 il residuo tratto si può realizzare tramite una palificata doppia; la palificata *latina* è, infatti, perfettamente integrabile con la palificata doppia dalla quale non si distingue quasi sul fronte anteriore, una volta riempita con la terra e le piante.



*Figura 3.39 La palificata latina presenta tratti rinforzati collegati dai correnti, come le torri di guardia collegate dalle mura. Mura romane di Porta Palatina a Torino (foto Cornelini P.).*



*Figura 3.40 Cassoni triangolari collegati dai correnti. Parco Nazionale del Vesuvio (foto Cornelini P.).*

La palificata doppia è sicuramente più solida nelle situazioni in cui vi siano dei possibili cedimenti delle fondazioni (ad esempio briglie con erosione e sifonamenti in alveo od opere di sostegno su frane in terreni cedevoli), ma nelle situazioni di opera di sostegno in ambito terrestre su fondazioni stabili rappresenta una valida alternativa.

Si segnala che la palificata latina è presente nel Prezzario Opere Edili della Regione Abruzzo a partire del 2013, con il nome di “Palificata a cassone triangolare” (Agg. 2021; cod. U.08.50.150.a; costo € 151,56).



*Figura 3.42 Palificata latina a lavori ultimati sotto il Vesuvio 2007 (foto Cornelini P.).*



*Figura 3.41 Evoluzione dopo 2 anni 2009 (foto Cornelini P.).*



Figura 3.44 Palificata latina L'Aquila, 2009 (foto Crocetti C.).



Figura 3.43 Palificata latina L'Aquila dopo un anno, 2010 (foto Crocetti C.).

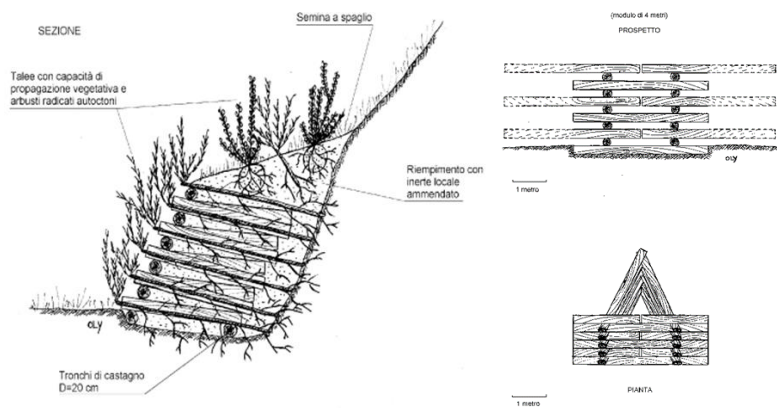


Figura 3.45 Palificata viva latina sec. Cornelini (disegni di Iacoangeli O.)

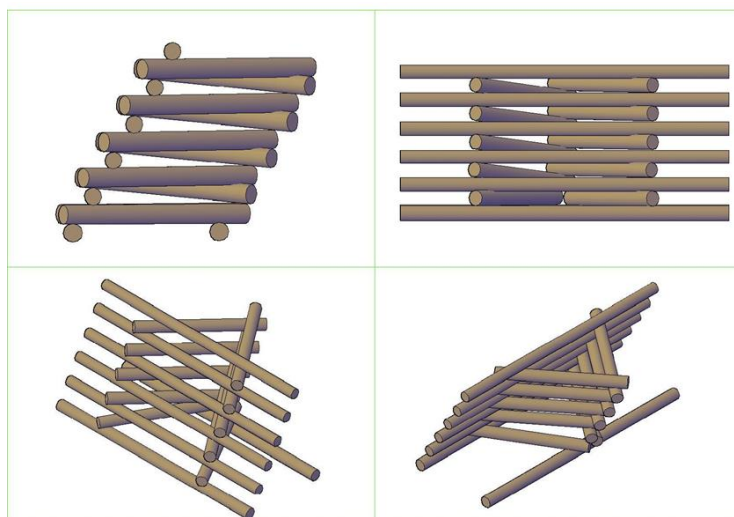


Figura 3.46 Schema costruttivo Palificata latina. Corso Università Tuscia - La Sapienza - Bracciano (RM) 2008.



*Figura 3.47 Palificata latina 2007  
Parco del Furlo (PU) (foto Cornellini P.)*



*Figura 3.48 Idem 2010.*



*Figura 3.49 Parco L'Aquila Genio  
Militare Esercito Italiano Cecchignola  
(RM),2011 (foto Cornellini P.).*



*Figura 3.50 Palificata latina nei Cantieri didattici  
Corso Ingegneria Naturalistica. Scuola Geometri  
Tallini Formia 2010 (foto Cornellini P.).*



*Figura 3.51 Palificata Latina a Coconuco\_ Colombia –2011 (foto Crocetti C.).*

**Voce di capitolato palificata latina**

Consolidamento del piede di pendii instabili con palificata in tondami di castagno o larice di  $\varnothing$  20 - 25 cm, posti alternativamente in senso longitudinale (correnti L= 4 m) ed in senso trasversale (traversi L=2-2,5 m a seconda dell'altezza) a formare cassoni triangolari in legname uniti tra loro dai correnti stessi; i traversi, posti a interasse di 2 m, formeranno un triangolo isoscele con i primi due in basso fissati sull'unico corrente posteriore e i successivi chiodati tra loro; i tondami saranno fissati tra di loro con viti da legno o tondini di acciaio a.m.  $\varnothing$  10-12 mm con lunghezza di poco inferiore ai due tronchi sovrapposti;

La fondazione sarà incassata con una pendenza di circa 10° ed il fronte avrà una pendenza di 60°. L'intera struttura verrà riempita a strati con l'inerte ricavato dallo scavo ammendato con terra di coltivo e negli interstizi tra i tondami orizzontali verranno collocate talee legnose di salici, tamerici od altre specie adatte alla riproduzione vegetativa e/o specie arbustive pioniere autoctone. Rami e piante dovranno sporgere non più di 10-20 cm dalla palificata e le talee dovranno arrivare nella parte posteriore sino al terreno naturale.

Il periodo d'intervento corrisponde, nel caso di uso delle talee, al riposo vegetativo con esclusione dei periodi di innevamento e gelo profondo e, nel caso di uso di arbusti radicati, a tutto l'anno con esclusione dei periodi di aridità estiva e di gelo

*3.3.1.5 La palificata viva loricata, opera di consolidamento di Ingegneria Naturalistica a struttura metallica*

Le palificate vive vengono realizzate con tronchi di legno morto, la cui funzione nel tempo sarà sostituita dal legno delle piante vive. In certi casi, tuttavia, viene richiesta una resistenza maggiore, per contare su una struttura non biodegradabile come il legno e da tale esigenza derivano varie proposte che vanno, nel campo dell'Ingegneria Naturalistica, dalle terre rinforzate rinverdite alle gabbionate rinverdite.

In tali opere le piante non hanno una funzione di stabilità strutturale neanche nel lungo periodo, in quanto questa viene affidata alla resistenza dei materiali morti; le piante, tuttavia, svolgono anche in tal caso, oltre alla finalità naturalistica di ricostruzione di unità ecosistemiche per l'aumento della biodiversità ed a quella paesaggistica, importanti funzioni di aumento della resistenza dell'opera, quali, ad esempio la dissipazione dell'energia cinetica dell'acqua operata dalle talee elastiche di una gabbionata spondale rinverdita, o di aumento della durata dell'opera quali, ad esempio, la funzione antisvuotamento del terreno di riempimento o la protezione dagli agenti atmosferici nel caso delle terre rinforzate rinverdite.

Non si può, comunque, negare che, nella maggior parte dei casi ove sarebbe stato possibile realizzare strutture rinverdite, tali opere strutturali risultano purtroppo prive di piante, sia per limiti progettuali che realizzativi.

La palificata viva *loricata* (Cornelini P., 2009), dal latino *lorica*, ossia corazza, vuole rappresentare il punto di incontro tra la palificata viva e la terra rinforzata rinverdita, unendo in positiva sinergia le migliori caratteristiche strutturali ed ambientali delle due tipologie.

È una struttura mista acciaio-legno che utilizza una armatura metallica prefabbricata (ricavata nelle prime opere da una elaborazione di strutture metalliche a monoancoraggio di largo impiego sul mercato), quale base di appoggio sul fronte anteriore dei tronchi orizzontali di contenimento del cuneo di terra rinverdito con arbusti autoctoni e/o talee.

La palificata viva *loricata*, per la maggior resistenza strutturale rispetto alle palificate in legno, dovuta alla armatura metallica, viene proposta come alternativa rispetto alle opere di sostegno tradizionali, anche nel settore delle infrastrutture stradali, laddove, per motivi di sicurezza, viene richiesta una struttura non biodegradabile (i tronchi possono essere facilmente sostituiti), con tutti i vantaggi naturalistici e paesaggistici tipici delle opere di Ingegneria Naturalistica.

La statica particolare consente di intervenire anche nel caso di mancanza di spazio con la possibilità di accostare il più possibile la struttura al versante con uno scavo limitato e concentrato.

Ne deriva un grande risparmio dei movimenti terra, particolarmente apprezzabile sulle scarpate di difficile accesso.



Figura 3.52 Prove di carico su *loricata*. Area sperimentale Pavona (RM) (foto Marrone E.).





Figura 3.53 Sperimentazione ad Asti del prototipo da parte del Politecnico di Torino (foto Valfrè).

La palificata viva *loricata* presenta i seguenti altri vantaggi funzionali:

- È di facile e rapida realizzazione grazie all'assemblaggio di elementi metallici prefabbricati e di tronchi di legno;
- rispetto alle palificate vive:
  - è una struttura più resistente grazie alla componente metallica e, in caso di necessità, è possibile sostituire i tronchi decomposti del fronte anteriore;
  - gli elementi strutturali sono molto più leggeri, meno ingombranti e facilmente trasportabili;
  - non sono necessarie le chiodature del legno che viene fissato con semplici ancoraggi;
  - tutta l'organizzazione del cantiere è semplificata.
- rispetto alle terre rinforzate rinverdite:
  - il contenimento del cuneo di terra anteriore non è affidato a reti metalliche o strutture sintetiche, ma, grazie alla minore pendenza del fronte anteriore ( $60^\circ$ ), ai tronchi, come nella palificata viva;
  - è facilissima da rinverdire con arbusti autoctoni in quanto la struttura viene riempita, come le palificate, con terra di coltivo ammendata sostenuta sul fronte anteriore dai tronchi di legno;
  - una volta riempita di terra e piante, l'armatura metallica non si vede più, ma si vedono solo i tronchi di legno del fronte anteriore e le piante, mentre l'opera viene percepita come una palificata viva, con un inserimento paesaggistico ottimale.

La struttura è modulare con correnti di legno di lunghezza di 4 m e, come la palificata *latina* non si presenta come una struttura omogenea a cassone continuo, ma con tratti rinforzati (i moduli metallici), collegati dai tronchi correnti anteriori, con l'interasse dei moduli di 4 m.

La palificata *loricata* è, perfettamente integrabile con le palificate vive dalle quale non si distingue quasi sul fronte anteriore, una volta riempita con la terra e le piante.

La palificata *loricata* può sostituire, per altezze contenute le opere in terra rinforzata, ove si richieda un ottimale inserimento paesaggistico con la ricucitura con le unità vegetazionali esistenti (infrastrutture stradali, parchi, aree protette, etc.). È indicata poi, particolarmente, nelle situazioni di emergenza (Protezione Civile) per la rapidità e facilità di realizzazione potendo garantire da subito una stabilità strutturale superiore a quella delle opere in legno.

La modularità realizzativa è massima e la palificata *loricata* è, perfettamente integrabile con le palificate vive dalle quale non si distingue quasi sul fronte anteriore, una volta riempita con la terra e le piante.

### **Descrizione della Palificata *loricata* sec. Cornellini**

La palificata viva *loricata* (dal latino *lorica*, corazza) è costituita da una struttura di acciaio e tondami di castagno o larice riempita di terra e arbusti, per il consolidamento di pendii instabili, anche nei casi di interventi urgenti. Esistono ormai sul mercato vari tipi di *loricata* che differiscono nella struttura metallica.

La struttura in acciaio a monoancoraggio è costituita da un paramento anteriore in acciaio a o H o X (con gli estremi della X collegati verticalmente da travi in acciaio), a seconda dei tipi offerti dal mercato, sul quale vanno appoggiati i tronchi; da tale paramento anteriore si diparte un gambo centrale metallico con funzione di tirante rigido collegato alla base posteriore ad un ancoraggio *a piastra* in metallo o calcestruzzo.

I paramenti anteriori metallici hanno dimensioni di circa 1,5- 2 m di larghezza in funzione dell'altezza. I tronchi, lunghi 3-4 m, sporgono a sbalzo dal fronte anteriore di circa un m da una parte e dall'altra.

La palificata può essere realizzata per singoli tratti modulari di 3-4 m, collegabili tra loro nei tratti rettilinei e i raccordi agli estremi con la morfologia esistente possono essere effettuati anche con tratti di palificata viva doppia o latina.

I tondami di castagno o larice (correnti  $L=3-4$  m) del diametro di circa 20 cm vanno fissati, paralleli tra loro, sul fronte anteriore metallico con collegamenti in acciaio e posti ad una distanza tra loro tale da consentire l'equilibrio del terreno di riempimento nelle finestre.

Il fronte anteriore costituito dall'insieme acciaio-legno deve avere una pendenza di  $60^\circ$  (per cui l'altezza utile del modulo di h 2 o 2,5 m. è di 1,73 o 2,16 m.), che garantisce la miglior stabilità del terreno di riempimento e la crescita delle piante; una fila di putrelle può ulteriormente consolidare la

palificata alla base; l'intera struttura va riempita con l'inerte ricavato dallo scavo ammendato con terra di coltivo e negli interstizi tra i correnti vanno collocate talee legnose di salici, tamerici od altre specie adatte alla riproduzione vegetativa, nonché arbusti pionieri autoctoni radicati . Le talee non devono sporgere più di 10-20 cm dalla palificata e arrivare nella parte posteriore sino al terreno locale.

Il periodo d'intervento corrisponde al riposo vegetativo nel caso delle talee e, nel caso degli arbusti in contenitore, al periodo vegetativo, con esclusione dei periodi di aridità estiva o gelo invernale.

Le principali precauzioni per una ottimale realizzazione:

- la pendenza anteriore della struttura metallica non deve superare i 60°;
- gli elementi di ancoraggio dei tronchi alla struttura vanno distanziati tra loro in funzione del diametro dei tronchi affinché il terreno sia in equilibrio tra i tronchi stessi;
- per una maggior praticità realizzativa il riempimento con la terra e le piante va effettuato a strati alla fine della posa del primo corrente, per una miglior compattazione della terra per evitare la formazione di vuoti;

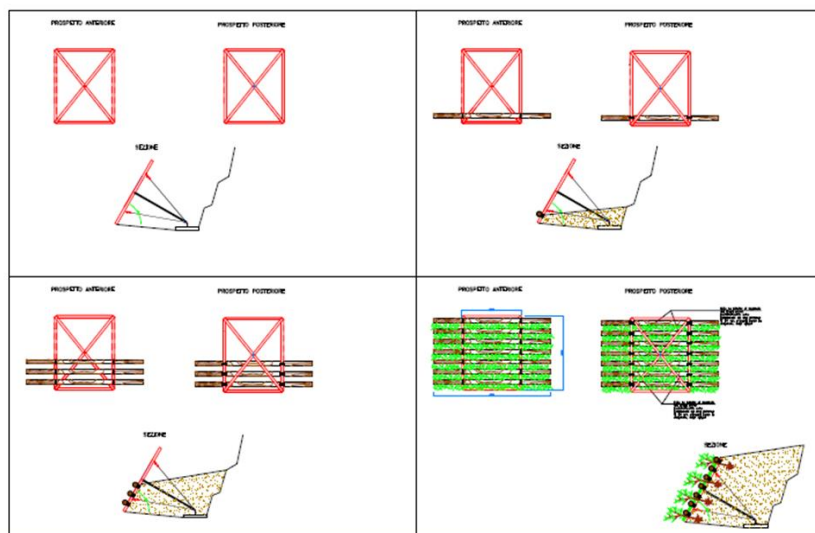
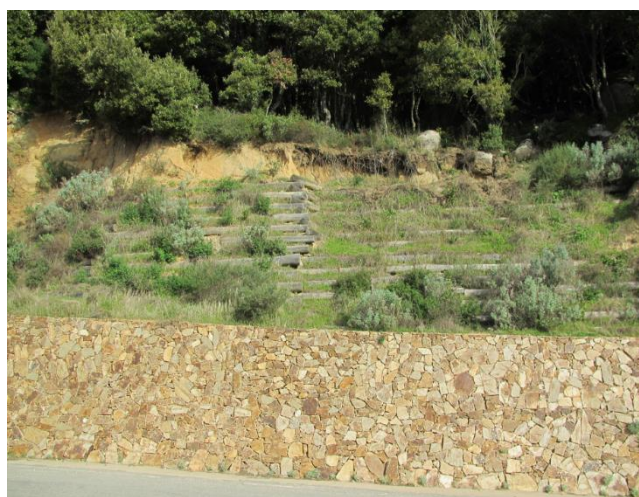


Figura 3.54 Fasi di montaggio di uno dei tipi della palificata loricata sec. Cornellini

(disegno di Marrone E.).



*Figura 3.55 Palificata loricata Roseto degli Abruzzi 2010, durante i lavori a sinistra ed a fine lavori a destra (foto Crocetti C.).*



*Figura 3.56 Palificata loricata a Nuoro: in alto a sinistra durante i lavori (2010), in alto a destra fine lavori (prima della piantagione), in basso sua evoluzione (2014) (foto di Di Pietro).*

### Voce di capitolato Palificata *loricata*

Consolidamento di scarpate instabili con palificata *loricata* costituita da:

- struttura di supporto frontale in acciaio non zincato costituita da profilati scatolari completi di supporti dei tronchi, collegati ad una piastra di ancoraggio tramite uno o più tiranti. La lunghezza dei montanti verticali può essere di 2 o 2,5 m. con sviluppo in altezza di 1,73 o 2,16 m., data la inclinazione del fronte di 60°, o misure diverse in funzione degli obiettivi progettuali;
- sistema di vincolo dei tronchi con catena ancorata ai montanti frontali;
- n. 1 piastra di ancoraggio in acciaio o calcestruzzo, dimensioni minime 75x75 cm. e comunque da valutarsi in base ai parametri geotecnici;
- n. 6 tronchi in castagno o larice scortecciato, od altra specie equivalente, con diam. 16/20 cm, lunghezza cm 300 per strutture con montanti verticali lunghi 2 m;
- n. 8 tronchi idem c.s. lunghezza 4 m. per strutture con montanti verticali lunghi 2,5 m;
- arbusti autoctoni in ragione di 3/ml. per strato di tronchi o talee di specie autoctone con capacità di riproduzione vegetativa in ragione di 6-8/ml. per strato di tronchi;
- il riempimento con l'inerte terroso eventualmente ammendato o miscelato con terra di coltivo avverrà per strati contestualmente alla posa degli arbusti radicati o delle talee;
- le talee dovranno sporgere per circa 10-12 cm. ed arrivare nella parte posteriore fino al terreno in posto.



Figura 3.57 Palificata *loricata* (PS) nel 2011 e 2014 (foto Marrone E.).



Figura 3.58 Versione della loricata realizzata in Spagna (foto Sorolla)

### **Bibliografia Par. 3.3.1**

CORNELINI P., 2001, “La palificata viva ROMA, una nuova tipologia di Ingegneria Naturalistica”. Acer n. 1

CORNELINI P., 2007, “La palificata latina”. Acer n. 6

CORNELINI P., 2009, “La nuova palificata viva loricata”. Acer n. 2

CORNELINI P., SAULI G., 2015, “Compendio di Ingegneria Naturalistica”. A cura di Regione Lazio

### **3.3.2 Rinforzo del rinforzo radicale ( $R^3$ ) (F. Preti)**

Quando le strutture di Ingegneria Naturalistica in legname sono realizzate hanno una loro resistenza globale ed interna garantita dal loro dimensionamento e dalle proprietà meccaniche del legname e delle chiodature metalliche, che devono garantire un aumento del fattore di stabilità del versante o scarpata o sponda. Una volta degradato il legname si fa affidamento alla resistenza esercitata dalle radici delle piante che si saranno sviluppate (per talee o da piante radicate) nel terreno all'interno della struttura (opere vive), Il dimensionamento a volte richiede anche la presenza di fittoni e/o tiranti metallici che non si degraderanno, ma i collegamenti solo ai tronchi di legname non sono garantiti dopo la degradazione del legno stesso. D'altra parte, le radici non è detto che si sviluppino a profondità e per spessori superiori a quelli fisiologici e all'esterno del “cassone” in legname. Si rende

quindi necessario un sistema per collegare ai tiranti e ai fittoni necessari, prima le strutture in legno e, dopo la loro degradazione, la porzione interna di terreno radicato, con fascioni e cavi (Figura 3.59).

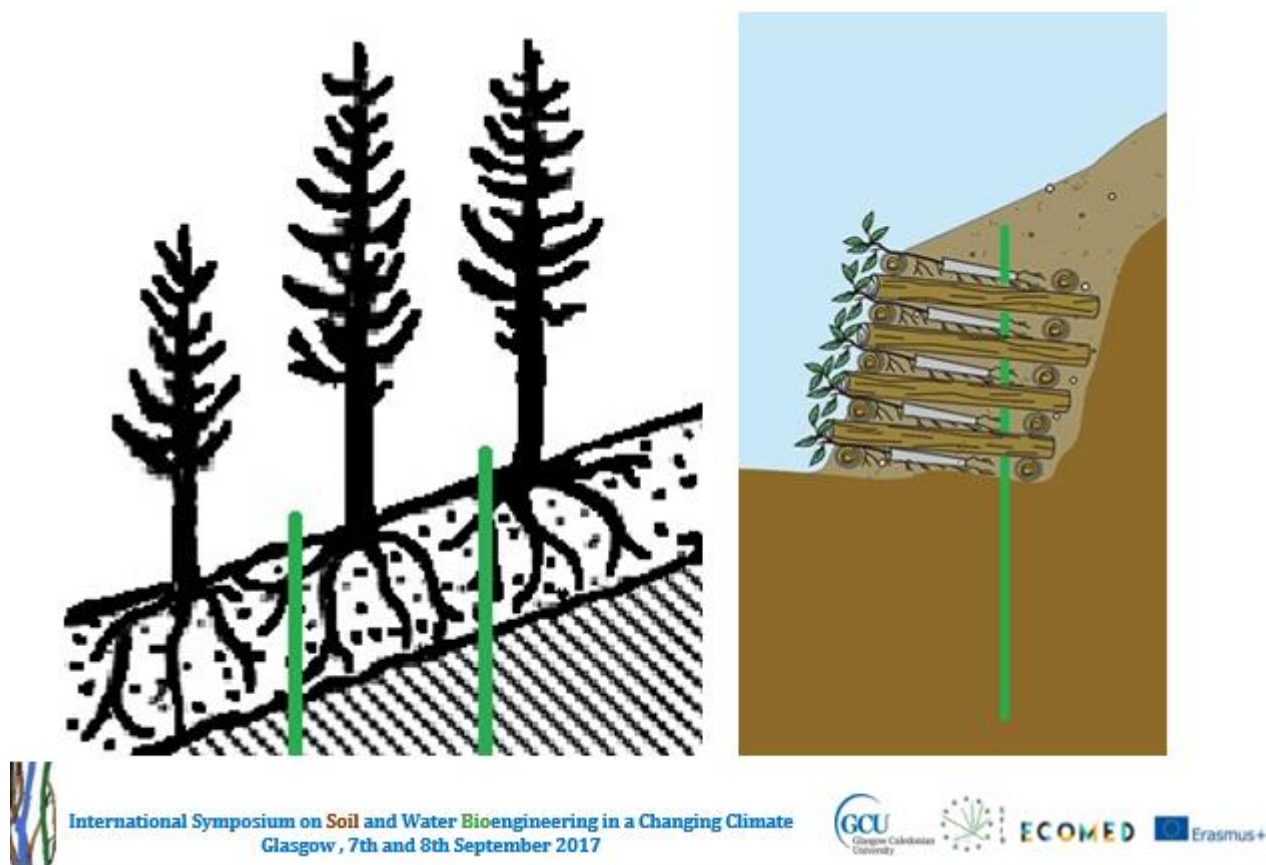
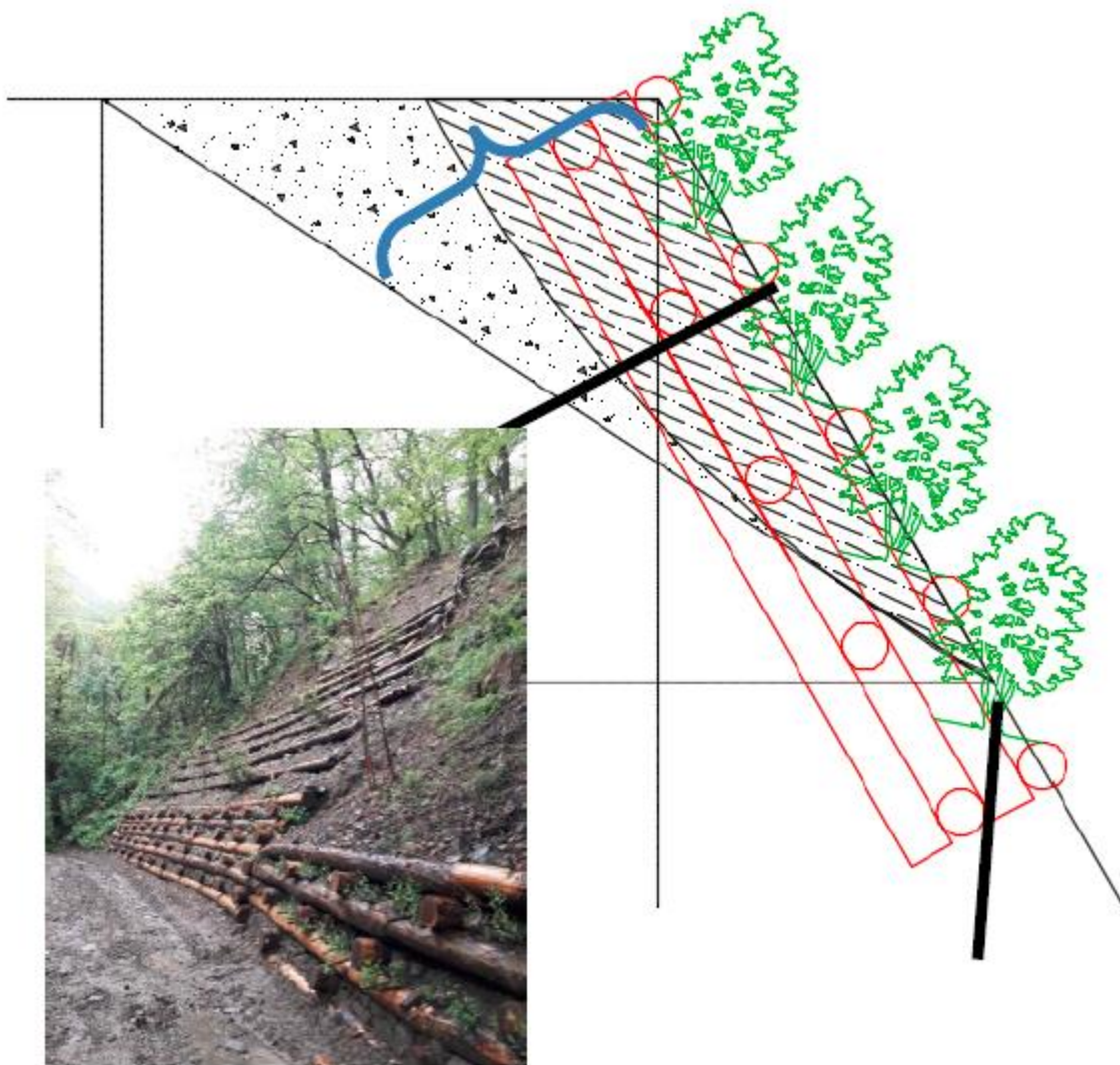


Figura 3.59 Schemi di test dell'estensione del rinforzo radicale a profondità maggiori (tesi dottorato Yamuna Giambastiani).

La durata delle opere di Ingegneria Naturalistica è legata al passaggio dalle funzioni garantite prima dalle proprietà meccaniche legname e poi da quelle biotecniche delle piante: una soluzione per migliorare l'effetto di stabilizzazione e consolidamento di opere di Ingegneria Naturalistica è quella di ottenere il "rinforzo del rinforzo radicale" (Reinforced Root Reinforcement,  $R^3$ ), ovvero di un sistema per collegare a tiranti e fittoni prima le strutture in legno e, dopo la loro degradazione, la porzione interna di terreno radicato, con dispositivi oggetto di studi incorso da parte del sottoscritto presso il DAGRI.

L'innovazione è quella di sfruttare la resistenza alla compressione del terreno correlata alla coesione e/o quello di materassi/reti in aderenza vive (radici di arbusti o talee in superfici e radici fittonanti o picchetti o tiranti inglobati dalla coltre/zolla vegetata) (Figura 3.60).



*Figura 3.60 Nella porzione con distanza maggiore tra vegetazione e superficie di scorrimento potrebbe essere necessario l’inserimento di piante radicate o l’installazione di picchetti o tiranti (utili anche in fase di montaggio e in futuro per estendere l’effetto delle radici a distanza maggiore).*

### 3.3.2.1 Strutture prefabbricate, pieghevoli e trasportabili (Preti)

Le sistemazioni di sponda e di versante realizzabili con l’Ingegneria Naturalistica, se da un lato permettono una migliore riqualificazione e una più rapida rinaturalizzazione delle aree colpite da dissesto, presentano pur sempre la caratteristica di essere opere sito-specifiche, costruite direttamente in loco e di conseguenza adeguate alle caratteristiche locali. Questa importante capacità di adattamento rende difficile la replicabilità delle strutture in una forma che ne renda agevole la progettazione. Una soluzione intermedia tra la realizzazione di strutture “artigianali” e l’omologazione, che sembrerebbe impossibile senza perdere il carattere di naturalità richiesto a questo tipo di strutture, viene ottenuta con strutture modulari.



## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Di recente sono state proposte strutture prefabbricate e pieghevoli che potrebbero agevolare le operazioni di trasporto e messa in opera, rendendo più accessibili le operazioni di stabilizzazione di versante e in alveo.

Il Dipartimento DAGRI dell'Università degli Studi di Firenze da alcuni anni porta avanti una sperimentazione mirata a verificare l'applicabilità di strutture prefabbricate e ripiegabili e trasportabili per le sistemazioni con ingegneria naturalistica. I primi risultati sono incoraggianti, mostrando valori di resistenza paragonabili alle strutture classiche e un'elevata plasticità di utilizzo, a fronte di una semplice progettazione degli interventi. Strutture più elaborate sono state realizzate ed altre sono in fase di realizzazione (<https://www.evintechsrl.it/wooden-blocks-gallery/>).

Si tratta di intelaiature in cui la paleria è collegata da barre filettate verticali passanti che sostituiscono i classici tondini ad aderenza migliorata e consentono la possibilità di ripiegamento delle strutture. I pali vengono forati con apposite dime e i moduli vengono pre-assemblati; la stabilità della struttura non è in questo caso garantita dall'attrito tra il tondino e la superficie interna del foro nel legno, bensì dalla presenza di dadi che vengono stretti al momento della messa in opera (*Menegazzi e Palmeri 2013*). Apposite piastre in acciaio, sagomate in maniera da adeguarsi alla superficie dei pali, ripartiscono il carico dei dadi. Le strutture più semplici realizzate con questa tecnica hanno forma parallelepipedoidale e dimensioni ridotte (pali in castagno di 10÷13 cm – sebbene sia possibile utilizzare paleria fino a 38 cm – di diametro, 2.5 x 1.25 m di base per 0.8÷1.2 m di altezza, barre filettate di 10 mm di diametro), risultando per questo quasi paragonabili come modalità d'impiego ai gabbioni di rete a doppia torsione, sebbene con caratteristiche di Ingegneria Naturalistica e prezzi concorrenziali. Il primo evidente vantaggio di questo tipo di struttura è quello della praticità di impiego.

La ripiegabilità consente un agevole caricamento delle strutture su carrelli o autotreni, e la leggerezza fa sì che con un miniescavatore sia possibile posizionare la struttura dopo aver lavorato il fondo con la contropendenza desiderata. Di contro, la ridotta sezione della paleria implica un limite nella durabilità dei moduli; applicando i risultati di analisi condotte sul degradamento del legname in opere di ingegneria naturalistica sull'Appennino toscano (*Guastini e Preti 2013*), la vita utile di questo tipo di strutture può essere stimata dai 12÷15 anni per l'utilizzo di paleria più minuta fino ai 30÷35 (45) per i moduli realizzati con paleria di diametri superiori.

Analoghe strutture, ma a sezione trapezia sono state realizzate nell'ottica di facilitare l'inserimento e l'attecchimento della porzione viva. Il fronte a valle in questo tipo di modulo ha una pendenza di 66°, più favorevole per l'inserimento della parte viva secondo gli schemi classici.

I collegamenti da un modulo all'altro sono realizzati con quattro tondini (proporzionati ai diametri) passanti nei traversi e ribattuti alle estremità.

Le barre filettate utilizzate, come già detto, non generano attrito sul legno, essendo inserite in fori che non ne pregiudicano la mobilità. La sollecitazione cui sono sottoposte dal momento in cui l'opera è posizionata è di taglio puro, in opposizione alla spinta del terreno che si scarica sugli elementi della palificata (Cornelini e Preti 2005). Al momento del serraggio dei dadi, la pressione viene trasferita agli elementi lignei attraverso le piastre di ripartizione del carico; a differenza delle strutture tradizionali in questo caso la paleria è soggetta ad attrito nei punti di giunzione, e questo va a diminuire la sollecitazione a taglio a carico delle barre filettate. Da calcoli condotti presso il dipartimento DAGRI, l'acciaio delle barre filettate è sufficiente che appartenga alla classe di resistenza 4.8 (ISO 898 2009); il fatto che si tratti di un materiale abbastanza comune nelle forniture contribuisce a mantenere concorrenziale il prezzo delle strutture. Sempre a proposito delle giunzioni, la resistenza a taglio del legno è verificata nelle opere tradizionali per valori di resistenza a rottura misurati in laboratorio (fonte DAGRI), ma non per quelli previsti dalla normativa UNI 11035 2010; l'utilizzo delle piastre di ripartizione di carico, e la conseguente attivazione di attrito tra elementi lignei (UNI EN 384, 2004) consente di garantire una sollecitazione a taglio compatibile con le indicazioni della norma UNI.

I calcoli sono stati effettuati considerando il terreno di riempimento in condizioni di saturazione (condizione peggiore e difficilmente raggiungibile in condizioni reali) e paleria con caratteristiche paragonabili a quelle del materiale utilizzabile normalmente in questi contesti (non si tratta di legname selezionato secondo gli standard applicati alle costruzioni).

La produzione degli elementi modulari può basarsi sull'utilizzo delle risorse forestali e della manodopera locali, sviluppando una filiera e attività anche nei periodi non idonei alla realizzazione di interventi di IN.

La modularità della soluzione consente applicazioni anche non lineari. Curvature sul fronte di intervento, in modo da seguire in maniera più fedele l'andamento del versante, possono essere facilmente realizzate lasciando parzialmente chiuse le strutture. Secondo calcoli condotti facendo riferimento all'approccio presentato dalla Regione Lazio (Menegazzi e Palmeri 2013), nella struttura non completamente aperta l'angolo tra corrente e trasverso può essere ridotto da 90° a 60° senza compromettere la stabilità della struttura (slittamento, ribaltamento e schiacciamento restano verificati).

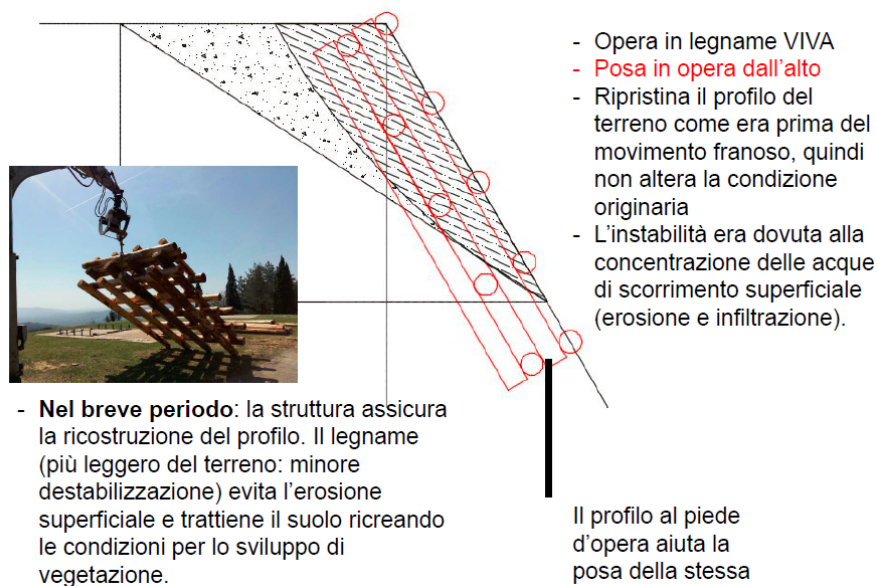
Altra applicazione è quella che prevede il parziale sormonto delle strutture, creando una sistemazione a più ordini, tipica dell'utilizzo di gabbioni; con tale disposizione è possibile compensare a livello complessivo la scarsa inclinazione del fronte di valle dei singoli moduli parallelepipedoidali, altrimenti dipendente solo dall'inclinazione della contropendenza data al piano di appoggio. Debita verifiche per la resistenza a schiacciamento sono state condotte attraverso calcoli teorici, e stime

## I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

cautelative garantiscono le strutture per un sovraccarico pari alla metà del proprio peso. La realizzazione di elementi di lunghezza dimezzata per le strutture di maggiori dimensioni (2.5 m di lunghezza) consente la disposizione a cortina dei singoli moduli, sfalsando i punti di giunzione e quindi garantendo una maggiore stabilità complessiva.

Su banchine e rilevati stradali o ferroviari può essere assai interessante l'utilizzo di doppie grate da calare dall'alto con un escavatore (

Figura 3.61).



### Evoluzione temporale

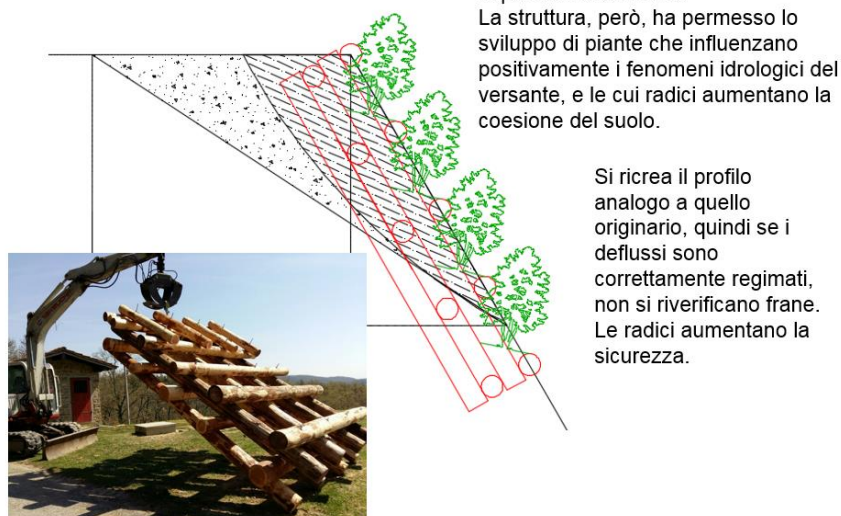


Figura 3.61 Schema di doppia grata viva prefabbricata e pieghevole con evoluzione temporale; un miniescavatore è sufficiente per la movimentazione e posizionamento.

La realizzazione di forme più complesse, quali quelle di briglie in legname e pietrame, è ad oggi nella sua fase preliminare. Non di poco conto il vantaggio di poter posizionare una struttura pre-assemblata direttamente nell'alveo (ritoccato con escavatore), evitando tutte le problematiche correlate alla deviazione della corrente e al lavoro degli operai in un'area almeno parzialmente allagata.

Altre soluzioni sono in fase di sviluppo per ridurre i quantitativi di legname (Figura 3.62).



Figura 3.62 Palificata pieghevole Firenze.

In ultima analisi, le strutture pre-assemblate sembrano presentare interessanti possibilità di applicazione per sistemazioni di versante e di corsi d'acqua, principalmente legate alla praticità di trasporto e collocamento, a fronte di una stabilità paragonabile a quella delle opere tradizionali e una modularità che permette di immaginare sistemazioni articolate, a fronte di costi in alcuni casi concorrenziali.

***Bibliografia Par. 3.3.2***

Cornelini, P., Preti, F., 2005 – Elementi di geotecnica applicata all’I.N.: aspetti generali, criteri di dimensionamento e verifiche di stabilità, Manuale di I.N. della Regione Lazio, vol. 2, cap. 10

Menegazzi G., Palmeri F., 2013 – Dimensionamento delle opere di ingegneria naturalistica – aspetti innovativi e verifiche preliminari. Assessorato per l’Ambiente Dipartimento Ambiente e Protezione Civile, Regione Lazio

Giambastiani Y.; Approccio multidisciplinare per l’analisi della distribuzione radicale delle piante con metodologie indirette e non distruttive; Università degli Studi di Firenze; 2017

Guastini, E., Preti, F. (2013) – Monitoring of live and woody elements, EGU General Assembly 2013, Wien, Geophysical Research Abstracts Vol. 15, EGU2013-12472

Guastini, E., Brucalassi F., Mazzanti L., Preti F., *Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*, Sherwood.

Brucalassi, E. Guastini, L. Mazzanti, F. Preti, Novel solutions for soil and river bioengineering: prefabricated and folding frameworks, 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE SOIL BIO- AND ECO-ENGINEERING: THE USE OF VEGETATION TO IMPROVE SLOPE STABILITY Sydney, Australia, 11 – 14 July 2016 SBEE67

<https://www.evintechsrl.it/wooden-blocks-gallery/>

***Normativa di riferimento***

ISO 898, 2009 – Classi di resistenza per elementi di collegamento. International Organization for Standardization

UNI 11035, 2010 – Legno strutturale - Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica. Ente Nazionale Italiano di Unificazione

UNI EN 384, 2004 – Legno strutturale - Determinazione dei valori caratteristici delle proprietà meccaniche e della massa volumica. Ente Nazionale Italiano di Unificazione

***3.3.3 Le rotofascine modulari (RFM): un esempio di economia circolare nell’Ingegneria Naturalistica (F. D’Asaro, R. Calvo, G. Pirrera, S.S. Palermo, G. Baiamonte)***

***3.3.3.1 Premesse***

Si presenta un’idea progettuale nel campo delle opere di Ingegneria Naturalistica (IN) basata su una serie di principi quali:

- 1) il riutilizzo di materiali di scarto e la loro immissione nel ciclo produttivo;
- 2) l'uso di risorse rinnovabili;
- 3) l'ecosostenibilità e l'adeguatezza ambientale dell'opera IN proposta.

Questi punti rappresentano proprio i canoni dell'Economia Circolare (sistema economico che può rigenerarsi da solo garantendo l'ecosostenibilità) che vengono applicati nella realizzazione di un'opera di IN. Ovviamente, non sarà sviluppato il tema economico ma quello costruttivo di un'opera di IN che si inquadra perfettamente nello spirito di questo approccio economico così attuale e diremmo oggi ormai indispensabile per una crescita sostenibile nel rispetto dell'ambiente.

L'elemento base dell'opera proposta è una versione moderna della fascina che, come ben noto, è la raccolta di rami di piccola dimensione, di origine antichissima. L'intervento descrive l'idea posta a base del progetto di manufatto e la susseguente realizzazione di prototipi dell'opera IN brevettata dall'Università di Palermo.

Il processo realizzativo è coerente con le politiche economiche dell'Unione Europea, per le quali l'economia è circolare quando un sistema conserva il più a lungo possibile il valore dei prodotti, dei materiali e delle risorse economiche, implementando il riutilizzo, la riparazione, la rigenerazione o il riciclaggio dei prodotti e riducendo di conseguenza la produzione di rifiuti.

Coerente anche con *“Il Green Deal europeo”* che vuole tendere a costruire un modello economico che oltre ad essere sostenibile, crei opportunità e riduca l'inquinamento climatico. È parte di questi obiettivi una *“politica dei prodotti sostenibili”* che riduca in modo significativo i rifiuti e laddove non sia possibile, ne recuperi il valore economico, azzerandone o minimizzandone l'impatto sull'ambiente e i cambiamenti climatici.

Un approccio questo che rispetta inoltre il principio DNSH (*Do No Significant Harm*) previsto dal Regolamento (UE) 2020/852, del 18 giugno 2020, relativo all'istituzione di un quadro (Regolamento Tassonomia) che favorisce e definisce *“investimento sostenibile”* le attività economiche che contribuiscono a raggiungere un obiettivo ambientale e/o un obiettivo sociale, a condizione però che tali investimenti *“non arrechino un danno significativo”*.

Per il manufatto proposto si tiene conto del ciclo di vita dei sarmenti e dei servizi forniti dalle attività vitivinicole senza arrecare un danno significativo ai sei obiettivi ambientali contemplati nel regolamento Tassonomia, ovvero: a) alla mitigazione dei cambiamenti climatici; b) all'adattamento ai cambiamenti climatici; c) all'uso sostenibile e alla protezione delle acque e delle risorse marine; d) all'economia circolare, compresi la prevenzione e il riciclaggio dei rifiuti; e) alla prevenzione e alla riduzione dell'inquinamento dell'aria, dell'acqua o del suolo; f) alla protezione e al ripristino della biodiversità e degli ecosistemi.

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Quindi utile e soprattutto DNSH in coerenza per l'utilizzo dell'Ingegneria Naturalistica come "Investimento sostenibile" per le misure del PNRR (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza) dei Paesi dell'Unione Europea.

È dunque questo il contesto in cui vanno lette ed interpretate le norme europee ed italiane sui sottoprodotti dell'economia circolare.

### *3.3.3.2 Il brevetto di opera di stabilizzazione*

Il brevetto dell'opera IN di stabilizzazione, più avanti descritto, riguarda essenzialmente il metodo e i materiali da costruzione utilizzati per la realizzazione dell'opera stessa. Più precisamente viene avanzata una tecnica innovativa che prevede la formazione di elementi modulari costruttivi, realizzati con materiali organici di scarto a basso costo, ed il sistema di montaggio per la formazione dell'opera. La metodologia costruttiva e l'ingegnerizzazione del processo è oggetto del brevetto di invenzione industriale n. 102017000141369 del 27/02/2020 depositato dall'Università degli Studi di Palermo.

#### ***L'idea base***

La ricerca sul riuso di materiali organici di scarto nel campo dell'Ingegneria Naturalistica, effettuata nell'ambito delle attività dell'insegnamento "Tecniche di Ingegneria Naturalistica" (Prof. F. D'Asaro - 2007/2017, Dipartimento SAAF dell'Università di Palermo), ha portato alla messa a punto della tecnica di costruzione per moduli di una fascinata (*Calvo, 2018a*).

L'idea di base del brevetto consiste nel recupero di materiali organici di scarto delle lavorazioni agricole che, attraverso il riciclo nel manufatto di IN, individuano una nuova destinazione d'uso, non interrompendo il loro ciclo energetico e produttivo. Nel contempo, biomasse spiaggiate, opportunamente trattate, sono destinate alla costituzione del substrato di coltivazione per la crescita di specie autoctone nel corpo dell'opera. I residui di potatura della vite, ovvero i sarmenti, e *Posidonia oceanica* spiaggiate (Figura 3.63) costituiscono le due biomasse impiegate nell'invenzione che, rappresentando rispettivamente uno scarto di produzione agricola (sarmenti) ed un rifiuto solido (*P. oceanica*), inquadrano il loro impiego:

- in un uso efficiente delle risorse (riuso sostenibile);
- nel risparmio economico ed energetico, nel pieno rispetto dell'ambiente.

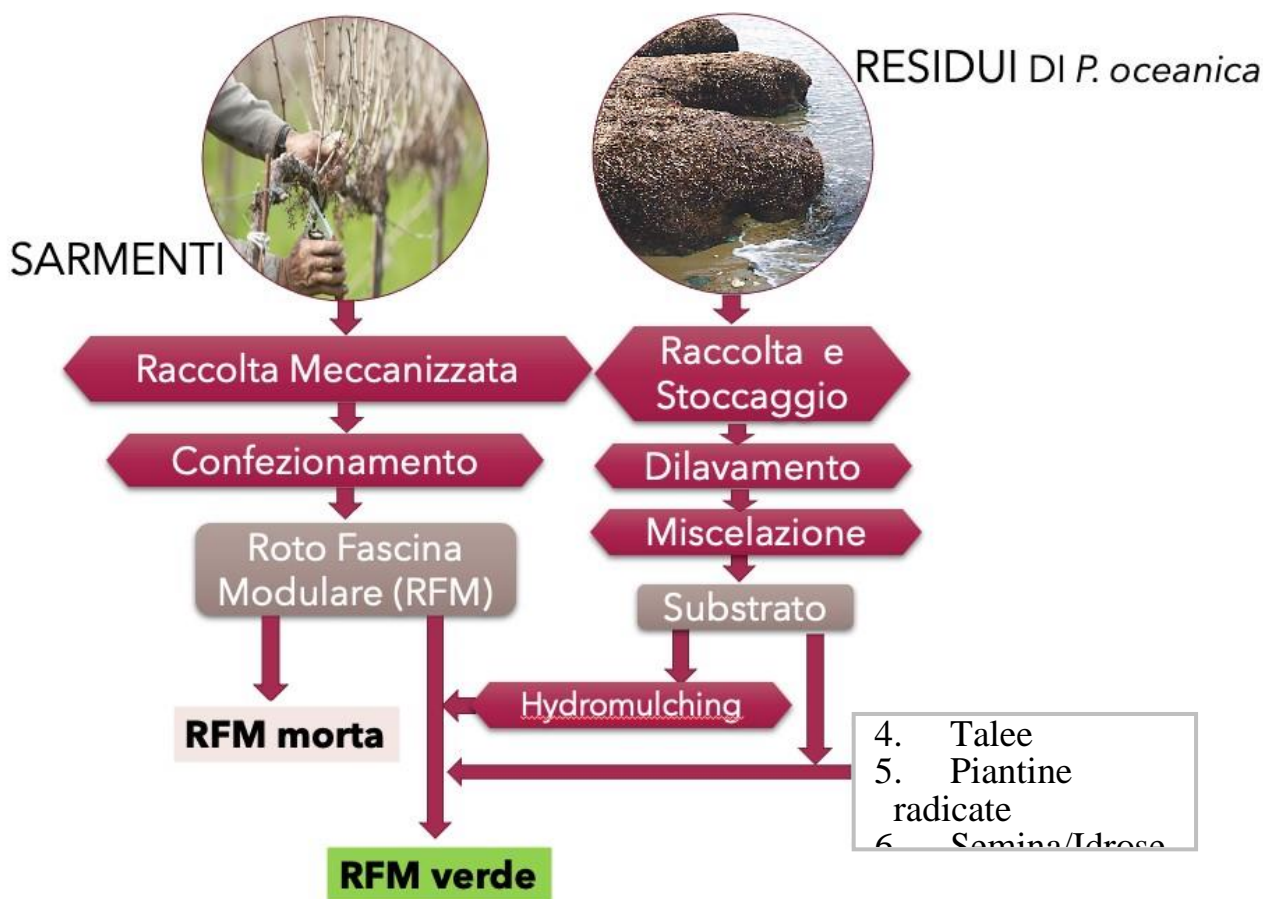


Figura 3.63 Idea base per la costituzione delle Roto Fascine Modulari (RFM).

L'elemento base dell'opera (modulo) è una fascina di sarmenti assemblata meccanicamente con macchine agricole specializzate ed attualmente in commercio. L'assemblaggio meccanico dei moduli, che prendono il nome di rotofascine modulari (RFM), comporta il miglioramento del processo di produzione, rispetto alle opere tradizionali (fascine), traducendosi in un aumento della produttività e ad un contenimento dei costi e dei tempi di costruzione, rispetto a manufatti alternativi di pari finalità. Il nuovo prodotto, realizzato con materiali di scarto locali e rinnovabili, risponde alla crescente richiesta del mercato in tema di difesa e salvaguardia del territorio, contro un quadro di offerta di analoghi manufatti di importazione e di costo più elevato (ed es. biorulli in fibra di cocco, etc.).

#### ***I sarmenti come materiale da costruzione dell'opera***

Il materiale di scarto utilizzato per la realizzazione dei moduli di fascine sono i residui di potatura della vite o, sarmenti. Il materiale presenta vantaggiosamente tutti i caratteri di eco-compatibilità: ha un costo praticamente nullo, ed è un materiale rinnovabile ogni anno e di facile reperibilità nel territorio nazionale. Il riuso di questo materiale ligneo, in alternativa alla sua bruciatura, o all'interramento o al suo conferimento in discarica, costituisce un notevole vantaggio sia dal punto di



## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

vista ecologico che economico. Analisi sulle caratteristiche meccaniche dei sarmenti, volte a testare resistenza e durabilità del materiale, hanno mostrato valori delle tensioni di rottura variabili da 35 a 55 MPa in dipendenza della cultivar.

Fondamentale per la produzione del manufatto è la grande disponibilità territoriale di tale materiale soprattutto in Sicilia, ma anche nella più estesa area europea e mediterranea.

In particolare, nel panorama vitivinicolo nazionale la Sicilia gioca da sempre un ruolo fondamentale, specie in termini quantitativi, essendo la regione con la maggior superficie vitata del paese, e con una conseguente alta produzione di biomassa annuale.

### ***Uso dei residui spiaggiati di *Posidonia oceanica* come substrato di coltivazione***

I residui di *P. oceanica*, preventivamente dilavati, saranno utilizzati, secondo brevetto, per costituire il substrato di coltivazione dei moduli di sarmenti, in sostituzione del terreno vegetale. I moduli (RFM), confezionati a bassa densità, consentono infatti il loro riempimento con un substrato di coltivazione preseminato costituito da una miscela di *P. oceanica* spiaggiata, residui vegetali organici compostati e una miscela di semi autoctoni.

Lo spiaggiamento dei residui di *P. oceanica* è un fenomeno naturale che annualmente si rileva in tutti i paesi bagnati dal Mar Mediterraneo e rappresenta pertanto, una elevata fonte rinnovabile di biomassa. L'uso delle spiagge a scopo turistico attualmente comporta la rimozione di questi residui, percepiti negativamente dai bagnanti e dagli stabilimenti balneari a causa dei possibili fenomeni degradativi. La loro rimozione, quindi, comporta quindi un triplice vantaggio: la fruizione della spiaggia, la risoluzione del problema dello smaltimento dei residui e la creazione di nuovi prodotti locali ed a basso costo, riutilizzabili nel campo del risanamento ambientale.

La formazione di uno strato di terreno "sintetico" fertile utile per l'attecchimento e lo sviluppo della vegetazione all'interno delle RFM, preserva al contempo le risorse naturali non rinnovabili, in un territorio colpito dal crescente fenomeno della desertificazione.

Inoltre, l'elevato grado di porosità dei residui riduce il fenomeno dell'asfissia radicale, consentendo un buon drenaggio (*Baiamonte et al, 2019*) e creando le condizioni ottimali per l'attecchimento della vegetazione (*Calvo, 2018b*).

### ***Costituzione della Fascinata***

L'opera lineare di IN sarà realizzata collegando i moduli RFM con un sistema di montaggio che renderà solidale la struttura. Questo consentirà alla fascinata risultante, nella fase iniziale di pre-inverdimento, di sostenere la spinta delle terre del riempimento di monte. Il collegamento avverrà con cavi tessili o metallici passanti longitudinalmente all'interno o esternamente alle RFM ed in fase di montaggio sarà possibile una lieve precompressione per aumentare la coesione degli elementi. La

fascinata, così collegata e vincolata su punti discreti al terreno, aumenterà il proprio grado di resistenza meccanica e di reazione alla spinta da tergo, aumentando la propria strutturalità (Figura 3.64).

Uno schema di calcolo possibile potrebbe essere quello della fune su più appoggi (catenaria) ribaltando il piano di azione delle forze di 90°.

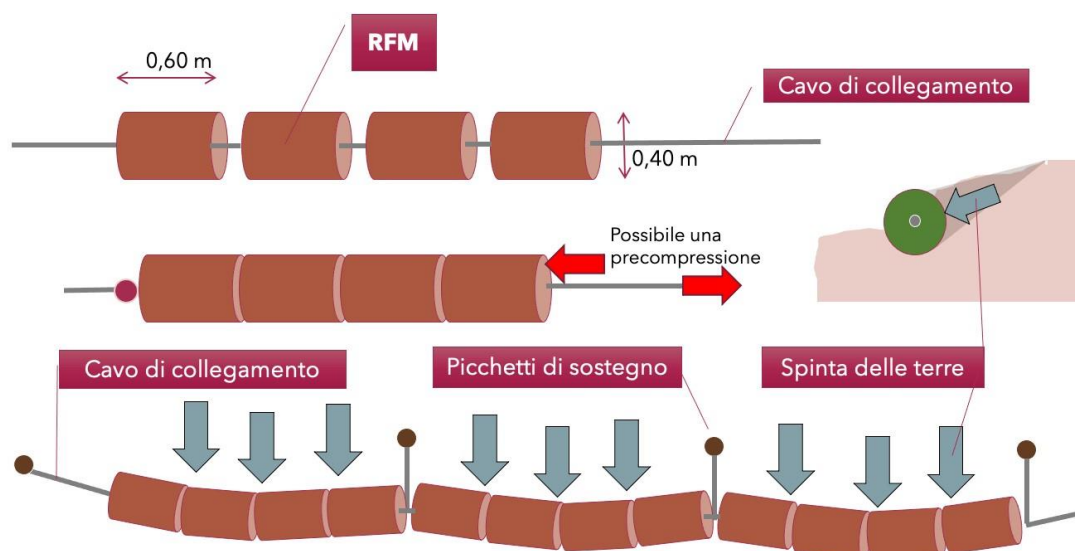


Figura 3.64 Schema fascinata costituita da RFM.

### 3.3.3.3 Realizzazione dei prototipi

#### **Progetto Jump-Poc Mise 2020**

Con DR 649 del 30/10/2020 della Scuola Superiore Sant'Anna, della Scuola Normale Superiore di Pisa, e dell'Università di Palermo, veniva pubblicato avviso di manifestazione di interesse rivolto al personale docente e ricercatore strutturato presso i tre Atenei, finalizzato all'attuazione di iniziative di Proof of Concept (PoC) nell'ambito del progetto JUMP (*Joint Universities' program for PoC*), finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico. Dal momento che la nuova tecnologia era stata soltanto formulata per via teorica, la proposta di progetto RiVite (Università di Palermo, RS G. Baiamonte), accolta in data 9/1/2021, si mostrò subito una valida occasione per l'auspicabile incremento del TRL (*Technology Readiness Level*) che, all'epoca della concessione del brevetto (n. 102017000141369 del 31/8/2021, inventori R. Calvo, F. D'Asaro, G. Baiamonte), era pari a 2. La realizzazione delle opere sopra descritte ha infatti consentito il raggiungimento del TRL 5, con la tecnologia dell'idea brevettuale che si è vista convalidata in campo. L'ulteriore incremento di sviluppo tecnologico che si attende a fine Progetto, previsto a giugno 2022, condurrebbe a TRL 7 (*Dimostrazione di un prototipo di sistema in ambiente operativo*).

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Il progetto RiVite finanziato dal MISE prevede quindi la progettazione dell'impianto sperimentale di prototipi dell'opera di IN, in linea con l'idea brevettuale, la sua realizzazione e il successivo monitoraggio al fine di evidenziarne l'efficacia.

Il team di lavoro è composto dai proponenti e dall'impresa co-finanziatrice Jonica 2001 Soc. Coop. ARL, con sede a Giarre (CT), che ha eseguito i lavori.

### ***Ambiente ed area di intervento***

I prototipi di opera di IN, sono stati realizzati in due aree limitrofe al Parco Regionale dell'Etna, aventi caratteristiche pedoclimatiche alquanto differenti (Figura 3.65).

Il primo sito oggetto di intervento, denominato A nel progetto, è ubicato nel comune di Nicolosi ad una quota di circa 670 m s.l.m. La temperatura media registrata è di circa 14°C, la temperatura del mese più freddo (febbraio) è di 3,4°C, la temperatura del mese più caldo (luglio) è di 30,2 °C. La piovosità media annuale è di circa 580 mm, con precipitazioni concentrate prevalentemente in inverno. Il mese più piovoso è gennaio con 83 mm. Per quanto riguarda il contesto territoriale, il sito si trova nelle vicinanze del centro abitato di Nicolosi, i terreni limitrofi sono per la maggior parte inutilizzati, mentre i terreni coltivati circostanti presentano come coltura in atto la vite e l'olivo. Inoltre, sull'area in oggetto è presente un vincolo idrogeologico. Il suolo presente nell'area risulta essere costituito essenzialmente da ghiaie e conglomerati a matrice sabbiosa, debolmente cementate, di colore giallastro, con sporadiche intercalazioni di sabbie e argille a stratificazione obliqua.

La vegetazione presente è tipica della macchia mediterranea e nello specifico vi sono anche diversi endemismi dell'Etna.

Le specie identificate nell'area sono: *Silene vulgaris* (Moench) Garcke, *Isatis tinctoria* L. subsp. *tinctoria*, *Achillea ligustica* All., *Echium vulgare* L. subsp. *pustulatum* (Sm.) Bonnier & Layens, *Centranthus ruber* (L.) DC. subsp. *ruber*, *Vicia villosa* Roth, *Linaria purpurea* (L.) Mill., *Micromeria graeca* (L.) Benth. ex Rchb., *Lupinus angustifolius* L., *Scrophularia canina* L., *Rumex scutatus* L. subsp. *aetnensis* (C. Presl) Cif. & Giacom., *Linaria multicaulis* (L.) Mill. subsp. *aetnensis* Giardina & Zizza, *Oloptum miliaceum* (L.) Röser & H.R. Hamasha, *Dactylis glomerata* L. *hispanica* (Roth) Nyman, *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., *Helichrysum italicum* (Roth) G.Don, *Euphorbia ceratocarpa* Ten., *Celtis australis* L., quercus, *Quercus coccifera* L., *Pistacea terebinthus* L., *Genista aetnensis* (Raf. ex Biv.) DC.

La seconda area oggetto d'intervento, denominata B, è ubicata nel comune di Giarre ad una quota di circa 320 m s.l.m. La temperatura media registrata è di circa 16°C, la temperatura media minima del mese più freddo (febbraio) è di 4,9 °C, la temperatura media massima del mese più caldo (agosto) è di 27,7 °C. La piovosità media annuale è di circa 1039 mm, con precipitazioni concentrate nel periodo autunnale. Il mese più piovoso è ottobre con 153 mm. Per quanto riguarda il contesto territoriale, il

sito si trova nelle vicinanze del centro abitato di San Giovanni, i terreni limitrofi sono per la maggior parte coltivati con colture arboree da frutto, nel terreno oggetto di intervento la coltura prevalente è l'avocado. Il terreno originatosi dalla disgregazione delle rocce vulcaniche di tipo basaltico o andesitico si presenta ricco di scheletro, sciolto, molto permeabile, di colore bruno più o meno scuro. Per quanto concerne la vegetazione, nell'area circostante è presente la vegetazione tipica del Parco dell'Etna.



Figura 3.65 a) Localizzazione siti di intervento; b) sito A (Nicolosi, CT), c) sito B (Giarre, CT).

### **Raccolta meccanizzata e costituzione delle RFM**

Secondo le linee di Brevetto gli elementi modulari che serviranno alla costruzione dell'opera di IN avranno origine dalla raccolta meccanizzata dei sarmenti. Nel progetto RiVite è stata utilizzata la rotoimballatrice per sarmenti QUICKPOWER 1230 della CAEB International operante su filari maggiori di 160 cm, capace di compiere l'intero ciclo di lavorazione:

- carico dei sarmenti in macchina (sino a 30 mm di diametro);
- legatura della balla con spago in fibra naturale;
- scarico automatico dal portello posteriore in pochi minuti (Figura 3.66).



Figura 3.66 a) Raccolta sarmenti e produzione RFM con rotoimballatrice CAEB, b) pesa delle RFM, c) RFM a bassa densità (100 kg/m<sup>3</sup>).

Le dimensioni della palla prodotta sono: 40 cm di diametro per un'altezza di 60 cm.

La macchina, trainata da un trattore MARS Pasquali 80.8, esegue la raccolta lungo filari di sesto 200x80 cm dove i residui di potatura vanno preventivamente disposti in senso perpendicolare alla direzione di moto della macchina. I sarmenti raccolti derivano da 3 cultivar tipiche dell'area etnea: Nerello mascalese (20 anni), Nerello cappuccio (16 anni), Carricante (4 anni).

L'imballaggio meccanizzato consente di aumentare notevolmente la densità apparente delle fascine che passa dai 40-80 Kg/m<sup>3</sup> della fascina tradizionale ai 100-300 Kg/m<sup>3</sup> della rotoballa (Tab. 3.3).

Agendo su un dispositivo che consente la regolazione della compressione nella camera di avvolgimento della rotoimballatrice, è possibile variare la densità apparente delle rotoballe appena raccolte (umide), come segue:

Tab. 3.3 Tabella delle Densità.

| Compressione | Densità apparente<br>[Kg/m <sup>3</sup> ] | Peso rotoballa<br>[Kg] |
|--------------|---|------------------------|
| max          | 300                                       | 24,0                   |
| 90%          | 281                                       | 22,0                   |
| 50%          | 182                                       | 14,6                   |
| min          | 96  | 7,7                    |

Tale possibilità consentirà di scegliere la densità più opportuna per effettuare un efficiente riempimento con materiale terroso che faccia da substrato di coltivazione per il rinverdimento della rotoballa. Le caratteristiche di produzione delle RFM rilevate durante la campagna di raccolta 2020, sono riportate in Tab. 3.4.

*Tab. 3.4 Dati di produzione delle RFM.*

| Velocità di raccolta<br>[RFM/ora] | Produzione<br>specificata [RFM/ha] | Peso medio<br>RFM umide<br>[Kg] | Peso medio<br>RFM secche<br>[Kg] |
|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 14                                | 48                                 | 20 (Nerello)<br>25 (Carricante) | 10 (Nerello)<br>12 (Carricante)  |

Subito dopo la raccolta il processo costruttivo delle opere prevede lo stoccaggio temporaneo delle RFM e la realizzazione del sistema di collegamento degli stessi moduli. Dall'osservazione che le RFM tendono ad aprirsi e scompaginarsi con il procedere dell'essiccamento naturale e con il deterioramento del filo di juta, è scaturita la necessità di cerchiare le rotoballe con filo di ferro. Solo con questo provvedimento sarà possibile la successiva movimentazione e le operazioni di carico/scarico senza danneggiare i moduli. La predisposizione di due anelli disposti sul cerchiaggio su due punti diametralmente opposti che consente il passaggio di un cavo di collegamento, permette di realizzare un efficace sistema di giunzione delle RFM. Questa operazione di cerchiaggio determina la costituzione definitiva dell'elemento modulare. Il sistema permette collegamenti sia longitudinali (tra le RFM) che trasversali (dalle file di RFM a punti di bloccaggio intermedi) che tra file di RFM sovrapposte. I cavi di collegamento saranno fissati alle due estremità della fascinata (fila di RFM) o in punti intermedi a picchetti di tenuta tramite tendifili o arridatoi.

### ***I prototipi di fascinata***

Sono stati predisposti 4 prototipi che si diversificano per la struttura, la messa in opera e le modalità di collegamento delle RFM riproducendo diverse caratteristiche statiche dell'opera lineare IN di tipo stabilizzante. È stata sempre mantenuta un'altezza di opera inferiore al metro. Le due tipologie, denominate A1 e A2, sono state localizzate a monte dell'Azienda Serafica in Contrada Monpiliari a sud di Nicolosi, a quota 685 m s.l.m.. Le altre due tipologie, denominate B1 e B2, sono state disposte all'interno del Vivaio Emmanuele sito in Contrada Paoli (Giarre) a sud est dell'abitato di S. Alfio, a quota 320 m s.l.m. Entrambe i siti sono limitrofi alle aree protette del Parco Regionale dell'Etna. I prototipi A1 ed A2, disposti sullo stesso allineamento, lungo complessivamente 60 m, a bordo del

## I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

vigneto esistente, sono stati messi a protezione del piede di uno scavo di sbancamento di un versante acclive che ha permesso il recupero di un nuovo filare. Funzione statica specifica dei due prototipi è quella del sostegno e della stabilizzazione del piano di scavo. Il prototipo A1, lungo 30 m, di altezza complessiva fuori terra 80 cm, consiste in una palizzata con traversi di rinforzo e parete di chiusura formata da due file sovrapposte di RFM non collegate (Figura 3.67). La palizzata è costituita da picchetti di castagno di altezza 1 m fuori terra posti a distanza di 60 cm (un palo per RFM) collegati da un corrente a mezza altezza. I traversi, disposti a 50°, distano tra di loro 1,80 m. In questo schema le RFM non hanno alcuna funzione statica.

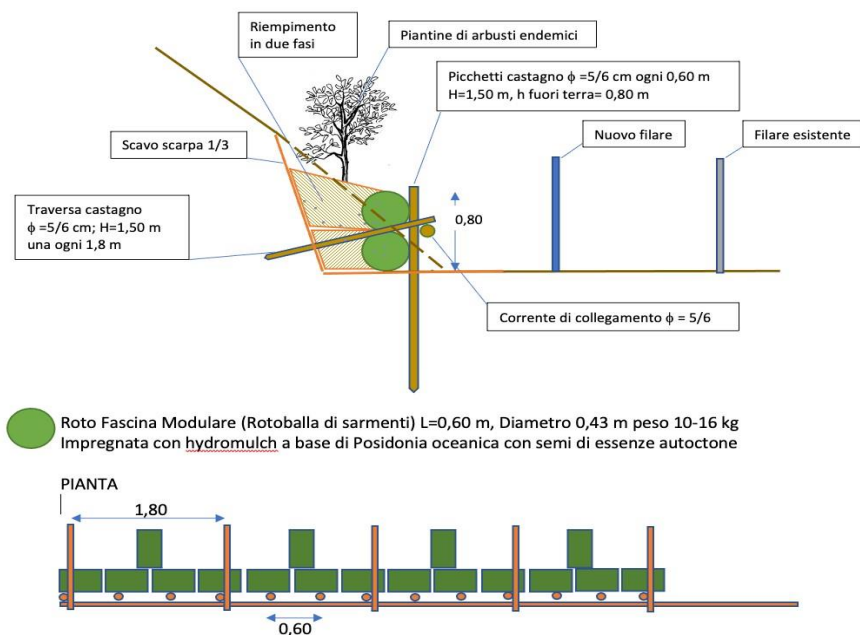


Figura 3.67 Schema di sezione tipo e pianta prototipo A1.

Il prototipo A2 prevede invece una piena funzione statica della fascinata costituita da due file sovrapposte di RFM (Figura 3.68). Le singole file sono collegate da due cavi di collegamento longitudinali, tirantati e fissati agli estremi e in punti intermedi dell'opera a picchetti metallici ad elica per vigneto. Il paramento frontale dell'opera è rinforzato da un cavo metallico che lega le due file sovrapposte con un andamento a zig zag. La struttura nel suo insieme reagisce alla spinta delle terre con il comportamento di una catenaria vincolata a punti discreti.

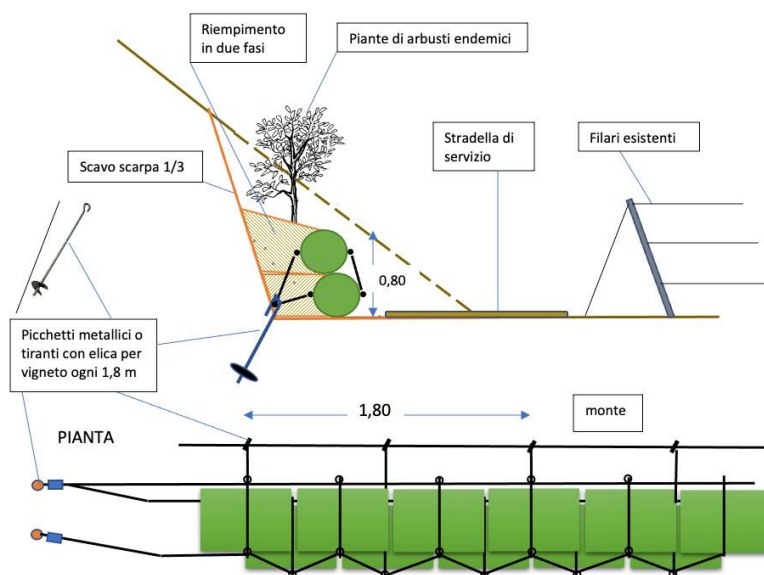


Figura 3.68 Schema di sezione tipo e pianta prototipo A2.

I prototipi B1 e B2, di minore estensione (4,2 m e 5,4 m), sono stati disposti lungo il ciglio superiore di un terrazzamento in corrispondenza di un muro di contenimento in pietra che ha ceduto in più punti. L'intervento è quindi di "sarcitura" del muro esistente ricostituendo due tratti mancanti.

Il prototipo B1 consiste in due gradoni realizzati da due fascinate di RFM a doppia altezza chiuse da rete metallica a maglia sciolta fissata a terra da picchetti metallici (Figura 3.69). I gabbioni risultanti sono sostenuti a valle da picchetti metallici 1 m fuori terra, posti a distanza di 0,60 m. Lo schema statico è un misto tra quello della terra armata e quello della gabbionata. Il dislivello complessivo dell'opera raggiunge 1,70 m per una larghezza dei gradoni pari a circa 2 m.

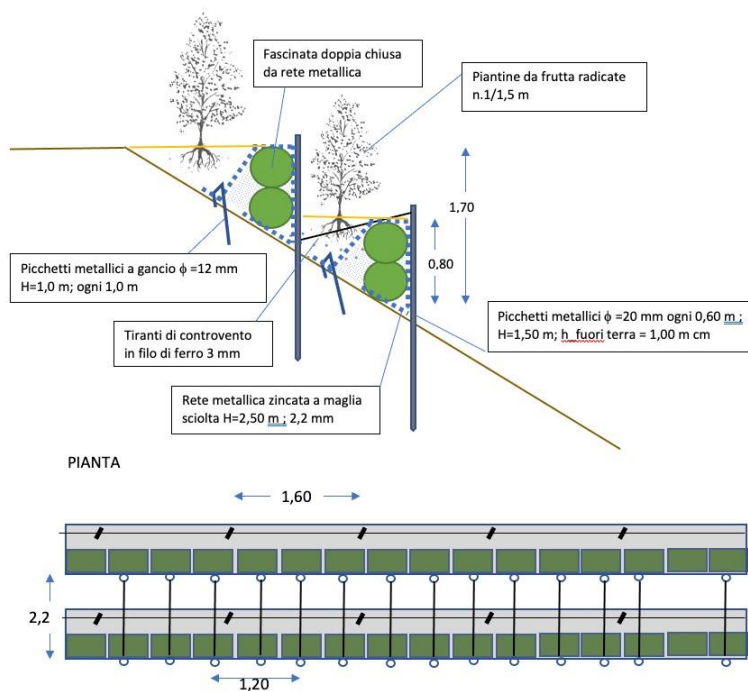




Figura 3.69 Schema di sezione tipo e pianta prototipo B1.

Il prototipo B2 si prefigura come una gradonata costituita da tre distinte file di RFM poste a distanza di 1,7 m lungo la pendice (Figura 3.70). Ciascuna fila viene collegata da due cavi correnti laterali vincolati a picchetti metallici agli estremi ed in punti intermedi. Il dislivello complessivo dell'opera raggiunge 1,5 m per una larghezza totale di circa 6 m.

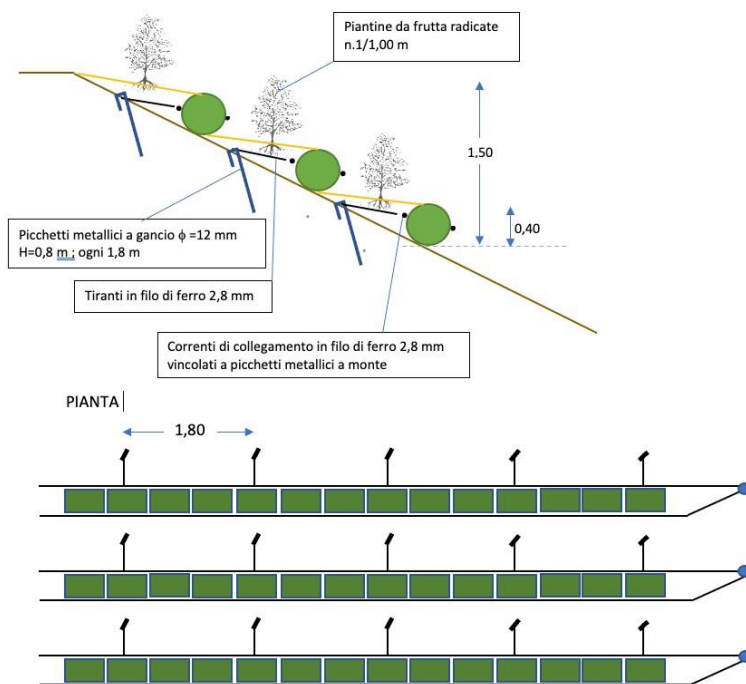


Figura 3.70 Schema di sezione tipo e pianta prototipo B2.

Previo intasamento delle roto fascine con una miscela di residui di *P. oceanica* spiaggiata e sostanza organica, tutti i prototipi saranno rinverditati sia in corrispondenza della fascinata di RFM che sul riempimento a tergo dell'opera.

Il piano sperimentale (Tab. 3.5) prevede quattro tipologie strutturali (A1, A2, B1, B2) due tratti di controllo (senza trattamento) o "bianchi" (A1.0, A2.0) e 9 tesi riguardanti il trattamento della fascinata. Due tesi sono distinte per la tipologia A1 (A1.1, A1.2), tre tesi per la tipologia A2 (A2.1, A2.2, A2.3), due tesi per la tipologia B1 (B1.1, B1.2) e due tesi per la tipologia B2 (B2.1, B2.2). La sperimentazione mira principalmente alla distinzione tra la semina naturalistica fatta con miscuglio di semi di piante autoctone e semina fatta con semi commerciali. Per la piantumazione del piano di riempimento dei prototipi A è previsto l'uso della vite e dello scornabecco che rappresentano una forte cucitura ambientale e paesaggistica tra l'opera e l'area produttiva. Nei prototipi B i piani di riempimento saranno piantumati con piante da frutto in armonia con la destinazione dell'area (vivaio).

Tab. 3.5 Piano sperimentale.

| Azienda          | Prototipi sito A (Serafica - Nicolosi) |                            |             |                        |                        |                        |  |                            | Prototipi sito B (Vivai Emmanuele-Giarre) |                            |                          |      |                            |                                  |      |           |           |
|------------------|--|----------------------------|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|--|----------------------------|---|----------------------------|--------------------------|------|----------------------------|----------------------------------|------|-----------|-----------|
| Codice prototipo | A1.0                                   | A1.1                       |             | A1.2                   | A2.1                   | A2.2                   |  | A2.3                       | A2.0                                      | B1.1                       | B1.2                     |      | B2.1                       | B2.2                             |      |           |           |
| Lunghezza [m]    | 6                                      | 12                         |             | 12                     | 6                      | 6                      |  | 12                         | 5   | 2,1                        | 2,1                      |      | 2,7                        | 2,7                              |      |           |           |
| Nella fascinata  | Bianco                                 | Semina Starter commerciale |             | Semina naturalistica 0 | Semina naturalistica 1 | Semina naturalistica 2 |  | Semina Starter commerciale | Bianco                                    | Semina Starter commerciale | Aromatiche (piantine in) |      | Semina Starter commerciale | Aromatiche (piantine in vassoio) |      |           |           |
| Sul riempimento  | Bianco                                 | Vite ad alberello          | Scornabecco | Scornabecco            | Scornabecco            | Scornabecco            |  | Vite ad alberello          | Scornabecco                               | Bianco                     | Melograno                | More | Noce                       | More                             | Noce | Melograno | Melograno |
| n. piante        |  | 6                          | 6           | 15                     | 8                      | 8                      |  | 6                          | 6   |                            | 6                        | 3    | 1                          | 9                                | 1    | 3         | 3         |

### Prototipo A1

Preliminarmente alla realizzazione del prototipo A1 è stato effettuato lo scavo a parete verticale, con mezzo meccanico al piede della pendice per ricavare lo spazio per un nuovo filare di viti (Figura 3.71). Quindi, le fasi costruttive sono state le seguenti:

- infissione dei pali (castagno  $\phi = 10$  cm) di sostegno frontale di altezza fuori terra 1 m, e interdistanza 0,60 m a mezzo di battipalo
- infissione dei trasversi e fissaggio del corrente di collegamento dei pali;
- posa della 1° fila di RFM non collegate
- 1° riempimento a tergo della 1° fila
- posa della 2° fila di RFM non collegate
- 2° riempimento a tergo della 2° fila



Figura 3.71 Messa in opera prototipo A1; a) scavo, b) realizzazione palizzata, c) opera finita.

### **Prototipo A2**

Anche per il prototipo A2, posto in prosecuzione dell'A1, è stato effettuato uno scavo a parete verticale per ricavare lo spazio della stradella di servizio al vigneto (Figura 3.72). Successivamente le fasi costruttive sono state le seguenti:

- predisposizione di picchetti metallici ad elica alle estremità del prototipo e in posizione intermedia, al piede dello scavo; passaggio di un cavo di collegamento tra i picchetti (cavo di sostegno);
- posa della 1° fila di RFM e loro collegamento longitudinale (con due cavi); i cavi di collegamento sono stati fissati ai picchetti di estremità e trasversalmente al cavo di sostegno ogni 4 moduli; predisposizione di spezzoni di filo di ferro fissati al cavo di sostegno per il successivo fissaggio ai cavi di collegamento della 2° fila di RFM;
- riempimento a tergo della 1° fila;
- posa della 2° fila di RFM e loro collegamento longitudinale e trasversale al cavo di sostegno;
- collegamento frontale delle due file sovrapposte con cavo passante a zig-zag;
- riempimento a tergo 2° fila.



Figura 3.72 Messa in opera Prototipo A2; a) allineamento e collegamento fascinata, b) tensionamento cavi, c) riempimento a tergo, d) opera ultimata.

### **Prototipo B1**

Alla pulitura dell'area di intervento, sono seguite le fasi costruttive seguenti (Figura 3.73):

- infissione picchetti metallici di sostegno frontale ( $h = 1$  m fuori terra) della fascinata di valle a due file sovrapposte;
- posa della rete metallica a maglie sciolte contro i picchetti di sostegno;
- disposizione di 1° e 2° fila di RFM sovrapposta;
- chiusura e picchettamento della rete;
- infissione di picchetti metallici di sostegno frontale ( $h = 1$  m fuori terra) della fascinata di monte a due file sovrapposte; tirantaggio delle teste dei picchetti di valle al piede dei picchetti di monte;
- riempimento a tergo della fascinata di valle;
- realizzazione della fascinata a due file sovrapposte di monte secondo la procedura su descritta;
- riempimento a tergo della fascinata di monte.



*Figura 3.73 Messa in opera Prototipo B1; a) infissione picchetti di sostegno, b) posa delle RFM nella rete, c) chiusura del sacco d) tiranti dei picchetti di valle e riempimento, e) posa fascinata di monte, f) opera finita.*

### **Prototipo B2**

Dopo la pulitura dell'area di intervento (Figura 3.74) si è proceduto con:

- la messa in opera di tre file di RFM poste a distanza di 3 m; ciascuna fila (fascinata) è connessa da cavi di collegamento (n.2) vincolati ai due estremi ed in punti intermedi; nel complesso viene costituita una gradonata;
- il riempimento a tergo delle 3 fascinate.



Figura 3.74 Messa in opera prototipo B2; a) posa dei primi due gradini, b) dettaglio dei cavi di collegamento e dell'ancoraggio, c) opera finita

### **Tempi di realizzazione**

Le squadre, costituite da 2 o 3 operai, hanno realizzato i 4 prototipi nell'arco di quattro giornate con il materiale occorrente a piè d'opera. Non è computata la fase di riempimento delle RFM con substrato di coltivazione, di semina e piantumazione. I tempi per metro di opera sono riportati in Tab. 3.6.

Tab. 3.6 Tempi di realizzazione per metro d'opera [ore/m]

|        | A1    | A2    | B1    | B2    |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| Operai | 0,210 | 0,517 | 1,309 | 0,555 |

|                        |       |       |   |   |
|------------------------|-------|-------|---|---|
| Escavatore             | 0,071 | 0,027 | - | - |
| Battipalo/mototrivella | 0,025 | 0,017 | - | - |

### **Analisi floristica**

L'analisi paesaggistica dei due siti pilota A (a monte dell'Azienda Vitivinicola Serafica) e B (all'interno dei Vivai Emmanuele), pur appartenendo entrambi all'ambito dei versanti etnei e quindi con terreni lavici, da un punto di vista vegetazionale sono diversi e comunque limitrofi alle aree protette del Parco Regionale dell'Etna. La prima in Contrada Monpilieri a sud di Nicolosi, a quota 685 m s.l.m., mentre la seconda in Contrada Paoli, nel Comune di Giarre a sud est dell'abitato di S. Alfio, a quota 320 m s.l.m.

Il sito A, quello dell'Azienda vitivinicola Serafica, è prettamente vocato alla produzione ma a margine e sottostante una scarpata in piena colata dove la vegetazione ha ormai acquisito elementi di spontaneità vegetazionale sia di varie specie erbacee, anche di interesse floristico, che di specie arbustive storicizzate (come il fico d'india, *Opuntia ficus-indica* L. Mill.) e di interesse naturalistico come le euforie e, soprattutto, lo scornabecco (*Pistacia terebinthus* L.). Questa specie è il portainnesto del pistacchio, autopropagatosi o rinselvaticitosi dagli alberi di pistacchio abbandonati dalla coltivazione a seguito della colata.

Il sito B della Vivai Emmanuele, si presenta invece con terrazze molto ampie, la cui produttività è legata al settore vivaistico e alla produzione da alberi da frutta, strutturate per il consolidamento con il riutilizzo del pietrame lavico come elemento costruttivo.

Le specie da utilizzare devono quindi tener conto del comune denominatore lavico, e quindi di specie non solo appartenenti al territorio, ma anche di provenienza locale e certificate come derivanti da germoplasma locale. Ma un altro elemento di connessione non solo paesaggistica da tenere in considerazione è proprio la genesi materica dei biorulli (in pratica un'evoluzione meccanizzata di un modello già utilizzato proprio a Custonaci da cui proveniva la *Posidonia oceanica* spiaggiata): i sarmenti delle fascine derivano infatti dalla vite, per cui è da ipotizzare proprio l'uso proprio della vite, *Vitis vinifera* L. come specie d'impianto.

I biorulli installati nel sito A (Azienda vitivinicola Serafica) sono un elemento di consolidamento e stabilizzazione ma di cerniera tra i filari di vite e la scarpata. Affascina subito, quindi, l'uso dello scornabecco e della vite, entrambi con portamento non finalizzato alla produzione, "in forma *wild*" in modo che la vite sia strisciante e lo scornabecco abbia un portamento naturale, per un collegamento tra il paesaggio produttivo e quello naturalistico. Si avrebbe una garanzia per il ricoprimento già ad un anno avendo il rinverdimento condizioni favorite perché la vite è un rampicante portentoso. In un

secondo momento l'Azienda Serafica potrebbe optare per una produttività delle due specie coltivandole ad alberello dopo l'innesto e le potature appropriate.

Anche per il sito B della Vivai Emmanuele potrebbe utilizzarsi la stessa opzione, ma con l'alternativa del pistacchio (al posto dello scornabecco che ne è porta innesto) e la vite si può mettere a dimora già innestata per avere produzioni di pistacchi e di uva. In alternativa la specie arborea da frutto potrebbe essere quella del melograno (*Punica granatum* L. 1753) o del noce (*Juglans regia* L. 1753) in modo da ben consolidare la pendice e, come arbustive le more (*Rubus* L. 1753) o il rosmarino (*Rosmarinus officinalis* L. 1753) preferibilmente ricadente.

Naturalmente le erbacee, derivanti dalla raccolta del fiorume negli stessi ambiti dei siti, determinano la scelta delle specie da mettere a dimora per le tecniche complementari delle semine e idrosemine.

La finalità divulgativa del progetto consiglia una cartellonistica tecnica nei due siti con l'Elenco floristico dei due siti e i cartellini botanici delle specie d'impianto.

#### 3.3.3.4 Conclusioni

Il lavoro descrive il brevetto depositato dall'Università degli Studi di Palermo riguardante un'opera innovativa IN di stabilizzazione dei versanti. L'opera di IN è realizzata con materiali generalmente di scarto: i) i sarmenti della vite, che danno vita alle cosiddette rotofascine modulari (RFM), elementi base dell'opera e ii) la P. oceanica spiaggiata, che è un componente del substrato di crescita. Il Progetto *Jump-Poc*, finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico, ha poi consentito di realizzare l'idea brevettuale e la costituzione di quattro differenti prototipi, che si distinguono per modalità di collegamento delle RFM e nell'inverdimento, in due diversi siti in prossimità del Parco dell'Etna.

La tipologia di opera, sicuramente ad alto valore ecologico per l'ecocompatibilità dei materiali e per l'uso efficiente delle risorse, ben si inquadra nella missione ambientale del recente PNRR. Peraltro, l'uso delle tecniche esposte in aree coltivate a vigneto mostrerebbe il segno della caratteristica produttiva della stessa area (i sarmenti) compensando il degrado indotto dalle lavorazioni e soprattutto dalle problematiche di tipo erosivo dovute alla costituzione di un nuovo impianto (scavi, decespugliamenti, movimenti di terra, etc.).

#### **Bibliografia Par. 3.3.3**

BAIAMONTE G., D'ASARO F., CALVO R. 2019. Gravity-driven infiltration and subsidence phenomena in *Posidonia oceanica* residues. *J Hydrol E – ASCE*, 24(6), 04019016.

CALVO, R. 2018a. Reutilización de residuos de poda de la vid y de *Posidonia oceanica* en las obras de Bioingeniería del paisaje. 1-95. Ph.D. Thesis. University of Palermo.



*I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

CALVO, R. 2018b. Thermal insulation role and possible exploitation of *Posidonia oceanica* detritus in the Mediterranean area. *Boccone*, 28, 321.

### 3.4 CENNI SUL DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA (G. Menegazzi, F. Palmeri)

Il dimensionamento preliminare delle opere di Ingegneria Naturalistica si colloca tra le operazioni più importanti da svolgere prima della progettazione esecutiva delle opere, da anteporre certamente alle verifiche tecniche e ai conseguenti dimensionamenti finali.

Avere a disposizione degli strumenti rapidi ed efficaci con i quali effettuare delle prime verifiche e valutare se le tecniche prescelte siano o meno in grado di risolvere le problematiche in esame, è stato da sempre un obiettivo cui ambivamo.

Negli anni abbiamo raccolto varie indicazioni e impostato e sviluppato dei programmi di calcolo realizzati con fogli elettronici “semplificati”, con l’intento di ottenere dei risultati di orientamento che potessero fornire utili indicazioni operative, nonostante i dovuti limiti di precisione. Pur essendo consci che solo una vera e propria verifica tecnica dell’opera, che richiede maggiore impegno e precisione rispetto a quanto proposto, possa fornire le dovute garanzie.

Abbiamo pertanto preso i “nostri” fogli di calcolo ed abbiamo cercato di correggerli, implementarli e renderli in una forma facilmente fruibile dai potenziali utenti.

Il nostro contributo vuol essere soprattutto quello di fornire uno strumento facile ed efficace, messo a disposizione della disciplina e degli operatori del settore, senza avere la pretesa di aver raggiunto un punto fermo sull’argomento che, molto probabilmente, necessita ancora di ulteriori studi ed affinamenti.

In tal senso, sollecitiamo il lettore a contestualizzare correttamente sia gli argomenti trattati sia i risultati conseguenti le elaborazioni (calcoli), che vanno sempre e comunque calibrati alla situazione in esame, alle caratteristiche dell’opera prevista, alle problematiche riscontrate che, in fase esecutiva, necessitano di ulteriori ed approfondite verifiche.

Per quanto ci riguarda, questo contributo, che ci ha tenuto occupati per più di due anni, oltre ad averci permesso di crescere professionalmente grazie al confronto basato sulla diversa formazione di studi, diversa pratica professione e diversi settori di esperienza, ci ha fatto soprattutto comprendere la necessità di fare un ulteriore e non più rimandabile passo nello sviluppo dell’Ingegneria Naturalistica: la redazione di capitolati tecnici relativi alle singole opere.

Tali capitolati, che richiederanno la collaborazione di tutti coloro che a diverso livello si occupano di Ingegneria Naturalistica Ingegneria Naturalistica sia in Italia che in Europa, consentiranno di definire al meglio le tecniche costruttive, al fine di garantirne la corretta applicabilità, esecuzione e collaudo. Nei primi capitoli del presente testo, non abbiamo rinunciato ad affrontare, a volte con audacia, argomenti che sono ancora in corso di discussione tra gli esperti della disciplina, riprendendo ed

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

elaborando alcuni concetti chiave della disciplina stessa, al fine di fornire maggiore chiarezza di principi e metodi.

Chiediamo scusa anticipatamente ai lettori “esperti”, pertanto, che troveranno qualche argomento un po’ troppo ripetitivo rispetto ad altri testi simili.

Abbiamo inoltre voluto introdurre elementi di discussione di un nuovo settore, trattato da pochi autori e che invece riteniamo importante ed ancora poco approfondito: la tecnologia del legno. Questo materiale, massicciamente impiegato nelle tecniche di Ingegneria Naturalistica, ha infatti spesso caratteristiche e classificazioni poco conosciute anche tra gli esperti del settore.

Si allega il link del libro ove è possibile scaricare gratuitamente, in formato aperto, le informazioni ed i documenti in formato aperto di predimensionamento in fase di progettazione preliminare delle strutture più diffuse nel campo delle riqualificazioni ed uso di tecniche a basso impatto ambientale: Manuale di dimensionamento delle opere di Ingegneria Naturalistica (all’interno della sezione <http://www.aipin.it/pubblicazioni/>).

### 3.5 IL CRITERIO DELLA MASSIMA APPLICABILITÀ DELL'INGEGNERIA NATURALISTICA<sup>10</sup> E LA NORMATIVA (G. Doronzo)

Gli interventi NBS (Nature Based Solutions) permettono di migliorare la qualità naturalistica, ecosistemica, ecologica, l'implementazione dei servizi ecosistemici e il rafforzamento del capitale naturale. Miglioramento paesaggistico e funzionale dei siti di intervento nel settore della progettazione ambientale a cui le tecniche di Ingegneria Naturalistica, impiegando piante o parti di esse come materiali da costruzione, non solo appartengono ma in qualche modo ne sono state anticipatrici e per certi versi "profetiche".

All'inizio da parte degli interessati e/o attivi professionalmente nel campo dell'Ingegneria Naturalistica vi è stato il riuscito intento di promuovere e divulgare l'Ingegneria Naturalistica mediante congressi, escursioni tecniche, corsi di formazione e di aggiornamento anche rivolti alla scuola, pubblicazioni, progetti di ricerca ed ogni altra attività inerente all'Ingegneria Naturalistica.

Tali applicazioni a grande scala sono state poi possibili considerato che, tra la fine degli anni '90 ed i primi anni del nuovo secolo, vi sono state una serie di azioni riguardanti l'I.N. inerenti: gli aspetti normativi (Legge Merloni, istituzione per i LL.PP. della categoria OG 13 - Opere di I.N., emanazione di vari regolamenti per l'attuazione degli interventi di Ingegneria Naturalistica, inserimento delle Tecniche nei Regolamenti di molte Autorità di Bacino, ecc.), gli aspetti formativi (corsi di formazione per tecnici delle Comunità Montane, corsi per funzionari di varie Regioni sviluppati, anche, dal Ministero dell'Ambiente, corsi realizzati da svariati Ordini professionali, Cantieri didattici a vari livelli, ecc).

Determinante è stata inoltre la disponibilità di adeguati fondi, in particolare per le Regioni ad "Obiettivo 1" (quelle per le quali, nell'ambito della politica regionale dell'Unione Europea, l'obiettivo prioritario è la promozione dello sviluppo e dell'adeguamento strutturale) con premialità relative alla I.N., utilizzo delle tecniche da parte di vari Enti, quali Regioni, Province, Commissariati di Governo, Comunità Montane, Comuni, ecc. un po' dovunque in Italia.

L'evoluzione è stata quella di crearsi controparte agli Enti pubblici interessati per la formulazione di leggi, direttive tecniche e capitolati inerenti la materia.

---

<sup>10</sup> Possibile acronimo MAIN, come quello del *Laboratorio di Modellistica, Ambientale, Idrologico, Idraulica e di Ingegneria Naturalistica* del DAGRI-UNIFI.



*Figura 3.75 Cantiere didattico di Ingegneria Naturalistica – Buonalbergo (BN) 2009 (Gradonata mista con talee e piantine, cordonata e Palificata viva doppia).*

Dalla fase “profetica” negli ultimi decenni si è affermata l’istanza di percorrere nuove strade per la gestione ed uso ecocompatibile del territorio che si è resa ormai scelta obbligata stante le innumerevoli emergenze ambientali che sono sotto gli occhi di tutti. Di pari passo si è sviluppato per gli operatori del settore (professionisti, tecnici, imprese, associazioni ambientaliste, ecc.) l’esigenza di avere un quadro normativo specifico per la progettazione e a successiva l’attuazione degli interventi di Ingegneria Naturalistica.

Il percorso è stato lungo e dalla prima importantissima fase sperimentale, durante la quale si sono espressi i primi enunciati fondamentali della disciplina (livello minima di energia, opzione zero, utilizza le piante vive autoctone, o parti di esse, come materiale da costruzione, conservazione e l’aumento della biodiversità, ecc.), man mano si è dovuto affrontare nell’uso quotidiano per progettazioni ed esecuzione di lavori del come utilizzare dati tecnici e scientifici a fini costruttivi, di consolidamento, stabilizzazione ed antierosivi sfruttando le proprietà biotecniche della vegetazione come materiale da costruzione. Insomma, stante il fatto che tali funzioni sono legate ad organismi viventi, in prevalenza piante di specie autoctone, con finalità di ricostruzione di ecosistemi tendenti al naturale ed all’aumento della biodiversità come inserire tutto ciò in un quadro di Leggi e Regolamenti che disciplinano, giustamente, progetti ed esecuzione dei lavori sia nel pubblico che nel privato

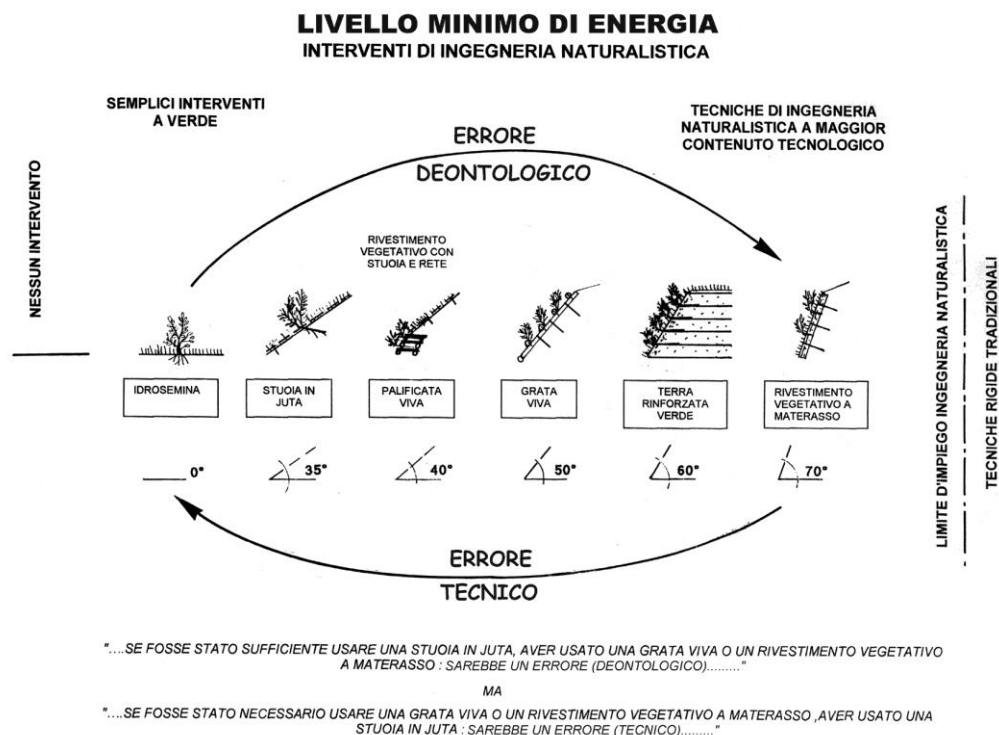


Figura 3.76 Dal Manuale di Ingegneria Naturalistica Applicabile ai settori delle strade, cave, discariche e coste sabbiose – Regione Lazio (2004) come già trattato in precedenza al Paragrafo 1.1.3.

Nel tempo sono stati prodotti svariati manuali sulle tecniche di Ingegneria Naturalistica come anche esistenti voci nei vari prezzi regionali per le opere pubbliche esistenti nel territorio nazionale. Di contro si segnalano pochi casi di strumenti legislativi che definiscano l'iter progettuale nelle varie fasi e poi quelli legati alla Direzione dei Lavori, collaudo, ecc per questo tipo di tecniche.

Considerando anche gli investimenti programmati per i prossimi anni vi è la forte esigenza di mettere a regime quanto realizzato per le progettazioni e l'esecuzione degli interventi di I.N. di anni di lavoro da parte di tecnici, imprese, maestranze, provenienti da più discipline scientifiche, che con il proprio impegno sul campo potrebbero contribuire, con atti formali, alla realizzazione di una regolamentazione normativa dell'Ingegneria Naturalistica finalizzata anche a stabilire il concetto di lavoro collegiale e multidisciplinare.

Vi è bisogno di definire concetti e principi vincolanti ai quali dovranno attenersi essenzialmente gli uffici regionali che operano in materia di difesa del suolo, bonifiche e recupero ambientale, infrastrutture e opere idrauliche, tutela dell'ambiente, nonché gli altri Enti eventualmente concessionari per la realizzazione di interventi nei suddetti settori, nelle diverse fasi della programmazione, progettazione, approvazione ed esecuzione delle opere di competenza regionale.



*Figura 3.77 Mitigazione rischio idrogeologico – Moschiano (AV) 2004 (Gradonata mista con talee e piantine e Palificata viva doppia).*



*Figura 3.78 Mitigazione rischio idrogeologico – Moschiano (AV) 2005 (Gradonata mista con talee e piantine e Palificata viva doppia).*

Dai manuali applicativi esistenti si possono specificare sia gli ambiti di applicazione sia le tipologie d'intervento con rimando per il dettaglio ad un allegato tecnico che essendo struttura di dettato normativo assumerebbe valore fondamentale per la disciplina.

Si potrebbe anche ribadire come le tecniche di Ingegneria Naturalistica devono essere applicate sia come tecniche di base che come tecniche di mitigazione degli impatti ambientali, per tutti gli interventi inseriti nei seguenti ambiti di applicazione: Mitigazione del rischio idrogeologiche; Bonifiche e recupero ambientale di discariche e cave; Difesa del suolo in generale; Infrastrutture viarie e ferroviarie; Rinaturalizzazione; Opere idrauliche in generale; Valorizzazione ambientale a fini turistici; Operazioni di protezione civile.



*Figura 3.79 Mitigazione rischio idrogeologico – Marano di Napoli (NA) 2011.*



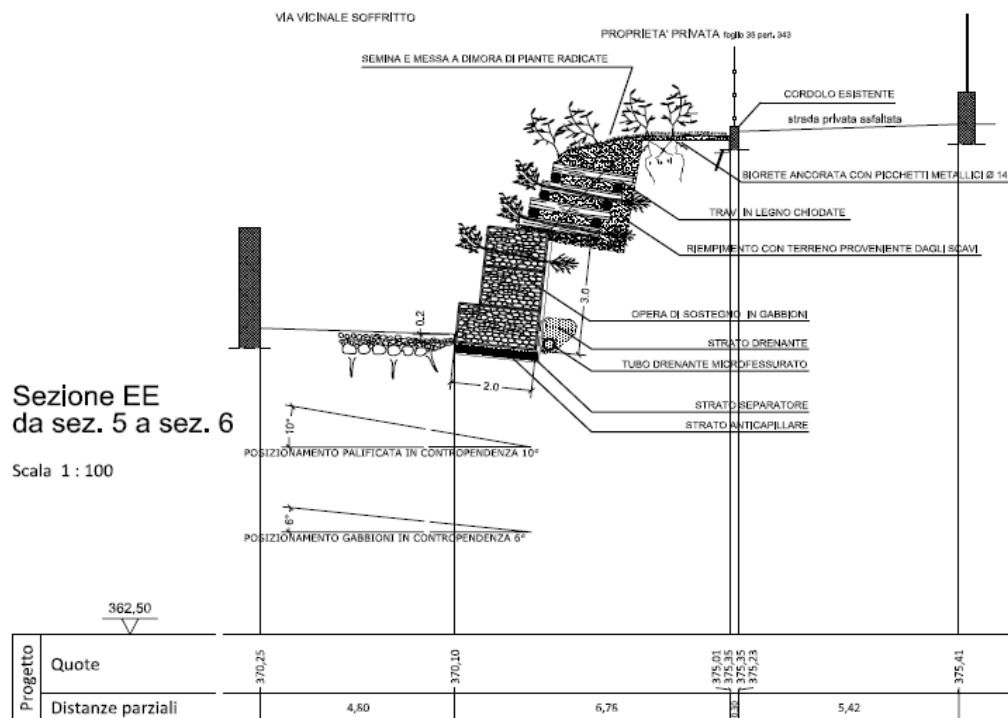


Figura 3.80 Mitigazione rischio idrogeologico – Marano di Napoli (NA) 2011 (Gabbionata rinverdita, Gradonata mista con talee e piantine e Palificata viva doppia – Progetto e Direzione Lavori: Arch. E. Cozzolino – Geol. G. Doronzo).



Figura 3.81 Mitigazione rischio idrogeologico – Marano di Napoli (NA) 2011 (Gabbionata rinverdita, Gradonata mista con talee e piantine e Palificata viva doppia – Progetto e Direzione Lavori: Arch. E. Cozzolino – Geol. G. Doronzo).

Fondamentale promuovere una "Relazione specifica sulla massima applicabilità della Ingegneria Naturalistica" da realizzare già dalla fase di progettazione preliminare con approfondimenti in quella

definitiva, redatta a cura di un tecnico il cui curriculum dimostri una comprovata esperienza nel campo dell'Ingegneria Naturalistica

Tale relazione dovrà partire da un'attenta analisi dell'ecosistema o degli ecosistemi presenti nell'area d'intervento, intesa come conoscenza e valutazione delle varie componenti e delle loro interconnessioni.

La "Relazione", dovrebbe riportare le finalità progettuali; i risultati degli studi relativi ai differenti aspetti ambientali (idrogeologico, idrologico, idraulico, geologico, geotecnico, vegetazionale, faunistico, paesaggistico, ecc), specificando le metodologie di analisi ed i modelli di calcolo utilizzati; la descrizione delle tecniche previste e dei criteri adottati per la scelta ed il dimensionamento delle opere; la valutazione della compatibilità ambientale degli interventi e la stima delle trasformazioni attese in seguito alla loro realizzazione, specificando le soluzioni adottate per assicurare la stabilità e la funzionalità delle opere rispetto alle finalità progettuali insieme con il minor impatto possibile.

Non secondario un allegato tecnico con lo scopo di fornire, in conformità con l'articolato, le definizioni normative relative alla disciplina dell'Ingegneria Naturalistica, con schede descrittive delle singole soluzioni tecniche di base, le voci di capitolato e tariffe aggiornate ottenute da analisi specifiche. Ciò potrà essere utile per tutti coloro che, secondo l'iter definito dalla vigente normativa sui Lavori Pubblici, siano essi parte dell'Amministrazione Pubblica, professionisti o ancora soggetti dell'imprenditoria privata, si trovino a programmare, valutare, progettare o eseguire interventi negli ambiti interessati da tale allegato, che potrebbe avere la funzione di Regolamento. Il repertorio di soluzioni dovrà costituire un abaco di soluzioni di base, dal momento che ogni singola tecnica può essere combinata con altre e dar luogo a soluzioni più complesse e articolate, ciò tutela il singolo progettista nella sua autonomia professionale, pur nell'ambito normativo che lo obbliga a considerare la priorità delle tecniche a basso impatto dell'Ingegneria Naturalistica.

Nello specifico la "Relazione" dovrà essere realizzata riportando le analisi riportate nello: studio geologico-geotecnico; studio idrologico e calcoli idraulici; studio della flora e della vegetazione; studio faunistico. Per i singoli aspetti si analizzeranno gli obiettivi che ci si prefigge delimitando, per ciascun ambito, l'area d'influenza, tenendo in giusto conto i riferimenti normativi e i vincoli territoriali.

Sempre relativamente a quanto ora descritto si dovrà enumerare quali sono le informazioni e dati da analizzare e quali sono le specifiche metodologie arrivando anche a definire gli elaborati da redigere.



*Figura 3.82 Riqualificazione urbana - Parco Urbano Pomigliano D'Arco (NA) (Grata viva e gradonata viva )2005.*



*Figura 3.83 Riqualificazione urbana - Parco Urbano Pomigliano D'Arco (NA) (Grata viva e gradonata viva) stesso sito 2017.*

Specifico ragionamento per gli step progettuali con puntuali informazioni per le varie fasi (progetto preliminare, progetto definitivo e progetto esecutivo) ed anche rispetto al dimensionamento delle opere, non trascurando la redazione del cronoprogramma e i criteri di scelta delle specie.

Come detto con il PNRR grande importanza viene dato alle NBS di cui le tecniche di Ingegneria Naturalistica fanno parte a pieno titolo. Stante il quadro normativo per i progetti legati ai finanziamenti afferenti al PNRR è da identificare un iter tecnico normativo ben specifico stante la notevole mole di norme e leggi esistenti.

Potrebbero evidenziarsi difficoltà per i progetti di I. N. e sarebbe utile delineare delle linee guida per la valutazione dei progetti di I.N., da parte del responsabile di procedimento o di chi è incaricato a valutare i progetti, partendo dall'assunto che per la valutazione dei progetti di I.N., fermo restando la necessaria esperienza maturata relativamente all'applicazione di queste tecniche e/o la necessità di essere affiancati da professionisti esperti nel campo dell'I.N., sia utile avvalersi di una lista di controllo a forma di questionario che faccia riferimento alle linee guida per la progettazione delle opere di I.N.



*Figura 3.84 Ricomposizione ambientale: mitigazione rischio idrogeologico. Sant'Anastasia (NA) 2014.*



*Figura 3.85 Ricomposizione ambientale: mitigazione rischio idrogeologico. Sant'Anastasia (NA) (Gradonata mista con talee e piantine, Palizzata, Palizzata viva tipo Montaguto, Grata viva, Palificata viva doppia) 2015.*



*Figura 3.86 Ricomposizione ambientale: mitigazione rischio idrogeologico. Sant'Anastasia (NA) 2017.*

Per quanto riguarda la “Relazione” in fase di progetto di fattibilità come noto la norma prevede un documento preliminare, con approfondimenti tecnici e amministrativi graduati in rapporto all’entità, alla tipologia e categoria dell’intervento da realizzare, con l’indicazione di verificare “la situazione iniziale e della possibilità di far ricorso alle tecniche di Ingegneria Naturalistica. Per cui appare congruo in fase di progettazione preliminare una prima “Relazione” con verifica della possibilità di utilizzo o non utilizzo delle tecniche di I.N. In pratica una sorta di assoggettabilità o non assoggettabilità per il singolo progetto delle tecniche di I.N. nonché la valutazione dell’ipotesi di *opzione zero* con l’esame delle possibili conseguenze del mancato intervento, laddove compatibile con la pianificazione d’area vasta. Tale assoggettabilità o non assoggettabilità redatta a cura di un tecnico il cui curriculum dimostri una comprovata esperienza nel campo dell’Ingegneria Naturalistica.



*Figura 3.87 Mitigazione rischio idrogeologico - Arnad (AO), foto G.Doranzo (Vallo paramassi costituito da terra rinforzata rinverdita) 2017.*



*Figura 3.88 Mitigazione rischio idrogeologico - Arnad (AO), foto G.Doronzo (Vallo paramassi costituito da terra rinforzata rinverdita) 2017.*

Per quanto riguarda la fase di progettazione definitiva la “Relazione” dovrà essere specificata tra le relazioni specialistiche e dovrà riportare:

- le finalità progettuali;
- i risultati degli studi relativi ai differenti aspetti ambientali (idrogeologico, idrologico, idraulico, geologico, geotecnico, vegetazionale, faunistico, paesaggistico), specificando le metodologie di analisi ed i modelli di calcolo utilizzati;
- la descrizione delle tecniche previste e dei criteri adottati per la scelta ed il dimensionamento delle opere;
- la valutazione della compatibilità ambientale degli interventi e la stima delle trasformazioni attese in seguito alla loro realizzazione, specificando le soluzioni adottate per assicurare la stabilità e la funzionalità delle opere rispetto alle finalità progettuali insieme con il minor impatto possibile.

Per quanto riguarda la fase di progettazione esecutiva la “Relazione”, così come già previsto per le altre relazioni specialistiche, definire in dettaglio gli aspetti inerenti alla esecuzione e alla manutenzione degli interventi di I.N. e di ogni altro aspetto dell'intervento e del lavoro.

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Comunque, certamente, la progettazione di un intervento di I.N. deve sostanzialmente ottemperare a quanto richiesto dalla normativa tecnica esistente, in modo da assicurare:

- 1) la *qualità* dell'opera e la *rispondenza* alle finalità relative;
- 2) la *conformità* alle norme ambientali ed urbanistiche;
- 3) il *soddisfacimento dei requisiti essenziali*, definiti dal quadro normativo nazionale e comunitario.



Figura 3.89 *Sistemazione con interventi innovativi di Ingegneria Naturalistica nel Parco nazionale del Vesuvio Trecase (NA) – (da ACER 2007).*



Figura 3.90 *Sistemazione con interventi innovativi di Ingegneria Naturalistica nel Parco nazionale del Vesuvio Trecase (NA) – (da ACER 2007).*

Come noto la Norma prevede la possibilità di avere assistenti con funzioni di direttori operativi e di ispettori di cantieri con i primi che collaborano con il direttore dei lavori nel verificare che lavorazioni di singole parti dei lavori da realizzare che rispondono della loro attività direttamente al direttore dei lavori ed i secondi nella sorveglianza dei lavori in conformità delle prescrizioni stabilite nel capitolato speciale di appalto. Stante la specificità degli interventi di I.N. pare utile la nomina di un esperto con funzione di direttore operativo e/o ispettore di cantiere nel caso di progetto con utilizzo di tali tecniche.

***Bibliografia Par. 3.5***

Calcaterra D., Palma B., Doronzo G., De Luca Tuppiti Schinosa F., Di Martire D., Dima C., (2005) – “Possibilità di utilizzo delle tecniche di Ingegneria Naturalistica su versanti”. Quaderni di Geologia Applicata, Bologna.

Castello P., Doronzo G., Ottenziali L., 2010. Ingegneria Naturalistica per la mitigazione del rischio Idrogeologico. Geologia Tecnica n. 2/2010 .

Cornelini P. 1999. Trasferibilità nel Lazio delle tipologie di intervento. In: Atti del Convegno “1° Giornata di studio sull’applicazione delle tecniche a basso impatto ambientale nella Regione Lazio: Ingegneria Naturalistica”, Regione Lazio, Roma.

Cornelini P. (2001) – “Monitoraggio e sperimentazione di interventi di rivegetazione di scarpate in ambito mediterraneo”. Atti Conv. “Interventi di rivegetazione e Ingegneria Naturalistica per infrastrutture lineari”, Tarvisio.

Cornelini P, Federico C., Pirrera G. (2008) - “Arbusti Autoctoni Mediterranei per l’Ingegneria Naturalistica - Primo contributo alla morfometria degli apparati radicali”. Azienda Regionale Foreste Demaniali, Collana Sicilia Foreste, n. 40.

De Falco V., Doronzo G., Roca M., (2005) – “Sotto Controllo. Ingegneria Naturalistica Manutenzione programmata delle aste fluviali con tecniche di I.N”. ACER Parchi - Verde attrezzato - Recupero ambientale, anno 19° n. 6/05 novembre-dicembre.

Doronzo G. 2002. Opere a verde di Ingegneria Naturalistica: il piano di manutenzione. In Atti del convegno l’Ingegneria Naturalistica nel quadro di attuazione del P.O.R. Campania. Regione Campania - AIPIN sezione Campania.



## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Doronzo G. 2002. Progettazione di opere di Ingegneria Naturalistica: i costi. In Atti del convegno l'Ingegneria Naturalistica nel quadro di attuazione del P.O.R. Campania. Regione Campania - AIPIN sezione Campania.

Doronzo G. 2003. Manutenzione programmata: monitoraggio delle tecniche di Ingegneria Naturalistica nel Parco nazionale del Vesuvio. In: "Ingegneria Naturalistica: dal Progetto ai Risultati". Edizioni CUSL, Milano.

Doronzo G. 2003. Un intervento ben radicato. Riqualificazione ambientale con tecniche di Ingegneria Naturalistica. In ACER Parchi - Verde attrezzato - Recupero ambientale anno 19° N. 1/03 gennaio-febbraio

Doronzo G. (2003) – "Esempi di interventi di Ingegneria Naturalistica nel Parco nazionale del Vesuvio". Atti Third International Congress of Ethobotany . Delpinoa , 45: 227-232, Napoli.

Florineth F. 1999. L'idoneità delle piante legnose per il consolidamento dei versanti franosi. In: A.I.P.I.N. Atti del Convegno "Efficacia e costi degli interventi di Ingegneria Naturalistica". pp. 59-66. Trieste.

Florineth F. (1999) – "L'idoneità delle piante legnose per il consolidamento dei versanti franosi". Atti Conv. "Efficacia e costi degli interventi di Ingegneria Naturalistica", Trieste, pp. 59-66.

Florineth F. (2005) – "Stato dell'arte dell'I.N. per il consolidamento dei versanti franosi". Convegno Applicazioni delle tecniche di Ingegneria Naturalistica nei settori infrastrutturali e del territorio, Bologna 23-24 giugno.

Florineth F (2007) - "Piante al posto del cemento. Manuale di Ingegneria Naturalistica e Verde tecnico". Il Verde Editoriale.

Pirrerà G., Calvo R., D'asaro F., Ferrara L.M., Lo Nardo C. (2017) "Technosoils for the prevention of desertification risk" - L'Ingegnere Italiano - n. 3/2017 - Edizione Speciale World Engineering Forum 2017 PAG.57, 59

Pirrerà G., Ferrara L.M. (2017). "Utilizzo di frazione organica stabilizzata da scarti di vegetazione e di vermicompost per i tecnosuoli" 3rd International Symposium of Soil and Water Bioengineering - Materials and Techniques in Ecological Restoration, Sant'Agata di Militello, Messina, Italia

Regione Campania. 2002. Regolamento per l'attuazione degli interventi di Ingegneria Naturalistica nel territorio della Regione Campania BURC del 19 agosto 2002.

Regione Lazio (2002) – “Manuale di Ingegneria Naturalistica Applicabile al settore idraulico”. Volume 1.

Regione Lazio (2004) – “Manuale di Ingegneria Naturalistica Applicabile ai settori delle strade, cave, discariche e coste sabbiose”. Volume 2.

Regione Lazio (2006) - “Manuale di Ingegneria Naturalistica, Sistemazione dei versanti”. Volume 3.

Regione Liguria. Opere e tecniche di Ingegneria Naturalistica e recupero ambientale.

Regione Lombardia. 2000. Deliberazione Giunta Regionale del 29 Febbraio 2000 n. 6/48740.

Regione Toscana (2000) - “Principi e linee guida per l’Ingegneria Naturalistica - Vol. I Processi territoriali e criteri metodologici” Collana fiumi e territorio. Regione Toscana Ed.

Regione Toscana (2001) - “Principi e linee guida per l’Ingegneria Naturalistica – Vol. II Sviluppi ed applicazioni in Toscana” Collana fiumi e territorio. Regione Toscana Ed..

Paola Sangalli, João Paulo Fernandes, Guillermo Tardío (2021) – Soil and Water Bioengineering as Natural-Based Solutions

Guillermo Tardío, Slobodan B. Mickovski, Paola Sangalli (2019) - Incorporating the particularities of soil and water bioengineering works into a design methodology with monitoring feedback loops.

Sauli G, Sieben S. (1995) - “Tecniche di rinaturazione e d’Ingegneria Naturalistica”. Patron Editore, Bologna.

Sauli G. 1999. Casistica di interventi di Ingegneria Naturalistica: costi e risultanze. In: A.I.P.I.N. Atti del Convegno “Efficacia e costi degli interventi di Ingegneria Naturalistica». pp. 131-136. Trieste.

Sauli G. (1999) – “Casistica di interventi di Ingegneria Naturalistica: costi e risultanze. Atti Conv. “Efficacia e costi degli interventi di Ingegneria Naturalistica”, Trieste, pp. 131-136..

Schiechtel H.M. (1991) – “Bioingegneria Forestale, Biotecnica Naturalistica”. Ed. Castaldi, Feltre. (BL).

Schiechtel H.M. 1991. Bioingegneria Forestale, Biotecnica Naturalistica. Castaldi, Feltre.

*I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Schiechl H.M., Stern R. (1992) - “Ingegneria Naturalistica. Manuale delle opere in terra”. Ed. Castaldi, Feltre (BL).

Schiechl H.M., Stern R. (1994) - “Ingegneria Naturalistica. Manuale delle costruzioni idrauliche”. Ed. Arca. Gardolo (TN).

Schiechl H.M. (1996) - “I salici nell’uso pratico”. Ed. Arca, Gardolo (TN.)

Zeh H. (1996) - “Tecniche di Ingegneria Naturalistica”. Ed. Il Verde Editoriale, Milano.

### 3.6 TRASFERIBILITÀ DELL'INGEGNERIA NATURALISTICA IN PAESI A BASSO REDDITO: ESPERIENZE NELLE ANDE TROPICALI (C. Crocetti, F. Preti)

#### 3.6.1 Trasferibilità dell'Ingegneria Naturalistica nei paesi a basso reddito

La trasferibilità dell'Ingegneria Naturalistica (I.N.) è un tema che da sempre coinvolge la disciplina, che ha conosciuto adattamenti in contesti geografici diversi da quelli di origine in Europa centrale, rispetto ai materiali (soprattutto vivi), ma anche alle tecniche e metodologie di lavoro. Si pensi all'uso del materiale vivo negli ambienti mediterranei rispetto a quelli alpini; ai legnami usati secondo disponibilità locali; al ricorso alla pietra a secco con pietrame e maestranze disponibili. In definitiva ogni intervento di I.N. si adatta, a diverse scale, alle condizioni locali (caratteristiche sito-specifiche, materiali, competenze maestranze, norme tecniche, ecc.). Condivisione e trasferimento di conoscenze hanno caratterizzato la diffusione dell'I.N. nel continente europeo, anche grazie ad associazioni come l'AIPIN (Associazione Italiana per l'Ingegneria Naturalistica). In Europa le associazioni di otto paesi sono federate nell'EFIB (*European Federation for Soil Bioengineering*), grazie a cui i soci continuano a condividere esperienze realizzate in nazioni europee ed extraeuropee. Generalmente i processi di trasferimento delle *Nature Based Solution (NBS)* possono assumere valori socioeconomici particolari in aree a basso reddito, se, come l'I.N., si tratta di tecniche ad alto uso di manodopera e materiali locali, soprattutto se disponibili a costi competitivi rispetto ai materiali di opere tradizionali. Le *NBS* sono ricercate nei progetti di cooperazione e sviluppo, per i risvolti ambientali, ma anche socioeconomici sulle popolazioni locali, in un'ottica di sviluppo sostenibile e durevole. La trasferibilità dell'I.N. è quindi un tema di interesse, sia a livello di scambi intra-europei, anche nell'ambito di bandi dell'Unione Europea (es. LIFE, ERASMUS+), sia per la trasferibilità in altri continenti, soprattutto in paesi a basso reddito, spesso più esposti a rischi ambientali e cambiamenti climatici. Dagli inizi degli anni '90 l'I. N. si è largamente diffusa in Europa, prima sulle Alpi e poi, grazie a un processo di trasferimento, nelle regioni mediterranee. Dagli inizi del 2000 gruppi di ricerca di diversa provenienza, hanno avviato studi sull'applicabilità in paesi extraeuropei a basso e medio reddito, pubblicando ricerche in Asia (Cina, Nepal), Africa (Etiopia) e America Latina (Brasile, Colombia, Nicaragua, Ecuador), dimostrando la possibilità di applicare l'I.N. in paesi con condizioni, ambientali, tecnologiche e socioeconomiche diverse dall'Europa (Borja et al. 2012; Florineth 2004; Ghimire et al. 2004; Lammeraner et al. 2005; Petrone 2006; Petrone et al. 2005, 2006; 2008, 2010, 2006, 2014; Rauch et al. 2011; Reubens et al. 2007; Rivera et al. 2006; Suttili et al. 2004; Stokes et al. 2010, Rauch et al., 2014; Maxwald et al., 2020).

### 3.6.2 Trasferibilità dell'Ingegneria Naturalistica in Centro e Sud America

Dal 2003 il gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali dell'Università di Firenze - DAGRI (ex GEESAF, ex DEISTAF, ex DIAF) ha condotto in America Latina, anche in collaborazione con AIPIN, studi, consulenze, corsi e cantieri didattici/sperimentali, in progetti di cooperazione e sviluppo, finalizzati a soluzioni sostenibili per la mitigazione dei rischi ambientali e per l'adattamento ai cambiamenti climatici. Lo studio più recente (Maxwald M. et al., 2020) presenta un'analisi di trasferibilità in Centro e Sud America, basata su una banca dati di 31 cantieri didattici e sperimentali (19 versante, 12 ambito idraulico), realizzati dal 2008 in paesi latinoamericani, di cui 24 coordinati dal DAGRI (Tab. 3.7). In totale si tratta di 76 opere afferenti a 15 diverse tecniche, di cui il 70% (53) su versante e il 30% (23) in ambito idraulico. Questo primo quadro di esperienze in paesi dove l'I.N. era praticamente inutilizzata è stato già presentato in un precedente lavoro (Preti F. et al., 2014), in cui si sottolineava l'importanza del contesto tecnico e tecnologico (*fattibilità tecnica*), ma anche di quello socioeconomico (*sostenibilità socioeconomica*), per selezionare soluzioni (a) economicamente sostenibili dalle comunità locali senza dipendenze esterne (b) e che massimizzino l'uso di manodopera e materiali locali.

#### 3.6.2.1 Analisi di trasferibilità in Centro e Sud America

Il trasferimento di *policy* avviene generalmente secondo diversi gradi (Dolowitz D. et al., 2000): (1) completo-copia; (2) trasferimento principi di base-emulazione; (3) fusione di diverse *policies*; (4) risultato ispirato, ma diverso dall'originario. L'analisi di trasferibilità è stata strutturata in (Gyergyay et al. 2009): (1) Obiettivi analisi; (2) Impatto trasferimento; (3) Identificazione necessità a diversa scala; (4) Identificazione fasi principali e componenti; (5) Identificazione livelli di importanza componenti; (6) Valutazione livelli di supporto componenti; (7) Conclusioni. Rimandando a Maxwald et al. (2020) per la trattazione completa, si illustrano brevemente i punti 4, 5 e 6. Fasi principali e componenti (*step 4*) sono individuate in Tab. 3.8. Nella *Fase di progettazione* le competenze tecniche sono un requisito basico, da cui l'importanza della formazione. Sono richieste conoscenze botaniche su specie con caratteristiche biotecniche adatte, da cui l'importanza di studi su quelle utilizzabili. Le condizioni climatiche influenzano trasferibilità e impiego di materiali vivi. Idrologia, idraulica e geologia sono le restanti componenti. Nella *Fase di costruzione* abbiamo: disponibilità di materiali di qualità, manodopera qualificata, macchinari, attrezzature e risorse economiche. Col monitoraggio nella *Fase d'uso* si possono acquisire dati utili per future implementazioni, tra cui quelli di efficacia. La manutenzione ha un ruolo importante soprattutto nei primi anni di vita. La sostenibilità d'uso è la capacità delle comunità locali di mantenere in efficienza le opere: (a) alta-tecnicamente/economicamente realizzabile; (b) media-tecnicamente realizzabile, ma

problematica economicamente; (c) bassa-tecnicamente/economicamente non realizzabile. Nel *Fine vita* si valuta la replicabilità degli interventi da parte delle popolazioni locali: (a) alta-replicabili autonomamente; (b) media-replicabili con tecnici e risorse economiche esterne; (c) bassa-non replicabili per mancanza di tecnici e risorse economiche. Tramite l'identificazione del livello di importanza (*step 5*) sono individuate le componenti con importanza elevata, media o bassa. Con la valutazione del livello di supporto (*step 6*), basata sulle difficoltà e opportunità riscontrate nelle esperienze dei casi studio, sono individuate le componenti che possono supportare positivamente, negativamente o in modo indifferente la trasferibilità. Le conclusioni (*step 7*) sono ottenute con confronti comparativi dei livelli di importanza e di supporto, individuando le componenti che possono rappresentare ostacoli o opportunità alla trasferibilità. La disponibilità di manodopera qualificata e di macchinari e attrezzature possono ostacolare la trasferibilità, mostrando alta importanza e livello di supporto mediamente negativo, da cui l'importanza della formazione di maestranze e di cercare soluzioni alle difficoltà di reperimento di taluni macchinari e attrezzature. La conoscenza delle tecniche di I.N. ha importanza alta, ma valore di supporto nullo, evidenziando possibili margini di miglioramento con azioni formative mirate. Le condizioni climatiche sono una componente mediamente importante, ma con un livello di supporto indifferente: essendo molto variabili possono influire in modi diversi sulla trasferibilità. L'idrologia e l'idraulica (in corsi d'acqua) sono mediamente importanti e con un livello di supporto mediamente negativo, considerando i regimi pluviometrici che possono caratterizzare l'area. L'efficacia ha importanza alta e valore di supporto mediamente positivo, evidenziando possibili miglioramenti attraverso esperienze e studi addizionali. Le risorse economiche hanno media importanza e valore di supporto nullo: possibilità di finanziamenti di progetti sulla difesa del suolo possono essere difficoltose, ma i costi delle opere sono competitivi. La geologia ha mostrato importanza bassa, ma può essere un ostacolo in mancanza di informazioni adeguate; sarebbero inoltre da approfondire aspetti legati a sisma di rare magnitudo per l'Europa e ai drenaggi più efficaci, considerando l'importanza del contenuto di acqua sulla stabilità. Elementi di media importanza, che possono supportare in maniera mediamente positiva la trasferibilità sono: materiali, monitoraggio, sostenibilità d'uso, manutenzione e replicabilità. Il fattore che può influenzare più positivamente i processi di trasferimento è la botanica. Si tratta di aree ricche in biodiversità con larga disponibilità sul posto di specie con buone caratteristiche biotecniche e rapida crescita. La disponibilità di materiale vegetale di qualità a costi contenuti è un'opportunità che può anche parzialmente compensare alcuni ostacoli.

Tab. 3.7 Riepilogo cantieri suddivisi per area geografica, paese e ambito (versante o idraulico).

|           | Area centroamericana |      | Area andina tropicale |      | Area subtropicale dell'Atlantico |      | Area tropicale del Pacifico |      |    |
|-----------|----------------------|------|-----------------------|------|----------------------------------|------|-----------------------------|------|----|
|           | ver.                 | idr. | ver.                  | idr. | ver.                             | idr. | ver.                        | idr. |    |
| Nicaragua | 5                    | 4    |                       |      |                                  |      |                             |      | 9  |
| Messico   | 2                    |      |                       |      |                                  |      |                             |      | 2  |
| Guatemala |                      | 1    |                       |      |                                  |      |                             |      | 1  |
| Ecuador   |                      |      | 2                     | 1    |                                  |      | 4                           | 2    | 9  |
| Colombia  |                      |      | 6                     |      |                                  |      |                             |      | 6  |
| Brasile   |                      |      |                       |      |                                  | 4    |                             |      | 4  |
|           | 7                    | 5    | 8                     | 1    |                                  | 4    | 4                           | 2    | 31 |

Tab. 3.8 Fasi principali e relative componenti dell'analisi di trasferibilità.

| Fase di progettazione                   | Fase di costruzione       | Fase d'uso    | Fine vita     |
|---|---------------------------|---------------|---------------|
| Competenze tecniche.                    | Materiali                 | Monitoraggio  | Replicabilità |
| Condizioni climatiche locali            | Manodopera qualificata    | Efficacia     |               |
| Botanica                                | Macchinari e attrezzature | Manutenzione  |               |
| Idrologia-Idraulica (nei corsi d'acqua) | Risorse economiche        | Sostenibilità |               |
| Geologia                                |                           |               |               |

### 3.6.3 Esperienze nell'area andina tropicale

Vengono illustrate le esperienze nelle Ande tropicali, che costituiscono 9 dei 31 casi studio e che, insieme al Centro America (12 casi) e all'area tropicale pacifica (6), sono un ambito geografico in cui il DAGRI, anche in collaborazione con l'AIPIN, ha condotto numerose esperienze. Si tratta di ambiti che presentano diversi aspetti in comune ai fini della trasferibilità, per contesto ambientale, socioeconomico e culturale. Le esperienze latinoamericane sono state più volte condivise con pubblicazioni e attività formative, realizzate anche con AIPIN e EFIB, per favorire dibattiti, collaborazioni e diffusione della disciplina in paesi extraeuropei. Nelle Ande tropicali il primo intervento (2008), l'unico in ambito **idraulico**, è stato realizzato a Cuenca (ECU), da G. Sauli (AIPIN) e P Talamantes (Facultad Ingenieria - Universidad Autonoma Queretaro, Mexico). I cantieri su **versante** (8) sono invece la casistica indagata più numerosa e, insieme a quelli del Centro America (7) e dell'area tropicale pacifica (4), costituiscono il totale per quest'ambito (19), di cui 17 eseguiti dal gruppo DAGRI. A questi interventi ne viene qui aggiunto un altro (tot. 10), realizzato a Pasto (COL) nel 2015 da D. Meneses, con la supervisione del gruppo DAGRI, considerabile una verifica sul campo dell'efficacia del processo di trasferimento. Si tratta di numeri certamente non esaustivi e da aggiornare, ma che costituiscono campioni di studio significativi, che possono fornire indicazioni utili per nuove attività e suggerire ambiti di approfondimento che possono supportare la trasferibilità. Tutti gli interventi sono risultati efficaci e si trovano in buono stato di efficienza. I cantieri sono stati

affiancati da attività di ricerca, formazione a tecnici e maestranze e divulgazione presso comunità ed enti locali. La

Tab. 3.9 evidenzia che due casi hanno riguardato più ambiti (aree degradate - degr.; versante e idraulico contemporaneamente - ver./idr.); 8 cantieri si trovano in zone rurali e 2 urbane. L'applicabilità nei **cantieri stradali** è stata elevata. È un contesto applicativo interessante che riguarda strade asfaltate (Figura 3.93 e Figura 3.94), ma, soprattutto nelle zone rurali, anche sterrate e sentieri (Figura 3.91 e Figura 3.92, Figura 3.104 e Figura 3.105), che possono essere vie di comunicazioni localmente importanti; spesso le uniche utilizzabili per commercializzare prodotti, rifornirsi di beni primari e accedere a servizi essenziali (sanità, scuola, ecc.). In questi casi l'approccio è riconducibile alla sistemazione di strade montane e sentieri, tenendo presente che, trattandosi di infrastrutture viarie, sono giustificati determinati livelli di investimento economico. Gli interventi in area urbana (Figura 3.93 e Figura 3.94) si trovano in **quartieri periferici** meridionali di Quito (ECU), che si sviluppa in una vallata stretta e lunga, con differenze di quote tra i due estremi di più di 1000 m, che si riflettono in un certo modo, insieme alle pendenze, anche nella matrice insediativa e socioeconomica: quartieri benestanti a nord, a quote minori e in aree più pianeggianti; quartieri disagiati a sud, a quote maggiori e in zone in pendenza. Tali quartieri sono spesso caratterizzati da caotico abusivismo edilizio con frequenti scavi e sbancamenti incontrollati, che possono risultare instabili in caso di pioggia. L'I.N. si è mostrata applicabile in questi contesti, frequenti in America Latina. Anche se si tratta di aree urbane, sono tecnicamente assimilabili a classici contesti applicativi della disciplina, che qui potrebbe avere diffusione e forte impatto sociale. Un altro contesto di interesse è quello delle sistemazioni di bacino per la **riduzione del trasporto solido**. Le attività realizzate nel 2011 a Popayan (COL) erano finalizzate anche a fornire competenze per interventi nel Rio Las Piedras della locale azienda acquedottistica e della sua fondazione, che si occupa di promuovere progetti socio-ambientali (*Acueducto y Alcantarillado de Popayan - AAPSA e Fundación. ProCuenca Rio Las Piedras*). Il bacino idrografico è utilizzato per la produzione di acqua potabile, che in Colombia proviene per lo più da filtraggio e depurazione di acque di fiume, con costi di esercizio e manutenzione influenzati dal trasporto solido. Il personale locale formato dal DAGRI è stato in grado di replicare, nell'area del Rio Las Piedras e altrove, tra il 2011 e il 2015, sistemazioni di bacino e di scarpate stradali con tecniche di I.N. (Figura 3.95, Figura 3.96, Figura 3.104 e Figura



*I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

3.105), nonché di completare autonomamente l'ultimo dei cantieri realizzati nel ciclo formativo del 2011 (Figura 3.91).

*Tab. 3.9 Cantieri didattici e sperimentali realizzati nelle Ande tropicali.*

|                 |   | <b>Prov. Dip. (Città)</b> | <b>Anno</b> | <b>Ambito</b> | <b>Esecutore</b>      | <b>Finanziatore</b> | <b>Zona</b> | <b>Cantiere</b> |
|-----------------|---|---------------------------|-------------|---------------|-----------------------|---------------------|-------------|-----------------|
| <b>Ecuador</b>  | 1 | Azuay (Cuenca)            | 2008        | idr.          | AIPIN- UNI Queretaro  | UNI-Cuenca          | Rur.        | Spondale        |
|                 | 1 | Pichincha (Quito)         | 2012        | ver.          | CRIC-DAGRI            | ECHO                | Urb.        | Stradale        |
|                 | 1 |                           |             | ver./degr.    |                       |                     | Urb.        | Strad./Ferr.    |
| <b>Colombia</b> | 1 | Nariño                    | 2010        | ver.          | UDENAR-DAGRI          | UNPD                | Rur.        | Stradale        |
|                 | 1 | (Pasto)                   | 2015        | ver./idr.     | UNDP-DAGRI            | UNPD                | Rur.        | Stradale        |
|                 | 5 | Cauca (Popayan)           | 2011        | ver.          | Rio Las Piedras-DAGRI | UNPD                | Rur.        | Stradale        |



*Figura 3.91 e Figura 3.92 Cantieri rurali realizzati con comunità locali, 2011-Popayan (COL).*



*Figura 3.93 e Figura 3.94 Cantieri urbani realizzati con enti pubblici, 2012-Quito (ECU).*



Figura 3.95 e Figura 3.96 Sistemazioni di bacino realizzate da tecnici e maestranze locali, 2013  
2014- (COL).

### 3.6.3.1 Area in esame

Dal Macizo Colombiano (Colombia meridionale) la catena andina si divide verso nord in tre cordigliere (Occidental, Central, Oriental) e verso sud entra in Ecuador, che ha caratteristiche ambientali, sociali e culturali simili al sud della Colombia. Le Ande sono hotspot di biodiversità e Colombia ed Ecuador sono paesi “megadiversi” secondo il Centro di monitoraggio per la Conservazione della Natura (WCMC-UNEP). Il Macizo Colombiano è Riserva della Biosfera UNESCO, ospita parchi nazionali ed è una delle maggiori riserve idriche del paese (bacini montani del Cauca, Magdalena, Patia, Caquetà, Putumayo). Si possono distinguere due sistemi ambientali: la Selva pluviale tropicale (Amazzonia e costa pacifica; precipitazione aree + piovose 3000-8000 mm/anno; °T mese + freddo > 20°C) e il Sistema montagnoso tropicale (Ande settentrionali; quota > 1000-1500 m; forti variazioni di °T con la quota) (AA. VV., 2005, 2006a, 2006b). Quest’ultimo ospita ambienti diversificati con la quota (AA. VV., 2006a, 2006b): (a) **bosco andino** umido basso-tra 1000/1500 e 1800/2400 m; (b) bosco andino umido alto-tra 1800/2400 e 3200/3400 m; (c) sub-paramo-tra 3200/3400 e 3700/3800 m; (d) paramo-tra 3700/3800 m e limite nevi perenni. I paramos (praterie e matorrales montani) e i boschi andini (bosques de niebla) svolgono una fondamentale regolazione idrologica, anche grazie alla vegetazione presente, che funziona come una “spugna”. I boschi sono caratterizzati da relativa povertà in varietà arboree, ma grande diversità di muschi, licheni, felci ed epifite. Gli interventi si trovano nella zona del bosco andino, che è l’ecosistema più minacciato in Colombia (4% della superficie nazionale - [www.parquenacionales.gov.co](http://www.parquenacionales.gov.co)) ed è la fascia altimetrica più popolata del paese, dove i boschi sono stati sostituiti da centri urbani, pascoli e coltivazioni. La provincia di Popayan (5 interventi, 2011) registra precipitazioni di 1550-2500 mm/anno; numero giorni piovosi tra 150-250; temperature medie annue tra 6 e 12 °C (AA. VV., 2005). I climogrammi di due stazioni meteorologiche nei pressi dei cantieri del 2011

## I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

Figura 3.98) mostrano l'assenza di stagioni secche (curva precipitazioni sempre sopra alle temperature). Il **contesto sociale** si caratterizza per povertà e disuguaglianze; l'esistenza di economie "informali"; la presenza di comunità locali (indigene, agricole, di quartiere) spesso ben organizzate e con forte senso di appartenenza. Si è riscontrato interesse per le attività formative e abitudine a quelle pratiche (*aprender haciendo*). Le comunità sono abituate al coinvolgimento in progetti volti a creare capacità autonome di gestione del territorio e di mitigazione dei rischi ambientali e sono presenti soggetti istituzionali che le rappresentano e coordinano (consigli indigeni, associazioni di agricoltori, comunità di quartiere, ecc.). Un caso particolare sono le *Reservas de la Sociedad Civil*, istituite in aree private ai sensi della *Ley n. 99/1993*, che conservano ecosistemi naturali e sono gestite secondo principi di sostenibilità e regolamentate in maniera partecipativa. Il *Rio Las Piedras* (alto bacino del *Rio Cauca*) conta una rete 64 riserve, di proprietà di 54 soci, per un totale di ca. 1380 ha, su 6626 ha di estensione del bacino (AA. VV, 2006).

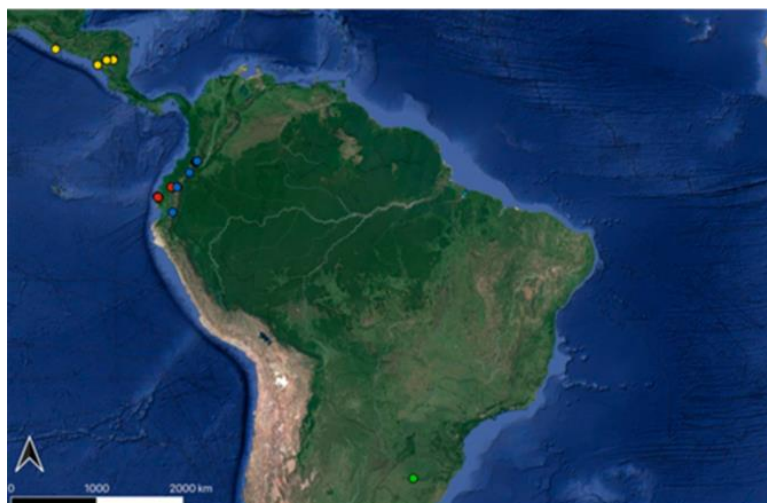


Figura 3.97 Ubicazione cantieri analisi di trasferibilità [blu: Ande Tropicali; giallo: Centroamerica; rosso: Area tropicale Pacifico; verde: Area subtropicale Atlantico] (da Maxwald M. et al., 2020).

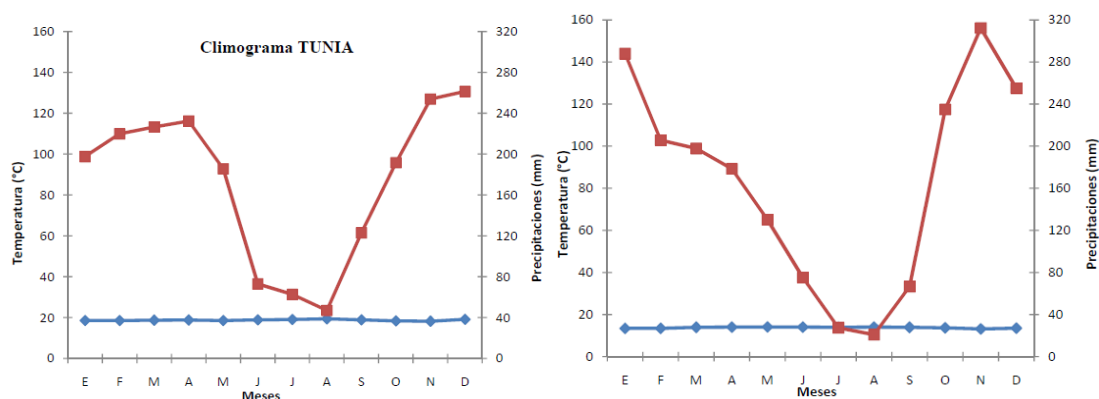


Figura 3.98 Climogrammi elaborati da dati di AA. VV. 2006 -Popayan (COL) - Loc. TUNIA, Quota 1800 m; °T media annua 18,8°C, Precipitazione annua 2075 mm (a sinistra) - Loc. PAISPAMBA, Quota 2450 m; °T media annua 13,8°C, Precipitazione annua 1992 mm (a destra).

### 3.6.3.2 Fase di progettazione

La progettazione è stata eseguita in due momenti: progettazione vera e propria e **selezione preliminare dei siti d'intervento**, effettuata con visite di campo e analisi, coadiuvati da tecnici locali e con modalità partecipative con le comunità. Sono stati ricercati siti con caratteristiche idonee per scopi didattici e di trasferibilità (fattibilità, dimensioni, obiettivi, visibilità, accessibilità, possibilità di monitoraggio, impatto sociale, ecc.). Matrici numeriche e analisi SWOT sono state elaborate per favorire oggettività e trasparenza. La Tab. 3.10 propone una scheda di selezione preliminare, utilizzabile secondo i dati disponibili e il dettaglio richiesto, con classici dati di progettazione, ma anche informazioni specifiche per obiettivi didattici e di trasferibilità. Anche la progettazione vera e propria è stata realizzata con tecnici locali. In termini di trasferibilità i risultati più efficaci si sono avuti con un alto grado di coinvolgimento nelle fasi di progettazione ed esecuzione. Formazione teorica e pratica di durata e intensità adeguate appaiono importanti per un trasferimento efficace di conoscenze. Per quanto riguarda le **competenze** di base dei **tecnici** da formare, l'interdisciplinarietà dell'I.N. richiede figure che ne comprendano i diversi aspetti. Il coinvolgimento di competenze differenti risulta importante per non settorializzare il trasferimento di conoscenze, viste anche le tempistiche generalmente limitate delle attività formative implementabili. La figura dell'*Ingeniero Forestal*, paragonabile al nostro Dottore Forestale è molto diffusa in America Latina. Se dotato di esperienze in difesa del suolo, competenze botaniche e familiarità con materiali e procedure di lavoro, sembrerebbe un profilo adatto a massimizzare il trasferimento di competenze. Considerando i contesti che hanno mostrato alta applicabilità, altri soggetti che potrebbero essere potenzialmente interessati ad **attività formative** sono: imprese stradali e acquedottistiche, enti pubblici e industrie di legno e carta (che si occupano spesso dell'intera filiera, dalla produzione di legno da cellulosa, gestendo direttamente i boschi, che possono richiedere interventi con legname da opera disponibili sul

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

posto, in particolare nelle strade di accesso). Una notazione merita l'**idioma**. L'America Latina è linguisticamente piuttosto omogenea, con netta prevalenza di spagnolo e la grande isola linguistica portoghese del Brasile. Le barriere linguistiche con i discendenti possono sfavorire il trasferimento di competenze, soprattutto con le maestranze, di solito meno scolarizzate. È quindi preferibile un profilo dei formatori anche con adeguate competenze linguistiche. La disponibilità di manualistica in lingua è anch'essa un ottimo supporto formativo e permette ai discendenti approfondimenti autonomi. La pubblicazione di manuali e linee guida in lingua, eventualmente tarati per aree geografiche, può favorire la trasferibilità. Tra le pubblicazioni esistenti si segnalano quelli multilingue dell'EFIB: *Linee guida europee dell'Ingegneria Naturalistica* (ing, ted, spa, ita, fra e ladino-2015) e il *Manuale Tecnico dell'Ingegneria Naturalistica* (ing, ted, spa, ita, fra, por, rus-2007), utili per termini tecnici poco comuni, anche se va considerato che possono esistere termini locali molto utilizzati. La progettazione non ha richiesto approfondimenti particolari di **norme tecniche locali**, ma non se ne esclude l'importanza per la trasferibilità. La verifica di compatibilità, anche rispetto norme di settore (ambientali, stradali, idrauliche, ecc.) e di sicurezza dei lavoratori, può rendersi necessaria come specifica componente della fase di progettazione. Si è già sottolineato il ruolo determinante della **botanica**. Approfondimenti su specie utilizzabili, distribuzione, velocità di crescita, capacità di radicazione e uso di prodotti per favorirne lo sviluppo potrebbero essere molto utili. Gli studi precedenti forniscono già dei primi elenchi, confrontabili con liste di flora locale e verificabili e modificabili con un tecnico locale, per valutare la presenza, ma anche la reperibilità (da selvatico o da vivaio). Le **condizioni climatiche** delle Ande tropicali possono favorire la trasferibilità, con interventi cantierabili per quasi tutto l'anno e periodi secchi assenti o ridotti, che favoriscono attecchimento e crescita delle piante e riducono i bisogni idrici di manutenzione. Le necessità di manutenzione possono essere differenti dal contesto europeo e potrebbero essere approfondite, per suggerire già in fase progettuale **piani di manutenzione**. Le stime effettuate in Petrone et al. (2014), mostrano **costi** concorrenziali per le opere di I.N., soprattutto con scavi manuali. Può però risultare necessario computarne alcuni, solitamente esclusi o computati diversamente nel contesto europeo: costi di alimentazione, trasporto, assicurazione e previdenza sociale del personale; supporto di tecnici locali; recinzioni di protezione dal bestiame; vigilanza notturna (anche armata) di particolari mezzi o attrezzature; acquisto di attrezzature poco reperibili (trapani di adeguata potenza, punte di trapano di diametro e lunghezza adeguate, generatori, ecc.). Da considerare già in fase progettuale, ai fini della trasferibilità, è anche il **ritorno economico** sulle comunità per forniture di manodopera, legname e piante (Tab. 3.11, include Nicaragua).

Tab. 3.10 Scheda di valutazione preliminare dei siti di intervento.

|  |   |   |                  |                         |
|--|---|---|------------------|-------------------------|
| <b>Localizzazione:</b> geografica, amministrativa, quota, esposizione  | <b>Descrizione sito:</b> ambito d'intervento, area di                                     | <b>Dati dimensionali:</b> lung. alt., profondità, sup., pendenze. (Schizzo in pianta e sezione del sito)  |                  |                         |
| <b>Dati vegetazione:</b> uso del suolo vegetazione attorno al sito (annotare specie arbustive e  | <b>Geologia:</b> litologia, geomorfologia, tipologia dissesto, parametri                  | <b>Cause probabili dissesto:</b> valutare tutte le possibili cause (acqua superficiale e nel terreno, pendenze, interazione con manufatti, attività |                  |                         |
| <b>Obiettivo intervento:</b> Protezione case, edifici pubblici, impianti, infrastrutture, coltivazioni, ecc.)  | <b>Informazioni climatiche e termo-pluviometriche:</b> zone climatiche, climogramma, ecc. | <b>Soluzioni proposte:</b> descrivere proposta e principali tecniche da utilizzare  |                  |                         |
|  |   | <b>Stima costi</b> secondo i prezzi locali  |                  |                         |
| <b>Analisi dei principali requisiti</b>  | <b>Matrice valutazione requisiti</b> (compilata per ipotesi con punteggi max)             |   |                  |                         |
| <b>Beneficiari</b> (residenti, utenti strade, agricoltori, comunità, scuole, ecc.)<br><b>Visibilità</b> (promozione dell'I.N.)<br><b>Accessibilità</b> | <i>Requisiti</i>  | <i>Peso</i>   | <i>Punteggio</i> | <i>Punteggio pesato</i> |
|  | Beneficiari   | 0,2   | 10               | 2                       |
|  | Visibilità  | 0,1   | 10               | 1                       |
|  | Accessibilità   | 0,2   | 10               | 2                       |
|  | Fattibilità tecnica   | 0,5   | 10               | 5                       |
|  | Totale  |   |                  | 10                      |
| <b>Analisi SWOT</b>  | <i>Diagnosi interna</i>   | <i>Diagnosi esterna</i>   |                  | Opportunità             |
|  | Punti di forza  | Punti di debolezza  |                  | Minacce                 |
| <b>Allegato fotografico:</b> allegare foto, se possibile anche con elementi dimensionali di raffronto come aste graduate                               |   |   |                  |                         |
| <b>Note:</b> .....   |   |   |                  |                         |

Tab. 3.11 Ritorni economici sulle comunità locali in termini percentuali dei costi di costruzione.

| (Forniture di manodopera, legname e piante) | Scavi manuali | Escavatore |
|---|---------------|------------|
| Colombia                                    | 86,0%         | 37,8%      |
| Ecuador                                     | 86,3%         | 34,1%      |
| Nicaragua                                   | 83,6%         | 26,8%      |

### 3.6.3.3 Fase di costruzione

La disponibilità di materiali è stata mediamente adeguata, con aspetti positivi, ma anche criticità e adattamenti necessari. Nei cantieri rurali manodopera e **materiali vivi** sono stati forniti dalle comunità (da selvatico le talee, da vivai le piante radicate); nei cantieri urbani (Quito-ECU) dalle *Administraciones Zonales* (Municipi metropolitani con competenze paragonabili ai Comuni), con potature del verde pubblico (talee) o forniture dai loro vivai (piante radicate). Si è fatto largo uso di **zolle erbose**, tradizionalmente usate su scarpate stradali e per il recupero di pascoli, fornite da comunità locali e dalle *Administraciones*. Sono comunque commercialmente diffuse nei vivai o prelevabili da selvatico. Su rilevati stradali (AA. VV., 1995) o su versanti globalmente stabili viene raccomandato l'uso di erbacee, anche con pendenze elevate, per la rapida e alta efficacia antierosiva, grazie alle capacità di attecchimento in pendenza e alla velocità di crescita (Figura 3.99, Figura 3.101

e Figura 3.102). I metodi di posa in opera, con picchetti e/o sostegni lignei, a formare tappeti continui, assicurano funzionalità già a fine lavori (Figura 3.93, Figura 3.94, Figura 3.99, Figura 3.101 e Figura 3.102). Le zolle sono state utilizzate anche negli spazi tra tronchi di palificate e grate per prevenire svuotamenti (Figura 3.91, Figura 3.92, Figura 3.93, Figura 3.94, Figura 3.104 e Figura 3.105). Le zolle erbose possono quindi sostituire rivestimenti vegetativi in stuoie, la cui reperibilità può essere difficoltosa. Biostuoie di produzione locale sono state comunque sperimentate, ma con risultati generalmente inferiori alle zolle. Tecnici e operai sono generalmente abituati all'**uso di materiale vegetale vivo con funzioni tecniche**, facilitandone l'impiego in cantiere. Si consideri l'esempio delle recinzioni "vive" (*cercas vivas*), in cui sono usati pali "vivi", capaci di propagazione vegetativa, che creano nel tempo una fitta siepe (Figura 3.100). Rispetto a recinzioni "morte" si raggiunge l'obiettivo principale (recintare), ma se ne ottengono altri aggiuntivi grazie a un approccio NBS: disponibilità locale di materiale a basso costo, manutenzioni ridotte sul lungo periodo, protezione del suolo, creazione di corridoi ecologici, assorbimento di CO<sub>2</sub>, abbattimento polveri stradali, protezione dal vento; talvolta si usano anche specie edibili con proprietà medicinali per il bestiame. Il principio è stato mutuato usando le specie delle *cercas vivas* come **paleria "viva"**, da impiegare come piloti verticali delle palizzate. La tecnica è molto diffusa con paleria in bambù (*caña guadua*), ma senza uso standardizzato di piloti vivi o inserimento di piante. Lo schema con piloti vivi è stato estesamente riproposto dal gruppo di tecnici formato a Popayan (COL) nelle sistemazioni di bacino del Rio Las Piedras, modificato per favorire il trasporto in aree impervie e la velocità e facilità esecutiva, grazie all'uso di leggeri correnti orizzontali in bambù e inserendo talee solo nella parte alta (Figura 3.95). Nei cantieri è stato usato quasi esclusivamente **legname** di eucalipto, specie alloctona e spesso invasiva nelle Ande tropicali, senza trovare alternative per paleria di grosso diametro. La fornitura di altri tipi di legname può presentare difficoltà, considerando che i boschi autoctoni sono fortemente minacciati. Nei cantieri urbani era disponibile paleria stagionata, ma in quelli rurali i costi di trasporto avrebbero inciso troppo. Si è preferita la fornitura sul posto dalle comunità locali, anche per favorire ricadute economiche. Il legname fresco è stato trattato prima della posa con immunizzante ai sali di boro per aumentarne la durabilità (già localmente usato allo scopo col bambù). Talvolta per ottenere pali di sezione regolare e per il trasporto a trazione animale dai siti di taglio, i tronchi più grossi sono stati spaccati in lunghezza in 2 o 4 parti, ottenendo paleria di sezione triangolare e semicircolare. Con alcuni adattamenti la disponibilità monospecifica di grossa paleria non è stata difficoltosa, ma potrebbe diventarlo in caso di scarsità dell'eucalipto. Può quindi essere utile approfondire l'uso di legname alternativo, tra cui il **bambù**, che costituisce certamente un'opportunità. I pali di *guadua* sono lunghi, uniformi e leggeri e, se ben lavorati, duri e durevoli. Sono usati anche in edilizia (ponteggi, tettoie, ecc.) e sono molto interessanti negli impieghi in I.N., anche come paleria viva.

Perdono però durezza e durabilità se interrati e hanno diametri limitati (8-14 cm), rendendoli poco adatti come elementi strutturali nelle opere di consolidamento. Può quindi essere utile approfondirne caratteristiche di durabilità in terra; possibilità di impiego di due o più elementi accoppiati (a formare diametri maggiori) e le relative modalità di giunzione e durabilità dei giunti. La durabilità degli elementi lignei strutturali risulta comunque una criticità in parte superabile dalla rapidità di crescita della vegetazione. Alcune difficoltà si sono verificate nelle aree rurali anche per altri materiali usuali nel contesto europeo, come geotessili e tubi fessurati per **dreni**. Per la tuberia si sono adattati tubi normali forati in cantiere. Il pietrame di grossa pezzatura può essere reperito sul posto (mucchi di pietre, da fiume o da frane, sono spesso in vendita ai bordi delle strade), ma i costi di trasporto della ghiaia possono risultare elevati, per cui i dreni sono stati talvolta riempiti anche con ramaglie. Considerando l'importanza dei drenaggi, potrebbe essere utile approfondire efficacia, efficienza e fattibilità di dreni da realizzare in situazioni di materiali scarsi, tenendo anche presente che i processi evo-traspirativi si attivano velocemente, per la rapida crescita delle piante. In generale i **trasporti** possono essere un elemento critico in fase esecutiva. I **sottoservizi**, in particolare nei cantieri urbani, possono creare difficoltà in fase esecutiva e possono risultare poco valutabili in fase progettuale. Sono comuni soprattutto acquedotti e fognature; altre tipologie sono poco diffuse o del tutto assenti, in particolare in quartieri periferici o zone rurali. Le implicazioni sulla **sicurezza dei lavoratori**, in paesi con standard generalmente diversi dal contesto europeo, sono particolarmente importanti e gli approfondimenti su procedure e norme tecniche potrebbero essere utili, per valutarle già in fase progettuale, in particolare per i rischi di cadute dall'alto e quelli connessi agli **scavi**. L'ultimo aspetto assume particolare rilevanza, se si considera che l'uso di escavatori nelle zone rurali può non essere scontato, a causa dei costi di trasporto dei mezzi ai siti di intervento (che può durare anche 1 o più giorni) e degli eventuali costi di vigilanza (anche armata). È usuale contrattare operai sul posto per scavi manuali. Un caso particolare è la *minga*, pratica tradizionale di lavoro comunitario basata sull'aiuto reciproco, diffusa nelle comunità andine. Una *minga* può essere convocata per ripulire un'area della città, costruire l'abitazione di un vicino oppure per lo scavo di posa di tubazioni, con cui l'azienda acquedottistica porterà "in cambio" acqua al villaggio. Nei cantieri rurali sono state convocate *mingas* dalle comunità per gli scavi, in quelli urbani erano disponibili escavatori. In generale si possono avere difficoltà di reperimento e/o costi elevati anche per altri **macchinari e attrezzature**: apprestamenti di sicurezza, dispositivi di protezione individuale, generatori elettrici, trapani di potenza adeguata, punte per legno di lunghezza e diametro adeguati (si consideri che i tondini in ferro sono solitamente commercializzati in pollici, mentre le punte anche in millimetri, complicando gli accoppiamenti foro-tondino). Gli aspetti di **logistica e organizzazione di cantiere**,



I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

nel loro insieme, potrebbero essere considerati una componente aggiuntiva dell'analisi di trasferibilità.



Figura 3.99 e Figura 3.100 Zolle erbose su rilevato stradale (Quito-ECU) e recinzioni “vive” (Popayan-COL).

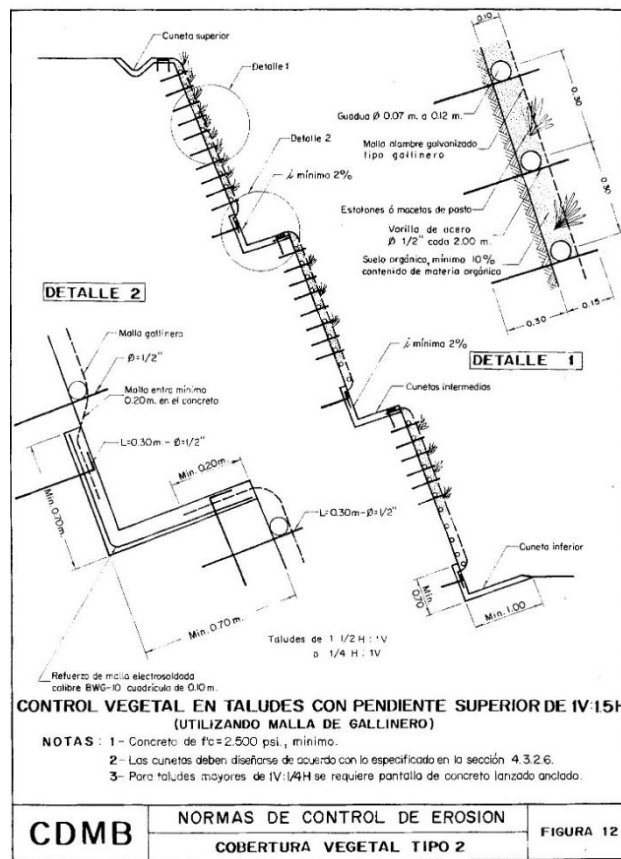
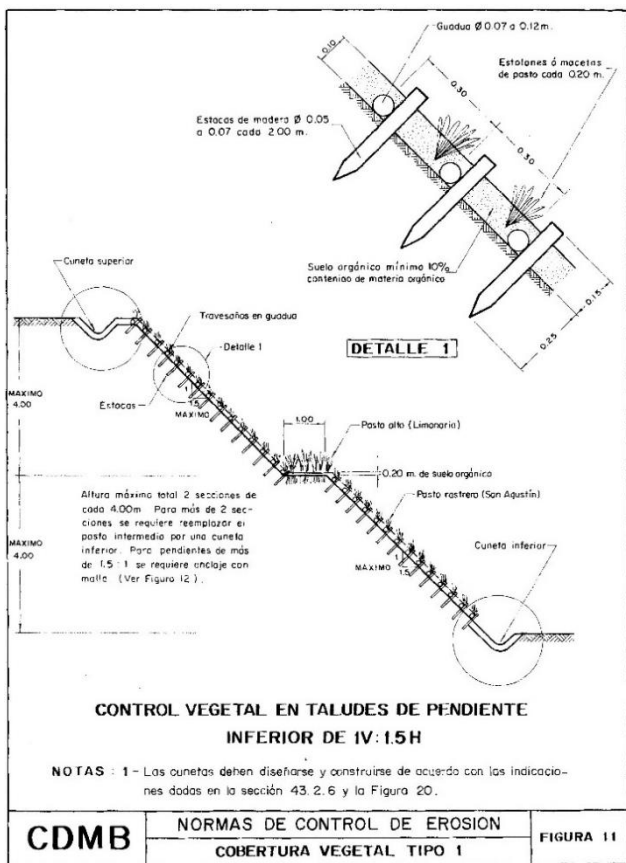


Figura 3.101 e Figura 3.102 Schemi di intervento su rilevati stradali con specie erbacee (AA. VV, 1995).

3.6.4 Conclusioni

Un intervento di Ingegneria Naturalistica viene progettato e realizzato, secondo un approccio Nature Based Solution, adattandosi in maniera più o meno marcata alle condizioni sito-specifiche e ai contesti

locali, Tale caratteristica determina contemporaneamente opportunità e limiti. L'I.N. si dimostra flessibile e adattabile a diverse situazioni, ma può richiedere procedure di trasferimento per applicazioni in differenti contesti geografici e ambientali. Si pensi semplicemente alle differenze in Italia - tra interventi realizzati a Nord o a Sud; su una costa sabbiosa o in alta montagna - rispetto a specie e materiali da impiegare, attrezzature e macchinari disponibili, modalità di lavorazione, trasporti, logistica, implicazioni per la sicurezza dei lavoratori. Nel presente lavoro, integrando studi precedenti (*Petrone et al., 2014; Maxwald et al. 2020*), sono state presentate nel dettaglio le esperienze realizzate nelle Ande tropicali. Un numero di casi limitato (10), ma significativo, che ha permesso di evidenziare punti di forza e di debolezza, opportunità e minacce per la trasferibilità dell'I.N. nelle Ande tropicali (Tab. 3.12). Sono stati inoltre individuati ambiti di sviluppo e possibili approfondimenti, che possono favorire la trasferibilità dell'I.N. in un contesto geografico che presenta similitudini con diverse aree dell'America Latina (Tab. 3.13). La disciplina si conferma altamente applicabile nell'area, evidenziando aspetti che ne favoriscono la trasferibilità, la fattibilità e la sostenibilità ambientale e socioeconomica, ma sottolineando anche criticità che ne possono ostacolare la diffusione. La missione effettuata nel 2015 a Pasto (COL), ha permesso di verificare sul campo l'efficienza del processo di trasferibilità nella Colombia meridionale, implementato dal gruppo di ricerca del DAGRI, tra il 2010 e 2011, con eventi divulgativi, studi, monitoraggi e attività formative teoriche e pratiche anche intensive. Durante la missione sono state supervisionate le fasi finali di un intervento (Figura 3.10304, Figura 3.105) progettato, diretto e realizzato da parte del gruppo di tecnici e operai formati nel 2011 a Popayan (COL) e sono state raccolte informazioni, con interviste e documentazione fotografica, dei numerosi interventi di sistemazione di bacino e su scarpate stradali, che hanno realizzato tra il 2011 e il 2015 (Figura 3.95 e Figura 3.96). Si è quindi avuta diretta conferma di un buon grado di trasferimento delle competenze, della fattibilità tecnica degli interventi, di un buon grado di replicabilità e di sostenibilità socioeconomica (considerando forniture di materiali e manodopera locali). Si sono riscontrate anche migliorie e modifiche delle tecniche, dei materiali e delle metodologie di lavoro, elaborate direttamente dagli attori locali, che mostrano un processo di adattamento autonomo al contesto locale. Monitoraggi su larga scala degli ormai numerosi interventi nella Colombia meridionale potrebbero dare utili informazioni sull'efficacia di lungo periodo, sui processi di disseminazione attivati e sull'adattamento e autonoma evoluzione locale delle tecniche, fornendo utili indicazioni per progetti futuri e favorendo un processo che da trasferimento potrebbe diventare anche di contaminazione tra Vecchio e Nuovo Mondo.



Figura 3.104 e Figura 3.105 Intervento realizzato da tecnici e maestranze locali nel 2015-Pasto (Nariño-COL).

Tab. 3.12 Analisi SWOT degli interventi di I.N. realizzati nelle Ande tropicali.

|                              | Diagnosi interna   |   | Diagnosi esterna   |   |
|------------------------------|--|---|--|---|
|                              | Punti di forza   | Punti di debolezza  | Opportunità  | Minacce   |
| <b>Fase di progettazione</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Botanica</li> <li>-Condizioni climatiche (manutenzioni ridotte, rapida crescita piante, cantierabilità per tutto l’anno)</li> <li>-Costi concorrenziali.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Barriere linguistiche</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Selezione preliminare siti di intervento (fattibilità, visibilità, replicabilità, impatto sociale)</li> <li>-Competenze dei tecnici da formare (<i>Ing. forestal</i>)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Norme tecniche delle costruzioni, settoriali e sulla sicurezza</li> </ul>   |
| <b>Fase di esecuzione</b>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Disponibilità di materiale vegetale vivo</li> <li>-Famigliarità all’uso di piante con funzioni tecniche</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Barriere linguistiche</li> <li>-Trasporti in aree rurali</li> <li>- Macchinari/attrezzature</li> <li>-Sicurezza lavoratori</li> <li>-Organizzazione e logistica cantiere</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Uso materiali viv (zolle erbose, paleria “viva”, bambù)</li> <li>-Fornitura materiali e manodopera locale e relativo ritorno economico</li> </ul>                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Disponibilità di legname di grosso diametro</li> <li>-Disponibilità di materiale per drenaggi soprattutto in aree rurali</li> <li>-Altri costi oltre a quelli usuali di costruzione</li> <li>-Presenza di sottoservizi, soprattutto in aree urbane</li> </ul> |

Tab. 3.13 Potenziali tematiche di interesse (T) e ambiti di sviluppo (A) dell'I.N. nelle Ande tropicali.

| Fase di progettazione   | Fase di esecuzione                     |            |
|---|--|------------|
| Studi e monitoraggi botanici ( <i>specie utilizzabili, distribuzione, velocità di crescita, capacità di radicazione, uso di prodotti per favorirne lo sviluppo</i> )  |  | <b>T</b>   |
| Necessità manutentive ( <i>Piano di manutenzione</i> )  |  | <b>T</b>   |
|   | Organizzazione e logistica di cantiere | <b>T</b>   |
| Ambiti di buona applicabilità: <i>scarpate stradali, quartieri periferici, bacini idrografici usati per la produzione di acqua potabile</i>   |  | <b>A</b>   |
| Figure professionali potenzialmente interessate ad attività formative: <i>comunità locali, tecnici di imprese stradali e acquedottistiche, di enti pubblici e delle industrie di legno e carta</i>          |  | <b>A</b>   |
| Manualistica e linee guida in lingua  |  | <b>T/A</b> |
| Norme tecniche delle costruzioni, settoriali e sicurezza lavoratori   |  | <b>T</b>   |
| Specie e disponibilità di legnami utilizzabili per paleria di grosso diametro e uso del bambù ( <i>durabilità in terra; impiego di elementi accoppiati, modalità di giunzione e durabilità dei giunti</i> ) |  | <b>T/A</b> |
| Efficacia e efficienza di diverse tipologie di dreni e loro fattibilità in situazioni di materiali scarsi   |  | <b>T</b>   |
| <b>Fase d'uso</b>   |  |            |
| Monitoraggi efficienza lungo periodo, disseminazione, adattamento e evoluzione I.N. in Colombia meridionale   |  | <b>T/A</b> |

**Bibliografia Par.3.6**

AA. VV. "Normas Técnicas para el Control de Erosion", Corporación Autónoma Regional para la de de la Meseta de Bucaramanga (CDBM). Bucaramanga (1995).

AA. VV. "Atlas climatológico de Colombia", Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2005)

AA. VV. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Rio Las Piedras", Fundación Procuencia Rio Las Piedras. Popayan. (2006a)

AA. VV. PLAN DE ORDENACION Y MANEJO DE LA SUBCUENCA RIO MOLINOPUBUS; Corporación Autónoma Regional del Cauca y Fund. Procuencia Rio Las Piedras. Popayan. (2006b)

Borja P., Vanacker V., Alvarado D., Govers G., Restoration of badlands through applying bio-engineering techniques in active gully systems: Evidence from the Ecuadorian Andes XY603 EGU2012-6684 (2012).

Dolowitz, D.P.; Marsh, D. Learning from Abroad: The Role of Policy Transfer in Contemporary Policy-Making. Governance 2000, 13, 5–23, [onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/0952-1895.00121](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/0952-1895.00121)

*I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Florineth, F., Stabilization of gullies with soil — bio-engineering methods in the Alps and in Nepal, in: *Gully Erosion under Global Change*, a cura di: Li, Y., Poisen, J., and Valentin, C., Sichuan Science and Technology Press, Chengdu, China, 315—339 (2004).

Ghimire, S. K. and Karki, K. K., Mitigation of soil erosion hazards through bio-engineering: a case study of Mid-Himalaya, Nepal, *International Conference Eco-Engineering: "Use of vegetation to improve slope stability"*, Thessaloniki, (2004).

Guía Práctica para la implementación de medidas de adaptación de gestión de riesgo para el fortalecimiento técnico administrativo en la cuenca alta del Rio Cauca, Fund. Procuenca Rio Las Piedras (Papayan). ISBN 978-958-58063-0-6 (2011).

Gyergyay, B.; Boehler-Baedeker, S. *Transferability Analysis: Innovative Sustainable Urban Solutions from Europe, Singapore, China and Latin America*. Rupprecht Consult. 2014. Available online: [www.rupprecht-consult.eu/uploads/tx\\_rupprecht/SOLUTIONS\\_D1.3\\_Transferability\\_Analysis.pdf](http://www.rupprecht-consult.eu/uploads/tx_rupprecht/SOLUTIONS_D1.3_Transferability_Analysis.pdf) (accessed on 30 August 2020).

Lammeraner W., Rauch, H. P., and Laaha, G., Implementation and monitoring of soil bioengineering measures at a landslide in the Middle Mountains of Nepal, *Plant Soil*, 278, 159– 170, (2005).

M. Maxwald, C. Crocetti, R. Ferrari, A. Petrone, H. P. Rauch, F. Preti *Soil and Water Bioengineering Applications in Central and South America: A Transferability Analysis.. Sustainability* 2020, 12(24), 10505; <https://doi.org/10.3390/su122410505> (2020)

Petrone, A., *Realización de obras de mitigación con técnicas de ingeniería naturalistica en el Cerro Musún- Río Blanco*, published in the framework of the DIPECHO Project "Sistema de prevención antes desatres naturales en 7 comunidades rurales del area del cerro Musún", Nicaragua, (2006).

Petrone A., Ferrari R., Preti F., *La riscoperta dell'America*, Acer-II Verde Editoriale, 05/2005, 74-79, (2005)

Petrone, A. and Preti, F. *Ingenieria Naturalistica en Centroamerica*, Manuali Tecnici per la Cooperazione allo Sviluppo, Istituto Agronomico per l'Oltremare, Società Editrice Fiorentina, Firenze, 108 pp., ISBN 88-89507-02-0, (2005).

Petrone, A., Matassoni, P., and Preti, F., *Sperimentazioni con talee di specie autoctone in interventi di Ingegneria Naturalistica in Nicaragua*, Quaderni di Idronomia montana, Nuova Editrice Bios, Castrolibero, 26, 477-488, (2006).

Petrone, A. and Preti, F., Suitability of soil bio-engineering techniques in Central America: a case study in Nicaragua, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12 ,1241-1248, (2008).

Petrone, A. and Preti, F., Soil bio-engineering for risk mitigation and environmental restoration in a humid tropical area, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 239–250, (2010).

Petrone A., Identificación de practicas inovadoras para la mitigación del riesgo a nivel regional latinoamericano con enfoque de ingeniería naturalística, Informe CRIC, (2013).

Preti F., Petrone A., Soil bio-engineering for watershed management and disaster mitigation in South America: local species survivability and growth rates in Ecuador, *IFOREST*, ISSN:1971-7458, (2012).

Preti F., Petrone A., Ferrari R., Crocetti C. Ingegneria Naturalistica in America Latina: stato dell'arte e sperimentazioni, in *QUADERNI DI IDRONOMIA MONTANA 31* “Monitoraggio, modellazione e gestione sostenibile dei processi erosivi nei territori agricoli, collinari e montani” a cura di F. Mannocchi e F. Todisco. EDIBIOS (ISBN 978-88-97181-29-3) (2014)

Rauch H.P., Rey F., Graf F., Preti F., NH10.4/BG2.18/GM4.4/SSS1.12 – Mitigating against natural hazards: Biological contribution to sustainable soil bio-engineering in a changing world (co-organized), European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 03–08 April (2011).

Rauch H.P., Sutili F., Hörbinger S., Installation of a Riparian Forest By Means of Soil Bio Engineering Techniques –Monitoring Results from a River Restoration Work in Southern Brazil, Scientific reserch ; <https://dx.doi.org/10.4236/ojf.2014.42022> (2014)

Reubens, B., Windey, J., Danjon, F., Poesen, J., and Muys, B., Root system architecture of woody species important for erosion control in Tigray, Northern Ethiopia, *Proceedings 4th International Symposium on Dynamics of Physiological Processes in Roots of Woody Plants*, 16-19, Bangkor, UK September (2007).

Rivera, H. R. and Sinisterra, J. A., *Uso social de la Bioingeniería para el control de la erosión severa*, CIPAV-CVC, (2006).

Schiechl, H. M., *Vegetative and soil treatment measures*, FAO watershed management field, (1985).

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Sutili, F. J., Durlo, M. A., and Bressan, D. A., Bio-technical capability of ``sarandi-branco'' (Phyllanthus sellowianus mull. Arg.) and ``vime'' (Salix viminalis L.) for re-vegetation water course edges, Ciencia Florestal, Santa Maria, Brasile, 14(1), 13-20, ISSN 0103-9954, (2004).

Stokes A., Sotir R., Chen W., Ghestem M., Soil bio- and eco-engineering in China: past experience and future priorities, Ecol. Eng., 36, 247-257, (2010).

www.parquenacionales.gov.co

**Ringraziamenti:** Si ringrazia l'Ing. For. David Meneses Perdomo di Popayan (COL) per le informazioni e le foto fornite.

### **Finanziamenti**

(a) *“Territorios sostenibles y adaptados/planificación a escala de Paisaje-PNUD COL/88087* (Colombia), UNDP (United Nation Development Program). (2015) (b) *“Vulnerability estimation and Disaster Risk reduction at urban level in Ecuador”*. (Ecuador). ECHO (European Community Humanitarian Office). (2012). (c) *“Joint Programme for Ecosystems integration and climate change adaptation in the Macizo Colombiano”* and *“ART-REDES Programme”*. Popayan/Pasto. UNDP (United Nation Development Program). (2010-2011). (d) *“Disaster Risk Reduction in Quito”*. Quito. ECHO. (2010-2011). (e) *“Disaster Risk Reduction in Santo Domingo de los Tsáchilas”*. (Ecuador). ECHO. (2010). (f) *“Increasing the coping capacities toward natural hazards at a local and municipal level of the CONRED in three municipalities in the Department of Escuintla”* (Guatemala). ECHO. (2009-2010) (g) *Río Grande of Matagalpa: Risk reduction for landslides and floods in the Municipality of Matagalpa*. (Nicaragua). ECHO. (2009). (g) *“Disaster Risk Reduction in the South of Manabi”*. (Ecuador). ECHO. (2008). (h) *“Fortalecimiento de las capacidades de preparación para la respuesta a nivel local y municipal del sistema CONRED en 5 distritos municipales Departamento de San Marcos”*. San Marco (Guatemala) ECHO. (2007). (i) *“Land management for DRR, environmental recovery and sustainable use of natural resources”*. León (Nicaragua). Università di Firenze. (2007). (j) *“Natural disaster preparedness system of the rural communities of Cerro Musún Area”*. Rio Blanco (Nicaragua). ECHO. (2005-2006). (k) *“Land management for Disaster prevention, environmental recovery and sustainable use of natural resources”*. León (Nicaragua). Università di Firenze. (2005). (l) *“Land Management and Protection- Natural Disasters Prevention and Management”*. León (Nicaragua). AUACS (Associazione Universitaria Cooperazione Sviluppo), Università di Firenze. (2004). (m) *“Support to Sustainable and concerted development in the sectors of urban planning, waste management and Disasters Prevention”*. León (Nicaragua). Università di Firenze. (2002).

## 4 L'INGEGNERIA NATURALISTICA E LE ACQUE

### 4.1 IL DIMENSIONAMENTO IDRAULICO DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA (V. Ferro)

#### 4.1.1 Introduzione

L'Ingegneria Naturalistica è un insieme di tecniche costruttive che privilegiano nella realizzazione dei manufatti l'elemento vegetale vivo, eventualmente, in unione con elementi inerti di varia origine (legname, pietrame, geostuoie, geogriglie, acciaio, etc.), per consentire un'efficienza sistematoria immediata delle opere realizzate (Ferro, 2019). L'utilizzazione come materiale da costruzione di piante viventi, di parti di piante o di intere biocenosi vegetali, pone comunque il problema di garantire la stabilità di un versante o di una sponda fluviale facendo ricorso anche a materiali inerti che collaborano e aiutano l'elemento vegetale fino a quando il suo apparato radicale non è capace di esercitare una efficace ed autonoma azione di trattenuta e consolidamento. Dopo il periodo di attecchimento, la componente viva del manufatto, affermandosi, accresce la sua funzionalità e svolge la sua funzione di stabilizzazione e consolidamento mentre la componente inerte, che ha assicurato la stabilità durante il periodo di sviluppo della vegetazione e del suo apparato radicale, perde gradualmente la sua importanza.



*Figura 4.1 Vista di alvei fluviali con vegetazione sul fondo e le sponde dopo il passaggio di una piena.*

La vegetazione in alveo, specie durante gli eventi di piena dei corsi d'acqua (Figura 4.1), con la sua struttura ed il suo apparato fogliare è comunque in grado di ridurre la velocità della corrente e la capacità di convogliamento del corso d'acqua stesso.



## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Nella valutazione delle resistenze al moto in alvei con vegetazione sul fondo e sulle sponde è necessario quantificare sia gli effetti dissipativi diretti, dipendenti dagli elementi che costituiscono la scabrezza (forma, dimensione, disposizione e caratteristiche biomeccaniche degli elementi) sia quelli imputabili alla riduzione della sezione idrica disponibile per il deflusso.

In questi ultimi anni hanno avuto diffusione gli interventi di sistemazione idraulico-forestale che seguono i criteri della ricostruzione morfologica degli alvei, progettati ed eseguiti sulle base delle conoscenze acquisite sulle condizioni di formazione e stabilità di unità morfologiche naturali come gli *step-pool*. La circostanza che un alveo con unità *step-pool* possa considerarsi il risultato del processo di naturale evoluzione che conduce alla stabilità plano-altimetrica del torrente, è stata il principio ispiratore di alcuni criteri di dimensionamento delle briglie in massi. La necessità, poi, di non interrompere la continuità morfologica di un alveo naturale, per permettere l'interscambio biologico tra la zona a monte e quella a valle di un manufatto trasversale, ha incentivato poi l'impiego delle rampe in pietrame negli interventi di sistemazione del tratto montano di un corso d'acqua.

In tutti i casi in esame la progettazione e la realizzazione delle opere devono essere fondate sulla conoscenza dei processi, sia fluviali sia di versante, che consentono di stabilire gli effetti in assenza di sistemazione e portano ad individuare gli interventi adeguati al caso in esame.

Il termine "Ingegneria" implica, inoltre, la necessità di utilizzare, per l'attuazione di queste tecniche costruttive, dati tecnici e criteri di dimensionamento per pervenire alla formulazione di un progetto.

Nel seguito del Capitolo sono introdotti gli elementi essenziali sulla resistenza al moto in alvei in presenza di vegetazione ed la relativa determinazione di un appropriato indice di resistenza con il fine di determinare la scala delle portate di una sezione fluviale. Vengono poi presentati i criteri di dimensionamento delle briglie in massi e delle rampe in pietrame e i criteri e le tecniche applicate nel caso di interventi di riconversione di briglie esistenti in rampe.

### **4.1.2 Influenza della vegetazione in alveo**

#### *4.1.2.1 Studio del comportamento idraulico degli elementi di vegetazione*

L'introduzione di vegetazione all'interno dell'alveo con l'intento di realizzare un rivestimento spondale (con talee di salice, con copertura diffusa di ramaglia viva, con copertura diffusa di astoni, con copertura diffusa di culmi di canne), una protezione al piede della sponda (con fascinata viva, con viminata viva) o una difesa spondale (con gradinata viva di salici, con palificata doppia viva) determina effetti sia in termini di resistenze al moto che, conseguentemente, di riduzione della capacità di convogliamento. Il comportamento idraulico del singolo elemento di vegetazione è differente a seconda che esso sia completamente *sommerso* oppure *emergente* dalla corrente e, in ciascuna delle due configurazioni deve essere distinto il caso di elemento *flessibile* da quello di

elemento *rigido*. Dal punto di vista applicativo la vegetazione di tipo erbaceo viene considerata di tipo flessibile e la sua altezza media, essendo generalmente contenuta, determina più frequentemente una condizione di completa sommersione. La vegetazione di tipo arbustivo si presenta, invece, come rigida e può essere sia emergente che sommersa; al passaggio di una piena la vegetazione di tipo rigido può inflettersi completamente (Eq.5.1), spesso spezzandosi ed adagiandosi sul fondo alveo. Quando gli elementi di vegetazione sono flessibili assumono una configurazione dipendente dall'azione idrodinamica della corrente e dalla rigidità flessionale degli elementi e sono stati osservati sperimentalmente tre differenti configurazioni: 1) elementi eretti (*erect*) che non mutano la loro posizione nel tempo; 2) elementi oscillanti (*waving*) che variano la loro posizione nel tempo e 3) elementi che assumono una posizione stabilmente inflessa e prona (*prone*) (Eq.5.1).

Nel caso di elementi rigidi, il comportamento idraulico della scabrezza di fondo presenta forti analogie con quello relativo al caso di fondo fisso, costituito da elementi di scabrezza di nota geometria (emisfere, cubi, ghiaia, etc.), in condizioni di macroscabrezza (*Baiamonte, Ferro, 1997*), (*Ferro, Giordano, 1990, 1991*). Per questo tipo di vegetazione la determinazione dell'indice di resistenza si conduce sulla base delle proprietà di resistenza idrodinamica della vegetazione immersa nella corrente, in analogia al caso dei corpi immersi in un flusso. In altri termini, la resistenza offerta dalla vegetazione rigida al moto della corrente è imputabile al livello di sommersione, che condizione la superficie  $A$  della sezione retta investita (superficie che assorbe la quantità di moto), dal quadrato della velocità  $V$  della corrente e dal coefficiente di resistenza idrodinamica  $C_d$  che varia con la forma dell'elemento della vegetazione e con il numero di Reynolds della corrente. Il valore medio dello sforzo tangenziale al fondo  $\tau_o$  per una corrente in moto uniforme viene calcolato con la seguente relazione:

$$\tau_o = \frac{1}{2} C_d \left( \frac{A}{a} \right) \rho V^2 \quad (5.1)$$

in cui si è indicato con  $\rho$  la densità dell'acqua e con  $a$  la superficie del fondo alveo interessata dalla presenza della vegetazione. In altri termini, la tensione di trascinamento della corrente è pari, in condizioni di equilibrio, all'azione di resistenza idrodinamica globalmente esercitata dalla vegetazione presente sulla superficie  $a$  del fondo alveo.

Tenuto conto che per definizione  $\tau_o = \rho u_*^2$ , in cui  $u_* = \sqrt{g R i}$  è la velocità d'attrito,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $R$  il raggio idraulico e  $i$  la pendenza del fondo alveo, il coefficiente di resistenza di Darcy-Weisbach  $f$  assume la seguente espressione:

$$f = 8 \left( \frac{u_*}{V} \right)^2 = 4 \left( \frac{C_d A}{a} \right) \quad (5.2)$$

La determinazione dell'indice di resistenza richiede, pertanto, una apposita sperimentazione che è finalizzata, per una fissata vegetazione di cui occorre, al variare del livello idrico, stabilire la

superficie assorbente  $A$ , a misurare la velocità media e la forza idrodinamica  $F_d$ , espressa dal secondo membro della (5.1), per pervenire alla determinazione del corrispondente  $C_d$ . Per un fissato livello idrico nel canale, nel caso di corpo rigido (ad es. un cilindro) la superficie assorbente è costante e tale risulta anche il prodotto  $C_d A$ , mentre nel caso di vegetazione flessibile le misure di Fathi e Kouwen (1997) hanno rivelato che il suddetto prodotto  $C_d A$  risulta una funzione decrescente della velocità della corrente. Questo comportamento è spiegabile tenendo conto che la vegetazione flessibile, all'aumentare della velocità, tende a mutare la sua forma diventando maggiormente *streamlined* (si manifesta un effetto di riduzione sia su  $A$ , dipendente dalla inflessione della vegetazione, sia sul coefficiente  $C_d$ ). Le misure di Fathi e Kouwen (1977) e quelle successive di Kouwen e Fathi (2000), utilizzando rami di conifere, hanno dimostrato che la resistenza idrodinamica  $F_d$  cresce linearmente con la velocità media della corrente. In definitiva, per un fissato livello idrico, ad una vegetazione flessibile ( $F_d \propto V$ ) corrisponde rispetto ad una vegetazione rigida ( $F_d \propto V^2$ ) una minore resistenza idrodinamica con una conseguente influenza sulla capacità di convogliamento.

Armanini et al. (2005) hanno condotto una sperimentazione di laboratorio finalizzata a misurare le sollecitazioni trasmesse (tre componenti della forza e momento flettente) ad un ramo di salice (*Salix Alba*) alto 2.5 m (*tall Salix*) o 1 m (*small Salix*). Le misure condotte nel caso di “tall Salix” hanno evidenziato un comportamento tipico del caso rigido e hanno dimostrato che i valori del coefficiente  $C_d$  sono confrontabili con quelli di un cilindro avente un diametro pari a quello della pianta. Il comportamento idrodinamico del caso “tall Salix” potrebbe, pertanto, essere approssimato a quello di una serie di cilindri. Nel caso “small Salix” è stato riscontrato un comportamento differente nel caso di vegetazione emergente (tirante idrico  $h$  minore dell'altezza della vegetazione), per cui la relazione tra  $F_d$  e  $V$  è parabolica (comportamento rigido) dal caso di vegetazione completamente sommersa in cui la resistenza idrodinamica cresce linearmente con la velocità (comportamento flessibile). Le esperienze effettuate in assenza ed in presenza di foglie sui rami hanno evidenziato la rilevante influenza di questi elementi nella valutazione delle resistenze dato che in assenza di foglie è stata rilevata una riduzione fino al 40%, rispetto al caso in cui le foglie sono presenti, della resistenza idrodinamica.

Le esperienze sin qui descritte hanno tutte l'inconveniente di essere effettuate su porzioni di piante o su singoli rami e prescindono, pertanto, dalla interazione tra elementi vegetali vicini. Questa condizione è rappresentativa di una condizione in cui ciascuna pianta può considerarsi isolata cioè quando i valori della concentrazione (numero di piante per unità di superficie) sono contenuti e quindi nella valutazione delle resistenze al moto si può prescindere dai fenomeni di interferenza tra le singole piante.

Chiaradia et al. (2006) hanno condotto alcune prove, su un canale di grande scala a sezione trapezia con larghezza al fondo pari a 2 m, scarpa 2:1, lunghezza 100 m e pendenza pari circa al 1%, impiegando piante, o parti di piante, di ontano nero, di salice bianco e di salicome. Il fondo del canale era in calcestruzzo mentre le sponde erano del tipo a scogliera. Le prove sono state effettuate, in una condizione di moto permanente che ha richiesto la misura di livello idrico in cinque sezioni trasversali, con una densità (numero di piante per m<sup>2</sup> di superficie di fondo) variabile tra 2.5 e 18.7 ed in presenza o in assenza di foglie. Le misure sin qui effettuate hanno mostrato che, anche a parità di caratteristiche della vegetazione (specie, densità), l'effetto della presenza della vegetazione dipende dalle caratteristiche della corrente (sommersione relativa, velocità media, numero di Reynolds). Le prove hanno evidenziato, a parità di tipo di materiale una influenza della densità di impianto e del grado di copertura vegetale.

#### 4.1.2.2 Resistenze al moto in presenza di vegetazione

Lo studio del moto uniforme delle correnti liquide nei canali artificiali e nei corsi d'acqua naturali è rivolto alla determinazione della legge di distribuzione delle velocità nella sezione trasversale, e quindi degli sforzi tangenziali e della legge di resistenza al moto.

I rilievi del profilo di velocità nel caso di vegetazione flessibile sommersa hanno evidenziato che, oltre alla tipica forma S-shaped (Bathurst, 1988) della distribuzione di velocità (Carollo et al., 2001), (Kouwen et al., 1969), per valori della quota  $y < h_s$ , essendo  $h_s$  l'altezza effettiva della vegetazione inflessa, la velocità locale è molto contenuta e quasi invariabile con  $y$  (Gourlay, 1970) mentre in prossimità della cima della vegetazione ( $y = h_s$ ) sia la velocità locale sia il suo gradiente risultano progressivamente crescenti determinando, pertanto, un profilo concavo verso il basso (Figura 4.2). Al di sopra della vegetazione ( $y > h_s$ ) il profilo di velocità, caratterizzato da gradienti decrescenti con la quota  $y$ , risulta invece concavo verso l'alto. In definitiva il profilo di velocità presenta un punto di flesso, localizzato in corrispondenza della cima della vegetazione ( $y = h_s$ ), dove si ritrovano anche i massimi valori della tensione tangenziale turbolenta e dell'intensità della turbolenza (Carollo et al., 2001), (Ikeda, Kanazawa, 1996).

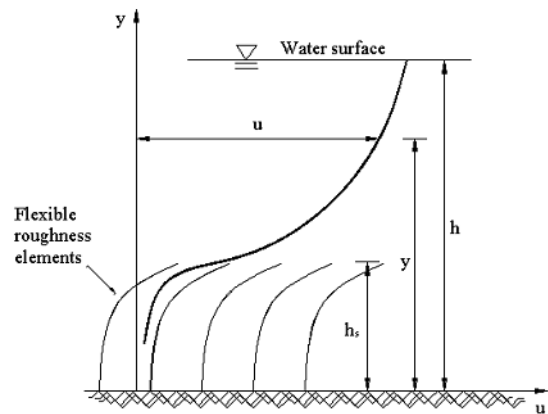
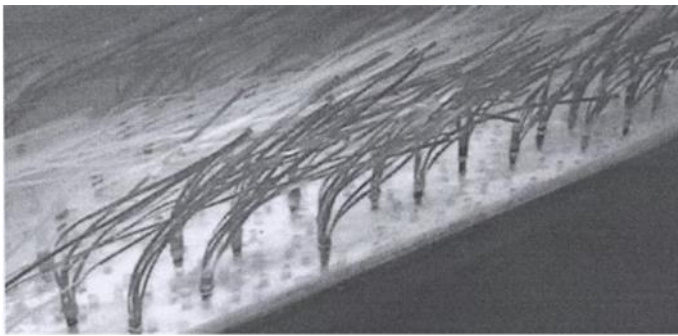


Figura 4.2 Profilo di velocità rilevato su una scabrezza artificiale flessibile (Kouwen et al., 1969).

L'analisi del profilo di velocità evidenzia, pertanto, la presenza di due distinte regioni di moto: una prossima al fondo di spessore pari all'altezza della vegetazione inflessa ed una che si sviluppa nel campo  $h_s < y \leq h$ . La distinzione tra le due regioni è sempre più marcata al crescere della concentrazione cioè del numero  $M$  di elementi vegetali per unità di superficie (Carollo et al., 2001) dato che vengono ridotti gli scambi di quantità di moto tra le due parti della corrente (Kouwen et al., 1981).

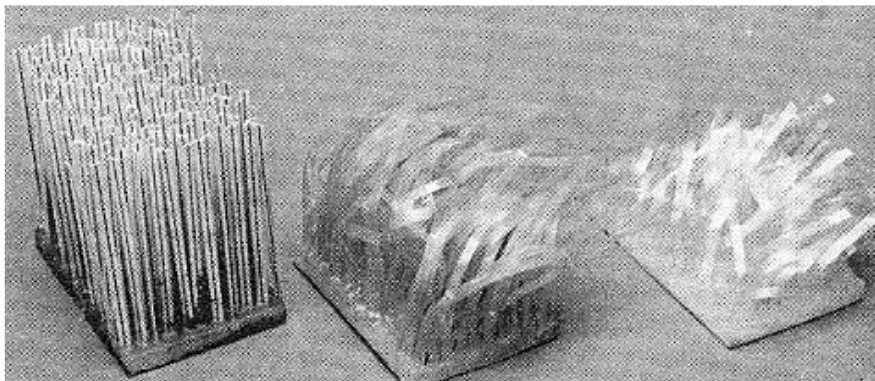


Figura 4.3 Vegetazione artificiale utilizzata nella sperimentazione del metodo di Kouwen.

Tra le metodologie disponibili in letteratura per la valutazione delle resistenze al moto in alvei con vegetazione flessibile sommersa sul fondo (*vegetated channels*), il metodo di Kouwen merita particolare attenzione sia per la vasta sperimentazione (Kouwen, Unny, 1973), (Kouwen et al., 1969), (Kouwen et al., 1981) su cui è basato sia per il ricorso ad un inquadramento teorico che si fonda sulle proprietà biomeccaniche della vegetazione. Il metodo, che utilizza i risultati di una sperimentazione condotta con strisce di materiale plastico (Kouwen, Unny, 1973) (Figura 4.3) il cui comportamento idraulico ai fini sia del moto oscillante sia della configurazione inflessa è stato considerato, a seguito di apposite verifiche (Kouwen et al., 1969), simile a quello della vegetazione erbacea negli alvei naturali, si fonda sulle seguenti ipotesi: a) le resistenze al moto indotte dal fondo in cui la vegetazione

è radicata sono trascurabili rispetto a quelle imputabili ai soli elementi vegetali; b) la vegetazione è uniformemente distribuita sul fondo; c) il regime di moto della corrente è puramente turbolento. La sperimentazione di Kouwen è stata condotta con valori della concentrazione compresa tra 7.5 e 50 steli/dm<sup>2</sup> ed ha condotto a valori crescenti delle resistenze al moto al crescere di  $M$ . Kouwen (1992), indipendentemente dalla configurazione (prona o eretta) della vegetazione flessibile, ha proposto la seguente legge di resistenza:

$$\frac{V}{u_*} = C_0 + C_1 \log\left(\frac{h}{h_s}\right) \quad (5.3)$$

in cui  $C_0$  e  $C_1$  sono due coefficienti numerici tabellati in funzione del grado di inflessione della vegetazione. La (5.3) è stata dedotta da Kouwen e Unny (1973) integrando un profilo di velocità di tipo logaritmico posto al di sopra degli elementi di vegetazione e, pertanto, la sua forma semilogaritmica deve essere considerata di deduzione puramente empirica tenuto conto che, come già esposto, il profilo di velocità in un alveo con vegetazione sul fondo non è di tipo logaritmico ma assume la tipica forma *S-shaped*.

Carollo et al. (2003) hanno condotto una sperimentazione, in una canaletta di laboratorio a pendenza variabile, facendo defluire la corrente sopra un tratto inerbito ottenuto per insemminazione di un miscuglio di sementi composto per il 50% di Loietto Perenne, per il 40% da Festuca Rubra e per il rimanente 10% da Poa Pratensis. Il manto erboso formatosi è risultato costituito da elementi di forma nastriforme di larghezza variabile tra i 4 e i 5 mm. La sperimentazione è stata effettuata utilizzando tre differenti campioni vegetali caratterizzati da valori della concentrazione  $M$  compresi tra 280 e 440 steli dm<sup>-2</sup>. Sono state condotte 80 prove sperimentali caratterizzate da pendenze variabili nell'intervallo 0.1-5.0 % e da tiranti idrici variabili fra 6.10 e 27.19 cm che hanno dato luogo a valori della sommergenza relativa  $h/h_s$ , compresi fra 1.02 e 6.04. Durante le prove la vegetazione ha assunto sempre la configurazione inflessa, sia prona sia oscillante, con valori del grado di inflessione  $h_s/H_v$ , essendo  $H_v$  l'altezza della vegetazione in assenza del deflusso, compresi nell'intervallo 0.25 - 0.73. I rilievi di Carollo et al. (2003) hanno evidenziato che il metodo di Kouwen è caratterizzato da una sistematica sovrastima delle resistenze al moto tanto più apprezzabile quanto maggiore è la concentrazione  $M$  dato che per valori elevati della concentrazione si ottiene un regime di moto della corrente quasi-liscio che Kouwen non ha rilevato nella sua sperimentazione condotta con valori molto contenuti della concentrazione (7.5 e 50 steli/dm<sup>2</sup>).

Per un alveo prismatico rigido e rettilineo, in assenza di trasporto solido, trascurando gli effetti dissipativi indotti dalla scabrezza del terreno in cui è radicata la vegetazione ed assumendo una distribuzione uniforme degli elementi vegetali, l'applicazione del II-Teorema (*Barenblatt, 1987*) e della condizione di autosimilitudine incompleta (*Barenblatt, 1993*) ha consentito la deduzione teorica della seguente legge di resistenza (*Carollo et al., 2005*):

$$\frac{V}{u_*} = A_o \left(\frac{h}{h_s}\right)^{a_1} \left(\frac{u_* h_s}{v_k}\right)^{a_2} \left(\frac{H_v}{h_s}\right)^{a_3} \quad (5.4)$$

essendo  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  dei coefficienti numerici da determinare sulla base delle misure disponibili,  $v_k$  la viscosità cinematica dell'acqua e  $A_o$  un coefficiente dipendente dalla concentrazione  $M$ . Per ciascun valore della concentrazione (50, 280, 310 e 440 steli  $\text{dm}^{-2}$ ), l'eq. (5.4) è stata adattata alle misure sperimentali disponibili imponendo che ciascuno dei coefficienti numerici  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  assuma lo stesso valore per le quattro configurazioni ( $a_1 = 1.168$ ,  $a_2 = -1.023$ ,  $a_3 = -0.861$ ), e che solo  $A_o$  risulti dipendente dalla concentrazione  $M$ . I valori di  $A_o$  relativi alla sperimentazione di Carollo et al. (2005) ( $M > 280$  steli  $\text{dm}^{-2}$ ) hanno mostrato un andamento monotono crescente con la concentrazione rappresentabile con la seguente equazione:

$$A_o = 0.0275 M^{2.37} \quad (5.5)$$

L'analisi ha anche evidenziato che il raggruppamento  $u_* h_s / v$  interviene nella legge di resistenza soltanto per i valori più elevati della concentrazione. Questo risultato può essere giustificato tenendo conto che se la velocità nello strato vegetato si considera, in accordo con Gourlay (1970) e con Kouwen et al. (1969), deducibile dalla velocità di attrito, allora il raggruppamento adimensionale  $u_* h_s / v$  rappresenta il numero di Reynolds della "corrente di fondo" che si muove all'interno dello strato vegetato di spessore  $h_s$ . Poiché al crescere della concentrazione le velocità all'interno dello strato vegetato si riducono apprezzabilmente allora lo studio dei fenomeni dissipativi non può più prescindere dal numero di Reynolds della corrente di fondo.

Per valori di  $M < 50$  steli  $\text{dm}^{-2}$  la legge di resistenza assume sempre l'espressione (5.4), con  $a_1 = 1.168$ ,  $a_2 = 0$  e  $a_3 = -0.861$  e i valori della costante  $A_o$  sono stati determinati utilizzando le misure di Raffaelli et al. (2002) ( $M = 10.2, 15.6, 20.4$  steli  $\text{dm}^{-2}$ ) quelle di Wilson e Horritt (2002) ( $M = 25$  steli  $\text{dm}^{-2}$ ) e quelle di Kouwen ( $M = 50$  steli  $\text{dm}^{-2}$ ) pervenendo alla seguente equazione (Carollo et al., 2005):

$$A_o = \frac{43.4}{M^{1.0521}} \quad (5.6)$$

Per il caso di vegetazione rigida emergente per la quale, ovviamente, riesce  $h = h_s$  e l'altezza effettiva della vegetazione  $h_s$  coincide con quella  $H_v$  in assenza di deflusso, la legge di resistenza assume sempre l'espressione (5.4) con  $a_1 = 0$ ,  $a_2 = -0.199$  e  $a_3 = 0$  (Ferro, Giordano, 1992) e la costante  $A_o$ , determinata sulla base delle misure disponibili ( $1.8 \leq M \leq 32$  steli  $\text{dm}^{-2}$ ), può essere stimata con la seguente relazione (Carollo et al., 2003):

$$A_o = \frac{62}{M^{0.38}} \quad (5.7)$$

## La vegetazione di tipo arbustivo (

Figura 4.4) si presenta, invece, come rigida e può essere sia emergente che sommersa; al passaggio di una piena la vegetazione di tipo rigido può inflettersi completamente, spesso spezzandosi ed adagiandosi sul fondo alveo (Ferro, 2019).



Figura 4.4 Vegetazione di tipo arbustivo in alveo.

Rhee et al. (2008) hanno condotto alcune esperienze di laboratorio con vegetazioni tipiche degli ambienti fluviali ed, in particolare, hanno effettuato misure di resistenze al moto di una corrente in un canale in cui era presente *Phragmites communis Trin.*, volgarmente denominata “canna di palude”, che è una vegetazione arbustiva molto alta (Figura 4.4), costituita da elementi flessibili, diffusa nei corsi d’acqua a regime torrentizio. Le misure sono state effettuate per due differenti stati vegetativi, corrispondenti, rispettivamente, alla condizione di vegetazione “verde” (VV) e di vegetazione “dormiente” (VD). Per vegetazione “verde” si intende quella in cui la pianta si presenta di colorazione completamente verde e in stato di continua crescita, mentre lo stato “dormiente” è quello in cui la vegetazione è inattiva, è avvizzita o morta. Per entrambe le condizioni, le misure hanno consentito di esprimere la legge di resistenza imputabile alla sola presenza della vegetazione mediante una relazione  $n_v - VR$ , essendo  $n_v$  l’indice di Manning ( $m^{-1/3} s$ ) corrispondente alla sola vegetazione, che assume la seguente espressione:

$$n_v = \frac{c_1}{VR} + c_2 \quad (5.8)$$

in cui  $c_1 = 0.0025$  e  $c_2 = 0.013$  per la vegetazione verde (VV) e  $c_1 = 0.0013$  e  $c_2 = 0.005$  per quella dormiente (VD).

L’applicazione della (5.8), in relazione allo stato della vegetazione (verde o dormiente), deve essere condotta risolvendo, per tentativi, il seguente sistema di equazioni:

$$V = \left( \frac{1}{n_f + n_v} \right) R^{2/3} i^{1/2} \quad (5.9)$$



$$V = \left( \frac{c_1}{n - c_2 - n_f} \right) \frac{1}{R} \quad (5.10)$$

in cui  $n_f$  è l'indice di Manning corrispondente al solo fondo in cui la vegetazione è radicata,  $n$  è l'indice di Manning complessivo (fondo+vegetazione) e  $i$  è la pendenza.

La Fig. 5.5 riporta, a titolo di esempio per un alveo avente una sezione rettangolare di larghezza pari a 20 m ed una pendenza del fondo  $i = 0.001$ , la scala delle portate relative alla condizione (SV) di alveo in terra ( $n_f = 0.033$ ), di alveo con vegetazione dormiente (VD) e con vegetazione verde (VV).

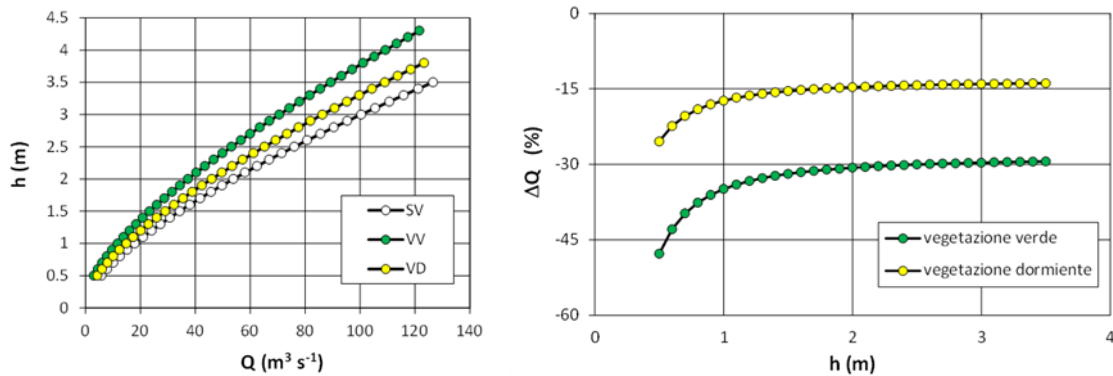


Figura 4.5 Scala delle portate e variazione della portata con il tipo di vegetazione.

La Figura Figura 4.5 dimostra che, per fissata portata, i valori più contenuti delle resistenze al moto della corrente corrispondono alla condizione di assenza di vegetazione mentre quelli più elevati, ai quali competono i maggiori tiranti idrici, si presentano per la vegetazione viva. La presenza della vegetazione determina, in modo inequivocabile, una diminuzione, rispetto ad un alveo in terra, della capacità di convogliamento che si attesta al 15% per il caso di vegetazione dormiente e al 30% per quello di vegetazione verde.

Errico et al. (2018) hanno condotto misure in pieno campo in un canale di drenaggio e in tre differenti condizioni della vegetazione (canale completamente vegetato, con vegetazione su una sola sponda e totale rimozione della vegetazione lungo l'intero contorno bagnato). Le misure effettuate e le valutazioni dell'indice di Manning hanno dimostrato che la presenza di una vegetazione indisturbata determina un innalzamento dei livelli idrici e i valori più elevati dell'indice  $n$  ( $0.063-0.074 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ ) mentre lo scenario intermedio, caratterizzato dalla presenza della vegetazione su una sola sponda si rileva meno impatto e con valori di  $n$  ( $0.03 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ ) non molto differenti da quelli ( $0.02 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ ) della configurazione in assenza di vegetazione.

Recentemente Ferro (2019), applicando l'analisi dimensionale e le teorie dell'autosimilarità incompleta, ha dedotto teoricamente il profilo di velocità:

$$\frac{v}{u_*} = \Gamma \left( \frac{u_* y}{v_k} \right)^\delta \quad (5.12)$$

in cui  $\Gamma$  è il parametro di scala della distribuzione di velocità e  $\delta$  è l'esponente che può essere calcolato con la seguente equazione teorica:

$$\delta = \frac{1.5}{\ln Re} \quad (5.13)$$

Integrando la distribuzione (5.12), Ferro (2017, 2018) ha ottenuto la seguente espressione del coefficiente di Darcy-Weisbach:

$$f = 8 \left[ \frac{(\delta+1)(\delta+2)}{2^{1-\delta} Re^\delta \Gamma} \right]^{2/(1+\delta)} \quad (5.14)$$

L'analisi, per il caso di vegetazione erbacea flessibile (Ferro, 2019), ha stabilito che il parametro di scala  $\Gamma$  dipende dalla sommergenza relativa ( $h/h_s$ ), dalle caratteristiche biomeccaniche della vegetazione (rapporto di inflessione  $h_s/H_v$  e  $M$ ), dal numero di Froude  $F$  della corrente e dalla pendenza  $i$  dell'alveo. Questa relazione è stata stabilita utilizzando le misure disponibili per il caso di vegetazione erbacea e distinguendo il caso di bassi valori della concentrazione ( $10.2 \leq M \leq 50$  steli  $\text{dm}^{-2}$ ) da quello dei valori elevati della concentrazione ( $280 \leq M \leq 440$  steli  $\text{dm}^{-2}$ ) in cui la corrente si muove in un regime "quasi-skimming flow".

L'applicabilità della legge di resistenza (5.14) è stata anche verificata (Nicosia et al., 2021), facendo ricorso alle misure di Chiaradia et al. (2006) per la vegetazione di tipo arbustivo (*Alnus glutinosa* L., *Salix alba* L., *Salix caprea* L.) pervenendo alla seguente legge di resistenza:

$$f = 8 \left[ \frac{(\delta+1)(\delta+2)}{2^{1-\delta} Re^\delta a_m F^{1.7577}} \right]^{2/(1+\delta)} \quad (5.15)$$

in cui il coefficiente  $a_m$  varia con la specie investigata ( $a_m = 11.93$  per *Alnus glutinosa* L.,  $a_m = 10.98$  per *Salix alba* L.,  $a_m = 11.29$  per *Salix caprea* L.) e può essere stimato in funzione della rigidità della vegetazione espressa dal prodotto  $EI$  ( $10^8 \text{ N m}^{-2}$ ), in cui  $E$  è il modulo di elasticità e  $I$  il momento di inerzia della sezione trasversale della vegetazione, con la seguente relazione:

$$a_m = 16.66 EI^{-0.144} \quad (5.16)$$

### 4.1.3 Opere in massi

#### 4.1.3.1 Briglie in massi

Quando la pendenza di un corso d'acqua montano, caratterizzato da una granulometria assortita del materiale di fondo alveo, supera valori del 2-3%, è stata osservata la tendenza alla formazione di unità morfologiche a gradino (*step*) (D'Agostino, Lenzi, 1997), (Lenzi, D'Agostino, 2000). A valle di queste forme di fondo si localizzano i *pool* determinati proprio dai fenomeni di erosione localizzata imputabili ai getti originati dalla presenza dei gradini naturali (Figura 4.6). È stato dimostrato che le sequenze *step-pool* sono stabili al passaggio di correnti di piena con tempo di ritorno variabile tra 30 e 40 anni, mentre per deflussi maggiori queste strutture vengono distrutte per riformarsi in differenti tratti dell'alveo o per trasformarsi (Lenzi, D'Agostino, 2000), (Lenzi, 2001).

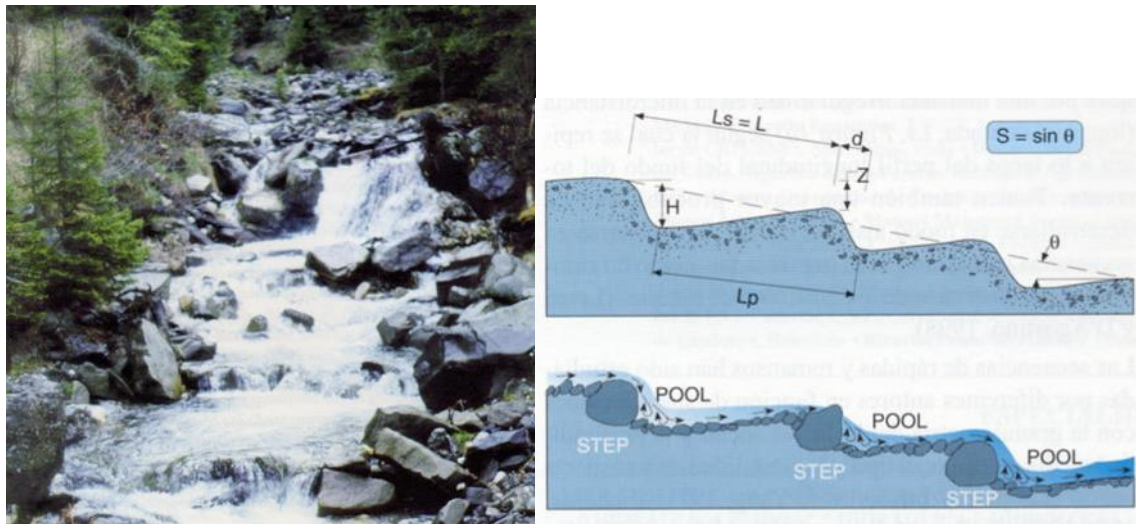


Figura 4.6 Vista di un torrente con configurazione step-pool e schema di un tratto.

La similitudine riscontrata tra le sequenze *step-pool*, caratterizzate da un profilo a gradinata, e la classica sistemazione ottenuta con una serie di briglie, nonché la circostanza che l'alveo a *step-pool* può considerarsi il risultato finale di un processo evolutivo naturale che conduce il torrente verso una condizione di stabilità plano-altimetrica, ha costituito il presupposto per avvalersi nella progettazione delle briglie in massi di indicazioni derivanti dallo studio di queste unità fisiografiche (D'Agostino, Lenzi, 1997, 1998), (Lenzi, 2001, 2002).

La progettazione delle briglie in massi, e quindi la determinazione dell'altezza fuori terra  $H$  delle opere e la loro distanza  $L$ , può avvalersi dei risultati ottenuti nell'analisi dei caratteri fluviomorfologici delle sequenze *step-pool* presenti in natura (D'Agostino, Lenzi, 1997, 1998), con l'obiettivo di imitare, mediante le opere artificiali, la morfologia dei torrenti montani. I principali elementi conoscitivi che derivano dagli studi fluviomorfologici sugli *step-pool* e che possono essere di ausilio per una "progettazione morfologica" riguardano sostanzialmente la lunghezza d'onda  $L_s$  degli *step*, cioè la distanza tra i salti valutata nella direzione parallela a quella della pendenza  $S$  del torrente, l'altezza  $H$  degli *step* ed il dislivello  $Z$  fra la testa degli *step* successivi.

Sono state formulate diverse teorie al fine di spiegare la dinamica formativa ed evolutiva delle sequenze a *step-pool* e la loro lunghezza d'onda (Andreoli et al., 2005). Le esperienze di laboratorio condotte da Abrahams et al. (1995) hanno supportato l'ipotesi che l'evoluzione di una struttura a gradinata avviene in maniera da massimizzare le resistenze al moto della corrente e corrisponde ad una configurazione geometrica caratterizzata anche dalla massima stabilità della struttura stessa. Alla configurazione che determina la massimizzazione delle resistenze al moto della corrente corrisponde la seguente relazione tra i parametri geometrici della morfologia a gradinata:

$$\frac{H}{L_s} = c S \quad (5.17)$$

avendo indicato con  $c$  un coefficiente che assume secondo Abrahams et al. (1995) il valore 1.5. Zimmermann e Church (2001), utilizzando anche le misure di Abrahams et al. (1995), di Chin (1999) e di Wohl et al. (1997), suggeriscono un range di variabilità di  $c$  da valori intorno a 2.5 per pendenze  $S$  minori di 0.05 a valori prossimi a 1.5 per pendenze maggiori del 10%. Tenendo conto dei risultati di Chartrand e Whiting (Ferro, 2019) e di Zimmermann e Church (2001) che hanno trovato che per pendenze minori del 10% il rapporto  $c$  tende a valori maggiori di 2, fino a 4, Ferro et al. (2006) hanno rappresentato il complesso delle misure disponibili, nel piano cartesiano  $S, c$ , relative sia a strutture step-pool naturali sia artificiali pervenendo alla seguente equazione:

$$c = 1 + \frac{0.11}{S} \quad (5.18)$$

Ferro et al. (2006), tenendo conto che la configurazione della struttura a gradinata è controllata dall'interazione fra la pendenza  $S$  del torrente, la dimensione dei sedimenti, rappresentata dal diametro corrispondente al frattile 90% della curva granulometrica del fondo alveo,  $D_{90}$ , ed il regime idraulico della corrente, hanno rappresentato analiticamente la condizione di formazione degli *step-pool* mediante il seguente legame funzionale:

$$\phi\left(\frac{H}{L_s S}, \frac{D_{90}}{H}\right) = 0 \quad (5.19)$$

Il complesso delle misure effettuate su alcuni torrenti alpini (Andreoli et al., 2005; Lenzi, 2001; Lenzi e D'Agostino, 2000) unitamente ai dati di Abrahams et al. (1995) hanno evidenziato la sostanziale indipendenza del rapporto  $c = H/L_s S$  da  $D_{90}/H$  (Ferro, 2019) e la possibilità di utilizzare un valore costante di  $c$ , pari a 1.5, coincidente con quello indicato da Abrahams et al. (1995).

Lo studio della distribuzione di frequenza dei rapporti  $H/D_{90}$  (Ferro, 2019) ha evidenziato che la condizione mediana, con riferimento al complesso delle misure disponibili, è quella corrispondente al rapporto  $H/D_{90} = 2.4$ . Pertanto, nella progettazione delle briglie in massi l'altezza  $H$  dei manufatti potrà essere stabilita sulla base dei rilievi granulometrici da effettuare in corrispondenza delle zone di inserimento dei manufatti; tali rilievi consentiranno, infatti, di pervenire alla determinazione del diametro caratteristico  $D_{90}$  e di assumere per l'altezza dell'opera un valore  $H$  pari a  $2.4 D_{90}$ .

La distanza  $L$  tra le briglie, assunta coincidente con la lunghezza d'onda  $L_s$  degli step, potrà, essere stabilita, invece, con la seguente relazione:

$$L_s = \frac{H}{c S} = \frac{2.4 D_{90}}{1.5 S} = 1.6 \frac{D_{90}}{S} \quad (5.20)$$

#### 4.1.3.2 Rampe in massi

L'obiettivo sistematorio del tratto montano di un corso d'acqua può essere conseguito con l'impiego di una rampa in pietrame. Si tratta di una scogliera, caratterizzata da una pendenza notevolmente più elevata di quella longitudinale dell'alveo in cui è inserita, realizzata con massi di grossa pezzatura. La

## I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

rampa non interrompe la continuità morfologica dell'alveo naturale, come avviene per le briglie, e permette sia un interscambio biologico tra la zona a monte e a valle del manufatto sia il ripopolamento ittico. Il pietrame di grossa pezzatura, disposto in modo regolare o irregolare su più strati sovrapposti, crea spazi vuoti ed anfratti che determinano sensibili variazioni della velocità della corrente sulla rampa facilitando la risalita dei pesci e contribuendo ad una locale diversificazione dell'ambiente fluviale. Una rampa è caratterizzata, in genere, da una altezza non superiore ai 2-3 m e da una pendenza rilevante ma non superiore al 20%-30%. Dal punto di vista idraulico, la rampa è generalmente costituita da un tratto a forte pendenza preceduto e seguito da un tratto fluviale che può essere a debole pendenza. La corrente a monte della rampa è lenta ed accelerata e nella sezione di incile della rampa si stabilisce l'altezza critica. Nella rampa, che si comporta come un alveo a forte pendenza, si stabilisce una corrente veloce ed accelerata. Nel tratto fluviale che segue il manufatto, indefinito verso valle, la corrente è lenta ed uniforme. Questa situazione idraulica implica che tra la rampa e l'alveo di valle si verifica il passaggio da una corrente veloce ad una corrente lenta con la formazione di un risalto idraulico ed una conseguente dissipazione energetica.

Per fissata portata, al variare del livello idrico di valle si possono verificare quattro differenti tipi di corrente sulla rampa (Fritz, Hager, 1998) (Figura 4.7): tipo a – con risalto posto al piede della rampa; tipo b – lama stramazza che si immette (*plunging flow*) nella corrente di valle caratterizzata dalla presenza di un roller superficiale; tipo c – corrente con ondulazioni superficiali tipiche del risalto ondulato ed una zona di ricircolo in prossimità del fondo; tipo d – corrente lenta su tutta la rampa (*surface jet flow*).

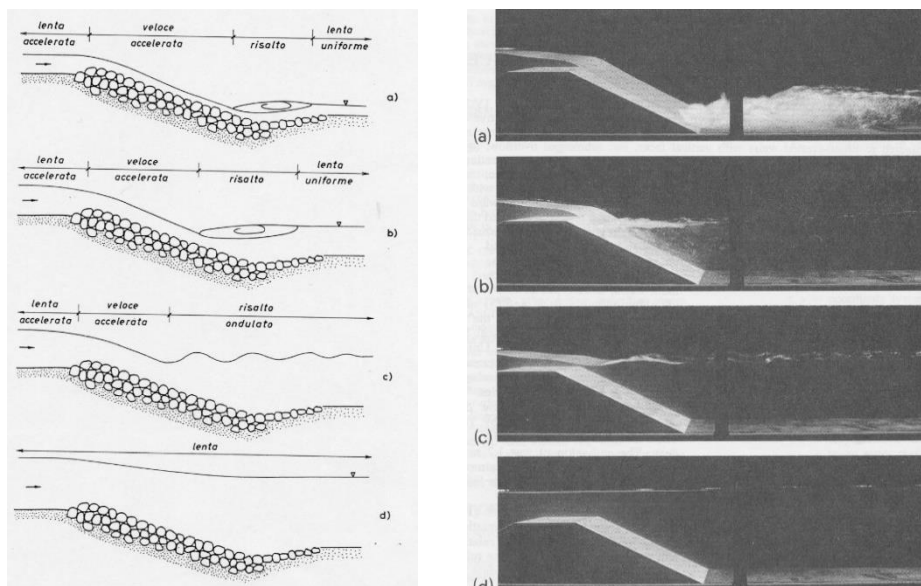


Figura 4.7 Schema del funzionamento idraulico di una rampa e tipi di corrente su uno scivolo liscio.

Dal punto di vista dell'efficienza del funzionamento della rampa, il processo dissipativo dovrebbe essere quello conseguente ad un funzionamento idraulico di tipo a) in maniera da confinare, con riferimento alla portata di progetto, il risalto idraulico nella zona immediatamente a valle della rampa. Il dimensionamento idraulico della rampa presuppone anche la determinazione del tirante idrico della corrente in moto sulla rampa che, in prima approssimazione, può essere assunta mediamente uniforme ed in questo caso è necessario scegliere una legge di resistenza al moto della corrente sulla rampa, ad esempio tra quelle disponibili per il caso degli alvei in ghiaia a fondo fisso. In alternativa, a vantaggio della sicurezza, può essere utilizzato il tirante idrico  $h_1$  della corrente veloce al piede della rampa. Per rampe di differente geometria (uniforme, uniforme con *boulders*, bidimensionale e tridimensionale), Ferro e Pagliara (2003) hanno discriminato due differenti comportamenti idraulici dello stesso manufatto in relazione al valore assunto dal rapporto adimensionale  $H/k$ , essendo  $k$  l'altezza critica della corrente. In particolare, i casi  $H/k < 10$  sono stati ottenuti nella sperimentazione condotta, per fissata altezza  $H$  dell'opera, con i valori più elevati della portata, e corrispondono a correnti idriche che muovono sulla rampa determinando una condizione idraulica di microscabrezza. I casi  $H/k \geq 10$  competono, invece, a correnti idriche di tirante confrontabile con la dimensione caratteristica dei massi costituenti la rampa (macroscabrezza). In altri termini il valore del rapporto  $H/k$  pari a 10 consente di discriminare, analogamente a quanto già noto per gli alvei in ghiaia (Ferro, Giordano, 1990), tra due differenti condizioni di scabrezza relativa che possono realizzarsi nel moto della corrente sulla rampa.

Per le situazioni idrauliche di microscabrezza ( $H/k < 10$ ), Ferro e Pagliara (2003) hanno determinato la seguente relazione:

$$\frac{L_R k}{H^2} = 40.76 \left(\frac{h_1}{k}\right)^{3.80} \left(\frac{H}{k}\right)^{-0.80} \quad (5.21)$$

in cui  $L_R$  è la lunghezza orizzontale della rampa.

Per valori di  $H/k > 10$  (macroscabrezza) alle coppie sperimentali ( $h_1/k, L_R k/H^2$ ) relative a rampe di differente geometria è stata adattata, invece, la seguente relazione:

$$\frac{L_R k}{H^2} = 7.59 \left(\frac{h_1}{k}\right)^{5.56} \quad (5.22)$$

Sulla superficie della rampa possono essere posizionati "grandi massi" o *boulders* che sono in grado di incrementare la dissipazione energetica operata dal manufatto sia determinando una condizione di macroscabrezza sia rallentando la corrente sulla base della propria azione idrodinamica e che riducono il rischio di erosione sul fondo alveo a valle della struttura. I *boulders* hanno anche un effetto benefico sulla stabilità strutturale della rampa e provocano degli effetti di corazzamento superficiale (*armouring*).

Il dimensionamento della zona a valle della vasca presuppone lo studio del risalto idraulico su un fondo scabro. Nel caso di sezione rettangolare e fondo liscio si utilizza la seguente soluzione di Bresse, fondata sulla applicazione dell'equazione dell'equilibrio dinamico al volume compreso tra la sezione 1 di corrente veloce a monte, in cui si stabilisce un tirante  $h_1$ , e la sezione 2 di corrente lenta a valle avente un tirante  $h_2$  (Ferro, 2013):

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left[ -1 + \sqrt{1 + 8 F_1^2} \right] \quad (5.23)$$

in cui  $F_1 = Q / (L g^{1/2} h_1^{3/2})$  è il numero di Froude della corrente veloce.

Rajaratnam (Carollo e Ferro, 2004), per considerare le dissipazioni energetiche imputabili al contorno bagnato, ha introdotto nell'equazione dell'equilibrio dinamico la risultante  $F_\tau$  delle azioni tangenziali per unità di larghezza sul contorno del volume di controllo (Figura 4.7):

$$\Pi_1 + M_1 = \Pi_2 + M_2 + F_\tau \quad (5.24)$$

In cui  $\Pi_1$ ,  $M_1$ ,  $\Pi_2$  e  $M_2$  sono, rispettivamente, la spinta idrostatica e la quantità di moto della sezione 1 di corrente veloce e della sezione 2 di corrente lenta.

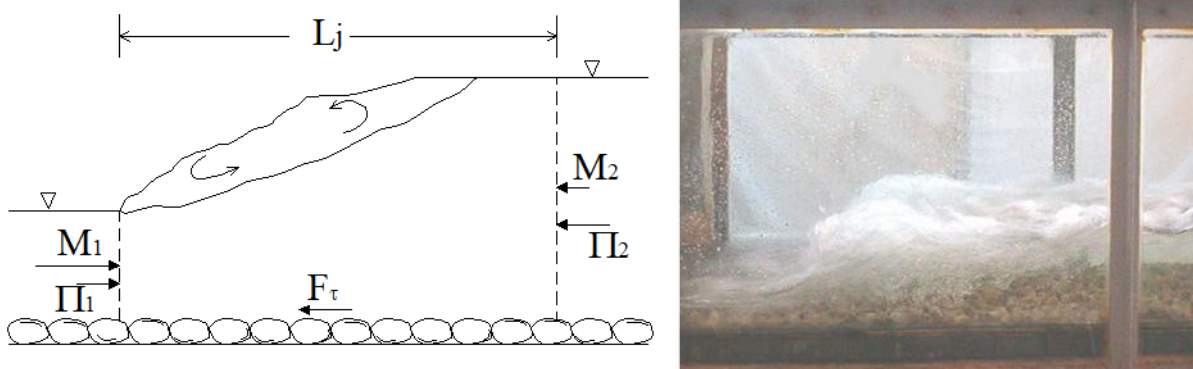


Figura 4.7 Schema e vista longitudinale del risalto idraulico su fondo scabro.

Carollo e Ferro (2004) hanno proposto la seguente espressione di  $F_\tau$ :

$$F_\tau = \beta(M_1 - M_2) \quad (5.25)$$

Sostituendo la (5.25) nella (5.24) per il caso di sezione rettangolare si ottiene la seguente equazione (Carollo et al., 2007):

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left[ -1 + \sqrt{1 + 8(1 - \beta) F_1^2} \right] \quad (5.26)$$

L'applicazione della (5.26) presuppone un criterio di stima del coefficiente  $\beta$ , per la cui determinazione sono al momento disponibili le misure di Hughes e Flack, Ead e Rajartnam e Carollo e Ferro (2004, 2005). In particolare, queste ultime misure sono state condotte su un fondo orizzontale scabro con scabrezza assoluta  $k_s$  variabile nel range 0.46-3.2 cm (



Figura 4.8 Canaletta ed elementi in ghiaia utilizzati per lo studio del risalto idraulico su fondo scabro.

Le misure disponibili hanno consentito di derivare la seguente equazione empirica per la stima di  $\beta$ :

$$\beta = 0.42 \left( \frac{k_s}{h_1} \right) \quad (5.27)$$

che rispetta la condizione che  $\beta$  assume valori positivi e che nel caso di fondo liscio  $F_\tau$  è trascurata ( $\beta = 0$ ). L'equazione (5.26) con  $\beta$  stimato mediante la (5.27) consente una stima di  $h_2/h_1$  caratterizzata da un errore medio del 4.9% e su 515 punti sperimentali solo 9 sono caratterizzati da un errore maggiore del  $\pm 15\%$ .

Ai fini della progettazione di manufatti che dissipano energia della corrente a seguito della formazione del risalto idraulico, come la vasca a valle di una rampa, riveste particolare importanza la lunghezza del risalto idraulico rappresentata dalla dimensione longitudinale del vortice ad asse orizzontale  $L_r$  (roller). Le esperienze condotte su fondo orizzontale liscio (Pietrkowski, 1932) (Smetana, 1937), (Hager, Bremen, 1989) sono state sintetizzate mediante una relazione di questo tipo:

$$L_r = a (h_2 - h_1) \quad (5.28)$$

in cui la costante  $a$  assume valori compresi tra 5 e 6.

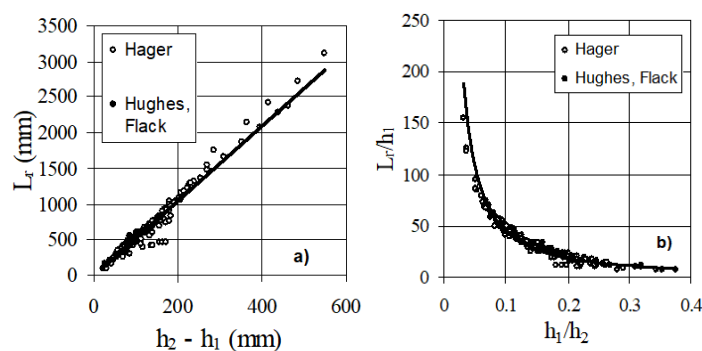


Figura 4.10 Confronto delle (5.28) e (5.29) con le misure (Hager et al., 1990)(Hughes, Flack, 1984).



Per il fondo orizzontale liscio, la

Figura 4.10 Confronto delle (5.28) e (5.29) con le misure (Hager et al.,1990)(Hughes, Flack, 1984).

(a) mostra il buon adattamento della (5.28) con  $a = 5.24$  alle misure di Hager et al. (1990) e di Hughes e Flack (1984). Le stesse misure hanno consentito di verificare l'applicabilità della seguente equazione adimensionale (

Figura 4.10 Confronto delle (5.28) e (5.29) con le misure (Hager et al.,1990)(Hughes, Flack, 1984).

(b)):

$$\frac{L_r}{h_1} = \frac{a_o}{\left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{1.272}} \quad (5.29)$$

con  $a_o$  pari a 2.418.

Nel caso di fondo orizzontale scabro, il complesso delle misure disponibili ha dimostrato che la (5.28) può essere applicata con  $a = 4.07$  e la (5.29) con  $a_o$  pari a 2.06.

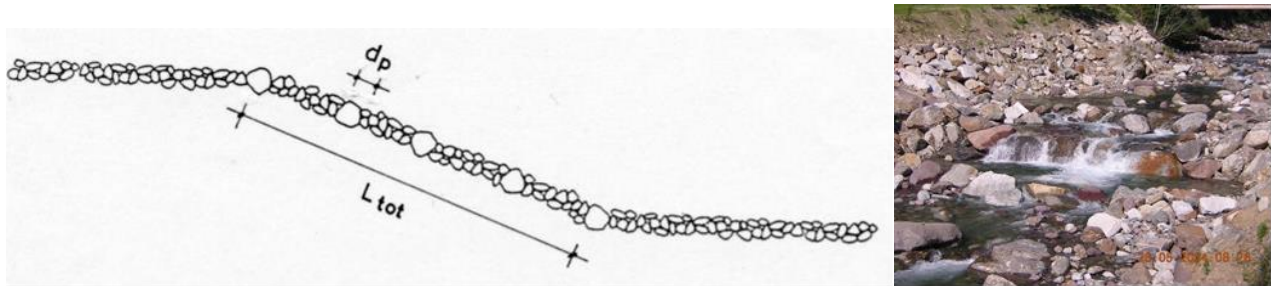


Figura 4.9 Schema e vista di una rampa con file di massi sciolti.

La condizione di stabilità di rampe in massi sciolti o in massi legati è stata studiata sperimentalmente da Armanini e Scotton (1995) utilizzando modelli di laboratorio costituiti da un materiale di base, che può essere quello presente sul fondo alveo, avente un diametro  $d_f$  e da alcuni massi di protezione, di maggiore diametro  $d_p$ , disposti in file trasversali (Figura 4.9). I risultati sperimentali, utili per la definizione della condizione di stabilità dei massi, sono stati rappresentati da Armanini e Scotton (1995) in abachi (Fig.5.12) che riportano in ascissa la percentuale di ricoprimento  $R$  ed in ordinata il raggruppamento adimensionale  $Y_{AS}$  aventi le seguenti espressioni:

$$R = 100 \frac{S_p n}{S_{tot}} = 100 \frac{n d_p}{L_{tot}} \quad (5.30)$$

in cui  $S_{tot}$  è la superficie totale della rampa,  $S_p$  è la superficie di una fila di massi di protezione,  $n$  è il numero di file di massi di protezione con diametro  $d_p$  e  $L_{tot}$  è la lunghezza della rampa misurata lungo la pendenza (Fig.5.9)

$$Y_{AS} = \frac{\gamma h i_R}{(\gamma_s - \gamma) d_f \left[ 0.06 \left( 1 + 0.67 \sqrt{\frac{d_f}{h}} \right) \right]} \quad (5.31)$$

in cui  $h$  è il tirante idrico di moto uniforme sulla rampa a pendenza  $i_R = H/L_R$ ,  $\gamma_s$  è il peso specifico dei massi, e  $\gamma$  è il peso specifico dell'acqua.

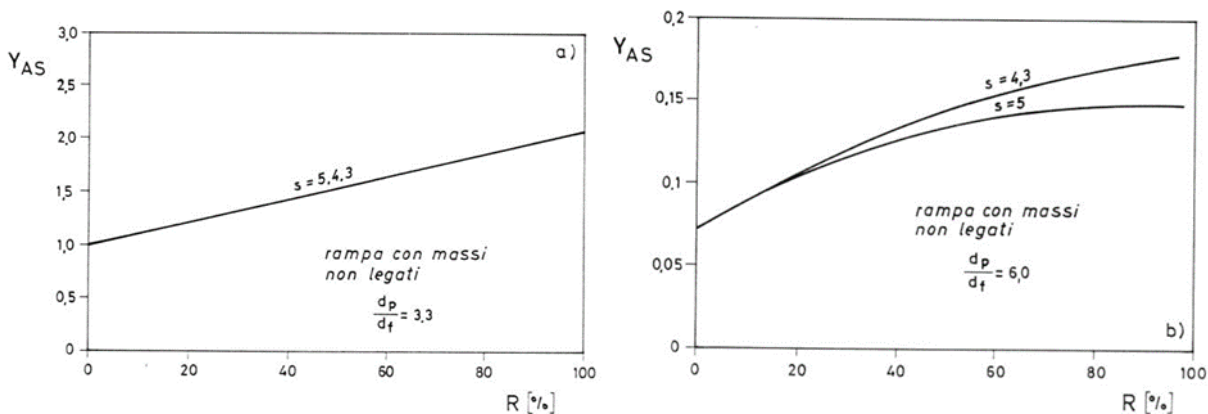


Figura 4.10 Abachi per il progetto di una rampa con massi sciolti disposti trasversalmente.

Per il caso di massi non legati con rapporto  $d_p/d_f$  pari a 3.3 la relazione tra il raggruppamento  $Y_{AS}$  e la percentuale di ricoprimento  $R$  può essere rappresentata dalla seguente equazione:

$$Y_{AS} = 1 + 0.0107 R \quad (5.32)$$

La trasformazione di briglie, che hanno assolto il loro compito sistematorio e sono totalmente interrite, in rampe in massi è un intervento di riconversione che, oltre ad avere finalità ecologiche, manifesta una convenienza economica nei casi di disponibilità in alveo di materiale di idonea pezzatura.

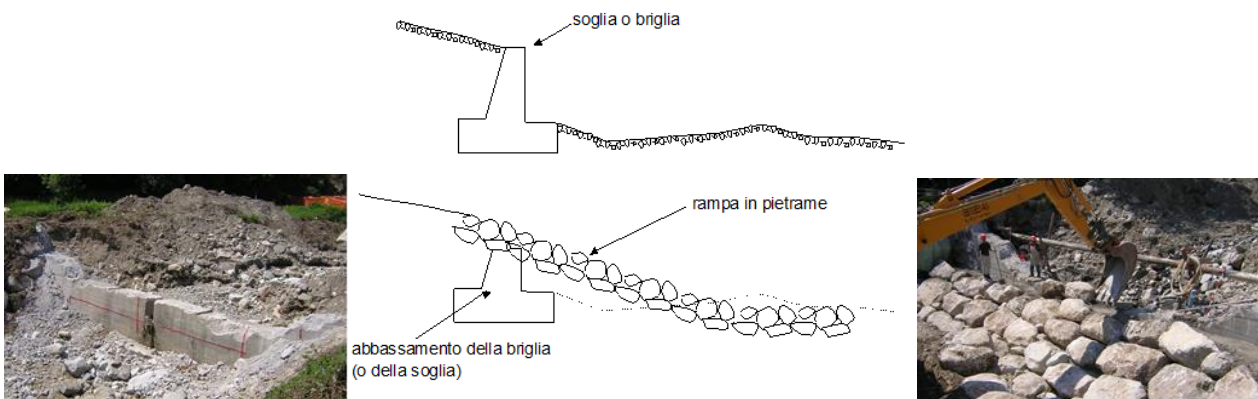


Figura 4.11 Schema di riconversione di una briglia in rampa e vista di un intervento realizzato

In tale tipo di trasformazione i massi vengono posizionati a valle della briglia o della soglia, generalmente in seguito alla rimozione di parte del coronamento superiore. In questo caso si sfrutta la maggiore stabilità offerta dalla presenza della struttura tradizionale e delle sue fondazioni, mitigandone la presenza (Figura 4.11). La pendenza delle rampe viene generalmente fissata in base a considerazioni idrauliche ed economiche. In alcuni casi esistono però dei vincoli, quali ad esempio la presenza di una controbriglia o di un bacino di dissipazione, che suggeriscono le dimensioni

geometriche da fornire alla rampa. La sistemazione prevede, in relazione alle dimensioni del materiale d'alveo, l'interposizione di un filtro tra i massi in pietrame ed il materiale di fondo.

#### ***Bibliografia Par. 4.1***

Abrahams, A.D., Gang, Li, Atkinson, J. F. (1995). Step-pool streams: adjustment to maximum flow resistance. *Water Resources Research*, Vol.31, 10, 2593-2602.

Andreoli, A., Comiti, F., Lenzi, M.A. (2005). Analogie tra i torrenti a morfologia step pool e gli alvei sistemati con opere trasversali. *Rivista di Ingegneria Agraria*, 3, 1-13.

Armanini A., Righetti M., Grisenti P. (2005). Direct measurement of vegetation resistance in prototype scale. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 43, No. 5, 481-487.

Armanini, A., Scotton, P. (1995). Criteri di dimensionamento e di verifica delle stabilizzazioni di alveo e di sponda con massi sciolti e massi legati. *Quaderni del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale*, Università di Trento, IDR 1/1995, 70 pp.

Baiamonte, G., Ferro, V. (1997). The influence of roughness geometry and Shields parameter on flow resistance in gravel bed channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 22, 759-772.

Barenblatt, G.I. (1987). *Dimensional Analysis*. Gordon and Breach Science Publishers. Amsterdam, The Netherlands.

Barenblatt, G.I. (1993). Scaling laws for fully developed turbulent shear flows, part 1, Basic hypothesis and analysis. *J. Fluid Mech.*, Vol.248, 513-520.

Bathurst, J.C. (1988). Velocity profile in high-gradient, boulder-bed channels. In: *Proceedings of International Conference on Fluvial Hydraulics*. IAHR, Budapest, pp. 29-34.

Carollo F.G., Ferro V. (2004). Determinazione delle altezze coniugate del risalto libero su fondo liscio e scabro. *Rivista di Ingegneria Agraria*, 4, 1-11.

Carollo F.G., Ferro V. (2004). Contributo allo studio della lunghezza del risalto libero su fondo liscio e scabro. *Rivista di Ingegneria Agraria*, 4, 13-20.

Carollo F.G., Ferro, V. (2005). Analisi sperimentale del risalto idraulico su fondo orizzontale scabro. *Quaderni di Idronomia Montana*, 24, 153-176.

- Carollo, F.G., Ferro, V., Termini, D. (2001). Rilievi del profilo di velocità in un canale con vegetazione flessibile sommersa. *Rivista di Ingegneria Agraria*, 2, 108-125.
- Carollo, F.G., Ferro, V., Termini, D. (2003). Resistenze al moto di correnti in canali con vegetazione sul fondo. *Rivista di Ingegneria Agraria*, 2, 23-36.
- Carollo, F. G., Ferro, V., & Termini, D. (2005). Flow resistance law in channels with flexible submerged vegetation. *J. Hydraul. Eng. ASCE*, Vol. 131(7), 554-564.
- Carollo F.G., Ferro, V., Pampalone, V. (2007). Hydraulic jumps on rough beds. *J. of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol.133, 9, 989-999.
- Chiaradia E.A., Bischetti G.B., Gandolfi C. (2006). Scabrezza in presenza di vegetazione arbustiva in diverse condizioni di sommersione: prove con materiale vivo. *Quaderni di Idronomia Montana*, 25, 105-116.
- Chin, A. (1999). The morphological structure of step-pools in mountain streams. *Geomorphology*, 27, 191-204.
- D'Agostino, V., Lenzi, M.A. (1997). Origine e dinamica della morfologia a gradinata (step pool) nei torrenti alpini ad elevata pendenza. *Dendronatura*, 2, 7-38.
- D'Agostino, V., Lenzi, M.A. (1998). La massimizzazione della resistenza al flusso nei torrenti con morfologia a step pool. *Atti del XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Volume I, 281-293.
- Errico, A., Pasquino, V., Maxwald, M., Chirico, G.B., Solari, L., Preti, F. (2018). The effect of flexible vegetation on flow in drainage channels: Estimation of roughness coefficients at the real scale. *Ecological Engineering*, Vol.120, 411-421.
- Fathi-Moghadam M., Kouwen N. (1997). Nonrigid, nonsubmerged, vegetative roughness on floodplains. *J. Hydraul. Eng. ASCE*, Vol. 123, No. 1, 51-57.
- Ferro, V. (2013). *Elementi di Idraulica e Idrologia*. Ed. McGraw-Hill, Milano, 344 pp.
- Ferro, V. (2017). New flow resistance law for steep mountain streams based on velocity profile. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 143 (04017024), 1–6.

Ferro, V. (2018). Assessing flow resistance in gravel bed channels by dimensional analysis and self-similarity. *Catena*, 169, 119-127

Ferro, V. (2019). Assessing flow resistance law in vegetated channels by dimensional analysis and self-similarity. *Flow Measurement and Instrumentation*, 69, 101610.

Ferro, V. (2019). Opere di sistemazione idraulico-forestale. McGraw Hill Education, Milano, 630 pp.

Ferro, V., Giordano, G. (1990). Esperienze sulle resistenze al moto in alvei di tipo montano: riesame critico e nuove acquisizioni. *Rivista di Ingegneria Agraria*, 2, 83-98.

Ferro, V., Giordano, G. (1991). Experimental study of flow resistance in gravel-bed rivers. *J. Hydraul. Eng.* ASCE, Vol.117 (10), 1239–1246.

Ferro, V., Giordano, G. (1992). Valutazione sperimentale delle resistenze al moto in alvei con vegetazione rigida sul fondo in condizioni di macroscabrezza. *Quaderni di Idronomia Montana*, 11/12, 163-181.

Ferro V., Lenzi M., Comiti (2006). Un criterio geomorfologico di progettazione delle briglie in massi. *Quaderni di Idronomia Montana*, 26, 285-292.

Ferro, V., Pagliara, S. (2003). Contributo al dimensionamento idraulico delle rampe in pietrame. *Rivista di Ingegneria Agraria*, 1, 23-31.

Fritz, H.M., Hager, W.H. (1998). Hydraulics of embankment weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, Proc. ASCE, Vol.124, 9, 963-971.

Gourley, M.R. (1970). Discussion on “Flow resistance in vegetated channels” by Kouwen, N., Unny, T.E., Hill, H.M.. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Proc. ASCE, Vol. 96, 3, 351-357.

Hager, W.H., Bremen, R., Kawagowshi, N. (1990), Classical hydraulic jump: length of roller. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 28, 5, 591-608.

Hager, W.H., Bremen, R. (1989). Classical hydraulic jump: sequent depths. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 27, 5, 565-585.

Hughes, W.C, Flack, J.E. (1984). Hydraulic jump properties over a rough bed. *J. Hydraul. Eng.* ASCE, Vol. 110, 12, 1755-1771.

- Ikeda, S., Kanazawa, M. (1996). Three dimensional organized vortices above flexible water plants. *J. Hydraul. Eng. ASCE*, Vol. 122 (11), 634-640.
- Kouwen N., Fathi-Moghadam M. (2000). Friction factors for coniferous trees along rivers. *J. Hydraul. Eng. ASCE*, Vol. 126, No. 10, 732-740.
- Kouwen, N., Li, R.M., Simons, D.B. (1981). Flow resistance in vegetated waterways. *Trans. of the ASAE*, 684-698.
- Kouwen, N., Unny, T. E. (1973). Flexible roughness in open channels. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 99(5), 713-728.
- Kouwen, N., Unny, T.E., Hill, H.M. (1969). Flow retardance in vegetated channels. *Journal of Irrigation and Drainage Division, Proc. ASCE*, Vol.95, 2, 329-342.
- Kouwen, N., Unny, T.E., Hill, H.M. (1969). Flow retardance in vegetated channels. *Journal of Irrigation and Drainage Division, Proc. ASCE*, Vol.95, 2, 329-342.
- Lenzi, M.A. (2001). Step-pool evolution in the Rio Cordon, Northeastern Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.26, 991-1008.
- Lenzi, M.A. (2002). Stream bed stabilization using boulder check dams that mimic step-pool morphology features in Northern Italy. *Geomorphology*, Vol.45, 243-260.
- Lenzi, M.A., D'Agostino, V.(2000). Step pool evolution in an Alpine torrent. *New Trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life*, Maione, U., Majone Lehto, B., Monti, R. Eds., Balkema, Rotterdam, 1-12.
- Nicosia, A., Bischetti, G.B., Chiaradia, E., Gandolfi, C., Ferro, V. (2021). A full-scale study of Darcy-Weisbach friction factor for channels vegetated by riparian species. *Hydrological Processes*, 35, e14009.
- Pietrkowski J. (1932), Beitrag zur kenntnis des wechelsprunges, *Wasserwirtschaft*, Vol. 25, 25, 356-358, Vol. 25, 26, 370-372, Vol. 25, 27, 377-379, Vol. 25, 28, 397-400.
- Rhee, D. S., Woo, H., Kwon, B. A., & Ahn, H. K. (2008). Hydraulic resistance of some selected vegetation in open channel flows. *River Research and Applications*, 24, 673–687.

*I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Smetana J. (1937), Studi sperimentali sul salto di Bidone libero e annegato, *L'Energia Elettrica*, Vol. 14, 829-835.

Zimmermann, A., Church, M. (2001). Channel morphology, gradient profiles and bed stresses during flood in a step-pool channel. *Geomorphology*, 40, 311-327.

Wohl, E.E., Madsen, S., MacDonald, L. (1997). Characteristics of log and clast bed-steps in step-pool streams of northern-west Montana, USA. *Geomorphology*, 20, 1-10.

## 4.2 DESERTIFICAZIONE 1981-2021 (G. Pirrera, L. M. Ferrara)

### 4.2.1 Generalità

Una delle più grandi problematiche del nostro secolo è la continua ed esponenziale perdita di suolo che interessa il pianeta. È un processo degenerativo e irreversibile, nella maggior parte dei casi innescato dall'attività antropica, che porta alla scomparsa di tonnellate di suolo annue. Come sappiamo, la pedogenesi, ovvero le fasi che si susseguono per la formazione di suolo a partire dalla disgregazione della roccia madre, è un processo estremamente lungo, che non riesce a concorrere con la quantità di suolo perso ogni anno. L'erosione, una delle principali cause della perdita di suolo, è un fenomeno naturale che si verifica ad opera degli agenti atmosferici, quali precipitazioni, vento, etc., e porta al continuo rimodellamento della superficie terrestre per asportazione delle particelle di suolo. A causa dell'Antropocene e del *Climate Change* questo processo accelera la gravità della perdita di suolo per erosione, fino a provocare progressivamente la diminuzione della fertilità e innescando fenomeni di desertificazione<sup>11</sup>.

La desertificazione quindi si verifica per degrado biologico in una superficie dovuto al cambiamento climatico o all'abbandono da parte dell'uomo o ad altri processi naturali.

I paesaggi a rischio di desertificazione sono abbastanza diffusi sul territorio nazionale e appaiono caratterizzati da specifiche forme, legate:

- all'aridità climatica,
- ai suoli poveri e degradati,
- alla vegetazione rada,
- all'orografia accidentata
- a sua volta legata al rischio di erosione idrica ed eolica.

In base ad un criterio di produttività biologica, la **Conferenza delle Nazioni Unite sulla desertificazione (UNCOD)**, tenutasi a Nairobi nel 1977, adottò una definizione di desertificazione «*riduzione o distruzione del potenziale biologico del terreno che può condurre a condizioni desertiche*».

---

<sup>11</sup> Da non confondere con il termine “*desertizzazione*”, che riguarda l'avanzata di un deserto in un'area geografica, un'espansione verso nuove zone. Col degrado della desertificazione, il deserto si può espandere (desertizzazione).



Secondo la **Convenzione delle Nazioni Unite per combattere la desertificazione (UNCCD<sup>12</sup>)**, la desertificazione rappresenta il “*degrado delle terre aride, semi-aride e sub-umide secche attribuibile a varie cause tra cui le variazioni climatiche e le attività umane*” (UNCCD art.1.a). In pratica, si manifesta con la diminuzione o la scomparsa della produttività e complessità biologica o economica delle terre coltivate, sia irrigate che non, delle praterie, dei pascoli, delle foreste o delle superfici boschive causate dai sistemi di utilizzo della terra, o da uno o più processi, compresi quelli derivanti dall'attività dell'uomo e dalle sue modalità di insediamento, tra i quali l'erosione idrica, eolica, etc; il deterioramento delle proprietà fisiche, chimiche e biologiche o economiche dei suoli; e la perdita protratta nel tempo di vegetazione naturale (UNCCD Art 1.f).



Figura 4.12 Paesaggi sempre più frequenti dovuti alla crescente desertificazione dei suoli.

Per quantificare l'erosione in termini di perdita di suolo media annua (t/ha) si fa riferimento al modello USLE (*Universal Soil Loss Equation* - Wischmeier W.H. e Smith D.D., 1978)<sup>13</sup>, come già

---

<sup>12</sup> Firmata a Parigi da 191 Paesi il 17 Giugno 1994 ed entrata in vigore 26 Dicembre 1996 con l'obiettivo principale consiste nel definire i principi, le strategie e gli impegni che "le Parti" si impegnano a rispettare per contrastare gli effetti della siccità e della desertificazione nelle aree affette, con una particolare attenzione all'Africa.

La CCD si prefigge di individuare e rendere possibili "strategie integrate a lungo termine incentrate simultaneamente, nelle zone colpite, sul miglioramento della produttività delle terre e sul ristabilimento, la conservazione e la gestione sostenibile in terre e in acqua, che permettano, in definitiva, di migliorare le condizioni di vita, in particolare a livello della collettività". (Art. 2)

GLI STRUMENTI PER REALIZZARLI: 1. PROGRAMMI DI AZIONE NAZIONALE (PAN): elaborati individualmente dai singoli Paesi, hanno lo scopo di identificare i fattori che contribuiscono alla desertificazione, individuando concrete strategie di intervento e precisando, nella ripartizione delle competenze statali e regionali, gli specifici ambiti di azione.

2. PROGRAMMI DI AZIONE REGIONALE E SUB REGIONALE: hanno la finalità di integrare e rafforzare l'operatività dei programmi di azione nazionale, coordinando gli interventi nazionali in un più ampio contesto internazionale e creando le opportune sinergie per la loro migliore attuazione.

<sup>13</sup>  $E = R * K * L * S * C * P$

dove :

E = valore medio annuale delle perdite di suolo (E), in t/ha

Fattore R, RAIN, rappresenta l'erosività della pioggia (aggressività climatica);

trattato in precedenza al Paragrafo 3.1.2.1, che contempla fattori fisici quali aspetti climatici, pedologici, topografici e legati alla copertura vegetale ed alle pratiche agricole.

Ma questo tipo di approccio è sufficiente?

Data la complessità della tematica, l'approccio dev'essere con formulazioni «universali» e multiobiettivo non solo di tipo tecnico naturalistico (cfr. come già illustrato, esempio semine ed idrosemine con specie erbacee appropriate par. 4.1.3. e suoli artificiali in primo luogo, par.2.3.) ma persino sociologiche.

Lo studio, la ricerca (cfr. Progetto LIFE “*Climate Change Adaptation*” e Progetto LIFE The Green Link “*Restore desertified areas with an innovative tree growing method across the Mediterranean border to increase resilience*” con contributi di soci AIPIN) e le applicazioni sono quindi sempre in evoluzione, soprattutto i monitoraggi. A tutte le scale, regionale, nazionale, europeo e mondiale (ONU & FAO). In quello europeo sull'utilizzo dei fondi UE la Sicilia è risultata meritevole dalla Corte dei Conti come buona pratica (si rimanda al Caso Studio di Custonaci).

#### **4.2.2 Le metodologie di approccio**

##### **4.2.2.1 GOALS 2030**

L'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile è un programma d'azione per le persone, il pianeta e la prosperità sottoscritto nel settembre 2015 dai governi dei 193 Paesi membri dell'ONU. Essa ingloba 17 Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile (*Sustainable Development Goals* SDGs) in un grande programma d'azione per un totale di 169 ‘target’ o traguardi. L'avvio ufficiale degli Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile ha coinciso con l'inizio del 2016, guidando il mondo sulla strada da percorrere nell'arco dei prossimi 15 anni: i Paesi, infatti, si sono impegnati a raggiungerli entro il 2030.

Tra i 17 obiettivi di sviluppo sostenibile dell'Agenda 2030, il sub-obiettivo 15.3 prevede di “*combattere la desertificazione, ripristinare le terre degradate, comprese quelle colpite da desertificazione, siccità e inondazioni, e battersi per ottenere un mondo privo di degrado del suolo*”. Secondo l'ONU non 1, ma ben 7 goals sono coinvolti per il perseguimento del sub-obiettivo 15.3.

---

Fattore K, indica l'erodibilità del suolo;

Fattore L e S, tengono conto della topografia del terreno;

Fattore C, sintetizza l'effetto delle colture, delle tecniche di coltivazione o della vegetazione;

Fattore P, si riferisce alle pratiche conservative.



Figura 4.13 17 Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile (Sustainable Development Goals SDGs) con particolare focus sul Goal 15.3 concernente la desertificazione.

#### 4.2.2.2 MEDALUS (1999)

La metodologia MEDALUS (*Mediterranean Desertification And Land Use*) è stata sviluppata all'interno del progetto rappresenta nasce per l'individuazione di aree ESAs, ovvero *Environmentally Sensitive Areas*, ovvero "aree sensibili dal punto di vista ambientale".

Il modello MEDALUS rappresenta quindi un approccio di tipo fisico multi-fattoriale per la quantificazione del fenomeno nell'area mediterranea.

Gli indicatori possono essere divisi in quattro categorie definendo la:

1. qualità del Suolo (*Soil Quality Index - SQI*), (4 indicatori: geologia, la tessitura, la pietrosità, lo strato di suolo utile per lo sviluppo delle piante, il drenaggio e la pendenza).
2. Qualità del Clima (*Climate Quality Index - CQI*), (3 indicatori: precipitazioni, aridità ed esposizione dei versanti).
3. Qualità della Vegetazione (*Vegetation Quality Index -VQI*) (4 indicatori: rischio incendio, protezione dall'erosione, resistenza all'aridità e copertura del terreno da parte della vegetazione).
4. Qualità della Gestione del Territorio(*Management Quality Index - MQI*) (3 indicatori: intensità d'uso del suolo e politiche di protezione dell'ambiente adottate).

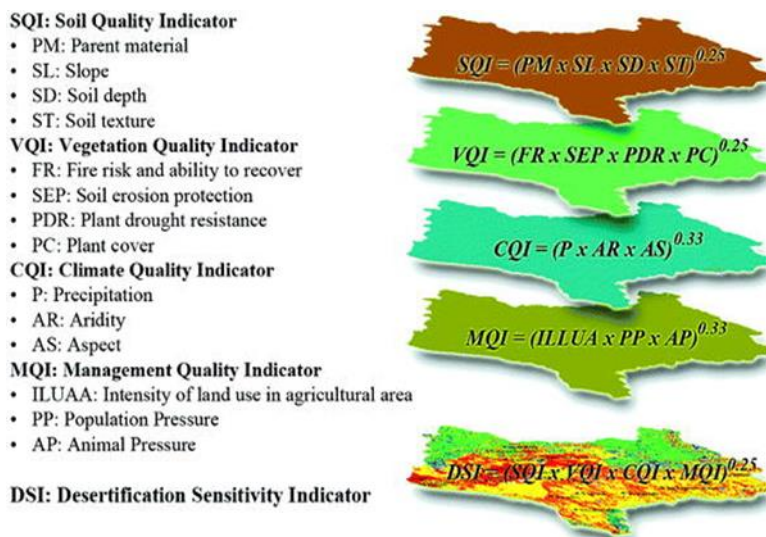


Figura 4.14 Rappresentazione sintetica del Modello MEDALUS.

Dopo aver calcolato i quattro indici, si procede alla definizione delle ESAs alla desertificazione combinando quattro indici attraverso la seguente formula:  $ESAI = (SQI * CQI * VQI * MQI)^{1/4}$

Si distinguono tre classi di ESAs:

- 1) ESAs critiche - aree già altamente degradate a causa di un uso errato del terreno. Queste, rappresentano una minaccia all'ambiente delle aree circostanti;
- 2) ESAs fragili - aree dove qualsiasi cambiamento del delicato equilibrio delle attività naturali o umane, molto probabilmente, porterà alla desertificazione;
- 3) ESAs potenziali - aree minacciate dalla desertificazione se soggette ad un significativo cambiamento climatico.

| Classi ESA   | Sottoclasse | Caratteristiche   |
|--------------|-------------|---|
| NON SOGGETTA | <b>N</b>    | Aree non soggette e non sensibili   |
| POTENZIALE   | <b>P</b>    | Aree a rischio di desertificazione qualora si verificassero condizioni climatiche estreme o drastici cambiamenti nell'uso del suolo. Si tratta di terre abbandonate gestite in modo non corretto nel passato  |
| FRAGILE      | <b>F 1</b>  | Aree limite, in cui qualsiasi alterazione degli equilibri tra risorse ambientali e attività umane può portare alla progressiva desertificazione del territorio. Ad esempio, il prolungarsi delle condizioni di siccità può portare alla riduzione della copertura vegetale e a successivi fenomeni di erosione. |
|              | <b>F 2</b>  |   |
|              | <b>F 3</b>  |   |
| CRITICA      | <b>C 1</b>  | Aree altamente degradate, caratterizzate da incendi, perdite di materiale sedimentario e in cui i fenomeni di erosione sono evidenti.   |
|              | <b>C 2</b>  |   |
|              | <b>C 3</b>  |   |

Figura 4.15 Legenda Medalus delle Classi e sottoclassi ESA.

### 4.2.3 UN DLDD (Desertification Land Degradation & Drought, 2007)

Il concetto di desertificazione si è progressivamente evoluto nel corso degli ultimi anni, cercando di definire un processo che, seppur caratterizzato da cause locali, assume una connotazione di problema globale. La UNCCD (*United Nations Convention to Combat Desertification, 1996*), concepisce la desertificazione in termini di degrado, attribuibile alle variazioni climatiche e alle attività umane (deforestazione, pratiche agricole non sostenibili, sovrappopolazione, inquinamento, pascolamento eccessivo, etc.)

Nel 2007, la UNCCD ha adottato un nuovo piano strategico decennale (2008-2018). Per tale ragione l'UE fa un check (cfr.) a tale data. La slide mostra in sintesi il confronto evolutivo tra il Medalus e l'UNCCD.

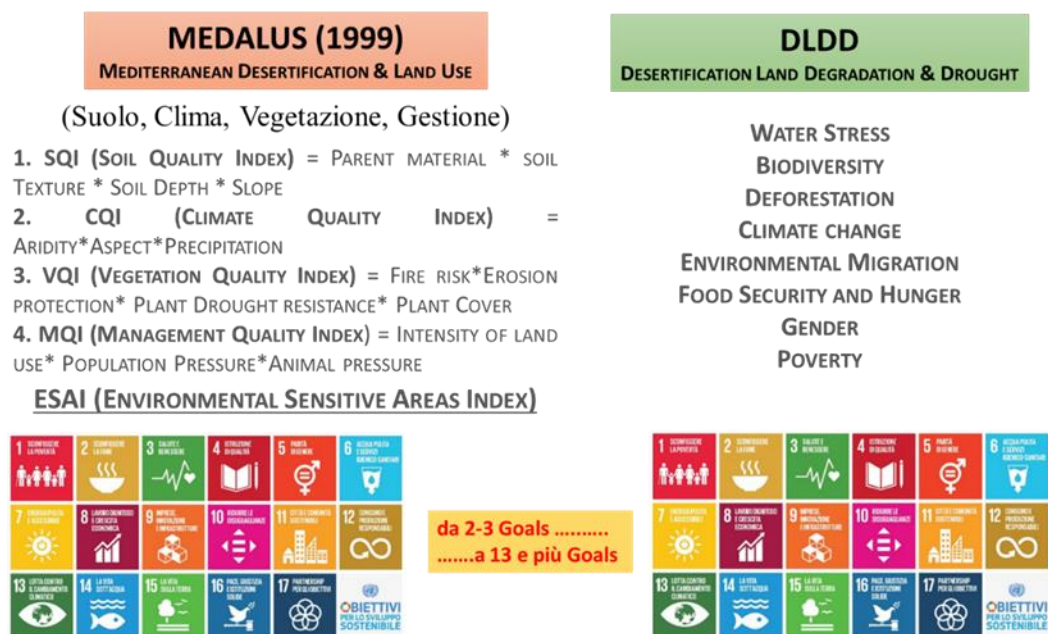



Figura 4.16 Quadro di confronto tra il Modello Medalus, il DLDD e i Goals 2030.

L'obiettivo per il futuro è quello di creare un partenariato globale per investire e prevenire la desertificazione/degradazione dei suoli e per attenuare gli effetti della siccità nelle zone colpite (**DLDD**), al fine di supportare la riduzione della povertà e la sostenibilità ambientale.

Il DDLDD (*Desertification Land Degradation & Drought*): un insieme di metodologie volte alla valutazione dei diversi impatti sociali del degrado del suolo, che include concetti relativi a pressioni migratorie, biodiversità, servizi ecosistemici, conflitti sulle scarse risorse naturali, stabilità socioeconomica e sviluppo sostenibile.

La Fao ha pienamente adottato la nuova metodologia.

## Land &amp; Water

 Overview **Land** Water Databases & Software News Events Resources

Sustainable Land Management

Land assessment & impacts

Land governance and planning


**LDN - Restoring degraded lands**

**UNCCD Collaboration on DLDD and LDN**

UNCCD Global Mechanism Collaboration on DLDD and LDN

Soils

## Collaboration with the UN Convention to Combat Desertification on DLDD and LDN




FAO is helping raise awareness of the urgent need to fully implement the United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), including by generating on-the-ground information, data and tools on land desertification, land degradation and drought (DLDD). FAO is also providing policy options for sustainable land management (SLM), the sustainable management of soil resources, and drought management aimed at achieving land degradation neutrality (LDN), and demonstrating the links between LDN, food security, poverty reduction and the provision of ecosystem services. FAO pursues coherent approaches that address governance, gender and local community aspects within the role and mandate of the UNCCD, including through partnerships with other international organizations and cooperative efforts to increase attention to, and funding for, such approaches.

DLDD was one of the crucial global issues to emerge from the Rio process in 1992, and it was instilled with a sense of urgency at Rio+20 because of concern that ecosystems were becoming degraded beyond their carrying capacity, affecting especially the livelihoods of the rural poor, reducing their resilience, and threatening the goal of food security for all. Even greater economic, social and environmental costs are expected in the future unless DLDD is fully addressed.

At the second meeting of the Inter-agency Expert Group on SDG [Sustainable Development Goal] Indicators in October 2015, FAO and the UNCCD Secretariat agreed to jointly monitor "trends in land degradation" as a priority indicator for Target 15.3 on LDN, providing the necessary metrics and building on the existing monitoring and assessment mechanisms of the UNCCD.

### Publications



[Drought risk management - Factsheet](#)

[UNCCD - Land degradation neutrality](#)

### See also

[UNCCD - Land degradation neutrality](#)

[Global Mechanism- UNCCD](#)

Figura 4.17 ONU & FAO - DLDD & LDN (Land & Water) by FAO.

#### 4.2.4 La segregazione del carbonio

L'aumento demografico e lo sviluppo dell'economia portato ad una crescita esponenziale dell'uso delle risorse del suolo. Circa 50 milioni di km<sup>2</sup> di suoli sono attualmente impiegati dall'uomo per l'allevamento, la produzione di cibo e fibre. Le conseguenze della dominazione umana delle risorse del suolo sono di vasta portata: aumento dell'erosione, desertificazione, salinizzazione, acidificazione, compattazione, perdita di biodiversità, esaurimento dei nutrienti e perdita di materia organica del suolo (*Soil organic matter* – SOM).

Secondo uno studio, i suoli del mondo hanno perso 133 miliardi di tonnellate di carbonio (SOC - *Soil Organic Carbon*) dagli albori dell'agricoltura.

## Pivotal soil carbon

- Stores atmospheric C
  - Cost effective climate mitigation measure
- Improved water holding capacity
  - Buffer against drought
- Improved soil fertility
  - Nutrient store and supply
  - Improved productivity / yields
- Improved soil structure
  - Improved workability
- Improved soil habitat soil organizations
  - Improved biodiversity

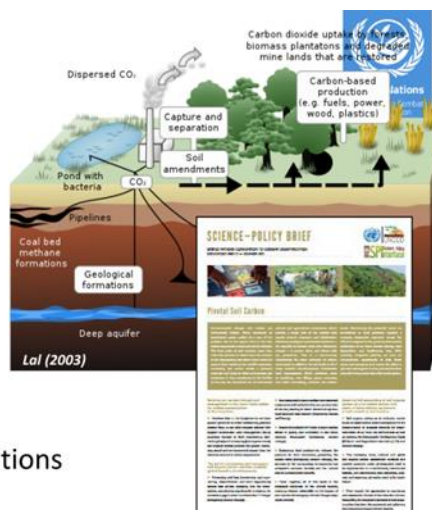


Figura 4.18 Pivotal soil carbon.

Nell'ambito dell'I.N. sono state condotte delle prime ricerche sulla tematica già nel 2015 da Giuliano Sauli. Sulla base dei dati disponibili per singolo intervento di IN, sono stati selezionati 15 siti, distribuiti tra le aree alpine dell'Italia nord-orientale e le aree appenniniche dell'Italia centro-settentrionale, da sottoporre ad analisi relativamente alla verifica dei tassi di assorbimento del carbonio. Tali studi sarebbero da sviluppare soprattutto per i semi e nelle aree a maggiore vulnerabilità alla desertificazione.

Tab. 4.1 Capacità di assorbimento della CO<sub>2</sub> nel suolo\_Per quanto riguarda la capacità di assorbimento della CO<sub>2</sub> da parte di suoli tecnogenici si riportano i valori medi ottenuti da Coelho A.T. et al. (2010) su scarpate stradali in Brasile a 10 anni di distanza dalla realizzazione.

| Tipo di intervento                                      | Quantità di carbonio organico del suolo [ton/ha] | Quantità equivalente di CO <sub>2</sub> [tonCO <sub>2</sub> /ha] |
|---|--|--|
| Semina più geotessile in fibra vegetale                 | 21,30  | 78,05  |
| Semina più geotessile tridimensionale in fibra vegetale | 17,37  | 63,65  |
| Semina con mulch di fibre                               | 17,53  | 64,24  |
| Non intervento  | 3,86   | 14,14  |
| Semina  | 19,25  | 70,54  |

Tab. 4.2 Risultati\_I tassi di assorbimento del carbonio da parte della componente arboreo-arbustiva presente nelle ADS considerate sono riportati nella seguente tabella. Come si vede alcuni siti di indagine (ADS7, ADS9, ADS10), per caratteristiche stazionali, problematiche amministrative o semplicemente per mancato sviluppo della componente arbustiva ed arborea, non hanno fornito dati di interesse.

| Codice ADS | Località                | Tipo costruttivo                    | Capacità assorbimento CO <sub>2</sub><br>[kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ] | Tasso assorbimento annuo<br>[tonCO <sub>2</sub> /ha anno] |
|------------|-------------------------|-------------------------------------|---|---|
| ADS1       | F. Fella (UD)           | Terra verde rinforzata              | 9,73  | 7,48  |
| ADS2       | F. Fella (UD)           | Materasso spondale                  | 6,38  | 4,91  |
| ADS3       | Rivoli Bianchi (UD)     | Briglia in gabbioni                 | 3,64  | 2,62  |
| ADS4       | Pontebbana (UD)         | Muro in gabbioni                    | 2,96  | 2,11  |
| ADS5       | Diga Ridracoli (FC)     | Rivestimento vegetativo a materasso | 2,49  | 1,31  |
| ADS6       | Miniera Giustino (TN)   | Rivestimento vegetativo a materasso | 19,66   | 7,28  |
| ADS7       | Atina (FR)              | Terra verde rinforzata              | Interdizione del fondo dalla proprietà  |   |
| ADS8       | Rio Valleluce (FR)      | Gabbionata spondale                 | 9,85  | 7,57  |
| ADS9       | Rocca di Cambio (AQ)    | Terra verde rinforzata              | Dati insufficienti per il calcolo della CO <sub>2</sub>                       |   |
| ADS10      | Fiume Aniene Roma       | Materasso spondale                  | Presenza della sola componente erbacea  |   |
| ADS11      | Rio Mutino (PU)         | Gabbionata spondale                 | 11,38   | 7,11  |
| ADS12      | Torrente Arrone (VT)    | Materassi spondali                  | -   | -   |
| ADS13      | Fiume Arno Bibbiena(AR) | Gabbionate spondali                 | 44,70   | 7,58  |
| ADS14      | Fiume Aliento (PE)      | Materassi spondali e gabbioni       | 36,72   | 12,24 <sup>(*)</sup>                                      |
| ADS15      | Fiume Foro (PE)         | Materassi spondali e gabbioni       | 20,84   | 6,95  |

Tab. 4.3 Applicando il valore monetario, pari a 15.80 €/ton, riferito ai ratei per il sequestro di CO<sub>2</sub> del Chicago Climate Exchange del 12 maggio 2009 riportato in Coelho A.T. et al. (2010) si ottengono i valori per ettaro per anni riportati di seguito.

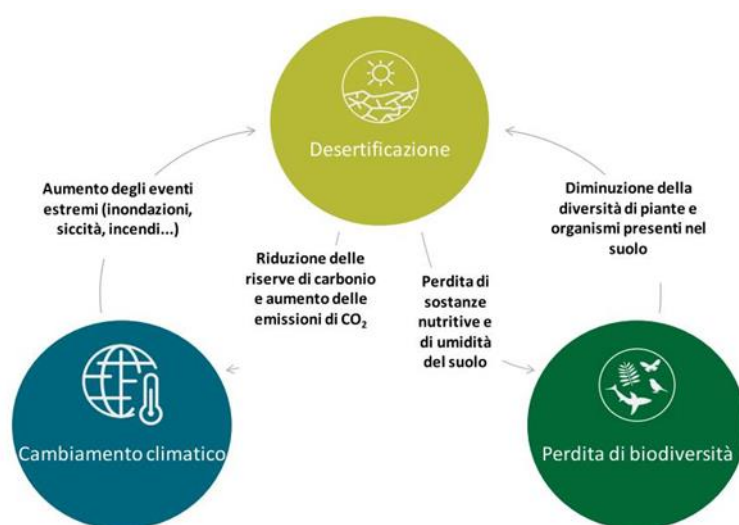
| Codice ADS | Località                | Tipo costruttivo                    | Tasso assorbimento annuo apparato radicale<br>tonCO <sub>2</sub> /ha anno | Tasso assorbimento annuo soprasuolo<br>tonCO <sub>2</sub> /ha anno | Tasso assorbimento annuo suolo<br>tonCO <sub>2</sub> /ha anno | Tasso assorbimento annuo generale<br>tonCO <sub>2</sub> /ha anno | Valore monetario potenziale del sequestro di CO <sub>2</sub><br>[€/ha/anno] |  |
|------------|-------------------------|-------------------------------------|---|--|---|--|---|--|
| ADS1       | F. Fella (UD)           | Terra verde rinforzata              | 2,26  | 7,48   | 7,85  | 17,59  | 255,28  |  |
| ADS2       | F. Fella (UD)           | Materasso spondale                  | 1,48  | 4,91   | 7,85  | 14,24  | 202,46  |  |
| ADS3       | Rivoli Bianchi (UD)     | Briglia in gabbioni                 | 0,79  | 2,62   | 7,85  | 11,26  | 155,24  |  |
| ADS4       | Pontebbana (UD)         | Muro in gabbioni                    | 0,64  | 2,11   | 7,85  | 10,60  | 144,85  |  |
| ADS5       | Diga Ridracoli (FC)     | Rivestimento vegetativo a materasso | 0,50  | 1,31   | 7,85  | 9,66   | 129,98  |  |
| ADS6       | Miniera Giustino (TN)   | Rivestimento vegetativo a materasso | 2,20  | 7,28   | 7,85  | 17,33  | 251,17  |  |
| ADS7       | Atina (FR)              | Terra verde rinforzata              | Nessun valore   |  |   |  |   |  |
| ADS8       | Rio Valleluce (FR)      | Gabbionata spondale                 | 2,29  | 7,57   | 7,85  | 17,71  | 257,15  |  |
| ADS9       | Rocca di Cambio (AQ)    | Terra verde rinforzata              | Nessun valore   |  |   |  |   |  |
| ADS10      | Fiume Aniene Roma       | Materasso spondale                  | Nessun valore   |  |   |  |   |  |
| ADS11      | Rio Mutino (PU)         | Gabbionata spondale                 | 2,15  | 7,11   | 7,85  | 17,11  | 247,67  |  |
| ADS12      | Torrente Arrone (VT)    | Materassi spondali                  |   | -  | 7,85  | 7,85   |   |  |
| ADS13      | Fiume Arno Bibbiena(AR) | Gabbionate spondali                 | 2,29  | 7,58   | 7,85  | 17,72  | 257,32  |  |
| ADS14      | Fiume Aliento (PE)      | Materassi spondali e gabbioni       | 3,69  | 12,24 <sup>(*)</sup>   | 7,85  | 11,54  | 159,79  |  |
| ADS15      | Fiume Foro (PE)         | Materassi spondali e gabbioni       | 2,10  | 6,95   | 7,85  | 16,90  | 244,36  |  |



#### 4.2.5 Il check europeo

In coerenza con l'ONU che nel 2007 con la UNCCD ha adottato il nuovo piano strategico decennale (2008-2018), la Corte dei Conti Europea fa un check della situazione a tale data. Il risultato è che la desertificazione in Europa avanza inesorabile. Il rischio di desertificazione è particolarmente serio nel **Portogallo meridionale**, in alcune aree della **Spagna** e dell'**Italia meridionale**, nel sud-est della **Grecia**, a **Malta**, **Cipro** e nelle zone che costeggiano il Mar Nero in **Bulgaria** e **Romania**.

La desertificazione può comportare **povertà**, problemi di **salute** dovuti alla polvere portata dal vento, nonché una **diminuzione della biodiversità**. Può anche avere **conseguenze demografiche ed economiche**, costringendo la popolazione a migrare lontano dalle aree colpite.



Fonte: Corte dei conti europea, sulla base del testo del World Resources Institute, intitolato "[Ecosystems and Human Well-being: Desertification Synthesis](#)", 2005, pag. 17.

Figura 4.19 Rapporto fra desertificazione, perdita di biodiversità e cambiamento climatico (World Resources Institute, 2005).

Tra il 2008 ed il 2017 la situazione peggiora nel decennio e soprattutto in aree economicamente meno ricche. Nel 2008, l'Agenzia europea dell'ambiente (AEA) ha svolto uno studio sulla desertificazione nell'Europa meridionale, centrale ed orientale, riguardante una superficie di 1,68 milioni di km<sup>2</sup>. Nel 2017 ha condotto uno studio basato sulla stessa metodologia. Dalla ricerca (cfr. Tab. 4.4 e Figura 4.20) è emerso che la parte di territorio ad alto o ad altissimo rischio di desertificazione era aumentata, in meno di un decennio, di 177 000 km<sup>2</sup>.

Tab. 4.4 Sensibilità alla desertificazione nell'Europa meridionale, centrale ed orientale (2008 e 2017) (Pravalie et al.,2017).

|               | 2008                        |            | 2017                        |            | Differenza fra il 2008 e il 2017 |          |
|---------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|----------------------------------|----------|
|               | migliaia di km <sup>2</sup> | %          | migliaia di km <sup>2</sup> | %          | migliaia di km <sup>2</sup>      | %        |
| Molto elevata | 10                          | 1          | 28                          | 2          | +18                              | +1,1     |
| Elevata       | 224                         | 13         | 383                         | 23         | +159                             | +9,5     |
| Moderata      | 419                         | 25         | 381                         | 23         | -38                              | -2,2     |
| Bassa         | 560                         | 33         | 475                         | 28         | -85                              | -5,1     |
| Molto bassa   | 467                         | 28         | 413                         | 24         | -54                              | -3,2     |
| <b>TOTALE</b> | <b>1 680</b>                | <b>100</b> | <b>1 680</b>                | <b>100</b> | <b>-</b>                         | <b>-</b> |

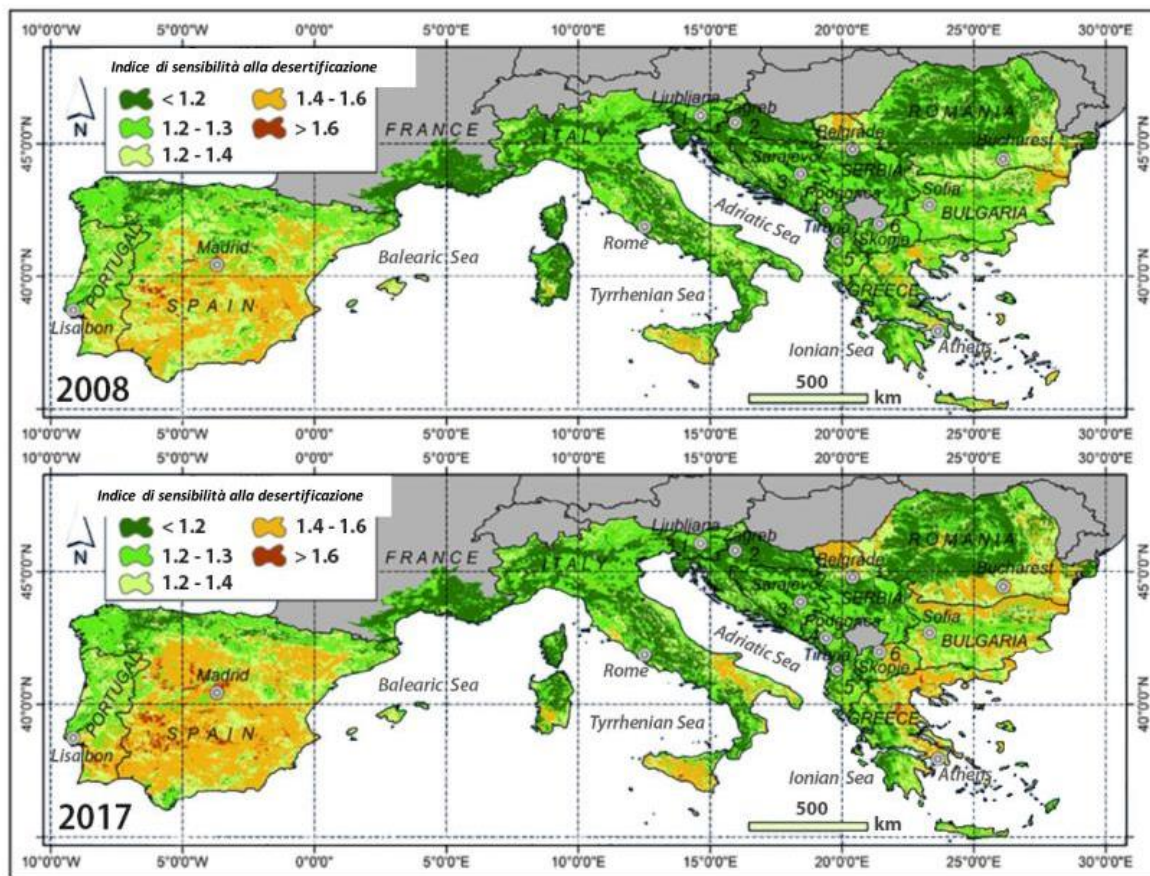
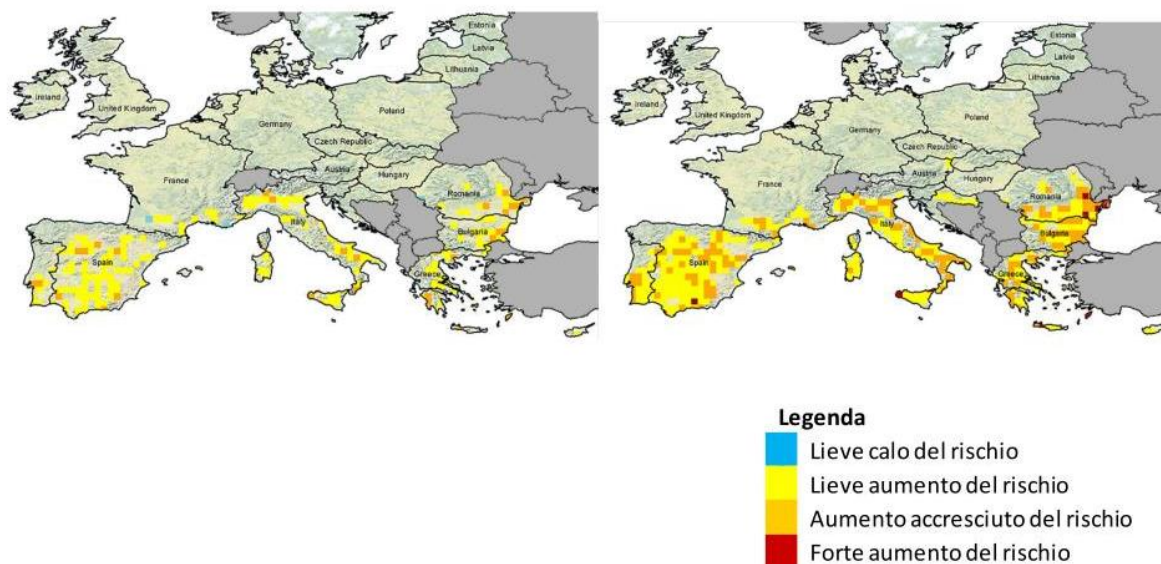


Figura 4.20 Indice di sensibilità alla desertificazione nell'UE per 2008 e 2017 (Pravalie et al., 2017).

La proiezione del trentennio 2071-2100 (rispetto al 1981-2010) peggiora per il *Climate Change*. Il rischio di desertificazione, che si prevede (Figura 4.21) sarà significativo soprattutto in Spagna,

## I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

nell'Italia meridionale, in Portogallo e in alcune zone dell'Europa sud-orientale, compresa la Bulgaria, la Grecia, Cipro e il delta del Danubio in Romania (Figura 4.21). Altri studi riportano un aumento dell'aridità e una diminuzione della disponibilità d'acqua particolarmente marcati nell'Europa meridionale e nell'area del Mediterraneo in concomitanza con l'aumento del riscaldamento globale da 1,5° C a 2° C.



*Figura 4.21 Cambiamento previsto nel periodo 2071–2100 riguardo al rischio di desertificazione e all'indice di aridità rispetto al periodo 1981-2010 (Spinioni J. et al., 2018).*

In Italia la sensibilità alla desertificazione è stata valutata in base alla definizione di zone sensibili sotto il profilo ambientale del progetto MEDALUS. La valutazione ha concluso, nel 2008, che il 10 % del territorio italiano era fortemente sensibile alla desertificazione mentre il 49 % presentava una sensibilità media. In particolare, il 70 % della Sicilia presenta un grado di vulnerabilità ambientale medio o elevato. Ma anche altre aree, specie nel sud-est dell'Italia e in Sardegna, ne sono interessate in misura significativa.

Il ruolo dell'I.N. nel combattere il degrado del suolo si esplica principalmente intervenendo sulla copertura del terreno e sull'implementazione del carbonio organico nel suolo, tramite semine, idrosemine e suoli artificiali (tecnosuoli).



Figura 4.22 Il contributo dell'I.N. alla mitigazione del rischio desertificazione.

Nella "Relazione speciale n. 33/2018: Combattere la desertificazione nell'UE: di fronte a una minaccia crescente occorre rafforzare le misure" sono stati segnalati due progetti particolarmente riusciti, nei quali gli auditor ravvisano esempio di buone pratiche (stabilizzazione scarpate, arricchimento con i tecnosuoli, miglioramento drenaggio, vegetazione adatta al clima, incremento biodiversità, miglioramento delle condizioni del terreno).

Uno di questi è il progetto per il contenimento del rischio desertificazione del "Parco sub-urbano Portella del Cerriolo" (Custonaci, Trapani).

**I progetti dell'UE possono avere un impatto positivo sulla lotta alla desertificazione**

60. Nel campione estratto, gli auditor hanno individuato due progetti particolarmente riusciti, nei quali ravvisano un esempio di buone pratiche. Questi progetti avevano consentito l'arricchimento di suolo in precedenza non produttivo e la protezione dello stesso dal degrado. Contrastando la desertificazione, riducendo l'erosione e migliorando la condizione del terreno, questi progetti hanno apportato, al contempo, vantaggi economici ai beneficiari o contribuito alla biodiversità (cfr. riquadro 4).

**Riquadro 4 – Buone pratiche – progetti concernenti la desertificazione**

Un progetto cofinanziato dal FESR in Sicilia (Italia) mirava a combattere la desertificazione stabilizzando le scarpate, arricchendo il suolo e migliorando il drenaggio. Il progetto ha anche contribuito alla crescita di vegetazione adattata alle condizioni climatiche locali e ad attenuare l'erosione in superficie, incrementando la biodiversità e migliorando le condizioni del terreno.

**Miglioramento delle condizioni del suolo in Italia (Sicilia)**



Fonte: Corte dei conti europea.

Figura 4.23 Estratto da Relazione speciale n. 33/2018: Combattere la desertificazione nell'UE: di fronte a una minaccia crescente occorre rafforzare le misure. Tra le best practices il Parco Portella del Cerriolo di Custonaci.

1

**ALLEGATO III**

Sintesi dei progetti concernenti la desertificazione visitati nel corso dell'audit

**TIPOLOGIE PROGETTI E VALUTAZIONI AUDITOR**

1. Irrigazioni
2. Forestazioni
3. Murature a Secco
4. Piante resilienti
5. Nuove Tecniche
6. Rotazione delle Colture
7. Gestione post incendi
8. Stabilizzazione scarpate
9. Aumento Copertura Vegetale
10. Aumento Copertura Suolo.

| Tipo di progetto   | Fonte UE di cofinanziamento     | N° di progetti inclusi nel campione | N° di progetti completati | Stati membri                    | Valutazione, da parte della Corte, del potenziale impatto sulla lotta alla desertificazione |
|--|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|
| Investimenti in infrastrutture irrigue   | FEASR<br>FESR                   | 9<br>1                              | 6<br>1                    | Tutti gli Stati membri visitati | Risultati contrastanti  |
| Misure forestali   | FEASR                           | 4                                   | 4                         | Italia, Cipro, Portogallo       | Positivo, in quanto la copertura vegetale è adattata alle condizioni climatiche             |
| Ripristino di muretti a secco o di sbarramenti   | FEASR                           | 3                                   | 3                         | Spagna, Italia                  | Positivo – previene l'erosione del suolo  |
| Uso di piante maggiormente adattate  | LIFE / Azione per il clima LIFE | 2                                   | 0                         | Spagna, Portogallo              | Progetti non completati   |
| Ricerca sulle tecniche per contrastare la desertificazione                                   | 7° PQ                           | 2                                   | 1                         | Cipro, Portogallo               | Positivo, data la divulgazione dei risultati della ricerca                                  |
| Rotazione delle colture  | FESR                            | 1                                   | 1                         | Spagna                          | Progetto non completato   |
| Recupero dei terreni dopo incendi boschivi   | FEASR                           | 1                                   | 0                         | Cipro                           | Progetto non completato   |
| Stabilizzazione delle scarpate, aumento della copertura vegetale e della copertura del suolo | FSUE                            | 1                                   | 0                         | Cipro                           | Progetto non completato   |
|  | FESR                            | 1                                   | 1                         | Italia                          | Positivo – previene la desertificazione e l'erosione del suolo                              |
| <b>Totale</b>  |                                 | <b>25</b>                           | <b>17</b>                 |                                 |   |

Figura 4.24 Estratto da Allegato III - Relazione speciale n. 33/2018: Combattere la desertificazione nell'UE: di fronte a una minaccia crescente occorre rafforzare le misure con un quadro di raffronto dei diversi progetti contro la desertificazione.

**Riquadro 6 – Preoccupazioni in merito alla sostenibilità di un progetto forestale per contrastare la desertificazione**

Riguardo a un progetto di imboscimento cofinanziato dal FEASR a Cipro, gli auditor hanno constatato che circa il 20 % degli alberi piantati non erano sopravvissuti nei primi cinque anni successivi alla conclusione del progetto, dato che alcune specie non erano del tutto adatte alle condizioni climatiche.



Fonte: Corte dei conti europea.

Figura 4.25 Preoccupazioni Corte dei conti per l'utilizzo dei fondi: Imboschimenti con specie non adatte.

#### 4.2.6 Il rischio desertificazione in Sicilia

##### La Sicilia resta la regione a maggior rischio desertificazione d'Europa.

Tra il 2001 e il 2011 sono state pubblicate 5 carte tematiche sulla desertificazione in Sicilia, seguite poi da studi sul rischio desertificazione a livello comunale, proiezioni di scenari futuri ed elaborazione di nuovi indici (Es. ESPI - *Environmentally Sensitive Patch Index* e ESPI-CQI, elaborati nel 2015 e nel 2016 da Duro, Piccione, Ragusa, Rapicavoli e Veneziano).

Tra i principali lavori si ricordano:

***Carta della vulnerabilità alla desertificazione della Sicilia elaborata nel 2008 a cura di Arnone G., Greco D., Renda P., Arisco G., Cusimano G., Favara R., Nigro F. Perricone M.***

Per la realizzazione della carta è stata adottata una metodologia di *land evaluation*, ispirata ai metodi di zonazione per aree omogenee in cui l'elemento centrale è costituito dalla sovrapposizione cartografica dei diversi tematismi (Analisi vegetazionale, morfologica, geologica, socioeconomica e climatica). Attraverso la successiva sovrapposizione pesata delle carte intermedie si ottiene la carta della desertificazione.

I territori maggiormente vulnerabili risultano essere quelli dell'estremità occidentale dell'Isola, della fascia costiera meridionale, della porzione centrale, centro-meridionale e centro-orientale dell'Isola. Ai fini della vulnerabilità lo 0,25% dei territori ricade nella classe bassa, il 6,49% nella moderata, il 30,79% nella media, il 43,22% nella elevata e il 19,24% nella molto elevata.

**2009 Piccione V., Veneziano V., Malacrinò V., Campisi S.**

Nel 2009 l'équipe del prof. Piccione, dell'Università degli Studi di Catania, pubblica uno studio del rischio desertificazione della Sicilia, con restituzione cartografica bitemporale (prima e seconda metà del XX Secolo) - con un dettaglio informativo di 50 per 50 metri al suolo.

Per quanto attiene la prima metà del XX Secolo il 74,7% del territorio siciliano presenta un'alta sensibilità alla desertificazione, il 14,8% era mediamente sensibile, il 2,4% potenziale e il 4,5 % non sensibile. Le aree urbane incidono per il 3,7%. Le aree maggiormente sensibili si collocano nello Stretto di Sicilia. I territori provinciali più a rischio sono: Agrigento, Caltanissetta, Enna, Ragusa e Trapani (Figura 4.26).

Per quanto attiene la seconda metà del XX Secolo il 61,1% del territorio siciliano presenta un'alta sensibilità alla desertificazione, il 16,6% è mediamente sensibile, il 3,5% potenziale e il 12,7% non sensibile. Le aree urbane incidono per il 6,1%. La maggiore sensibilità alla desertificazione si colloca nello Stretto di Sicilia e nella Piana di Catania.

Le Province maggiormente interessate sono: Agrigento, Caltanissetta, Ragusa e Trapani (Figura 4.26).

Dal confronto dei due periodi analizzati emerge un aumento significativo delle aree non sensibili (+9,3%) e un decremento delle aree ad alta sensibilità (-13,6%). L'area più a rischio è rappresentata dal centro Sicilia, dove dominavano le aridocolture. Le aree che hanno mantenuto la maggiore sensibilità si collocano nello Stretto di Sicilia e nell'Agrigentino. Le province più a rischio sono rimaste: Agrigento, Caltanissetta, Ragusa e Trapani (Figura 4.26).

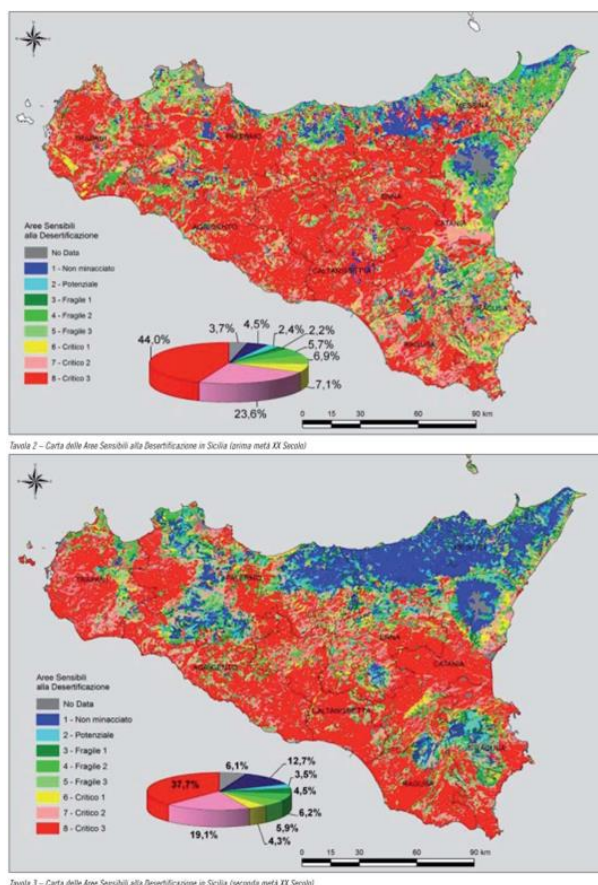


Figura 4.26 carta delle aree sensibili alla Desertificazione in Sicilia prima metà del XX Secolo sopra e seconda metà del XX Secolo sotto.

I territori di 242 comuni regrediscono dalla condizione di massima sensibilità (critico 3), 107 subiscono un incremento, 33 si mantengono stabili.

I territori non affetti da rischio desertificazione si concentrano prevalentemente nella provincia di Messina, probabilmente per effetto di aspetti climatici, vegetazionali e gestionali del territorio (climi umidi, zone boscate, presenza di aree protette).

I territori a rischio ricadono nell'entroterra dell'isola, in particolare in provincia di Caltanissetta ed Enna, ma anche a Catania e lungo la fascia costiera nella provincia di Agrigento. Ciò è dovuto alle particolari caratteristiche geo-morfologiche (colline argillose poco stabili) e all'intenso sfruttamento delle risorse naturali per le attività antropiche.

Per quanto attiene il confronto dei due periodi, è significativo il decremento del rischio registrato dall'Indice di Qualità della Vegetazione e di Gestione del Territorio a conferma delle riuscite politiche di conservazione della natura e di riforestazione, unitamente al ritorno alla naturalità di alcuni territori abbandonati.



#### **4.2.7 Caso Studio: Parco sub-urbano Portella del Cerriolo (Custonaci, Trapani)**

Il Parco sub-urbano Portella del Cerriolo si trova a Custonaci (Trapani), il 2° Comune a maggior rischio desertificazione della Sicilia. Abitato sin dalla preistoria, ha oggi una fisionomia del paesaggio vegetale e una composizione floristica profondamente influenzate dalle attività antropiche: in particolare agricoltura ed estrazione di marmo. Inoltre, il litorale è interessato da notevoli spiaggiamenti a banchi di posidonia che sono un fattore positivo per la difesa naturale contro l'erosione costiera, dall'altro lato che rappresentano un problema per la balneazione e conseguenti onerose rimozioni, spostamenti temporanei e smaltimenti. Il caso studio, anche per la vicina Riserva Monte Cofano, è importante per la conservazione della biodiversità floristica e vegetazionale della provincia di Trapani.

Nell'ambito del progetto "*Primi interventi finalizzati a contenere il fenomeno della desertificazione nel Parco sub-urbano Portella del Cerriolo*", realizzati negli anni 2014-2015, con finanziamento PO- FERS 2007-2013, si sono eseguite delle opere di Ingegneria Naturalistica al fine di ridurre l'elevato rischio desertificazione che caratterizzava l'area. Il progetto ha ricevuto il premio internazionale ECOMED nell'ambito della X Conference AEIP-APENA-ECOMED, Bioengineering in the Mediterranean Area, che si è tenuta il 21, 22, 23 Novembre 2018 a Madrid ed è stato menzionato come "buona pratica" dalla Corte dei Conti Europea nella Relazione speciale n.33 2018 - Combattere la desertificazione nell'UE: di fronte a una minaccia crescente occorre rafforzare le misure.

Per le schede di intervento tecniche si rimanda al sito AIPIN (<http://www.aipin.it/database-best-practices-i-n/>).

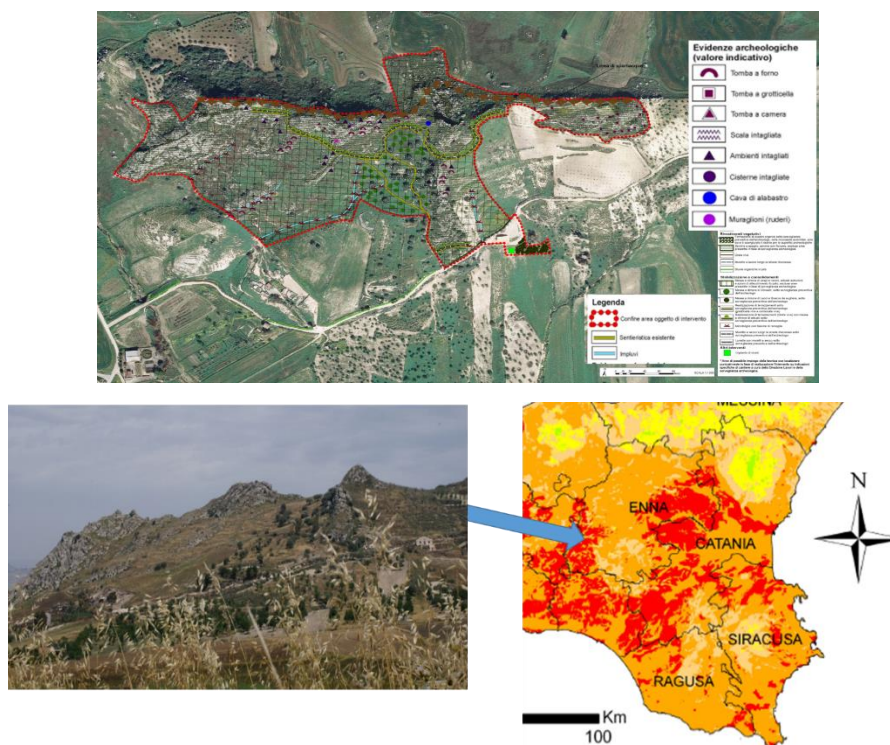
4.2.8 *Caso Studio: Area archeologica «Le Rocche», Pietraperzia (Enna)*

Figura 4.27 Area di progetto.

Nel 2014 in occasione intervento di prevenzione rischio desertificazione in area archeologica (Le Rocche) a Pietraperzia è stato impiegato un tecnosuolo costituito da terre di scavo e FOS di scarti di vegetazione. In particolare, nell'area sono stati effettuati i seguenti interventi: Semine a spaglio e con fiorume, Muretti a secco e lunette con muretti a secco, Terrazzamenti, Cuscini organici, Stuoie organiche in juta, Grata viva, Messa a dimora di specie ad elevata capacità biotecnica, messe a dimora di Lecci e querce, microbriglie con fascine di ramaglia. Il progetto è stato occasione per condurre studi e ricerche sulle caratteristiche biotecniche degli apparati radicali delle graminacee mediterranee.

Per le schede di intervento tecniche si rimanda al sito AIPIN (<http://www.aipin.it/database-best-practices-i-n/>).

4.2.9 *Riflessioni e conclusioni dall'Oreto all'Alcantara: una involuzione o una evoluzione?*

*Una profezia del Prof. Ugo Maione?*

**1981**

Epoca di piene fluviali in Sicilia. La mia Tesi sperimentale di laurea trattava 40 anni di deflussi per laminare le piene urbane dell'Oreto con piccolissimi serbatoi in serie rovinose per la Città di Palermo. In questo fiume vi era in passato tanta acqua che tra i pesci vi erano anche gli storioni. Il Prof. Ugo

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Maione, illustre idraulico del Politecnico di Milano, venuto a conoscenza dell'oggetto della tesi si stupì perché disse che in Sicilia si sarebbero dovute le portate di magra perché morivano i pesci. Allora non esistevano ancora termini quali minimo deflusso vitale.



*Figura 4.28 Piene fluviali in Sicilia.*

## **2021**

Gli impegni professionali chiedono di trattenere in aree golenali l'acqua da subalveo dell'Alcantara, perché completamente in secca. Il Fiume Alcantara, nel 1981 era ricchissimo d'acqua ed ora, invece, e con Deflusso Ecologico nullo. Ecco perché si vogliono creare aree emergenziali di rinaturalizzazione temporanee faunistiche e vegetazionali.

La desertificazione porta ormai a dighe per laghi artificiali sovradimensionati e prosciugati da opere di derivazione a valle spesso deficitarie.

Ciò fa riemergere, come fantasmi, archeologie dell'Antropocene, come Abu Simbel.



*Figura 4.29 Fiume Alcantara.*

### **Occorre una riflessione**

Si dovrebbe rivedere naturalisticamente la gestione delle acque aumentando le lunghezze dei bagnasciuga creando, con pennelli /penisole, isole galleggianti etc., aree di diversità morfologica e biologica.

Cioè ripianificare sulla base dei bisogni del Climate Change e non solo dell'idraulica.

Una revisione, una rilettura, in funzione dei Servizi Ecosistemici.

### ***Bibliografia Par.4.2***

CANCELLIERI F., Piccione V , VENEZIANO V. (2017). Principali studi sul rischio desertificazione in Sicilia. *Geologia dell'Ambiente*, Periodico trimestrale della Società Italiana di Geologia Ambientale N. 1/2017Anno XXV - gennaio-marzo 2017

EUROPEAN COMMISSION, 1999 - *The MEDALUS project Mediterranean desertification and land use*. Project report. Kosmas C., Kirkby M., Geeson N. (eds.), EUR 18882.

Kosmas C, Kirkby M and Geeson N, 1999. The MEDALUS project. Mediterranean Desertification and Land Use. Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification. European Commission, Brussels.

PICCIONE V., VENEZIANO V., MALACRINÒ V., CAMPISI S. 2009 - Rischio Desertificazione Regione Sicilia (Protocollo MEDALUS). Mappe di sensibilità e incidenza territoriale a scala comunale del processo in divenire. *Quad. Bot. Ambientale Appl*, 20.

Pirrerà G., Ferrara L.M. (2019) University of Milano-Bicocca, Milano “Technosoils as an help from Nature & Anthropocene Activities to ecological restoration”, Nature and society facing the Anthropocene challenges and perspectives for landscape ecology, 10th World Congress of the International Association for Landscape Ecology, SIEP IALE

Pirrerà G., Ferrara L.M. (2018) – “New Scenarios From Ecological Restoration Work to contain the Risk of Desertification in Custonaci” X AEIP-APENA-EFIB-ECOMED conference: Soil and Water Bioengineering in the Mediterranean ecoregion. ECOMEDBIO EFIB Award-European Soil and Water Bioengineering for “Better communication in the congress”, Madrid Spain

Pirrerà G. (2018) - “Recupero di Materiali di Scarto per la Prevenzione del Rischio Desertificazione a Custonaci (Trapani – Sicilia)”, *Affrontare la desertificazione nel Mediterraneo col Cocoon*, Roma

*I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Pirrerà G., Calvo R., D'asaro F., Ferrara L.M., Lo Nardo C. (2017) "Technosoils for the prevention of desertification risk" - *L'Ingegnere Italiano* - n. 3/2017 - Edizione Speciale World Engineering Forum 2017 PAG.57, 59

Pirrerà G. (2017) "Acqua&Suolo: la rinaturazione come motore di sviluppo" - *Sicily: Landscape in motion. Lo sviluppo del paesaggio nelle strategie di sostenibilità*, Giarre, Catania, Italia.

Pirrerà G., Ferrara L.M. (2017). "Utilizzo di frazione organica stabilizzata da scarti di vegetazione e di vermicompost per i tecnosuoli" 3rd International Symposium of Soil and Water Bioengineering - *Materials and Techniques in Ecological Restoration*, Sant'Agata di Militello, Messina, Italia

Pirrerà G., Ferrara L.M. (2017) "Recupero di scarti di vegetazione e ammendanti compostati per la prevenzione del rischio desertificazione" *Convegno Ingegneria Naturalistica in Ambito Mediterraneo*, Roma, Italia

Pirrerà G., Ferrara L.M. (2017). "Applications of wooswms and materials for prevention the desertification risk and technosoils" *International Symposium on Soil and Water Bioengineering in a Changing Climate*, Glasgow, Scotland, UK.

Renda P; Arisco G.; Cusimano G.; Favara R.; Nigro F.; Perricone M. (2008). *Carta della vulnerabilità alla desertificazione della Sicilia. Regione Sicilia. ARTA.*

Sauli G., Pellizzari L. (2015) – *La segregazione del carbonio negli interventi di Ingegneria Naturalistica. Convegno "Acque e Suoli"*, Milano 25 settembre 2015

### **4.3 AREE UMIDE QUALE COMPENSAZIONE AMBIENTALE PER IL RISCHIO DESERTIFICAZIONE: CASI STUDIO (G. Pirrera)**

#### **4.3.1 Perché le Nature Based Solutions (NBS) consentono di contrastare la desertificazione con aree umide**

La definizione della IUNC (*International Union for the Conservation of Nature*) definisce le *Nature Based Solution (NBS)* come «Azioni per proteggere, gestire in modo sostenibile e ripristinare ecosistemi naturali o modificati, che affrontino le sfide della società in modo efficace e adattivo, fornendo contemporaneamente benessere umano e benefici per la biodiversità».

Le *NBS* affrontano infatti tutti i temi legati alla desertificazione: la sicurezza alimentare, i cambiamenti climatici, la sicurezza dell'acqua, la salute umana, il rischio di catastrofi e lo sviluppo sociale ed economico.

Anche i Principi fondamentali delle *NBS* sono legati sia alla desertificazione e alle aree umide:

- 1) abbracciare le norme di conservazione della natura;
- 2) possono essere implementate da solo o in modo integrato con altre soluzioni alle sfide della società (ad esempio, soluzioni tecnologiche e ingegneristiche);
- 3) sono determinati da contesti naturali e culturali che includono conoscenze tradizionali, locali e scientifiche;
- 4) produrre benefici per la società in modo giusto ed equo, in modo da promuovere la trasparenza e un'ampia partecipazione;
- 5) mantenere la diversità biologica e culturale e la capacità degli ecosistemi di evolversi nel tempo;
- 6) sono applicati su scala paesaggistica;
- 7) riconoscere e affrontare i compromessi tra la produzione di alcuni benefici economici immediati per lo sviluppo e le opzioni future per la produzione dell'intera gamma di servizi ecosistemici;
- 8) sono parte integrante della progettazione generale delle politiche, delle misure o delle azioni, per affrontare una sfida specifica.



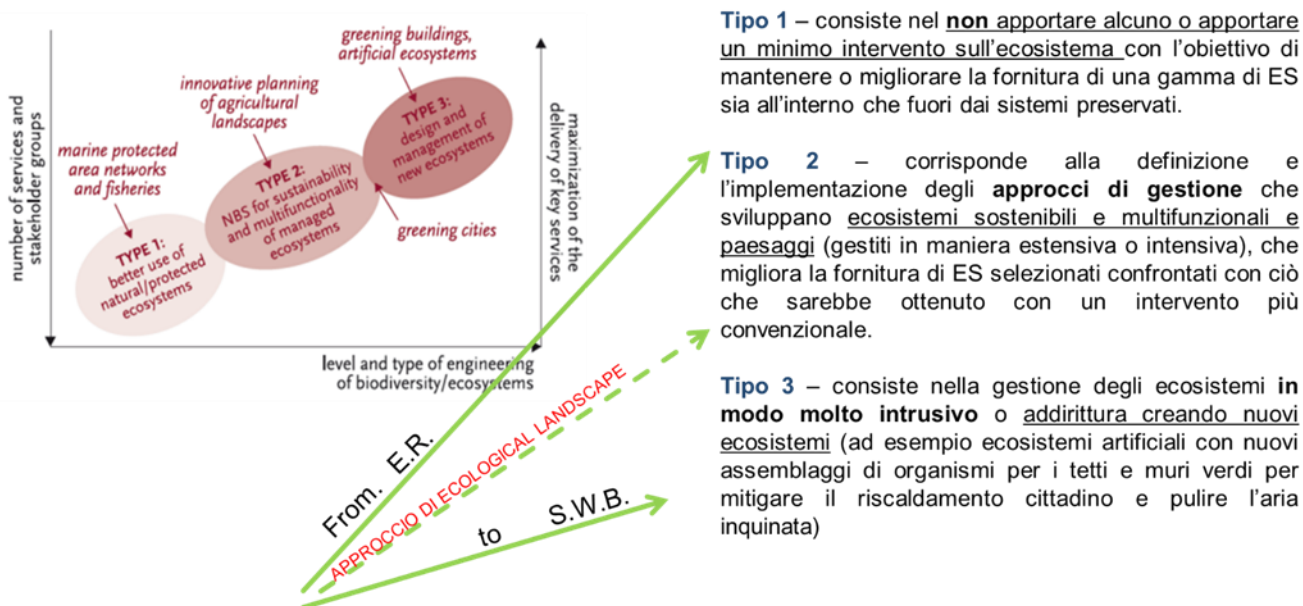
Figura 4.30 Nature-Based Solutions fonte IUCN.

Ingegneria Naturalistica L’Ingegneria Naturalistica ha da sempre avuto uno stretto legame con le aree umide, in particolare per quello che concerne sistemazioni spondali ed interventi in alveo.

Oggi questo legame è ancor più rafforzato dalla presa di coscienza che la SWB è NBS, ed in quanto tale si applica non solo per la tutela delle aree umide (depurazione naturale fiumi, laghi, restauro dunale, etc), ma anche per la creazione di aree umide in ambito urbano e industriale (depurazione naturale per il trattamento dei reflui, sistemi di de-impermeabilizzazione urbana, Fasce tampone Ecosistemi filtro, Vasche di sicurezza stradali, etc.).

Grazie alla depurazione naturale, infatti, si possono raggiungere standard di miglioramento del paesaggio naturale anche in contesti industriali, abbattendo costi di smaltimento dei reflui (ecologia industriale). Inoltre, tutto ciò che viene prodotto in termini di biomassa, può anche essere impiegato per la produzione di energia (economia circolare).

## Nature Based Solutions (NBS)



**Tipologia 1** – consiste nel non apportare alcuno o apportare un minimo intervento sull'ecosistema con l'obiettivo di mantenere o migliorare la fornitura di una gamma di ES sia all'interno che fuori dai sistemi preservati.

**Tipologia 2** – corrisponde alla definizione e l'implementazione degli **approcci di gestione** che sviluppano ecosistemi sostenibili e multifunzionali e paesaggi (gestiti in maniera estensiva o intensiva), che migliora la fornitura di ES selezionati confrontati con ciò che sarebbe ottenuto con un intervento più convenzionale.

**Tipologia 3** – consiste nella gestione degli ecosistemi **in modo molto intrusivo** o addirittura creando nuovi ecosistemi (ad esempio ecosistemi artificiali con nuovi assemblaggi di organismi per i tetti e muri verdi per mitigare il riscaldamento cittadino e pulire l'aria inquinata)

Figura 4.31 Tipologie di NBS.

Per valutare come le aree umide possano contribuire al contrasto alla desertificazione è utile ricordare i principi base della depurazione naturale.

### 4.3.2 Generalità sulla depurazione naturale

Per **depurazione naturale** si intendono l'insieme di tecniche di trattamento delle acque o dei suoli che sfruttano l'azione combinata di piante, particolari ceppi batterici e il terreno per ottenere la rimozione dei contaminati. Le tecniche di depurazione naturale permettono di realizzare efficienti sistemi di depurazione (con efficienze di processo superiori al 90%) mediante la riproduzione di ambienti normalmente presenti in natura. Ciò rende questo tipo di trattamenti, una valida alternativa a quelli convenzionali, soprattutto nel caso di abitazioni isolate che hanno difficoltà a collegarsi alla rete fognaria.

I trattamenti di depurazione naturali più utilizzati sono:

- **fitodepurazione;**
- **biostagni lagune naturali;**
- **fasce tampone;**
- **depurazione in alveo.**

I biostagni e le lagune naturali sono dei piccoli bacini idrici artificiali, in cui è solitamente prevista un'impermeabilizzazione di fondo, e che vengono utilizzati nel campo della depurazione delle acque.



## I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

La depurazione in alveo permette la depurazione delle acque negli stessi alvei dei corsi d'acqua, mediante tecniche che permettono l'areazione naturale

Le fasce tampone e la *phytoremediation* sono delle tecniche di bonifica dei siti che sfruttano le piante per limitare la diffusione o rimuovere i contaminanti presenti in un'area contaminata.

### 4.3.2.1 Meccanismi di trattamento dei contaminanti

In funzione delle applicazioni pratiche, le tecniche di fitodepurazione si possono classificare in diverse categorie sulla base del processo di trattamento del contaminante.

In particolare, tra i meccanismi di *phytoremediation* dei contaminanti possiamo distinguere:

- 1) **degradazione**, per distruzione o alterazione del contaminante organico con i seguenti processi:
  - **fitodegradazione**: Assimilazione diretta del contaminante o di metalli pesanti nella biomassa. Le piante possono metabolizzare una varietà di composti organici, inclusi i solventi clorurati, gli erbicidi e gli insetticidi. Alcune piante capaci di attivare questo meccanismo sono: *Lemna minor*, *Hydrocotyle* sp., *Lolium perenne*, *Populus* spp..
  - **Rizodegradazione**: Degradazione del contaminante organico con attività biologica ad opera della rizosfera. Alcune piante capaci di attivare questo processo: *Lemna minor*, *Hydrocotyle* sp., *Scirpus lacustris*, *Phragmites australis*, *Typha* sp., *Trifolium repens*, *Salix* spp..
- 2) **Accumulazione, per il contenimento o la rimozione di contaminanti organici e metallici**:
  - **Fitoestrazione**: Le piante attraverso le proprie radici assorbono insieme ai nutrienti e all'acqua presente nel suolo, anche i metalli pesanti e i radionuclidi. Le piante possono tollerare, traslocare e accumulare alte concentrazioni di metalli pesanti nella parte aerea e avere una rapida crescita e un'alta produzione di biomassa. Gli inquinanti non sono distrutti ma accumulati nei tessuti. Alcune specie in grado di attivare i meccanismi di fitoestrazione sono: *Salix* spp., *Brassica arvensis* var. *juncea* Kunze, *Carex nigra*, *Typha angustifolia*., *Typha latifolia*, *Medicago sativa*., *Alyssum bertolonii*, *Cyperus papyrus*, *Helianthus annuus* oltre che *Nicotiana* spp..
  - **Rizofiltrazione**: meccanismo attraverso il quale le piante assorbono e concentrano i metalli, i radionuclidi e i contaminanti organici nelle radici.
- 3) **Dissipazione, per la rimozione di contaminanti organici o inorganici, nell'atmosfera**:
  - **Fitovolatilizzazione**: I contaminanti organici e inorganici, se disponibili, sono prelevati nei tessuti della pianta e volatilizzati in atmosfera. Alcune specie in grado di

fitovolatilizzare: *Bolboschoenus maritimus*, *Arabsidopsis thaliana*, *Brassica napus*, *Populus* spp., oltre che *Nicotiana* spp.

#### 4) Immobilizzazione per il contenimento di contaminanti organici e inorganici:

- **Fitostabilizzazione:** il meccanismo di alcune piante, utile per immobilizzare i contaminanti nel suolo, acqua e aria attraverso l'assorbimento e l'accumulo. Specie: *Carex nigra*, *Scirpus lacustris*, *Typha* spp., *Festuca arundinacea*, *Medicago sativa*, *Salix alba*
- **Controllo Idraulico:** impiego della vegetazione per influenzare il movimento dell'acqua di falda e l'acqua del suolo, attraverso l'assimilazione e il consumo di grandi volumi di acqua. Il controllo idraulico può influenzare e contenere potenzialmente il movimento dell'inquinante di falda, ridurre o prevenire potenzialmente il movimento dell'inquinante di falda o del percolato. Pioppi e Salici sono in grado di assorbire anche 100 litri di acqua al giorno, adempiendo alle funzioni di barriera idraulica.

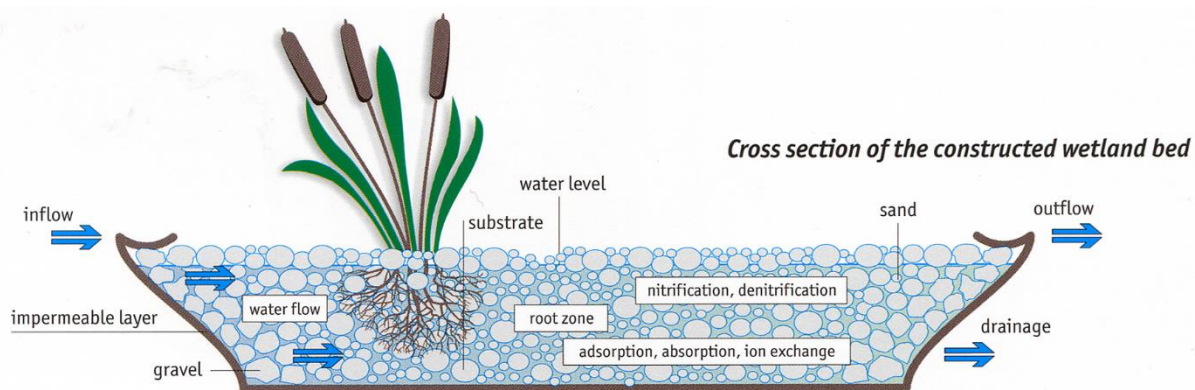


Figura 4.32 Meccanismi di azione e obiettivi di bonifica.

#### 4.3.2.2 Tipologie di sistemi di fitodepurazione

I sistemi di fitodepurazione in base alle caratteristiche del cammino idraulico delle acque reflue in:

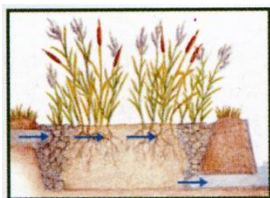
- sistemi a flusso superficiale o libero (FWS - Free Water Surface);
- sistemi a flusso sub-superficiale o sommerso (SFS: Subsurface Flow Sistem) a sua volta suddivisi in:
  - sistemi a flusso sommerso orizzontale (SFS-h o HF: Subsurface Flow System - horizontal)
  - sistema a flusso sommerso verticale (SFS-v o VF: Subsurface Flow System - vertical).



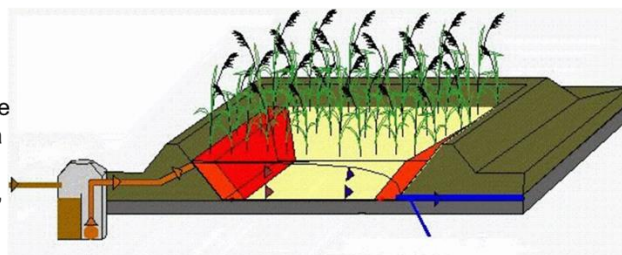
I sistemi FWS consistono in vasche o canali dove la superficie dell'acqua è esposta all'atmosfera ed il suolo, costantemente sommerso, costituisce il supporto per le radici delle piante emergenti; anche in questi sistemi il flusso è orizzontale e l'altezza delle vasche generalmente limitata a poche decine di centimetri. In questi sistemi i meccanismi di abbattimento riproducono esattamente tutti i fattori in gioco nel potere autodepurativo delle zone umide

Figura 4.33 Sistemi a flusso superficiale (FWS).

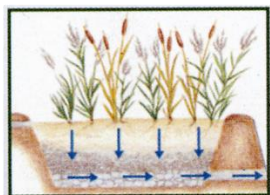
### Sistemi a flusso sommerso orizzontale (SFS-h o HF)



I sistemi di fitodepurazione SFS-h o HF (flusso sommerso orizzontale) sono costituiti da vasche contenenti materiale inerte con granulometria prescelta al fine di assicurare una adeguata conducibilità idraulica (i mezzi di riempimento comunemente usati sono sabbia, ghiaia, pietrisco).



### Sistemi a flusso sommerso verticale (VF)



La differenza consiste nel fatto che il refluo da trattare scorre verticalmente nel medium di riempimento (percolazione) e viene immesso nelle vasche con carico alternato discontinuo, mentre nei sistemi SFS-h si ha un flusso a pistone, con alimentazione continua.

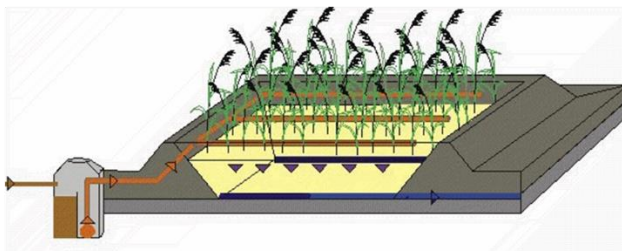


Figura 4.34 Sistemi a flusso sommerso orizzontale e verticale.

#### 4.3.2.3 La vegetazione

Le piante principalmente coinvolte nei processi di bioremediation sono le macrofite acquatiche e si classificano in:

- 1) **Elofite o macrofite radicate emergenti:** specie caratterizzate da foglie, fusto e organi riproduttivi emersi e da un esteso apparato radicale, spesso di tipo rizomatoso, adatto a crescere su terreni saturi o completamente sommersi grazie al parenchima aerifero molto sviluppato che permette il trasporto dell'ossigeno dalle foglie fino alle radici e ai rizomi.

2) **Idrofite:** piante acquatiche perenni le cui gemme si trovano sommerse o natanti. Le idrofite possono essere suddivise in due sottogruppi: pleustofite, se non ancorate al substrato e liberamente natanti in superficie e rizofite (idrofitte sommerse e idrofite flottanti) se ancorate al fondo mediante il loro apparato radicale. In particolare, le rizofite sono piante con radici che penetrano nel substrato, che vivono totalmente sommerse (idrofitte sommerse) o ancorate al fondo e fluttuanti, emergenti dalla superficie solo con i fiori e, talvolta, con foglie galleggianti (idrofitte flottanti).

Tab. 4.5 Ruolo delle macrofite (ISPRA,2012).

| Parte aerea                        | Parte sommersa                           | Apparati radicali e rizomi   |
|------------------------------------|--|--|
| attenuazione della luce            | funzione di supporto per i microrganismi | stabilizzazione della superficie e, quindi, controllo dell'erosione          |
| influenza sul microclima           | rilascio di ossigeno fotosintetico       | prevenzione di infiltrazione nei sistemi a flusso sub-superficiale verticale |
| riduzione della velocità del vento | assunzione dei nutrienti                 | assunzione di nutrienti  |
| funzione estetica                  | effetto filtrante per i detriti          | rilascio di antibiotici  |
| riserva di nutrienti               | riduzione della velocità della corrente  |  |

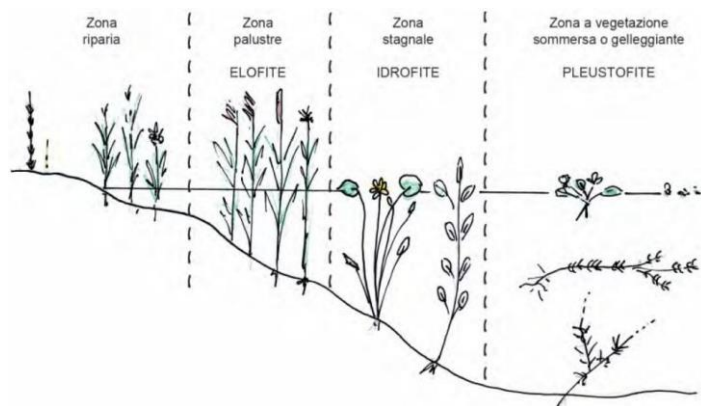


Figura 4.35 Classificazione delle piante acquatiche.

Tab. 4.6 Piante acquatiche maggiormente utilizzate per i sistemi a flusso libero in Italia (ISPRA,2012).

| ELOFITE  |                     | IDROFITE                          |                        |
|--|---------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Nome scientifico                                 | Nome comune         | Nome scientifico                  | Nome comune            |
| <i>Phragmites australis</i> (o <i>communis</i> ) | Cannuccia di palude | IDROFITE SOMMERSE                 |                        |
| <i>Thypha latifolia</i>                          | Mazzasorda, Sala    | <i>Myriophyllum spicatum</i>      | Millefoglie d'acqua    |
| <i>Thypha minima</i>                             | Mazzasorda          | <i>Potamogeton natans</i>         | Lingua d'acqua         |
| <i>Thypha angustifolia</i>                       | Stiancia            | <i>Potamogeton crispus</i>        | Lingua d'acqua crespa  |
| <i>Schoenoplectus lacustris</i>                  | Giunco da corde     | <i>Ceratophyllum demersum</i>     |                        |
| <i>Juncus</i> spp.                               | Giunco              | <i>Elodea canadensis</i>          | Peste d'acqua comune   |
| <i>Butomus umbellatus</i>                        | Giunco fiorito      |                                   |                        |
| <i>Caltha palustris</i>                          | Farferugine         | IDROFITE FLOTTANTI                |                        |
| <i>Carex fusca</i>                               | Carice nera         | <i>Nymphaea alba</i>              | Ninfea comune, carfano |
| <i>Carex hirta</i>                               | Carice eretta       | <i>Nymphaea rustica</i>           | Ninfea rosa            |
| <i>Carex elata</i>                               | Carice spondicola   | <i>Nuphar lutea</i>               | Nannufero              |
| <i>Iris pseudacorus</i>                          | Iris giallo         | <i>Nymphoides peltata</i>         | Genziana d'acqua       |
| <i>Eupatorium cannabinum</i>                     | Canapa d'acqua      | <i>Callitriche stagnalis</i>      | Stella d'acqua         |
| <i>Mentha aquatica</i>                           | Menta acquatica     | <i>Hottonia palustris</i>         | Violetta d'acqua       |
| <i>Epilobium irsutum</i>                         | Epilobio maggiore   |                                   |                        |
| <i>Alisma plantago aquatica</i>                  | Mestolaccia         | PLEUSTOFITE                       |                        |
| <i>Lythrum salicaria</i>                         | Salcerella          | <i>Hydrocharis morsus - ranae</i> | Morso di rana          |
| <i>Stachys palustris</i>                         | Mastricale palustre | <i>Lemna</i> spp.                 | Lenticchie d'acqua     |
| <i>Sparganium erectum</i>                        | Coltellaccio, bido  | <i>Wolffia arrhiza</i>            |                        |
| <i>Glyceria maxima</i>                           | Gramigna di palude  | <i>Eichornia crassipes</i>        | Giacinto d'acqua       |

Al fine di ottimizzare l'utilizzo delle piante per la depurazione delle acque e il recupero ecologico, è stato ideato un data base che contiene caratteristiche biotecniche delle piante più utilizzate e di quelle utilizzabili. La scelta delle specie deve dipendere dalle esigenze depurative ma anche dalla compatibilità con il paesaggio circostante, soprattutto nelle aree protette, nelle quali è opportuno individuare taxa autoctoni ed idonei (Latteo, 2012).

## Data base delle piante idonee

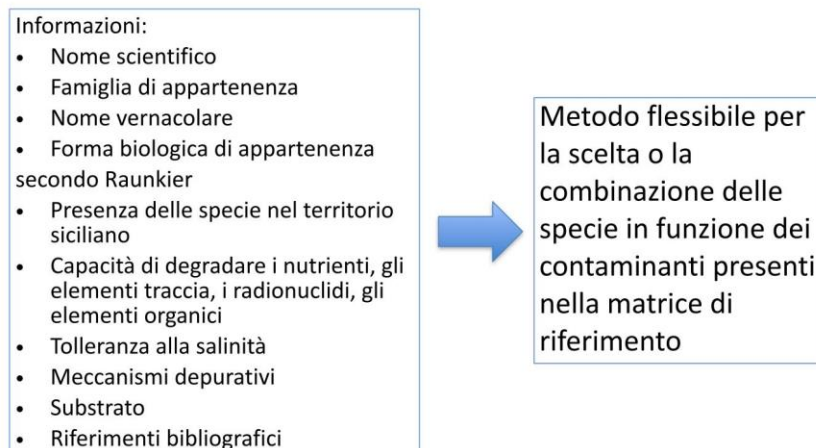


Figura 4.36 Data base delle piante idonee.

### 4.3.3 *Restauro ecologico e ricostruzione di aree umide a obiettivo multipli: CASI STUDIO*

I Casi Studio possono suddividersi in 3 categorie:

- Conservazione e Capitale Naturale;
- Restauro Fluviale e Fitorimediaio;
- Ecologia Industriale.

#### 4.3.3.1 *Conservazione e Capitale Naturale*

##### ***Bosco WWF di Vanzago (Milano) 2015-2019***

Miglioramento sito natura 2000 SIC/ZPS IT2050006 "Bosco WWF di Vanzago" attraverso interventi alle aree umide e di Wildlife (Scheda 39: 2015-2018 – Scheda 39bis: 2018 -2019 Monitoraggio in corso).



Figura 4.37 Bosco WWF di Vanzago SIC/ZPS IT2050006. Area di intervento post operam (2016) ed ante operam (2015).

### **Obiettivo dell'intervento**

Contenimento perdite mediante impermeabilizzazione bentonitica del lago Vecchio ad alta naturalità gestiti da WWF Oasi. I lavori comprendevano anche realizzazione di isole artificiali, palificate doppie per nidificazione martin pescatore e gruccioni, pali di sosta per ardeidi, taglio di una penisola per conversione in isola, piccoli biostagni diffusi, messe a dimora di idrofite e talee di salice, espanti alloctone invasive, etc. E poi ancora economia circolare in ambito di cantiere: riutilizzo di radici di alberi morti e cilindri di cartone d'imbballaggio a pelo d'acqua. Salvaguardia specie autoctone nell'ambito rete Natura 2000. Protezione delle specie di avifauna acquatica e dei siti di sosta e nidificazione, Ricostituzione del potenziale botanico e faunistico legato agli ambienti umidi, anche in assolvimento agli obiettivi della convenzione di Ramsar; Migliore fruizione e mantenimento della biodiversità e dell'equilibrio degli ambienti umidi attraverso il ripristino di aree ad alta naturalità; Miglioramento e diversificazione delle modalità di fruizione dell'area.

Lavori naturalistici sono stati effettuati in precedenza con palificate doppie modificate per la nidificazione di martin pescatore. A questi si sono aggiunti i lavori di impermeabilizzazione effettuati in due momenti 2015 e 2019 quali misure di compensazione ambientale per Milano Expo. Il secondo stralcio è stato un finanziamento aggiuntivo premiante per i buoni risultati ottenuti col primo. Tutti i lavori sono stati soggetti a "avviamento post impianto" e manutenzione e monitoraggio ecologico per Unità Ambientali per un quinquennio secondo una modalità prescritta dall'ente appaltante.



Figura 4.38 Scavi e posa del geocomposito per le impermeabilizzazioni. Bosco WWF di Vanzago (2015).

### Aspetti vegetazionali dell'area

Il sottobosco è costituito da prugnolo tardivo, noccioli, sambuchi, ciliegi selvatici, agrifogli, biancospini, felci di diverse varietà, mughetti, e centinaia di altre specie erbacee.

Le sponde degli specchi d'acqua e delle altre zone umide ospitano invece specie tipicamente igrofile come il salice bianco, il salicone, il pioppo, l'ontano e cannuce palustri come la tifa o la fragmite. È di particolare importanza l'habitat "Laghi eutrofici naturali con vegetazione del Magnopotamion o Hydrocharition" per una copertura del 2% (codice 3150). Altri Habitat significativi e meritevoli di tutela secondo la direttiva 79/43/CEE, presenti all'interno dell'oasi risultano:

- querceti di farnia o rovere subatlantici e dell'Europa Centrale del *Carpinion betuli* per una copertura del 50% (codice 9160);
- foreste miste riparie di grandi fiumi a *Quercus robur*, *Ulmus laevis* e *Ulmus minor*, *Fraxinus excelsior* o *Fraxinus angustifolia* (*Ulmion minoris*) per una copertura del 10% (codice 91F0);
- foreste alluvionali di *Alnus glutinosa* e *Fraxinus excelsior* (Alno-Padion, Alnion incanae, Salicion albae) per una copertura del 5% (codice 91E0).

### Qualità raggiunta:

- 1) aumento della superficie delle aree umide;
- 2) benefici diretti sulle aree di intervento zona habitat e zona umida (Nuove specie vegetali e faunistiche e aumento dei popolamenti);
- 3) benefici indiretti sulle aree prossime a quelle di intervento (zona di nidificazione);
- 4) benefici indiretti sull'intero lago (per avifauna acquatica e per vegetazione).



### **Specie presenti**

Anfibi e rettili: *Emys orbiculatus*, *Bufo bufo*, *Bufo viridis*, *Triturus cristatus*, *Pelophylax esculentus*, *Hyla arborea*, *Natrix natrix*, *Hierophis viridiflavus*. Da evidenziare la presenza nel corso dell'anno 2019, non registrata sino a adesso al "Bosco WWF di Vanzago", di rana di lataste (*Rana latastei*), legata ai boschi planiziali, ma con l'esigenza di aree umide per la riproduzione.

Avifauna: *Faulica atra*, *Gallinula chloropus*, *Ardea cinerea*, *Anas platyrhynchos*, *Ixobrychus minutus*, *Circus aeruginosus*, *Anas clypeata*, *Tachybaptus rufofollis*, *Podiceps cristatus*, *Phalacrocorax carbo*.

### **Monitoraggio**

Il monitoraggio effettuato nel corso dei mesi del 2019, come per il periodo 2016, 2017 e 2018 fa principale riferimento ad alcune specie avifaunistiche. Anche nel corso dell'anno 2019 gli interventi di monitoraggio faunistico sono stati effettuati direttamente dal personale dipendente del WWF Oasi, avente professionalità in merito, con esperienza decennale nel settore faunistico e della dinamica delle popolazioni faunistiche.

Le modalità di indagine, dettate dal Direttore della riserva naturale, hanno seguito un criterio legato principalmente alle specie prescelte e al periodo dell'anno. Alle osservazioni dirette effettuate con l'ausilio di binocoli e cannocchiali si è scelto anche di utilizzare le foto trappole utili per indagare talune specie difficilmente riscontrabili diversamente. Inoltre, per gli anfibi sono state utilizzate tecniche di prelievo/rilascio con l'utilizzo di trappole a caduta usufruendo anche dei teloni per convogliare gli individui lungo le aree di monitoraggio. Di particolare importanza è stato l'impiego delle UNITA' AMBIENTALI per il monitoraggio.

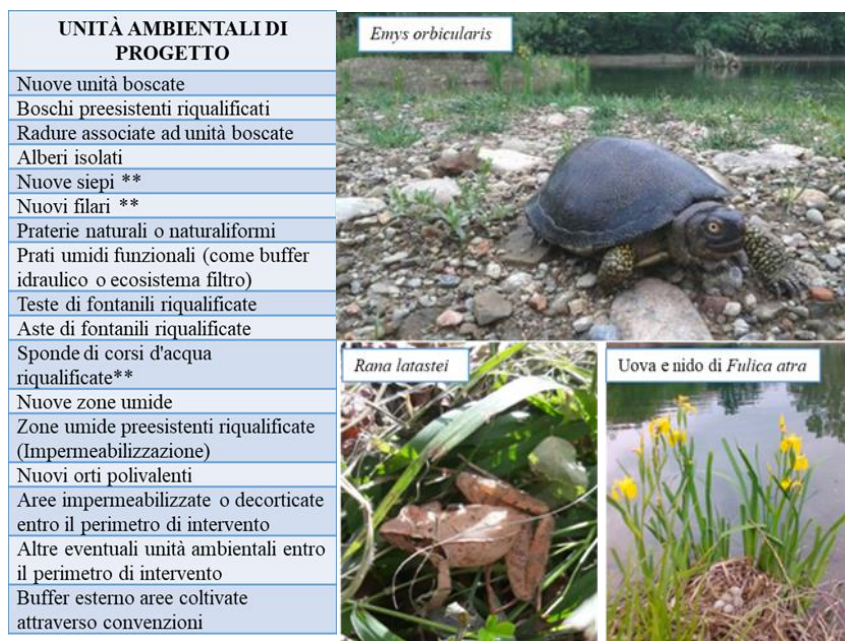


Figura 4.39 Monitoraggio e Manutenzione attraverso analisi delle Unità Ambientali (U.A.)

OPERE DI IMPERMEABILIZZAZIONE NEL LAGO VECCHIO



**Scheda 39:** in azzurro l'area impermeabilizzata. La profondità media al massimo invaso di circa 120 cm è stata ora recuperata per una porzione importante (ovest) del Lago Vecchio per una superficie di 8.604 mq. Precedentemente agli interventi la profondità media (minimo invaso) era ridotta a circa 30 cm. con una notevole evapotraspirazione e a notevole moria di fauna ittica.



**Scheda 39 bis:** nuove aree da impermeabilizzare, realizzazione di un canale e di pozze temporanee in terra argillosa compattata

Figura 4.40 Aree di intervento. A sinistra il primo lotto (Scheda 39 - 2015): in azzurro l'area impermeabilizzata. La profondità media al massimo invaso di circa 120 cm è stata ora recuperata per una porzione importante (ovest) del Lago Vecchio per una superficie di 8.604 mq. Precedentemente agli interventi la profondità media (minimo invaso) era ridotta a circa 30 cm. con una notevole evapotraspirazione e a notevole moria di fauna ittica. A destra il secondo lotto (Scheda 39 bis - 2018): nuove aree impermeabilizzate, realizzazione di un canale e di pozze temporanee in terra argillosa compattata.

**Riserva lago Preola e Gorghi Tondi (Mazara del Vallo, Trapani) 2013**

**Obiettivo dell'intervento**

Miglioramento dello stato di conservazione della specie all'interno della Riserva e precisamente:

- Realizzazione di 5 piccoli Biostagni per la conservazione e lo studio della biologia riproduttiva, della fenologia, del ciclo biologico della specie prioritaria endemica *Emys trinacris*, specie registrata (Fritz, d'Ángelo et. Al 2005) come differente dall'originaria e ben più diffusa *Emys orbicularis*.
- Misura compensativa per la lotta alla tartaruga dalle guance rosse, abbandonata da privati nelle aree umide e, soprattutto lotta al *Procambarus clarkii* (gambero rosso della Louisiana), specie anch'essa altamente invasiva

Le vasche contribuiscono all'educazione ambientale, alla biodiversità e alla ricerca.



*Figura 4.41 Nursery per Emys trinacris realizzata presso la Riserva lago Preola e Gorghi Tondi (Mazara del Vallo, Trapani) 2013.*

**Specie Target**

*Emys trinacris* specie endemica e prioritaria non più a rischio (lista Rossa), secondo l'IUCN, grazie soprattutto alle azioni di conservazione nella Riserva.

Nell'ambito della Riserva, per l'ambito floristico, si segnalano azioni pilota a favore della *Quercus calliprinos*, altra specie prioritaria, a compensazione delle forestazioni ad eucalipteti. Anche in

questo caso era stato realizzato (a cura di volontari WWF) un piccolo vivaio monospecifico perché la *Quercus c.* era molto diffusa in Sicilia ed ora resiste solo in poche aree relitte, tra cui proprio l'area dei Gorghi Tondi.

### **Materiali utilizzati**

Per l'intervento sono state costruite particolari vasche di lagunaggio in calcarenite (pietra locale utilizzata tradizionalmente per l'edilizia) impermeabilizzate ecologicamente spennellando, tipo "tufina", polvere di calcarenite. Le pareti ora sono ricoperte da uno strato naturalizzante per l'attecchimento di microalghe.

L'inserimento nel paesaggio agrario è stato integrato con coperture e setti di separazione con cannucciati.

### **Monitoraggio**

Il monitoraggio è continuo in tutta la Riserva grazie alla Direttrice della Riserva Stefania d'Angelo, dottore di ricerca dal 2011 per la specie (\*), ed anche in parallelo con un altro ricercatore, della più diffusa *Emys orbicularis*, Dario Ottonello in Toscana che ha contribuito alla caratterizzazione scientifica della progettazione. Studi sono in corso anche con il CNR e dottorati di ricerca. Vasta Bibliografia disponibile a cura a Stefania d'Angelo, Ottonello e Fritz. (\*) [http://dspace.unive.it/bitstream/handle/10579/3042/Tesi\\_Dottorato\\_Stefania\\_D%27Angelo.pdf?sequence=1](http://dspace.unive.it/bitstream/handle/10579/3042/Tesi_Dottorato_Stefania_D%27Angelo.pdf?sequence=1)

### ***Urgo di Pietra Giordano 2012***

La valenza scientifica di azioni di ripristino delle torbiere di Geraci Siculo, nell'Urgo di Pietra Giordano, Alte Madonie, mette in luce un Capitale Naturale che riguarda rari biotopi per la Sicilia e la relitta popolazione di *Abies nebrodensis* (Lojac.) Mattei, la specie endemica più emblematica delle Madonie, in reale pericolo di estinzione. La sua popolazione naturale è costituita da appena trenta individui distribuiti discontinuamente in zona A del Parco delle Madonie e all'interno del SIC ITA020016 e della ZSC ITA 020050. La rarità dei biotopi è costituita da particolari manifestazioni idromorfe indicate localmente con i nomi di "margi", "triemule" e "urghi" o "gurghi". Questi ultimi, meno diffusi, sono piccoli specchi d'acqua, siti in piccole depressioni naturali che consentono il ristagno, estesi, in passato, qualche centinaio di m<sup>2</sup> e di profondità variabile da pochi centimetri a qualche metro in dipendenza delle stagioni (Petronici & al., 1978). Tuttavia, gli interventi passati di captazione delle acque, hanno determinato il parziale prosciugamento degli specchi lacustri e la scomparsa delle rispettive falde di alimentazione. L'Urgo di Pietra Giordano, è particolarmente

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

importante per la presenza nei suoi strati di pollini di *A. nebrodensis* risalenti a circa 10.000 anni fa (Bertolani Marchetti, 1984) ma parzialmente prosciugato a causa degli interventi di captazione delle acque. A monte dell'urgo vi è una piccola sfagneta anch'essa rimaneggiata da passati interventi antropici che alimentava l'area dell'urgo. I lavori realizzati sono di grande importanza per gli aspetti ecologici perché permettono il ripristino di aree una volta frequentate da specie, quali l'*Emys trinacris*, testimoniata come presente in ere passate ed oggi riconosciuta come endemismo siciliano ben distinto dalla più nota *E. orbicularis*.



*Figura 4.42 Urgo di Pietra Giordano, Parco delle Madonie (Geraci Siculo).*

### **Il progetto**

Il piano di ripristino ambientale comprende indagini da parte del Dipartimento di Biologia ambientale e Biodiversità di Palermo riguardanti: il censimento e la caratterizzazione delle specie vegetali insediate, la definizione degli interventi di recupero tramite l'impiego di tecniche a basso impatto; il prelievo tramite carotaggio di campioni di torba, a diversa profondità, per lo studio dei pollini e degli eventuali legni fossili riscontrati. Per ridurre le alterazioni strutturali di questi ambienti e migliorare la funzionalità degli stessi, l'azione di recupero comprende due distinte tipologie di intervento che saranno realizzate dall'Azienda Foreste Demaniali:

- interventi di rinaturazione per stabilizzare le acque assicurando, nel contempo, all'urgo e alla sfagneta delimitazione e protezione di "microriserva";
- primi interventi atti a rimediare alle alterazioni territoriali attraverso: l'alimentazione controllata dall'abbeveratoio; la riduzione delle perdite ad Est (riduzione di un "by-pass"), ad Ovest-SO (riduzione delle perdite verso l'area umida contigua) e Ovest-NO (aumento del livello idrico per stabilizzare la piezometrica dell'urgo); captazione di parte delle perdite di bacino anche attraverso piccoli interventi di drenaggio.

- 1) Drenaggi con fascine e tubazioni alimentazione regimentata di Pietra Giordano e Sopra Pietra G. con le acque dell'abbeveratoio e dalla captazione sorgente D. La tubazione è fasciata con materiale spugnoso, pietrame e terra di mimetizzazione.
- 2) Per la presenza attorno all'Urgo di Pietra Giordano di cumuli di materiale terroso e di pietrame, l'area adiacente a monte al gorgo è convertita in area di laminazione delle acque drenate per rallentarne la velocità di adduzione al gorgo. Il livello max di laminazione è determinato dal livello di saturazione di una fascinata a margine della sommità della sponda.
- 3) Decespugliamento manuale selettivo, di rovi e calicotome invasive. La sponda arretrata dell'Urgo e a Sud consolidamento con scogliera rinverdita con pietrame locale e grata viva per la scarpata che sovrasta l'area umida adiacente a Sud-Est. Sia la scogliera che la grata sono rinverdite con *Genista cupani*, *Rosa canina*, *Prunus spinosa*, *Ilex aquifolium*.
- 4) Trapianto di cespi e rizomi, ecocelle e messa a dimora di specie erbacee idrofite (presenti in passato e attualmente scomparse o presenti con popolazioni esigue a causa del drenaggio praticato) le indicazioni qualitative e quantitative scaturiscono dal confronto tra i risultati ottenuti da indagini conoscitive con quelli di pubblicazioni prima del drenaggio (*Petronici, Mazzola & Raimondo, 1978; Raimondo & Dia, 1981*).
- 5) Onde ricucire l'area del gorgo con l'ambiente circostante, ed in particolare con la zona ad est, interessata da azioni di scavo, realizzati antecedentemente all'istituzione dell'area protetta, messa a dimora di *Ilex aquifolium*.
- 6) Delimitazione dei due Urghi quali "micro riserve" con recinzioni H= 1,5 mt. con paletti di castagno (distanziati 2,5 mt.) e rete d'acciaio a maglia quadra per la parte fuori terra e, sotto il piano di campagna "anticinghiali" profondità 1 mt., e forature H= 20 cm. per corridoi faunistici piccoli mammiferi.
- 7) Elevazione piezometrica del livello di by-pass del gorgo di sfioro nell'"Urgo di Pietra Giordano", con riduzione perdita nel vallone contiguo, nel punto di cambio di livelletta "F", che rappresenta lo spartiacque a Ovest dell'Urgo.
- 8) Elevazione del livello di by-pass dell'area di laminazione sovrastante l'Urgo di Pietra Giordano" verso l'area umida alterata a sud – est di questo, mediante rinterro di materiale di scavo per elevare la piezometrica e ridurre drasticamente la perdita nel vallone contiguo.
- 9) Innalzamento del pelo idrico mediante ripristino della quota originaria della stradella d'accesso tramite rinterro dei materiali di scavo e conseguente ripristino dell'area umida adiacente l'Urgo di Pietra Giordano.

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

- 10) Inerbimento con idrosemina a spessore e/o con semi prelevati in loco di specie legnose arbustive delle due sponde occidentali dell'Urgo di Pietra Giordano.
- 11) Captazione delle acque di dispersione lungo il sentiero/stradella sovrastante l'Urgo mediante canalette trasversali realizzate con tronchi di legno di diametro non inferiore a 40 cm. tagliati longitudinalmente e distanziati tra di loro 20-30 cm. e successiva fascia di indirizzo verso l'Urgo di Pietra Giordano".
- 12) Miglioramento e stabilizzazione dei flussi bio-idrodinamici nell'area della scaturigine sovrastante l'Urgo di sopra" con arginelli da 20-40 cm e fascine di drenaggio vive per aumentare lo specchio libero dell'Urgo e captare e rallentare le perdite.
- 13) Ripristino del solco rinterrito dell'incisione di alimentazione sovrastante l'Urgo di Sopra" per il drenaggio e captazione delle acque dell'area della pietraia a sud dell'Urgo.
- 14) Rivestimento in pietra locale del pozzetto esistente della sorgente sovrastante l'Urgo di sopra".



*Figura 4.47 Abbeveratoio storico presente in area di progetto*



Figura 4.43 Area di progetto Uργο di Pietra Giordano, Parco delle Madonie (Geraci Siculo).

#### 4.3.3.2 Restauro fluviale e fitorimediazione

##### **Oasi Valle del Morello (Villarosa, Enna) 2008**

Nel primo caso, restauro del paesaggio fluviale e suburbano del Vallone Vanelle nell'Oasi Valle del Morello (2008, Villarosa Enna) si è effettuato un intervento per la riqualificazione del paesaggio naturale e per la depurazione ecologica del fiume, grazie all'impiego di sacchi filtranti posti in alveo. La multifunzionalità riguarda il trattenimento di particelle di suolo, e con una piccola soglia anche il contenimento della perdita di suolo, il consolidamento delle sponde e la ripresa ecologica. L'OASI VALLE DEL MORELLO è una realizzazione che interessa, la valle del Fiume Morello: non solo il Lago Villarosa, ma anche i valloni tributari urbani, da indirizzare verso corridoi ecologici acquatici ("blue ways"), e gravanti nel territorio comunale di Villarosa. In particolare, i Valloni Mastrosilvestro e Vanella (dall'abitato all'invaso, e valutati quale "ecosistema filtro"), il fiume Morello (dal ponte prossimo alla Stazione Ferroviaria e sino alla strada per Calascibetta) con il relativo invaso creato dalla diga Ferrara, ed il Lago Stelo, di grande interesse storico archeologico, benché interrato a seguito di una bonifica.





*Figura 4.44 Interventi per il Wild Life Management: Zattere galleggianti , pozzetto di beveraggio per anfibî, uccelli e piccoli mammiferi, cannucciato di dissimulazione per un capanno in legno.*

Nel 2008 furono realizzati dei lavori denominati “*Infrastrutturazione ambientale della Vallata del fiume Morello e Tributari – Per la salvaguardia del suolo e dell’equilibrio idrogeologico e finalizzati alla valorizzazione, tutela e fruizione*”. Il progetto era già all’epoca innovativo perché, modificando un originario obiettivo di “pulizia” dei valloni tributari per limitare il forte interrimento del Lago Villarosa, considerava tutti i valori dell’area in termini di Paesaggio ecologico.

Oggi diremmo valorizzazione del Capitale Naturale e Culturale. In altri termini, quello che la visione olistica originaria, ispirata da un albero e dal poeta locale dialettale De Simone, oggi si direbbe che avesse come obiettivo lo sviluppo di Servizi Ecosistemici per il territorio. All’epoca, pur non essendo ancora “di moda” i Servizi Ecosistemici, il lavoro è stato valutato in termini di funzionalità tecnica, naturalistica, paesaggistica e socio-economica. Tutto ciò è stato apprezzato in sede nazionale tanto che il Comune di Villarosa ha ricevuto un Premio Città per il Verde nel 2008.

I lavori strettamente d’appalto concernevano:

- greenway, con sentieristica anche per portatori di handicap, ed ippovie;
- opere di ing. naturalistica quali palificate, grate vive, etc.;
- opere per il wild life management quali isole, pali di sosta, nidi e zattere galleggianti per uccelli, etc.;
- aree birdwatching, ricerca, accoglienza, vivai di cantiere e manutenzione, etc.



*Figura 4.45 Realizzazione di repellenti vivi per la creazione di aree di ristagno nei periodi di magra, a beneficio soprattutto della bracofoauna e dei limicoli.*

L'aspetto più innovativo è risultato la -Depurazione in alveo (Valloni Vanelle e Mastrosilvestro) dei reflui comunali non trattati o parzialmente depurati al fine non solo di migliorare la qualità delle acque, ma anche di creare delle piccole aree umide che facevano così emergere l'acqua. Ciò è stato un successo perché i valloni hanno portate pari solo a quelle degli scarichi e quelle durante i fenomeni piovosi. Sono state condotte inoltre delle campagne di monitoraggio ante e post operam per valutare l'efficacia chimica ed ecologica delle opere di depurazione in alveo, attraverso la determinazione degli Indici Sintetici: L.I.M., I.B.E. ed I.F.F. e SECA nei sistemi idrici Torrente Mastrosilvestro e Torrente Vanella.



Figura 4.46 Principali tecniche di ingegneria naturalistica impiegate.

A distanza di 13 anni il paesaggio nei luoghi di intervento fluviale è migliorato notevolmente con crescita di salici e pioppi dove, prima l'alveo era percorso solo da reflui.

Nel corso dei lavori e dell'anno successivo la popolazione è stata fortemente coinvolta per far emergere quel senso di appartenenza necessario per il mantenimento del "bene collettivo". I tanti Enti coinvolti (Comuni di Villarosa, Enna, Calascibetta, Azienda Foreste Demaniali ed Ente Gestore delle Acque del Lago) non sono però riusciti a trovare un'adeguata intesa gestionale per la manutenzione delle opere. Un nuovo monitoraggio naturalistico farebbe comunque emergere l'utilità delle opere anche per il paesaggio ecologico. Oggi il patrimonio naturalistico, archeologico e minerario restano il punto di attenzione di una rete di collegamento di grande importanza per il trekking e il turismo lento.

Non è superfluo ricordare che il trekking per i valori naturalistici e archeologici dell'Oasi del Morello sono una parte dell'Antica Trasversale Sicula. Una tappa raggiunge, infatti, Villarosa da Calascibetta, ed un'altra riparte da Villarosa a Resuttano passando per la frazione Villapriolo. Per le opere realizzate il Comune di Villarosa ha ottenuto il Premio Città per il Verde" 2008.



Fig. 28. Localizzazione dei punti in cui verrà realizzato il sistema di lagunaggio.



Figura 4.47 Area di progetto Oasi Valle del Morello (Villarosa, Enna) 2008.

### **Foce del fiume Acquicella (Catania) 2015**

#### **Obiettivo intervento**

Restauro ecologico urbano della foce del fiume Acquicella all'interno della Città di Catania, sia in termini morfologici con abbattimento della regimazione cementizia (per T=300 anni), il restauro dunale, la formazione di aree umide e il miglioramento della qualità delle acque.



Figura 4.48 Veduta aerea della Foce del fiume Acquicella (Catania) 2015.

**Situazione paesaggistica ante opera**

Regimazione idraulica forzata con inquinanti da reflui urbani. Il restauro della foce del fiume Acquicella nasce come misura di compensazione prescritta dalla Commissione Nazionale VIA per l'occupazione di suolo per l'adiacente nuova darsena nel Porto di Catania. L'area è così ridotta e compressa su 3 lati (darsena del porto, balneazione, rotonda in area di foce di grande arteria urbana) restando libera solo sul quarto lato mare.

Il fiume Acquicella attraversa Catania riversandosi con piene rapide sulla costa, già occupata da intensa viabilità, rifiuti e reflui non trattati.

Rischi sanitari per la balneazione nei lidi adiacenti e area abbandonata soggetta ad attività incontrollate e malavitose.



*Figura 4.49 Situazione ante operam.*

**Qualità funzionale raggiunta:**

- depurazione acque fluviali: mediante fitodepurazione, lagunaggio e fasce tampone arborate inverse.
- Restauro dunale: con ammassi sabbiosi progressivi grazie agli attecchimenti significativi di *Ammophila arenaria*. prelevata in situ, che trattiene le sabbie.
- Aree umide retrodunali stabilizzate.

I lavori hanno apportato grandi benefici faunistici, testimoniate da eccezionali schiuse di *Caretta caretta*, nonostante l'intensa balneazione. I popolamenti di specie prioritarie e di interesse naturalistico si incrementano anche per aironi, garzette, pollo sultano, etc.

Il restauro della foce dell'Acquicella, con accurata vigilanza e manutenzione, può divenire innesco di un corridoio ecologico urbano (lungo il fiume) e costiero (sino alla Riserva del Fiume Simeto). Piccole infrastrutturazioni per la fruizione naturalistica, sebbene in abbandono, sono state realizzate dalla Autorità Portuale..

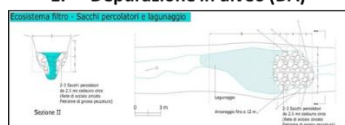
## Specie e funzione

Fitodepurazione tramite: *Phragmites australis* e *Typha* sp.

Le piante utilizzate per i lagunaggi e il restauro dunale sono state esclusivamente prelevate nell'area di foce e messe a dimora sia mediante trapianto di rizomi (*Phragmites australis*, *Typha* sp., *Juncus* sp.), che di ecocelle miste prelevate a monte direttamente in alveo.

### QUALITA' DELLE ACQUE DEL TORRENTE

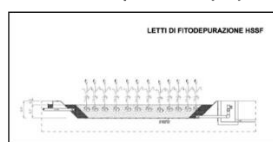
#### 1. Depurazione in alveo (DA)



(Schema Pirrera "Oasi Fluviale Valle del Morello")

Produce a monte un accumulo provvisorio di acqua (lagunaggio "laminato"), fintantoché non avviene l'interrimento e l'estensione dell'effetto filtrante di *medium* terrosi a monte del dreno. A quel punto lo spontaneo, o innescato, attecchimento di cespi di graminacee, associa una più diretta azione di fitodepurazione in alveo.

#### 2. Fitodepurazione (FD) nell'area cuscinetto alimentata da sollevamento (P).

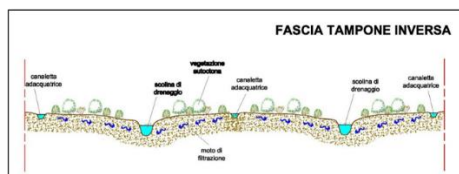


#### "Flusso sub-superficiale"

L'acqua filtrando nel terreno, entra in contatto con le popolazioni epifitiche responsabili del processo di **abbattimento del carico organico**, inoltre, il processo di filtrazione attraverso il *medium*, (strato di assorbimento basale e terreno di coltura delle piante fitodepuranti) permetterà di affinare le caratteristiche dell'acqua.

#### 3. Lagunaggio drenante (WL) nelle aree sottostanti la FD con infiltrazione – percolazione (IP) sino all'alveo.

Gli elevati rendimenti di rimozione del **carico microbiologico** ottenibili con il processo di infiltrazione e percolazione, suggeriscono che sarà possibile rispettare i limiti di qualità microbiologica che devono avere le acque per poter essere ritenute idonee alla balneazione.



#### 4. Fascia Tampone Inversa mediante Infiltrazione - Percolazione (IP), alimentata da sollevamento.

E' opportuno prevedere una **modularità** a seconda se il problema prevalente sarà l'uno (carica organica) e/o l'altro (inquinamento microbiologico) per la balneazione, per il rispetto dei parametri della Direttiva Balneazione" (Dir. 2006/7/CE).

#### 5. Fasce tampone (FT) perimetrali di salvaguardia sanitaria costituite da tamerici, pioppi e salici

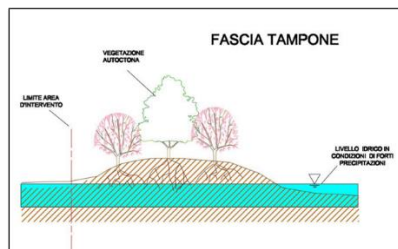


Figura 4.50 Principali meccanismi di depurazione impiegati.



Figura 4.51 Fitodepurazione e ripristino dunale.

### ***Cascate delle due rocche (Corleone, Palermo)***

Fondi PO FESR SICILIA 2014-2020, Asse 6, Azione 6.6.1

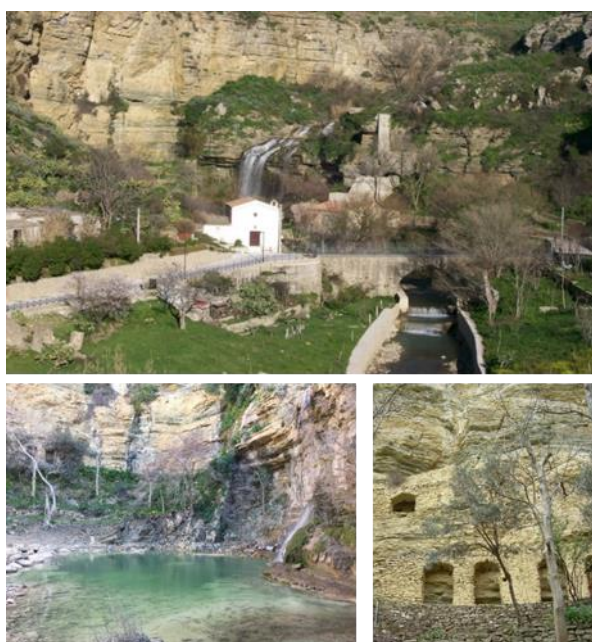


Figura 4.52 Cascate delle due rocche (Corleone, Palermo).

- Interventi di riqualificazione e Ingegneria Naturalistica (muretti a secco, palificata, biorulli, fitodepurazione in alveo, interventi per ittiofauna, anfibi, avifauna).
- Recupero e realizzazione di sentieristica e di ciclovia, cartellonistica, arredi per la fruizione, valorizzazione Cammini lenti (Antica Trasversale Sicula, Itinerario Sulle Orme di San Bernardo, Itinerarium Rosaliae, Magna Via Francigena).
- Restauro e valorizzazione dei Mulini, Orto botanico, Centro Visite, Area Musealizzazione e punti di osservazione per birdwatching.
- Allestimento aree per la produzione di compost verde (Economia circolare).
- Colonnine per ricarica di veicoli elettrici.
- Workshop, sito web, attività educative ambientali, totem interattivi.
- Monitoraggi specifici su fauna, flora e qualità fluviale.

***Monastero Lhungtok Choekhorling (Pomaia, Pisa)***

Anche le aree umide a fini ornamentali perseguono gli obiettivi di contrastare la desertificazione.

Il nuovo monastero Lhungtok Choekhorling sorge in una cava di serpentiniti (già da restaurare ecologicamente con fitoremediation) la cui collina è delimitata dal torrente Riseccoli, il cui nome deriva proprio dall'essere asciutto tranne che durante le piene. Per tale ragione gli interventi di ripristino della sentieristica faciliteranno la stagnazione ampliando le aree vocate e destinando a sommersione temporanea piccole conche. I popolamenti di Anfibi e libellule saranno così agevolati.



*Figura 4.53 Aree umide presso Monastero Lhungtok Choekhorling e il sentiero Riseccoli (Pomaia, Pisa).*

**4.3.3.3 Ecologia industriale**

**SI.A.M. (MODICA, RAGUSA) 2017**

**Obiettivo dell'intervento**

Trattamento depurativo delle acque reflue civili, di prima pioggia ed industriali tramite fitodepurazione tradizionale e biolaghi di affinamento azzerando lo smaltimento.

L'obiettivo è anche quello di rendere visibile il prodotto "Acqua" convertendolo per il Capitale Umano industriale in Capitale Naturale che offra Servizi ecosistemici aggiuntivi all'azienda in termini di economia, ecologia, immagine, promozione, educazione naturalistica (l'azienda già adotta rapporti con scuole per visite aziendali) e sostenibilità.





Figura 4.54 Impianto di fitodepurazione SIAM (Sicil Acque Minerali s.r.l. a Modica, Ragusa).

L'impianto di trattamento delle acque reflue civili, industriali e di prima pioggia della SIAM (Sicil Acque Minerali s.r.l. a Modica, Ragusa) comprende 3 sistemi: 1) le acque industriali smaltite per fertirrigazione; 2) le acque di prima pioggia trattate con un siluro compartimentalizzato a 4 vasche e successiva subirrigazione; 3) le acque reflue civili con fitodepurazione a doppia vasca, che permette di lavorare in serie e in parallelo, con due differenti idrofite (*Phragmites australis* e *Typha latifolia*). Quest'ultima permette di funzionare ad "evaporazione totale" consentendo risparmi sugli smaltimenti dei reflui. Inoltre, è stata realizzata una fascia di sicurezza perimetrale con *Cyperius papyrus*, per il trattamento delle acque di prima pioggia per evapotraspirazione totale e produzione di biomassa.

La tipologia impiantistica adottata, ottimale per il trattamento secondario del refluo in esame, è definita a flusso subsuperficiale orizzontale H-SFS. Sono stati previsti tre sistemi per il trattamento delle acque reflue civili, di prima pioggia ed industriali.

- Per il trattamento delle **acque reflue civili** è stata predisposta una doppia vasca, che permette di lavorare in serie e in parallelo, con due differenti idrofite (*Phragmites australis* e *Typha latifolia*). Permette di funzionare ad "evaporazione totale" consentendo risparmi sugli smaltimenti dei reflui. *Typha latifolia*, presenta una crescita rapida ed un'ampia tolleranza per i metalli, con penetrazione nel terreno sino a 0,3-0,4m. La specie più utilizzata in Europa è *Phragmites australis*, per l'ampia tolleranza alle condizioni climatiche, dovuta alla molteplicità dei suoi biotipi. Ha una crescita molto rapida ed una penetrazione radicale di

0,6m nel medium in cui viene immesso e possiede un'elevata capacità di trasferimento dell'ossigeno dalle parti aeree alle parti sommerse, il che favorisce i processi di nitrificazione. Inoltre è stata realizzata una fascia di sicurezza perimetrale con *Cyperius papyrus*, per il trattamento delle acque di prima pioggia per evapotraspirazione totale e produzione di biomassa.

- Le **acque di prima pioggia** vengono trattate mediante un siluro compartimentalizzato a quattro vasche, al termine del quale l'acqua viene impiegata per subirrigazione. La funzione delle vasche/sezione di accumulo è quella di stoccare l'acqua di prima pioggia (quindi potenzialmente inquinata) e di impedire che venga convogliata direttamente sul suolo prima di aver subito la necessaria depurazione. Altresì la sezione di accumulo ha la funzione di sedimentatore per gravità della frazione sia organica che inerte presente nelle acque da trattare. L'efficienza di allontanamento per decantazione delle particelle sospese è funzione del tempo di decantazione che è sua volta inversamente proporzionale al quadrato del loro diametro.
- Le **acque industriali** sono destinate a fertirrigazione.

Il trattamento delle acque reflue civili, di prima pioggia ed industriali. della S.I.A.M. coniuga elementi di ecologia industriale ed economia circolare. È un caso tecnicamente complesso, volto a salvaguardare l'acquifero da cui avviene il prelievo delle acque da imbottigliare.

Il sistema di accumulo degli scarichi depurati (civili, prima pioggia e industriali di lavaggio) in vasche e il successivo smaltimento con auto spurghi dai costi elevati, è stato sostituito con 3 sistemi differenti che interagiscono tra loro con vantaggi anche per la gestione delle emergenze.



Figura 4.55 Biolago e biofossato (2020).

L'effetto ricercato dell'evapotraspirazione totale ha di fatto azzerato i costi di smaltimento del refluo, rendendo l'impianto a ciclo chiuso (circa € 500-800 / mese).

La conversione delle 4 aree (ingresso e uscita) delle 2 vasche di fitodepurazione in piccoli biostagni ha richiamato sia anfibi che libellule e, insieme ai rettili, ha convinto la committenza a favorire i

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

popolamenti faunistici. Ad agosto 2020 è stato quindi realizzato un biolago con funzione puramente paesaggistica ed ecologica ma anche, tecnicamente, quale trattamento di affinamento depurativo e per aumentare la superficie di evapotraspirazione delle acque depurate provenienti dalle vasche di stoccaggio finali.

Il risultato maggiore, oltre che per il discoglossus specie protetta anche se non rara in Sicilia, è stato soprattutto per il notevole popolamento di libellule (2 specie accertate e probabilità di averne 4). Ciò è anche un indice indiretto di misura dei cambiamenti climatici perché studi siciliani hanno rilevato che i popolamenti si stanno espandendo dall’Africa verso la Sicilia che quindi ha bisogno di implementare le proprie aree umide. Inoltre, sebbene mai lamentato il rischio zanzare, le libellule rappresentano per l’azienda una garanzia nei confronti di diffidenze autorità sanitarie siciliane dovute proprio all’uso di fitodepurazione per la proliferazione delle zanzare.

Il biolago, per facilitare il passaggio degli anuri, è stato collegato con un biofossato avente funzione di corridoio ecologico. A dicembre '20 sono stati messi a dimora perimetralmente *Chamaerops humilis* ed anche Noci (*Junglas regia*) per la notevole capacità di suzione di eventuali portate eccedenti la capacità dell’impianto di prima pioggia ed altre specie acquatiche sia per aumentare la biodiversità e per un successivo step di conversione in un giardino botanico acquatico.



*Figura 4.56 Discoglossus pictus e Simpetro sanguineo (2020).*

Numerose specie tipiche faunistiche e floristiche delle aree umide sono quindi presenti e il monitoraggio è continuo dal 2017, anno di costruzione degli impianti con un’”offerta migliorativa” dell’impresa in sede di gara che superasse i metodi tradizionali di depurazione da appaltare.

Cenni flora e fauna.

Flora:

- Fitodepuranti utilizzate: *Phragmites australis*, *Typha latifolia*, *Cyperius papyrus*
- Altre idrofite introdotte per scopi paesaggistici e di giardino acquatico: *Juncus effusus*, *Iris ensata*, *Calla palustris*, *Equisetum hyemale* e, richiesti per una fontana nel biolago dal committente, *Colocasia esculenta*.
- Arboree: *Olea europea*, oltre che Carrubi, Noci e Palme Nane.
- Altra Flora: *Anemone coronaria*, *Gladiolus italicus*, *Tragopogon sp.*, *Glebionis coronaria*, *Papaver sp.*, microalghe, etc.

Fauna: *Discoglossus pictus*, *Podarcis sicula*, *Hierophis viridiflavus*, *Natrix natrix*, *Simpetro sanguineo*, *Erythromma viridulum*, *Acrida ungarica mediterranea*, *Scolopendra cingulata*, etc.

|                 | Species                     | Inquinanti inorganici              | Inquinanti organici  | Matrice Ambientale   |
|-----------------|-----------------------------|------------------------------------|--|----------------------|
| <b>Idrofite</b> | <i>Cyperus papyrus s.</i>   | Al, Ca, Fe, Mn, K                  |  | Water                |
|                 | <i>Phragmites australis</i> | Fe, Al, Mn, Zn                     | Benzene, toluene, clorobenzene, cloroformio, dicloroetano, broformio   | Water, wet soil      |
|                 | <i>Scirpus lacustris</i>    | Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Cr, Al, Se, Cd | Pesticidi, fenoli  | Sludges              |
|                 | <i>Typha latifolia</i>      | Pb, Zn, Cd, Se, Cu                 | Surfattanti-LAS  | Outgoing waters      |
|                 | <i>Typha angustifolia</i>   | Al                                 |  | Outgoing waters      |
| <b>Arboree</b>  | <i>Morus rubra</i>          |                                    | PCB  | Soil                 |
|                 | <i>Populus tremula</i>      | Pb, Zn, Al, Ni                     | Tricloroetilene, tricloroetano, fenoli, carbontetrachloride, pesticidi | Soil and groundwater |
|                 | <i>Populus nigra</i>        | Pb, Se                             | Anilina, TCE, PCE, m-xylene, pesticidi, benzene, erbicidi, BTEX        | Soil and groundwater |
|                 | <i>Salix alba</i>           | Cd, As, Pb, Zn                     |  | Soil                 |

Figura 4.57 Specie per il Trattamento delle acque industriali ( $Na^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$ ) (Latteo V., 2012).

### **Impianto acquacoltura Algozino (Assoro, Enna)**

L'area d'impianto ricade all'interno del bacino idrografico del fiume Simeto, precisamente sulla destra idraulica del Fiume Dittaino, area a discreta meandrizazione e buona naturalità d'alveo. Individuata con livello di pericolosità P3 (elevata) per fenomeni di esondazione dal P.A.I. (Piano di Assetto Idrogeologico). I lavori di ampliamento dell'impianto di piscicoltura prevedono la realizzazione di nuove vasche di trattamento e di affinamento delle acque reflue derivanti dal ciclo produttivo. L'idea progettuale consiste nell'ampliamento, ammodernamento, potenziamento ed efficientamento di un impianto produttivo di tipo misto, ovvero, in parte destinato alla produzione di pesce per il consumo umano (trote, anguille, lucci, tinche e storioni) ed una piccola quota) tra pesci ornamentali a scopo di acquariofilia e riproduttori altamente selezionati a scopo di ripopolamento ittico (da destinare ad altri produttori, ai privati o alle Province Regionali).

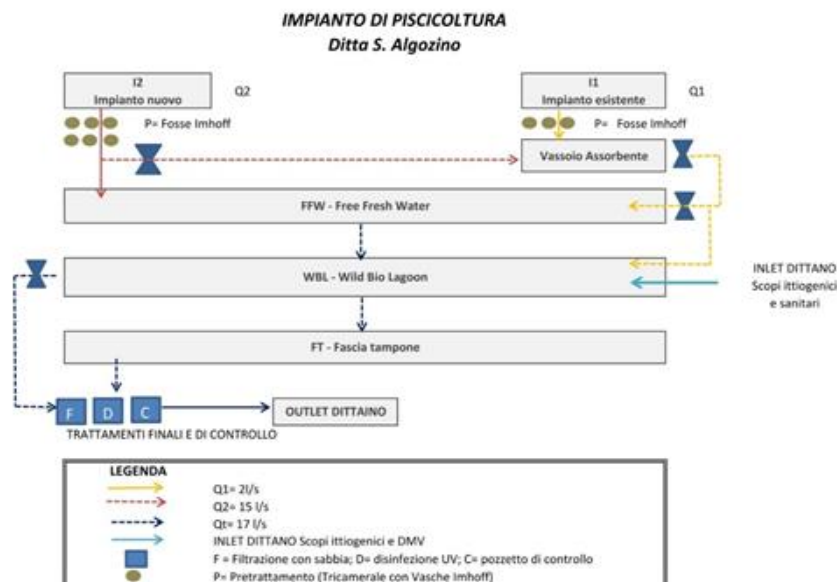


Figura 4.58 Schema di funzionamento dell'impianto.

Una rilevante parte della produzione di pesce sarà immessa nei corsi d'acqua per il **ripopolamento ittiogenico** e per la conservazione delle biodiversità di ceppi autoctoni siciliani. Il flusso dei reflui in uscita verrà pretrattato con due tricamerale con Vasche Imhoff con un'efficienza depurativa che si assume cautelativamente in termini di BOD 5 pari al 10%.

Le acque in uscita dal vassoio assorbente e dal nuovo impianto verranno convogliate in un'unica vasca di trattamento fitodepurativo del tipo **Free Fresh Water (FFW)** di forma molto allungata.

Le acque in uscita dal FFW verranno convogliate in un'area impermeabilizzata di affinamento **WBL (Wild Bio Lagoon)** che è in pratica un biolagunaggio aerato in modo da poter essere idonea anche per gli obblighi ittiogenici. L'aerazione e la movimentazione saranno favorite sia dall'andamento a chicane che da una pompa (del tipo a trombone) che miscela acqua ed aria. Il bacino di lagunaggio ha dimensioni di 2.500 mq e profondità 1,3 m per un volume quindi complessivo di circa 32860 mc, che sarà ripartito in 3 in modo che la coltura libera abbia:

- 1) una prima parte maggiormente destinata alla riduzione del residuo carbonioso inquinante (BOD),
- 2) la seconda contribuisce maggiormente all'abbattimento di azoto e fosforo,
- 3) mentre la terza ha un comportamento di affinamento e di sicurezza.

La vasca avrà internamente la forma della trota sarda *Salmo cettii*, autoctona della zona orientale dell'isola quale omaggio ed indirizzo naturalistico/ittiogenico della produzione dell'impianto.

Verranno realizzate anche delle isole verdi con papiri (occhio della trota e aree pinne).

### **Multifunzionalità**

Si prevede anche l'inlet delle acque del fiume Dittaino per scopi ittiogenici, sanitari e per aumentare il DMV di 550 mc/ora. Il bacino resta inoltre a disposizione dei deflussi di piena del fiume Dittaino per accogliere portate in laminazione, realizzati di biolagunaggio. Per ulteriore affinamento e a fini paesaggistici si prevedere la realizzazione di una **fascia tampone** di vegetazione che serve anche, a garanzia del fiume, da sicurezza per versamenti eventuali incontrollati agricoli esterni tamponabili con gli apparati radicali.

### **Conclusione**

La vegetazione da frutto "storica" e l'età di alcuni esemplari dimostra che l'area di intervento non è soggetta a fenomeni di sommersione significativa da almeno 30 anni. La vegetazione per la sua natura flessibile (tamerici, canne, salici) nell'alveo contribuisce al rallentamento della velocità dell'onda di piena e, con l'unica eccezione dei pochi pioppi ed eucalipti, non produce significativi innalzamenti dell'onda di piena. Posto come livello di sicurezza una quota superiore a 308 mslm., pari a quella del ponte di C.da Passo Catalano, sono state necessarie le opere realizzate che comprendono basse arginature e una fascia tampone del tipo "a siepe". Ciò garantirebbe in fase di piena, con tempo di ritorno dell'ordine  $T=100$  anni, una eventuale laminazione di un volume ampiamente sufficiente per l'ulteriore garanzia dell'impianto e che a valle permetterebbe uno sfasamento, sia pur contenuto, del colmo di piena.

La realizzazione dell'insediamento non comporta modifiche significative ai fenomeni idraulici naturali, che possono avere luogo nell'area in occasione di inondazioni con tempo di ritorno pari a 50, 100 e 300 anni. Le caratteristiche tecniche dell'impianto e gli accorgimenti progettuali prescritti per la sicurezza dello stesso sono tali da evitare danneggiamenti dello stesso da parte di tali eventi di piena. La compatibilità idraulica e ambientale è così garantita.



Figura 4.59 Ubicazione Impianto acquacoltura Algozino (Assoro, Enna). In azzurro l'area esondabile del fiume Dittaino.

### **Biostagni OGGI**

- Depurazione naturale
- Produzione ittica (**Trota, Storioni, Pesci Ornamentali**)
- Difesa idraulica
- Biodiversità floristica (**Cannuccia d'acqua, Tifa, Giunco, Papiro, Tamerici, Salici, Pioppi**)
- Biodiversità faunistica (**Rane, Rospi**)
- Economia Circolare

### **AMPLIAMENTO depurazione**

- MDV
- Disegn (Trota e richiamo a nuove specie, come la prioritaria **Anguilla**)
- Fruizione naturalistica fiume
- Pesca sportiva
- Divulgazione
- Riutilizzo irriguo acque (caviale vegetale)
- Riutilizzo irriguo acque (**vivaismo idrofite classico e idroponico**)
- **Conservazione faunistica** per RES
- **Obblighi Ittiogenici**



Figura 4.60 L'impianto di acquacoltura Ditta S. Algozino (Assoro, Enna).

#### Azienda Agricola Cos Vittoria (RG) 2019

Impianto per il trattamento delle acque di prima pioggia Azienda Agricola COS Vittoria (RG).

Per equilibrare le portate ed omogeneizzare le caratteristiche dei reflui, si è fatto ricorso ad un biostagno (avente funzione di Free Fresh Water) e a due letti di fitodepurazione aventi funzione prevalentemente di vassoi assorbenti, per un'area complessiva di 240 m<sup>2</sup>. Per consentire un maggiore trattamento volumetrico della portata di garanzia si fa ricorso a due filari di salici lungo i letti di fitodepurazione e si pongono a valle dei gelsi. Infine, si ricorre ad un sistema di ricircolo a monte del refluo in eccesso.

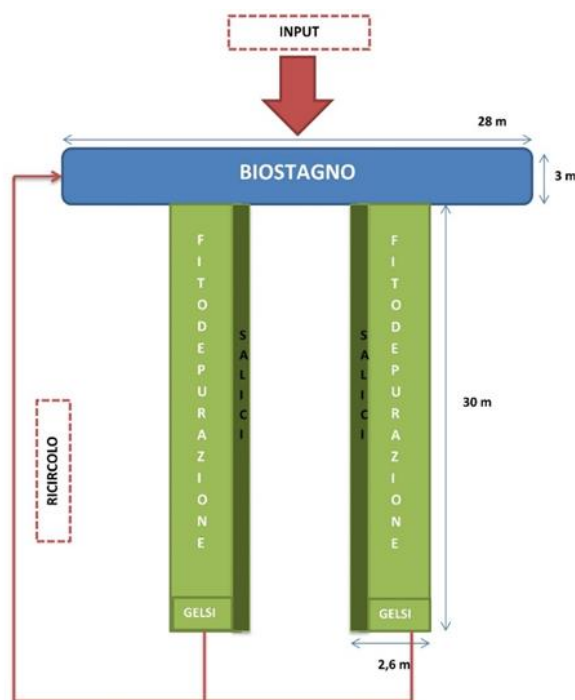


Figura 4.61 Schema Impianto per il trattamento delle acque di prima pioggia.





Figura 4.62 Dimostrativo Semplicità di realizzazione di zattere con idrofite (Azienda Agricola Cos Vittoria (RG) 2019).



Figura 4.63 Riutilizzo da trattamento acque di prima pioggia (Azienda Agricola Cos Vittoria (RG) 2019).

### **Bibliografia Par. 4.3**

ISPRA, 2012. Guida Tecnica per la progettazione e gestione dei sistemi di fitodepurazione per il trattamento delle acque reflue urbane. Manuali e linee guida 81/21 ISPRA.

Latteo V. (2012). Screening delle specie vegetali idonee in phytoremediation – University of Palermo, Tesi Master in Restauro Ambientale e Ingegneria Naturalistica, Relatore: G. Pirrera

PLUCHINO A., PIRRERA G., LATTEO V., AMATO F., FERRARA L.M.(2017) "Industrial Ecology With Phytoremediation By Native Species" - L'Ingegnere Italiano - n. 3/2017 - Edizione Speciale World Engineering Forum 2017 PAG.58, 62

[www.cni.it/ingegnere-italiano-03-2017#prj\\_592bd727f3364/ingegnereitaliano/5000-01-03/64-65](http://www.cni.it/ingegnere-italiano-03-2017#prj_592bd727f3364/ingegnereitaliano/5000-01-03/64-65)

PIRRERA G., FRECCERO C. (1-5 luglio 2019) University of Milano-Bicocca, Milano “Ecological restoration of a quarry and spiritual landscapes in motion for a Buddhist monastery”, Nature and society facing the Anthropocene challenges and perspectives for landscape ecology, 10th World Congress of the International Association for Landscape Ecology, SIEP IALE

Pirrera G. (2017) “Acqua&Suolo: la rinaturazione come motore di sviluppo” - Sicily: Landscape in motion. Lo sviluppo del paesaggio nelle strategie di sostenibilità, Giarre, Catania, Italia.

Pirrera G., Amato F., Latteo V., Pluchino A. (2017). ”Attitudine depurative delle piante per il restauro ecologico” 3rd International Symposium of Soil and Water Bioengineering - Materials and Techniques in Ecological Restoration, Sant’Agata di Militello, Messina, Italia

PIRRERA G., PLUCHINO A. (2017) Phytoremediation For Ecological Restauration And Industrial Ecology - Procedia Environmental Science, Engineering and Management, Vol 4(4) 2017 (ISSN: 2392 - 9537 ; ISSN-L: 2392 - 9537; eISSN: 2392 - 9545). [www.procedia-ensem.eu/pdf/issues/2017/no4/35\\_Pirrera\\_17.pdf](http://www.procedia-ensem.eu/pdf/issues/2017/no4/35_Pirrera_17.pdf)

Pirrera G., Filiberto G. (2008). Recupero di paesaggio Fluviale e Storico nella valle del Morello – in Mairota, Mininni, Laforteza, Schioppa “Ecologia e governante del paesaggio” Università degli studi di Bari pp. 493-496

### ***Sitografia***

Database Best Practices SWB AIPIN [www.aipin.it/database-best-practices-i-n/](http://www.aipin.it/database-best-practices-i-n/)

## **5 LA MANUTENZIONE ED IL MONITORAGGIO DELLE OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA**

### **5.1 MONITORAGGI IN ITALIA SU OPERE DI INGEGNERIA NATURALISTICA**

#### **5.1.1 Il monitoraggio della componente viva (P. Cornelini)**

Il monitoraggio sulla componente viva degli interventi di Ingegneria Naturalistica Ingegneria Naturalistica è stato eseguito nel periodo 2012-2016, al fine di verificarne, nel corso del tempo, l'evoluzione floristica e strutturale.

Si tratta di interventi realizzati, per la maggior parte, tra il 1999 ed il 2001, ad eccezione dei cantieri di Marcellini RI (2005), di Acquapendente VT (2006) e di Barbarano Romano VT (2006).

I dati sono stati riportati nelle schede di monitoraggio allegate, ogni intervento è stato ubicato su cartografia 1:10 000 ed integrato da una significativa documentazione fotografica.

In questa pubblicazione si riportano i risultati conclusivi del monitoraggio.

Tabella 5.1 Dati stazionali degli interventi di Ingegneria Naturalistica monitorati e coperture vegetazionali attuali.

| INTERVENTO  | n.1                    | n.2                    | n.3                      | n.4                                | n.5            | n.6                    | n.7                     | n.8  | n.9                            | n.10                                    | n.11                   | n.12                   |
|---|------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|----------------|------------------------|-------------------------|--|--------------------------------|---|------------------------|------------------------|
| <i>Tecnica</i>  | Palificata doppia viva | Palificata doppia viva | Gabbionata viva          | Palificata doppia viva + scogliera | Materassi vivi | Palificata doppia viva | Palificata viva retinia | Palificata doppia viva + canalina rivertitia | Palificata doppia viva + grata | Palificata Latina + palificata semplice | Palificata doppia viva | Palificata doppia viva |
| <i>Comune</i>   | Cassino (FR)           | Cassino (FR)           | S. Elia Finteraphio (FR) | Rocca di Papa (RM)                 | Tarquina (VT)  | Posta (RI)             | Posta (RI)              | Aina (FR)                                    | Marcellif (RI)                 | Gaeta (LT)                              | Barbarano Romano (VT)  | Acquapendente (VT)     |
| <i>Anno realizzazione</i>                               | 1999-2001              | 2000-2001              | 1999-2000                | 2000                               | 1999-2001      | 1999                   | 2000                    | 2000   | 2005                           | 2010                                    | 2006                   | 2006                   |
| <i>Quota altimetrica</i>                                | 30                     | 50                     | 100                      | 750                                | 3              | 700                    | 750                     | 400-500                                      | 900                            | 70                                      | 290                    | 527                    |
| <i>Esposizione</i>                                      |                        |                        | Sud-Est                  |                                    | Nord           |                        |                         | Sud-Ovest                                    | Nord-Ovest                     | Nord-Est                                | Ovest                  | Est/Sud-Est            |
| <i>Palificata doppia viva copertura totale %</i>        | 80                     | 80                     |                          | 60                                 |                | 80                     |                         | 95   | 90                             | 80                                      | 40                     | 100                    |
| <i>Palificata semplice copertura totale %</i>           |                        |                        |                          |                                    |                |                        |                         |  |                                | 80                                      |                        |                        |
| <i>Palificata Latina copertura totale %</i>             |                        |                        |                          |                                    |                |                        |                         |  |                                | 80                                      |                        |                        |
| <i>Rinaturazione spontanea alveo copertura totale %</i> | 100                    | 100                    | 70                       |                                    |                | 95                     |                         |  |                                |   |                        |                        |
| <i>Gabbionata viva copertura totale %</i>               |                        |                        | 70                       |                                    |                |                        |                         |  |                                |   |                        |                        |
| <i>Scogliera rivertitia copertura totale %</i>          |                        |                        |                          | 80                                 |                |                        |                         |  |                                |   |                        |                        |
| <i>Materasso rivertitio copertura totale %</i>          |                        |                        |                          |                                    | 80             |                        |                         |  |                                |   |                        |                        |
| <i>Palificata viva retinia copertura totale %</i>       |                        |                        |                          |                                    |                |                        | 20                      |  |                                |   |                        |                        |
| <i>Canalita rivertitia copertura totale %</i>           |                        |                        |                          |                                    |                |                        |                         | 90   |                                |   |                        |                        |
| <i>Grata rivertitia copertura totale %</i>              |                        |                        |                          |                                    |                |                        |                         |  | 55                             |   |                        |                        |

L'analisi dei dati è stata suddivisa tra opere in ambito idraulico (intervento da 1 a 7) e di versante (intervento da 8 a 12).

#### *5.1.1.1 Gli interventi in ambito idraulico*

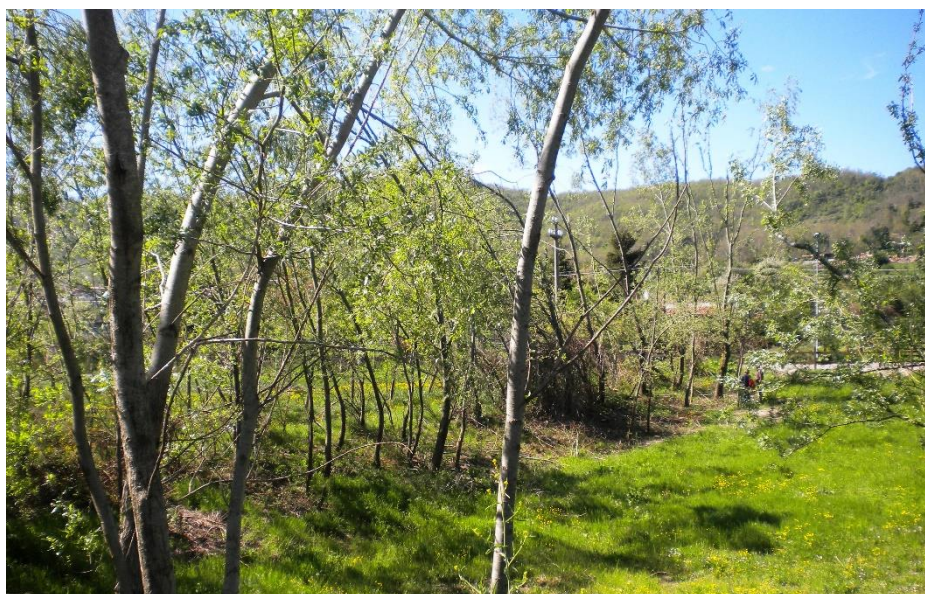
Nelle opere di consolidamento spondale sono state utilizzate le seguenti tecniche di Ingegneria Naturalistica:

- palificata viva doppia;
- palificata reatina;
- gabbionata viva;
- scogliera viva;
- nelle opere di consolidamento degli argini, a contatto con l'acqua solo in occasione di piene non ordinarie, sono stati utilizzati i materassi rinverditi.

I dati delle schede di monitoraggio sono sintetizzati nella Tabella 5.2

Nei casi significativi sono stati effettuati ulteriori rilievi sullo sviluppo spontaneo della vegetazione in alveo, a seguito dei movimenti terra per i lavori (vedi la Tabella 5.4).

Le coperture vegetali attuali delle opere di consolidamento spondale sono in media del 75% ad eccezione della palificata reatina (20%) e mostrano una sostanziale affermazione delle talee di salice inserite, con notevoli sviluppi in altezza, soprattutto per *Salix alba* (fino a 20 m) e diametri (fino a 40 cm per *Salix alba* e fino a 12 cm per *Salix purpurea*).



*Figura 5.1 Sviluppo delle talee di salice sulle scogliere rinverdite dopo 12 anni. Rocca di Papa (RM) 2012.*

Tabella 5.2 Interventi in ambito idraulico - tabella di sintesi dello sviluppo della parte viva.

| <b>INTERVENTO</b>                              | <b>Interventi 1-2-4-6<br/>Palificata viva<br/>doppia</b>   | <b>Intervento 7<br/>Palificata viva<br/>reatina</b>            | <b>Intervento 3<br/>Gabbionata<br/>viva</b>  | <b>Intervento 4<br/>Scogliera<br/>rinverdita</b>                                | <b>Intervento 5<br/>Materassi vivi</b>   |
|--|--|--|--|---|--|
| <b>Copertura media complessiva delle talee</b> | 75%  | 20%  | 70%  | 80%   | 80%  |
| <b>Specie presenti da talea</b>                | 1: <i>Salix alba</i><br>2: <i>Salix alba</i> e <i>Salix purpurea</i><br>4: <i>Salix alba</i><br>6: <i>Salix eleagnos</i> e <i>Salix purpurea</i>   | <i>Salix alba</i> e <i>Salix eleagnos</i>                      | <i>Salix alba</i>  | <i>Salix alba</i>   | Le talee di <i>Salix</i> posizionate nella parte basale sono scomparse, le talee di <i>Tamarix sp.</i> sono predominanti nella parte sommitale con <i>Rubus ulmifolius</i> |
| <b>Diametro talee</b>                          | <i>Salix alba</i><br>4-40 cm<br><i>S. purpurea</i><br>1-12cm<br><i>S. eleagnos</i><br>4-10 cm  | <i>Salix alba</i><br>4- 18 cm<br><i>S. eleagnos</i><br>3- 8 cm | Primo gradone dal basso<br>10 -25 cm<br>Secondo gradone dal basso<br>8 -14 cm                          | 8-20 cm   | <i>Tamarix</i><br>0,8-1,5 cm   |
| <b>Altezza talee</b>                           | <i>S. alba</i> 5-20 m<br><i>S. purpurea</i> 0,5-4 m<br><i>S. eleagnos</i> (attualmente ceduati, nel 2005 5 m)  | <i>Salix alba</i><br>7- 10 m<br><i>S. eleagnos</i><br>2 - 4 m  | Primo gradone dal basso<br>16-18 m<br>Secondo gradone dal basso<br>14-16 m                             | 10-16 m   | <i>Tamarix sp.</i><br>1- 2,5 m   |
| <b>Ingressione da ambienti limitrofi</b>       | 1: <i>Eucalyptus sp.</i> ,<br><i>Rubus ulmifolius</i> ,<br><i>Crataegus monogyna</i><br>2: <i>Robinia pseudacacia</i> ,<br><i>Sambucus nigra</i> ,<br><i>Cornus sanguinea</i> ,<br><i>Rubus ulmifolius</i> |  | <i>Laurus nobilis</i> ,<br><i>Sambucus nigra</i> ,<br><i>Rubus ulmifolius</i> ,<br><i>Hedera helix</i> | <i>Cytisus scoparius</i> ,<br><i>Rosa canina</i> ,<br><i>Crataegus monogyna</i> | <i>Arundo donax</i> ,<br><i>Sambucus ebulus</i> ,<br><i>Rubus ulmifolius</i> ,<br>etc.<br>Parte basale: 9 specie<br>Parte sommitale: 11 specie                             |



*Figura 5.2 Palificata viva spondale dopo 13 anni. Posta (RI) 2012.*



*Figura 5.4 Palificata reatina nascosta dietro salici arborei cresciuti spontaneamente. Posta (RI) 2012*



*Figura 5.3 Sviluppo delle talee di salice inserite nelle opere di IN; in alto sx Rio Valleluce (FR), in alto dx Campi di Annibale (RM) e in basso Rio Inferno (FR) 2012.*

Nella maggioranza degli interventi si è rilevata la presenza di esemplari di specie legnose provenienti dal territorio limitrofo:

|                            |                           |
|----------------------------|---------------------------|
| <i>Eucalyptus sp.</i> ,    | <i>Laurus nobilis</i>     |
| <i>Robinia pseudacacia</i> | <i>Cytisus scoparius</i>  |
| <i>Sambucus nigra</i>      | <i>Rosa canina</i>        |
| <i>Cornus sanguinea</i>    | <i>Crataegus monogyna</i> |
| <i>Rubus ulmifolius</i>    |                           |

Sull'argine del torrente Arrone le talee di salice inserite nella parte inferiore sono scomparse e sostituite da fitocenosi a dominanza di specie sinantropiche (*Arundo donax*, *Sambucus ebulus*, *Rubus ulmifolius*, etc.), mentre nella parte sommitale domina nella copertura *Tamarix* con diametri di 0,8-1,5 cm e altezze di 1,2-1,5 m, con ingressione di *Rubus ulmifolius* e altre specie sinantropiche (vedi Tabella 5.2).



Figura 5.5 Sviluppo di talee di *Tamarix* sulla sommità arginale del T. Arrone (VT) 2012.

La Tabella 5.3 riporta l'andamento nel tempo della sopravvivenza delle talee di salice inserite nelle opere di Ingegneria Naturalistica del Rio Inferno e Rio Valleruce. I dati del 2000 sono stati rilevati a fine lavori, mentre i dati del 2007 sono riferiti ad un monitoraggio effettuato dagli studenti del corso di Ingegneria Naturalistica dell'Università della Tuscia.



Ne risulta, nel periodo 2000-2012, una sopravvivenza media delle talee inserite del 4-6%.

*Tabella 5.3 Sopravvivenza negli anni delle talee di salice inserite negli interventi del Rio Inferno e Rio Valleluce*

|   | <b>2000</b> | <b>2007</b> | <b>2012</b> | <b>Percentuale di talee sopravvissute</b> |
|---|-------------|-------------|-------------|---|
| <i>N° talee/ mq<br/>palificata Rio Inferno loc. S. Pasquale</i>                           | 15          | 1.4         | 0.6         | 4%  |
| <i>N° talee/ mq<br/>palificata Rio Inferno loc. Portella</i>                              | 5           | 1,8         | 0,3         | 6%  |
| <i>N° talee/ mq<br/>gabbionate Rio Valleluce<br/>(valore medio su 3 file di gabbioni)</i> | 10          | 0,6         | 0,6         | 6%  |



*Figura 5.6 Sviluppo di talee della palificata viva dopo 14 anni. S. Pasquale Rio Inferno (FR). 2014*

I lavori di consolidamento sulle sponde hanno comportato l'alterazione delle morfologie originarie degli alvei, con l'eliminazione della vegetazione esistente. Dal monitoraggio del 2012 negli interventi riportati nella Tabella 5.4, emerge una colonizzazione spontanea delle superfici degli alvei rimodellate dai lavori, esterne alle opere di Ingegneria Naturalistica, da parte di specie di ambienti meso- igrofili con aumento della biodiversità.

Tabella 5.4 Rinaturazione spontanea degli alvei

| <b>INTERVENTO</b>   | <b>n. 3<br/>Rio<br/>Valleluce</b> | <b>n. 2<br/>Rio<br/>Inferno</b> | <b>n. 1<br/>Rio Fontanelle</b> | <b>n. 6<br/>Fiume Velino<br/>loc. Posta</b> |
|---|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---|
| <i>Acer campestre</i> L. pl.                                | x                                 |                                 | x                              |   |
| <i>Aegopodium podagraria</i> L.                             | x                                 | x                               | x                              | x   |
| <i>Alliaria petiolata</i> (Bieb) Cav.et G.                  |                                   |                                 |                                | x   |
| <i>Alopecurus myosuroides</i> Huds.                         |                                   |                                 | x                              |   |
| <i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.                    | x                                 | x                               |                                | x   |
| <i>Apium nodiflorum</i> (L.) Lag.                           |                                   | x                               | x                              |   |
| <i>Arum italicum</i> Miller                                 | x                                 | x                               |                                |   |
| <i>Borago officinalis</i> L.                                |                                   |                                 | x                              |   |
| <i>Brachypodium sylvatica</i> (Huds.) P. Beauv.             | x                                 |                                 |                                | x   |
| <i>Bromus gussonei</i> Parl.                                |                                   | x                               | x                              |   |
| <i>Calystegia sepium</i> (L.) R.Br.                         |                                   |                                 | x                              | x   |
| <i>Carex pendula</i> Huds.                                  | x                                 | x                               | x                              | x   |
| <i>Clematis vitalba</i> L.                                  | x                                 | x                               |                                |   |
| <i>Cornus sanguinea</i> L.                                  |                                   | x                               |                                | x   |
| <i>Equisetum arvense</i> L.                                 | x                                 |                                 |                                | x   |
| <i>Euonymus europaeus</i>                                   |                                   |                                 | x                              |   |
| <i>Eupatorium cannabinum</i> L.                             |                                   |                                 |                                | x   |
| <i>Galium album</i> Miller                                  |                                   | x                               | x                              | x   |
| <i>Galium aparine</i> L.                                    | x                                 | x                               |                                |   |
| <i>Geranium dissectum</i> L.                                |                                   |                                 | x                              |   |
| <i>Geranium robertianum</i> L.                              | x                                 | x                               |                                |   |
| <i>Hedera helix</i> L.                                      | x                                 |                                 |                                |   |
| <i>Holcus lanatus</i> L.                                    |                                   |                                 |                                | x   |
| <i>Humulus lupulus</i> L.                                   | x                                 |                                 |                                |   |
| <i>Iris pseudacorus</i> L.                                  |                                   |                                 | x                              |   |
| <i>Lamium</i> cfr. <i>garganicum</i> L.                     | x                                 |                                 |                                | x   |
| <i>Lathyrus pratensis</i> L.                                |                                   |                                 | x                              |   |
| <i>Laurus nobilis</i> L.                                    | x                                 |                                 |                                |   |
| <i>Lycopus europaeus</i> L.                                 |                                   | x                               |                                |   |
| <i>Mentha longifolia</i> (L.) Huds.                         |                                   |                                 |                                | x   |
| <i>Nasturtium officinale</i> R.Br. subsp. <i>Officinale</i> |                                   | x                               | x                              |   |
| <i>Petasites hybridus</i> (L.) Gaertn.et al.                | x                                 | x                               | x                              | x   |
| <i>Phalaris arundinacea</i>                                 |                                   |                                 | x                              |   |

I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

|   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|
| <i>Phragmites australis</i>                               |   | x |   |   |
| <i>Poa trivialis L.</i>                                   |   | x |   |   |
| <i>Poa palustris</i>                                      |   |   | x |   |
| <i>Poa trivialis L.</i>                                   |   |   |   | x |
| <i>Populus nigra</i>                                      |   |   | x |   |
| <i>Quercus robur,</i>                                     |   |   | x |   |
| <i>Ranunculus ficaria L.</i>                              | x |   |   |   |
| <i>Ranunculus bulbosus L.</i>                             |   |   | x | x |
| <i>Ranunculus lanuginosus L.</i>                          | x | x |   |   |
| <i>Robinia pseudoacacia L.</i>                            | x | x |   |   |
| <i>Rubus ulmifolius Schott</i>                            |   | x | x |   |
| <i>Rumex conglomeratus Murray</i>                         |   |   | x |   |
| <i>Rumex sanguineus L.</i>                                |   | x |   |   |
| <i>Salix alba L.</i>                                      | x | x | x | x |
| <i>Salix purpurea L.</i>                                  | x | x | x | x |
| <i>Sambucus nigra L.</i>                                  |   | x | x |   |
| <i>Saponaria officinale L.</i>                            |   | x |   |   |
| <i>Silene alba (Miller) Krause</i>                        |   |   | x |   |
| <i>Symphytum tuberosum L.</i>                             | x | x |   |   |
| <i>Urtica dioica L</i>                                    | x | x | x |   |
| <i>Veronica anagallis acquatica L.</i>                    |   |   | x |   |
| <i>Veronica beccabunga L.</i>                             |   |   | x |   |
| <i>Veronica hederifolia L.</i>                            |   | x |   |   |
| <i>Viola cfr. alba subsp. dehnhardtii (Ten.) W.Becker</i> | x |   |   |   |



*Figura 5.7 Rinaturazione spontanea alveo Rio Fontanelle (FR) 2012.*



*Figura 5.8 Rinaturazione spontanea alveo Rio Inferno loc. Portella (FR) 2012.*

#### *5.1.1.2 Gli interventi in ambito di versante*

Nelle opere di consolidamento dei versanti sono state utilizzate le seguenti tecniche di Ingegneria Naturalistica:

- palificata viva doppia;
- palificata Latina;
- palificata semplice;

## I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

- grata;
- canaletta rinverdata.

Le talee di salice inserite nel 2000 nelle palificate dell'intervento n. 8 Colle Melfa ad Atina (FR) sono scomparse, mentre sopravvivono quelle dell'intervento n.9 Valle Obito a Marcellini (RI) realizzato nel 2005 (h fino 4 m e Ø 4 cm).

I dati delle schede di monitoraggio sono riassunti nella Tabella 5.5.

In particolare, per quanto riguarda le palificate, i dati più significativi sono:

- copertura complessiva della vegetazione, costituita essenzialmente da arbusti, del 90%;
- numero totale specie legnose presenti 27;
- altezza arbusti: 0,20 -4 m;
- diametro arbusti: 0,30 -2,5 cm;
- sono presenti le seguenti specie di arbusti con altezza superiore ai 2 m: *Cornus sanguinea*, *Rubus ulmifolius*, *Spartium junceum*. *Salix alba* e *S. purpurea*;
- confrontando gli arbusti inseriti e quelli presenti nel periodo di rilievo si constata una ingressione spontanea dal territorio limitrofo di specie; le talee di salice persistono e su 18 specie inserite ne sopravvivono 15 e sono entrate 10 nuove specie legnose dai boschi mesofili a cerro e faggio.

Per quanto riguarda le grate i dati più significativi sono:

- copertura complessiva della vegetazione 55%;
- la copertura erbacea è del 20%;
- la copertura arbustiva è del 40%;
- numero specie legnose presenti: 12;
- altezza arbusti da 1 a 3 m;
- diametro arbusti: da 0,5 a 2 cm;
- sono presenti le seguenti specie di arbusti con altezza superiore ai 2 m: *Salix alba*, *Salix purpurea*, *Cornus sanguinea*, *Rosa canina*;

- ingressione dagli ambienti limitrofi: 2 specie arboree e 24 specie erbacee.



Figura 5.9 Palificata Colle Melfa (FR). 2000, 2008 e 2012.

Tabella 5.5 Interventi in ambito di versante - tabella di sintesi dello sviluppo della parte viva

| <b>INTERVENTO</b>                                | n.8,9,10,11,12<br>palificata viva doppia,<br>semplice, Latina                            | n.9<br>Grata viva   | n.8<br>Canaletta rinverdita |
|--|--|---|-----------------------------|
| Copertura complessiva %                          | 90   | 55  | 80                          |
| Copertura arbustivo %                            | 90   | 40  |                             |
| Copertura erbaceo %                              |  | 20  |                             |
| Numero tot specie presenti                       | 27   | 12  | 10                          |
| H arbusti  | 0,20 - 4 m (H max è relativa<br>alla specie Salix)                                       | 1-3 m   |                             |
| D arbusti  | 0,30 - 2,5 cm (D max è<br>relativo alla specie Salix)                                    | 0,5-2 cm  |                             |
| N specie da ingressione da<br>ambienti limitrofi | Le talee di Salix persistono<br>solo in una delle palificate e<br>su 18 specie arbustive | 2 legnose + 24 erbacee<br>dei boschi mesofili a<br>cerro e faggio | 2 arbusti + 8 erbacee       |

*I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

|                                    |  |  |  |
|------------------------------------|--|--|--|
|                                    | inserite ne sopravvivono 15 e sono entrate 10 nuove specie legnose dai boschi mesofili a cerro e faggio  |  |  |
| Arbusti di altezza superiore a 2 m | <i>Cornus sanguinea, Rubus ulmifolius, Spartium junceum. Salix alba e S. purpurea</i>  | <i>Salix alba, Salix purpurea, Cornus sanguinea, Rosa canina</i> |  |
| Specie a maggior copertura         | <i>Cornus sanguinea, Crataegus monogyna, Rubus ulmifolius, Rosa canina, Salix purpurea, Laburnum anagyroides, Viburnum tinus, Prunus spinosa, Phillyrea angustifolia</i> |  |  |

Nella seguente tabella si evidenzia l'attecchimento e l'ingressione delle specie legnose negli interventi di versante.

Tabella 5.6 Tabella comparativa tra le specie vegetali piantate negli interventi ed il rilievo dell'attuale

| I<br>N<br>T<br>E<br>R<br>V<br>E<br>N<br>T<br>O | n. 8 Colle Melfa, Atina (FR)         |   |   | n. 9 Valle dell'Obito,<br>Marcetelli (RI) |                              |                              | n. 10 Monte Orlando,<br>Gaeta (LT)   |   | n. 11 Pisciareello Porta<br>Romana, Barbarano<br>Romano (VT) |                              | n. 12 Cava dei<br>Bianchi,<br>Acquapendente (VT) |                              |
|--|--------------------------------------|---|---|---|------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|---|--|------------------------------|--|------------------------------|
|  | Specie<br>piantate<br>da<br>progetto | Palificata<br>doppia<br>viva a<br>monte | Palificata<br>doppia<br>viva a<br>valle | Specie<br>piantate<br>da<br>progetto      | Palificata                   | Grata                        | Specie<br>piantate<br>da<br>progetto | Palificata<br>doppia<br>viva +<br>Grata | Specie<br>piantate<br>da<br>progetto                         | Palificata<br>doppia<br>viva | Specie<br>piantate<br>da<br>progetto             | Palificata<br>doppia<br>viva |
|  |                                      | Specie<br>presenti<br>(2012)            | Specie<br>presenti<br>(2012)            |   | Specie<br>presenti<br>(2012) | Specie<br>presenti<br>(2012) |                                      | Specie<br>presenti<br>(2016)            |  | Specie<br>presenti<br>(2016) |  | Specie<br>presenti<br>(2016) |
| <i>Acer campestre</i>                          |                                      | +                                       |   |   |                              |                              |                                      |   |  |                              |  |                              |
| <i>Acer pseudoplatanus</i>                     |                                      |   |   |   | +                            | 1                            |                                      |   |  |                              |  |                              |
| <i>Cornus mas</i>                              | x                                    |   |   | x   | 1                            | 1                            |                                      |   |  |                              |  |                              |
| <i>Cornus sanguinea</i>                        | x                                    | 3                                       |   | x   |                              | 2                            |                                      |   |  |                              |  | 3                            |
| <i>Corylus avellana</i>                        |                                      |   |   |   | +                            |                              |                                      |   |  |                              |  |                              |
| <i>Crataegus monogyna</i>                      | x                                    | 2                                       | 2                                       | x   |                              | 1                            | x                                    | 1                                       |  |                              |  | 2                            |
| <i>Cytisus sessifolius</i>                     |                                      |   |   | x   |                              |                              |                                      |   |  |                              |  |                              |
| <i>Emerus majus</i>                            | x                                    | +                                       |   |   |                              |                              |                                      |   |  |                              |  |                              |
| <i>Euonymus europaeus</i>                      |                                      |   |   | x   |                              | +                            |                                      |   |  |                              |  |                              |
| <i>Laburnum anagyroides</i>                    |                                      |   |   |   | +                            |                              |                                      |   |  |                              |  |                              |
| <i>Laurus nobilis</i>                          |                                      |   |   | x   |                              |                              |                                      |   |  |                              |  |                              |
| <i>Ligustrum vulgare</i>                       | x                                    |   | 1                                       | x   |                              | +                            | x                                    | +                                       |  |                              |  | 1                            |
| <i>Lonicera caprifolium</i>                    |                                      |   | 1                                       |   |                              |                              |                                      |   |  |                              |  |                              |
| <i>Ostrya carpinifolia</i>                     |                                      |   |   |   | +                            |                              |                                      |   |  |                              |  |                              |
| <i>Prunus spinosa</i>                          | x                                    |   |   | x   |                              | +                            |                                      |   |  |                              |  | 2                            |
| <i>Rhamnus alaternus</i>                       |                                      |   | +                                       |   |                              |                              |                                      |   | x  |                              |  |                              |
| <i>Rosa canina</i>                             | x                                    | +                                       | 2                                       | x   | 1                            | 2                            |                                      |   |  |                              |  | 1                            |
| <i>Rubus ulmifolius</i>                        |                                      | 3                                       | 4                                       |   |                              |                              |                                      |   |  |                              |  | 1                            |
| <i>Rubus hirtus</i>                            |                                      |   |   |   |                              | 2                            |                                      |   |  |                              |  |                              |
| <i>Salix alba</i>                              | x                                    |   |   | x   | 2                            | 1                            |                                      |   |  |                              |  |                              |
| <i>Salix eleagnos</i>                          | x                                    |   |   |   |                              |                              |                                      |   |  |                              |  |                              |
| <i>Salix purpurea</i>                          | x                                    |   |   | x   | 4                            | 1                            |                                      |   | x  |                              |  |                              |
| <i>Sorbus aria</i>                             |                                      |   |   | x   |                              | 1                            |                                      |   |  |                              |  |                              |
| <i>Spartium junceum</i>                        | x                                    | 2                                       | 2                                       | x   |                              |                              |                                      |   |  |                              |  | 3                            |
| <i>Ulmus minor</i>                             |                                      | +                                       |   |   |                              |                              |                                      |   |  |                              |  |                              |
| <i>Virburnum tinus</i>                         |                                      |   |   |   |                              |                              | x                                    | 3                                       |  |                              |  |                              |
| <i>Phillyrea angustifolia</i>                  |                                      |   |   |   |                              |                              | x                                    | 2                                       |  |                              |  |                              |
| <i>Coronilla emerus</i>                        |                                      |   |   |   |                              |                              | x                                    | +                                       |  |                              |  |                              |
| <i>Fraxinus ornus</i>                          |                                      |   |   |   |                              |                              |                                      |   |  |                              |  | 1                            |





Figura 5.10 Talee salice nella palificata di Mercetelli (RI) 2012.

#### 5.1.1.3 Risultati conclusivi del monitoraggio

Le opere hanno svolto e svolgono la funzione di consolidamento anche in presenza di decomposizione del legno (vedi palificata Rio Inferno) confermando lo schema statico di cunei di terra rinforzati dalle radici delle piante.

La vitalità delle opere realizzate è dimostrata quasi ovunque, dall'ampia rinnovazione naturale, con localmente abbondante presenza di plantule di specie arbustive spontanee di nuova colonizzazione.

L'analisi dei risultati del monitoraggio in merito allo sviluppo della vegetazione ed al ruolo delle diverse specie permette di formulare le seguenti considerazioni:

- L'uso dei salici in ambito idraulico ha dato ottimi risultati con sviluppo della vegetazione arbustiva ed arborea prevalentemente a *Salix alba* con esemplari alti fino a 20 m con diametri di 40 cm. Rispetto alla densità iniziale dopo oltre 10 anni sopravvivono mediamente il 5% delle talee messe a dimora.
- I salici messi a dimora come talea nelle palificate e grate di versante hanno svolto il ruolo colonizzatore, con lo sviluppo nei primi anni lasciando, successivamente, il posto agli arbusti della serie terrestre. Viene quindi confermato il ruolo pioniero dei salici anche in stazioni non igrofile, ma comunque non termoxerofile.
- Si conferma un dinamismo della vegetazione floristico e strutturale con la comparsa nelle opere di specie arbustive dal bacino biogeografico limitrofo, con una notevole colonizzazione di specie erbacee

- Nelle opere di versante gli arbusti autoctoni piantati: *Cornus sanguinea*, *Crataegus monogyna*, *Rosa canina*, *Spartium junceum* *Salix alba* e *Salix purpurea* presentano buone coperture, mentre gli alberi sono presenti solo sporadicamente (vedi Tabella 5.6). Tra le specie non piantate a colonizzazione spontanea il *Rubus ulmifolius* è la specie a maggior copertura.
- Le specie a maggior sviluppo in altezza e diametro sono i salici e, tra gli arbusti radicati, *Cornus sanguinea* *Rosa canina*, *Crataegus monogyna*, *Cornus mas*, *Acer campestre*, (vedi Tabella 5.7). Tali specie arbustive, utilizzate comunemente nelle opere di Ingegneria Naturalistica, confermano la validità del loro impiego.



Figura 5.11 Sviluppo arbusti autoctoni Colle Melfa (FR) 2012

Tabella 5.7 Sintesi delle migliori performance in altezza e diametro basale delle specie rinvenute negli interventi di IN, ad eccezione di *Robinia pseudacacia* (monitoraggio maggio 2010).

| <b>Specie</b>                         | <b>H (m)</b> | <b>DIAMETRO (cm)</b> |
|---------------------------------------|--------------|----------------------|
| <b>Interventi sui versanti</b>        |              |                      |
| <i>Salix alba</i>                     | 4            | 3.5                  |
| <i>Salix purpurea</i>                 | 3            | 2                    |
| <i>Cornus sanguinea</i>               | 3.5          | 2.5                  |
| <i>Acer campestre</i>                 | 2            | 2                    |
| <i>Crataegus monogyna</i>             | 2            | 2                    |
| <i>Rosa canina</i>                    | 2.5          | 1.5                  |
| <i>Cornus mas</i>                     | 2            | 1                    |
| <b>Interventi in ambito idraulico</b> |              |                      |
| <i>Salix alba</i>                     | 20           | 35                   |
| <i>Salix purpurea</i>                 | 5            | 12                   |
| <i>Salix eleagnos</i>                 | 5            | 10                   |
| <i>Tamarix sp.</i>                    | 2.5          | 1.5                  |

Si ringraziano per i dati forniti e per l'assistenza nei sopralluoghi:

*Parco Riviera di Ulisse*

*Riserva Naturale Monte Rufeno*

*Parco Marturanum*

*Riserva Monte Navegna e Cervia*

Gruppo di lavoro:

*Maria Silvia Amadori*

*Gemma Meriano*

*Simona De Bartoli*

*Giuseppe Puddu*

*Ambra Forconi*

*Valter Tonelli*

*Pierluca Gaglioppa*

Coordinamento scientifico di *Paolo Cornelini*.

### 5.1.2 Il caso della Gola del Furlo (PU) (P. Giacchini)

#### **Premessa**

Qualsiasi intervento dovrebbe prevedere un monitoraggio della propria efficacia al fine di validare i principi ispiratori, la corretta esecuzione e gli effetti nel breve e medio periodo.

Nel caso degli interventi di Ingegneria Naturalistica (consolidamento, manutenzione, rinaturalizzazione) in genere, l'attività di monitoraggio è pratica assolutamente virtuosa per permettere di valutare il rapporto costi-benefici, dalla validità della progettazione a quella della realizzazione, pratica tanto più necessaria nel caso delle opere a verde, come sono quelle di I.N. In questa presentazione ci si sofferma sul monitoraggio delle opere attraverso l'analisi della componente vegetazionale presente a distanza delle diverse stagioni vegetative.

Il monitoraggio delle opere (Sauli G., 2012) prevede analisi (botaniche, biometriche, naturalistiche) con periodicità consigliata nel I, II e V anno, in grado di verificare sia gli aspetti strutturali e di attecchimento delle piante, sia quelli di integrazione nel contesto floristico, vegetazionale e paesaggistico, attraverso:

- verifica della percentuale di attecchimento;
- livello di copertura al suolo;
- rilievi floristici per determinare lo stato di ripresa della vegetazione spontanea del piano dominato (arbustivo);
- rilievi floristici per determinare lo stato di ripresa della vegetazione spontanea delle specie di sottobosco;
- verifica della presenza di specie infestanti e ruderali;
- analisi della composizione floristica dello strato arbustivo in riferimento ai sestri di impianto iniziali;
- analisi della composizione floristica dello strato arboreo e rilievo dendrologico in riferimento ai sestri di impianto iniziali;
- calcolo del numero di fallanze per specie di arbusti ed alberi.

#### 5.1.2.1 La Riserva Naturale Statale Gola Del Furlo (PU)

Presso la Riserva Naturale Statale Gola del Furlo (PU), per iniziativa del Centro Studi Faunistici ed Ecologici di Pesaro e della Provincia di Pesaro e Urbino, nel 1995 è stato avviato un programma di formazione residenziale denominato "L'Università nel Bosco", in cui ha avuto luogo il primo corso sull'uso delle tecniche di Ingegneria Naturalistica presso il rifugio Ca' I Fabbri (Fossombrone PU), tra boschi di faggio, cerro, carpino nero e orniello, ad una quota di 770 m. Dal 1995 al 2010 si sono

regolarmente susseguiti 23 cantieri (nell'ambito di L'Università nel Bosco, corsi di formazione professionale FSE, corsi di aggiornamento) con la realizzazione di numerosi interventi di Ingegneria Naturalistica a scopo didattico, in cui uno dei principali elementi di attrazione era rappresentato dalla possibilità di partecipare direttamente all'esecuzione sul campo di opere reali, nel confronto assiduo con tecnici e docenti, a cui si è aggiunta, dal 2000, la neonata sezione regionale *AIPIN Marche*.

I cantieri sono stati realizzati lungo i versanti del *M. Paganuccio*, su substrati calcarei, spesso poveri di sostanza organica, caratterizzati da scaglia cinerea e scaglia rossa, con finalità didattiche e/o sperimentali, in particolare volti alla:

- sperimentazione delle tecniche in ambito mediterraneo (condizioni tendenzialmente termoxerofile);
- sperimentazione dell'uso di specie vegetali e di modalità di impianto;
- sperimentazione di nuove tipologie di tecniche di Ingegneria Naturalistica;
- divulgazione delle tecniche (a tecnici, laureati, professionisti, amministratori, operatori).

L'aspetto principalmente divulgativo ha spesso comportato l'esecuzione dei lavori in periodi non ottimali per lo sviluppo delle piante inserite nelle opere, con manutenzione molto ridotta o assente a causa delle distanze dalle principali vie di accesso e dai cantieri in ambito naturalistico.

A distanza di anni dall'esecuzione delle opere, l'attività di monitoraggio ha interessato, in due diverse fasi temporali, gli aspetti prevalentemente vegetazionali.

#### *5.1.2.2 Metodologia*

Le opere sono state oggetto di monitoraggi al fine di verificarne l'evoluzione e la funzionalità, spesso in condizioni termofile e su suoli calcarei poveri di sostanza organica. La casistica nota a livello nazionale ed internazionale, infatti, prevedeva spesso una buona disponibilità idrica, che permetteva alle piante, materiale costruttivo di elezione, di potersi sviluppare in modo appropriato.

Lo sviluppo delle tecniche di Ingegneria NaturalisticaIngegneria Naturalistica nell'area del *Furlo* ha posto seri problemi a causa dell'ambiente mediterraneo, spingendo fin dai primi anni, alla ricerca di soluzioni tecniche alternative e di piante con adeguate caratteristiche biotecniche ed ecologiche.

La componente viva delle opere di IN è stata sottoposta a monitoraggi in periodo primaverile nel 2006 (parziale) e nel 2010, su opere realizzate nel periodo 1995-2009 suddivise in:

- opere di rivestimento superficiale (reti, biostuoie, idrosemia)
- opere di consolidamento e combinate (opere lineari, palizzate, palificate, grate, nuovi modelli di palificata).

Considerato che per molti interventi lo sviluppo della vegetazione e del quadro ambientale naturale diviene, con gli anni, sempre meno dipendente dalle caratteristiche tecniche di realizzazione, il monitoraggio negli anni successivi ha avuto solo il compito di seguire l'evoluzione dal punto di vista fotografico e di inserimento paesaggistico.

Ogni intervento è stato riportato su carta 1:10.000, arricchito con documentazione fotografica nelle diverse fasi: ante opera, in corso d'opera e in post opera.

Il monitoraggio degli interventi è stato realizzato attraverso la compilazione di una scheda tipo (Tabella 5.8).

Tabella 5.8 Scheda tipo per il monitoraggio delle opere di Ingegneria Naturalistica nella Riserva Naturale Gola del Furlo

| DATI GENERALI   |           |                       |       |
|---|-----------|-----------------------|-------|
| Data rilevamento  |           |                       |       |
| Rilevatori  |           |                       |       |
| Località (Comune)   |           |                       |       |
| Coordinate  |           |                       |       |
| Tipologia di opera di IN (n.)                             |           |                       |       |
| Anno di intervento  |           | Periodo di intervento |       |
| DATI STAZIONALI   |           |                       |       |
| Altitudine (m slm)  |           |                       |       |
| Inclinazione (in gradi)                                   |           |                       |       |
| Esposizione   |           |                       |       |
| Lineamenti geomorfologici                                 |           |                       |       |
| Lineamenti vegetazionali                                  |           |                       |       |
| Problematica principale                                   |           |                       |       |
| Obiettivi dell'intervento                                 |           |                       |       |
| DATI DELL'OPERA   |           |                       |       |
| Descrizione dell'intervento                               |           |                       |       |
| Dimensioni dell'intervento                                | L (m)     |                       |       |
| Dimensioni dell'intervento<br>Materiali inerti utilizzati |           |                       |       |
| Dimensioni dell'intervento<br>Materiali inerti utilizzati |           | P (m)                 | H (m) |
| Giudizio sulle parti morte dell'opera                     |           |                       |       |
| Materiale vivo utilizzato (specie)                        | N/m talee |                       |       |
| Materiale vivo utilizzato (specie)                        |           |                       |       |

I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

|  |           |                     |
|--|-----------|---------------------|
| Materiale vivo presente (specie e stima %) |           |                     |
| Materiale vivo utilizzato (specie)         | N/m talee | N/m piante radicate |
| Materiale vivo presente (specie e stima %) |           |                     |
| Materiale vivo presente (specie e stima %) |           |                     |
| Manutenzione                               |           |                     |
| Materiale vivo presente (specie e stima %) |           | N/m piante radicate |
| Manutenzione                               |           |                     |
| Giudizio generale sull'opera               |           |                     |

I risultati del monitoraggio della vegetazione sono stati inquadrati nel seguente prospetto:

| Altezza e diametro delle specie arbustive rinvenute | Diametro (alla base) cm | Altezza cm | Rinnovo naturale |
|---|-------------------------|------------|------------------|
| Elenco specie rinvenute, con relative misure        |                         |            | (pl=plantula)    |
| In <u>sottolineato</u> le specie dominanti          |                         |            |                  |
| Copertura arbustiva                                 | %                       |            |                  |

Tabella 5.9 Elenco degli interventi di I.N. soggetti a monitoraggio 2010

| N. | Anno | Località                                 | Opera/e                                    | Corso                | Periodo    |
|----|------|--|--|----------------------|------------|
| 1  | 1995 | Ca' I Fabbri                             | Rete metallica, biostuoie                  | Università nel Bosco | luglio     |
| 2  | 1996 | Strada provinciale Tarugo                | Palificata doppia e grata viva             | Università nel Bosco | luglio     |
| 3  | 1997 | Strada provinciale Tarugo                | Grata viva                                 | Corso FSE (80 ore)   | aprile     |
| 4  | 1997 | Fosso del Rio                            | Copertura diffusa spondale                 | Corso FSE (80 ore)   | aprile     |
| 5  | 1997 | Strada provinciale Tarugo                | Grata viva                                 | Università nel Bosco | luglio     |
| 6  | 1998 | Ca' I Fabbri                             | Palificata semplice (+ canalette stradali) | Università nel Bosco | luglio     |
| 7  | 1999 | Strada forestale S. Anna                 | Palificata semplice e grata viva           | Università nel Bosco | luglio     |
| 8  | 1999 | Strada forestale S. Anna                 | Palificata semplice e grata viva           | Corso FSE (80 ore)   | settembre  |
| 9  | 1999 | Fosso del Rio                            | Copertura diffusa spondale, ribalta viva   | Corso FSE (80 ore)   | settembre  |
| 10 | 2000 | Strada forestale S. Anna                 | Palificata Roma                            | Università nel Bosco | luglio     |
| 11 | 2001 | Strada provinciale Tarugo                | Grata viva e rete metallica                | Università nel Bosco | luglio     |
| 12 | 2002 | Ca' I Fabbri / Strada provinciale Tarugo | Idrosemia (+ manutenzione)                 | Seminario AIPIN      | 5-6 aprile |

| N. | Anno | Località                   | Opera/e   | Corso                       | Periodo           |
|----|------|----------------------------|---|-----------------------------|-------------------|
| 13 | 2002 | Fiume Candigliano          | Palificata spondale                                       | Università nel Bosco        | agosto            |
| 14 | 2003 | Strada provinciale Tarugo  | Palificata Roma   | Corso FSE (80 ore)          | aprile            |
| 15 | 2003 | Strada provinciale Tarugo  | Opere lineari (viminata, fascinata, gradonata, cordonata) | Corso FSE (80 ore)          | aprile            |
| 16 | 2003 | Fiume Candigliano          | Palificata spondale                                       | Università nel Bosco        | agosto            |
| 17 | 2004 | Ca' I Fabbri               | Rete metallica con biostuoia (+ manutenzione)             | Workshop AIPIN              | 23-24<br>aprile   |
| 18 | 2004 | Fiume Candigliano          | Palificata spondale                                       | Università nel Bosco        | agosto            |
| 19 | 2005 | Strada forestale S. Ubaldo | Grata viva  | Cantiere didattico<br>AIPIN | 6-8<br>ottobre    |
| 20 | 2006 | Strada provinciale Tarugo  | Grata viva (altezza 7 m)                                  | Università nel Bosco        | agosto            |
| 21 | 2007 | Strada forestale S. Anna   | Palificata latina   | Cantiere didattico<br>AIPIN | ottobre           |
| 22 | 2008 | Fiume Candigliano          | Palificata spondale + copertura diffusa                   | Università nel Bosco        | luglio-<br>agosto |
| 23 | 2009 | Strada provinciale Tarugo  | Grata viva (altezza 10 m) + rete metallica con Macmat     | Università nel Bosco        | luglio            |

### 5.1.2.3 Il monitoraggio

Il risultato del monitoraggio è stato la redazione di una scheda analitica per tutti gli interventi realizzati. A titolo esemplificativo vengono riportate due delle schede relative ad interventi sperimentali, con la realizzazione dei primi esempi di nuove soluzioni come la palificata Roma e la palificata latina. Queste tecniche, ideate da *Paolo Cornelini*, sono state sperimentate nella *Riserva Gola del Furlo* rappresentando un importante momento di evoluzione e crescita dell'Ingegneria Naturalistica verso sistemi in grado di raccogliere diverse esigenze realizzative come rapidità di esecuzione, risparmio sui materiali, spazi ridotti di esecuzione, ecc.

### 5.1.2.4 Esempio - Palificata Roma

**Anno di intervento:** 2000 (luglio)

**Località:** strada forestale S. Anna

**Comune:** Fossombrone

**Altitudine:** 618 m slm

**Esposizione prevalente:** W

**Esposizione solare:** ombra

**Pendenza versante:** 35° circa



**Lineamenti geomorfologici:** l'area è situata nel medio versante settentrionale del M. Paganuccio. Dal punto di vista geologico i terreni presenti fanno parte della Formazione Umbro-Marchigiana. Si tratta di un'area costituita da detrito di versante di probabile origine tettonica, dall'aspetto prevalentemente caotico, e composta da scaglie e blocchi calcarei e marnosi immersi in una matrice pelitica, riconoscibile soprattutto nella parte terminale più prossima all'area di intervento. Lo strato più superficiale del detrito di falda, costituito da scaglia marnosa e calcarea, drena le acque meteoriche che imbibiscono la sottostante componente pelitica creando un degrado dei parametri geotecnici che ne regolano la stabilità. Lo spessore del corpo detritico non si evince con chiarezza dal rilevamento di superficie. In via del tutto preliminare si può considerare uno spessore medio superiore a 4-5 m.

**Lineamenti vegetazionali:** area di transizione dalla lecceta all'orno-ostrieto, in cui si alterna la presenza di leccio (*Quercus ilex*) prevalentemente in forma arbustiva, ad elementi dell'orno-ostrieto dominanti come carpino nero (*Ostrya carpinifolia*) e orniello (*Fraxinus ornus*). Le diverse situazioni edafiche permettono la compenetrazione di elementi a caratteristiche ecologiche diversificate; si segnala acero campestre (*Acer campestre*), roverella (*Quercus pubescens*) e più sporadicamente faggio (*Fagus sylvatica*) e sorbo montano (*Sorbus aria*).

Lo strato arbustivo è caratterizzato da dondolino (*Coronilla emerus*), citiso minore (*Cytisophyllum sessilifolium*), scotano (*Cotinus coggygria*), rosa selvatica (*Rosa canina*), sanguinello (*Cornus sanguinea*), nocciolo (*Corylus avellana*), ginepro (*Juniperus communis*).

**Problematica:** versante stradale in frana per distacco di una nicchia del soprassuolo. L'apporto detritico dell'erosione può lentamente procurare problemi alla viabilità.

**Obiettivi:** recupero della scarpata stradale, con contenimento e consolidamento dello strato più superficiale del detrito (circa 2 m). Sperimentazione di una nuova tipologia di palificata, che qui viene realizzata quale prototipo a livello nazionale.

**Tecnica utilizzata:** palificata Roma.

**Dimensioni:** lunghezza 5,00 m – altezza 2,00

**Materiali inerti utilizzati:**

- pali di pino nero Ø 20-25 cm
- picchetti in acciaio ad aderenza migliorata Ø 14 mm, L = 40 cm, per fissaggio dei pali
- bulloni in ferro per chiusura dei picchetti
- cambre in tondino liscio Ø 14 mm

- rete in acciaio zincata e plastificata di maglia 6x8 cm
- filo di ferro
- terra di coltivo per riempimento

**Materiali vivi utilizzati:**

- piante radicate in fitocella di:
  - acero campestre (*Acer campestre*)
  - biancospino (*Crataegus monogyna*)
  - carpino nero (*Ostrya carpinifolia*)
  - ciavardello (*Sorbus torminalis*)
  - lantana (*Viburnum lantana*)
  - leccio (*Quercus ilex*)
  - nocciolo (*Corylus avellana*)
  - pero selvatico (*Pyrus piraster*)
  - salicone (*Salix caprea*)
  - sanguinello (*Cornus sanguinea*)
  - sorbo domestico (*Sorbus domestica*)
- talee legnose (lunghezza circa 150 cm, Ø 1-5 cm) di:
  - salice bianco (*Salix alba*)
  - salice rosso (*Salix purpurea*)
  - salice di ripa (*Salix eleagnos*)
  - salicone (*Salix caprea*)

Nel corso degli interventi di manutenzione eseguiti nell'aprile 2002, sono state messe a dimora le seguenti specie arbustive (prevalentemente in *fitocella*):

- agazzino *Phytocantha coccinea*
- biancospino *Crataegus monogyna*
- carpino nero *Ostrya carpinifolia*
- ciliegio *Prunus avium*
- fusaggine *Euonymus europaeus*
- laurotino *Viburnum tinus*
- ligustro *Ligustrum vulgare*
- orniello *Fraxinus ornus*
- rosa selvatica *Rosa canina*
- salice dell'Appennino *Salix apennina*
- sanguinello *Cornus sanguinea*

**Risultati:** monitoraggio maggio 2010

**Stagione vegetativa:** decima stagione vegetativa post realizzazione

**Copertura complessiva:** 60%

Tabella 5.10 Risultati del monitoraggio

| Specie arboree e arbustive rilevate              | Diametro (alla base)<br>cm | Altezza cm | Rinnovo naturale (pl. plantula) |
|--|----------------------------|------------|---------------------------------|
| acero campestre <i>Acer campestre</i>            | 0,5                        | 70-80      |                                 |
| biancospino <i>Crataegus monogyna</i>            | 0,5                        | 60         |                                 |
| carpino nero <i>Ostrya carpinifolia</i>          | 1,2                        | 80         | pl                              |
| ciavardello <i>Sorbus torminalis</i>             | 0,5                        | 60         |                                 |
| citiso minore <i>Cytisophyllum sessilifolium</i> | 0,5                        | 40-80      |                                 |
| laurotino <i>Viburnum tinus</i>                  | 0,6                        | 60         |                                 |
| leccio <i>Quercus ilex</i>                       | 1,5                        | 40-80      |                                 |
| orniello <i>Fraxinus ornus</i>                   | 0,3-1,6                    | 30-200     | pl                              |
| rovo <i>Rubus ulmifolius</i>                     | 0,3-0,4                    | 80         |                                 |
| salice dell'Appennino <i>Salix apennina</i>      | 1                          | 100        |                                 |
| salice rosso <i>Salix purpurea</i>               | 1,5                        | 60         |                                 |
| sanguinello <i>Cornus sanguinea</i>              | 0,6-1                      | 60-110     |                                 |
| sorbo montano <i>Sorbus aria</i>                 | 1                          | 80         |                                 |
| <b>copertura arbustiva (1-3 m altezza)</b>       | <b>30%</b>                 |            |                                 |

**\*specie dominanti**

|  |            |
|--|------------|
| <b>Copertura erbacea complessiva</b>   | <b>20%</b> |
| <i>Brachypodium</i> sp., <i>Viola</i> sp., <i>Dactylis glomerata</i> , <i>Fragaria vesca</i> , <i>Hedera helix</i> ,<br><i>Anemone hepatica</i> , + copertura a muschi |            |

**Descrizione generale**

Opera di consolidamento al piede, realizzata con una tecnica che riprende aspetti della palificata doppia, della grata, della palizzata, della terra rinforzata, con l'obiettivo di una maggiore rapidità di esecuzione ed una minore quantità di materiali utilizzati, quindi minori costi.

La struttura è stata realizzata utilizzando tondami di pino (per la disponibilità locale di tronchi di pezzatura idonea, anche se notoriamente questo legname è di pregio inferiore) Ø 20÷25 cm posti a formare una struttura triangolare in legname, con i montanti, i tiranti ed i traversi di L= 2,50 ÷ 3,00 m e fissati tra di loro con tondini e barre filettate in acciaio con dadi e rondelle Ø 14 mm. La palificata è stata interrata con una pendenza del 10÷15% verso monte. Sui traversi di base è stata posata una

rete in acciaio zincata e plastificata di maglia 6x8 cm, per la ripartizione del carico del terreno di riempimento sulla fondazione.

Il terreno di scavo è stato miscelato con terreno di coltivo per il riempimento della palificata, dove sono state inserite talee di salici con capacità di propagazione vegetativa, e piante radicate di specie arbustive pioniere. Rami e piante dovranno sporgere circa 10 cm dalla palificata ed arrivare nella parte posteriore sino al terreno naturale.

### ***Criticità***

L'attecchimento delle specie arbustive ha subito varie vicissitudini, con alternanza di specie a diversificate esigenze ecologiche. Gli interventi di manutenzione del 2002 sono stati quanto mai opportuni. L'attecchimento è, tuttavia, non ancora del tutto ottimale.

I tronchi di legno di pino hanno subito forti fenomeni di degrado, come già preventivato, e soprattutto in corrispondenza dei picchetti mostrano evidenti spaccature che porteranno in un futuro non troppo lontano, ad un generalizzato degrado della struttura inerte. Inoltre, le bullonature hanno favorito un più veloce deterioramento dei tondami di legno.

### ***Giudizio complessivo post operam***

Nonostante le criticità rilevate, il prototipo di questa nuova tipologia di tecnica di Ingegneria Naturalistica sembra aver ottenuto un discreto successo.

La stabilità del versante è stata assicurata e l'erosione superficiale, per quanto di non particolare entità, non sembra più minacciare la sede stradale.

Il recupero ecologico, per quanto difficoltoso per l'evidente povertà del substrato, ma avvantaggiato da condizioni di ombreggiamento che hanno evitato forti e prolungate condizioni di aridità, ha comunque preso un deciso avvio. Le tabelle relative ai monitoraggi e la documentazione fotografica mostrano come l'avvicendamento abbia interessato le diverse specie di salici esplose nei primi anni, mentre allo stato attuale è in via di affermazione una popolazione arbustiva più consona alle caratteristiche ambientali dell'area.

Sarebbe infine auspicabile attuare ulteriori interventi di manutenzione, con la messa a dimora di altre piante arbustive per migliorare l'effetto funzionale (consolidante, estetico ed ecologico) dell'opera.



*Figura 5.12 Fase di realizzazione della palificata Roma (2000).*



*Figura 5.13 Palificata Roma alla seconda stagione vegetativa.*



Figura 5.14 Palificata Roma alla quattordicesima stagione vegetativa, interamente vegetata.

#### 5.1.2.5 Esempio - Palificata Roma

**Anno di intervento:** 2007 (ottobre)

**Esposizione prevalente:** NW

**Località:** strada forestale S. Anna

**Esposizione solare:** ombra

**Comune:** Fossombrone (PU)

**Pendenza versante:** 35-40°

**Altitudine:** 262 m slm

**Lineamenti geomorfologici:** l'area è situata nel basso versante settentrionale del M. Paganuccio. Dal punto di vista geologico i terreni presenti fanno parte della Formazione Umbro-Marchigiana.

Si tratta di una piccola area di cantiere lungo la strada bianca che sale verso S. Ubaldo e Ca' I Fabbri, costituita da detrito di falda a elementi sub spigolosi, eterodimensionali, calcareo marnosi e marnoso argillosi, derivante dall'alterazione della formazione a Scaglia Rossa.

**Lineamenti vegetazionali:** area compresa nell'ambito di un orno-ostrieto, con dominanza di carpino nero (*Ostrya carpinifolia*), accompagnato da orniello (*Fraxinus ornus*), aceri (*Acer campestre*, *Acer pseudoplatanus*), cerro (*Quercus cerris*) e roverella (*Quercus pubescens*). La strada ha tagliato l'omogeneità della formazione forestale; qui si è insinuato un mantello arbustivo contrassegnato da ginestra (*Spartium junceum*), dondolino (*Coronilla emerus*), citiso minore (*Cytisophyllum sessilifolium*), leccio (*Quercus ilex*), scotano (*Cotinus coggygria*), rosa selvatica (*Rosa canina*), ciliegio canino (*Prunus mahaleb*).

**Problematica:** antico allargamento della sede stradale con deboli fenomeni erosivi del cotico superficiale e frattura dell'integrità della scarpata forestale.

## Obiettivi

Sperimentazione di una nuova tecnica di Ingegneria Naturalistica, ripristino della scarpata stradale con reintegro nel tessuto forestale.

**Tecnica utilizzata:** palificata latina.

**Dimensioni:** lunghezza 4,00 m – altezza 1,20 m

## Materiali inerti utilizzati:

- pali di castagno scortecciati Ø 20-25 cm
- picchetti in acciaio ad aderenza migliorata Ø 14 mm, L = 40 cm
- viti tipo Parker da legno zincata e cerata di Ø 10 mm, per fissaggio dei pali di castagno
- terra di coltivo per riempimento

## Materiali vivi utilizzati:

- piante in fitocella di:
  - ligustro (*Ligustrum vulgare*)
  - nocciolo (*Corylus avellana*)
  - sanguinello (*Cornus sanguinea*)

**Risultati:** monitoraggio maggio 2010

**Stagione vegetativa:** terza stagione vegetativa post realizzazione

**Copertura complessiva:** 85%

Tabella 5.11 Risultati del monitoraggio

| Specie arboree e arbustive rilevate        | Diametro (alla base) in cm | Altezza in cm | Rinnovo naturale (pl. plantula) |
|--|----------------------------|---------------|---------------------------------|
| caprifoglio <i>Lonicera etrusca</i>        |                            | 20            | pl                              |
| ciliegio canino <i>Prunus mahaleb</i>      | 0,4                        | 60            | pl                              |
| dondolino <i>Coronilla emerus</i>          | 0,5                        | 100-130       |                                 |
| <u>ligustro</u> <i>Ligustrum vulgare</i>   | 0,7-0,8                    | 120-150       |                                 |
| nocciolo <i>Corylus avellana</i>           | 0,8                        | 120-130       |                                 |
| orniello <i>Fraxinus ornus</i>             |                            |               | pl                              |
| <u>rovo</u> <i>Rubus ulmifolius</i>        | 1                          | 100-130       |                                 |
| <u>sanguinello</u> <i>Cornus sanguinea</i> | 1                          | 100-150       | pl                              |
| <u>scotano</u> <i>Cotinus coggygria</i>    | 1                          | 120-180       |                                 |
| <i>copertura arbustiva (1-3 m altezza)</i> | <b>80%</b>                 |               |                                 |

specie dominanti

| Copertura erbacea complessiva   | 5% |
|---|----|
| <i>Viola</i> sp., <i>Geranium</i> sp., <i>Euphorbia</i> sp., <i>Silene</i> sp., <i>Digitalis</i> sp., <i>Edera helix</i> ,<br><i>Clematis vitalba</i> , <i>Geum urbanum</i> , <i>Poa annua</i> e altre Graminacee |    |

**Descrizione generale**

Opera di consolidamento al piede di nuova ideazione e realizzazione, a cura dell'Ing. Paolo Cornolini. Nell'area del *Furlo* è stata eseguita la seconda opera in Italia appartenente a questa tipologia di intervento di Ingegneria Naturalistica.

È stata realizzata usando tondami di castagno di diametro 20-25 cm posti alternativamente in senso longitudinale (correnti L= 4 m) ed in senso trasversale (traversi L=2-2,5 m a seconda dell'altezza), a formare cassoni triangolari in legname uniti tra loro dai correnti stessi con interasse di 4 m. I tondami sono fissati tra di loro con chiodi (viti Parker) 10-12 mm con lunghezza di poco inferiore ai due tronchi sovrapposti. Per una maggiore stabilità la palificata è stata interrata con una pendenza di 10°-15° verso monte. L'intera struttura è stata riempita con l'inerte ricavato dallo scavo miscelato con terreno di coltivo. Nelle camere formate tra i tondami orizzontali sono state collocate piante radicate di specie arbustive pioniere. Rami e piante dovranno sporgere non più di 10-20 cm dalla palificata ed arrivare nella parte posteriore sino al terreno naturale.

Il fissaggio dei tronchi di castagno è stato realizzato per la prima volta sostituendo i classici tondini in ferro con viti Parker da legno zincate e cerate di Ø 10 mm; tale intervento, che comporta l'acquisto di materiale ferroso di maggior pregio (le viti) e l'utilizzo di un avvitatore, permette però una decisa velocizzazione delle operazioni di montaggio ed un notevole abbattimento dei costi della manodopera.

**Criticità**

Non si sono verificate criticità.

**Giudizio complessivo post operam**

L'opera aveva un valore decisamente sperimentale e didattico-divulgativo per testare questa nuova tipologia di Ingegneria Naturalistica. A ciò si è aggiunta la sperimentazione di una nuova modalità di fissaggio dei tronchi in legno, sostituendo i tondini in ferro con le viti tipo Parker. Valutando attentamente le dimensioni del legname e delle viti, quindi non perdendo di efficacia nella realizzazione di opere consolidate, l'uso esteso di queste viti consente un notevole risparmio di tempo



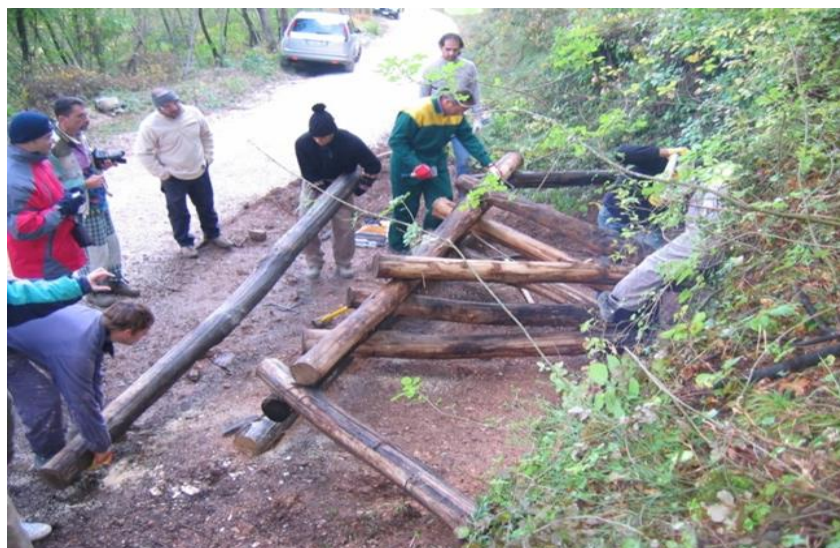
e l'abbattimento dei costi (valutato successivamente nell'adeguamento del Prezzario regionale delle opere di I.N.).

Allo stato attuale l'opera sembra aver raggiunto tutti gli obiettivi prefissati.

L'esecuzione ha riscosso notevole interesse nei partecipanti e nell'ambito della sistemazione dei versanti con tecniche a basso impatto ambientale, per la sua velocità nell'esecuzione e per la buona affidabilità.

Pur in assenza di problematiche di particolare entità, la palificata latina ha permesso un veloce recupero della scarpata stradale con il reintegro nell'ambiente forestale. La quasi invisibilità dell'opera nel periodo vegetativo conferma che l'opera è stata adeguatamente rivegetata dalle specie messe a dimora e colonizzata da altre specie spontanee.

Il tonname ha mantenuto la sua integrità, mentre non si rilevano fenomeni di svuotamento.



*Figura 5.15 Fase di realizzazione della palificata latina (2007).*



Figura 5.16 Palificata latina alla terza stagione vegetativa.



Figura 5.17 Palificata latina alla nona stagione vegetativa, e dopo una drastica potatura.

#### 5.1.2.6 Parametri del monitoraggio

Nelle seguenti tabelle vengono riportati i dati del monitoraggio effettuato sui principali parametri vegetazionali, come diametro e altezza delle piante rilevate all'interno delle opere, o capacità di rinnovo naturale (pl.) negli ambienti termofili e xerici del M. Paganuccio (Furlo PU). Non è stata compresa *Robinia pseudoacacia*, specie esotica invasiva che entra come pianta pioniera sviluppando risultati in altezza e diametro spesso molto superiori al resto delle specie autoctone utilizzate.

Tabella 5.12 Sintesi delle migliori performance in altezza e diametro basale delle specie rinvenute negli interventi di I.N. (monitoraggio maggio 2010).

| Altezza                                 | cm  | Diametro                                | cm      |
|---|-----|---|---------|
| orniello <i>Fraxinus ornus</i>          | 400 | ginestra <i>Spartium junceum</i>        | 3,5     |
| agazzino <i>Pyracantha coccinea</i>     | 350 | sorbo montano <i>Sorbus aria</i>        |         |
| ciliegio canino <i>Prunus mahaleb</i>   |     | acero campestre <i>Acer campestre</i>   | 3,2     |
| sorbo montano <i>Sorbus aria</i>        |     | orniello <i>Fraxinus ornus</i>          | 3       |
| carpino nero <i>Ostrya carpinifolia</i> | 300 | agazzino <i>Pyracantha coccinea</i>     |         |
| nocciolo <i>Corylus avellana</i>        |     | biancospino <i>Crataegus monogyna</i>   |         |
| sanguinello <i>Cornus sanguinea</i>     |     | laurotino <i>Viburnum tinus</i>         |         |
| acero campestre <i>Acer campestre</i>   | 250 | leccio <i>Quercus ilex</i>              | 2,4-2,6 |
| ginestra <i>Spartium junceum</i>        |     | carpino nero <i>Ostrya carpinifolia</i> |         |

*I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

|  |     |   |         |
|--|-----|---|---------|
| laurotino <i>Viburnum tinus</i>                  |     | nocciolo <i>Corylus avellana</i>            |         |
| ligustro <i>Ligustrum vulgare</i>                |     | scotano <i>Cotinus coggygia</i>             |         |
| rosa selvatica <i>Rosa canina</i>                |     | ciliegio canino <i>Prunus mahaleb</i>       |         |
| scotano <i>Cotinus coggygia</i>                  |     | salice dell'Appennino <i>Salix apennina</i> | 2       |
| caprifoglio <i>Lonicera etrusca</i>              | 200 | salice eleagno <i>Salix eleagnos</i>        |         |
| citiso minore <i>Cytisophyllum sessilifolium</i> |     | salice rosso <i>Salix purpurea</i>          |         |
| dondolino <i>Coronilla emerus</i>                |     | fusaggine <i>Euonymus europaeus</i>         | 1,4-1,5 |
| fusaggine <i>Euonymus europaeus</i>              |     | sanguinello <i>Cornus sanguinea</i>         |         |
| salice dell'Appennino <i>Salix apennina</i>      |     |   |         |
| salice rosso <i>Salix purpurea</i>               |     |   |         |

Tabella 5.13 Rinnovazione naturale (pl=plantula) delle specie rinvenute in alcuni interventi di I.N. (monitoraggio maggio 2010). La numerazione è stata assegnata ai diversi interventi di I.N. realizzati nella Riserva Gola del Furlo.

| Specie arboree o arbustive rilevate           | 2 / 3 / 5 - palificata + GRATA | 7 - grata | 7 - palificata. doppia + grata | 8 - palificata semplice | 10 - palificata Roma | 11 - grata | 14 - palificata Roma | 15 - opere lineari | 17 - rete + stuoia | 19 - grata + rete | 20 - grata | 21 - palificata. latina |
|---|--------------------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------|----------------------|------------|----------------------|--------------------|--------------------|-------------------|------------|-------------------------|
| acero campestre<br><i>Acer campestre</i>      | pl                             |           | pl                             |                         |                      |            | pl                   |                    |                    |                   |            |                         |
| acero napoletano<br><i>Acer obtusatum</i>     | pl                             |           |                                |                         |                      | pl         |                      |                    |                    |                   | pl         |                         |
| carpino nero<br><i>Ostrya carpinifolia</i>    | pl                             |           | pl                             |                         | pl                   | pl         | pl                   | Pl                 | pl                 | pl                | pl         |                         |
| ciliegio canino<br><i>Prunus mahaleb</i>      |                                |           |                                |                         |                      |            |                      |                    |                    |                   |            | pl                      |
| ciliegio volpino<br><i>Lonicera xylosteum</i> |                                | pl        |                                |                         |                      |            |                      |                    |                    |                   |            |                         |
| leccio <i>Quercus ilex</i>                    |                                | pl        | pl                             |                         |                      |            |                      |                    |                    | pl                |            |                         |
| orniello<br><i>Fraxinus ornus</i>             | pl                             | pl        | pl                             | pl                      | pl                   | pl         | pl                   |                    |                    | pl                |            | pl                      |
| robinia<br><i>Robinia pseudoacacia</i>        | pl                             |           |                                |                         |                      |            |                      |                    |                    |                   |            |                         |
| rovo<br><i>Rubus ulmifolius</i>               | pl                             |           |                                | pl                      |                      |            |                      |                    |                    |                   |            |                         |
| roverella<br><i>Quercus pubescens</i>         |                                |           |                                |                         |                      |            |                      | pl                 |                    |                   | pl         |                         |
| sanguinello<br><i>Cornus sanguinea</i>        |                                |           |                                |                         |                      |            |                      |                    |                    |                   |            | pl                      |
| scotano<br><i>Cotinus coggygria</i>           |                                | pl        |                                |                         |                      | pl         |                      |                    |                    |                   |            |                         |
| sorbo domestico<br><i>Sorbus domestica</i>    |                                |           |                                | pl                      |                      |            |                      |                    |                    |                   |            |                         |

Tabella 5.14 Analisi delle altezze delle specie rinvenute negli interventi di I.N. dopo diverse stagioni vegetative (monitoraggio maggio 2010).

| ALTEZZA DELLE SPECIE RINVENUTE (cm)            | 2 / 3 / 5 - palificata + GRATA | 7 - grata | 7 - palificata, doppia + grata | 8 - palificata semplice | 10 - palificata Roma | 11 - grata | 14 - palificata Roma | 19 - grata + rete | 20 - grata | 21 - palificata, latina |
|--|--------------------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------|----------------------|------------|----------------------|-------------------|------------|-------------------------|
| robinia<br><i>Robinia pseudoacacia</i>         | 800-1000                       |           |                                |                         |                      |            |                      |                   | 60         |                         |
| orniello<br><i>Fraxinus ornus</i>              | 30-120                         | 100-220   | 100-400                        | 100                     | 30-200               | 40-200     | 40                   |                   | 40         |                         |
| Agazzino<br><i>Pyracantha coccinea</i>         | 100-230                        | 100       | 200                            |                         |                      | 100-200    | 250-350              |                   |            |                         |
| ciliegio canino<br><i>Prunus mahaleb</i>       | 300-350                        |           |                                |                         |                      | 100        | 120                  |                   |            | 60                      |
| sorbo montano<br><i>Sorbus aria</i>            | 100-350                        | 150       | 90-220                         | 200-350                 | 80                   | 200-250    |                      |                   | 80         |                         |
| sanguinello<br><i>Cornus sanguinea</i>         | 100-140                        | 80        | 60-120                         | 60-220                  | 60-110               | 180-300    |                      | 150-210           | 60-80      | 100-150                 |
| carpino nero<br><i>Ostrya carpinifolia</i>     | 300                            |           | 50-110                         |                         | 80                   | 100-300    | 60-80                | 40                | 25         |                         |
| nocciolo<br><i>Corylus avellana</i>            | 200-250                        |           |                                |                         |                      | 160        | 300                  |                   |            | 120-130                 |
| ligustro<br><i>Ligustrum vulgare</i>           |                                |           |                                | 140                     |                      |            |                      | 180-250           |            | 120-150                 |
| laurotino<br><i>Viburnum tinus</i>             |                                | 100-250   | 40-250                         | 40-150                  | 60                   | 100-150    |                      |                   | 35         |                         |
| ginestra<br><i>Spartium junceum</i>            |                                |           |                                |                         |                      | 250        |                      |                   |            |                         |
| rosa selvatica<br><i>Rosa canina</i>           |                                | 120       | 240                            | 120                     |                      |            |                      | 250               |            |                         |
| scotano<br><i>Cotinus coggygria</i>            | 100-250                        | 70-120    |                                |                         |                      | 30         |                      |                   |            | 120-180                 |
| acero campestre<br><i>Acer campestre</i>       | 20                             | 110       | 100-250                        |                         | 70-80                | 20         | 60-80                |                   |            |                         |
| dondolino<br><i>Coronilla emerus</i>           |                                |           |                                |                         |                      |            |                      | 60-150            | 100-200    | 100-130                 |
| citiso minore<br><i>Cytisophyllum</i>          | 200                            | 80        |                                |                         | 40-80                | 150-170    |                      |                   | 100-200    |                         |
| fusaggine<br><i>Euonymus europaeus</i>         |                                |           |                                |                         |                      | 200        |                      |                   |            |                         |
| salice dell'Appennino<br><i>Salix apennina</i> |                                |           |                                | 200                     | 100                  | 150-200    |                      |                   |            |                         |
| salice rosso<br><i>Salix purpurea</i>          |                                |           |                                |                         | 60                   | 150-200    |                      |                   |            |                         |
| caprifoglio<br><i>Lonicera etrusca</i>         | 100-120                        | 70-200    |                                |                         |                      |            |                      |                   | 60         | 20                      |
| biancospino<br><i>Crataegus monogyna</i>       | 150                            | 60-130    | 100                            |                         | 60                   | 150        |                      |                   | 60-80      |                         |
| sorbo domestico<br><i>Sorbus domestica</i>     | 150                            |           | 80                             | 60                      |                      |            |                      |                   |            |                         |
| rovo<br><i>Rubus ulmifolius</i>                |                                |           |                                |                         | 80                   |            | 100                  | 100               |            | 100-130                 |
| leccio<br><i>Quercus ilex</i>                  |                                | 120       | 120                            |                         | 40-80                |            |                      | 30                |            |                         |
| prugnolo<br><i>Prunus spinosa</i>              |                                |           |                                |                         |                      |            |                      | 70-120            |            |                         |
| salice eleagno<br><i>Salix eleagnos</i>        |                                |           |                                |                         |                      |            | 100                  |                   |            |                         |
| acero napoletano<br><i>Acer obtusatum</i>      | 30-100                         |           |                                |                         |                      | 50         |                      | 20-80             | 10         |                         |
| ciavardello<br><i>Sorbus torminalis</i>        |                                |           | 35                             |                         | 60                   | 70         |                      |                   |            |                         |
| ciliegio<br><i>Prunus avium</i>                |                                |           |                                |                         |                      |            | 40                   |                   |            |                         |
| ciliegio volpino<br><i>Lonicera xylosteum</i>  |                                | 30-40     |                                |                         |                      |            |                      |                   |            |                         |
| roverella<br><i>Quercus pubescens</i>          |                                |           |                                |                         |                      | 20         |                      |                   | 10         |                         |



Figura 5.20 Orniello

*Fraxinus ornus* (infiorescenza)



Figura 5.21 Sanguinello

*Cornus sanguinea* (infiorescenza)



Figura 5.18 Laurotino

*Viburnum tinus* (frutti)



Figura 5.19 Carpino nero

*Ostrya carpinifolia* (frutti)



Figura 5.23 Acero campestre

*Acer campestre* (foglie e frutti)



Figura 5.22 Sorbo montano

*Sorbus aria* (foglie e frutti)

#### 5.1.2.7 Conclusioni

- Mission = promuovere tecniche a basso impatto ambientale nella gestione del territorio (I.N.)

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

- Sviluppo della vegetazione fortemente condizionato dal substrato
- Ruolo pioniere dei salici poco efficace in ambiente mediterraneo (tendenzialmente xerico), anche in qualità di specie starter
- Evoluzione della vegetazione spontanea verso specie esotiche (*Robinia pseudoacacia*, *Ailanthus altissima*, *Amorpha fruticosa*) o sinantropiche
- Interventi di I.N. nella Riserva (dopo 10-15 anni): ottimi risultati in termini di sviluppo per *Fraxinus ornus* e *Cornus sanguinea*, risultati buoni anche per *Ostrya carpinifolia* e *Viburnum tinus*
- Interventi di I.N. nella Riserva (dopo 10-15 anni): risultati ridotti in termini di sviluppo per *Rosa canina* e *Crataegus monogyna*
- Sperimentazione delle tecniche di I.N. in ambienti mediterranei, spesso ostili
- Fondamentale l'analisi della componente floristica dell'intorno
- Importanza della disponibilità di materiale vivo adeguato proveniente da vivai specializzati o da forniture autonome (autoproduzione programmata)
- Importanza dell'apporto di suolo con sostanza organica, nel riempimento delle opere di I.N.
- Capacità di resilienza naturale con diversificate velocità di recupero da parte della vegetazione naturale nei diversi ambienti (attenzione all'ingresso di specie esotiche invasive)
- Necessità assoluta di manutenzione (soprattutto iniziale), con irrigazione in ogni periodo dell'anno in funzione delle condizioni atmosferiche, recupero fallanze, potature
- Monitoraggio (verde) post operam come condizione per una corretta realizzazione degli interventi.

### ***Ringraziamenti***

Elisabetta Cecchini, Maurizio Bartoli della *Riserva Naturale Statale Gola del Furlo* per il fondamentale sostegno alle idee ed alla realizzazione di tutte le iniziative. Paolo Cornelini per l'indispensabile e insostituibile collaborazione al monitoraggio delle opere. Marco Bonacoscia, Massimo Cappelletti, Paolo Cornelini, Giuliano Sauli, Roberto Ferrari per la progettazione e realizzazione dei cantieri e dei corsi. Simone Marochi, Erierto Cecchini della *Riserva Gola del Furlo* per la preziosa assistenza ai cantieri. Tutti i partecipanti alle iniziative di corsi e cantieri.

## 6 LA PIANIFICAZIONE DEL VERDE ED INTERVENTI DI INGEGNERIA NATURALISTICA

### 6.1 ECOSISTEMI E IL VALORE ECOLOGICO DEGLI INTERVENTI DI INGEGNERIA NATURALISTICA, ESEMPI DI VALUTAZIONE DEI SERVIZI ECOSISTEMICI (R. Santolini)

#### 6.1.1 Introduzione

La rapidità con cui gli ambienti naturali vengono distrutti ed alterati dalle attività umane con conseguenze significative sulla frammentazione degli ecosistemi e degli habitat anche di interesse comunitario, ha determinato l'importanza del ripristino ecologico (Young 2000) e del recupero della funzionalità ecosistemica (Comitato Capitale Naturale, 2021) per preservare il capitale naturale ed il suo valore.

A causa dell'ampia estensione degli ecosistemi degradati e dei fondi limitati generalmente disponibili per la gestione delle risorse naturali, la selezione delle aree e delle componenti dell'ecosistema da ripristinare è una delle principali sfide che l'Ingegneria Naturalistica (IN) e la *Restoration Ecology* (RE) devono affrontare. Nonostante sia fondamentale, è difficile condurre una valutazione pratica per stabilire se un particolare paesaggio necessita di restauro e, in tal caso, quali componenti o funzioni dell'ecosistema dovrebbero essere ripristinati per primi. Questo compito può essere ottimizzato se è data la possibilità di definire in anticipo lo stato funzionale degli ecosistemi, se è possibile stabilire la relazione tra struttura e funzioni e se è noto il potenziale di ripristino dell'ecosistema.

Ripristino significa qualcosa di più della semplice riduzione dell'impatto distruttivo dell'uomo e cioè prevenire, bloccare e se possibile invertire i processi di degradazione degli ecosistemi (terrestri e marini), mettendo in sicurezza e recuperando la vitalità degli ecosistemi in modo da dare opportunità vera ai benefici insiti nelle *green and blu infrastructures*.

Data la sua importanza e le implicazioni nella gestione, sono stati sviluppati numerosi modelli legati alla struttura/composizione e il funzionamento dell'ecosistema (Hobbs & Norton 1996; Zedler & Callaway 1999; Lockwood & Samuels 2004). In Figura 6.1 viene mostrato il modello proposto da AD Bradshaw (Bradshaw 1984) (*Linear Structure vs. Function model* o LSF), uno dei più influenti e ampiamente utilizzati poiché presuppone un cambiamento correlato nella struttura e nella funzione nel progressivo degrado degli ecosistemi, ovvero un aumento lineare della funzionalità dell'ecosistema con l'aumento della complessità della sua struttura (Figura 6.1). La struttura può essere qualsiasi composizione della comunità e del modo in cui gli organismi sono organizzati (specie e complessità, nella formulazione originale di Bradshaw 1984) posti in relazione con qualsiasi



processo che esprima una funzione ecologica misurabile presa come surrogato del funzionamento dell'ecosistema (es. fotosintesi, accumulo di nutrienti, dinamica di specie focali). Secondo questo modello, il restauro è definito come l'aumento simultaneo della struttura e della funzione promosso dall'intervento umano parallelamente ai cambiamenti che si verificano durante l'evoluzione successiva.

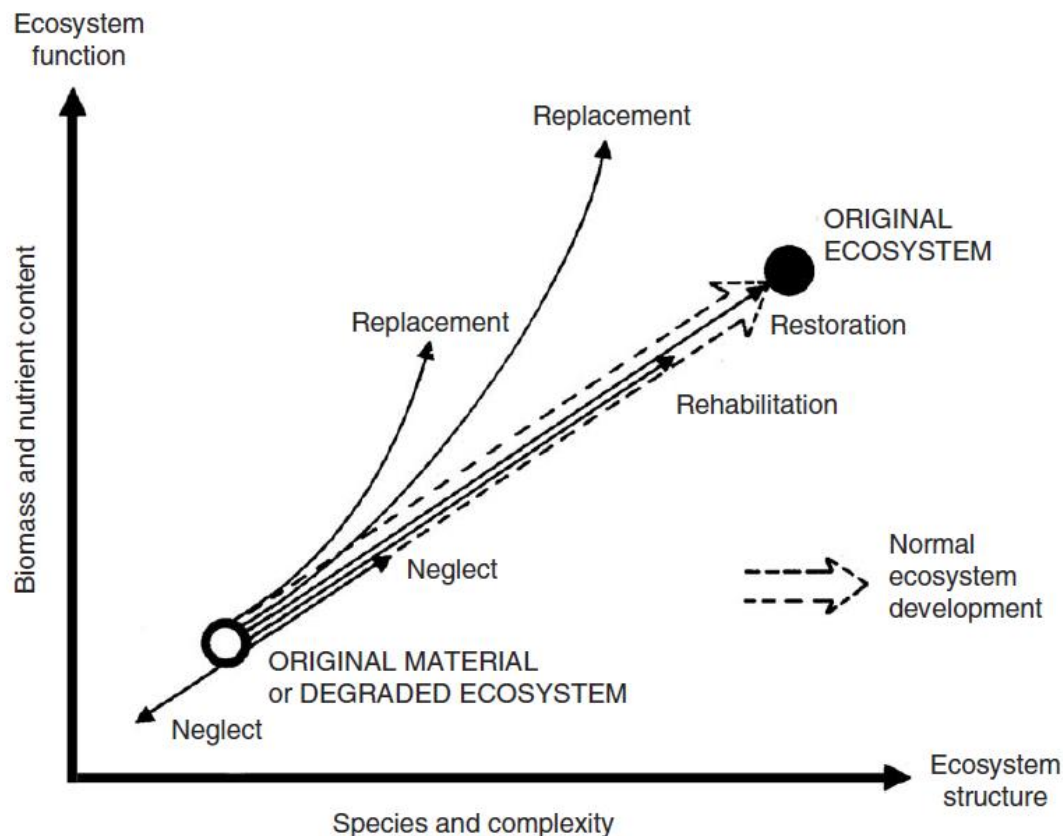


Figura 6.1 Rappresentazione grafica del modello struttura/funzione (da Bradshaw 1984).

Più completa è la definizione dell'International Society for Ecological Restoration (SER, Clewell et al., 2005), la *restoration ecology* è un processo che consiste nell'aiutare un ecosistema a ristabilirsi dopo che è stato degradato, danneggiato o distrutto. È un'attività svolta con il proposito di dare inizio o accelerare il recupero dell'ecosistema rispetto alle seguenti caratteristiche:

- 1) stato di salute (processi funzionali);
- 2) integrità (composizione di specie e struttura della comunità);
- 3) sostenibilità (resistenza alle perturbazioni e resilienza).

Il restauro garantisce un supporto di tipo abiotico dall'ambiente fisico, garantisce l'instaurarsi di flussi e scambi di organismi e materia dall'ambiente circostante, garantisce infine, il ristabilirsi di relazioni uomo-ambiente da cui dipende l'integrità di alcuni ecosistemi.

*Il restauro tenta di riportare un ecosistema sulla sua dinamica storica, ossia a una condizione simile a una condizione precedente a noi nota o a un'altra condizione che ci si aspetta che evolva spontaneamente all'interno dei confini della dinamica storica. Può accadere però che l'ecosistema non torni nella sua condizione precedente perché nuovi fattori limitanti e nuove situazioni al contorno potrebbero farlo evolvere lungo una dinamica diversa rispetto a quella storica così come normalmente succede in tutti gli ecosistemi che subiscono un impatto, soprattutto se cadenzato in un tempo che limita un recupero completo o nelle attuali condizioni di crisi climatica (Comitato Capitale Naturale, 2021).*

### **6.1.2 Gli ecosistemi**

Con questa premessa, è utile capire meglio l'oggetto su cui svolgiamo le nostre attività di recupero e restauro: le unità ecosistemiche. Sono unità spaziali funzionali ai diversi livelli di scala che per la contabilità degli ecosistemi sono etichettate come risorse ecosistemiche. Gli *asset* ecosistemici (EA) sono spazi contigui di un tipo specifico di ecosistema, caratterizzato da un insieme distinto di componenti biotiche e abiotiche e dalle loro interazioni. La definizione di beni ecosistemici è una rappresentazione statistica della definizione generale di ecosistemi dalla CBD (*Convention on Biological Diversity*) (United Nations et al., 2021).

I sistemi ecologici sono caratterizzati da una struttura gerarchica in cui l'insieme degli ecosistemi forma un paesaggio e, un ecosistema è formato da componenti biologiche (piante e animali) e abiotiche (suolo, acqua ecc.) e dalle interazioni fra queste. Quindi, la struttura ecosistemica è caratterizzata da componenti fondamentali che per Odum e Barrett (2005) sono comunità, flussi di energia e cicli della materia, mentre in una revisione più recente e funzionale, Jørgensen (2012) evidenzia i concetti di biomassa, interazioni e informazioni. La Notte et al. (2017) enfatizzano gli aspetti legati alla complessità dei sistemi sottolineando come un servizio ecosistemico (SE) sia un processo determinato dai rapporti gerarchici verticali e orizzontali in cui ogni livello è vincolato/condizionato dai livelli superiore ed inferiore (ecosistema/paesaggio) e dai rapporti orizzontali (tra ecosistemi o componenti) recuperando anche qui i concetti propri dell'Ecologia del Paesaggio (Forman e Godron 1986). Di fatto le interazioni verticali e orizzontali costituiscono la proprietà emergente (Odum e Barrett, 2005) del sistema che ne caratterizza la funzione e che può diventare servizio.

La funzione dell'ecosistema si riferisce ai processi relativi ai flussi di risorse come energia e acqua, fotosintesi e decomposizione, che costituiscono le interazioni tra le componenti dell'ecosistema (Agren & Andersson, 2011). Keith et al. (2020) distinguono cinque gruppi di processi che governano il funzionamento dell'ecosistema alle diverse scale di riferimento e che l'IN e la RE devono

considerare per mantenere e/o recuperare la funzionalità persa e la resilienza del sistema affinché le nostre azioni possano sviluppare un valore ecosistemico più completo.

- 1) **Risorse** (energia, nutrienti, acqua, carbonio, ossigeno, ecc.). Uno o più di questi fattori saranno spesso limitati, inducendo una risposta funzionale dell'ecosistema come la competizione;
- 2) **Condizioni ambientali** (temperatura, salinità, geomorfologia ecc.). Questi fattori regolano la disponibilità e l'accesso alle risorse, nonché i processi ecologici (la temperatura controlla la cinetica di reazione biochimica, la geomorfologia controlla le condizioni di umidità del suolo, ecc.);
- 3) **Regimi di disturbo** (incendi, inondazioni, frane ecc.). Questi fattori distruggono episodicamente le strutture ecosistemiche esistenti e/o trasformano gli ecosistemi generando nuove opportunità (risorse e nicchie);
- 4) **Interazioni biotiche** (competizione, predazione, ecc.). Questi sono in gran parte processi endogeni che modellano la struttura e la funzione dell'ecosistema, ma includono organismi che agiscono come collegamenti tra diversi ecosistemi e regolano i trasferimenti di materia ed energia tra di loro;
- 5) **Attività umana**. I processi antropogenici sono un tipo speciale di interazione biotica che influenza la struttura e la funzione degli ecosistemi sia direttamente (ad es. il cambiamento della copertura del suolo, attività venatoria) o indirettamente (ad es. raccolta di biomassa e altre forme di utilizzo delle risorse, il cambiamento climatico).

### ***6.1.3 Funzioni ecologiche e servizi ecosistemici***

L'insieme di questi processi e condizioni danno origine a una varietà di ecosistemi con proprie caratteristiche, come produttività, diversità, struttura trofica, forme di vita e loro fenologia che sarebbe opportuno tenere in considerazione nelle azioni di *RE* attraverso l'I.N. L'insieme dei processi e le caratteristiche dell'ecosistema influenzano entrambi gli *stock* di risorse e i flussi di servizi modellando la struttura e la funzione dell'ecosistema stesso. Quindi i processi che determinano l'identità di un ecosistema determinano anche la loro integrità. Di conseguenza, il beneficio è una componente singola, valutabile con una unità di misura ed è il veicolo per godere del servizio (*Matthies et al. 2016*), mentre il servizio è il risultato di un articolato processo a cascata (*La Notte et al., 2016*), complesso, che parte dalle componenti fondamentali che formano la struttura biofisica dell'ecosistema, di cui la biodiversità è il motore fondamentale e di cui le azioni di *restoration* devono tenere conto perché si possa mantenere il valore funzionale del sistema recuperato.

Il funzionamento del sistema “Capitale Naturale”, quindi, è garantito dalle “unità di lavoro” (gli ecosistemi) che ne sono l’architettura fondamentale e funzionale di cui i SE di regolazione e di supporto sono l’espressione vitale; la naturale e costante azione dei SE di regolazione e supporto favorisce l’erogazione degli altri SE di approvvigionamento e culturali (*Elmqvist et al., 2011*) in relazione alla domanda.

Il funzionamento degli ecosistemi è quindi garantito dalle funzioni di regolazione e sul territorio queste funzioni/SE assumono una maggiore importanza nella valutazione ecologica ed economica dei SE poiché anche a scala locale, garantiscono il funzionamento dell’ecosistema (flusso di energia, di informazioni e materia) e come tali possono essere usati per stimare le soglie di criticità d’uso rispetto agli altri SE (*Comitato Capitale Naturale, 2019*).

Di conseguenza, in un processo di Pianificazione, di VAS o di sviluppo di Pagamento di Servizi Ecosistemici ed Ambientali (L. 221/2015, PSEA Art. 70), la valutazione biofisica dei SE di supporto e regolazione (fissazione di CO<sub>2</sub>, trattenimento del suolo, di acqua, ecc.) diventa necessaria per determinare la qualità dell’intervento di recupero e la sua efficacia a salvaguardia nel tempo della funzione collettiva del bene, cioè l’utilità sociale e il benessere derivante, nonché per mantenere intatte o incrementare le sue funzioni (commi a e b art. 70) rispetto agli usi diretti delle risorse.

Inoltre, queste funzioni possono produrre un effetto integrato e interdependente che spesso dipende dagli stessi fattori ambientali che le determinano e le guidano. In un ecosistema forestale, ad esempio le funzioni ecologiche del ciclo dell’acqua (depurazione, riduzione tempi di corruzione, stoccaggio, laminazione) sono fortemente in relazione alle funzioni del ciclo dei sedimenti (es. trattenimento del suolo) sviluppando SE di regolazione di tipo integrato (es. WES *Water Ecosystem Services*). Questi processi che hanno una dimensione territoriale spiccata e definita si prestano ad un bilancio ecologico-economico più completo ed efficace se sviluppate all’interno di una unità territoriale (Unità Ecologico Funzionale = bacino idrografico o sottobacino) (*Santolini e Morri 2017*) in cui le aree protette possono essere l’elemento *core* del sistema a salvaguardia delle funzioni collettive del Capitale Naturale nel tempo.

Queste considerazioni impongono nei processi progettuali una valutazione di funzionalità almeno qualitativa per capire quanto siano alterate le funzioni ecologiche rispetto all’azione di recupero da attuare e quanto possa essere efficace l’intervento in attuazione, non solo per rispondere al tema del consolidamento ma anche per capire quanto sia efficace rispetto ai processi descritti in precedenza ed ai SE che quell’ecosistema può generare.

#### 6.1.4 Il valore e la valutazione

La poca consapevolezza del valore intrinseco della natura, cioè l'importanza delle sue funzioni di interesse collettivo, ha influito in modo devastante sulla gestione ignorante degli ecosistemi naturali, rurali e urbani. Le logiche economiche hanno indirizzato molte scelte di pianificazione territoriale e di interventi che hanno messo in secondo piano gli effetti complessivi dell'azione, tralasciandone l'importanza come effetto sinergico delle funzioni ecologiche che l'intervento può attivare.

Il concetto di valore di un bene è cambiato anche nei termini economici, dove le teorie dell'economia neoclassica hanno messo in luce la questione dell'utilità legata al bene. Infatti, molte metodologie della valutazione economica ambientale si basano sull'approccio utilitaristico, fondato sul fatto che le persone sfruttano i benefici (l'utilità) degli ecosistemi in modo diretto, secondo scelte individuali e di profitto diretto legato al mercato, senza considerare i benefici indiretti, di interesse collettivo. Legati alle relazioni con scale più vaste che l'azione può avere. Nasce anche da queste considerazioni il pensiero settoriale di risposta univoca dell'intervento e non la considerazione legata alla plurifunzionalità e all'efficacia complessiva dell'azione se mai alle diverse scale con cui inevitabilmente si interagisce.

Dall'ecologia del paesaggio sappiamo che la grana è la dimensione dell'unità di osservazione e quindi dell'intervento. Per esempio, una mappa con una grana fine può strutturare l'informazione all'interno di un'unità di 1 ha, mentre una mappa con una grana grossolana potrebbe strutturare l'informazione in unità grandi 10 ha (Turner et al., 1989). Parlando di funzionalità ecosistemica dobbiamo quindi distinguere funzioni proprie (e quindi SE) degli elementi che compongono l'unità di informazione (es la capacità di un individuo di una specie vegetale di stoccare CO<sub>2</sub>) e la capacità di un sistema di sviluppare una funzione che per sua natura si esplica in unità più grandi (fornitura di acqua, di habitat ecc.). Quindi, la struttura e la funzione del mosaico ambientale dipendono dal concetto ecologico di scala spaziale e dal tipo di funzione/SE che viene espressa sia dagli elementi dell'unità a scale a grana fine sia dal sistema caratterizzato da unità più grandi a scale grossolane.

Proviamo a fare un esempio rispetto alla capacità di fissare CO<sub>2</sub> da parte della vegetazione. Questo SE di regolazione si riferisce alla capacità delle diverse specie e degli ecosistemi vegetali di immagazzinare carbonio nei loro tessuti e nel suolo rimuovendo l'anidride carbonica dall'atmosfera e bloccandola efficacemente nei loro tessuti e nel suolo e trova corrispondenza nella classificazione del sistema CICES v. 5.1 che utilizza la seguente dicitura: *Regulation of chemical composition of atmosphere*.

Le diverse specie di alberi e gli arbusti influiscono sulla qualità dell'aria in 2 modi: direttamente attraverso l'effettiva rimozione del particolato e degli inquinanti gassosi attraverso le foglie per

assorbimento e adsorbimento e indirettamente semplicemente agendo come entità fisica (ostacolo) modificano la velocità del vento e la turbolenza influenzando quindi sulla concentrazione locale degli inquinanti atmosferici. Alcune piante funzionano meglio di altre nel rimuovere polveri e inquinanti dall'aria ed alcune specie assorbono più di altre sviluppando un *Potenziale Specie-Specifico*. Quindi in un intervento puntuale di RE/IN potremmo valutare quale può essere il contributo dell'azione progettuale rispetto ad una dimensione di domanda che dovremmo conoscere e che ci permetterebbe di valutare l'incidenza dell'intervento in relazione alle specie utilizzate e alla composizione posta in atto.

Diverso è il discorso rispetto ad una scala più grande in cui si deve sviluppare un'azione di recupero in cui ad esempio, va realizzata una copertura forestale. Sappiamo dalla bibliografia esistente (*Federici et al., 2008; PEFC, 2021*) che le diverse coperture possono generare in funzione anche della gestione, un incremento nell'assorbimento di CO<sub>2</sub> che oscilla in media da 5,3 tonnellate di CO<sub>2</sub>/ha/anno per i cedui a 6,1 tonnellate di CO<sub>2</sub>/ha/anno per le fustaie di latifoglie, se si considerano entrambi i pool biomassa e suolo. Tuttavia, ai fini della garanzia di un approccio conservativo, solo la metà dei crediti generabili annualmente potrà essere utilizzata, con una quota di incremento nell'assorbimento di CO<sub>2</sub> che oscilla da 2,7 per i cedui a 3,05 tonnellate di CO<sub>2</sub>/ha/anno per le fustaie se si considerano entrambi i pool biomassa epigea e suolo (*PEFC, 2021*).

L'analisi di un solo SE rende il senso della funzione ecologica a livello di scala dal punto di vista ecologico considerando la prospettiva dell'intervento puntuale e di quello che interessa un ambito più esteso, cioè da una valutazione centrata sull'elemento (quando possibile) in cui la grana diventa il più piccolo componente dell'ambiente che può sviluppare quel tipo di funzione/SE, fino a considerare il sistema, la patch, che sviluppa nel suo complesso la funzione/SE come media relativa di funzione rispetto all'insieme di elementi che caratterizzano l'ecosistema considerato.

L'approccio è più complesso se la valutazione riguarda più SE che è necessario indagare per un intervento di RE e/o I.N. e nell'ottica della gerarchia tra SE la cui propedeuticità vuole esaminate le funzioni ecologiche per la stabilità degli ecosistemi e di interesse collettivo.

In Santolini et al (2022) è stato messo a punto un approccio metodologico articolato in step successivi che permette di individuare il gradiente di funzionalità ecologica attraverso l'analisi dei Servizi Ecosistemici (SE), di un ecosistema e/o di un ambito territoriale sufficientemente ampio.

Il passo successivo è valutare le condizioni dell'ecosistema rispetto all'intervento, definite come la qualità fisica, chimica e biologica di un ecosistema la cui condizione di funzionalità è una parte vitale della valutazione, perché determina la capacità di fornire servizi (*Maes et al., 2012; EEA, 2015*) da parte del sistema prima e dopo l'intervento. È necessario sviluppare una la matrice di funzionalità in

## I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica

cui vengono identificati tutti i fattori che concorrono a modificare la funzionalità potenziale dei diversi SE che si mettono in relazione.

I fattori aggiuntivi (di modulazione) potranno essere ricavati da dati bibliografici, cartografie esistenti oppure da elaborazioni cartografiche. Ad esempio, la mappa di pendenza derivata da modelli digitali di terreno, oppure una fascia laterale (buffer) applicata a lato del bordo stradale, o una serie di fasce di distanza da elementi lineari (es. rete sentieristica) o poligonali (parchi pubblici, centri abitati) (Tab. 6.1).

Tab. 6.1 I Fattori di Modulazione Servizi Ecosistemici.

| Fattori di Modulazione<br>Servizio Ecosistemico | Copertura forestale | Pendenza | Incremento corrente di<br>biomassa forestale | Influenza delle Strade | Stock carbonio organico nel<br>suolo 0- 300 cm | Capacità disco (LCC) | Coef. evap. (EC) | Infiltraz. Profonda di acqua<br>(W/AF) (plumma) | Acquiferi in ammasso<br>roccioso (collina montagna) | Capacità depurativa (BUF)<br>(plumma) | Erosione attuale (RUSLE) | Densità specie floricole | Miopia alla riproduzione | Distanza dai centri urbani | Distanza dalla rete stradale | Distanza dalla sentieristica e<br>dalle ciclobike | Distanza dalle aree protette | Relazione con aree protette | Naturalità Vegetazione (IN) | Rarità (Habitat) |  |
|---|---------------------|----------|--|------------------------|--|----------------------|------------------|---|---|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------|--|
|   | %                   | classe   | m <sup>3</sup> /ha                           | m                      | Mg/ha  | classe               | indice           | indice  | perm.   | indice                                | Mg/ha/y                  | indice                   | indice                   | m                          | m                            | m   | cop %                        | indice                      | cop %                       |                  |  |
| Regolazione della CO2                           | •                   |          |  |                        | •  |                      |                  |   |   |                                       |                          |                          |                          |                            |                              |   |                              |                             |                             |                  |  |
| Produzione Agricola                             |                     | •        |  | •                      |  | •                    |                  |   |   |                                       |                          |                          |                          |                            |                              |   |                              |                             |                             |                  |  |
| Produzione forestale                            |                     | •        | •  |                        |  |                      |                  |   |   |                                       |                          |                          |                          |                            |                              |   |                              |                             |                             |                  |  |
| Regolazione del Regime Idrologico               | •                   | •        |  |                        |  |                      | •                | •   | •   |                                       |                          |                          |                          |                            |                              |   |                              |                             |                             |                  |  |
| Purificazione dell'acqua                        | •                   | •        |  | •                      |  |                      |                  |   |   | •                                     |                          |                          |                          |                            |                              |   |                              |                             |                             |                  |  |
| Protezione dagli eventi estremi                 | •                   | •        |  |                        |  |                      |                  |   |   |                                       |                          |                          |                          |                            |                              |   |                              |                             |                             |                  |  |
| Controllo dell'erosione                         |                     |          |  |                        |  |                      |                  |   |   |                                       | •                        |                          |                          |                            |                              |   |                              |                             |                             |                  |  |
| Regolazione del microclima                      |                     |          |  | •                      |  |                      |                  |   |   |                                       |                          |                          |                          |                            |                              |   |                              |                             |                             |                  |  |
| Impollinazione                                  |                     |          |  | •                      |  |                      |                  |   |   |                                       |                          | •                        | •                        |                            |                              |   |                              |                             |                             |                  |  |
| Servizio ricreativo                             |                     |          |  |                        |  |                      |                  |   |   |                                       |                          |                          |                          | •                          | •                            | •   | •                            |                             |                             |                  |  |
| Idoneità dell'Habitat                           |                     |          |  | •                      |  |                      |                  |   |   |                                       |                          |                          |                          |                            |                              |   |                              | •                           | •                           | •                |  |

Si tratta in generale di ri-classificare in modo opportuno mappe già disponibili, definendo dei livelli (ad es. per la pendenza tre livelli: alta, media e bassa pendenza) in funzione del SE valutato. Ciascun fattore viene rappresentato da una o più colonne nella matrice di valutazione (Santolini et al. 2022).

La metodologia utilizzata offre le basi quali-quantitative per poter determinare gli opportuni approfondimenti utili a valutare anche i valori economici dei diversi SE. In questo modo si integrano tutte le diverse informazioni esistenti per raggiungere una stima della potenzialità di erogazione del SE più accurata possibile utilizzando anche valutazioni quantitative di alcune funzioni che possono indirizzare le valutazioni.

Nell'esempio riportato in

Figura 6.2, è stato sviluppato un modello di valutazione della funzionalità ecologica della trasformazione di uso del suolo in relazione al recupero di una cava di inerti indicata con il cerchio rosso.

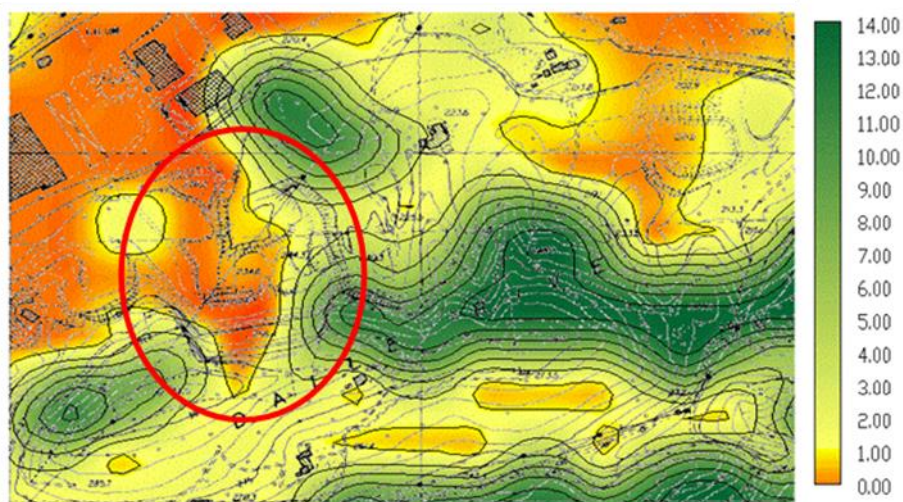


Figura 6.2 Valutazione geostatistica della funzionalità ecologica relativa ad un versante in cui è necessario recuperare una cava di inerti. Sulla destra la scala di funzionalità relativa con valori cumulati tra 0 e 14. Nel cerchio è localizzata l'area di recupero (Val Cavasia, TV).

In relazione alle tipologie d'uso del suolo, sono stati distribuiti dei valori di funzionalità ecologica per ogni tipologia che esprimeva una serie di SE di quelli indicati in Tab. 6.1 e per cui i fattori di modulazione ne accentuavano in genere la negatività del valore relativo attribuito che variava da 0 a 5 (Maes et al., 2012; EEA, 2015). Sulla base degli interventi ipotizzati di *restoration ecology* caratterizzati da interventi di IN si è costruito un nuovo modello che illustra la risposta dell'intervento rispetto ai SE potenzialmente offerti dalle diverse tipologie d'uso del suolo e dalle azioni di recupero ambientale.

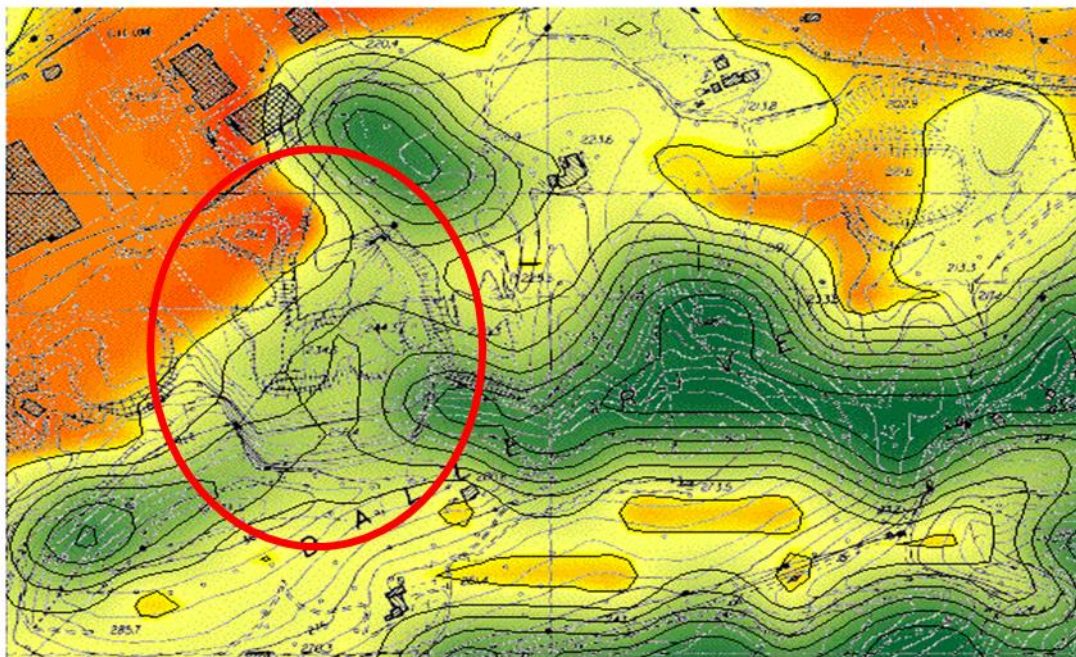
Le caratteristiche della cava, la modalità di estrazione in parte propensa al recupero e le azioni di IN naturalistica ha permesso di progettare interventi di rinaturalizzazione del sito, attraverso la ricostituzione di ambienti naturali in grado di ospitare la massima variabilità di organismi vegetali e animali. In particolare:

- messa a dimora di specie arboreo arbustive
- interventi di idrosemina;
- mimetizzazione delle pareti rocciose, mediante applicazione di ossidanti naturali e/o biostuoie vegetali ricoprenti.

Questi interventi permettono di sviluppare una potenzialità di funzionalità ecosistemica importante, in cui da, valori quasi nulli di fornitura di SE relativi alla regolazione del ciclo idrologico legati alle superfici nude in parte gradonate, si è passati a sviluppare valori più importanti effetto degli interventi progettati di IN.



La Figura 6.3 mostra l'effetto dell'intervento di *restoration ecology* in cui si osserva in modo evidente come le azioni di riqualificazione abbiano la possibilità di dare continuità e connettività al versante che quindi mantiene la sua resistenza e resilienza ambientale rispetto agli effetti perturbativi dell'area urbanizzata posta a ridosso del versante stesso. Inoltre, si mantiene una significativa caratterizzazione e valore di tutto il sistema collinare comprese le aree agricole e i prati pascoli sommitali.



*Figura 6.3 Effetto degli interventi progettati di IN sul modello geostatistico di funzionalità ecologica. Nel cerchio è localizzata l'area di recupero (Val Cavasia, TV).*

### **6.1.5 Considerazioni conclusive**

Il ripristino degli ecosistemi è fondamentale all'interno degli obiettivi di sviluppo sostenibile dell'Agenda 2030: dimezzamento delle emissioni di gas serra, lotta alla povertà, salvaguardia della biodiversità (per evitare la potenziale estinzione di un milione di specie animali e vegetali), per citarne alcuni. Fattori e pressioni, come l'intensificazione dell'agricoltura, l'inquinamento dell'acqua o il cambiamento climatico, possono tutti ridurre le condizioni dell'ecosistema e compromettere la fornitura di servizi ecosistemici (EEA, 2015). Secondo le Nazioni Unite, recuperare 350 milioni di ettari di ecosistemi terrestri e marini degradati, da qui al 2030, consentirebbe di generare un valore di 9.000 miliardi di dollari attraverso nuovi servizi, nonché di eliminare dall'atmosfera una quantità di gas serra compresa fra 13 e 26 miliardi di tonnellate.

Certo, questo lavoro ha un costo, ma i benefici economici ottenibili sono nove volte più grandi dell'investimento. Al contrario, non fare nulla causerebbe danni economici tre volte più grandi, senza contare i danni ambientali e altre conseguenze non quantificabili e gravi, come la riduzione della speranza di vita per chi abita in luoghi inquinati o contaminati.

Vincere questa sfida può significare “contribuire a metter fine alla povertà, a combattere il cambiamento climatico e a prevenire l’estinzione di massa”, si legge sul sito del “Decennio delle Nazioni Unite per il Ripristino dell’Ecosistema” iniziato nel 2021. “Avremo successo solo se ciascuno farà la sua parte”.

**Bibliografia Par. 6.1**

Agren G. I. and Andersson F. O., (2012). *Terrestrial Ecosystem Ecology Principles and Applications* ISBN 978-1-107-64825-8 Cambridge University Press, New York,

Bradshaw, A. D. (1984). *Ecological principles and land reclamation practice. Landscape Planning*, 11, 35–48.

Bradshaw, A. D. (2002). *Introduction and philosophy. In M. R. Perrow, & A. J. Davy (Eds.), Handbook of ecological restoration, Vol. 1 (pp. 1–9). Cambridge: Cambridge University Press.*

Clewell A., Rieger, J., Munro, J. (2005). *Guidelines for developing and managing ecological restoration projects*, 2nd edition. www.ser.org and Tucson: Society for Ecological Restoration International.

Comitato Capitale Naturale (2021). *Quarto Rapporto sullo Stato del Capitale Naturale in Italia*. Roma

EEA, 2015, *The European environment — state and outlook 2015: synthesis report*, European Environment Agency, Copenhagen.

Federici S, Vitullo M, Tulipano S, De Lauretis R, Seufert G, 2008. *An approach to estimate carbon stocks change in forest carbon pools under the UNFCCC: the Italian case. iForest 1: 86-95 [online: 2008-05-19]*

Young, T. P. (2000). *Restoration ecology and conservation biology. Biological Conservation*, 92, 73–83.

Forman R.T.T. e Godron M., 1986. *Landscape Ecology*. Wiley, New York.

Hobbs, R. J., & Norton, D. A. (1996). *Towards a conceptual framework for restoration ecology. Restoration Ecology*, 4, 93–110. Hooper, D. U., Chapin, F. S., III,

Keddy, P. A. (1992). *Assembly and response rules: two goals for predictive community ecology. Journal of Vegetation Science*, 3(2), 157–164. <https://doi.org/10.2307/3235676>

Keith, D. A., Ferrer-Paris, J. R., Nicholson, E., & Kingsford, R. (2020). IUCN Global Ecosystem Typology 2.0: descriptive profiles for biomes and ecosystem functional groups (D. A. Keith, J. R. Ferrer-Paris, E. Nicholson, & R. T. Kingsford (Eds.)). IUCN, International Union for Conservation of Nature. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.13.en>

Jørgensen, S., 2012. Introduction to Systems Ecology. CRC Press.

La Notte A., D'Amato D., Mäkinen H., Paracchinia M. L., Liquetea C., Egohd B., Geneletti D. Crossman N. D., 2017b. Ecosystem services classification: A systems ecology perspective of the cascade framework. *Ecological Indicators* 74: 392–402

Maes, J., Egoh, B., Willemen, L., Lique, C., Vihervaara, P., Schägner, J. P., Grizzetti, B., Drakou, E. G., Notte, A. L., Zulian, G., Bouraoui, F., Luisa Paracchini, M., Braat, L. & Bidoglio, G., 2012. Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union Ecosystem Services, vol 1, pp. 31-39

Matthies, B., D'Amato, D., Berghäll, S., Ekholm, T., Hoen, H., Holopainen, J, Korhonen, J., Lähtinen, J., Mattila, O., Toppinen, A., Valsta, L., Wang, L. Yousefpour, R., 2016. An Ecosystem Service-Dominant Logic? Integrating theecosystem service approach and the service-dominant logic. *J. Clean. Prod.* 124, pp. 51–64.

Odum E. P. e Barrett G. W., 2005. Fundamentals of ecology. Brooks/Cole, Thomson Learning, Inc. pp 594

PEFC, 2021. Standard di certificazione dei Servizi Ecosistemici generati da boschi e piantagioni gestiti in maniera sostenibile. PEFC Italia, Perugia

Lockwood, J. L., & Samuels, C. L. (2004). Assembly models and the practice of restoration. In V. M. Temperton, R. J. Hobbs, T. Nuttle, & S. Halle (Eds.), *Assembly rules and restoration ecology* (pp. 34–54). Washington: Island Press.

Santolini, R., & Morri, E., 2017. Criteri ecologici per l'introduzione di sistemi di valutazione e remunerazione dei Servizi Ecosistemici (SE) nella progettazione e pianificazione. In: Arcidiacono, A., Di Simine, D., Oliva, F., Ronchi, S., Salata, S., (a cura di), *La dimensione europea del consumo di suolo e le politiche nazionali*, CRCS Rapporto 2017, INU Edizioni, Roma, pp: 149-154.

Santolini R., Morri E. e Pasini G. (2022). Linee Guida per un approccio ecosistemico alla pianificazione. Mappatura e Valutazione dei Servizi Ecosistemici. Regione Emilia Romagna, pp 65

Turner M. G. (1989). Landscape Ecology: The Effect of Pattern on Process. *Annual Review of Ecology and Systematics* , 1989, Vol. 20 (1989), pp. 171-197

United Nations et al. (2021). System of Environmental-Economic Accounting—Ecosystem Accounting (SEEA EA). White cover publication, pre-edited text subject to official editing. Available at: <https://seea.un.org/ecosystem-accounting>.

Zedler, J. B., & Callaway, J. C. (1999). Tracking wetland restoration: Do mitigation sites follow desired trajectories? *Restoration Ecology*, 7, 69–73.

## 6.2 STOCCAGGIO DELLA CO<sub>2</sub> (M. Togni)

Uno dei punti di forza della I.N. è la capacità delle opere di svolgere una funzione di stoccaggio della CO<sub>2</sub>. Questa funzione viene assolta in due modalità differenti e integrate tra loro:

- dal legname utilizzato nelle opere: è di per sé un materiale biogenico<sup>14</sup> che si inserisce nel ciclo del carbonio e svolge la funzione di *carbon pool*, grazie al sequestro della CO<sub>2</sub> effettuato dagli alberi nella loro crescita per la formazione del legno;
- dal materiale vegetale: qualora il materiale vivo impiantato sia costituito da specie legnose (ad es. salici, ontani, tamerici, pioppi, ecc.), con la crescita delle nuove piante arboree si avrà un nuovo fissaggio di carbonio nel legno attraverso la fotosintesi clorofilliana, che sottrarrà l'anidride carbonica dall'atmosfera (semplificando il processo biochimico, in realtà ben più complesso). Questo importante ruolo è svolto anche dalle specie erbacee che, tuttavia, non hanno tessuti che consentano di mantenere questo sequestro di CO<sub>2</sub> per tempi lunghi, dato che i tessuti verdi sono destinati a degradarsi rapidamente e rimettere in circolo l'anidride carbonica.

Per costruzione, la durata delle opere di IN è limitata nel tempo e il legname utilizzato è destinato a essere degradato a causa principalmente degli agenti della carie. Il processo degradativo porta alla demolizione del legno e alla restituzione della CO<sub>2</sub> all'atmosfera, producendo un bilancio in termini di ciclo del carbonio sostanzialmente neutro<sup>15</sup> in riferimento al *global warming* (IPCC 2022), ovvero tanta CO<sub>2</sub> era stata sequestrata nei fusti legnosi, quanta ne viene resa al termine del completo degradamento del legno. Nello stesso tempo la crescita dei fusti legnosi delle piante verdi procederà gradualmente al nuovo sequestro dell'anidride carbonica per sintetizzare i polimeri che costituiscono il legno (cellulose e lignine). È abbastanza chiaro che i due processi si contrappongono in relazione agli equilibri della CO<sub>2</sub>, e che, se opportunamente bilanciati in termini quantitativi (numero di alberi di nuovo impianto) e qualitativi (scelta delle specie legnose e delle velocità di accrescimento), possono portare a una sostanziale parità nel bilancio del carbonio nel tempo, ovvero tanta massa legnosa viene degradata dalle alterazioni del legno quanta nuova massa legnosa viene prodotta dagli alberi. Se tale equilibramento dei bilanci in termini di CO<sub>2</sub> viene opportunamente progettato, si può avere una sostanziale conservazione della quantità di carbonio presente nell'opera di IN al momento della sua realizzazione e quindi uno stoccaggio di lungo termine della CO<sub>2</sub>. A tal proposito è bene

---

<sup>14</sup> Proveniente da materie prime capaci di autorigenerarsi con naturale capacità di stoccare l'anidride carbonica all'interno della biomassa.

<sup>15</sup> Nella trattazione riportata non vengono conteggiati gli impatti e le emissioni delle lavorazioni per la realizzazione dell'opera né dei materiali utilizzati non di origine biogenica.

rammentare che si ritiene definitivamente rimossa la CO<sub>2</sub> dall'atmosfera quando lo stoccaggio supera i 100 anni.

La determinazione della CO<sub>2</sub> sequestrata negli elementi lignei può essere effettuata utilizzando la norma europea EN 16449 (2014), che stabilisce le modalità di calcolo per passare dai volumi di legno di un manufatto, al corrispondente quantitativo di CO<sub>2</sub>e (e=equivalente) sequestrato nell'opera. La formula da utilizzare per tale determinazione è la seguente

$$M_{CO_2e} = \frac{\rho_u \cdot V_u}{1 + u/100} \cdot cf \cdot \frac{44}{12}$$

dove

$M_{CO_2e}$  è la massa della CO<sub>2</sub> equivalente espressa in kg

$\rho_u$  è la densità della specie legnosa espressa in kg/m<sup>3</sup>

$V_u$  è il volume del legname utilizzato espresso in m<sup>3</sup>

$u$  è l'umidità del legno

$cf$  è la frazione del carbonio contenuto nel legno, pari a 0,5 (50%)

$44/12$  è il rapporto tra le masse dell'anidride carbonica CO<sub>2</sub> e del carbonio C.

L'applicazione della formula non è troppo agevole nel caso del legname per I.N., tipicamente molto umido (umidità > 30%), poiché è assai difficile conoscere l'umidità effettiva del legno al momento della messa in opera ed è ugualmente difficile disporre dei dati di densità allo stato fresco, riportati su manuali ma con valori di bibliografia ampiamente variabili. Tuttavia, le conoscenze di base della tecnologia del legno consentono di applicare gli opportuni coefficienti correttivi al fine di stimare i volumi di legno utilizzati alle condizioni di umidità normale alle quali poter applicare i dati di densità di letteratura, disponibili tipicamente in questa forma.

La peculiarità delle opere di I.N., che di fatto sono interventi indispensabili al fine ad esempio della stabilizzazione dei versanti, è tale che il progetto di realizzazione con l'impiego di legname allo stato grezzo (legno tondo), quindi con lavorazioni del legno quasi nulle, a cui si aggiunge l'impianto di un certo quantitativo di alberi adatti, si potrebbe prestare alla rimozione effettiva di importanti quantitativi di CO<sub>2</sub> tali da poter essere quantificati ai fini della *carbon sequestration* e come tali monetizzati attraverso i *network* di certificazione dei crediti di carbonio. Il condizionale per le opere di IN è però d'obbligo poiché è indispensabile che il progetto venga realizzato con l'obiettivo anche di quantificare i bilanci nel tempo della CO<sub>2</sub> sequestrata, considerando contemporaneamente sia le perdite di massa dovute al legno destinato a degradarsi progressivamente nel corso di 20 - 30 anni e a perdere massa, sia allo sviluppo delle piante arboree messe a dimora che aumentano progressivamente le proprie dimensioni, la propria capacità di fissare CO<sub>2</sub> atmosferica e quindi la

propria massa. Una corretta pianificazione del progetto dell'opera che portasse a un bilancio della CO<sub>2</sub> e da essa bloccata in modo permanente per un tempo pari o superiore a 100 anni potrebbe avere tutti gli elementi per entrare nei processi di calcolo e di mercato del ciclo di vita dei crediti di carbonio certificati.

Le procedure odierne per la valorizzazione del sequestro del carbonio sono piuttosto complesse, necessitano di metodologie di quantificazione studiate, consolidate, verificate e approvate, che possano condurre alla redazione di standard di riferimento condivisi a livello internazionale. Attraverso gli enti di certificazione accreditati e gli organismi di controllo, mediante l'applicazione di tali standard, si può giungere al riconoscimento della funzione carbon sink. Tuttavia, ad oggi non esistono metodologie riconosciute, applicabili alle opere di I.N. Benché ci siano tutti i presupposti, comprese delle significative potenzialità per queste opere, il percorso per la loro valorizzazione sarà ancora lungo e dovrà passare attraverso ricerche e lo studio di apposite metodologie, nonché essere caldeggiato e promosso dagli operatori del settore, diretti interessati a ottenere questo genere di certificazione.

### ***Bibliografia Par. 6.2***

IPCC - The Intergovernmental Panel on Climate Change <https://www.ipcc.ch/> (consultato il 24/02/2022).

UNI EN 16449:2014 - Legno e prodotti a base di legno - Calcolo del contenuto di carbonio di origine non fossile del legno e conversione in anidride carbonica

### 6.3 LIFE CYCLE ASSESSMENT DELLE OPERE A VERDE (M. Cellura, S.R. La Mantia)

#### 6.3.1 Introduzione

In accordo con l'intento di limitare sia le emissioni di gas climalteranti sia il degrado ambientale, è stato presentato dall'Europa il "New Green Deal" Europeo, che contiene una serie di proposte per ridurre le emissioni climalteranti di almeno il 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990 (*European Commission, 2019*).

In particolare, per le opere improntate alla salvaguardia dell'ambiente e alla riduzione del consumo di materiali provenienti da risorse non rinnovabili, si ritiene prioritario l'impiego di biomateriali.

Molte normative dell'Unione Europea mirano all'introduzione di soluzioni ingegneristiche basate sulle soluzioni naturalistiche, come ad esempio le tecniche di bioingegneria del suolo e dell'acqua (*European Commission, 2015*).

A scala internazionale l'Organizzazione delle Nazioni Unite ha definito gli obiettivi di sviluppo sostenibile, molti dei quali hanno una forte connessione con la gestione del territorio e dell'acqua e richiedono l'uso efficiente delle risorse, il ripristino degli ecosistemi, della biodiversità, la cattura del carbonio e la gestione sostenibile dei bacini idrografici (*United Nations, 2015*).

In questo contesto si inseriscono le opere di Ingegneria Naturalistica che si basano sull'uso della componente vegetale viva - in abbinamento in taluni casi con materiali inerti come pietrame, terra, nonché fibre vegetali e sintetiche - nella struttura ingegneristica, nel tentativo di coniugare non solo la funzione tecnica, ma anche ecologica e paesaggistica.

L'origine di tale disciplina ha radici storiche, ma il progresso e le più recenti applicazioni mostrano come l'Ingegneria Naturalistica sia diventata negli anni un compromesso e una cooperazione per costruire infrastrutture di protezione e allo stesso tempo promuovere lo sviluppo naturale (*Europäische Föderation für Ingenieurbiologie et al., 2015*). Lo sviluppo di tali soluzioni risponde alla necessità di eseguire contemporaneamente la messa in sicurezza delle zone a rischio idrogeologico con la salvaguardia dell'ambiente, minimizzando gli impatti ambientali connessi alle opere di difesa del suolo.

Una metodologia largamente impiegata per stimare l'impatto ambientale connesso alla generazione di manufatti con riguardo all'intero ciclo di vita degli stessi è la "Life Cycle Assessment" (LCA).

L'applicazione della metodologia LCA al settore dell'Ingegneria Naturalistica può rappresentare pertanto uno strumento utile per valutare, attraverso un approccio scientificamente affidabile, gli impatti connessi al ciclo di vita di prodotti e tecnologie tipiche dell'Ingegneria Naturalistica.



### 6.3.2 La metodologia LCA

La *Life Cycle Assessment* (LCA) è una compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo di vita dei flussi in entrata e in uscita, nonché dei potenziali impatti ambientali, di un sistema di prodotto.

La metodologia è regolamentata dalla Norma UNI EN ISO 14040 (UNI EN ISO, 2021a), che ne definisce i principi e il quadro di riferimento, e dalla Norma UNI EN ISO 14044 (UNI EN ISO, 2021b) che è finalizzata a supportare la conduzione degli studi di LCA. Altri riferimenti sono rappresentati dalla *Product Environmental Footprint Guide* (European Commission, 2012) e dall'*ILCD Handbook* (European Commission et al., 2010) che costituiscono delle guide generali per lo svolgimento degli studi di LCA.

La LCA rappresenta uno dei pilastri di politiche ambientali Europee che hanno come obiettivo l'uso sostenibile delle risorse, la produzione e il consumo sostenibili, l'etichettatura ambientale, la progettazione eco-compatibile, l'eco-innovazione, la prevenzione dei rifiuti e il loro riciclo, giusto per citare le più rilevanti.

Uno studio di LCA è tipicamente suddiviso in quattro fasi, riportate nello schema in Figura 6.4 :

- definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione;
- analisi di inventario;
- valutazione dell'impatto;
- interpretazione.

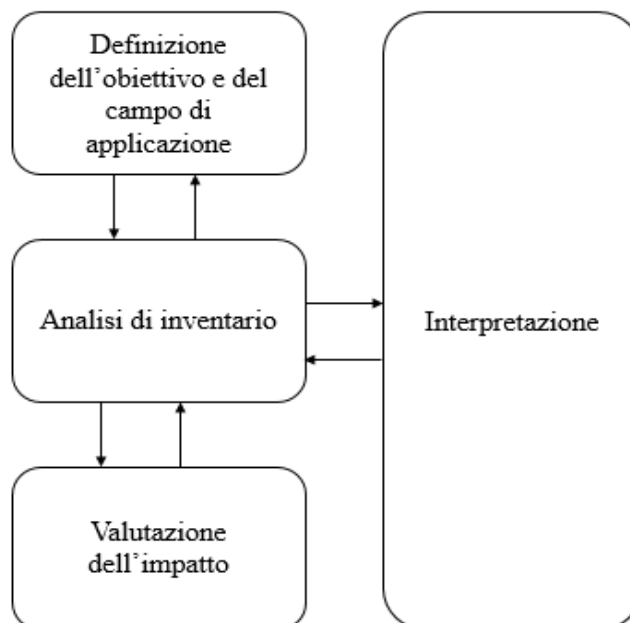


Figura 6.4 Fasi di uno studio LCA.

La definizione degli obiettivi e del campo di applicazione rappresenta la fase preliminare dello studio in cui vengono esplicitate le finalità, l'unità funzionale ed i confini del sistema. L'unità funzionale è la quantificazione della performance del sistema di prodotto e costituisce l'unità di riferimento dell'analisi e dei risultati. L'interfaccia tra la modellizzazione del ciclo di vita del prodotto (sistema di prodotto) e l'ambiente è costituita dai confini del sistema, che definiscono quali unità di processo devono essere contemplate nel sistema. Tipicamente, sono comprese molteplici fasi consecutive del ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime fino alla gestione dei rifiuti generati dal prodotto al termine della sua vita utile.

L'analisi dell'inventario di ciclo di vita (*Life Cycle Inventory - LCI*) è la seconda fase della LCA. Durante questa fase sono raccolti ed elaborati i dati necessari al conseguimento degli obiettivi dello studio e sono compresi i procedimenti di calcolo che consentono di quantificare i flussi in entrata e in uscita del sistema di prodotto con riferimento al suo ciclo di vita.

La terza fase di uno studio LCA è rappresentata dalla valutazione dell'impatto di ciclo di vita (*Life Cycle Impact Assessment - LCIA*). Questa fase ha lo scopo di valutare la portata e la significatività ambientale dei potenziali impatti connessi al sistema di prodotto, utilizzando i risultati ottenuti dall'analisi di inventario del ciclo di vita. In questo procedimento è indispensabile selezionare delle categorie di impatto a cui associare i risultati dell'analisi di inventario e calcolare i valori degli indicatori di ciascuna categoria di impatto (caratterizzazione).

Infine, la fase di interpretazione rappresenta lo step conclusivo di uno studio di LCA, durante la quale sono opportunamente analizzati i risultati ottenuti nelle precedenti fasi di LCI e LCIA allo scopo di verificare l'affidabilità dello studio e trarre raccomandazioni e conclusioni che possano essere utilizzate in modo coerente ai prefissati obiettivi dello studio.

La metodologia LCA consente di cambiare il modo in cui sono analizzati i sistemi e permette di avere una visione globale del prodotto lungo tutto il suo ciclo di vita includendo anche taluni impatti normalmente ignorati o trascurati, al fine di evitare lo spostamento dell'impatto da una fase all'altra del ciclo di vita o da una categoria di impatto ad un'altra.

### **6.3.3 *La LCA applicata alle opere a verde***

La valutazione del ciclo di vita applicata alle opere a verde consente di stimare gli impatti energetico-ambientali attribuibili al ciclo di vita di tali opere e di identificare i processi maggiormente responsabili degli impatti presi in esame, nonché valutare e confrontare i profili ambientali di diversi prodotti.

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

La presente analisi mira a realizzare un'indagine degli studi scientifici presenti nel database *Scopus*, relativa alla LCA delle opere a verde. Le parole chiave utilizzate per condurre lo studio sono state le seguenti: *Life cycle assessment, Green infrastructure, Nature based solution, Soil and water engineering, Low impact development*.

Dalle ricerche è emerso che la metodologia LCA riguardante le opere a verde trova ancora scarse applicazioni, come testimoniato dai pochi studi riscontrabili in letteratura.

Per valutare gli impatti ambientali connessi alla fase di costruzione di tre diverse tipologie di opere di bioingegneria del suolo in Von der Thannen et al. (2017) è stata utilizzata la metodologia LCA.

In particolare, sono state analizzate tre soluzioni tecniche di protezione arginale del fiume Liesing, a sud-ovest di Vienna (Austria):

- *Riprap* costituito da massi di roccia calcarea;
- Muro costituito da tronchi di legno e rocce;
- Muro costituito da rami di salice, in cui il piede dell'argine è sostenuto da tronchi di alberi.

L'analisi LCA è stata altresì applicata da von der Thannen et al. (2021) per valutare la soluzione tecnica ottimale, dal punto di vista ambientale, per risolvere il problema dell'erosione del fiume Thaya, situato a Bernhardsthal (Austria). Nel dettaglio, sono stati confrontati gli impatti ambientali connessi ad un'opera di bioingegneria idraulica e quelli connessi ad un'opera di ingegneria civile convenzionale. La costruzione di bioingegneria consiste in un muro costituito da rami di salice e tronchi di legno collocati tra i piloni di salice. Come opera alternativa convenzionale è stato considerato un *riprap* costituito da massi di roccia calcarea.

Tra le soluzioni ingegneristiche "*nature based*", rientra la progettazione di infrastrutture verdi costruite combinando piante viventi a materiali da costruzione.

Wang et al. (2020) hanno analizzato e confrontato le prestazioni ambientali e l'efficienza energetica di tre tipologie di infrastrutture verdi: un tetto verde semi intensivo, una strada verde, un boschetto.

Lo scenario del tetto verde è costituito da una membrana impermeabile, una barriera anti radice, uno strato di isolante, uno strato di drenaggio, una membrana filtrante, ed un substrato costituito per il 20% da materia organica e per l'80% da materia minerale. La strada verde è costituita da alberi di medie dimensioni che sono aggiunti lungo il bordo della strada. Le buche scavate per il posizionamento degli alberi sono riempite per il 75% da terreno, per il 15% da compost e per il 10% da sabbia. Il sistema prevede, inoltre, una barriera anti radice e un sotto drenaggio che scarica le acque nel sistema fognario. Rispetto al tetto verde e alla strada verde, il boschetto richiede solo due strati, ovvero materiali di riempimento e pacciamе.

Koura et al. (2020) hanno confrontato gli impatti ambientali di un tetto zavorrato tradizionale con ghiaia e di un tetto verde, installati sull'edificio del dipartimento di Ingegneria chimica dell'Università di Balamand (Libano). La stratigrafia del tetto tradizionale consiste, dal basso verso l'alto, in un telo impermeabile (mastice d'asfalto che preserva il tetto dalle infiltrazioni d'acqua), uno strato termoisolante, una membrana filtrante e uno strato di ghiaia. Invece, il tetto vegetativo è costituito da un telo impermeabile, uno strato di isolante termico, una barriera anti radice, uno strato di drenaggio, una membrana filtrante, un substrato (compost, aggregati e terra) seguito da strati di vegetazione. Lo scopo di questi spazi completamente piantumati è di offrire una migliore gestione delle acque meteoriche, isolamento acustico, risparmio energetico e miglioramento dell'aria e dell'impatto visivo.

Una gestione più efficiente delle acque meteoriche può realizzarsi anche attraverso i cosiddetti *Sustainable Drainage Systems* (SuDS), ovvero sistemi di drenaggio sostenibili che cercano di attenuare i picchi di deflusso attraverso tecnologie costituite, ad esempio, da pavimentazioni permeabili, tetti verdi, canali erbosi o zone umide.

Jato-Espino et al. (2022) hanno applicato la metodologia LCA per intraprendere una valutazione comparativa degli impatti ambientali connessi ad un sistema di drenaggio tradizionale ed uno sostenibile, nel quartiere residenziale Rancho situato a Santiago de Queretaro (Messico). Per quanto riguarda i SuDS esaminati sono caratterizzati da una pavimentazione permeabile discontinua, poiché lo strato superficiale è costituito da lastre in calcestruzzo. Al di sotto sono presenti un letto di sabbia e due strati granulari di diverse dimensioni separati da un geotessile. Infine, si trova un'area di bioritenzione formata da una miscela di sostanza organica e sabbia ricoperta da piante autoctone, da uno strato di ghiaia e da un geotessile di transizione.

In questo contesto alternativo di gestione delle acque meteoriche urbane rientrano anche le tecnologie avanzate per lo sviluppo a basso impatto (Low Impact Development, LID).

Spatari et al. (2011) hanno confrontato gli impatti ambientali causati da un sistema di spartiacque urbano non LID con quelli di un sistema LID costituito da pavimentazione permeabile e alberi stradali.

Santos et al. (2021) hanno valutato gli impatti ambientali connessi a tre diversi sistemi di drenaggio, così sintetizzabili:

- un sistema di drenaggio convenzionale (CDS), denominato Scen.CONV;
- un sistema di drenaggio alternativo che associa il CDS all'uso dei controlli LID per disconnettere i pozzi di infiltrazione, denominato Scen.WELL;

- un sistema, denominato Scen.LID, che ha utilizzato i controlli LID per disconnettere sia i pozzi di infiltrazione che i canali di infiltrazione e le trincee di scolo (considerati mezzi di infrastruttura verde).

Garfi et al. (2017) hanno spostato l'attenzione verso i sistemi di trattamento delle acque reflue, valutando gli impatti ambientali di tre diversi sistemi.

Nel dettaglio, sono stati confrontati un sistema convenzionale a fanghi attivi con due tecnologie basate su elementi naturali, cioè un sistema a zona umida ed un sistema a laghetti algali. Il sistema a zona umida consiste in una combinazione di due zone umide costruite a flusso verticale e una zona umida a flusso orizzontale sotterranea costituita da piante erbacee. Il secondo sistema considerato comprende una fossa settica a tre camere seguita da due stagni ad alta densità algale, da queste due unità le acque reflue passano attraverso un sistema che raccoglie la biomassa e chiarifica l'acqua. In entrambi i sistemi il fango è disidratato in loco e l'acqua trattata è disinfettata e riutilizzata per l'irrigazione, come avviene per l'impianto tradizionale.

In Tab. 6.2 è riportato un elenco degli studi analizzati in cui si evidenziano obiettivo, unità funzionale e confini del sistema.

*Tab. 6.2 Studi di LCA delle opere a verde*

| <b>Autori</b>             | <b>Titolo</b>  | <b>Obiettivo</b>  | <b>Unità funzionale</b>                       | <b>Confini del sistema</b> |
|---------------------------|--|---|---|----------------------------|
| Wang et al. (2020)        | Environmental performances and energy efficiencies of various urban green infrastructures: A life-cycle assessment | Quantificazione degli impatti ambientali connessi a tre tipologie di infrastrutture verdi | 4.800 m <sup>2</sup> di superficie            | Dalla culla alla tomba     |
| Jato-Espino et al. (2022) | Life cycle sustainability assessment for the comparison of traditional and sustainable drainage systems            | Confronto di due sistemi di drenaggio dell'acqua  | 1 m <sup>3</sup> di acque meteoriche trattate | Dalla culla alla tomba     |

|                               |  |   |   |                          |
|-------------------------------|--|---|---|--------------------------|
| von der Thannen et al. (2017) | Development of an environmental life cycle assessment model for soil bioengineering constructions  | Valutazione degli impatti ambientali di tre diversi tipi di costruzione protezione arginale del fiume | 100 m di protezione arginale                        | Dalla culla al cancello  |
| von der Thannen et al. (2021) | Case study of a water bioengineering construction site in Austria. Ecological aspects and application of an environmental life cycle assessment mode   | Confronto impatti ambientali connessi a due opere di ingegneria idraulica                             | 150 m di protezione arginale                        | Dalla culla al cancello  |
| Garfi et al. (2017)           | Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities: Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds          | Confronto di tre impianti di trattamento delle acque reflue   | 1 m <sup>3</sup> di acqua trattata                  | Dalla culla all'utilizzo |
| Spatari et al. (2011)         | Life cycle implications of urban green infrastructure  | Confronto di strategia LID e non LID per gli spartiacque urbani                                       | 2,66 ettari   | -                        |
| Koura et al. (2020)           | Comparative cradle to grave environmental life cycle assessment of traditional and extensive vegetative roofs: an application for the Lebanese context | Confronto degli impatti ambientali dei tradizionali tetti in ghiaia e dei tetti verdi                 | 650 m <sup>2</sup> di copertura                     | Dalla culla alla tomba   |
| Santos et al. (2021)          | Stormwater management for highly urbanized areas in the tropics: Life cycle assessment of low impact development practices                             | Valutazione degli impatti ambientali connessi a tre sistemi di drenaggio                              | m <sup>3</sup> di acqua piovana gestita dal sistema | Dalla culla alla tomba   |

### *6.3.3.1 Approcci metodologici*

Gli obiettivi per cui vengono condotti gli studi sono molteplici, ma tutti hanno in comune lo scopo di confrontare gli impatti ambientali connessi a diverse configurazioni tecniche utilizzate per le opere di Ingegneria Naturalistica.

Alcune valutazioni generali che possono essere tratte sulle unità funzionali scelte riguardano la dipendenza di queste ultime con il campo di applicazione degli studi.

L'analisi ha evidenziato che per gli studi riguardanti opere quali tetti verdi (Koura et al., 2020) o altre infrastrutture verdi (Wang et al., 2020) l'unità funzionale è stata espressa in m<sup>2</sup> di superficie, mentre per le opere di protezione arginale dei fiumi l'unità funzionale è espressa in metri.

Per il trattamento delle acque reflue (Garfi et al., 2017) e meteoriche (Jato-Espino et al., 2022 e dos Santos et al., 2021) sono stati utilizzati m<sup>3</sup> di acqua, rispettivamente, trattata e gestita dal sistema.

In riferimento ai confini del sistema gli studi seguono, con maggiore frequenza, un approccio dalla culla alla tomba, ad esclusione dello studio di von der Thannen et al. (2017) e von der Thannen et al. (2021) per cui è stato selezionato il confine del sistema dalla culla al cancello e di Garfi et al. (2017) che conducono un'analisi dalla culla all'utilizzo.

Infine, una considerazione conclusiva riguarda il metodo di valutazione degli impatti ambientali.

Per la maggior parte degli studi selezionati la metodologia utilizzata è *Recipe*<sub>2016</sub>, ad eccezione di Koura et al. (2020) che hanno utilizzato l'*IMPACT*<sub>2002+</sub> e von der Thannen et al. (2017), (2021) che hanno utilizzato il *Cumulative Energy Demand* (CED) ed il CML 2001 per valutare gli impatti ambientali dovuti alle emissioni di gas serra.

### *6.3.4 Ecoprofili degli interventi di Ingegneria Naturalistica*

Per comprendere gli impatti connessi al ciclo di vita dei sistemi indagati è necessario analizzare i processi che si verificano in tutte le fasi del ciclo di vita e identificare i materiali e le tecnologie più impattanti.

L'obiettivo principale dello studio di von der Thannen et al. (2017) è stato quello di condurre un'analisi degli *hotspot* per identificare i processi che consumano più energia. Il focus è stata la fase di costruzione delle tre strutture di protezione arginale del fiume, compresa l'acquisizione di materie prime, la lavorazione dei materiali, il trasporto, la fornitura di energia ed i processi di costruzione.

I risultati hanno evidenziato che il funzionamento dei macchinari ha avuto il maggiore impatto sul consumo di energia per i tre tipi di costruzione analizzati, a differenza dei materiali utilizzati che mostrano impatti piuttosto bassi.

Il *riprap* ha registrato il più alto consumo di energia primaria (35.388 MJ), circa il 60% in più rispetto al muro con tronchi di legno. Il muro con rami di salice ha ottenuto il minor consumo di energia primaria per la costruzione della protezione, pari a 6.603 MJ (80% in meno rispetto al *riprap*).

Le categorie di impatto selezionate nello studio di von der Thannen et al. (2021) sono state rispettivamente il consumo di energia primaria e il potenziale di riscaldamento globale. Dall'analisi è emerso che per l'opera di bioingegneria idraulica la causa prevalente delle emissioni di gas serra, pari a 8.065 kg CO<sub>2</sub> eq, deriva dal funzionamento delle macchine operanti in cantiere, mentre per il *riprap* le emissioni sono pari a 4.674 kg CO<sub>2</sub> eq. Ciò a causa del fatto che per il sistema bioingegneristico è necessario un impiego maggiore delle macchine da cantiere. Per quanto riguarda i trasporti i risultati sono diversi e hanno mostrato che le emissioni causate dall'opera convenzionale sono pari a 9.386 kg CO<sub>2</sub> eq, circa il doppio delle emissioni causate dalla realizzazione dall'opera di bioingegneria idraulica, pari a 4.674 kg CO<sub>2</sub> eq. La differenza in termini di emissioni causate dai materiali utilizzati è minore, ed è pari a 2.030 kg CO<sub>2</sub> eq per il sistema convenzionale ed a 2.667 kg CO<sub>2</sub> eq per il sistema di bioingegneria. Il consumo di energia totale equivale a 238.155 MJ per la costruzione dell'opera convenzionale ed a 230.090 MJ e per l'opera alternativa di bioingegneria idraulica.

I risultati dello studio di Koura et al. (2020) hanno dimostrato che gli impatti ambientali dovuti al tetto verde sono inferiori rispetto al tradizionale tetto zavorrato con ghiaia per quasi tutte le categorie di impatto prese in esame, tranne per l'occupazione del suolo che è giustificabile dalla presenza di vegetazione nei tetti verdi. La scarsità dell'acqua, con un valore pari a 8,65E+01 m<sup>3</sup>eq, è risultata inferiore nel sistema con tetto verde rispetto al tetto tradizionale in cui è risultata pari a 8,85E+01 m<sup>3</sup>eq. In entrambi i casi l'impatto è dovuto principalmente all'utilizzo di acciaio d'armatura.

Inoltre, l'installazione dei tetti verdi ha ridotto il consumo annuale di elettricità da 352,55 kWh a 169,77 kWh, diminuendo la necessità di sistemi di condizionamento.

Dallo studio condotto da Jato-Espino et al. (2022) è emerso che entrambi i sistemi di drenaggio, tradizionale e sostenibile, hanno determinato importanti impatti sulla categoria del cambiamento climatico a causa delle elevate emissioni di gas serra generate durante la fase di costruzione, principalmente, dalle attività di trasporto e riempimento. Per quanto riguarda la fase operativa, la composizione dell'area di bioritenzione ha contribuito alle riduzioni di gas serra attraverso il sequestro del carbonio. Inoltre, le prestazioni ambientali dei sistemi sostenibili sono risultate superiori soprattutto per quanto riguarda la categoria dell'eutrofizzazione delle acque, poiché i sistemi SuDS hanno la capacità di intercettare e quindi ridurre gli inquinanti quali fosforo e azoto prima di raggiungere i corpi idrici destinatari.



Le attività di scavo e riempimento sono state le cause principali degli impatti sull'acidificazione terrestre, poiché hanno provocato cambiamenti nella composizione chimica e biologica del suolo. Inoltre, la combustione di carburante durante il trasporto di materiali e rifiuti ha contribuito a questa categoria attraverso la generazione di solfati e ossidi di zolfo. Nel complesso, gli effetti associati a queste attività sono stati particolarmente dannosi nel caso del drenaggio tradizionale.

L'uso di materiali come cemento e polietilene ad alta densità nella costruzione di infrastrutture di drenaggio ha avuto un impatto significativo sulla tossicità umana perché questi materiali possono rilasciare agenti cancerogeni come cloruro di vinile, cromo e diossine. Anche in questo caso, la combustione di carburante durante il trasporto ha influito sulla salute pubblica attraverso le emissioni di particolato (PM), anidride solforosa (SO<sub>2</sub>) e ossido di azoto (NO<sub>x</sub>). Infine, gli impatti connessi all'uso del suolo non hanno registrato differenze significative tra i due sistemi analizzati.

L'analisi trattata da Garfi et al. (2017) ha evidenziato che gli impatti ambientali dovuti all'impianto convenzionale di trattamento delle acque reflue sono da 2 a 5 volte superiori rispetto alle soluzioni basate su elementi naturali, per le categorie di impatto considerate. Ciò è dovuto principalmente all'elevato consumo di elettricità e di prodotti chimici durante la fase di funzionamento che ha inciso con una percentuale variabile tra l'85% e il 97% dell'impatto totale, mentre la fase di costruzione ha rappresentato meno del 12% dell'impatto totale in tutti gli indicatori.

Per quanto riguarda l'esaurimento dei combustibili fossili, la riduzione dello strato di ozono, l'acidificazione, l'eutrofizzazione delle acque dolci e l'eutrofizzazione marina, il contributo delle fasi di costruzione e di esercizio per l'impianto a zone umide ha rappresentato il 25,35% dell'impatto totale e per l'impianto a stagni algali il 35,65% dell'impatto totale.

Sul cambiamento climatico le fasi di costruzione e di esercizio hanno inciso per circa il 50% nello scenario a stagni algali. Nello scenario a zone umide, le emissioni dirette di gas serra, la fase di costruzione e la fase di esercizio hanno contribuito in egual modo all'impatto complessivo.

Infine, in tutti gli scenari, il trasporto e lo smaltimento dei fanghi hanno avuto un impatto inferiore al 5% su tutte le categorie di impatto considerate, ad eccezione dei potenziali di eutrofizzazione delle acque dolci e di eutrofizzazione marina in cui rappresentano circa il 15-20% dell'impatto complessivo.

I risultati totali della valutazione del ciclo di vita ottenuti da Santos et al. (2021) hanno rivelato che i maggiori impatti ambientali sono connessi allo scenario Scen.WELL, al contrario gli impatti più bassi sono connessi allo scenario Scen.LID, per tutte le categorie valutate.

Rispetto al sistema di drenaggio convenzionale, lo scenario Scen.WELL ha registrato un aumento degli impatti in termini percentuali variabile tra il 3% e il 52%. D'altra parte, lo Scen.LID ha

conseguito una riduzione degli impatti del 12%-27% rispetto allo Scen.CONV, ad eccezione della categoria di riduzione dell'ozono che ha mostrato una riduzione del 5%.

Considerazioni analoghe non sono emerse dallo studio di Spatari et al. (2011), poiché i risparmi annuali che si ottengono in termini di energia incorporata ed emissioni di gas serra per la strategia LID analizzata sono ridotti (rispettivamente 7,3 GJ e 0,4 ton) e avvengono in tempi di ritorno lenti rispetto ai valori associati ai materiali da costruzione LID.

Infine, dal confronto delle infrastrutture verdi effettuato da Wang et al. (2020) è emerso che il boschetto è lo scenario in cui si ottiene il maggiore risparmio energetico, seguito dalla strada verde e dal tetto verde. Ciò è dovuto al fatto che il risparmio di energia conseguito attraverso il boschetto è risultato 2,4 volte superiore rispetto alla strada verde e circa 3 volte superiore rispetto al tetto verde.

Il risparmio energetico ottenuto nella fase di uso e manutenzione ha contribuito in modo significativo ai miglioramenti ambientali, mentre il materiale da costruzione impiegato nella fase di estrazione e costruzione è stato responsabile di una parte dominante degli impatti totali. In questa fase gli impatti sull'acidificazione e sull'eutrofizzazione connessi alla strada verde ed al boschetto sono risultati circa sei volte superiori rispetto al tetto verde a causa dell'utilizzo di compost nel materiale di rivestimento.

La seconda fase influente è stata quella di fine vita, in particolare per il tetto verde, in cui l'impatto sull'eutrofizzazione è risultato quasi 18 volte superiore rispetto agli altri due scenari. Una spiegazione plausibile può essere collegata alla elevata quantità di rifiuti prodotti per generare il tetto verde.

Una sintesi dei principali risultati summenzionati espressa attraverso l'indicatore di Global Warming Potential è riportata in Tab. 6.3.

Tab. 6.3 Sintesi risultati GWP

| <b>Studi di letteratura</b>   | <b>Unità</b>          | <b>GWP</b>   |
|-------------------------------|-----------------------|--|
| Wang et al. (2020)            | -                     | -  |
| Jato-Espino et al. (2022)     | kg CO <sub>2</sub> eq | 5,40E+02   |
| von der Thannen et al. (2017) | -                     | -  |
| von der Thannen et al. (2021) | kg CO <sub>2</sub> eq | Sistema convenzionale: 1,64E+04<br>Sistema di bioingegneria: 1,54E+04                                    |
| Garfi et al. (2017)           | kg CO <sub>2</sub> eq | Sistema a fanghi attivi: 1,30E+00<br>Sistema a zone umide: 7,0E-01<br>Sistema a laghetti algali: 5,0E-01 |
| Spatari et al. (2011)         | -                     | -  |

|                      |                       |  |
|----------------------|-----------------------|--|
| Koura et al. (2020)  | kg CO <sub>2</sub> eq | Tetto tradizionale: 1.00E+02<br>Tetto verde: 5.76E+01            |
| Santos et al. (2021) | kg CO <sub>2</sub> eq | Scen.CONV: 2,69E+06<br>Scen.WELL: 3,02E+06<br>Scen.LID: 2,36E+06 |

### 6.3.5 Prospettive e conclusioni

La presente analisi mira a fornire una sintesi dei principali contenuti riscontrabili nello stato dell'arte inerente alle principali applicazioni della metodologia LCA di opere a verde.

Attraverso la consultazione del database Scopus sono stati selezionati le principali pubblicazioni riguardanti i temi di interesse.

La selezione di soluzioni ingegneristiche basate su elementi naturali appare particolarmente adatta nell'ambito della diffusione delle bio-soluzioni ingegneristiche, mentre l'applicazione della valutazione del ciclo di vita può essere un valido approccio per valutare gli effettivi vantaggi e le sfide di queste soluzioni.

L'analisi condotta mostra come la metodologia LCA, oltre a fungere da strumento per valutare gli impatti ambientali connessi alle opere a verde, è utile ad assistere nei processi decisionali, al fine di selezionare l'opzione ritenuta più efficace in termini di riduzione dell'impatto ambientale.

È auspicabile che, nel contesto di future ricerche sull'argomento, si possa estendere l'impiego della metodologia LCA unitamente ad altri strumenti che considerano gli impatti economici e sociali al fine di ottenere analisi più ampie e complete.

È utile inoltre sottolineare che, nonostante la maggior parte degli studi abbia dimostrato che le soluzioni "nature based" abbiano migliori prestazioni ambientali, il caso-studio di Spatari et al. (2011) e, parzialmente, l'analisi di von der Thannen et al. (2021) evidenziano che l'applicazione delle tecniche di bioingegneria non implica necessariamente un miglioramento delle eco-prestazioni se comparate a sistemi tradizionali. I sistemi di interesse sono dinamici e sempre diversi, in relazione in particolare del loro campo di applicazione, e occorre sviluppare un'armonizzazione delle strategie e degli obiettivi al fine di supportare misure coerenti volte a migliorare lo stato ecologico dell'ambiente. Sulla base dell'analisi condotta, si possono formulare alcuni indirizzi per il miglioramento delle "performance" ambientali delle opere a verde, in particolare in merito possono ricadere alla scelta dei materiali impiegati e alle fasi del ciclo di vita che generano i maggiori consumi e i maggiori impatti. Tuttavia, per poter eseguire un accurato confronto dei risultati è necessario che in futuro gli studi seguano approcci definiscano confini del sistema di pari estensione, così da rendere efficaci le comparazioni tra applicazioni diverse.

Infine, si evidenzia la necessità di perseguire strategie di ciclo di vita nella generazione dei manufatti di bio-ingegneria, al fine di evitare lo spostamento degli impatti da una fase all'altra del ciclo di vita o da un indicatore ad un altro.

***Bibliografia Par. 6.3***

Europäische Föderation für Ingenieurbiologie et al. Direttiva Europea per l'Ingegneria Naturalistica. (2015) <https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/14589/1/Richtlinie%20pdf.pdf>, Ultimo accesso 21 Marzo 2022.

European Commission. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. The European Green Deal. (2019)

European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. Publications Office of the European Union. (2010).

European Commission. Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities. (2015).

European Commission. Product Environmental Footprint (PEF) Guide. (2012).

Garfí M., Flores L., Ferrer I. Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities: Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. *Journal of Cleaner Production* 161 (2017) 211-219.

Jato-Espino D., Toro-Huertas E.I., Güereca L.P. Lifecycle sustainability assessment for the comparison of traditional and sustainable drainage systems. *Science of the Total Environment* 817 (2022).

Koura J., Manneh R., Belarbi R., El Khoury V., El Bachawati M. Comparative cradle to grave environmental life cycle assessment of traditional and extensive vegetative roofs: an application for the Lebanese context. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 25 (2020) 423–442.

Santos M.F.N., Barbassa A.P., Vasconcelos A.F., Ometto A.R., Stormwater management for highly urbanized areas in the tropics: Life cycle assessment of low impact development practices. *Journal of Hydrology* 598 (2021).

Spatari S., Yu Z., Montalto F.A. Life cycle implications of urban green infrastructure. *Environmental Pollution* 159 (2011) 2174-2179.

UNI EN ISO, 2021a. UNI EN ISO 14040: Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework, International Organization for Standardizations.

UNI EN ISO, 2021b. UNI EN ISO 14044. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, International Organization for Standardizations.

United Nations. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. (2015)

Von der Thannen M., Hoerbinger S., Muellebner C., Biber H., Rauch H. P. Case study of a water bioengineering construction site in Austria. Ecological aspects and application of an environmental life cycle assessment model. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 12 (2021) 599–609.

Von der Thannen M., Hoerbinger S., Paratscha R., Smutny R., Lampalzer T., Strauss A., Rauch H.P. Development of an environmental life cycle assessment model for soil bioengineering constructions. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* (2017).

Wang Y., Ni Z., Hu M., Li J., Wang Y., Lu Z., Chen S., Xia B. Environmental performances and energy efficiencies of various urban green infrastructures: A life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 248 (2020).

## 6.4 I.N. E CAM PER IL VERDE E LA SOSTENIBILITÀ IN AMBITO URBANO (F. Vallone)

### 6.4.1 Criteri Ambientali Minimi (CAM)

I CAM sono i requisiti ambientali definiti per le varie fasi del processo di acquisto, volti a individuare la soluzione progettuale, il prodotto o il servizio migliore sotto il profilo ambientale lungo il ciclo di vita, tenuto conto della disponibilità di mercato. Sono emanazione del *Piano di Azione Nazionale Green Public Procurement (PAN GPP)* per l'introduzione di criteri di sostenibilità ambientale in fase di approvvigionamento di beni e servizi da parte delle stazioni appaltanti della pubblica amministrazione.

Attengono diverse categorie di prodotti/servizi, dagli arredi, alle cartucce, ai servizi di cleaning e gestione rifiuti e sono in continuo aggiornamento (tra i più recenti anche il CAM veicoli per dotazioni basso emissive) per fornire alla PA parametri e standard prestazionali di riferimento da utilizzare nei bandi di gara e appalti.

#### 6.4.1.1 CAM per il verde pubblico

Tra i vari CAM ci sono anche quelli per il **Servizio di gestione del verde pubblico e la fornitura di prodotti per la cura del verde** che si richiamano a:

- *L. 296/2006 «Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi della pubblica amministrazione»*
- *D.L. 13/2013 «Criteri ambientali minimi per il servizio di gestione del verde pubblico e per l'acquisto di ammendanti, piante ornamentali e impianti di irrigazione»*
- *D.L. 50/2016 (Codice Appalti) «Criteri di sostenibilità energetica ed ambientale» che stabilisce che le stazioni appaltanti contribuiscono al conseguimento degli obiettivi ambientali previsti dal «Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della pubblica amministrazione»*
- revisione del citato decreto 13 dicembre 2013 in ragione dell'evoluzione della normativa nel frattempo intervenuta sulla protezione del **capitale naturale** e sul valore dei **servizi ecosistemici** e della necessità di adottare un **approccio sistemico**, integrato affrontando la gestione del verde pubblico nell'ambito di una visione strategica del ruolo che lo stesso può avere per l'ambiente urbano e per la collettività.

I CAM per il verde pubblico sono strutturati in due ambiti di applicazione:

- per affidamento dei servizi:
  - a) di progettazione di nuova area verde o riqualificazione dell'area già esistente;
  - b) di gestione e manutenzione del verde pubblico;

- c) di fornitura di prodotti per la gestione del verde;
- per fornitura di prodotti (materiale florovivaistico, fertilizzanti, impianti irrigui).

Qui tratteremo di:

a) servizio di progettazione di nuova area verde o riqualificazione dell'area già esistente così precisata: **selezione delle specie vegetali** adeguate alle caratteristiche pedoclimatiche regionali, soluzioni di impianti che riducano il consumo delle risorse e l'emissione di CO<sub>2</sub> e di **arredo urbano** che soddisfi criteri di sostenibilità, individuazione delle **migliori pratiche ambientali** per la gestione del cantiere e programmazione e pianificazione delle attività di manutenzione post realizzazione dell'area verde;

Ulteriori precisazioni sono descritte come di seguito (*Gazzetta Ufficiale n. 90 del 4 aprile 2020*):

### ***B. Approccio dei criteri ambientali minimi per il conseguimento degli obiettivi ambientali***

[...] obiettivo di incrementare e valorizzare il patrimonio del verde pubblico, considerati i noti e importanti benefici sulla salute umana e sull'ambiente, mediante un approccio sistematico, integrato ed innovativo alla gestione del verde intesa sia come manutenzione dell'esistente e sua valorizzazione e sia come realizzazione del nuovo, applicando una logica di sistema con una visione olistica proiettata sul lungo termine piuttosto che mirata all'immediato e alla gestione delle emergenze. ... per garantire la qualificazione e il miglioramento del servizio di gestione e manutenzione delle aree verdi. Tale approccio deve avvenire in tutte le tipologie di gare di appalto, anche in quelle che riguardano solo l'affidamento di singoli servizi, ... I CAM perseguono gli obiettivi ambientali strategici definiti nel PAN GPP riportati di seguito: efficienza e risparmio nell'uso delle risorse; riduzione dell'uso di sostanze pericolose; riduzione quantitativa dei rifiuti prodotti ... , si sottolinea la stretta relazione che sussiste tra i CAM verde pubblico e quelli relativi ad altre categorie merceologiche e servizi (rifiuti urbani, fornitura arredi urbani e illuminazione pubblica).

### ***C. Raccomandazioni per le stazioni appaltanti.***

Obiettivo: visione strategica di medio-lungo periodo, finalizzata a raggiungere obiettivi di sostenibilità complessiva (ambientale, sanitaria, sociale ed economica), tenendo conto delle indicazioni che nel corso degli anni sono emerse dalle norme e dai piani elaborati, sia dal Parlamento, sia da vari organismi istituzionali ed enti di ricerca, tra i quali si segnalano:

- *legge 14 gennaio 2013, n. 10 «Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani» (Gazzetta Ufficiale n. 27 del 1° febbraio 2013);*

- “Qualità dell’ambiente urbano Rapporto sistema nazionale per la protezione dell’ambiente”, varie edizioni ([www.areeurbane.isprambiente.it](http://www.areeurbane.isprambiente.it) - con relativa banca dati on-line);
- I Criteri ambientali minimi/Ministero dell’ambiente e della tutela del territorio e del mare;
- “Linee guida per il governo sostenibile del verde urbano” e “Strategia nazionale del verde urbano” a cura del “Comitato per lo sviluppo del verde pubblico” (<https://www.minambiente.it/pagina/comitato-il-verde-pubblico>);
- “Carta nazionale del paesaggio” realizzata dal Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo;
- le norme del progetto QUALIVIVA: (<https://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/serveblob.php/L/IT/idpagina/9785>);
- prassi di riferimento UNI/PdR 8/2014 “Linee guida per lo sviluppo sostenibile degli spazi verdi - Pianificazione, progettazione, realizzazione e manutenzione”.

Per garantire l’approccio strategico di medio-lungo periodo, è essenziale che le stazioni appaltanti, in particolare le amministrazioni comunali, siano in possesso e applichino concretamente strumenti di gestione del verde pubblico come **il censimento del verde, il piano del verde, il regolamento del verde pubblico e privato e il bilancio arboreo** per la progettazione degli interventi di riqualificazione del patrimonio esistente, e per la stima degli investimenti economici necessari al mantenimento e potenziamento della funzionalità del patrimonio verde. Tale strumento deve essere supportato dalla costituzione di una banca dati di conoscenze e informazioni (geo referenziate) ... l’amministrazione deve prevedere la realizzazione di un **censimento minimo di livello 1** (si veda la scheda B presente nel documento) prima di procedere all’affidamento del servizio di gestione e manutenzione. Per attuare una pianificazione strategica del verde urbano in un’ottica di riqualificazione territoriale e di miglioramento della gestione è necessario partire quindi dalla valutazione del patrimonio pubblico esistente, del contesto e delle risorse presenti sul territorio, proseguendo con la redazione del “Piano del verde”. Infatti, va sottolineato che il patrimonio del verde è un **sistema vivente in continua evoluzione** e richiede un’analisi puntuale, una costante attività di **monitoraggio e manutenzione**.

Il Piano del verde rappresenta lo strumento necessario integrativo della pianificazione urbanistica generale, che stabilisce, in base alle priorità determinate dalle esigenze del territorio, gli obiettivi previsti in termini di miglioramento dei servizi ecosistemici, gli interventi di sviluppo e valorizzazione del verde urbano e periurbano a lungo termine, le risorse economiche da impegnare e



le modalità di monitoraggio degli obiettivi raggiunti (previsti dal Piano stesso) e di coinvolgimento delle comunità locali.

Nella programmazione delle attività, le stazioni appaltanti possono, inoltre, **pianificare le forniture di materiale florovivaistico** attraverso la stipula di contratti di coltivazione, pratica già adottata in diversi Paesi europei che assicura vantaggi all'amministrazione sull'esito delle realizzazioni, sui prezzi di mercato e sulla probabile riduzione dei contenziosi. Oltre all'utilizzo di idonei strumenti di gestione che consentano una corretta pianificazione e gestione del territorio, un elemento di grande importanza è la garanzia che i servizi di progettazione e di manutenzione delle aree verdi vengano commissionati a **personale dotato di competenze tecniche idonee** ad effettuare i corretti interventi sul territorio, evitando interventi qualitativamente scarsi e persino dannosi che compromettono lo stato di salute delle piante.

La progettazione per le nuove realizzazioni o per le riqualificazioni delle aree già esistenti dovrà considerare come fattore prioritario il loro inserimento nel **sistema del verde** urbano esistente, allo scopo di costituire un elemento integrato della **rete di spazi verdi** e integrarsi nell'infrastruttura verde urbana. L'organizzazione spaziale delle nuove realizzazioni dovrà favorire il massimo accorpamento delle superfici evitando frammentazione e collocazioni residuali delle singole aree. La progettazione dovrà perseguire la **qualità estetica e funzionale** ottimizzando **costi** della realizzazione e della futura manutenzione. In particolare, per raggiungere l'obiettivo prefisso di riduzione degli impatti ambientali ed economici di gestione, dovrà privilegiare **specie vegetali autoctone e rustiche**, pur tuttavia tenendo in considerazione i prevedibili cambiamenti delle condizioni ambientali legate ai mutamenti climatici, che necessitano di **bassa intensità di manutenzione**, valutando opportunamente distanze e sestri di impianto, **selezionando e attuando soluzioni tecniche che riducano il consumo della risorsa idrica e di sostanze chimiche, adottando soluzioni idonee all'ambiente, al paesaggio e alle risorse economiche disponibili per la manutenzione dell'opera progettata**. Gli elementi da considerare nella progettazione e nel censimento sono riportati rispettivamente nella scheda A) e nella scheda B) contenute nel documento.

#### ***D. CAM per l'affidamento del servizio di progettazione di nuove aree verdi e di riqualificazione di aree esistenti***

*a) Selezione dei candidati.* Ai sensi dell'art. 34 del decreto legislativo n. 50/2016 il criterio di selezione tecnico-professionale riportato di seguito non è obbligatorio:

- *Team di progettazione.* Il progetto è elaborato da un team multidisciplinare di professionisti, con competenze adeguate alla dimensione dell'area oggetto dell'appalto e

alla complessità del progetto. In particolar modo, per progetti significativi di nuove aree verdi o di riqualificazione di quelle esistenti, è assicurata la presenza delle capacità tecniche professionali fondamentali come quelle relative al campo ambientale, paesaggistico, naturalistico, forestale, ingegneristico, geologico e urbanistico e il coordinamento del gruppo è affidato a figure professionali che garantiscano una visione completa ed organica volta ad identificare il valore culturale del progetto in grado di valorizzare e migliorare concretamente il paesaggio.

**b) *Specifiche tecniche.*** La stazione appaltante deve introdurre, nella documentazione progettuale e di gara, le seguenti specifiche tecniche:

- *Contenuti del progetto.* Il progetto, alla luce degli obiettivi ambientali definiti dalla stazione appaltante, che riguardano in particolare gli aspetti floristici, vegetazionali, paesaggistici, culturali e sociali, tiene conto degli elementi richiamati nella scheda A) relativa alla progettazione, di seguito elencati: criteri di scelta delle specie vegetali (arboree, arbustive e erbacee) da selezionare e i criteri per la loro messa a dimora; soluzioni adottate per la conservazione e la tutela della fauna selvatica ove pertinente; migliore gestione delle acque (anche quelle meteoriche), tenendo conto della fascia climatica e della morfologia dell'area, della tipologia e concentrazione degli inquinanti, delle caratteristiche dei suoli e della fragilità delle falde; eventuali interventi di Ingegneria Naturalistica atti alla sistemazione idrogeologica di scarpate o alla riqualificazione dei versanti o corsi d'acqua, ove pertinente; impianti di illuminazione pubblica; eventuali opere di arredo urbano; indicazioni per la gestione dei cantieri per la nuova realizzazione o per la riqualificazione di aree verdi; piano di gestione e manutenzione delle aree verdi; eventuale predisposizione di un'area di compostaggio all'interno del sito al fine di produrre terriccio riutilizzabile come fertilizzante per la cura dell'area verde.

**c) *Criteri premianti.*** La stazione appaltante, laddove utilizzi il miglior rapporto qualità prezzo ai fini dell'aggiudicazione del contratto, deve introdurre uno o più dei seguenti criteri premianti nella documentazione di gara, assegnandovi una significativa quota del punteggio tecnico attribuibile.

### ***Sintesi***

I CAM per il verde pubblico sono orientati a obiettivi di sostenibilità ambientale, incremento della biodiversità e del capitale naturale, e sono allineati/integrati alle afferenti altre normative nazionali.

## *I.N. 2.0 Innovazioni in Ingegneria Naturalistica*

Affermano la necessità di una visione strategica e di un approccio sistemico per la gestione del verde pubblico, che ne attivi promozione e controllo attraverso specifici strumenti (censimento del verde, piano del verde, regolamento del verde pubblico e privato, bilancio arboreo) anche coadiuvati da monitoraggi, sistemi informatici, data base, e appositi contratti di coltivazione per gli approvvigionamenti necessari.

Precisano caratteristiche e standard di forniture e servizi (dalla scelta delle piante alla messa dimora e manutenzione) richiamando a soluzioni tecniche che riducano i fabbisogni idrici e di sostanze chimiche, che siano basso manutentive e idonee all'ambiente, al paesaggio e alle risorse economiche disponibili.

Riconoscono e sostengono la necessaria competenza professionale di tipo anche multidisciplinare (in campo ambientale, paesaggistico, naturalistico, forestale, ingegneristico, geologico e urbanistico) all'interno di una visione organica per la valorizzazione del paesaggio.

Affermano l'importanza dell'Ingegneria Naturalistica quale tecnica per la sistemazione idrogeologica di scarpate e la riqualificazione dei versanti e corsi d'acqua

Mancano espliciti riferimenti alle *Nature Based Solutions* e relative molteplici fattispecie operative (come anche per l'Ingegneria Naturalistica) per l'innescio di processi di rigenerazione paesaggistica anche mediante nuovi habitat pure in ambito urbano.

Mancano di efficaci obbligatorietà (cfr. criteri premianti) e quindi di efficacia trasformativa delle logiche/metodologie in essere per la progettazione e gestione del verde pubblico.

In statistica 2021 risultano comunque utilizzati (sempre/in parte) da circa l'80% delle PA, contro un 50% dei CAM edilizia, a rappresentare quindi un buon grado di consapevolezza delle PA sul valore del verde pubblico non solo in termini di servizio ai cittadini e qualità estetica, ma anche di servizi ecosistemici collegati (qualità aria, clima, *SuDS*, ...).

## 7 SOFTWARE DI SUPPORTO AD INTERVENTI DI I.N.

### 7.1 *SOSlope e SlideforNET (F. Giadrossich, I. Murgia e M. Schwarz)*

#### 7.1.1 *SOSlope*

Per la quantificazione del rinforzo radicale nelle dinamiche idromeccaniche che determinano la stabilità dei pendii, vengono utilizzati modelli a scala di versante che combinano, nel calcolo del fattore di stabilità, lo scenario idrologico, i parametri geotecnici e il rinforzo radicale (Murgia et al., 2022).

Il modello SOSlope, acronimo di Self-Organized Slope (Cohen and Schwarz, 2017) è stato sviluppato per effettuare analisi di stabilità su pendii vegetati considerando esplicitamente il contributo del rinforzo delle radici nella stabilizzazione del suolo. Il software, scaricabile dal sito [www.ecorisq.org](http://www.ecorisq.org), presenta un'intuitiva interfaccia grafica (Figura 7.1) che permette il suo utilizzo sia in ambito accademico che professionale.

SOSlope è un modello idromeccanico ad elementi discreti, composto da un modulo idrologico ed un modulo meccanico. Il modulo idrologico è basato su TOPMODEL di (Beven et al., 2021; Beven and Kirkby, 1979), mentre il modulo meccanico considera l'equazione della meccanica dei suoli di Mohr-Coulomb per le sollecitazioni al taglio, e la resistenza passiva del suolo a compressione (Cislaghi et al., 2019). Il modello dinamico per la stima del rinforzo radicale si basa sul "Root Bundle Model Weibull" (RBMw, Schwarz et al., 2013, 2012, 2010). Quest'ultimo permette di valutare e quantificare l'effetto del rinforzo radicale sul piano basale e su quello laterale, considerando sia il rinforzo radicale in tensione che in compressione (Schwarz et al., 2015) sviluppato durante l'evoluzione progressiva della frana superficiale.

SOSlope consente di simulare eventi piovosi intensi impostando i valori di intensità e durata dell'evento, permettendo di verificare la stabilità del versante durante eventi eccezionali. I dati richiesti per l'applicazione di SOSlope riguardano informazioni geomorfologiche, attraverso l'utilizzo del modello digitale del terreno, e relative alle caratteristiche fisiche del suolo. Tali informazioni sono facilmente reperibili dai geoportali regionali. Per quanto riguarda il rinforzo radicale, il software contiene già le informazioni meccaniche del rinforzo delle principali specie vegetali di interesse forestale.

SOSlope viene aggiornato periodicamente per l'implementazione di nuove specie arboree tramite campagne di rilievo basate su tecniche standardizzate di raccolta dati in campo (Giadrossich et al., 2017).

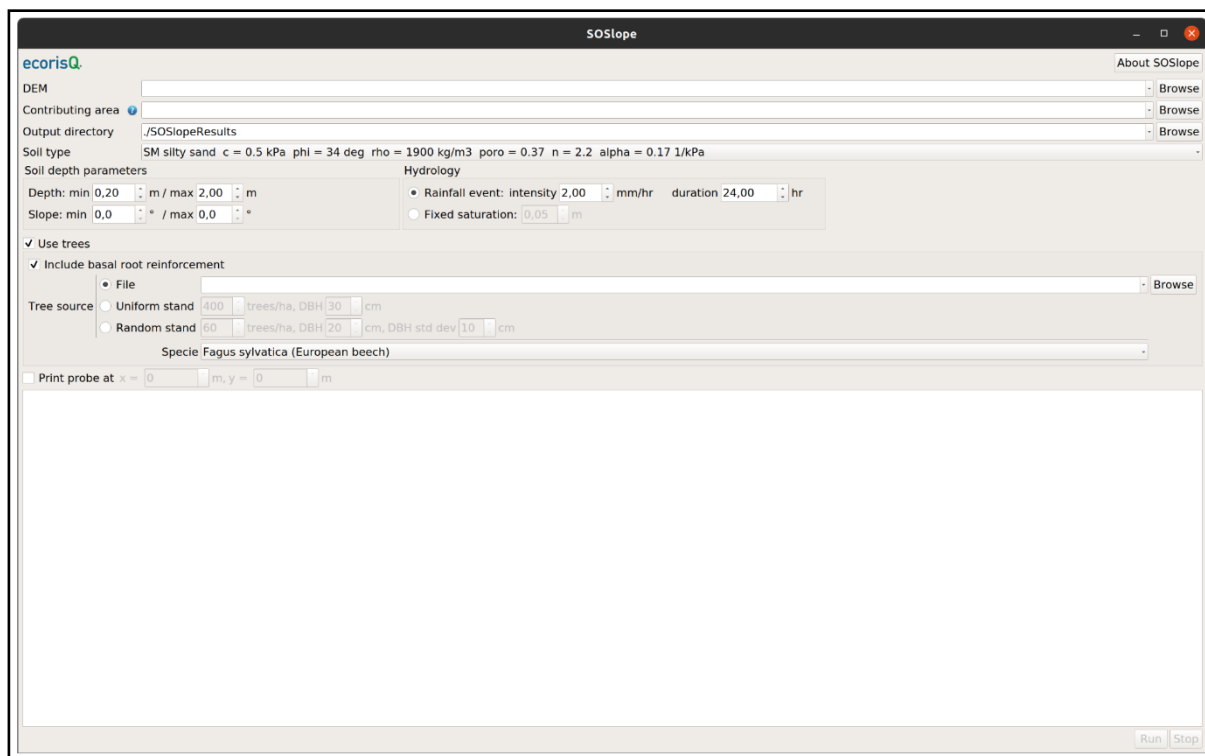


Figura 7.1 Interfaccia grafica del software SOSlope

### 7.1.2 SlideforNET

SlideforNET ([www.slidefor.net](http://www.slidefor.net)) è uno strumento web sviluppato per stimare in maniera rapida e sul campo l'effetto del rinforzo radicale nella stabilità dei versanti. Questo strumento permette il confronto tra scenari caratterizzati da diverse condizioni della vegetazione (foreste o opere di IN) considerando diverse caratteristiche dei pendii (Dorren and Schwarz, 2016). SlideforNET si basa su un approccio probabilistico che verifica la distribuzione di probabilità di fenomeni franosi, considerando informazioni note derivanti da inventari di tali processi (Malamud et al., 2004; Rickli and Graf, 2009). Il calcolo dell'equilibrio tra le forze è effettuato con un modello tridimensionale che considera il suolo come perfettamente rigido e soggetto all'attivazione di forze laterali e basali. Il rinforzo delle radici è implementato nel calcolo considerando i) rinforzo laterale delle radici lungo la potenziale fessura di tensione nella testa della frana, e ii) il rinforzo basale procurato dalle radici che attraversano il piano di taglio basale.

Sulla base delle informazioni relative alla dimensione degli alberi e la composizione specifica del bosco, il modello quantifica il rinforzo radicale laterale assumendo una distanza media tra gli alberi calcolata in funzione della densità arborea impostata. Attualmente sono disponibili dati sperimentali relativi alla distribuzione delle radici delle principali specie arboree alpine (abete rosso, abete bianco e faggio europeo).

I parametri di input relativi alla profondità della superficie di scorrimento e di coesione efficace del suolo sono calcolati utilizzando un approccio probabilistico. Partendo da un valore medio definito dall'utente, viene applicata una funzione casuale per creare una distribuzione log-normale di valori basata su una deviazione standard fissa.

SlideforNET analizza la probabilità che si verifichi o meno la condizione favorevole all'innesco della frana. Le informazioni che si ottengono riguardano sia la relazione tra la probabilità d'innesco di frane, espressa in percentuale, con differenti estensioni degli eventi ipotetici, espressi in  $m^2$ , sia relativamente al grado di protezione della foresta, espresso in termini di riduzione del numero totale degli eventi franosi, espressa in percentuale.

Figura 7.2: Interfaccia grafica del software SlideforNET

***Bibliografia Par. 7.1***

- Beven, K.J., Kirkby, M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrol. Sci. Bull.* 24, 43–69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Beven, K.J., Kirkby, M.J., Freer, J.E., Lamb, R., 2021. A history of TOPMODEL. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25, 527–549. <https://doi.org/10.5194/hess-25-527-2021>
- Cislaghi, A., Cohen, D., Gasser, E., Bischetti, G.B., Schwarz, M., 2019. Field Measurements of Passive Earth Forces in Steep, Shallow, Landslide-Prone Areas. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 124, 838–866. <https://doi.org/10.1029/2017JF004557>
- Cohen, D., Schwarz, M., 2017. Tree-root control of shallow landslides. *Earth Surf. Dyn.* 5, 451–477. <https://doi.org/10.5194/esurf-5-451-2017>
- Dorren, L., Schwarz, M., 2016. Quantifying the Stabilizing Effect of Forests on Shallow Landslide-Prone Slopes, in: Renaud, F.G., Sudmeier-Rieux, K., Estrella, M., Nehren, U. (Eds.), *Ecosystem-Based Disaster Risk Reduction and Adaptation in Practice, Advances in Natural and Technological Hazards Research*. Springer International Publishing, Cham, pp. 255–270. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-43633-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-43633-3_11)
- Giadrossich, F., Schwarz, M., Cohen, D., Cislaghi, A., Vergani, C., Hubble, T., Phillips, C., Stokes, A., 2017. Methods to measure the mechanical behaviour of tree roots: A review. *Ecol. Eng., Soil Bio- and Eco-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability - Proceedings of the Fourth International Conference* 109, 256–271. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.032>
- Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 2004. Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surf. Process. Landf.* 29, 687–711. <https://doi.org/10.1002/esp.1064>
- Murgia, I., Giadrossich, F., Mao, Z., Cohen, D., Capra, G.F., Schwarz, M., 2022. Modeling shallow landslides and root reinforcement: A review. *Ecol. Eng.* 181, 106671. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106671>
- Rickli, C., Graf, F., 2009. *Effects of Forests on Shallow Landslides – Case Studies in Switzerland* 13.

- Schwarz, M., Cohen, D., Or, D., 2012. Spatial characterization of root reinforcement at stand scale: Theory and case study. *Geomorphology* 171–172, 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.020>
- Schwarz, M., Giadrossich, F., Cohen, D., 2013. Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 4367–4377. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4367-2013>
- Schwarz, M., Lehmann, P., Or, D., 2010. Quantifying Lateral Root Reinforcement in Steep Slopes – from a Bundle of Roots to Tree Stands. *Earth Surf. Process. Landf.* 35, 354–367. <https://doi.org/10.1002/esp.1927>
- Schwarz, M., Rist, A., Cohen, D., Giadrossich, F., Egorov, P., Büttner, D., Stolz, M., Thormann, J.-J., 2015. Root reinforcement of soils under compression. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 120, 2103–2120. <https://doi.org/10.1002/2015JF003632>



## **7.2 STRUMENTI E SOFTWARE INNOVATIVI PER LA VALUTAZIONE DI STABILITÀ DI VERSANTI VEGETATI : SSAP- Slope Stability Analysis Program (L. Borselli, F. Preti, M. Uzielli, D.Boni)**

### **7.2.1 SSAP- Slope Stability Analysis Program ([www.ssap.eu](http://www.ssap.eu))**

Nelle applicazioni geologico-tecniche è spesso necessario valutare il grado di stabilità di un pendio naturale in terreni sciolti o di opere in terra rispetto a potenziali movimenti gravitativi. Tali valutazioni vengono usualmente condotte tenendo conto sia delle condizioni attuali, che di quelle prevedibili o probabili nel futuro (analisi di scenario). Le successive verifiche vengono quindi realizzate, una volta note le caratteristiche lito-stratigrafiche, idrogeologiche, geomeccaniche del pendio, attraverso l'utilizzo di procedure di calcolo generalmente lunghe, ripetitive e talvolta assai complesse.

Per questo motivo, ormai da più di tre decenni, trovano largo impiego in questo campo codici di calcolo automatico che consentono di ridurre tempi e costi di questo processo di analisi permettendo di ottenere, con velocità ed efficienza, risultati più attendibili.

Attualmente, esistono numerosi software per la verifica di stabilità dei pendii (per lo più software commerciali) usati da professionisti e ricercatori in tutto il mondo. Nell'ambito di essi è disponibile per la comunità tecnico scientifica italiana il codice SSAP (SLOPE STABILITY ANALYSIS PROGRAM), versione 5.1, (Borselli, 2022), che è oramai un consolidato strumento applicativo che consente di dare un consistente supporto sia nelle attività progettuali riguardanti manufatti di sostegno di opere in terra, che in quelle inerenti alla valutazione della stabilità dei pendii. Il software SSAP è completamente gratuito, ovvero distribuito per un uso libero senza limitazioni.

Questo capitolo è indirizzato a coloro che sono interessati ad avere una panoramica del Software SSAP, non solo delle caratteristiche e funzionalità della sua versione attuale (versione 5.1) ma anche della sua storia, alle motivazioni che hanno portato al suo sviluppo e agli ambiti di applicazione, con una speciale attenzione agli esempi di Ingegneria Naturalistica .

#### **7.2.1.1 Storia e obiettivi del codice SSAP**

SSAP2010 è il risultato di lungo lavoro di sviluppo iniziato ben 30 anni fa che ha visto la collaborazione di moltissimi utenti che hanno dato un notevole contributo allo stesso attraverso critiche costruttive e suggerimenti. La presente versione è il frutto di una evoluzione continua di un codice sorgente totalmente originale, scritto interamente dall'autore iniziando nel lontano 1991, culminata con la prima versione freeware, versione 4.0 (SSAP2010) nel dicembre 2010. La versione attuale SSAP2010 rel. 5.1 (2022).

Il Programma SSAP nasce dall'attività di ricerca svolta nello sviluppo di algoritmi che consentono di ottenere una ottimale modellizzazione della configurazione geomeccanica e litostratigrafica dei pendii in terreni sciolti. Infatti, per valutare correttamente il grado di stabilità di un pendio, oltre che eseguire una corretta caratterizzazione geolitologica dell'area, è necessario tener conto delle eventuali disomogeneità presenti nella massa del pendio, soprattutto nei casi di marcata variabilità delle caratteristiche del terreno, quali ad esempio disomogeneità costituite da strati e lenti di materiali aventi diverse caratteristiche geomeccaniche, livelli di falda variabili, topografie irregolari, elementi stabilizzanti (muri, palificate, tiranti, geogriglie, geosintetici, reti in aderenza ancorate, opere di ingegneria naturalistica, ecc.).

Da un punto di vista geologico, infatti, tutti gli elementi di discontinuità costituiscono parte caratterizzante del pendio e come tali non possono essere trascurati a priori da operazioni di eccessiva generalizzazione del profilo stratigrafico e geomeccanico ricavato da campagne geognostiche. Talvolta invece occorre che per deficienze insite nei codici di calcolo esistenti o a causa dei tempi di calcolo, gli elementi di discontinuità rilevati vengono trascurati o semplificati eccessivamente, con conseguenze sulla attendibilità finale del processo di verifica.

In quest'ottica il codice SSAP è stato sviluppato mirando ai seguenti obiettivi:

- Possibilità di rappresentare adeguatamente tutte le discontinuità presenti nei pendii naturali o artificiali.
- Evitare tutte le eccessive assunzioni semplificative sulla stratigrafia, sul profilo della falda, sulle superfici di scorrimento.
- Implementare diversi tipi di criteri di rottura per terreni e ammassi rocciosi fratturati con la possibilità di combinazioni di questi in uno stesso pendio.
- Seguire gli attuali standard di lavoro e le normative nelle verifiche di stabilità nei pendii in terreni sciolti e ammassi rocciosi fratturati (NTC2018/EC-7);
- Implementare nel software una serie di strumenti di calcolo tra i più avanzati e originali nell'ambito dei modelli di calcolo per le verifiche all'equilibrio limite con metodi rigorosi. Includendo la possibilità di integrare strutture di rinforzo e stabilizzazione (muri, gabbionate, terre armate, tiranti e chiodi, palificate, reti in aderenza., opere di ingegneria naturalistica, etc.).
- Uno strumento utilizzabile per la importazione dati da file AUTOCAD (DXF) e l'assemblaggio facilitato dei modelli del pendio con e senza strutture
- Conseguire tempi di calcolo realistici anche per elaboratori anche di medie capacità.

- Software Interamente Freeware, completamente Gratuito e di utilizzo libero per Privati, liberi professionisti, studenti e Pubbliche Amministrazioni, con la possibilità di essere utilizzato liberamente per fini professionali, istituzionali, di studio e ricerca.

#### *7.2.1.2 Caratteristiche del software SSAP*

La continua evoluzione del software è stata guidata dall'obiettivo di realizzare uno strumento professionale, con un elevato livello tecnico scientifico, di facile accessibilità e utilizzo per una fascia la più ampia possibile di utenti. Il software è il risultato di un continuo lavoro di sviluppo, test e verifica degli algoritmi fondamentali e originali che costituiscono il cuore del programma. Inoltre, è sempre risultato determinante il contributo continuo degli utenti mediante suggerimenti, richieste di funzionalità e segnalazioni di anomalie di funzionamento.

La versione attuale di SSAP (versione 5.1, 2022, [www.ssap.eu](http://www.ssap.eu)) è caratterizzata da una interfaccia semplice e intuitiva costituita da un'unica finestra grafica principale, dalla quale si accede a tutte le funzioni del programma, compresi alcuni programmi di utilità che vengono forniti dal pacchetto e da un codice che permette un funzionamento ottimizzato per spazio e velocità in ambiente Windows 10,11 (Figura 7.3) ottimizzata per i PC con le architetture multiprocessori 64 bit più moderni.

Questo lavoro di ottimizzazione è stato finalizzato alla realizzazione di un software più affidabile e veloce che potesse garantire i migliori standard a progettisti, tecnici, ricercatori e studenti, con un costo pari a zero.

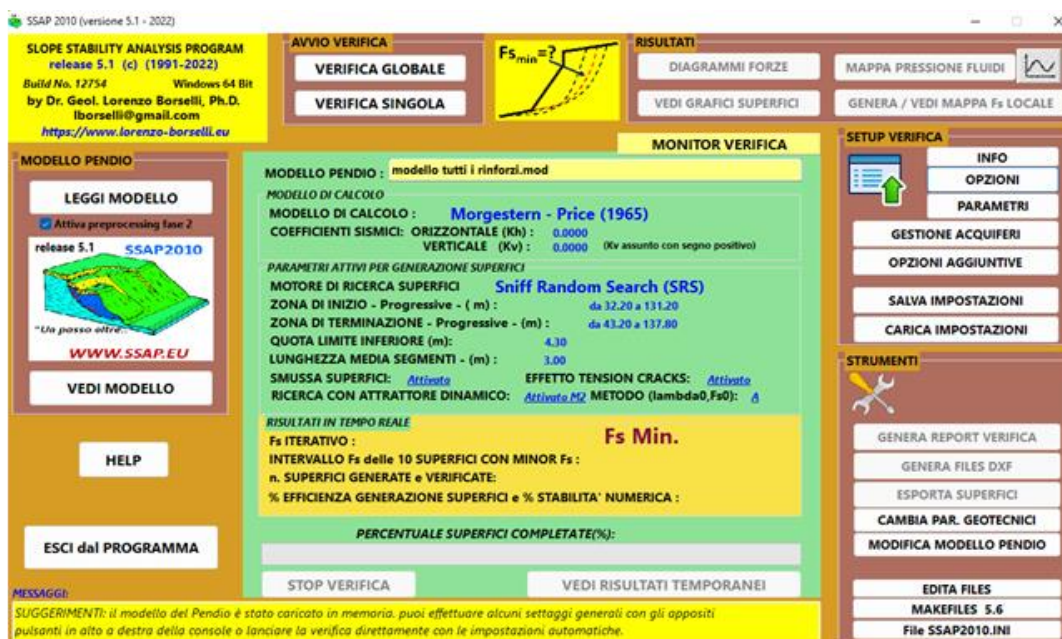


Figura 7.3 Interfaccia utente SSAP 5.1: finestra principale

Le caratteristiche salienti del codice SSAP, sintetizzate anche nella Figura 7.5, sono elencate di seguito:

- 1) La presenza di 7 metodi di calcolo rigorosi che operano nell'ambito della metodologia delle verifiche di stabilità dei pendii mediante il metodo dell'equilibrio limite (Figura 7.4 e Figura 7.5). Gli algoritmi base per il calcolo utilizzano una notazione unificata che deriva dall'algoritmo proposto da Zhu et al (2005) per il solo metodo di Morgestern & Price (1965). Il metodo di ZHU et al. (2005) è stato ampliato e ulteriormente sviluppato dall'autore per permettere la applicazione con i più importanti metodi rigorosi per applicazione del metodo dell'equilibrio limite:
  - Janbu rigoroso (1973);
  - Spencer (1973);
  - Sarma I (1973);
  - Morgenstern & Price (1965);
  - Sarma II (1979);
  - Borselli (2016).
- 2) Utilizzo di varie strategie computazionali (es. quelle proposte da Zhu et al (2003), altre innovative presenti solo in SSAP e sviluppate dall'autore) per eliminare i problemi di convergenza notoriamente esistenti in molti metodi di calcolo rigorosi (es. il metodo di

calcolo di Janbu rigoroso (Janbu,1973)). Questi algoritmi, sviluppati in modo originale in SSAP2010, vengono continuamente migliorati, testati per renderli più affidabili. Questo è uno di punti di maggiore innovazione rispetto ai software anche commerciali presenti attualmente sul mercato. Queste strategie computazionali sono uno dei cuori del programma SSAP che lo diversificano da altri software, specialmente da quelli con propositi commerciali.

- 3) Possibilità di caratterizzare geomeccanicamente gli ammassi rocciosi fratturati mediante il criterio di rottura di Hoek et al. (2002,2006), e eseguire verifiche di stabilità allo scivolamento in pendii costituiti, del tutto o in parte, da ammassi rocciosi fratturati. Il criterio di rottura Hoek et al. è da questa versione presente in una modalità completamente non lineare seguendo, tra gli altri, l'algoritmo proposto di Carranza-Torres (2004), incentrato con l'obiettivo della stima dei valori di  $c'$  e  $\phi'$  equivalenti locali che seguono la curva di involuppo non lineare nel grafico ( $\tau$ - $\sigma$ ). Tutti i nuovi metodi proposti sono un importante sviluppo della metodologia approssimata originale proposta da Hoek et al. (2002). Questi metodi sono presenti in pochissimi software commerciali pur essendo gli unici veri strumenti che fino ad adesso esistono per la stima dei valori locali di resistenza al taglio in un ammasso roccioso considerato isotropo.

Possibilità di integrare il criterio di rottura JRC (Barton & Bandis, 1990, Barton, 2013), non lineare, con il criterio Hoek –GSI in uno stesso masso roccioso caratterizzato da discontinuità orientate.

- 4) Possibilità di combinare in uno stesso pendio sia strati, o lenti, caratterizzati come terreni sciolti(Criterio Mohr-Coulomb , Tresca), sia strati, o lenti, caratterizzati come ammassi rocciosi fratturati usando il criterio di rottura di Hoek-GSI (o GSI+BARTON JRC), entrambi in modalita' generalizzata non lineare.
- 5) La possibilità di inserire direttamente strutture di sostegno tipo palificate e valutare l'incremento del fattore di sicurezza indotto, attraverso un modello di calcolo e progettazione derivato da quello Ito e Matsui(1981) e Hassiotis et al (1997), Kumar & Hall (2006). A questa si aggiunge una innovativa e originale procedura per il calcolo automatico della forza di reazione effettivamente mobilizzata dalla palificata, integrata nel metodo di calcolo per la risoluzione rigoroso del valore di  $F_s$  .
- 6) La Implementazione un metodo completo e rigoroso per considerare la resistenza offerta da sistemi di Tiranti (attivi e passivi) e con distribuzione di resistenza lineare o non lineare

- 7) La Implementazione un metodo completo e rigoroso per considerare la resistenza offerta da sistemi di geogriglie/geosintetici, con particolare riferimento all'effetto di resistenza al pullout.
- 8) La possibilità di analisi particolareggiate che comprendono il calcolo del coefficiente Sismico Critico, come proposto da Sarma (1973), la possibilità di verificare l'effetto di forze stabilizzanti alla base del pendio (muro di sostegno o palificata) o destabilizzanti in testa al pendio (tension Craks riempite di acqua).
- 9) Mappe a colori del Fattore FS locale e dell' OSR (Over stress Ratio). Ogni mappa di Fs locale è una mappa a colori di un campo scalare (Valori di FS o OSR) locali che possono essere generati secondo diversi algoritmi presenti nella Versione 5.1 dopo circa 9 anni di fase sperimentale. I 4 tipi di nuove mappe a colori tutte basate su un innovativo sistema quasi-FEM sono
  - mappa – qFEM con algoritmo quasi Gauss integration e analisi geostatistica non parametrica, basato su sistema FEM di Schofield & p. Wroth(1968) e Griffith al. (1999))
  - mappa – SRM con algoritmo quasi Gauss integration e geostatistica non parametrica basato su sistema Strength Reduction Method(SRM), (Bing et al. 2014).
  - mappa –OSR (Over stress ratio) con algoritmo quasi Gauss integration e geostatistica non parametrica basato su sistema FEM di Farias & Naylor a 1998
  - mappa –LEM, basata sulla assegnazione di un valore costante di FS lungo ogni superficie, secondo le convenzioni del Limit Equilibrium Method (LEM)
- 10) La possibilità di una completa verifica di superfici di scivolamento singole, definite dall'utente e permette il calcolo del coefficiente sismico critico (secondo il metodo proposta da Sarma(1973) applicato anche agli altri metodi di calcolo (Janbu, Spencer...ecc).
- 11) Metodo degli spostamenti semiprobabilistico (Biondi et al. 2011) applicato per analisi in condizione dinamica posteriormente a verifiche su superfici singole.
- 12) La realizzazione di un controllo stringente, in modo automatico, affinché nessuna parte delle superfici soggette a verifica violi, in base alla propria geometria locale, il principio di rottura di Mohr-Coulomb o Hoek (Hoek et al. 2002) .
- 13) Verifiche in condizione di liquefazione post-simica dei terreni con la metodologia di Olson & Stark (2003).
- 14) Una delle più nuove e importanti caratteristiche di SSAP2010 è il modulo completo per la gestione avanzata degli acquiferi presenti in un pendio. Lo scopo è quello di rendere più versatile e più corrispondente alla realtà geologica-geotecnica la componente delle

pressioni interstiziali entro i vari strati che compongono il modello del pendio, considerando anche l'effetto delle forze di filtrazione o la presenza di acquiferi sospesi o in pressione.

Per maggiori dettagli si veda la documentazione ufficiale del software SSAP (Borselli, 2022).

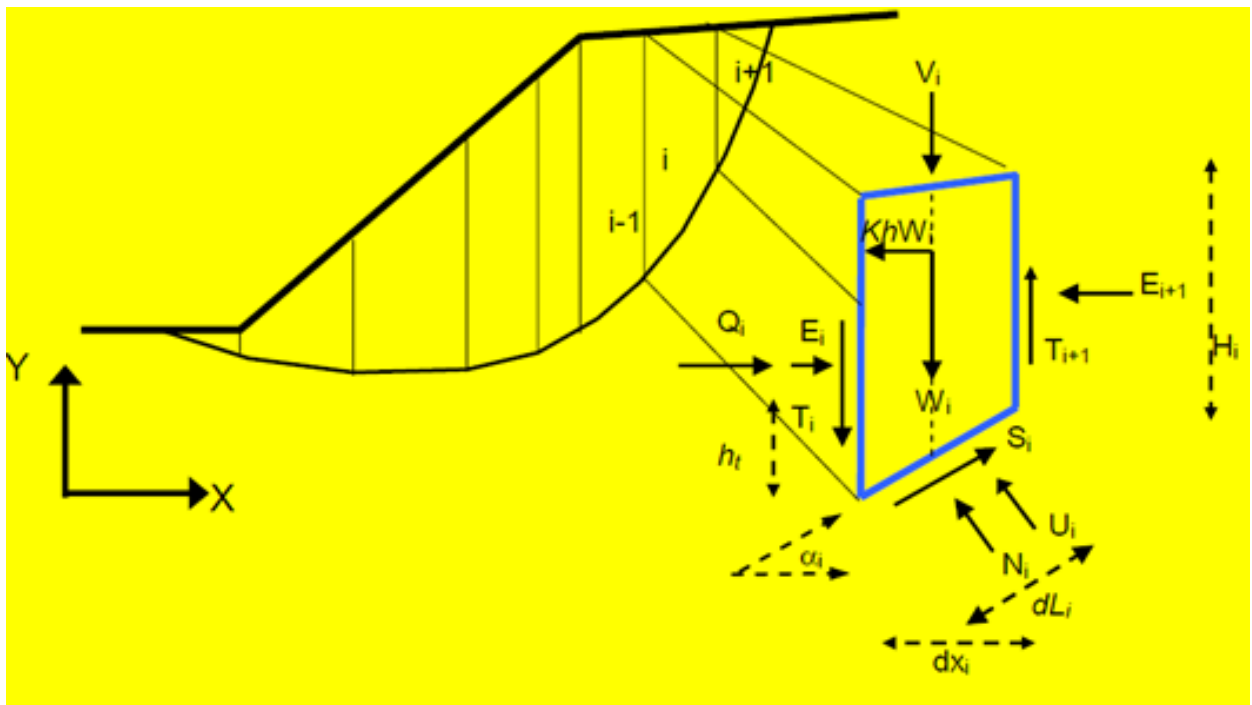


Figura 7.4 Uso di Metodi di calcolo rigorosi che considerano l'equilibrio limite di tutto il complesso di sistemi di forze (interne, esterne) e momenti

SSAP2010 fondamentalmente è dotato di un sistema molto avanzato di motori di generazione di superfici di scivolamento di forma generica, sviluppati in modo originale dall'autore. Tutte le superfici generate sono sempre di forma generica, compatibile con lo scivolamento potenziale, ma non vincolate a priori con una forma particolare, come quella circolare. In Figura 7.6 sono presentate le caratteristiche principali dei 4 motori di ricerca presenti in SSAP 5.1.

Per dettagli su questo punto vedasi la documentazione tecnica ufficiale (Borselli 2022).

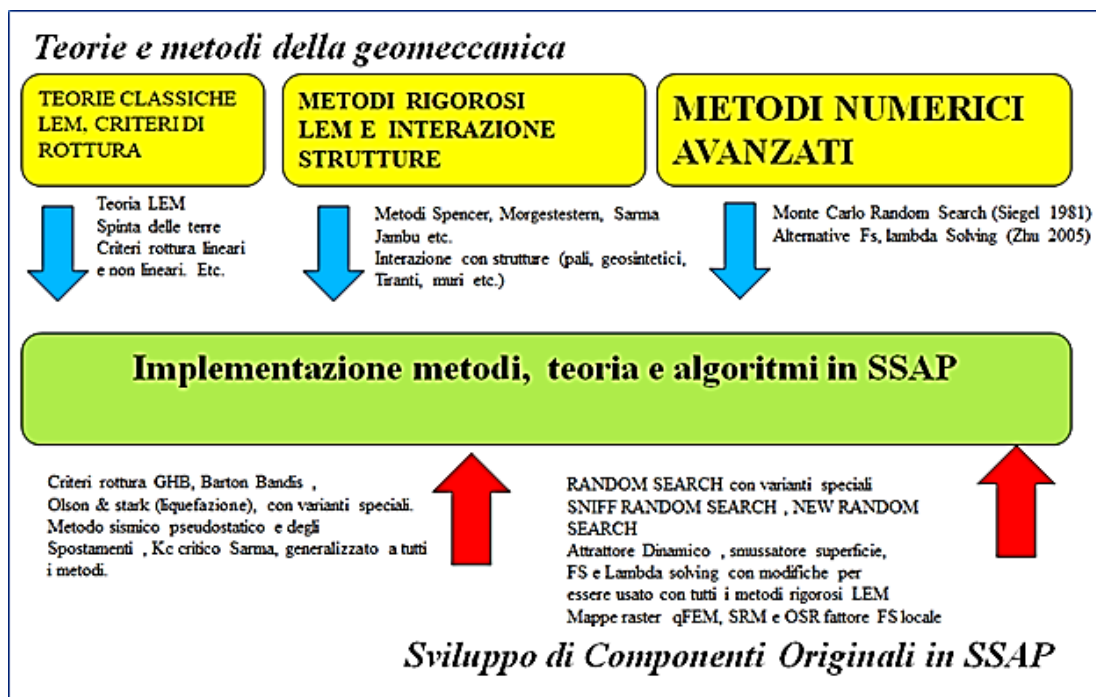


Figura 7.5 Sintesi degli elementi caratteristici e originali nel codice SSAP 5.1

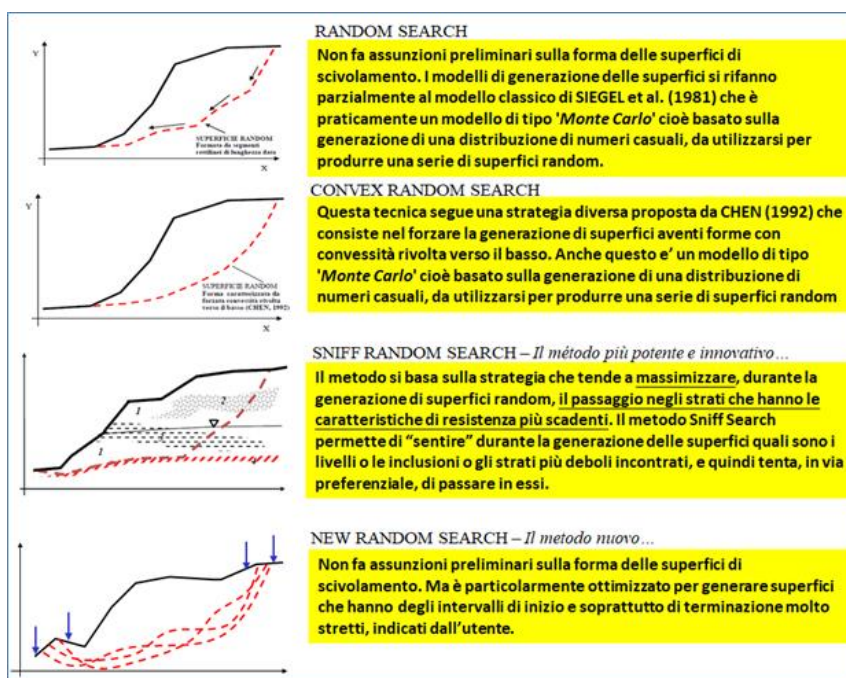


Figura 7.6 Sintesi dei motori di ricerca delle superficie di potenziale scivolamento presenti in SSAP nel codice SSAP 5.1

### 7.2.1.3 Esempi di Applicazioni in Ingegneria Naturalistica: ciglionamenti rinforzati da supporto radicale

La progettazione ottimale di una porzione di territorio terrazzato in grado di garantire una riduzione della perdita di suolo è da secoli una sfida dell'ingegneria agraria, in molte parti del mondo. Il gruppo di ricerca della Università di Firenze (DAGRI) è attualmente impegnato nello studio e nella revisione



delle tecniche progettuali da attuare nella trasformazione con terrazzamenti di alcune porzioni del paesaggio agrario collinare del Burundi, nel quadro del progetto Burundi Landscape Restoration and Resilience Project (PRRPB), con la collaborazione dell'istituto di Geologia della Università Autonoma di San Luis Potosi, nell'ambito di un progetto bilaterale di collaborazione tra le due università, iniziato nel 2018.

L'attività di ricerca sul campo in Burundi si è sviluppata con l'esigenza di verificare ed attivare tecniche che consentano stime attendibili dei parametri geomeccanici dei suoli e substrati rocciosi esistenti e del contributo biomeccanico superficiale degli apparati radicali. Sono state applicate una serie di metodologie considerando le teorie geotecniche classiche della spinta del terreno e della stabilità dei versanti, riferite ai movimenti di massa geometricamente rilevati sul campo e attraverso la caratterizzazione stratigrafica locale dell'insieme colluvio-base rocciosa. In questa analisi si considera la valutazione degli effetti biomeccanici dell'apparato radicale, come tecnica di bioingegneria del suolo e dell'acqua, introducendo una variante nella teoria geotecnica classica.

L'applicazione presentata è stata sviluppata utilizzando il software SSAP (versione 5.0.2, 2021),. Nella metodologia di progettazione è stata considerata anche una componente idrologica per simulare scenari di saturazione parziale o totale del sistema terrazzato. Viene fornita una serie di nuove metodologie operative per integrare le strategie di conservazione del suolo esistenti.

Secondo le procedure di progettazione del Burundi e della FAO vengono considerate diverse combinazioni di geometrie di progettazione, compresi i parametri geotecnici dei suoli residuali e del substrato roccioso.

Nella metodologia progettuale è stata considerata anche una componente idrologica per simulare scenari di saturazione parziale o totale del sistema terrazzato e rinforzo di radicamento ai lati delle sponde, ad esempio i seguenti scenari:

- A) Un pendio asciutto considerando l'effetto del rinforzo delle radici
- B) Pendio asciutto compreso l'effetto di crepe da tensione riempite dall'acqua
- C) Pendenza completamente satura
- D) Pendenza completamente saturata con possibile effetto di crepe di tensione riempite d'acqua
- E) Pendio completamente saturo con possibile effetto di forze di infiltrazione e pressione e crepe di tensione riempite d'acqua

La caratterizzazione geotecnica è stata effettuata per mezzo campionamenti indisturbati in trincee localizzata nella area di studio. I campioni sono stati successivamente sottoposti a prove di laboratorio di meccanica delle terre presso la università' del Burundi: granulometria, densità, limiti di Atterberg, prove di taglio diretto (16 prove). La analisi statistica dei risultati delle prove di taglio secondo la metodologia di progettazione allo stato limite (EUROCODE -7) ha permesso di determinare i valori caratteristici e di progetto dei parametri di resistenza al taglio in condizione drenate dei terreni della area di studio (angolo di attrito interno e coesione).

Nella nostra analisi, la valutazione degli effetti biomeccanici dell'apparato radicale, come tecnica di bioingegneria del suolo e dell'acqua, viene considerata introducendo una variante nella teoria geotecnica classica. L'erba dell'elefante (*Pennisetum purpureum*) è stata considerata per l'azione rinforzante delle sponde del terrazzo, generando una coesione aggiuntiva di 7 kPa, a quella del terreno per una profondità massima di 1 m. (Lawrance et al. 1996)

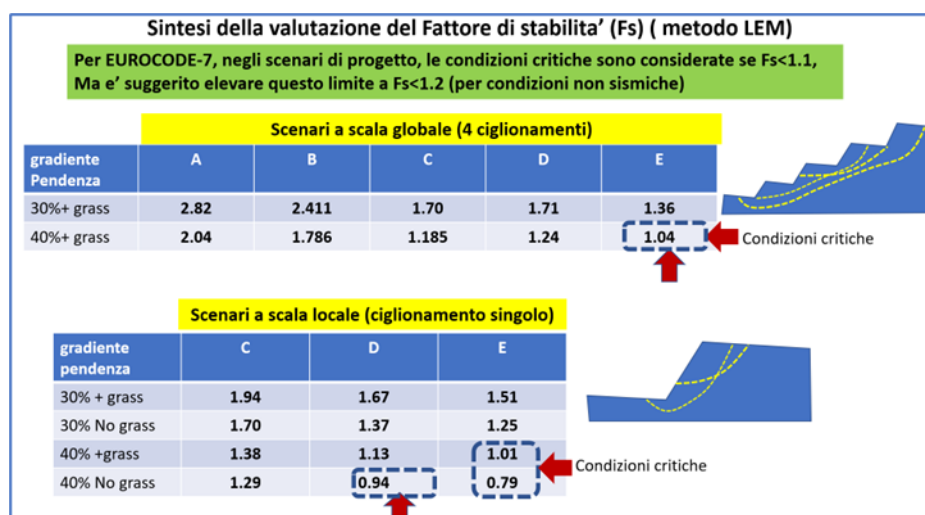


Figura 7.7 Sintesi dei risultati delle varie condizioni di stabilità per diversi sistemi di ciglionamenti e scenari di verifica.

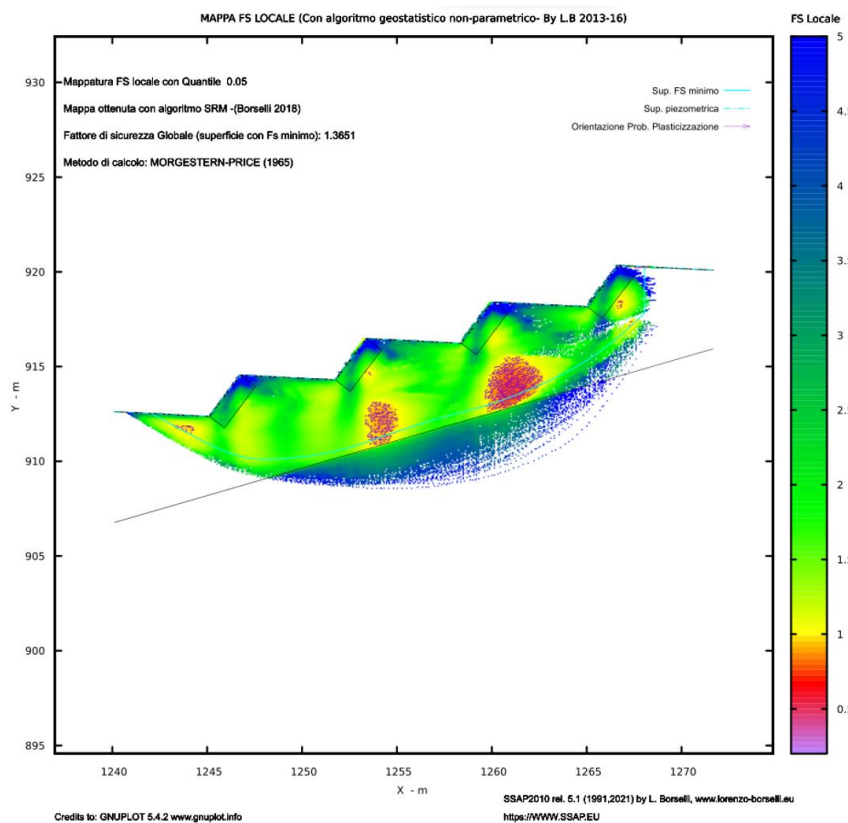


Figura 7.8 Pendio completamente saturo con possibile effetto di forze di infiltrazione e pressione e crepe di tensione riempite d'acqua: scenario E, 30% +grass.  $F_s=1.365$

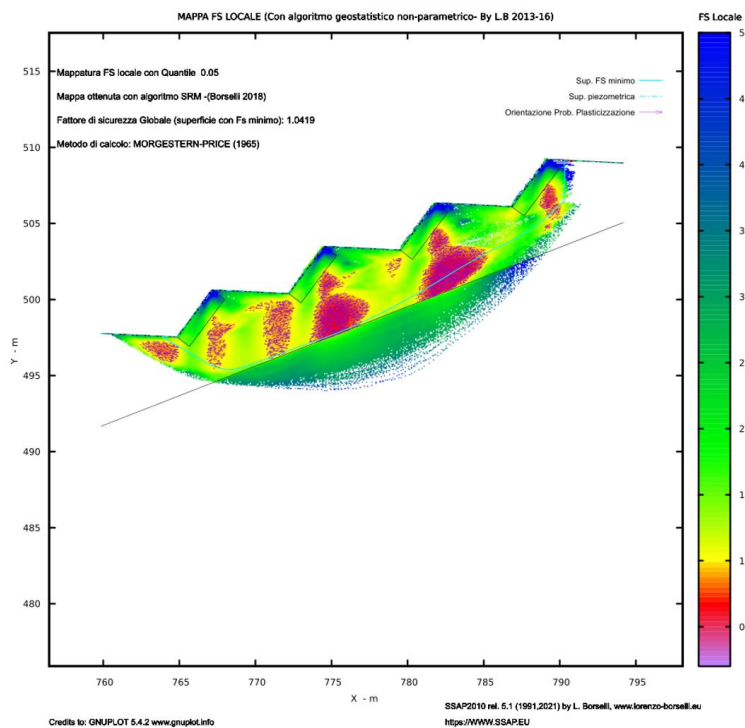


Figura 7.9 Pendio completamente saturo con possibile effetto di forze di infiltrazione e pressione e crepe di tensione riempite d'acqua: scenario E, 40% +grass.  $F_s=1.041$

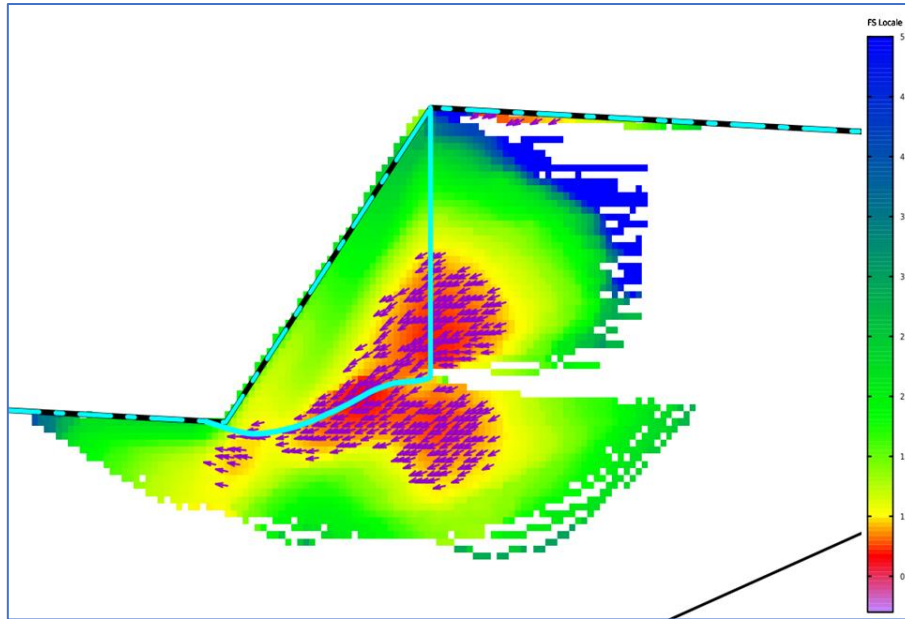


Figura 7.10 Pendio completamente saturo con possibile effetto di forze di infiltrazione e pressione e crepe di tensione riempite d'acqua: scenario E, 40% , no grass.  $F_s=0.79$

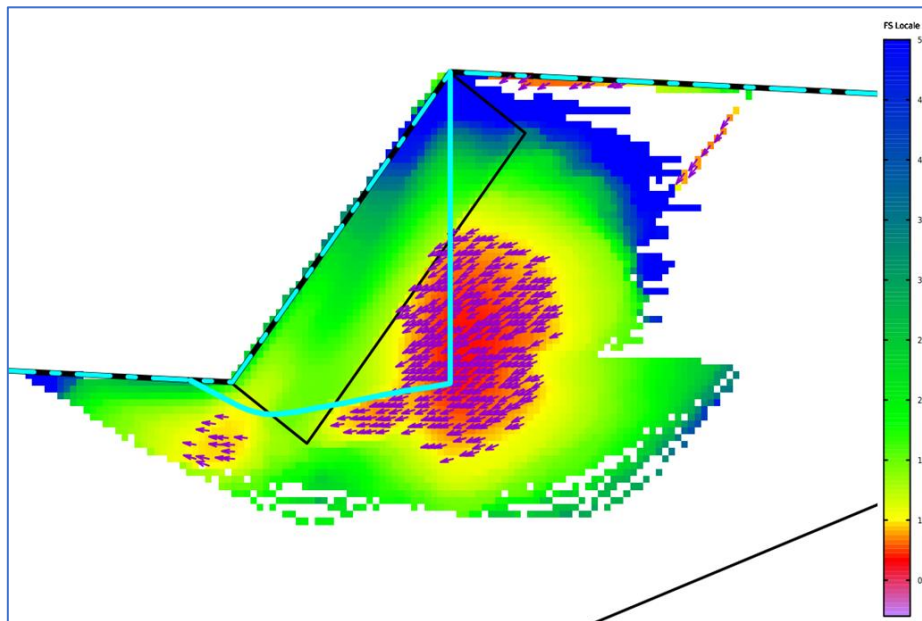


Figura 7.11 Pendio completamente saturo con possibile effetto di forze di infiltrazione e pressione e crepe di tensione riempite d'acqua: scenario E, 40% +grass.  $F_s=1.01$

Le principali conclusioni di questa applicazione sono le seguenti:

- I terrazzamenti radicali in Burundi possono essere stabili nella maggior parte delle condizioni geo-idrologiche
- Gli scenari di saturazione influenzano la gravità delle potenziali condizioni critiche
- Le fessura da trazione pieno d'acqua può generare condizioni critiche anche in caso di pendio asciutto.

- È necessario considerare la scala globale e locale della valutazione della stabilità, ovvero potenziali condizioni critiche associate a famiglie di superficie di scala dimensionale diversa.
- Il processo di infiltrazione può influenzare la condizione critica globale e locale anche in caso di versante parzialmente saturo.
- L'effetto Radici di superficie può migliorare la stabilità del pendio anche in condizioni critiche come fessure di tensione completamente riempite ed effetto infiltrazioni
- Le mappe FS locali (secondo la metodologia qFEM, (Borselli , 2022)) possono essere utili per identificare zone critiche con possibile inizio di progressivo cedimento che ridurrà ulteriormente il grado di stabilità.
- SSAP è uno strumento Freeware utilizzabile in un approccio integrato ai problemi del dissesto idrogeologico e della conservazione del suolo dove l'approccio Geotecnico e Agronomico e Forestale deve essere integrato con metodologie geotecniche.
- Con SSAP abbiamo la possibilità di progettare nuovi tipi di sistemi terrazzati anche ubicati in siti con caratteristiche geologiche complesse (es. copertura del suolo sopra il substrato roccioso esposto agli agenti atmosferici) e idrologiche (es. simulazione di varie condizioni di saturazione e fessure di tensione, anche riempite d'acqua)
- Questo studio preliminare deve essere integrato con l'erosione del suolo e la modellazione idrologica al fine di ottenere un approccio integrato di conservazione del suolo

#### *7.2.1.4 Esempi di Applicazioni in Ingegneria Naturalistica: applicazione in Nature Based Berlinese*

Per valutare quanto l'interazione della coesione radicale crescente nel tempo con degli elementi verticali potesse essere influente nella stabilità del pendio, è stata indagata la presenza di una berlinese di pali in legno castagno, in corrispondenza di una grata viva, nella quale si sono piantate delle talee e delle specie arboree. Il caso in esame, dettagliatamente descritto in una tesi di Laurea Magistrale (Boni, 2022), rappresenta un pendio stabilizzato con opere di Ingegneria Naturalistica (Figura 7.12), in particolare con 3 ordini di palificate vive poste al piede del pendio (strato n. 5-6-7), una grata viva (strato n. 8), oltre agli strati geomeccanici (strato n. 1-2-3-4) che caratterizzano il pendio stesso: il modello geomeccanico è stato definito con il software SSAP, come riportato in Figura 7.13

Questo intervento, definito “*Nature Based Berlinese*” (NB), è rappresentato dallo strato n.9, presente in Figura 7.13 e descritto in Tabella 7.1.

Per definire la lunghezza della NB Berlinese si è verificata la posizione della superficie di scivolamento in assenza di essa, per quantificare un metro aggiuntivo di ammorsamento allo strato più profondo, nonché simil roccioso, ottenendo il valore di 4m.

Le analisi di stabilità svolte hanno permesso di valutare il fattore di sicurezza della stabilità globale del pendio in presenza della NB Berlinese, in tre istanti temporali ben definiti: a costruzione (0 anni), a 10 e a 25 anni da questa. Si sono definiti differenti valori di coesione radicale, crescente nel tempo e decrescente con la profondità del terreno in modo esponenziale, e allo stesso tempo, una degradazione lineare nel tempo del legno costituente la berlinese, passando dal valore iniziale attribuito a costruzione alla metà di questo, in corrispondenza dei 25 anni.



Figura 7.12 Opera di Ingegneria Naturalistica realizzata.

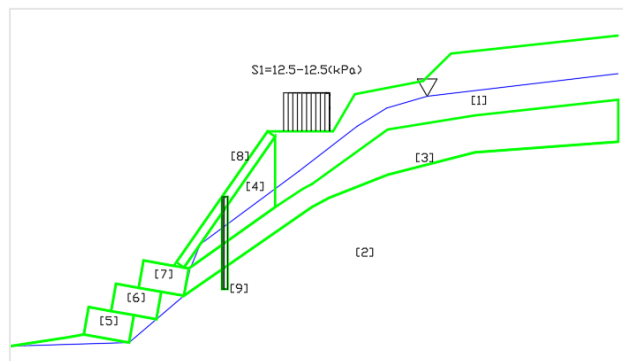


Figura 7.13 Modello geotecnico del pendio analizzato.

Tabella 7.1: Caratteristiche NB Berlinese

|              | <i>Peso di volume <math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>)</i> | <i>Diametro (cm)</i> | <i>Lunghezza (m)</i> | <i>Interasse (m)</i> | <i>Apertura tra pali (m)</i> |
|--------------|--|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|
| NB Berlinese | 5.59   | 25                   | 4.00                 | 1.00                 | 0.75                         |

In Figura 7.14 sono riportate le superfici di scivolamento con il minor fattore di sicurezza individuate dal software: l'incremento di coesione nel tempo negli strati superficiali porta il software ad individuare le superfici critiche sempre più in profondità a causa della crescente resistenza che offre l'apparato radicale negli strati superficiali.



Figura 7.14 Superfici di scivolamento ai vari istanti temporali.

Quanto riportato in Figura 7.15 Evoluzione temporale della stabilità con mappe FS locale rappresenta la mappa del fattore di sicurezza locale generato dal software SSAP: quanto ottenuto è ben visibile in figura, dal momento che la coesione crescente negli anni si traduce in un fattore di sicurezza crescente anche in zone non raggiunte dalle radici.

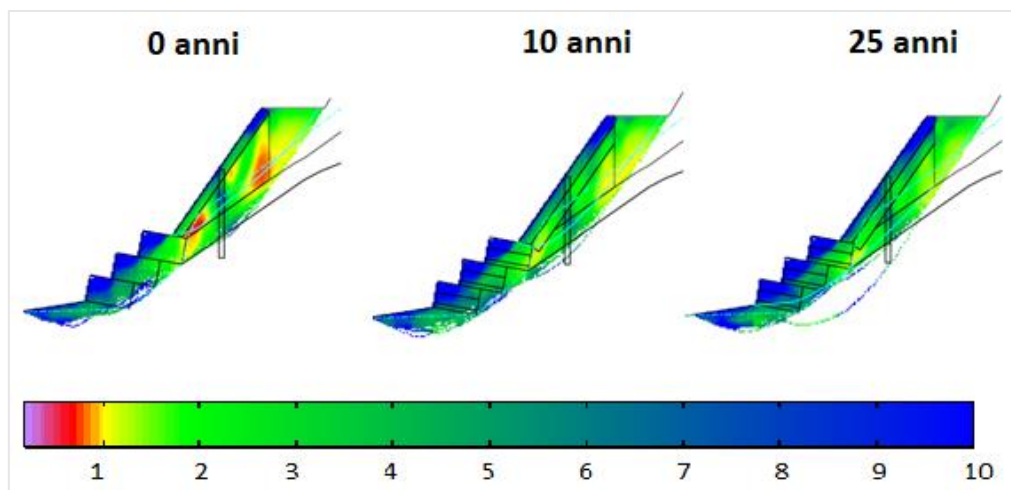


Figura 7.15 Evoluzione temporale della stabilità con mappe FS locale

Questo aspetto rappresenta un beneficio per gli elementi in legname che costituiscono la NB Berlinese, dal momento che le radici assumono la funzione di “cordolo naturale” di collegamento (come quella realizzata in cemento per i micropali) e l’aumento di coesione radicale nel tempo si trasferisce negli strati inferiori del terreno mediante la presenza dei pali in legno, aumentando la stabilità globale.

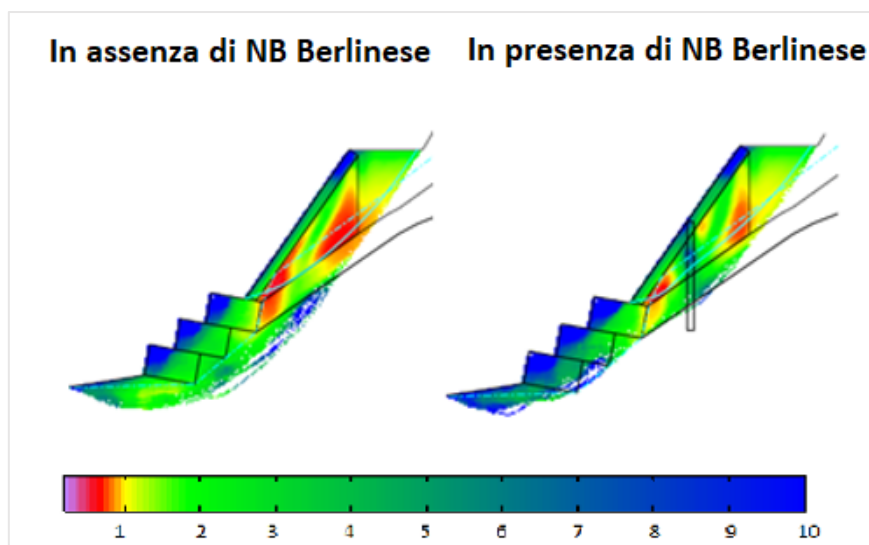


Figura 7.16 Confronto tra assenza e presenza della NB Berlinese.

Il confronto tra assenza e presenza della NB Berlinese (Figura 7.16) permette di evidenziare quanto le soluzioni verificate comportino un miglioramento del fattore di sicurezza, anche se permangono alcune zone con valori al di sotto dell’unità.



#### *7.2.1.5 Conclusioni*

Il software SSAP presenta molte originalità e peculiarità rispetto ai numerosi software commerciali disponibili, e il fatto che sia uno strumento gratuito e di uso libero non è certamente la principale tra queste.

Tali peculiarità sono infatti nel cuore di calcolo del programma, ovvero nell'insieme degli algoritmi impiegati per risolvere problemi di verifiche di stabilità all'equilibrio Limite (metodi LEM) nella configurazione più complessa e rigorosa. Un cuore di calcolo che è concreto, affidabile, veloce e rigoroso.

Il SSAP vuol essere a tal proposito un passo oltre. Infatti, implementa una articolata serie di strumenti molto avanzati che permettono di esplorare un pendio generando una serie di superfici di forma generica (e quindi non vincolata a forme predefinite come la circolare) fino a indentificare non solo la superficie più critica in assoluto (fattore FS più basso) ma anche fasce e zone con maggiore criticità' del pendio. I motori di generazione e ricerca RANDOM di SSAP, ovvero una serie di algoritmi che sono come un secondo cuore di calcolo, sono un elemento ulteriormente innovativo. Alcuni di questi algoritmi come lo SNIFF RANDOM SEARCH sono uno strumento totalmente originale. Il calcolo del fattore di sicurezza (FS) associato a un pendio viene svolto poi non solo usando esclusivamente metodi di calcolo rigorosi riconosciuti tra i più affidabili già da 40 anni, ma implementando una serie numerosa di strategie computazionali e algoritmi che incrementano la affidabilità dei risultati eliminando o mitigando alcuni delle più conosciute problematiche nel calcolo di FS su pendii complessi, con e senza opere di rinforzo.

SSAP2010 è il frutto della Ricerca italiana e può oggi essere liberamente, senza costi, utilizzato da tutti e a beneficio della comunità. Esso di fatto non ha un unico autore. Molti utenti negli ultimi 20 anni hanno infatti contribuito con le loro osservazioni e suggerimenti, incentivando così il suo sviluppo. Il codice SSAP ha mostrato negli anni una grande flessibilità nella sua applicazione in una molteplicità' di ambienti e condizioni diverse. La applicazione in ingegneria naturalistica non è una novità assoluta dato che negli ultimi 20 anni SSAP è stato applicato in questo contesto da numerosi professionisti in Italia. In questo capitolo però sono state riportate esempi che sono stati utili a mostrare la potenzialità' del software. Le opere di ingegneria naturalistica hanno necessità di una forte integrazione di metodi di calcolo rigorosi applicati con una modellazione geomeccanica realistica delle varie unità di rinforzo e stratigrafiche nel contesto di scenari geotecnici, sismici e idrologici che siano rappresentativi delle condizioni ambientali e delle limitazioni imposte dalla normativa progettuale esistente. Il SSAP ha la possibilità di ottemperare a queste esigenze stringenti.

Rimane comunque al progettista l'onere di una corretta modellazione geotecnica del pendio con le opere di rinforzo, ma anche quello di scegliere adeguati strumenti di calcolo. Il software SSAP viene quindi proposto come uno strumento di lavoro per il progettista che desideri impiegarlo nella progettazione di opere di ingegneria naturalistica.

**Codice SSAP: WEB Links utili**

Sito ufficiale software SSAP: <https://www.ssap.eu>

Manuale SSAP2010 (format PDF): <https://www.ssap.eu/manuaelssap2010.pdf>

Caratteristiche del software: <https://www.ssap.eu/caratteristiche.html>

Licenza d'uso freeware : <https://www.ssap.eu/ssap2010licence.pdf>

Progetto No Profit per didattica e divulgazione SSAP: <https://www.ssap.eu/corsi.html>

Esempi di applicazione (da PP.AA.) del software SSAP disponibili sul WEB  
<https://www.ssap.eu/onweb.html>

Canale WEB dedicato a SSAP su YOUTUBE con video didattici  
[https://www.youtube.com/channel/UCcOmf\\_OHXWlDr9oXvS6X7fw](https://www.youtube.com/channel/UCcOmf_OHXWlDr9oXvS6X7fw)

**Ringraziamenti**

Un ringraziamento speciale all'Università del Burundi per gli sforzi nel campionamento del suolo e nelle analisi di laboratorio.

Ringraziamo l'Universidad Autonoma de San Luis Potosi per consentire questa collaborazione con il Progetto Burundi Landscape Restoration and Resilience Project (PRRPB) nell'ambito del suo accordo bilaterale con l'Università di Firenze.

Crediti speciali a CONACYT (Messico) per i fondi di ricerca utilizzati per lo sviluppo del Software SSAP nell'ambito del progetto, CB-2016/286764.

**Bibliografia Par.7.2**

Boni D. (2022). *Tesi di Laurea Magistrale, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze.*

Borselli Ll. (2022). "SSAP 5.1 - Slope Stability Analysis Program". *Manuale di riferimento. Del codice SSAP Versione 5.1. Researchgate. DOI: <https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.31522.91841>*

Lawrance, C. J., Rickson, R. J., & Clark, J. E. (1996). *The effect of grass roots on the shear strength of colluvial soils in Nepal. Advances in Hillslope Processes, 2, 857-868.*

*Barton, N. (2013). Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 5(4), 249-261.*

*Barton, N., Bandis, S.C. (1990).. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. International Symposium on Rock Joints. Loen 1990. Proceedings, pp. 603-610, 1990.*

*CARRANZA-TORRES C. (2004). Some comments on the application of the Hoek–Brown failure criterion for intact rock and rock masses to the solution of tunnel and slope problems. In: Barla G, Barla M, editors, MIR 2004 – X Conference on rock and engineering mechanics, Torino, Italy, Pàtron Editore, Bologna; 24–25 November 2004. p. 285–326. [Chapter 10].*

*HASSIOTIS S., CHAMEAU J.L., GUNARATNE M. (1997). Design method for stabilization of slopes with piles. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 123(4):314-323.*

*HOEK, E., & DIEDERICHS, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. International journal of rock mechanics and mining sciences, 43(2), 203-215.*

*Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., and Corkum, B. (2002), Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. Proc. North American Rock Mechanics Society meeting in Toronto in July 2002.*

*ITO T., MATSUI T. (1981). Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles. Soil and Foundation. 21(1):21-37*  
<http://ci.nii.ac.jp/lognavi?name=nels&lang=en&type=pdf&id=ART0005363351>

*JANBU N. (1973) Slope stability computations. The embankment dam Engineering Casagrande Volume. John Willey e Sons pp 47-86.*

*MORGESTERN N.R. & PRICE V.E.(1965) The analysis of the stability of general slip surfaces. Geotechnique, 15, pp 70-93.*

*SARMA S.K. (1979). Stability analysis of embankments and slopes. Journal of Geotech. Eng. Vol. 105(2):1511-1524.*

*SARMA, S. K. (1973). Stability analysis of embankments and slopes. Geotechnique 23, No. 3, 423–433*

*SIEGEL R.A., KOVACS W.D.,LOVELL C.W. (1981) Random surface generation in stability analysis. Journal of Geotech. Eng. Vol. 107 No. 7 pp 996-1002.*

SPENCER, E. (1967). *A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. Géotechnique, 17(1): 11–26.*

ZHU D.Y., LEE C.F., QIAN Q.H., and CHEN G.R.. 2005. *A concise algorithm for computing the factor of safety using the Morgen-stern–Price method. Can. Geotech. J. 42: 272–278*