



*Linee guida per una
Gestione Forestale
Sostenibile di
(*Fagus sylvatica* L.)*



Linee guida per una Gestione Forestale Sostenibile di *Fagus sylvatica* L.

Deliverable: Section of the guidelines on management activities in forest conservation areas in climate change for each of the 4 species/genera complexes targeted



UNIVERSITA'
DEGLI STUDI
FIRENZE
DAGRI
DIPARTIMENTO DI AGROLOGIA
E AMBIENTE



UNIVERSITA' DEL SALENTO
CASA S. GIOVANNI
CASA S. MARCO
CASA S. PIERO
CASA S. VINCENZO



Zavod za gozdove Slovenije
Slovenia Forest Service



DESCRIZIONE DEL PROGETTO LIFE SySTEMiC

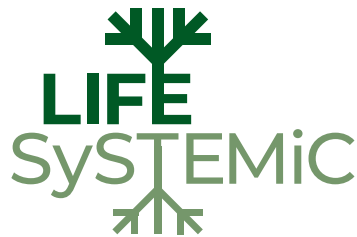
Il programma LIFE è uno strumento dell'Unione Europea che finanzia progetti aventi come scopo la conservazione degli ecosistemi, della biodiversità e la lotta al cambiamento climatico.

Il progetto LIFE SySTEMiC Project (*Close-to-nature foreSt SusTainable Management practices under Climate Changes*) ha come obiettivo lo sviluppo e l'utilizzo di uno modello basato sulla diversità genetica per determinare le migliori pratiche selvicolturali al fine di proteggere le nostre foreste in tempi di cambiamenti climatici. L'idea di base è semplice: maggiore è la diversità genetica degli alberi in una foresta, più è probabile che alcuni alberi abbiano caratteristiche genetiche che li rendono più adattabili ai cambiamenti climatici, aumentando la resistenza e la resilienza del sistema forestale.

Sulla base di queste premesse, gli obiettivi principali del progetto sono:

- Indagare le relazioni tra gestione forestale e diversità genetica per 8 specie di alberi forestali in 3 Paesi europei (Croazia, Italia, Slovenia) al fine di identificare i sistemi selvicolturali che mantengono alti livelli di diversità genetica.
- Sviluppare un modello innovativo che comprenda Genetica, Biodiversità e Selvicoltura (GenBio-Silvi) basato sulla combinazione di tecniche avanzate di *Landscape Genomics*, genetica applicata e modelli selvicolturali al fine di supportare una Gestione Forestale Sostenibile.
- Diffondere la conoscenza del metodo in tutta Europa e trasferirne l'uso nella pratica forestale attraverso il coinvolgimento di Stakeholder.

Nella pagina web del progetto LIFE SySTEMiC vengono riportati tutti i prodotti finali del progetto: <https://www.lifsystemic.eu/>



1. Introduzione

Hojka Kraigher, Marjana Westergren

Slovenian Forestry Institute (SFI), Slovenia

Il faggio (*Fagus sylvatica* L.) è una specie monoica anemofila con una durata di vita fino a 300 anni, raggiungendo un'altezza di 40 (60) m. È una specie che forma popolamenti, crescendo in boschi puri o misti in tutta Europa. Nel sud-est Europa può ibridarsi con *Fagus orientalis* Lipsky (Figura 1.1). Cresce su una vasta gamma di suoli, eccetto quelli compatti e idromorfici, e preferisce climi umidi. Poiché è suscettibile alle alte temperature, alle siccità estive e alle gelate tardive, la sua distribuzione è limitata all'area del Mediterraneo e nelle parti continentali dell'Europa occidentale e settentrionale (Westergren *et al.*, 2020).



Figura 1.1. Areale di distribuzione del Faggio europeo (www.euforgen.org) da Caudullo G., CC BY 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>, via Wikimedia Commons.

Il faggio è caratterizzato da una struttura genetica semplice lungo il continente europeo. Le popolazioni della penisola iberica e del sud-ovest della Francia, della penisola italiana e dei Balcani sud-orientali (potrebbero esserci altri pool genici nella regione) appartengono ciascuna a diversi pool genici, mentre il pool genico dell'Europa centrale si mescola con quello dei Balcani e si espande verso l'areale settentrionale della specie (Demesure *et al.*, 1996; Magri *et al.*, 2006; GenTree, 2021; Höhn *et al.*, 2021), con l'isolamento per distanza che gioca un ruolo importante nella differenziazione (Höhn *et al.*, 2021). La diversità genetica del faggio sembra essere più alta nei rifugi glaciali (GenTree, 2021). Complessivamente, le popolazioni al centro dell'areale sono più simili in termini di diversità e struttura (GenTree, 2021).

2. Linee guida sulla Gestione Forestale Sostenibile e sull'adattamento delle faggete al cambiamento climatico

Andrej Breznikar

Slovenian Forestry Institute (SFI), Slovenia

La silvicoltura sostenibile e *close to nature* utilizza metodi di gestione forestale che promuovono la conservazione della natura e delle foreste in modo da preservarle come ecosistema naturale, con tutte le sue forme di vita e le relazioni che vi si instaurano. Essa si basa su una pianificazione forestale dettagliata, adattata alle condizioni specifiche del sito e del popolamento, così come alle funzioni della foresta, considerando i processi e le strutture naturali specifiche degli ecosistemi forestali naturali (Veselič, 2008).



Figura 2.1. Il sistema a tagli successivi a gruppi è di comune utilizzo per la gestione dei soprassuoli di faggio.

I sistemi selvicolturali applicati ai popolamenti di faggio devono essere selezionati con attenzione, per promuovere approcci *close to nature* e imitare i processi naturali. Nell'ambito del progetto LIFE SySTEMiC sono stati analizzati quattro gestioni selvicolturali applicate ai popolamenti di faggio (Tabella 2.1). Sono stati studiati 12 popolamenti di faggio, corrispondenti a 4 Tipi di Foresta Europea (EFT): 6.6 Illyrian sub-mountainous beech forest; 7.2 Central European mountainous beech forest; 7.3 Apennine-Corsican mountainous beech forest and 7.4 Illyrian mountainous beech forest. I risultati mostrano come i sistemi selvicolturali a basso impatto favoriscono il mantenimento e la conservazione della variabilità genetica, come il taglio a scelta colturale ed i tagli successivi a gruppi effettuati su piccola scala.

Tabella 2.1. Lista dei siti di *Fagus sylvatica* L. del progetto LIFE SySTEMiC.

Id	Nome del sito	Paese	Specie	EFT *	Struttura	Sistema selvicolturale
01	Pian degli Ontani	Italia	<i>F. sylvatica</i>	7.3	Coetanea	Tagli successivi uniformi
02	Baldo's forest	Italia	<i>F. sylvatica</i>	7.3	Disetanea	Taglio a scelta colturale
03	Pian dei Ciliegi	Italia	<i>F. sylvatica</i>	7.3	Coetanea	Tagli successivi uniformi
04	Caselle 1	Italia	<i>F. sylvatica</i>	7.3	Coetanea	Tagli successivi uniformi
05	Caselle 2	Italia	<i>F. sylvatica</i>	7.3	Coetanea	Tagli successivi uniformi
11	Fonte Novello	Italia	<i>F. sylvatica</i>	7.3	Disetanea / Vetusta	Non gestito
12	Venacquaro	Italia	<i>F. sylvatica</i>	7.3	Coetanea	Tagli successivi uniformi
14	Ogulin	Croazia	<i>F. sylvatica</i>	7.2	Coetanea	Tagli successivi uniformi
23	Osankarica	Slovenia	<i>F. sylvatica</i>	7.2	Coetanea	Tagli successivi a gruppi
24	Pri Studencu	Slovenia	<i>F. sylvatica</i>	6.6	Coetanea	Tagli successivi a gruppi
25	Rajhenavski Rog	Slovenia	<i>F. sylvatica</i>	7.4	Disetanea / Vetusta	Non gestito
29	Gorski kotar, Vrbovsko	Croazia	<i>F. sylvatica</i>	7.2	Disetanea	Taglio a scelta colturale

* EFT = European Forest Type: 6.6 Illyrian submountainous beech forest; 7.2 Central European mountainous beech forest; 7.3 Apennine-Corsican mountainous beech forest; 7.4 Illyrian mountainous.

Il faggio è una specie arborea tollerante l'ombra, presente in molte comunità forestali in Europa ed in diversi tipi di foreste, principalmente come specie dominante o, in alcuni casi, come specie consociata. Si contraddistingue per una crescita lenta durante lo stadio giovanile, che culmina solo dopo 45 anni, quando le condizioni di luce lo permettono. Il faggio raggiunge il suo massimo incremento volumetrico molto tardi, su alcuni siti solo dopo 75 anni. In generale, l'incremento totale medio del volume non mostra segni di declino fino all'età di 150 anni. Il faggio continua a rispondere bene alla gestione selvicolturale ed ai diradamenti fino agli stadi finali di età, superando tutte le altre specie arboree (Diaci, 2006). Il faggio è relativamente resistente alla maggior parte delle malattie. Non soffre di predazioni da parte di parassiti, che portano a una totale mortalità dei boschi. Le gelate tardive primaverili, spesso, danneggiano la rinnovazione o i fiori, che si aprono simultaneamente con la ripresa della vegetazione. La luce solare intensa può danneggiare la superficie del tronco (Wuelisch, 2010). Le principali minacce per le foreste di faggio sono i disastri naturali come la grandine e le rotture causate dalla neve (Figura 2.2) a quote più elevate, mentre il vento può causare gravi danni.

Le faggete situate nei siti più caldi possono essere a rischio a causa di estati tendenzialmente più secche e prolungate. Le foreste che vegetano sui versanti settentrionali sono meno minacciate (ZGS, 2021). La stabilità dei popolamenti misti di faggio, con una maggiore proporzione di altre specie, è fortemente minacciata dallo stato di salute di queste specie. C'è anche un rischio di introduzione e diffusione di specie invasive alloctone nelle foreste vicine a insediamenti e infrastrutture (strade, ferrovie).



Figura 2.2. La neve/gelo può essere molto dannosa per i popolamenti di faggio a quote elevate.

Attraverso la rinnovazione naturale dei popolamenti di faggio, si preserva l'adattabilità degli alberi alle condizioni ambientali locali e alle dinamiche naturali. I soprassuoli di faggio dovrebbero essere rinnovati naturalmente e dovrebbero imitare una consociazione di specie arboree tipiche dei boschi naturali (ZGS, 2021). La rinnovazione naturale dei popolamenti di faggio, generalmente, non è problematica. I soprassuoli giovani di faggio sono caratterizzati da una densità con stratificazione vigorosa. Nei gap e nei giovani soprassuoli a gruppi, gli alberi dominanti sviluppano rapidamente chiome sovrapposte (Diaci, 2006). Il metodo più comune per l'affermazione della rinnovazione dei soprassuoli di faggio è sotto la copertura della chioma. La rinnovazione è avviata dopo i tagli, principalmente dopo i tagli successivi uniformi (Nocentini, 2009) o dopo tagli successivi a gruppi (Westergren *et al.*, 2015). In quest'ultimo caso, il taglio è pianificato in piccoli spazi di rinnovazione che vengono poi gradualmente collegati nel tempo. Un sistema alquanto adatto è anche quello del taglio a scelta selvicolturale, specialmente in boschi misti con abete bianco e in aree dove la pressione ambientale è molto alta (ZGS, 2021). La rinnovazione può anche essere introdotta su aree leggermente più grandi, che dovrebbero essere spazialmente separate da popolamenti maturi.

La rinnovazione nei gap dovrebbe iniziare dopo l'anno di pasciona, con un'intensità di taglio tra il 30 e il 50% del patrimonio legnoso (Matić *et al.*, 2003). È necessario preparare il bosco per la rinnovazione naturale, diradando il sottobosco e lo strato arbustivo. Dove possibile, si utilizza la rinnovazione naturale, poiché questo rende il processo evolutivo meno disturbato e preserva la diversità genetica delle popolazioni forestali arboree. Dopo l'apparizione di giovani piante di alta qualità, la gestione continua con una maggiore intensità di taglio (tra il 50 e il 60% del patrimonio legnoso) per aumentare la competitività di altre specie importanti, che fanno parte delle comunità forestali di faggio. Con i tagli finali si completa la gestione, quando il novellame è alto da 1 a 2 metri. Tutti i tagli di rinnovazione su aree con giovani soprassuoli già stabiliti devono essere effettuati al di fuori del periodo vegetativo (ZGS, 2021). Nelle aree dove la rinnovazione naturale fallisce, si raccomanda di ripristinare la foresta piantando e arricchendo con piantine di faggio, con l'aggiunta di altre specie

arboree adatte al sito (come querce, acero campestre, altre specie di latifoglie nobili). L'arricchimento con piante dovrebbe essere effettuato solo in piccoli gruppi. La dimensione delle aree per la piantagione dovrebbe essere la più piccola possibile; la struttura a mosaico dei futuri boschi aumenta la loro resilienza alle minacce dei cambiamenti climatici.

Il problema della rinnovazione naturale è che le risorse forestali possono essere vulnerabili, poiché le specie arboree longeve non riescono a adattarsi rapidamente a nuove malattie e parassiti semplicemente tramite la trasmissione di informazioni genetiche attraverso i normali processi evolutivi. Particolarmente problematiche sono le aree danneggiate in cui gli alberi hanno compromesso le parti rigenerative delle loro chiome, che dovrebbero garantire la rinnovazione naturale (ZGS, 2021).

Dal punto di vista selvicolturale, il faggio tende a liberare rapidamente i propri rami, rendendo necessario concentrare il diradamento principalmente sulla rimozione di alberi malformati, danneggiati ed eccessivamente sviluppati (Figura 2.3). Gli alberi del sottobosco non dovrebbero essere rimossi, poiché contribuiscono in modo significativo alla stabilità futura del popolamento (ZGS 2021). È essenziale mantenere la biodiversità delle specie arboree e ridurre la presenza di specie indesiderate, regolando la composizione arborea. Inoltre, si deve prestare particolare attenzione alla stabilità dei popolamenti di faggio, soprattutto sui versanti. Un approccio di diradamento di selezione, che segue i principi selvicolturali tradizionali ma si focalizza su un numero ristretto di alberi selezionati, si dimostra più appropriato. Nella scelta degli alberi da tagliare, la priorità va alla vitalità e alla stabilità, seguite dalla qualità, mentre la distanza tra gli alberi selezionati viene considerata meno. L'intensità della rimozione degli alberi deve essere adattata alle condizioni specifiche del popolamento forestale e alle specie arboree presenti (Sever *et al.*, 2022; Diaci, 2021).

Una trasformazione naturale graduale (ripristino) dei popolamenti di faggio adulti è necessaria solo dove la composizione delle specie arboree è cambiata al punto da compromettere la stabilità. La trasformazione dovrebbe andare verso la direzione del rinnovamento naturale con alberi decidui, in particolare faggio, e tutti gli alberi decidui nobili, comprese ciliegio e tiglio (ZGS 2021).



Figura 2.3. Il diradamento è ancora una parte fondamentale della gestione dei soprassuoli adulti di faggio.

Le principali misure per adattare la gestione forestale delle faggete ai cambiamenti climatici si concentrano sull'adattamento della composizione arborea nei boschi di faggio, sull'aumento della resilienza forestale attraverso strutture forestali diversificate a tutti i livelli, in particolare genetico, mediante misure avanzate di rinnovazione e rimboschimento, e sull'aumento della stabilità mediante misure di cura tempestive (ad es., diradamenti), formazione di strutture forestali multistratificate e selettive e, non da ultimo, monitoraggio e conservazione della biodiversità forestale, a partire dalla diversità genetica (Bajc *et al.*, 2020).



Figura 2.4. Il successo della rinnovazione dei popolamenti di faggio dipende dalle fonti di semi, di qualità e geneticamente diverse.

Per garantire l'adattabilità dei futuri popolamenti ai cambiamenti ambientali, è fondamentale utilizzare materiale riproduttivo forestale geneticamente diversificato. Questo include l'acquisizione di semi da un ampio numero di alberi durante i periodi di fioritura e pasciona, la miscelazione appropriata del materiale riproduttivo forestale e, sulla base di test di provenienza, il trasferimento di diverse provenienze locali tra ambienti ecologici differenti. Inoltre, è essenziale una pianificazione adeguata a medio termine per la conservazione dei semi nelle banche del germoplasma e garantire la costante disponibilità di piantine (Kraigher *et al.*, 2019).

3. Landscape genomics

Cesare Garosi¹, Cristina Vettori^{1,2}, Marko Bajc³, Donatella Paffetti¹

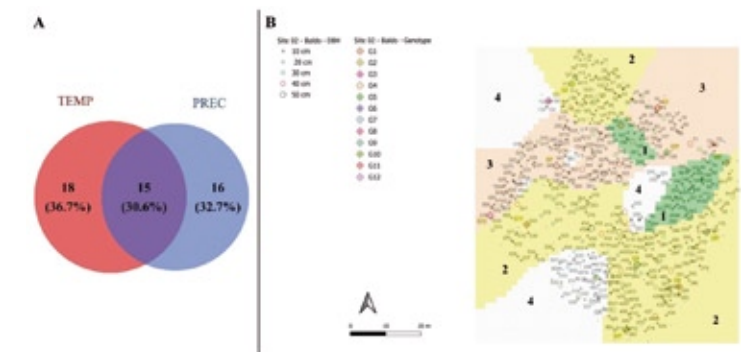
¹ Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Università degli Studi di Firenze (UNIFI), Italia

² Istituto di Bioscienze e Biorisorse (IBBR), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Italia

³ Slovenian Forestry Institute (SFI), Slovenia

In questo studio, abbiamo utilizzato approcci di *Landscape Genomics* per analizzare la diversità genetica neutrale e adattativa al fine di evidenziare possibili profili di adattamento locale nelle popolazioni di faggio analizzate. Abbiamo utilizzato marcatori molecolari neutrali e adattativi in combinazione con dati spaziali ed indicatori bioclimatici. Come risultato del *target re-sequencing* del genoma di *F. sylvatica* L., sono stati genotipizzati circa 1400 SNP (*Single Nucleotide Polymorphism*) in 18 regioni genomiche rilevanti per la risposta ad uno o più stress abiotici (risultati riportati nel *deliverable Action B1: SNP road-map of each study sites*). Attraverso la distribuzione spaziale degli SNP, è stato possibile osservare un numero maggiore di SNP specifici per sito e regione nei siti italiani. Questo potrebbe essere interpretato come un "segno" di adattamento ad un regime bioclimatico mediterraneo che caratterizza la penisola italiana e la distingue dal clima più continentale presente in Slovenia e Croazia. Per identificare i pattern di adattamento locale delle specie target, abbiamo condotto un'analisi GEA (*Genotype-Environment Association*). I risultati dell'analisi hanno mostrato l'esistenza di 5 *cluster* presenti in Italia, Croazia e Slovenia. Inoltre, un dato ancora più interessante è la presenza di un'associazione tra 98 varianti alleliche e i valori medi dei 12 indicatori bioclimatici considerati per queste analisi. La presenza di varianti alleliche associate a specifici siti potrebbe essere correlata ad un modello di adattamento locale piuttosto che regionale. Nell'analisi di associazioni ambientali (EAA, *Environmental Association Analysis*) è importante tenere conto della struttura genetica spaziale (Rellstab *et al.*, 2015), poiché la struttura genetica spaziale può produrre modelli simili a quelli previsti tenendo conto dei soli processi non neutrali (Excoffier e Ray, 2008; Excoffier *et al.*, 2009; Sillanpää, 2011). Per questo, la struttura genetica spaziale delle popolazioni è stata analizzata utilizzando due approcci di *clustering* bayesiano: uno che fa uso del software STRUCTURE al fine di determinare il numero di sottopopolazioni presenti (Pritchard *et al.*, 2000) e l'altro che fa uso del software GENELAND (Guillot 2008) per la spazializzazione delle stesse. In generale, abbiamo osservato un elevato numero di varianti alleliche specifiche, nei siti non gestiti e nelle foreste vetuste. La presenza di un alto numero di SNP associati alle variabili ambientali in questi siti potrebbe essere correlata alla struttura genetica spaziale riportata per queste popolazioni (Aravanopoulos, 2018; Paffetti *et al.*, 2012; Stiers *et al.*, 2018). Alcuni studi hanno osservato che siti come questi (faggete con le stesse tipologie di gestione) sono generalmente caratterizzati da

Figura 3.1. Risultati dell'analisi LFMM (*Latent Factor Mixed Models*) e mappa della distribuzione dei genotipi del Sito 02 - Bosco di Baldo. (A) Il diagramma di Venn mostra la sovrapposizione tra SNP associati a indicatori bioclimatici legati alla temperatura e alle precipitazioni, come risultato dell'analisi LFMM. (B) Distribuzione spaziale del genotipo e organizzazione spaziale in 3 *cluster* (risultati GENELAND). La mappa mostra gli individui presenti nel sito di studio (cerchio con bordo nero) e gli individui sequenziati. Questi ultimi sono caratterizzati da cerchi colorati in base al genotipo osservato. Colori uguali significano genotipi identici.



una complessa struttura genetica spaziale, caratterizzata da un alto numero di *cluster* familiari. Questa grande variabilità può aumentare la probabilità di comparsa di nuove varianti alleliche che potrebbero arricchire il potenziale adattativo di questa specie per i cambiamenti climatici attuali e futuri. Una situazione simile è stata osservata in popolamenti gestiti con regimi di gestione a ridotto impatto: taglio a scelta colturale. Il numero di varianti alleliche specifiche per ciascun sito è elevato. Il Bosco di Baldo (Sito O2) presenta il maggior numero di SNP associati a variabili ambientali (Figura 3.1). L'apertura di gap nella copertura forestale e la complessità della struttura che caratterizza questi popolamenti potrebbero favorire una maggiore probabilità di ricombinazione genica tra genotipi appartenenti a *cluster* familiari differenti. Questi profili sono simili a quelli riscontrati nelle foreste vetuste e nelle popolazioni non gestite. Pertanto, il potenziale della gestione selvicolturale a basso impatto, nel conservare la diversità genetica adattativa, appare promettente. Questi dati sono ulteriormente supportati dall'analisi degli altri siti di faggio nello studio.

I tipi di gestione meno impattanti, come il taglio a scelta selvicolturale, sembrano riportare una popolazione con un elevato numero di varianti alleliche associate alle variabili ambientali. Risultati simili sono stati osservati in popolamenti non gestiti e nelle foreste vetuste. I risultati riportati in questo studio potrebbero svolgere un ruolo essenziale nella pianificazione della gestione selvicolturale, dove la conoscenza della variabilità genetica da una prospettiva adattativa potrebbe aiutare i processi decisionali. Inoltre, queste conoscenze potrebbero essere utilizzate anche in previsione di interventi di migrazione assistita. Questo è importante non solo per preservare le attuali risorse genetiche forestali, ma anche per arricchire i popolamenti esistenti con genotipi potenzialmente favorevoli.

4. Soil biodiversity

Tanja Mrak, Marko Bajc, Rok Damjanić, Natalija Dovč, Tine Grebenc, Tijana Martinović, Nataša Šibanc, Tina Unuk Nahberger, Hojka Kraigher

Slovenian Forestry Institute (SFI), Slovenia

La componente vitale del suolo, derivante dall'interazione delle proprietà fisiche, chimiche e biologiche del suolo, è fondamentale per sostenere la crescita delle foreste e i servizi ecosistemici. Un'alta biodiversità del suolo supporta la flessibilità funzionale per l'adattamento ai cambiamenti sconosciuti che possono verificarsi in futuro.

Gli apici radicali ectomicorrizici (Figura 4.1) supportano popolazioni specifiche e diverse di batteri e microfunghi, inclusi batteri che supportano le simbiosi micorriziche. Le radici degli alberi ospitano anche endofiti settati scuri e funghi decompositori del legno (Baldrian, 2017). Oltre ai miceli micorrizici e agli organismi associati, il suolo ospita funghi e batteri saprotrofi (Baldrian, 2017). Una parte considerevole del microbiota del suolo, inclusi molti invertebrati del suolo, dipende dal flusso di carbonio fotosintetico dalle radici degli alberi verso il suolo (Prescott e Grayston, 2023).



Figura 4.1. I funghi ectomicorrizici sono simbionti degli alberi che ne supportano la crescita fornendo accesso a nutrienti e acqua in cambio del carbonio fotosintetico.

Nelle foreste gestite, la quantità di carbonio fotosintetico allocata nel sottosuolo per radici fini e microrganismi associati alle radici, diminuisce (Noormets *et al.*, 2015). Di conseguenza, con l'aumentare dell'intensità della gestione, ci aspettiamo cambiamenti nella diversità (alfa e beta) del microbiota delle radici e del suolo. L'obiettivo è comprendere quale intensità di gestione mantenga un'elevata biodiversità del suolo. Nel progetto LIFE SySTEMiC, sono stati valutati gli effetti a breve termine del taglio a scelta colturale, e gli effetti a lungo termine di quattro sistemi selvicolturali, sulla biodiversità del suolo.

Gli effetti a breve termine della rimozione di alberi singoli hanno riportato una diminuzione della ricchezza dei taxa (numero di taxa differenti, cioè specie) e un indice di diversità di Shannon inferiore (un indice che considera il numero di specie e la loro abbondanza relativa) dei funghi ectomicorrizici sviluppati sulle radici degli alberi rimanenti. Tuttavia, la rimozione di alberi singoli non ha influenzato la ricchezza e la diversità della comunità fungina totale. D'altro canto, le comunità fungine sono cambiate in composizione, con un aumento dei funghi saprotrofi, probabilmente a causa dell'aumento della necromassa (materia organica morta, ad es. radici morte, micelio micorrizico e tutti gli organismi che dipendono da essi) e una diminuzione dell'abbondanza relativa dei funghi ectomicorrizici. Il declino dei funghi ectomicorrizici è stato molto probabilmente dovuto alla rimozione dei loro partner fotosintetici e alla conseguente diminuzione del flusso di carbonio al sottosuolo.

Lo studio degli effetti a lungo termine ha riguardato foreste non gestite, gestioni basate su tagli a scelta colturale, tagli successivi a gruppi ed uniformi. In generale, le foreste non gestite, note per le loro elevate quantità di legno morto, e le foreste con gestione basata sul taglio a scelta, ma con una considerevole quantità di legno morto (circa 25 m³/ha), ospitano la maggiore ricchezza fungina. I funghi ectomicorrizici sono stati osservati essere più presenti nei sistemi a scelta colturale, molto probabilmente a causa della maggiore complessità della struttura forestale combinata con la rimozione di singoli alberi. Secondo Twieg *et al.*, (2007), la maggiore ricchezza di specie di funghi ectomicorrizici si verifica in strutture chiuse dovute alla presenza di chiome. Questa fase è caratterizzata dai tassi di crescita degli alberi più elevati e dalla massima area fogliare, corrispondente a una maggiore allocazione di carbonio al suolo, alle radici e ai simbionti radicali. Gli altri due sistemi selvicolturali sono paragonabili alle foreste non gestite, in termini di ricchezza di funghi ectomicorrizici. Diversi studi sottolineano l'importanza di preservare gli alberi in gruppi, o singolarmente, per la cosiddetta silvicoltura a radici continue. In tali sistemi, gli alberi singoli non dovrebbero essere distanti più di 15 metri l'uno dall'altro per garantire che la biodiversità del sottosuolo sia sostenuta (Prescott e Grayston, 2023).

Mentre i sistemi selvicolturali hanno un impatto sulle comunità fungine (Figura 4.2), il loro effetto è spesso offuscato da influenze più forti della posizione e del substrato roccioso quando questi fattori sono considerati. Gli effetti significativi di queste variabili suggeriscono che le condizioni ambientali locali e le differenze regionali sono determinanti cruciali della diversità fungina e della struttura della comunità. Di conseguenza, nonostante le pratiche di gestione siano fondamentali, dovrebbero essere considerate insieme a questi altri fattori influenti per una conservazione e gestione efficaci della biodiversità fungina. Anche se non significativa, il grafico mostra una tendenza al declino della ricchezza delle comunità fungine.

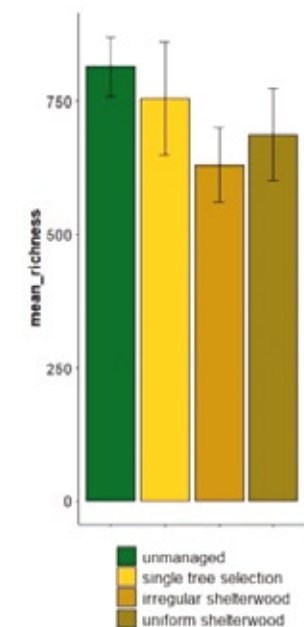


Figura 4.2. Ricchezza media fungina OTU (*Operational Taxonomic Unit*) in relazione a differenti regimi selvicolturali.

5. GenBioSilvi model

Roberta Ferrante^{1,2}, Cesare Garosi¹, Cristina Vettori^{1,3}, Davide Travaglini¹, Donatella Paffetti¹

¹ Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Università degli Studi di Firenze (UNIFI), Italia

² NBFC, National Biodiversity Future Center, Italy

³ Istituto di Bioscienze e Biorisorse (IBBR), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Italy

Per osservare la biodiversità negli ecosistemi forestali, abbiamo analizzato diversi indicatori, tra cui la diversità genetica, la struttura forestale, il legno morto, la diversità del suolo ed il numero di microhabitat, utilizzando i dati raccolti nelle varie azioni del progetto. Nei popolamenti di *Fagus sylvatica* L., abbiamo osservato una conservazione e/o un incremento nei soprassuoli non gestiti e nelle foreste vetuste. I siti gestiti con taglio a scelta colturale hanno mostrato livelli di biodiversità simili ai siti precedenti. L'analisi della diversità genetica utilizzando SSRs (*Simple Sequence Repeats*) ha riportato come le foreste vetuste ed i siti gestiti con taglio a scelta colturale sono caratterizzate da strutture genetiche spaziali complesse, a differenza dei popolamenti gestiti con sistemi di tagli successivi uniformi e tagli successivi a gruppi. Sono stati identificati numerosi SNPs (*Single Nucleotide Polymorphisms*) correlati alle condizioni ambientali, in particolare nel bosco di Baldo (Sito 02), che presenta una struttura genetica spaziale complessa. Dall'analisi dei dati dendrometrici, abbiamo osservato che la miglior struttura forestale è una struttura multi-stratificata disetanea, osservata nel bosco di Baldo (Sito 02), Fonte Novello (Sito 11) e Rajhenavski Rog (Sito 25). I siti non gestiti presentano il più alto volume di legno morto ed il numero più alto di microhabitat saproxilici, soprattutto nelle foreste vetuste. La maggior parte dei siti sono boschi puri di faggio con alcune specie sporadiche, che dovrebbero essere preservate. La diversità del suolo è più elevata nei boschi vetusti e nei siti con gestione a ridotto impatto. Abbiamo ipotizzato che la migliore pratica di gestione che mantiene alta la biodiversità sia il taglio a scelta colturale, che imita le dinamiche presenti nelle foreste vetuste e promuove la rinnovazione naturale. Questo approccio favorisce la dispersione del

Tabella 5.1. Descrizione degli indicatori selezionati per valutare lo stato dei popolamenti.

Categorie	Indicatori	Descrizione
Struttura forestale	Deviazione standard (SD) dei diametri a petto d'uomo (DBH)	Variazione dei diametri degli alberi presenti nello stand analizzato
	% di piante nello strato di rinnovazione (con DBH compreso tra 2,5 e 10 cm)	Presenza di rinnovazione naturale da seme della specie target
	Curva di distribuzione in classi di diametro	Complessità di struttura verticale ed orizzontale
Struttura verticale (distribuzione in altezza degli alberi)		
Legno morto	Presenza di legno morto in piedi	Descrizione della presenza di legno morto in piedi e a terra
	Detriti legnosi grossolani	
Diversità di specie	Ricchezza di specie	Presenza di altre specie arboree nel sito
	Percentuale di rinnovazione della specie non-target	
Microhabitat arborei	Percentuali di cavità presenti	Presenza di microhabitat

polline, la diversità genetica e la comparsa di nuove varianti alleliche cruciali per l'adattamento ai cambiamenti climatici. Abbiamo, quindi, sviluppato un modello che si concentra su indicatori chiave come il legno morto, i microhabitat e la diversità delle specie per rappresentare la biodiversità e guidare le pratiche di gestione sostenibile. I dati sulla diversità genetica e del suolo sono stati esclusi dal modulo a causa delle difficoltà di osservazione (Tabella 5.1).

Di seguito l'esempio della scheda che mostrava il modulo compilato sulla base dei dati effettivi ottenuti dal Sito 02 - Bosco di Baldo (Figura 5.1).

SCHEDA DI VALUTAZIONE GenBioSilvi			
Riferimenti del sito (località, posizione, ecc.)	Sistema selvicolturale attualmente applicato	Indicazioni per una Gestione Forestale Sostenibile sotto Cambiamenti Climatici	
Il "Bosco di Baldo" è una proprietà forestale privata gestita dalla Famiglia Baldo, tramandata di padre in figlio dal XIX secolo. Parte dell'area di studio ricade in una ZPS della Rete Natura 2000 denominata "Pian degli Ontani" (codice IT5130004). La proprietà si estende su 10 ha a quota compresa fra 1000 e 1200 m s.l.m.; il substrato è composto da rocce silicatiche ed il suolo è bruno-acido.	Il Bosco di Baldo è una fustaia di faggio disetanea gestita con una forma di taglio a scelta colturale effettuato secondo le tradizioni locali; il taglio è effettuato ogni 5-6 anni e le piante da tagliare sono selezionate a seconda delle dimensioni, delle caratteristiche tecnologiche del fusto e delle esigenze della rinnovazione.	Punteggio finale 10: il bosco analizzato è in eccellente stato in termini di complessità della struttura forestale e in buono stato in termini di biodiversità Nessun intervento richiesto	
Indicatori di struttura forestale	Punteggio indicatore-specifico	Implicazioni sulla struttura forestale orizzontale e verticale	
Deviazione standard (SD) dei diametri a petto d'uomo (DBH)	Score 1 (DBH SD < 5) X Score 2 (5 ≥ DBH SD ≤ 15) Score 3 (DBH SD > 15)	X Score 1 (Struttura forestale semplificata senza rinnovazione) - da 4 a 6 Score 2 (Struttura forestale semplificata con rinnovazione o struttura forestale complessa senza rinnovazione) - da 7 a 8 Score 3 (Struttura forestale complessa con rinnovazione) - da 9 a 11 Score 4 (Struttura complessa con rinnovazione in tutta l'area) - da 12 a 13	
% di piante nello strato di rinnovazione (con DBH compreso tra 2,5 e 10 cm)	Score 1 (% Rinn < 15) Score 2 (15 ≥ % Rinn < 30) Score 3 (30 ≥ % Rinn < 50) X Score 4 (% Rinn ≥ 50)		
Curva di distribuzione in classi di diametro	Score 1 (Uni-modale) Score 2 (Bi modale) X Score 3 (J rovesciata)		
Struttura verticale (distribuzione in altezza degli alberi)	Score 1 (Mono-stratificato) Score 2 (Bi-stratificato) X Score 3 (Multi-stratificato)		
13. Punteggio indicatori di struttura forestale			
Indicatori di biodiversità	Punteggio indicatore-specifico		Implicazioni sulla struttura forestale
Indicatori legno morto			
Presenza di legno morto in piedi	Score 1 (assenza di legno morto in piedi) X Score 2 (presenza di legno morto in piedi)	X core 1 (Assenza di legno morto) - 1 Score 2 (Presenza di legno morto in piedi e assenza di detriti) - 3 core 3 (Presenza di legno morto in piedi e presenza di detriti) - 4	
Detriti legnosi grossolani	X Score 1 (assenza di detriti legnosi) Score 2 (presenza di detriti legnosi)		
Indicatori di diversità di specie			
Presenza/assenza di altre specie	X Score 1 (assenza di altre specie) Score 2 (presenza di altre specie)	X Score 1 (Sito monospecifico) - 2 Score 2 (Specie sporadiche con poca o assente rinnovazione) - 3 Score 3 (Specie sporadiche con presenza di rinnovazione) - da 4 a 6	
% di rinnovazione di altre specie oltre la specie target (diametro da 2,5 a 10 cm)	X Score 1 (% Rinn < 15) Score 2 (15 ≥ % Rinn < 30) Score 3 (30 ≥ % Rinn < 50) Score 4 (% Rinn ≥ 50)		
Indicatori di microhabitat arborei			
% di alberi con cavità	X Score 1 (% piante < 15) Score 2 (15 ≥ % Rinn < 50) Score 3 (% Rinn ≥ 50)	X Score 1 (Assenza o basso numero di microhabitat) - 1 Score 2 (Presenza di microhabitat) - 2 Score 3 (Alto numero di microhabitat presenti) - 3	
6. Punteggio indicatori di struttura forestale			
10. Punteggio complessivo			

Figura 5.1. Scheda di valutazione del Sito 02 - Bosco di Baldo.

6. Raccomandazioni per una gestione forestale sostenibile

Hojka Kraigher¹, Kristina Sever², Davide Travaglini³, Cesare Garosi³, Cristina Vettori^{3,4}, Donatella Paffetti³, Roberta Ferrante^{3,5}, Tanja Mrak¹, Andrej Breznikar²

¹ Slovenian Forestry Institute (SFI), Slovenia

² Slovenia Forest Service (SFS), Slovenia

³ Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Università degli Studi di Firenze (UNIFI), Italia

⁴ Istituto di Bioscienze e Biorisorse (IBBR), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Italia

⁵ NBFC, National Biodiversity Future Center, Italia

Raccomandazioni per una gestione forestale sostenibile:

- I sistemi selvicolturali per i popolamenti di faggio devono essere scelti con attenzione per promuovere approcci il più possibile simili alla natura e imitare i processi naturali dei boschi di faggio.
- I sistemi selvicolturali a basso impatto sono più favorevoli alla conservazione della variabilità genetica delle foreste di faggio, come il taglio a scelta colturale e i tagli successivi a gruppi a bassa scala.
- Il faggio è una specie tollerante l'ombra, caratterizzata da una crescita lenta nella fase giovanile e un incremento del volume che raggiunge il suo massimo solo in età avanzata, senza mostrare segni di declino fino a tarda età.
- Il faggio è relativamente resistente alla maggior parte delle malattie, ma è suscettibile a gelate tardive primaverili, danni alla superficie del tronco causati dalla luce solare intensa e disastri naturali come grandine, rottura da neve e tempeste di vento.
- Attraverso la rinnovazione naturale dei popolamenti di faggio, viene preservata l'adattabilità degli alberi alle condizioni specifiche dei siti di crescita e alla dinamica naturale, pertanto i popolamenti di faggio dovrebbero essere rinnovati naturalmente.
- Il metodo più comune per la rinnovazione dei popolamenti di faggio avviene sotto copertura, dove la rinnovazione si insedia durante la sequenza di tagli, principalmente come parte del sistema a tagli successivi a gruppi.
- La rinnovazione nei gap dovrebbe iniziare dopo l'anno di pasciona, accompagnata dalla preparazione del popolamento per la rinnovazione naturale mediante il taglio degli alberi di sottobosco e copertura vegetale.
- Quando la rinnovazione naturale fallisce, è consigliabile ripristinare la foresta con piantagioni di faggio in piccoli gruppi, mescolati con altre specie arboree adatte al sito.
- È fondamentale prestare particolare attenzione alla stabilità dei popolamenti di faggio, specialmente sui versanti.
- Una soluzione molto adatta per i popolamenti di faggio è il diradamento selettivo, che si concentra su un numero ristretto di alberi target selezionati nel popolamento.
- Le principali misure per adattare la gestione forestale dei popolamenti di faggio ai cambiamenti climatici includono l'adattamento della composizione arborea, un aumento della resilienza forestale attraverso strutture forestali diversificate a tutti i livelli, specialmente genetico, tramite avanzate misure di rinnovazione e rimboschimento, e il miglioramento della loro stabilità mediante misure di trattamento tempestive e adattate.
- La *Landscape Genomics* è essenziale per valutare la diversità genetica neutrale e adattativa per comprendere la capacità di adattamento delle popolazioni e guidare la gestione forestale.
- La conoscenza della variabilità genetica da una prospettiva adattativa può migliorare le decisioni di gestione forestale e anticipare gli sforzi di migrazione assistita. Questo è cruciale per preservare le risorse genetiche forestali e arricchire i popolamenti con genotipi potenzialmente più adatti, garantendo la resilienza e la diversità genetica delle foreste.
- Per i popolamenti di *Fagus sylvatica* L., raccomandiamo pratiche di gestione a basso impatto, come il diradamento selettivo.

- Il monitoraggio e lo studio della biodiversità in tutte le sue componenti sono cruciali per comprendere la resilienza degli ecosistemi forestali. Per questo motivo, è importante raccogliere informazioni riguardanti la diversità genetica, la struttura forestale, il legno morto, la diversità del suolo e i microhabitat.
- Per i popolamenti di *Fagus sylvatica* L. che hanno mostrato caratteristiche simili a quelle incluse nel nostro studio, suggeriamo l'uso di un tipo di gestione che aumenti la complessità del popolamento forestale con una struttura verticale multistratificata che faciliti la dispersione del polline, promuova la diversità genetica e aumenti le nuove varianti alleliche cruciali per l'adattamento ai cambiamenti climatici. Nel nostro studio, queste caratteristiche si trovano nei popolamenti gestiti secondo il diradamento selettivo.
- L'utilizzo del modello GenBioSilvi potrebbe supportare i gestori e i tecnici forestali nel valutare lo stato attuale della biodiversità del popolamento e fornire indicazioni per una gestione sostenibile.
- Per garantire l'adattabilità dei futuri popolamenti ai cambiamenti ambientali, è necessario utilizzare materiale forestale riproduttivo geneticamente diversificato, ottenendo semi da un gran numero di alberi durante i periodi di forte fioritura e fruttificazione, mescolando il materiale riproduttivo e, basandosi su test di provenienza, trasferendo, seguendo un criterio scientifico le provenienze da ambienti ecologici diversi, principalmente dalle regioni sud-orientali verso località nord-occidentali.



Bibliografia

- Aravanopoulos, FA. (2018), Do Silviculture and Forest Management Affect the Genetic Diversity and Structure of Long-Impacted Forest Tree Populations? *Forests*. 9(6):355. <https://doi.org/10.3390/f9060355>
- Bajc M., Aravanopoulos F., Westergren M., Fussi B., Kavaliauskas D., Alizoti P., Kiourtsis F., Kraigher H. (eds.) (2020). *Manual for Forest Genetic Monitoring*. Slovenian Forestry Institute, Silva Slovenica Publishing Center. Ljubljana.
- Baldrian P. (2017). Forest microbiome: diversity, complexity and dynamics, *FEMS Microbiology Reviews*, 41(2): 109-130.
- Calama R., Puértolas J., Madrigal G., Pardos M. (2013). Modeling the environmental response of leaf net photosynthesis in *Pinus pinea* L. natural regeneration. *Ecological Modelling*, 251: 9- 21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.11.029>.
- Diaci J. (2006). Gojenje gozdov: pragozdovi, sestoji, zvrsti, načrtovanje, izbrana poglavja. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, 348 p.
- Diaci J., Roženberger D., Fidej G., Arnič D. (2021). Sodobna izhodišča redčenj: povezovanje načel izbiralnega redčenja, situacijskega redčenja, redčenja šopov in skupin ter redčenja spremenljive gostote. *Gozdarski vestnik*, 79, št. 9: 299-311.
- Excoffier L, Ray N. (2008). Surfing during population expansions promotes genetic revolutions and structuration. *Trends Ecol Evol*. Jul;23(7):347-51. doi: 10.1016/j.tree.2008.04.004. PMID: 18502536.
- Excoffier, L., Hofer, T. & Foll, M. (2009), Detecting loci under selection in a hierarchically structured population. *Heredity* 103, 285-298. <https://doi.org/10.1038/hdy.2009.74>
- Guillot G., Mortier F., Estoup A. (2008). Analysing georeferenced population genetics data with Geneland: a new algorithm to deal with null alleles and a friendly graphical user interface. *Bioinformatics* 24:1406-1407. <http://dx.doi.org/10.1093/bioinformatics/btn136>.
- Kraigher H., Bajc M., Božič G., Brus R., Jarni K., Westergren M. (2019). Forests, forestry and the Slovenian forest genetic resources programme. In: *Forests of Southeast Europe under a changing climate* (Šijačić-Nikolić M., Milovanović J., Nonić M. eds.). Springer International Publishing. pp. 29-47. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95267-3_3.
- Matić S. (ed.) (2003). Obična bukva (*Fagus sylvatica* L.) u Hrvatskoj [Common beech (*Fagus sylvatica* L.) in Croatia]. Akademija Šumarskih Znanosti (Academy of Forest Science), Zagreb, Croatia, 855 p.
- Nocentini S. (2009). Structure and management of beech (*Fagus sylvatica* L.) forests in Italy. *iForest* 2: 105-113. doi: 10.3832/ifor0499-002.
- Paffetti, D., Travaglini, D., Buonamici, A., Nocentini, S., Vendramin, G., Giannini, R., Vettori, C. (2012), The influence of forest management on beech (*Fagus sylvatica* L.) stand structure and genetic diversity, *Forest Ecology and Management*, Volume 284, Pages 34-44, ISSN 0378-1127. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.07.026>.
- Pritchard JK, Stephens M, Donnelly P. (2000), Inference of population structure using multilocus genotype data. *Genetics*. Jun;155(2):945-59. doi: 10.1093/genetics/155.2.945. PMID: 10835412; PMCID: PMC1461096.
- Prescott C.E., Grayston S.J. (2023). Tamm review: Continuous root forestry—Living roots sustain the belowground ecosystem and soil carbon in managed forests, *Forest Ecology and Management*, 532: 120848.
- Sever K., Fidej G., Breznikar A., Roženberger D., Rantaša B. (2022). *Sodobna nega gozda - zgbanka*. Zavod za gozdove Slovenije, Ljubljana, Slovenija, 2 p.
- Westergren *et al.* (2020) Guidelines for genetic monitoring of European beech (*Fagus sylvatica* L.). In: Bajc *et al.* (eds) *Manual for Forest Genetic Monitoring*. Slovenian Forestry Institute: Silva Slovenica Publishing Centre, Ljubljana.
- Wuehlisch G. (2008). EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for European beech (*Fagus sylvatica*). Bioversity International, Rome, Italy, 6 p.
- ZGS (2021). *Usmeritve za gospodarjenje z gozdovi po skupinah gozdnih rastišnih tipov*. Internal publication. Slovenia Forest Service, Ljubljana, Slovenija, 236 p.





Beneficiary's name

Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry (DAGRI), University of Florence (UNIFI), Italy (Coordinator)
Croatian Forest Research Institute (CFRI), Croatia
D.R.E.A.M., Italy
Ente Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciuccoli (MSRM), Italy
Slovenian Forestry Institute (SFI), Slovenia
Slovenia Forest Service (SFS), Slovenia
Unione dei Comuni Montani del Casentino (UCCAS), Italy

Contributors

DAGRI-UNIFI: Cristina Vettori (IBBR-CNR), Roberta Ferrante, Cesare Garosi, Francesco Parisi, Davide Travaglini, Donatella Paffetti
CFRI: Sanja Bogunović, Mladen Ivanković, Anđelina Gavranović Markić, Barbara Škiljan, Zvonimir Vujnović, Miran Lanščak
MSRM: Francesca Logli
SFI: Marko Bajc, Rok Damjanić, Natalija Dovč, Tine Grebenc, Tijana Martinović, Tanja Mrak, Tina Unuk Nahberger, Nataša Šibanc, Marjana Westergren, Hojka Kraigher
SFS: Andrej Breznikar, Kristina Sever

Project duration

01/09/2019 - 31/08/2024

Total cost and EU contribution

Total project budget: 2,976,245 €
LIFE Funding: 1,635,709 € (55% of total eligible budget)

Project's contact details

Coordinator and scientific responsible of the project
Donatella Paffetti - DAGRI-UNIFI
Via Maragliano, 77
50144 Firenze
Italy
donatella.paffetti@unifi.it

Project Manager

Cristina Vettori - IBBR-CNR
Via Madonna del Piano, 10
50019 Sesto Fiorentino (FI)
Italy
cristina.vettori@cnr.it

Communication Manager

Davide Travaglini - DAGRI-UNIFI
Via San Bonaventura, 13
50145 Firenze
Italy
davide.travaglini@unifi.it

Website

<https://www.lifesystemic.eu>



The LIFE SySTEMiC project has received funding from the LIFE program of the European Union.

Details on how to cite the content

The contents of book is under the Licensed Rights bound by the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International Public License ("Public License") (for details see <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode>).

Text, photos, images, illustrations

You are allowed to use the text, photos, images, and illustration reported within the Guidelines for Sustainable Forest Management of Beech (*Fagus sylvatica* L.), but acknowledgements to LIFE SySTEMiC project must be provided reporting the link to website of the project in the case of presentations/publications, and cited as Guidelines for Sustainable Forest Management of Beech (*Fagus sylvatica* L.), pages 22, (www.lifesystemic.eu). ISBN: 978889578858.



Graphics Arts & altro Grafica



LIFEsystemic © 2020 | All Rights Reserved

