



Lista di Criteri & Indicatori per il monitoraggio degli impatti delle pratiche selvicolturali sugli ecosistemi forestali degradati

**Documento realizzato con il contributo FEASR nell'ambito del
Programma Rete Nazionale della PAC 2025-2027**

Progetto “Valorizzazione dei servizi ecosistemici attraverso il ripristino
degli ecosistemi forestali degradati (RESTORE)” (CR.04.08.)

Autorità di gestione:

Ministero dell'agricoltura, della sovranità alimentare e delle foreste
Direzione Generale Sviluppo Rurale
Direttore Generale: Simona Angelini

Responsabile scientifico: Alessandro Paletto, Daniele Giordano

Autori: Giorgia Di Domenico, Sofia Baldessari, Claudia Becagli, Isabella
De Meo, Daniele Giordano, Alessandro Paletto

Data: 01 ottobre 2026

Impaginazione e grafica:

Roberta Ruberto e Mario Cariello

Introduzione

Il documento raccoglie gli indicatori quantitativi utili a valutare l'effetto delle misure di ripristino degli ecosistemi forestali degradati sui servizi ecosistemici (SE), nel quadro dell'attuazione del Regolamento (UE) 2024/1991 sul ripristino della natura (Nature Restoration Regulation).

Gli indicatori sono organizzati secondo le quattro categorie di servizi ecosistemici della classificazione MEA/CICES (servizi di approvvigionamento, di regolazione, di supporto e culturali) e distinti in due gruppi: gli indicatori biofisici, che misurano le componenti strutturali e funzionali dell'ecosistema e la sua capacità di erogare il servizio, e gli indicatori economici, che ne esprimono il valore in termini monetari. Per ciascun indicatore è riportata la formula di calcolo, accompagnata dalla legenda dei simboli utilizzati.

Indicatori biofisici

SERVIZI DI APPROVVIGIONAMENTO

VOLUME DI PROVVIGIONE LEGNOSA: Volume totale di legname accumulato nel popolamento, ricavabile dai dati dell'Inventario Forestale Nazionale (IFN), tramite tavole di cubatura/rendimento o equazioni allometriche.

INCREMENTO MEDIO ANNUO (IMA): Tasso di accrescimento medio del volume legnoso calcolato lungo il periodo di accrescimento del popolamento.

Equazione	in cui:
$IMA = \frac{V_t}{t}$	V_t : incremento di volume cumulato (m ³ /ha) t : età del popolamento (anni)

RESA DI BIOMASSA RACCOGLIBILE: Stima della quantità di prodotti forestali non legnosi raccogliibili all'interno del popolamento con rilievi di raccolta sul campo o campionamento su particelle.

SERVIZI DI REGOLAZIONE

STOCK DI CARBONIO FORESTALE: Quantità complessiva di carbonio stoccato nella biomassa arborea ipogea.

Equazione	in cui:
$C = V \times WBD \times BEF \times CF$	V : volume del fusto (m ³ /ha) WBD : densità basale del legno BEF : fattore di espansione della biomassa CF : frazione di carbonio

COPERTURA/USO SUOLO: Indicatore spaziale e trasversale relativo alla destinazione d'uso e al tipo di vegetazione, calcola tramite elaborazioni e classificazioni GIS/telerilevamento.

LEAF AREA INDEX (LAI): Indicatore biofisico e strutturale della chioma che misura l'area fogliare complessiva per unità di superficie di suolo proiettata.

Equazione	in cui:
$LAI = \frac{A_f}{A_g}$	A_f : area fogliare totale, superficie monofacciale (m ²) A_g : superficie di suolo proiettata (m ²)

VARIAZIONE DELLO STOCK DI CARBONIO NELLA BIOMASSA EPIGEA/IPOGEA: Variazione netta dello stoccaggio di carbonio della biomassa sopra e sotto il suolo a seguito di interventi di ripristino

Equazione	in cui:
$\Delta C_{stock} = k \cdot [(1 - b) \cdot (V_{i,restore} - V_{i,baseline}) \cdot BEF \cdot WBD \cdot (1 + R)]$	k : fattore di conversione biomassa-carbonio b : frazione di biomassa radicale $V_{i,restore}$: volume legnoso post-ripristino $V_{i,baseline}$: volume legnoso di riferimento (baseline) BEF : fattore di espansione della biomassa WBD : densità basale del legno R : fattore di correzione per la componente radicale

TEMPERATURA: Effetto di mitigazione termica locale e condizionamento del microclima esercitato dalla copertura forestale.

Equazione	in cui:
$\Delta T = T_{oa} - T_c$	T_{oa} : temperatura misurata in area aperta (°C) T_c : temperatura misurata sotto chioma (°C)

PERDITA DI SUOLO, A (RUSLE): Quantità di suolo protetto dal rischio di erosione idrica grazie al mantello vegetale.

Equazione	in cui:
$A = R \times K \times LS \times C \times P$	A : perdita di suolo (t ha ⁻¹ anno ⁻¹) R : erosività della pioggia K : erodibilità del suolo LS : fattore lunghezza-pendenza del versante C : fattore di copertura vegetale P : fattore delle pratiche di supporto

PROBABILITÀ DI RISCHIO DI EROSIONE (ERISK): Stima della probabilità che si verifichino fenomeni erosivi nel popolamento; logistico a livello di popolamento espresso come probabilità (E_{risk}) in funzione di area basimetrica, altezza, pendenza, percentuale di piante morte

Equazione	in cui:
$E_{risk} = (1 + e^{-[-12,356 + 0,04BA + 0,301H + 0,134dead\% + 0,13slope]})^{-1}$	E_{risk} : probabilità di erosione nel popolamento (0–1) BA : area basimetrica ($m^2 ha^{-1}$) H : altezza media degli alberi (m) dead% : percentuale di alberi morti in piedi slope : inclinazione del terreno in gradi, calcolata dal DEM (Modello Digitale del Terreno)

COEFFICIENTE DI DEFLUSSO (SCS CURVE NUMBER): Capacità del sistema bosco-suolo di trattenere l'acqua piovana e mitigare il deflusso superficiale; la stima dell'afflusso efficace (deflusso diretto) viene effettuata tramite il metodo SCS Curve Number.

Equazione	in cui:
$S = \frac{25400}{CN} - 254$ $I_a = 0,2 \cdot S$ $Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$ $C_r = \frac{Q}{P}$	Q : deflusso superficiale (mm) P : precipitazione totale affluita sul bacino (mm) CN : Curve Number, tabellato in funzione della copertura del suolo e del gruppo idrologico del terreno S : ritenzione idrica potenziale massima del suolo (mm) I_a : perdite iniziali (mm) C_r : coefficiente di deflusso

COEFFICIENTE DI SNELLEZZA (SC): rapporto tra altezza totale e diametro a petto d'uomo, usato per valutare la stabilità e il rischio di schianto da vento. I valori critici di stabilità, in base alla Scala di Burschel e Huss:

Equazione	in cui:
$SC = \frac{H}{DBH}$	H : altezza totale dell'albero (m) DBH : diametro a petto d'uomo (cm)

SERVIZI DI SUPPORTO

INDICE DI GINI: quantifica l'eterogeneità strutturale del popolamento, da 0 (perfetta uguaglianza) a 1 (massima disuguaglianza/eterogeneità)

Equazione	in cui:
$G = 1 - \sum_{i=1}^k [(ba_{i-1} + ba_i)(n_i - n_{i-1})]$	alberi ordinati per diametro crescente ba_i, ba_{i-1} : frazione cumulata (0–1) dell'area basimetrica degli alberi nelle classi diametriche fino alla i-esima (i–1)-esima; per $i = 1$, $ba_0 = 0$ n_i, n_{i-1} : frazione cumulata (0–1) del numero di alberi nelle classi diametriche fino alla i-esima (i–1)-esima; per $i = 1$, $n_0 = 0$ k : numero totale di classi diametriche

INDICE DI HEGYI: Misura la competizione spaziale individuale (dipendente dalla distanza) esercitata dagli alberi vicini su un albero bersaglio. L'indice aumenta all'aumentare delle dimensioni dei competitori rispetto all'albero bersaglio e al diminuire della loro distanza da esso.

Equazione	in cui:
$CI_i = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{d_i L_{ij}}$ $CI = \sum_{i=1}^N CI_i$	CI_i : indice di competizione di Hegyi per l'albero bersaglio i j : alberi concorrenti entro il raggio R n : numero di alberi concorrenti dell'albero bersaglio i d_i : diametro dell'albero bersaglio d_j : diametro dell'albero concorrente L_{ij} : distanza tra l'albero bersaglio e il concorrente (m) N : numero totale di alberi

TASSO DI PRODUZIONE DEL SUOLO (P) E PROFONDITÀ DEL SUOLO (H): Stima del tasso di formazione del suolo in funzione della sua profondità.

Equazione	in cui:
$P = P_0 \cdot e^{-\alpha \cdot h}$	P : tasso di produzione del suolo alla profondità h P_0 : tasso di produzione in superficie (mm/anno) α : coefficiente di attenuazione (m^{-1}) h : profondità del suolo (m)

MASSA DELLA LETTIERA E RITORNO DEI NUTRIENTI: Misura dell'apporto annuale di sostanza organica e di elementi nutritivi principali restituiti al suolo attraverso la caduta della lettiera vegetale. $\dot{}$

RICCHEZZA SPECIFICA (S): Conteggio diretto del numero totale di specie vegetali o animali differenti presenti all'interno di un'area d'indagine.

INDICE DI SHANNON-WIENER (H'): Indice ecologico di diversità che integra sia la ricchezza specifica (numero complessivo di specie) sia la loro equi-ripartizione (*evenness* o omogeneità dell'abbondanza relativa).

Equazione	in cui:
$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln(p_i)$	H' : indice di diversità di Shannon-Wiener p_i : proporzione (abbondanza relativa) della specie i-esima, $p_i = n_i / N$ S : numero totale di specie presenti (ricchezza specifica)

INDICE DI GINI-SIMPSON (D): Misura di diversità ecologica che quantifica la probabilità che due individui estratti casualmente da una comunità appartengano a specie diverse.

Equazione	in cui:
$D = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2$	D : indice di diversità di Simpson (0–1) p_i : proporzione relativa della specie i-esima S : numero totale di specie presenti

INDICE DI BIODIVERSITÀ POTENZIALE (IBP): Strumento diagnostico rapido di rilievo sul campo progettato per valutare la capacità di un popolamento forestale di ospitare la massima biodiversità specifica; sintetizza in un unico punteggio 10 fattori chiave.

Equazione	in cui:
$IBP = \sum_{k=1}^{10} F_k$	IBP : Indice di Biodiversità Potenziale del popolamento (0–50) F_k : punteggio discreto del k-esimo fattore (0, 1, 2 o 5), assegnato sul campo in base a soglie predefinite Fattori: A diversità delle specie autoctone; B struttura verticale della vegetazione; C e D alberi morti in piedi e al suolo; E alberi vivi di grandi dimensioni; F alberi vivi con dendromicrohabitat; G ambienti aperti; H continuità temporale della copertura forestale; I ambienti acquatici; J ambienti rocciosi

EFFECTIVE MESH SIZE (MEFF): Esprime la probabilità che due punti scelti casualmente all'interno dell'area di studio ricadano nella stessa patch forestale non frammentata.

Equazione	in cui:
$MEFF = \frac{1}{A_{tot}} \sum_{i=1}^n A_i^2$	A_i : superficie della i-esima patch forestale (ha) A_{tot} : superficie totale dell'area di studio (ha) n : numero totale di patch forestali presenti nell'area

PROBABILITY OF CONNECTIVITY (PC): Indice basato sulla teoria dei grafi che stima la probabilità che due punti collocati casualmente nel paesaggio possano essere connessi funzionalmente, tenendo conto sia dell'area/qualità delle patch sia della loro raggiungibilità reciproca (dispersione).

Equazione	in cui:
$PC = \frac{\sum_i \sum_j a_i a_j p_{ij}^*}{A_L^2}$	a_i, a_j : attributo (tipicamente l'area) delle patch i e j p_{ij}^* : probabilità massima di dispersione lungo il percorso migliore tra la patch i e la patch j A_L : attributo dell'intero paesaggio di studio (es. area totale, incluse le aree non forestali) i, j : indici delle patch, con $i, j = 1 \dots n$

INTEGRAL INDEX OF CONNECTIVITY (IIC): Versione "binaria" del PC — usa connessioni presenza/assenza (patch connesse o non connesse) invece della probabilità continua di dispersione, ed è quindi adatta quando non si dispone di dati fini sulla capacità di dispersione della specie.

Equazione	in cui:
$IIC = \frac{\sum_i \sum_j \frac{a_i a_j}{1 + nl_{ij}}}{A_L^2}$	a_i, a_j : attributo (tipicamente l'area) delle patch i e j nl_{ij} : numero di link (passaggi tra patch adiacenti) del percorso più breve tra i e j A_L : attributo dell'intero paesaggio di studio

EQUIVALENT CONNECTED AREA (ECA): Deriva dal PC ma restituisce un valore in unità di superficie anziché adimensionale: rappresenta l'area di un'unica patch, completamente connessa, che darebbe lo stesso valore di PC del paesaggio reale.

Equazione	in cui:
$ECA = A_L \cdot \sqrt{PC}$	A_L : attributo dell'intero paesaggio di studio (ha o km²) PC : Probability of Connectivity

PATCH COHESION INDEX (COHESION): Misura il grado di "aggregazione fisica" delle patch forestali a livello di paesaggio, basandosi su perimetro e area delle patch; è sensibile alla soglia di frammentazione oltre la quale la connettività strutturale collassa rapidamente.

Equazione	in cui:
$COHESION = \left[1 - \frac{\sum p_{ij}}{\sum (p_{ij} \cdot \sqrt{a_{ij}})} \right] \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{A_{tot}}} \right]^{-1} \cdot 100$	p_{ij} : perimetro della patch ij a_{ij} : area della patch ij A_{tot} : area totale del paesaggio

SPLITTING INDEX (SPLIT): Indice complementare del meff, esprime il numero di patch di area uguale in cui il paesaggio dovrebbe essere diviso per ottenere lo stesso grado di frammentazione osservato.

Equazione	in cui:
$SPLIT = \frac{A_{tot}^2}{\sum A_i^2}$	A_{tot} : superficie totale dell'area di studio A_i : superficie della i-esima patch forestale

SERVIZI CULTURALI

PHOTO-USER-DAYS (PUD): Indicatore proxy dell'affluenza e dell'uso ricreativo basato sulla condivisione di immagini geolocalizzate sui social media.

PERSONE CHE UTILIZZANO STRUTTURE DIDATTICHE: Monitoraggio dell'affluenza a infrastrutture educativo-formative forestali (centri visita, aule verdi, percorsi didattici), tramite conteggio diretto o survey di flusso.

DISTANZA DA SITI PANORAMICI, CORPI IDRICI O AREE FORESTALI: Indicatore spaziale di prossimità e accessibilità a elementi di interesse estetico o naturale. Misurazione della distanza euclidea o di rete calcolata tramite software GIS.

NUMERO DI VISITATORI: Misura diretta della frequentazione complessiva dell'area forestale a scopo turistico/ricreativo. Conteggio diretto effettuato con sensori ai varchi, rilevatori fisici o indagini campionarie.

INDICATORE COMPOSITO CES (SENSO DEL LUOGO, VALORE SPIRITUALE-ISPIRATIVO, EDUCATIVO): Valutazione integrata dei Servizi Ecosistemici Culturali (CES) intangibili e percepiti dalla comunità. Costruzione di un indice mediante mappatura partecipativa, interviste semi-strutturate e valutazioni aggregate su scala Likert.

Indicatori economici

SERVIZI DI APPROVVIGIONAMENTO

VALORE ECONOMICO DEI PRODOTTI FORESTALI NON LEGNOSI (PFNL): valore di mercato dei prodotti forestali non legnosi raccolti (funghi, tartufi, castagne, piccoli frutti).

Equazione	in cui:
$V_{pfnl} = \sum_i (Q_i \times P_i)$	V_{pfnl} : valore dei PFNL (€/ha/anno) Q_i : quantità raccolta del prodotto i-esimo (kg/ha/anno o unità equivalenti) P_i : prezzo di mercato del prodotto i-esimo (€/kg)

VALORE DI MACCHIATICO: valore economico del legname in piedi, calcolato con il metodo del valore di trasformazione: il prezzo di mercato del legname lavorato viene depurato dei costi necessari a commercializzarlo sul mercato.

Equazione	in cui:
$V_m = P_m - (C_e + C_t + C_l + p)$	V_m : valore di macchiatico (€/m ³) P_m : prezzo di mercato del legname C_e : costi di esbosco C_t : costi di trasporto C_l : costi di lavorazione/abbattimento p : utile normale dell'imprenditore

SERVIZI DI REGOLAZIONE

VAN DEI COSTI DI FERTILIZZAZIONE EVITATI (NPVF): Valore economico attribuito alla prevenzione dell'erosione, calcolato come risparmio sui costi di fertilizzazione del suolo.

Equazione	in cui:
$NPV_f = C_f \cdot \frac{1 - (1 + r)^{-t}}{r} \cdot (1 + r)$	NPV_f : valore attuale netto dei costi di fertilizzazione evitati (€/ha) C_f : costo unitario annuo evitato r : tasso di sconto t : orizzonte temporale (anni)

VALORE ECONOMICO DELLO STOCK DI CARBONIO FORESTALE: valore monetario del carbonio sequestrato e stoccato dalla foresta, stimato applicando un prezzo di mercato o un valore sociale del carbonio allo stock già quantificato con l'indicatore biofisico.

Equazione	in cui:
$VC = C_{stock} \times 3,67 \times P_c$	VC : valore economico del carbonio stoccato (€/ha) C_{stock} : stock di carbonio (t C/ha) 3,67 : fattore di conversione da carbonio a CO ₂ equivalente P_c : prezzo della CO ₂ (€/t CO ₂ , es. quotazione EU ETS o Social Cost of Carbon)

COSTI EVITATI DI DEPURAZIONE IDRICA E DI DANNO DA ALLUVIONE: valore economico attribuito alla regolazione del flusso idrico, stimato come costo evitato di depurazione delle acque e/o di danno da esondazione grazie alla riduzione del deflusso superficiale ottenuta con il ripristino forestale.

Equazione	in cui:
$CE = \Delta Q \times C_u$	CE : costo evitato (€/ha/anno) ΔQ : riduzione del deflusso superficiale rispetto alla condizione degradata (mm o m³, dall'indicatore SCS Curve Number) C_u : costo unitario evitato di depurazione o di danno da alluvione (€/m³ o €/mm)

SERVIZI DI SUPPORTO

VALORE DI SOSTITUZIONE DEL CICLO DEI NUTRIENTI: valore economico del servizio di ciclo dei nutrienti svolto dalla lettiera forestale, stimato con il metodo del costo di sostituzione: quanto costerebbe restituire al suolo la stessa quantità di nutrienti tramite fertilizzanti di sintesi.

Equazione	in cui:
$V_n = (N \times P_n) + (P \times P_p) + (K \times P_k)$	V_n : valore di sostituzione del ciclo dei nutrienti (€/ha/anno) N, P, K : quantità di azoto, fosforo e potassio restituite dalla lettiera (kg/ha/anno) P_n, P_p, P_k : prezzi di mercato dei fertilizzanti equivalenti (€/kg)

COSTO DI SOSTITUZIONE DELLA PRODUZIONE DI SUOLO: valore economico attribuito al servizio di formazione del suolo, stimato come costo evitato di interventi artificiali di ripristino della fertilità e della profondità del suolo perso per erosione.

Equazione	in cui:
$C_s = P \times C_r$	C_s : costo di sostituzione della produzione di suolo (€/ha/anno) P : tasso di produzione di suolo (t/ha/anno) C_r : costo unitario di ripristino artificiale del suolo (€/t)

SERVIZI CULTURALI

VALORE ECONOMICO NETTO DELL'ACCESSO AL SITO RICREATIVO (WTP – TRAVEL COST METHOD): Stima il valore ricreativo tramite il metodo del costo di viaggio (TCM), usando il costo sostenuto per raggiungere il sito come "prezzo implicito" del bene non di mercato, per ricavarne la curva di domanda e il surplus del consumatore.

Equazione	in cui:
$V = f(C, X)$	V : numero di visite C : costo di viaggio implicito X : variabili socioeconomiche

0

VALORE MARGINALE DI UN ATTRIBUTO FORESTALE: Stima del valore economico specifico attribuito dai visitatori a singole caratteristiche strutturali o ambientali del bosco.

Equazione	in cui:
$p_k = \frac{\partial TC}{\partial z_k}$ $TC = f(z_1, z_2, \dots, z_n)$	TC : funzione edonica del costo di viaggio z_k : k-esimo attributo strutturale/ambientale del sito forestale (es. m ² di radura, presenza di sentieri, indice di naturalità) p_k : prezzo implicito (valore marginale) dell'attributo k (€/unità di attributo)

VALUTAZIONE CONTINGENTE (CVM): metodo di valutazione basato su indagine diretta (survey), utile quando manca un mercato osservabile (a differenza del Travel Cost Method, non richiede spostamenti reali da parte dei potenziali fruitori).

Equazione	in cui:
$E[WTP] = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt$	WTP : disponibilità a pagare (€/individuo o €/famiglia) $F(t)$: funzione di distribuzione cumulata della WTP, stimata con un modello logit/probit a scelta dicotomica t : offerta (importo) proposta agli intervistati

COSTO-OPPORTUNITÀ DEL MANCATO USO ALTERNATIVO DEL SUOLO: valore economico proxy dei servizi culturali forestali, stimato come mancato guadagno a cui il proprietario rinuncia non destinando il suolo a un uso alternativo (agricolo, edificatorio, turistico-intensivo)

Equazione	in cui:
$CO = R_a - R_f$	CO : costo-opportunità (€/ha/anno) R_a : rendita netta dell'uso alternativo del suolo (€/ha/anno) R_f : rendita netta dell'uso forestale attuale (€/ha/anno)