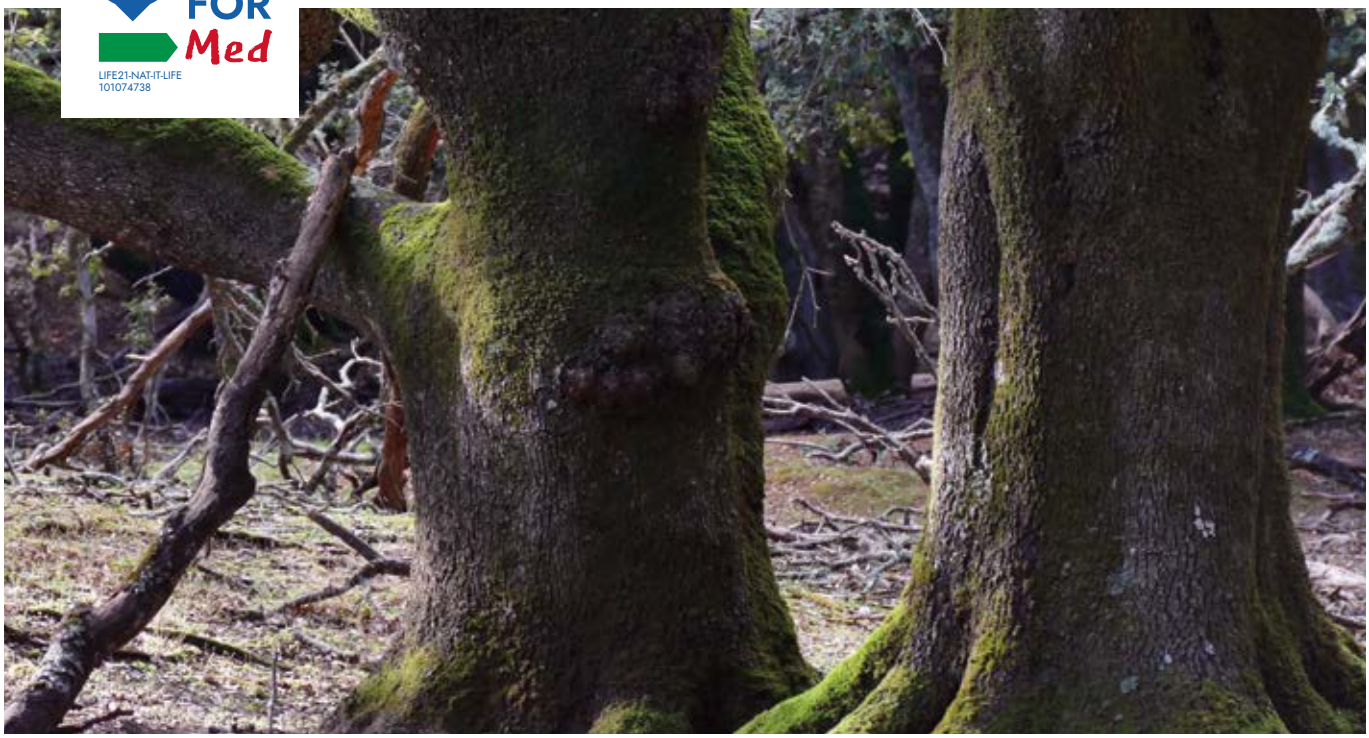

Principio di Equivalenza Energetica

Uno strumento operativo per la gestione forestale più prossima alla natura

di Tommaso Anfodillo, Gaia Pasqualotto

Nell'ambito del LIFE GoProForMED uno degli obiettivi prioritari degli interventi selvicolturali è stato puntare a una struttura di massima funzionalità teorica seguendo il Principio di Equivalenza Energetica. Questo, infatti, consente di definire una teorica distribuzione diametrica di riferimento, che rappresenta la struttura forestale associata a una condizione di massima funzionalità ecologica. Applicando tale modello è possibile quantificare il discostamento della struttura attuale di un bosco rispetto a quella ottimale, ottenendo così chiare indicazioni per indirizzare gli interventi.

La gestione forestale più prossima alla natura (Closer-to-Nature Forestry) mira ad assicurare la permanenza di foreste nel loro stato di para-naturalità tramite una gestione selvicolturale coerente. Tale scopo sottende la comprensione delle strutture e dei processi di sistemi forestali complessi, spesso polispecifici e quasi sempre disetanei, e si intreccia inevitabilmente con lo studio di foreste primarie e secondarie in avanzato stato di sviluppo. Come è stato ribadito nel **Manifesto per una Selvicoltura più vicina alla Natura** (Sherwood - Foreste ed Alberi Oggi, 269: 11), **occorre affinare gli interventi selvicolturali in modo da promuovere questo tipo di gestione forestale**. Come possiamo definire obiettivi selvicolturali concreti per condurre i popolamenti forestali verso comunità arboree stabili nel lungo periodo, ovvero resilienti e/o resistenti ai disturbi e al tempo stesso multifunzionali? Il lavoro presentato in questo approfondimento cerca di soddisfare tale esigenza rispondendo ad una fondamentale domanda: **qual è concretamente la distribuzione diametrica dello specifico popolamento che soddisfa la condizione di maggiore efficienza funzionale?**

Utilizzando strumenti propri della meccanica statistica è possibile determinare quale struttura (ossia quale specifica distribuzione diametrica) soddisfi la condizione di massimo uso delle risorse. Confrontando poi questa distribuzione con quella reale (ossia quella del popolamento attuale) è possibile avere delle semplici indicazioni concrete per l'intervento selvicolturale che indirizzi la comunità in una condizione di maggiore funzionalità. È doveroso ricordare che le pratiche empiriche di selvicoltura naturalistica in Europa sono state molteplici nel tempo. Tuttavia, possiamo trovare un metodo al contempo semplice e dalla base teorica solida dal punto di vista fisiologico, fisico e statistico che sia applicabile in molteplici (effettivamente tutti) ecosistemi forestali.

Modelli forestali

I modelli che mirano a predire strutture e dinamiche di sviluppo sono un potente strumento, ma non sono mediamente di facile accessibilità e comprensione per i gestori forestali. Tuttavia vi sono modelli più generali che si basano su prin-

Parole chiave
Closer-to-Nature Forestry, Funzionalità ecologica, Principio di Equivalenza Energetica, modello allometrico, grado di disturbo, LIFE GoProForMED

cipi bio-fisici, come i **modelli allometrici** proposti per la definizione di strutture e dinamiche forestali che sono **basati fondamentalmente su principi di ottimizzazione dell'uso delle risorse** negli e tra gli individui e, quindi, nelle comunità da loro costituite (Enquist *et al.* 2009, Enquist e Niklas 2001, West 1999). Correttamente applicati possono prevedere la distribuzione delle dimensioni degli alberi nelle foreste con piccoli o antichi disturbi, dove la comunità forestale evolve in una condizione strutturale di quasi-equilibrio con le risorse disponibili.

Energy Equivalence Principle

Esistono alcuni modelli (Simini *et al.* 2010, West 1999) in grado di prevedere la struttura di foreste naturaliformi basati sul concetto che, in condizioni prossime all'equilibrio, tutte le foreste raggiungano uno stato strutturale che soddisfa il cosiddetto **Principio di Equivalenza Energetica (EEP)** (White *et al.* 2007). Questo nasce dall'osservazione che, in varie comunità (animali, piante, microrganismi), **una diminuzione del numero di individui di una certa specie è compensata da un aumento proporzionale del tasso metabolico totale di quella specie**. Nel caso degli alberi in foresta, questa compensazione assicura che ogni classe dimensionale nel suo complesso (ad esempio, tutti gli alberi di 2 m di altezza e tutti gli alberi di 20 m di altezza) mantenga un **consumo energetico totale simile alle altre classi indipendentemente dalle dimensioni**, poiché la minore numerosità di individui nelle dimensioni maggiori è totalmente compensata dall'aumento del loro consumo di risorse complessivo (Figura 1).

Quando disponiamo la frequenza dei diametri in un determinato sito in scala logaritmica vediamo che è descritta da una relazione lineare. Il valore dell'esponente che descrive questa relazione in condizioni di equivalenza energetica può essere confrontato con quello individuato nello stato reale. In questo senso il modello dà la possibilità di valutare il **grado di disturbo in una foresta**, confrontando gli esponenti previsti teoricamente con quelli osservati nella situazione reale (Anfodillo *et al.* 2013, Sellan *et al.* 2017). Il nostro approccio si basa sulla premessa che la struttura della foresta è determinata da come varia il consumo di risorse del singolo albero rispetto alla sua dimensione. Quindi si può dire che il modo in cui si accumula area fogliare durante la crescita di un albero determina di fatto la struttura della comunità forestale (Enquist *et al.* 2009, Simini *et al.* 2010). Il consumo di risorse è proporzionale all'area fogliare (Enquist e Niklas 2001) e questa varia in modo isometrico con il volume totale della chioma (Sillett *et al.* 2015). **In tal modo il volume di chioma può essere considerato come un indicatore sintetico e molto pratico** che tiene implicitamente conto del fototemperamento delle diverse specie. La distribuzione EEP si verifica perché, quando l'uso delle risorse aumenta con la crescita individuale (ossia col volume di chioma), c'è una **perfetta compensazione attraverso la diminuzione dell'abbondanza degli individui di quella particolare dimensione** (White *et al.* 2007).

EEP applicato in foresta

Nello specifico, l'EEP prevede innanzitutto di definire come varia l'uso delle risorse tra individui di dimensioni diverse nel popolamento. Si definisce quindi la relazione allometrica empirica e specifica del sito **mettendo in relazione il volume della chioma (V_{cro} in m³) e l'altezza totale (H in m) di individui di diverse dimensioni** (se il popolamento è polispecifico, considerando tutte le specie che concorrono a comporlo, poichè il modello tratta la foresta in quanto comunità o aggregato). Questa relazione allometrica è descritta tipicamente da una potenza del tipo $y = a * x^b$, dove y è il volume di chioma e x l'altezza. Affinché l'EEP sia soddisfatto, il numero di individui in una determinata classe dimensionale deve scalare con l'altezza H con un esponente di "*-b*".

Nell'ambito del progetto LIFE GoProForMED abbiamo applicato il modello basato sull'EEP ad alcune comunità forestali mediterranee ed in particolare: leccete pure a diverso grado di evoluzione (Foresta di Montes, Sardegna), una sughereta lasciata a libera evoluzione (Goceano, Sardegna) e un ex Castagneto (S. Antonio, Toscana). Come predire la distribuzione che ottimizza l'uso delle risorse secondo l'EEP?

Nello specifico il **volume di chioma** viene misurato per 5-10 alberi in tutti gli intervalli di altezza di 2 m fino al massimo rilevato (0-2 m; 2-4 m; 4-6 m; ecc.) in tutta la porzione di foresta. Per ciascun albero viene indicata la specie e misurato: diametro alla base e a 1,30 m di altezza, altezza totale, punto di inserzione della chioma sul fusto e due raggi di chioma opposti (mediante uso di laser TruPulse® 360°). Con questi dati viene stimato l'esponente "b" della relazione allometrica descritta sopra. Questo esponente con segno negativo predice come decresce il numero di alberi all'aumentare della loro dimensione nello stato di massimo uso

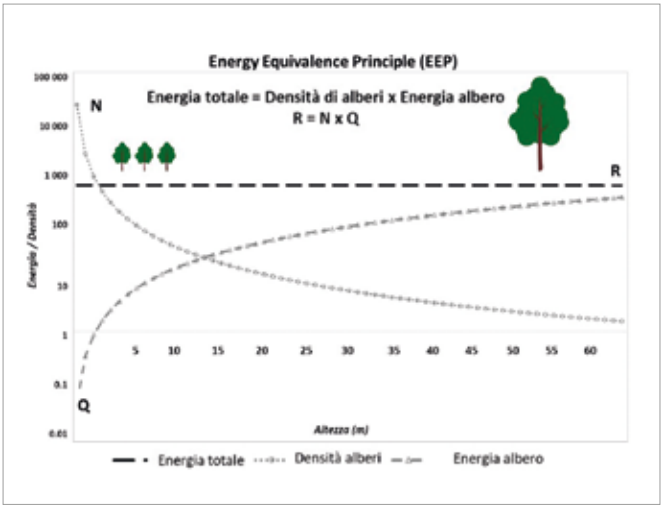

Figura 1 - Simulazione dell'EEP applicato alla distribuzione delle dimensioni degli alberi in foresta (espresso come altezza) e della loro numerosità. L'energia totale della comunità forestale rimane globalmente costante in virtù della diminuzione nel numero di individui all'aumentare della loro altezza, come descritto dall'EEP.

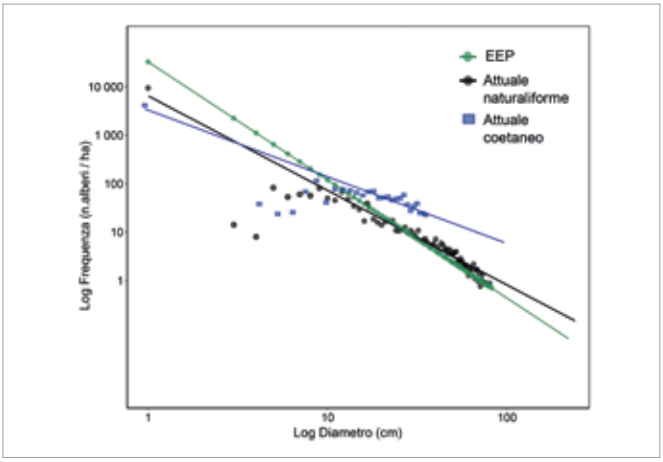

Figura 2 - Confronto tra curve che descrivono il decremento del numero di piante per classe diametrica di due leccete nella foresta di Montes (2023) con la curva potenziale EEP. Gli esponenti sono: -2,44, -1,99 e -1,36 rispettivamente per la curva potenziale EEP, per la foresta naturaliforme e per la struttura coetaniforme. Come atteso, la porzione di foresta naturaliforme assume una pendenza più vicina all'EEP, che si attesta all'82% rispetto al potenziale, mentre quella coetaniforme al 56%.

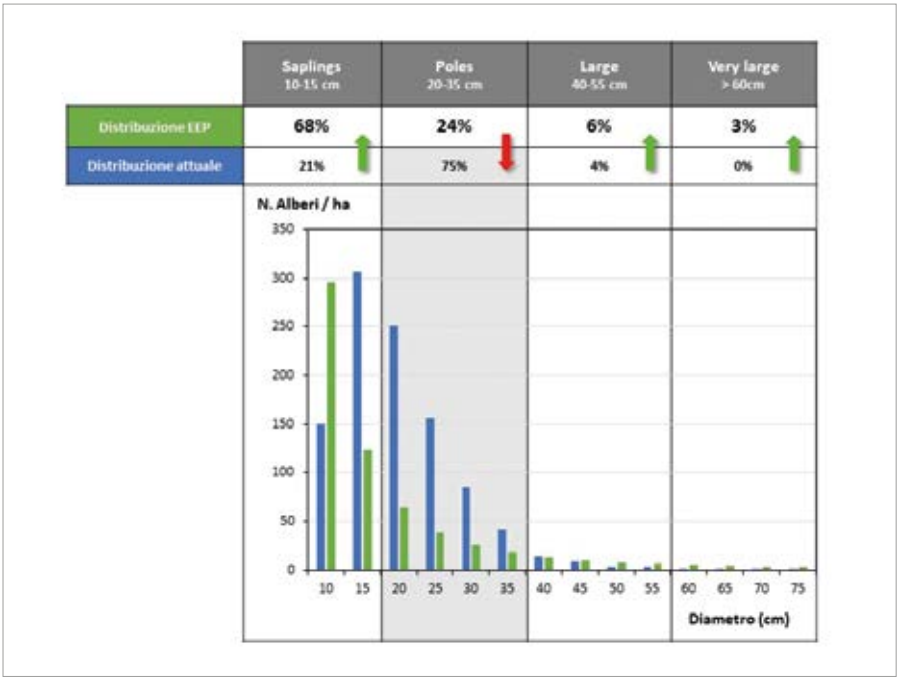

Figura 3 - La distribuzione diametrica prevista dall'EEP può essere sintetizzata in percentuali di abbondanza di alberi per classe (Saplings, Poles, Large e Very large) e confrontata con la distribuzione reale. Questo è un caso esemplificativo di lecceta destinata a divenire Isola per la Biodiversità presso un'area LIFE GoProForMED (Montes - Sardegna). Queste distribuzioni comparate danno indicazione per gli interventi selvicolturali da attuare (percentuali raccomandate di abbondanza di individui per classe) verso una struttura coerente con una Closer-to-Nature Forestry.

delle risorse (ossia la condizione di massima efficienza funzionale della comunità) (Figura 2, EEP).

La **distribuzione diametrica reale** del popolamento viene determinata invece tramite aree relascopiche diametriche effettuate con relascopio di Bitterlich (Φ = 1). Il numero di aree relascopiche può variare in funzione della dimensione della foresta e della variabilità strutturale al suo interno da circa 20 a 50-60. Ad ogni area relascopica è stato associato un transetto lineare di 10 m × 1 m in modo da rilevare tutta la rinnovazione sotto i 2 m di altezza. Si costruisce anche in questo caso una curva di distribuzione diametrica che sarà descritta da una relazione potenza con un proprio esponente con valore negativo (Figura 2, stato attuale).

La distribuzione reale viene quindi comparata a quella potenziale. È proprio questo valore di esponente che viene confrontato con quello determinato dall'applicazione EEP. Quasi sempre ci troviamo di fronte a casi dove lo stato reale ha una pendenza della curva minore dello stato potenziale, ovvero **la foresta ha una struttura tendenzialmente più semplificata**, ossia para-coetanea/monoplana rispetto a come sarebbe nello stato di ottimizzazione dell'uso delle risorse. La numerosità di individui attualmente presenti e predetta dall'EEP possono essere aggregate in classi selvicolturali funzionali alla gestione e sintetizzate in percentuali per guidare gli interventi che andranno ad aggiustare l'abbondanza relativa delle classi verso il raggiungimento dell'EEP sul sito (Figura 3).

Il metodo è pensato per essere dinamico e reiterativo. Ovvero la distribuzione diametrica che caratterizza l'equivalenza energetica, e quindi l'ottimizzazione delle risorse, può essere raggiunta con **interventi realizzati in diversi step temporali**. In questo senso l'applicazione del metodo può diventare un utile strumento per una gestione forestale Closer-to-Nature.

La metodologia, in una forma più dettagliata per la replicazione del metodo è presentata attraverso la descrizione di un caso studio nella lecceta mediterranea di Montes nel Supramonte di Su Sercone, Orgosolo e Urzulei nella Sardegna centrale (Pasqualotto *et al.* 2025).

Nell'ambito del progetto LIFE GoProForMED è stato inoltre realizzato un **manuale per i rilievi in campo** dal titolo "Definizione del grado di disturbo in foreste mediterranee: Inquadramento metodologico e strumenti di monitoraggio" scaricabile a questo indirizzo https://shorturl.at/dNEXn. Per tutte le basi e il *background* del modello che include principi di fisica e meccanica statistica si rimanda alla lettura di Simini *et al.* 2010 e Sellan *et al.* 2017.

BIBLIOGRAFIA

Anfodillo T., Carrer M., Simini F., Popa I., Banavar J.R., Maritan A., 2013 - **An allometry-based approach for understanding forest structure, predicting tree-size distribution and assessing the degree of disturbance.** Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 280 (1751): 1-8. https://doi.org/10.1098/rspb.2012.2375

Enquist B.J., Niklas K.J., 2001 - **Invariant scaling relations across tree-dominated communities.** Nature 2001, 410 (6829): 655-660. https://doi.org/10.1038/35070500

Enquist B.J., West G.B., Brown J.H., 2009 - **Extensions and evaluations of a general quantitative theory of forest structure and dynamics.** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 106 (17): 7046-7051. https://doi.org/10.1073/PNAS.0812303106/SUPPL_FILE/0812303106SI.PDF

Pasqualotto G., Pellizzari S., Carraro V., Airi M., Miozzo M., Buscarini S., Anfodillo T., 2025 - **Operationalizing closer-to-nature forest management: Application of the energy-equivalence principle in a holm oak (*Quercus ilex* L.) Mediterranean forest.** Forest Ecology and Management, 588: 122735. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122735

Sellan G., Simini F., Maritan A., Banavar J.R., de Haulleville T., Bauters M., Doucet J.L., Beeckman H., Anfodillo T., 2017 - **Testing a general approach to assess the degree of disturbance in tropical forests.** Journal of Vegetation Science, 28 (3): 659-668. https://doi.org/10.1111/jvs.12512

Sillett S.C., Van Pelt R., Carroll A.L., Kramer R.D., Ambrose A.R., Trask D., 2015 - **How do tree structure and old age affect growth potential of California redwoods?** Ecological Monographs, 85 (2): 181-212. https://doi.org/10.1890/14-1016.1

Simini F., Anfodillo T., Carrer M., Banavar J.R., Maritan A., 2010 - **Self-similarity and scaling in forest communities.** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 107 (17): 7658-7662. https://doi.org/10.1073/pnas.1000137107

West G.B., 1999 - **The Origin of Universal Scaling Laws in Biology.** SEtVIF Physica A, 263: 104-113.

White E.P., Ernest S.K.M., Kerkhoff A.J., Enquist B.J., 2007 - **Relationships between body size and abundance in ecology.** Trends in Ecology and Evolution, 22 (6): 323-330. https://doi.org/10.1016/J.TREE.2007.03.007/ASSET/CD9EBAC1-2DC7-461E-9CEE-8D0CC86109F2/MAIN.ASSETS/GR2.SML

INFO AUTORI

Tommaso Anfodillo, Dipartimento TeSAF, Università degli Studi di Padova.
E-mail: tommaso.anfodillo@unipd.it

Gaia Pasqualotto, Dipartimento TeSAF, Università degli Studi di Padova.
E-mail: gaia.pasqualotto@unipd.it

Co-funded by the European Union

NATURA 2000

www.lifegoproformed.eu