

## **Il progetto LIFE MODERn (NEC) per la valutazione degli impatti dell'inquinamento atmosferico: i licheni epifiti tra gli indicatori degli ecosistemi forestali**

Giorgio Brunialti<sup>1</sup>, Luisa Frati<sup>1</sup>, Marco Calderisi<sup>1</sup>, Cristiana Cocciufa<sup>2</sup>, Giancarlo Papitto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TerraData srl environmetrics, Spin-off dell'Università di Siena; <sup>2</sup>Arma dei Carabinieri – Comando Unità Forestali, Ambientali e Agroalimentari (CUFAA)

Gli attuali livelli di emissioni inquinanti nell'Unione Europea comportano rischi per la salute umana e per gli ecosistemi, oltre ad esporre i Paesi membri al rischio di infrazione e al pagamento di pesanti sanzioni.

Per fronteggiare questa emergenza è stata emessa la Direttiva Europea 2016/2284 (Direttiva NEC), che impegna gli Stati membri a: (i) ridurre le emissioni in atmosfera di alcuni inquinanti pericolosi per la salute umana e l'ambiente, come zolfo, azoto, composti organici volatili non metanici, ammoniaca e particolato fine (PM), mediante l'attuazione di programmi nazionali di controllo dell'inquinamento atmosferico, e (ii) monitorare gli effetti degli inquinanti atmosferici sugli ecosistemi terrestri e di acqua dolce. Gli Stati europei perseguono gli obiettivi della Direttiva attraverso una rete di siti di monitoraggio rappresentativa dei principali ecosistemi europei.

In Italia, il Ministero della Transizione Ecologica ha istituito la Rete NEC Italia, coordinata dal Comando Unità Forestali, Ambientali e Agroalimentari dell'Arma dei Carabinieri, con la collaborazione di un vasto partenariato composto da ricercatori e tecnici appartenenti a università e centri di ricerca di eccellenza nazionale.

L'attuale Rete NEC Italia comprende sei siti forestali e quattro di acque dolci, afferenti ai programmi di monitoraggio ICP Forests (<http://icp-forests.net>) e ICP Waters (<https://www.icp-waters.no>) (Figura 1). Nove siti (di cui 6 ICP Forests) sono dedicati al monitoraggio specifico dell'ozono e dei suoi effetti sulla vegetazione.

In questo contesto, nasce il progetto LIFE MODERn (NEC) “Nuovo sistema di Monitoraggio per rilevare gli effetti della riduzione delle emissioni inquinanti derivanti dalla adozione della Direttiva NEC. LIFE20GIE/IT/000091 (2021-2025)” con l'obiettivo di migliorare il sistema di valutazione degli impatti dell'inquinamento atmosferico e dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi forestali e d'acqua dolce in Italia.



Figura 1. Distribuzione dei siti della Rete NEC Italiana allo stato attuale: ecosistemi terrestri (6 siti forestali), ecosistemi di acqua dolce (4 siti), siti di monitoraggio ozono (9 siti). Fonte: <https://lifemodernec.eu>

Il progetto è coordinato dall'Arma dei Carabinieri – Comando Unità Forestali, Ambientali e Agroalimentari (CUFAA) – e vede il coinvolgimento di altri sette beneficiari associati: CNR, Consiglio Nazionale delle ricerche, con quattro istituti (IRSA, IRET, IREA, IBE); CREA, Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (Centro di ricerca Foreste e Legno); ENEA, Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile; Legambiente APS Onlus; TerraData srl environmetrics; Università degli Studi di Camerino; Università degli Studi di Firenze, con due dipartimenti (DST e DAGRI).

Il progetto si propone di selezionare quattro nuovi siti in ambiente forestale e sei

nuovi siti di acque interne, in modo da migliorare struttura e rappresentatività della Rete NEC Italia. Il progetto, inoltre, intende applicare indicatori innovativi degli effetti dell'inquinamento atmosferico sugli ecosistemi in modo da seguirne l'andamento nel tempo e nello spazio e da intraprendere azioni di governance per il controllo dell'inquinamento atmosferico in aree remote e naturali.

La Tabella 1 riporta un elenco degli indicatori che sono presi in considerazione dal progetto, distinti tra ecosistemi forestali (siti ICP Forests Livello II) e acquatici (laghi di alta quota appartenenti alla rete ICP Waters).

Poiché il progetto si propone anche di valutare le relazioni reciproche tra gli indicatori, si possono distinguere variabili di risposta rappresentate dai componenti reattivi dell'ecosistema che rispondono a stress ambientali (ad es. la composizione in specie vegetali e di licheni nelle foreste o di diatomee e macroinvertebrati negli ecosistemi acquatici, o l'accrescimento degli alberi e le condizioni delle chiome), e variabili predittive, che quindi possono condizionare queste risposte, come ad esempio i parametri meteorologici o i dati di ozono misurati nei plot forestali. Un terzo gruppo di indicatori sono rappresentati dai dati misurati o modellati delle concentrazioni dei principali inquinanti atmosferici. Questi dati sono stati estrapolati da banche dati istituzionali relative a reti di monitoraggio nazionali (ISPRA) o europee (EMEP) e saranno utilizzati per individuarne l'effetto sugli indicatori di progetto, ottenendo così una visione d'insieme del funzionamento della Rete NEC e per poter suggerire miglioramenti validi anche a scala europea.

### **I licheni epifiti nel progetto LIFE MODERn (NEC)**

I metodi di biomonitoraggio dell'inquinamento atmosferico basati sui licheni epifiti sono tra i più utilizzati a livello mondiale (Nimis *et al.* 2002). Di solito sono presi in considerazione vari aspetti della diversità dei licheni, come ad esempio la ricchezza e l'abbondanza delle specie, la composizione specifica delle comunità che crescono sugli alberi, la presenza di specie indicatrici e di gruppi funzionali (Nimis *et al.* 2002; Giordani *et al.* 2012).

Sebbene la maggior parte degli studi sull'inquinamento atmosferico siano stati condotti in aree urbane e industriali (cfr. Conti & Cecchetti 2001; Abas 2021), sono numerosi gli esempi di studi scientifici e di programmi di monitoraggio che utilizzano i licheni a questo scopo anche nell'ambito degli ecosistemi forestali (cfr. ad esempio Kapusta *et al.* 2004; Jovan & McCune 2005; Brunialti *et al.* 2008; Svoboda *et al.* 2010; Ellis 2012).

Tabella 1. Elenco degli indicatori considerati dal progetto.

Indicatore	Dettaglio dei parametri misurati	N. variabili	Beneficiari responsabili
<b><i>Ecosistemi forestali</i></b>			
Deposizioni atmosferiche	Inquinanti misurati nelle acque raccolte nel plot	13	CUFAA, CNR (IRET)
Analisi dei nutrienti fogliari	Concentrazioni di elementi nelle foglie	6	CNR (IRET)
Chimica delle soluzioni circolanti nei suoli	pH, nitrati, solfati sia in superficie che in profondità	6	CUFAA, UNIFI (DST)
Diversità vegetale	Lista di specie e diversità	6	UNICAM
Diversità dei licheni epifiti	Lista di specie e diversità	6	TerraData
Diversità animale	Uccelli: lista di specie e diversità	6	CNR (IRET)
	Pipistrelli: lista di specie e diversità	2	CNR (IRET)
	Qualità biologica del suolo	4	CNR (IRET)
Condizioni delle chiome	Defogliazione delle chiome degli alberi e danni da patogeni	11	CUFAA, UNIFI (DAGRI)
	Dati telerilevati della defogliazione delle chiome	1	CNR (IREA)
Accrescimento degli alberi	Volume e suo incremento, contenuto di carbonio	3	CREA
Ozono	Effetti sulle piante: % di specie sintomatiche; % di foglie sintomatiche	3	CNR (IRET)
	Concentrazioni nei siti forestali	5	CNR (IRET)
Dati meteorologici	Principali parametri climatici all'interno dei siti forestali	24	CREA
<b><i>Ecosistemi di acqua dolce</i></b>			
Chimica delle acque	Dati chimici previsti dal Manuale ICP Waters	22	
Diversità delle diatomee	Lista di specie e diversità	12	CNR (IRSA)
Diversità dei macroinvertebrati	Lista di specie e diversità	5	
<b><i>Dati di inquinanti atmosferici</i></b>			
Dati derivati dai modelli EMEP	Concentrazioni in aria nei pressi dei siti della rete di monitoraggio degli ecosistemi forestali e di acqua dolce: PM <sub>10</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> , RDN, SO <sub>4</sub> , SO <sub>2</sub>	6	TerraData
Dati rilevati dalle centraline ARPA regionali	Concentrazioni in aria nei pressi dei siti della rete di monitoraggio degli ecosistemi forestali: C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , SO <sub>2</sub>	12	ENEA, ISPRA
Trasparenza e chimica dell'aria	Concentrazione in aria di PM <sub>10</sub> e PM <sub>2.5</sub> , trasparenza ottica dell'aria	3	CUFAA, ENEA

Per quanto riguarda il LIFE MODERn (NEC), i licheni epifiti sono già inseriti tra gli indicatori della Rete NEC Italia, essendo in grado di fornire informazioni sugli effetti di NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> (Brunialti *et al.* 2020). In particolare, allo stato attuale, i rilievi nei siti della rete di monitoraggio sono condotti sulla base del protocollo operativo Field Manual part VII.2 (Stofer *et al.* 2016) che si basa principalmente sulle linee guida europee per il monitoraggio con i licheni (Asta *et al.* 2002; Scheidegger *et al.* 2002). Ad oggi, la Rete NEC Italia fornisce alle banche dati ICP IM e ICP Forests i risultati dei rilievi con due parametri: la ricchezza specifica e l'Indice di Biodiversità Lichenica (IBL).

Il progetto LIFE MODERn (NEC) si propone di individuare nuovi metodi basati sullo studio di gruppi funzionali (forme di crescita, fotobionte, strategia riproduttiva, indicatori ecologici) e sull'individuazione di specie indicatrici (ad es. il lichene foglioso *Lobaria pulmonaria*, Brunialti *et al.* 2015), che forniscano indicatori quantitativi efficaci nella valutazione della risposta agli effetti dell'inquinamento atmosferico e dei cambiamenti climatici negli ecosistemi forestali. I protocolli adottati saranno oggetto di corsi di formazione per il personale specializzato dell'Arma dei Carabinieri già impegnato in alcune attività delle indagini in campo. Inoltre, i rilievi della biodiversità lichenica, che saranno condotti nei 10 siti forestali di progetto, verranno messi in relazione con gli altri indicatori forestali in modo da ottenere un quadro esaustivo degli effetti dell'inquinamento atmosferico su componenti reattivi degli ecosistemi forestali. Dall'inizio del progetto (ottobre 2021), nell'ambito delle attività preparatorie è stata effettuata una selezione e revisione critica: i) della letteratura scientifica sull'argomento, che ha permesso di individuare 90 pubblicazioni, tra articoli e revisioni; ii) dei principali metodi di biomonitoraggio mediante licheni già adottati o utili nell'ambito degli ecosistemi forestali. Quest'ultima attività ha permesso di individuare altri quattro protocolli potenzialmente interessanti ad essere adottati, con eventuali modifiche, nell'ambito della Direttiva NEC, incluso il metodo di bioaccumulo (Subprogramme EP: Trunk epiphytes 1998; Mayer *et al.* 2009; USFS 2011; Giordani *et al.* 2020).

## Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato finanziato dal LIFE Programme of the European Commission nell'ambito del Grant Agreement LIFE20 GIE/IT/000091 (LIFE MODERn (NEC), "Nuovo sistema di Monitoraggio per rilevare gli effetti della riduzione delle emissioni inquinanti derivanti dalla adozione della Direttiva NEC"). Il progetto è supportato anche dalla Società Lichenologica Italiana, in qualità di stakeholder.

## Bibliografia

- Abas A. 2021. A systematic review on biomonitoring using lichen as the biological indicator: A decade of practices, progress and challenges. *Ecological Indicators* 121: 107197.
- Asta J., Erhardt W., Ferretti M., Fornasier F., Kirschbaum U., Nimis P.L., Purvis O.W., Pirtintos S., Scheidegger C., Haluwyn C., Wirth V. 2002. Mapping lichen diversity

- as an indicator of environmental quality. In: Nimis P.L., Scheidegger C., Wolseley P.A. (eds.) *Monitoring with lichens-monitoring lichens*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 273-279.
- Brunialti G., Frati L., Ravera S. 2015. Ecology and conservation of the sensitive lichen *Lobaria pulmonaria* in Mediterranean old-growth forests. In: *Old-Growth Forests and Coniferous Forests. Ecology, habitat and conservation*, Weber R.P. (Ed.), Nova Publisher, New York. Chapter 1: 1-20.
- Brunialti G., Frati L., Incerti G., Rizzi G., Vinci M., Giordani P. 2008. Lichen biomonitoring of air pollution: issues for applications in complex environments. In: Romano G.C., Conti A.G. (eds.) *Air Quality in the 21st Century*. Nova Science Publishers Inc., New York, pp. 211-260.
- Brunialti G., Frati L., Giordani P., Nascimbene J., Canullo R., Cindolo C., Cocciufa C., Papitto G. 2020. Rete NEC Italia: i risultati della prima campagna di monitoraggio della diversità dei licheni epifiti. *Notiziario della Società Lichenologica Italiana* 33: 75-83.
- Conti M.E., Cecchetti G. 2001. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment - a review. *Environmental Pollution* 114: 471-492.
- Direttiva (UE) 2016/2284 2016. Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio, del 14 dicembre 2016, concernente la riduzione delle emissioni nazionali di determinati inquinanti atmosferici, che modifica la direttiva 2003/35/CE e abroga la direttiva 2001/81/CE, OJ L 344, 17.12.2016, p. 1–31.
- Ellis C.J. 2012. Lichen epiphyte diversity: A species, community and trait-based review. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 14: 131-152.
- Giordani P., Brunialti G., Bacaro G., Nascimbene J. 2012. Functional traits of epiphytic lichens as potential indicators of environmental conditions in forest ecosystems. *Ecological Indicators* 18: 413-420.
- Giordani P., Benesperi R., Bianchi E., Brunialti G., Cecconi E., Contardo T., Di Nuzzo L., Fortuna L., Frati L., Loppi S., Monaci F., Munzi S., Nascimbene J., Paoli L., Ravera S., Tretiach M., Vannini A. 2020. Guidelines for the use of lichens as bioindicators. *ISPRA Manuali e Linee Guida* 189/2019. ISBN 978-88-448-0966-9.
- Jovan S.E., McCune B. 2005. Air-quality bioindication in the greater central valley of California, with epiphytic macrolichen communities. *Ecological Applications* 15(5): 1712-1726.
- Kapusta P., Szarek-Lukaszewska G., Kiszka J. 2004. Spatial analysis of lichen species richness in a disturbed ecosystem (Niepolomice Forest, S Poland). *Lichenologist* 36: 249-260.
- Mayer A. L., Vihermaa L., Nieminen N., Luomi A., Posch M. 2009. Epiphytic macrolichen community correlates with modeled air pollutants and forest conditions. *Ecological Indicators* 9: 992–1000.
- Nimis P.L., Scheidegger C., Wolseley P.A. 2002. *Monitoring with Lichens: Monitoring Lichens*. Kluwer Academic Published in Association with the NATO Scientific Affairs Division, Dordrecht, London.
- Scheidegger C., Groner U., Keller C., Stofer S. 2002. Biodiversity assessment tools – Lichens. In: Nimis P.L., Scheidegger C., Wolseley P. (eds.). *Monitoring with lichens – Monitoring lichens*. Kluwer, Dordrecht, pp. 359-365.
- Stofer S., Catalayud V., Giordani P., Neville P. 2016. Assessment of epiphytic lichen diversity. In: *UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre (ed.). Manual on*

- methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, 13 pp.
- Subprogramme EP: Trunk epiphytes (Chapter 7.20) 1998. In: Manual for Integrated Monitoring. 1998. [www.syke.fi/nature/icpim](http://www.syke.fi/nature/icpim) > Manual for Integrated Monitoring. (Accessed 17.05.2022).
- Svoboda D., Peksa O., Veselá J. 2010. Epiphytic lichen diversity in central European oak forests: assessment of the effects of natural environmental factors and human influences. *Environmental Pollution* 158: 812-819.
- USFS 2011. Phase 3 Field Guide – Lichen Communities. Version 5.1 October 2011. United States Forest Service. Web site accessed 17.05.2022. <https://www.fia.fs.fed.us/library/field-guides-methods-proc/index.php>