

DAL VERDE URBANO ALLE FORESTE



estratto da

SEGNALI
DAL CLIMA

FVG

CAMBIAMENTI
IMPATTI
AZIONI

Settembre 2025

DAL VERDE URBANO ALLE FORESTE

- 7 I SERVIZI ECOSISTEMICI DELLA
RETE ECOLOGICA DI TRIESTE
CONTRO I CAMBIAMENTI CLIMATICI
- 17 SOLUZIONI BASATE SULLA NATURA
PER L'ADATTAMENTO CLIMATICO: IL
SUPPORTO DELLA REGIONE FVG AI
COMUNI PER IL VERDE URBANO
- 23 IL CUORE VERDE DEL TERRITORIO:
CONNETTIVITÀ E SERVIZI PER LA
RESILIENZA CLIMATICA
- 31 UNA NUOVA TECNOLOGIA PER
"ASCOLTARE" GLI ALBERI:
I TREETALKERS®
- 37 LE STRATEGIE DELLE SPECIE
FORESTALI PER ADATTARSI AI
CAMBIAMENTI CLIMATICI
- 45 IL CARBONIO CATTURATO DALLE
FORESTE: LA MAPPATURA PER IL
FRIULI VENEZIA GIULIA
- 51 IL *REWILDING* PER CONTRASTARE
LA PERDITA DI BIODIVERSITÀ E
PER MITIGARE IL CAMBIAMENTO
CLIMATICO
- 59 CONSERVARE LA BIODIVERSITÀ
DEL FUTURO

"Segnali dal Clima in FVG" è realizzato da:

ARPA FVG - Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia *nell'ambito dell'attività di coordinamento e segreteria del "Gruppo di lavoro tecnico scientifico Clima FVG" istituito dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia con Decreto DC Difesa dell'ambiente, energia e sviluppo sostenibile, n. 2137 del 04/05/2022*

Coordinamento editoriale:
Federica Flapp, Fulvio Stel

Elaborazione grafica:
Michela Mauro

"Segnali dal Clima in FVG" ospita articoli firmati da vari autori: ciascun autore è responsabile per i contenuti (testi, dati e immagini) dei propri articoli ed esclusivamente di essi.

ARPA FVG, gli altri enti del "Gruppo di lavoro tecnico scientifico Clima FVG" e i singoli autori non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questa pubblicazione.

Ove non diversamente specificato, le immagini sono state fornite dagli autori dei diversi contributi, che se ne assumono la responsabilità, o sono tratte da:

<https://pixabay.com/it/>
<https://www.google.com/maps>
<https://climatevisual.org>
<https://unsplash.com/it>
<https://www.pexels.com/it-it/>
<https://www.flickr.com>

La foto di copertina è di Emanuele Esposito

ARPA FVG
Via Cairoli, 14 - 33057 Palmanova (UD)
Tel +39 0432 922 611 - Fax +39 0432 922 626
www.arpa.fvg.it
<https://x.com/arpafvg>
<https://www.instagram.com/arpafvg/>
https://www.youtube.com/channel/UCd04ue_5J9nkZzuTet2ISrg
<https://www.linkedin.com/company/arpa-fvg/>
<https://www.facebook.com/arpafvg/>

Questo prodotto è rilasciato con licenza Creative Commons - Attribuzione 4.0 Internazionale (CC BY 4.0):
Può essere quindi utilizzato citando la fonte, nel rispetto delle condizioni qui specificate:
informazioni generali <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.it>
licenza <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.it>



Come citare questa pubblicazione:
Segnali dal clima in FVG. Notizie dal Gruppo di lavoro tecnico-scientifico Clima FVG. (ARPA FVG, 2025)

Segnali dal Clima

Come sta cambiando il clima in Friuli Venezia Giulia e come cambierà in futuro? Con quali effetti su ambiente, economia e società? Quali strumenti e conoscenze abbiamo a disposizione, nella nostra regione, per agire sulle cause dei cambiamenti climatici e per ridurre gli impatti? Come si stanno attivando le istituzioni, la società, gli enti scientifici e di ricerca?

A queste domande, anno dopo anno, cerca di rispondere *Segnali dal clima in FVG*, una pubblicazione divulgativa che racconta i cambiamenti climatici partendo da un'ottica locale e regionale e affrontando questo grande tema da tre prospettive: CAMBIAMENTI, IMPATTI, AZIONI.

Il 2024 è stato l'anno più caldo mai registrato in Friuli Venezia Giulia, come anche a livello globale: un record che si inserisce in una tendenza climatica ben evidenziata dai dati e che proseguirà in futuro. Per far fronte ai cambiamenti del clima e alle loro molteplici implicazioni, nel 2025 la Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia ha avviato il percorso per elaborare LA STRATEGIA E IL PIANO CLIMA FVG: gli strumenti per pianificare, con un approccio integrato e innovativo, le azioni regionali per la mitigazione e per l'adattamento ai cambiamenti climatici. L'edizione 2025 dei *Segnali* si apre quindi con una sezione che illustra questo percorso, che si svilupperà con la partecipazione dei diversi attori del territorio e della cittadinanza. È quindi fondamentale promuovere la conoscenza e la consapevolezza di tutta la popolazione riguardo a questi temi.

Attraverso le pagine dei *Segnali*, gli esperti degli enti che compongono il Gruppo di lavoro tecnico-scientifico Clima FVG raccontano e spiegano i diversi eventi, fenomeni e attività collegati ai cambiamenti climatici, mettendo a disposizione le loro conoscenze con l'obiettivo di renderle accessibili e interessanti per tutta la cittadinanza. Come? Traducendo le informazioni tecnico-scientifiche in un linguaggio comprensibile e utilizzando esempi, immagini, infografiche che le rendono più chiare e immediate. Ma rendere più semplici e accessibili argomenti complessi non significa banalizzarli: attraverso la lettura di *Segnali dal clima in FVG* il lettore può rendersi conto di come tutti gli elementi - i cambiamenti dei diversi fattori climatici, le

implicazioni per i vari sistemi naturali e settori socio-economici, le risposte che possiamo mettere in campo - siano interconnessi. E di come ciò che avviene nella nostra regione sia collegato a ciò che accade su scala planetaria.

“Capire le connessioni per affrontare i cambiamenti” diventa quindi il filo conduttore che ci accompagna nel percorso di lettura di questa terza edizione dei *Segnali*, che esplora alcune nuove tematiche: IL VERDE, nelle sue diverse declinazioni; la FAUNA SELVATICA; la SALUTE UMANA. Quest'ultima è tema centrale della sezione NOI E IL CLIMA, che quest'anno si arricchisce anche di nuovi contributi sulla psicologia ambientale, l'alimentazione sostenibile e i consumi energetici futuri per climatizzare le nostre case. Tema già presente nelle precedenti edizioni è quello delle acque interne, che viene qui sviluppato con particolare riferimento alla VITA NEI FIUMI.

Nell'intero percorso di lettura, ritroviamo più volte alcuni concetti e principi trasversali, fondamentali per uno sviluppo climaticamente resiliente: i servizi ecosistemici, la naturalità e connettività degli habitat, la necessità di affrontare con approcci integrati la crisi climatica che sta diventando sistemica.

Capisaldi di questo progetto editoriale rimangono le sezioni dedicate a IL METEO E IL CLIMA, I GHIACCIAI e IL MARE, che ogni anno forniscono aggiornamenti sugli andamenti di ciascun settore grazie alle serie storiche di dati analizzate dagli esperti, a cui si aggiungono nuovi approfondimenti.

Gli articoli di *Segnali dal Clima in FVG* sono il risultato del lavoro di decine di autori appartenenti agli enti del Gruppo di lavoro Clima FVG, che vi contribuiscono su base volontaria: perciò di anno in anno variano i temi generali e gli aspetti specifici che vengono esplorati e messi in evidenza. Ma *Segnali dal clima in FVG* non “invecchia” rapidamente: rimangono quindi a disposizione online le edizioni precedenti e tutta la ricchezza delle tematiche esplorate e degli argomenti trattati.

Questo impegno divulgativo condiviso ha ricevuto un importante riconoscimento internazionale, vincendo l'*EMS 2025 Outreach & Communication Award*, il premio per la sensibilizzazione e la comunicazione attribuito dalla European Meteorological Society.

**Il gruppo di lavoro tecnico-scientifico
Clima FVG**

L'ABC DEL CLIMA

I box o le pagine a sfondo arancione spiegano termini e concetti specifici utilizzati nell'articolo, fornendo le informazioni di base necessarie per una piena comprensione.

Lo sfondo arancione evidenzia anche i MINI-RIASSUNTI inseriti nella prima pagina di ciascun articolo.

APPROFONDIMENTI

I box o le pagine a sfondo azzurro contengono ulteriori informazioni sull'argomento, esempi specifici, contenuti extra e spiegazioni tecniche per chi sia interessato a una lettura più approfondita.

CONSIGLI PRATICI

I box o le pagine a sfondo verde propongono suggerimenti sui comportamenti che ciascuno può adottare a livello personale per adattarsi a cambiamenti climatici e/o ridurre le emissioni di gas serra.

GRUPPO DI LAVORO TECNICO-SCIENTIFICO CLIMA FVG

Il gruppo di lavoro tecnico-scientifico “Clima FVG” istituito dalla Regione autonoma Friuli Venezia Giulia nel 2022 riunisce le eccellenze tecniche e scientifiche presenti in FVG, in grado di fornire all’amministrazione regionale e a tutti gli enti e soggetti del FVG le conoscenze più aggiornate per affrontare i cambiamenti climatici sul nostro territorio.

Ad ARPA FVG è stato affidato il coordinamento del team, che è composto da esperti di ICTP, OGS, CNR, delle Università di Udine e di Trieste e della stessa Regione: gli stessi che avevano elaborato e pubblicato, nel 2018, il primo **Studio conoscitivo dei cambiamenti climatici e di alcuni loro impatti in Friuli Venezia Giulia**.

Il Gruppo di lavoro Clima FVG innanzitutto facilita la condivisione e la collaborazione tra i soggetti esperti che in regione producono conoscenze tecnico-scientifiche sui cambiamenti climatici e sui loro effetti.

Fornisce quindi un **orientamento** e un **supporto consultivo alla pianificazione** regionale delle azioni per il clima e in particolare per **l’adattamento ai cambiamenti climatici**.

L’attività del gruppo Clima FVG favorisce poi il **trasferimento delle conoscenze** scientifiche ai tecnici che le applicheranno sul territorio.

E infine, tutti i componenti del gruppo di lavoro credono che sia indispensabile divulgare queste **conoscenze alla cittadinanza**, promuovendo quella che si chiama “climate literacy” ovvero **l’alfabetizzazione climatica** che mette ciascuno di noi in condizione di comprendere la propria influenza sul clima e l’influenza del clima su ciascuna persona e sulla società.

La redazione di “Segnali dal Clima in FVG” è un primo passo per dare concretezza a questo fondamentale obiettivo.

GLI ENTI E LE PERSONE



ARPA FVG – Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente



CNR - Istituto di Scienze Marine di Trieste



CNR - Istituto di Scienze Polari



ICTP - International Centre for Theoretical Physics di Trieste



OGS - Istituto nazionale di oceanografia e di geofisica sperimentale di Trieste



Regione autonoma Friuli Venezia Giulia



Università degli Studi di Trieste



Università degli Studi di Udine



Fulvio Stel (coordinatore) e Federica Flapp



Fabio Raicich



Renato R. Colucci



Filippo Giorgi



Cosimo Solidoro



Silvia Stefanelli



Giovanni Bacaro



Alessandro Peressotti

DAL VERDE URBANO ALLE FORESTE

estratto da

SEGNALI DAL CLIMA FVG CAMBIAMENTI IMPATTI AZIONI

notizie dal

GRUPPO DI LAVORO TECNICO SCIENTIFICO CLIMA FVG

Settembre 2025

DAL VERDE URBANO ALLE FORESTE

Alberi, siepi, ecosistemi: dall'ambiente cittadino ai grandi spazi naturali, i rischi che corrono e le soluzioni che ci offrono

Il “verde” rappresenta non solo un elemento esposto e vulnerabile agli impatti dei cambiamenti climatici, ma anche uno dei nostri alleati più preziosi per contrastarne le cause e gli effetti. Gli articoli di questa sezione ci guidano attraverso un viaggio che parte dalle nostre città, arriva fino alle foreste e fa emergere il ruolo fondamentale che la natura gioca sia per la mitigazione che per l'adattamento ai cambiamenti climatici, oltre che per il benessere e la salute di persone e ambiente.

La rete ecologica urbana, composta da parchi e giardini, fornisce una molteplicità di servizi ecosistemici, tra cui la difesa contro ondate di calore e piogge intense e l'assorbimento del carbonio dall'atmosfera. Sono sempre più evidenti i vantaggi delle “soluzioni basate sulla natura”, promosse anche dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia che supporta concretamente i Comuni nell'adozione di strategie innovative, dai giardini pluviali ai corridoi di ventilazione, per contrastare l'effetto “isola di calore urbana” e migliorare la qualità della vita.

Uscendo dalla città, il viaggio prosegue verso il “cuore verde” del territorio: siepi e filari di alberi che popolano la nostra campagna formano un'infrastruttura verde, ora mappata tramite immagini satellitari, che contribuisce ad assorbire CO₂ dall'atmosfera e garantisce la connettività ecologica, essenziale per la sopravvivenza di piante e animali.

Addentrando nelle foreste, scopriamo come la tecnologia più avanzata, come i sensori *TreeTalkers*®, permetta di “ascoltare” gli alberi in tempo reale per monitorare la loro salute e la loro capacità di adattamento ai cambiamenti climatici. Le specie forestali hanno infatti diverse strategie per adattarsi al clima che cambia, ma possono essere anche aiutate con una “migrazione assistita”.

Le foreste svolgono inoltre un ruolo fondamentale per la mitigazione del riscaldamento globale grazie alla loro capacità di catturare e stoccare il carbonio: il telerilevamento consente di quantificare questo contributo per pianificare una gestione forestale più efficace.

Il percorso di lettura ci porta quindi a comprendere come perdita di biodiversità e cambiamento climatico siano due crisi interconnesse, che possono essere affrontate con una strategia comune: ripristinare la natura. Il *rewilding*, mira a ripristinare la natura e a promuovere un nuovo equilibrio tra gli ecosistemi e le attività umane: la sua applicazione all'ambito forestale è oggetto di studio in FVG.

Il viaggio nel “verde” si conclude con un approfondimento di ampio respiro, che evidenzia come oggi sia necessario adottare forme di conservazione dinamiche della natura, che si adattino ai cambiamenti, per garantire che la biodiversità del futuro possa prosperare.

I SERVIZI ECOSISTEMICI DELLA RETE ECOLOGICA DI TRIESTE CONTRO I CAMBIAMENTI CLIMATICI



Le infrastrutture verdi migliorano la qualità della vita urbana integrando la natura negli spazi cittadini.

A Trieste la rete ecologica formata da ecosistemi urbani e periurbani favorisce la biodiversità e la resilienza climatica, attenuando gli effetti di ondate di calore e piogge intense.

Inoltre, sequestro e stoccaggio del carbonio contribuiscono alla mitigazione del cambiamento climatico.

Ma i servizi ecosistemici forniti dagli alberi sono a rischio in scenari climatici futuri associati a emissioni crescenti di gas serra.

Le aree urbane ospitano una parte crescente, ormai già oltre il 50%, della popolazione mondiale, configurandosi come luoghi complessi dove le dinamiche ambientali, sociali ed economiche si intrecciano in maniera profonda. In questo contesto, i servizi ecosistemici rivestono un ruolo fondamentale nel miglioramento della qualità della vita e nella sostenibilità delle città. Questi servizi, che provengono dagli **ecosistemi naturali e seminaturali** presenti negli spazi urbani e periurbani, offrono una vasta gamma di benefici cruciali per il benessere dei cittadini. Tra i principali **servizi ecosistemici** si possono ricordare la regolazione del microclima, il miglioramento della qualità dell'aria, il controllo delle acque meteoriche, la conservazione della biodiversità e il rafforzamento del benessere psico-fisico delle persone.

INFRASTRUTTURE VERDI: UNA STRATEGIA EMERGENTE

Le infrastrutture verdi, intese come reti di spazi naturali e seminaturali progettati e gestiti per fornire tali servizi alle persone, stanno emergendo, in Europa come nel resto del mondo, come una strategia chiave per **affrontare le sfide ambientali e migliorare la resilienza del territorio e delle città**. Tali soluzioni, che comprendono una varietà di spazi naturali e seminaturali progettati e gestiti con l'obiettivo di fornire servizi ecosistemici, non solo migliorano la qualità dell'ambiente urbano, ma contribuiscono anche a ridurre gli effetti dei cambiamenti climatici. Parchi, giardini, tetti e pareti verdi, corridoi ecologici e aree umide artificiali sono solo alcune delle forme di infrastrutture verdi che, oltre a incrementare la **biodiversità**, migliorano la **qualità dell'aria**, contrastano il fenomeno di **isola di calore urbana** e favoriscono l'infiltrazione delle **acque piovane**. Questi spazi, inoltre, promuovono la **coesione sociale**, offrendo aree accessibili per la comunità dove è possibile socializzare, fare attività fisica e godere del contatto con la natura.

LA RETE ECOLOGICA DELLA CITTÀ DI TRIESTE...

Nel caso della città di Trieste, l'analisi delle infrastrutture verdi non può prescindere dalla comprensione della sua rete ecologica complessa, che si inserisce all'interno della più ampia rete ecologica regionale. La città si caratterizza per una **notevole varietà di ambienti naturali e seminaturali**, che spaziano dagli altopiani carsici agli ambienti costieri e marini, con formazioni forestali e prati aridi inseriti in un diversificato mosaico agricolo ad alto valore ecologico e paesaggistico. L'integrazione delle infrastrutture verdi nella pianificazione urbana a Trieste non si limita alla creazione di nuovi spazi verdi, ma implica anche un processo di **valorizzazione e miglioramento della rete ecologica esistente**. La conformazione geografica della città e la sua posizione strategica, tra il mare Adriatico e le Alpi Giulie, offrono opportunità uniche per l'integrazione di soluzioni basate sulla natura, che rafforzano la connettività ecologica tra le diverse aree naturali.



... NEL CONTESTO DELLA RETE ECOLOGICA REGIONALE

La rete ecologica di Trieste si inserisce nel contesto della rete ecologica regionale, un sistema di aree protette e corridoi ecologici che **collega ecosistemi significativi e favorisce la continuità biologica tra habitat naturali e seminaturali**. Trieste, infatti, è un nodo cruciale di questa rete, poiché le sue caratteristiche geografiche e naturali determinano una serie di potenzialità per il miglioramento della connessione tra gli ecosistemi urbani e quelli circostanti. L'analisi di questa rete ecologica comprende la **valutazione degli ambienti naturali e seminaturali, dei corridoi ecologici esistenti e delle connessioni** tra i diversi habitat, così da individuare le possibili aree di intervento per potenziare la resilienza della città e la sua capacità di adattamento ai cambiamenti climatici.

In questo contesto, le infrastrutture verdi a Trieste non solo contribuiscono alla sostenibilità ambientale, ma svolgono anche un ruolo cruciale nella **conservazione della biodiversità locale**, creando habitat per le specie animali e vegetali tipiche dell'area. La progettazione e la gestione di questi spazi devono quindi essere strettamente legate alla rete ecologica regionale, affinché la città possa mantenere e potenziare la connessione tra gli ambienti naturali e urbani.

IL COINVOLGIMENTO DELLA COMUNITÀ

Un aspetto fondamentale per il successo di queste infrastrutture è il coinvolgimento attivo della comunità. La **partecipazione dei cittadini alla progettazione, realizzazione e manutenzione degli spazi verdi** è un elemento chiave per promuovere una gestione sostenibile e inclusiva. Trieste, in questo senso, si distingue per un modello di governance che promuove la collaborazione tra le istituzioni locali, le organizzazioni non governative, i cittadini e i vari attori sociali. Il coinvolgimento attivo della comunità non solo aumenta la consapevolezza riguardo l'importanza delle infrastrutture verdi, ma favorisce anche la **creazione di legami più stretti tra le persone e l'ambiente**.

Guardando al futuro, le infrastrutture verdi rappresentano una delle risposte più promettenti

alle sfide ambientali e climatiche che Trieste si troverà a fronteggiare. Con l'aumento delle temperature, l'intensificarsi degli eventi climatici estremi e la crescente pressione urbana, le soluzioni basate sulla natura sono destinate a diventare sempre più cruciali. Trieste, attraverso l'analisi e il potenziamento della sua rete ecologica, potrà continuare a migliorare la qualità della vita dei suoi abitanti, promuovendo la resilienza urbana e contribuendo alla sostenibilità dell'intero territorio.

GLI ECOSISTEMI ASSORBONO E SEQUESTRANO CO₂

Tra i numerosi servizi ecosistemici forniti dalle aree naturali, seminaturali e urbane, **la capacità di assorbire e immagazzinare anidride carbonica (CO₂)** rappresenta uno dei contributi più rilevanti degli ecosistemi alla regolazione del clima. Questo servizio, noto come sequestro e stoccaggio del carbonio, permette di ridurre la concentrazione di gas serra in atmosfera e contribuisce quindi alla **mitigazione del cambiamento climatico**, in sinergia con le politiche di riduzione delle emissioni. Attraverso la fotosintesi, le piante e gli ecosistemi di cui esse fanno parte trasformano la CO₂ atmosferica in biomassa, trattenendola nei tronchi, nelle foglie, nelle radici e nel suolo. Questo processo consente non solo di **sottrarre carbonio dall'atmosfera** (sequestro annuale), ma anche di **conservarlo nel tempo** (stoccaggio), svolgendo una funzione assimilabile a quella di una "infrastruttura verde" (IV) invisibile ma vitale per la resilienza del sistema urbano e periurbano.

Uno studio condotto dall'Università degli Studi di Trieste per il Comune di Trieste ha calcolato la quantità di carbonio fissata e stoccata dagli ecosistemi del territorio comunale e dagli alberi all'interno della città, come spiegato nell'approfondimento **IL SEQUESTRO E LO STOCCAGGIO DI CARBONIO: UN SERVIZIO ECOSISTEMICO CHIAVE NELLA RETE ECOLOGICA DEL COMUNE DI TRIESTE**.

IL SEQUESTRO E LO STOCCAGGIO DI CARBONIO: UN SERVIZIO ECOSISTEMICO CHIAVE NEL COMUNE DI TRIESTE

LO STOCCAGGIO DI CARBONIO NEGLI ECOSISTEMI DEL COMUNE DI TRIESTE

La quantificazione del carbonio stoccato all'interno della rete ecologica del Comune di Trieste, effettuata mediante il modello InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*), applicato a una mappa degli habitat aggiornata con risoluzione spaziale di 5 metri (Figura 1), ha permesso di stimare il carbonio immagazzinato nei principali comparti ecologici: biomassa epigea, biomassa ipogea, sostanza organica del suolo e lettiera forestale. I risultati ottenuti offrono una fotografia scientificamente fondata ma al contempo sorprendentemente concreta dell'infrastruttura ecologica triestina. In termini assoluti, la quantità di carbonio attualmente stoccata nei comparti vegetazionali e pedologici del Comune di Trieste corrisponde a circa 700,000 tonnellate di carbonio.

IL CONTRIBUTO DELLA FORESTA URBANA: ALBERI CITTADINI COME ATTORI CLIMATICI

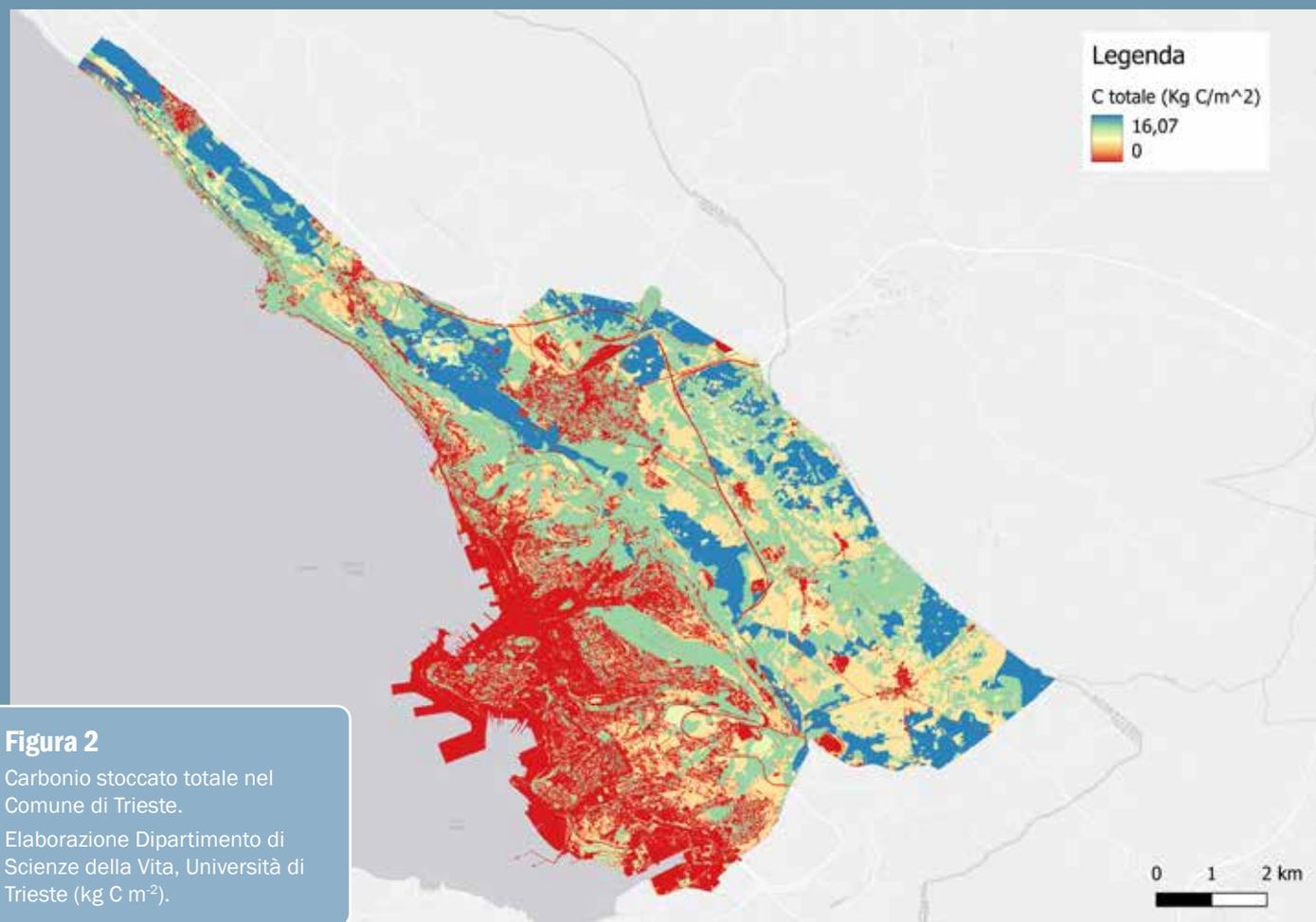
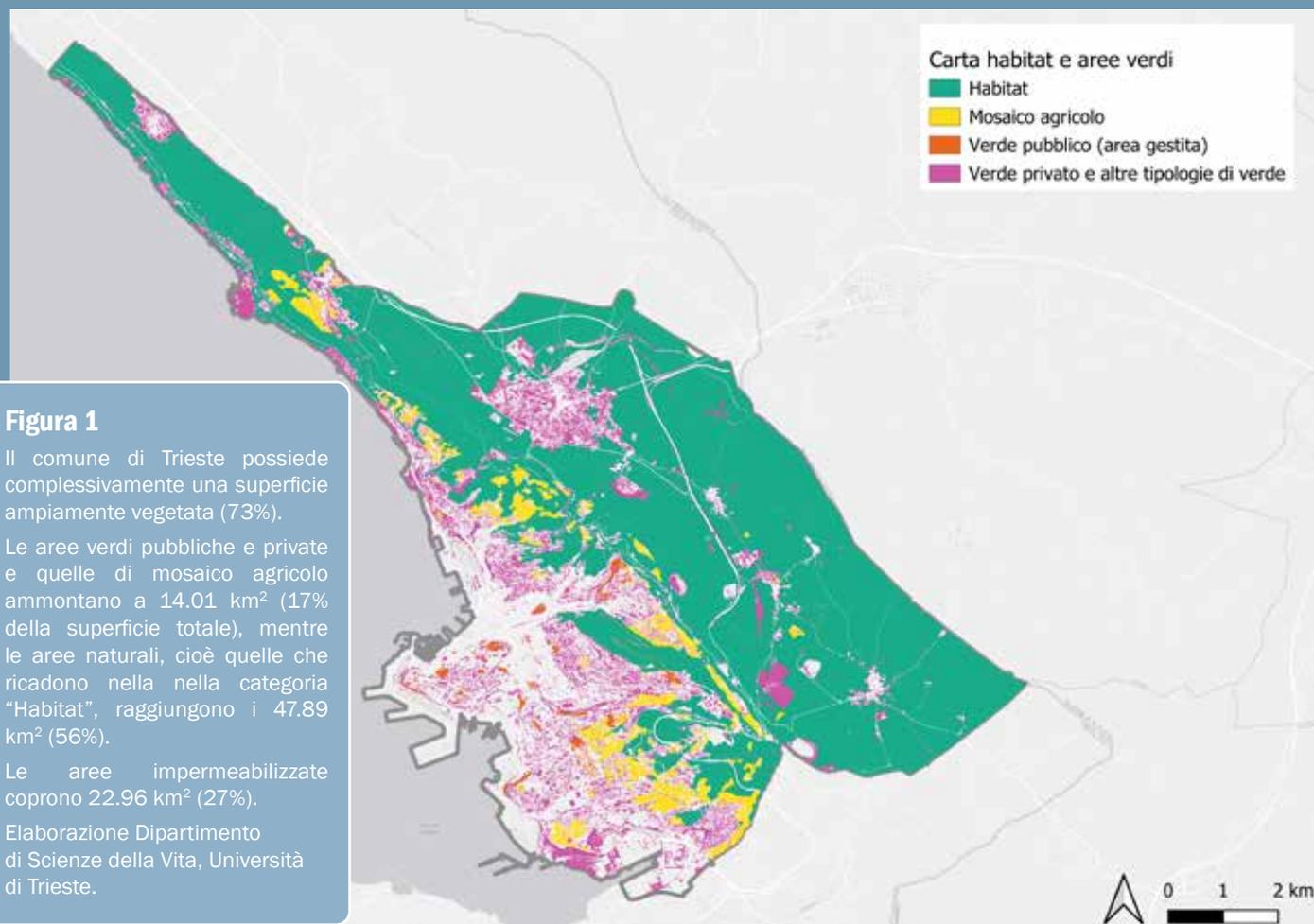
Se il territorio comunale, nella sua dimensione vasta e articolata, costituisce un importante serbatoio di carbonio, anche la porzione urbana offre un contributo significativo. In particolare, gli alberi censiti all'interno della città di Trieste sono stati oggetto di una stima puntuale grazie alla piattaforma i-Tree Eco, strumento adottato a livello internazionale per quantificare i servizi ecosistemici delle foreste urbane. L'analisi ha considerato 28.692 alberi censiti dall'Unità Tecnica Alberature e Parchi del Comune di Trieste, per i quali sono stati raccolti dati dettagliati su specie, diametro del tronco, altezza, condizione fitosanitaria, esposizione e posizione. Attraverso i-Tree, è stato possibile calcolare tanto il carbonio attualmente stoccato (Figura 2) quanto quello sequestrato ogni anno.

In termini di equivalenza funzionale, il carbonio immagazzinato nelle alberature urbane corrisponde alle emissioni annuali di circa 8.180 automobili di media cilindrata, mentre annualmente la foresta urbana di Trieste sequestra carbonio corrispondente alle emissioni prodotte in un anno da circa 300 automobili o, ancora, alle emissioni generate in un anno da circa 100 abitazioni monofamiliari.

Pur trattandosi di quantità inferiori rispetto al patrimonio vegetale periurbano (circa 1,5%), le alberature urbane offrono un contributo tutt'altro che trascurabile. Infatti, gli alberi in ambiente urbano svolgono molteplici funzioni oltre al sequestro di CO₂: offrono ombra e mitigano l'isola di calore, migliorano la qualità dell'aria, favoriscono la salute mentale e fisica, aumentano la biodiversità locale e contribuiscono al valore estetico e identitario dei quartieri.

Il raffronto con le emissioni cittadine sottolinea quanto anche piccoli interventi di forestazione urbana o cura del verde possano generare benefici cumulativi misurabili. Il mantenimento e la valorizzazione del patrimonio arboreo urbano rappresentano, dunque, una strategia accessibile e immediata per rafforzare la resilienza climatica locale e promuovere una cultura ambientale diffusa.





L'INFRASTRUTTURA VERDE ATTENUA L'EFFETTO “ISOLA DI CALORE URBANO”

Uno degli effetti più evidenti e problematici legati all'urbanizzazione è il fenomeno dell'isola di calore urbana, conosciuto anche come *Urban Heat Island* (UHI). Questo termine descrive l'aumento della temperatura che si verifica nelle aree urbanizzate rispetto a quelle rurali circostanti. Le superfici costruite, come strade, edifici e tetti, tendono infatti ad assorbire e trattenere il calore derivato dalla radiazione solare durante il giorno, rilasciandolo lentamente durante la notte, determinando un persistente aumento delle temperature locali.

L'isola di calore può essere osservata sia come differenza tra le temperature dell'aria (*urban canopy UHI*), sia come differenza tra le temperature di superficie (*surface UHI*). In entrambi i casi, l'effetto si traduce in una maggiore esposizione al caldo per chi vive in città, aggravata dai cambiamenti climatici e dalla crescente impermeabilizzazione del suolo.

Questa condizione comporta conseguenze rilevanti per la salute pubblica, in particolare durante le ondate di calore estive, ma incide anche sul consumo energetico, sull'equilibrio ecologico urbano e sulla qualità della vita in generale.

In questo scenario, il ruolo delle aree verdi urbane e della rete ecologica diventa cruciale. Gli spazi naturali e seminaturali, come parchi, giardini, viali e filari alberati e aree boscate, hanno una riconosciuta capacità di mitigare l'isola di calore attraverso diversi meccanismi ecologici. Gli alberi e la vegetazione contribuiscono all'abbassamento della temperatura attraverso l'ombreggiamento diretto, la riduzione dell'assorbimento di calore da parte delle superfici sottostanti e i processi di evapotraspirazione, che rilasciano umidità nell'aria raffrescando l'ambiente. I benefici variano a seconda della tipologia, dell'estensione e della struttura delle aree verdi, ma possono produrre differenze termiche anche significative.

REGOLAZIONE DEL MICROCLIMA URBANO: IL CONTRIBUTO DELL'INFRASTRUTTURA VERDE DI TRIESTE ALLA MITIGAZIONE DELL'ISOLA DI CALORE

Nel contesto della città di Trieste, la regolazione del microclima attraverso l'infrastruttura verde locale riveste un'importanza strategica, anche alla luce delle caratteristiche climatiche locali e della peculiare configurazione urbanistica.

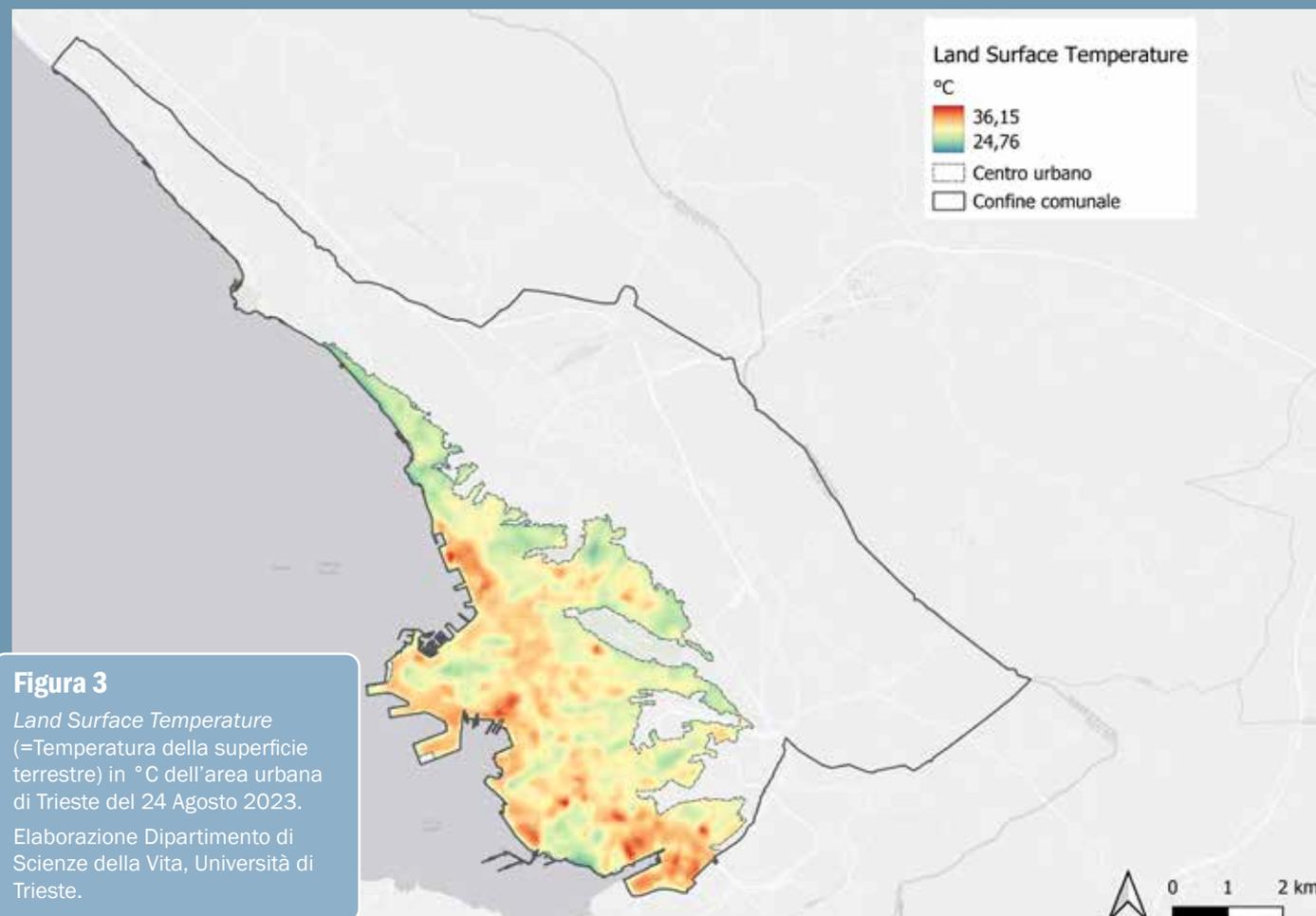
Trieste, situata in una fascia climatica di transizione tra il clima mediterraneo e quello continentale, presenta un tessuto urbano fortemente antropizzato e in alcune zone più densamente edificate ha una ridotta copertura vegetale. Al tempo stesso, la città è circondata da un mosaico di ambienti naturali e seminaturali, dai boschi del Carso alle aree verdi collinari e costiere, che offrono un grande potenziale per la mitigazione degli impatti microclimatici negativi.

LE AREE URBANE CENTRALI: MOLTO PIÙ CALDE

Le analisi condotte tramite tecniche di telerilevamento, hanno evidenziato come le aree urbane centrali di Trieste, in particolare i quartieri con elevata densità edilizia e scarsa presenza di verde (es. Borgo Teresiano, San Giacomo), sperimentino temperature superficiali estive significativamente superiori rispetto alle zone periferiche o collinari, dove la vegetazione è più abbondante (Figura 3). Durante le ondate di calore estive, le temperature superficiali nel centro città possono mantenersi anche di 8-9 °C superiori rispetto alle aree boscate del Carso o alle zone con maggiore copertura vegetale, aggravando i rischi per la salute delle fasce più vulnerabili della popolazione.

I PARCHI URBANI: “REGOLATORI TERMICI”

Al contrario, parchi urbani come il Giardino Pubblico Muzio de Tommasini, il Parco di Villa Revoltella o il Bosco Farneto mostrano una significativa capacità di abbattimento della temperatura locale, fungendo da veri e propri “regolatori termici” della città. Le analisi condotte mostrano che entro un raggio di circa 90 metri da queste aree verdi, in particolare nel centro cittadino, si osserva una riduzione sensibile della temperatura, che può raggiungere 2 °C in meno

**Figura 3**

Land Surface Temperature (=Temperatura della superficie terrestre) in °C dell'area urbana di Trieste del 24 Agosto 2023.

Elaborazione Dipartimento di Scienze della Vita, Università di Trieste.

rispetto alle aree asfaltate circostanti durante le ore più calde della giornata. Questa differenza è ancora più notevole se si pensa alla scala spaziale relativamente ridotta.

IL VERDE: STRUMENTO DI SALUTE PUBBLICA E RESILIENZA CLIMATICA

La promozione e il rafforzamento delle infrastrutture verdi a Trieste, anche attraverso interventi mirati di afforestazione urbana, la realizzazione di tetti e pareti verdi, e la valorizzazione ecologica di spazi pubblici residuali, può quindi rappresentare una risposta concreta alla sfida climatica. La pianificazione urbanistica orientata all'integrazione del verde non dovrebbe dunque essere considerata solo come una misura ambientale, ma come un vero e proprio strumento di salute pubblica e resilienza climatica. Nel quadro della rete ecologica locale e regionale, potenziare la continuità vegetale tra le aree urbane e periurbane di Trieste, favorendo la connettività tra gli spazi verdi esistenti e creando nuovi elementi vegetati nei vuoti urbani, consente di massimizzare i benefici della regolazione microclimatica.



Misurazioni effettuate nel Giardino Pubblico Muzio de Tommasini di Trieste dal Dipartimento di Scienze della Vita dell'Università di Trieste.

Strumenti avanzati, come i sensori termici montati su piattaforme satellitari o droni, consentono oggi di monitorare con precisione l'entità di questo effetto rinfrescante, offrendo evidenze concrete del beneficio apportato dal verde urbano.

A Trieste rilievi e misurazioni effettuati con diverse tecniche hanno consentito di misurare la capacità del verde urbano di abbattere le alte temperature estive, come illustrato nell'approfondimento **REGOLAZIONE DEL MICROCLIMA URBANO: IL CONTRIBUTO DELLA RETE ECOLOGICA DI TRIESTE ALLA MITIGAZIONE DELL'ISOLA DI CALORE.**

ALBERI E SERVIZI ECOSISTEMICI A RISCHIO NEL CLIMA ATTUALE E FUTURO

L'aumento delle temperature medie, l'intensificazione della stagionalità climatica e la maggiore frequenza di eventi meteorologici estremi, in particolare di lunghi periodi di siccità, compromettono la **disponibilità idrica per le piante** e, di conseguenza, la **salute delle foreste urbane**. In ambito urbano, questi effetti risultano ulteriormente amplificati dalla presenza di **estese superfici impermeabili**, che impediscono l'infiltrazione dell'acqua nel suolo e aggravano le condizioni di stress idrico. Questa combinazione di fattori rende **gli alberi della città particolarmente vulnerabili**, soprattutto quelli con scarsa tolleranza alla siccità.

Lo studio condotto dall'Università di Trieste per il Comune di Trieste ha permesso di stimare come in futuro le condizioni degli alberi cittadini e i servizi ecosistemici che essi offrono risentiranno dei cambiamenti climatici in due possibili scenari: con una rapida e decisa riduzione delle emissioni di gas serra oppure con emissioni che continueranno a crescere. La compromissione della foresta urbana e dei suoi servizi ecosistemici saranno molto più marcati nel secondo caso, come illustrato nell'approfondimento **"SCENARI DI CAMBIAMENTI CLIMATICI E LORO IMPATTO SUI SERVIZI ECOSISTEMICI DELLA FORESTA URBANA DI TRIESTE"** (a destra).

SCENARI DI CAMBIAMENTI CLIMATICI E LORO IMPATTO SUI SERVIZI ECOSISTEMICI DELLA FORESTA URBANA DI TRIESTE

Dalle analisi di scenario effettuate sulla vulnerabilità ai cambiamenti climatici della foresta urbana del Comune di Trieste, la modellazione condotta ha consentito di stimare lo stato di salute degli alberi in condizioni attuali e di proiettare tale stato in due scenari futuri di cambiamento climatico, il primo ipotizza una forte riduzione delle emissioni, mentre il secondo descrive un mondo in cui le emissioni continuano a crescere ai ritmi attuali. Ai due scenari corrispondono conseguenze diverse sul clima e sull'aumento delle temperature (corrispondenti agli scenari di emissione di gas serra RCP2.6 e RCP8.5 dell'IPCC).

I risultati ottenuti indicano una correlazione negativa tra la tolleranza alla siccità delle specie arboree e lo stato di salute osservato, evidenziando come le aree caratterizzate da elevata stagionalità delle precipitazioni e bassa resilienza idrica delle piante mostrino già oggi segni di maggiore vulnerabilità.

UN MERCATO DECLINO DELLA FORESTA URBANA E DEI SERVIZI ECOSISTEMICI NELLO SCENARIO A EMISSIONI CRESCENTI

Nel confronto tra scenari futuri, lo scenario RCP8.5, associato a un'elevata emissione di gas serra, prevede un marcato declino della salute della foresta urbana, con conseguente perdita di numerosi individui appartenenti a specie particolarmente diffuse come *Acer campestre* (acero campestre), *Tilia cordata* (tiglio selvatico), *Ligustrum lucidum* (ligustro del Giappone) e *Carpinus betulus* (carpino bianco). La perdita stimata di queste specie, dovuta alla loro vulnerabilità funzionale e alla distribuzione in aree che diventeranno climaticamente sfavorevoli, potrebbe tradursi in una sostanziale riduzione della capacità della foresta urbana di Trieste di fornire servizi ecosistemici.

In termini di variazioni attese nella fornitura dei servizi ecosistemici associati alla salute degli alberi urbani, nello scenario RCP8.5, si prevede una significativa riduzione dei servizi legati alla regolazione climatica (sequestro e stoccaggio del

carbonio), al miglioramento della qualità dell'aria e alla gestione delle acque meteoriche. Due specie particolarmente rappresentative, *Platanus x acerifolia* (platano) e *Aesculus hippocastanum* (ippocastano), che oggi contribuiscono per circa il 28,4% alla fornitura totale di servizi ecosistemici della foresta urbana di Trieste, mostrano alti valori di vulnerabilità nello scenario più critico.

La loro eventuale perdita comporterebbe impatti rilevanti anche in termini economici, con diminuzioni significative del valore di mercato legato allo stoccaggio e alla fissazione del carbonio (Figura 4).

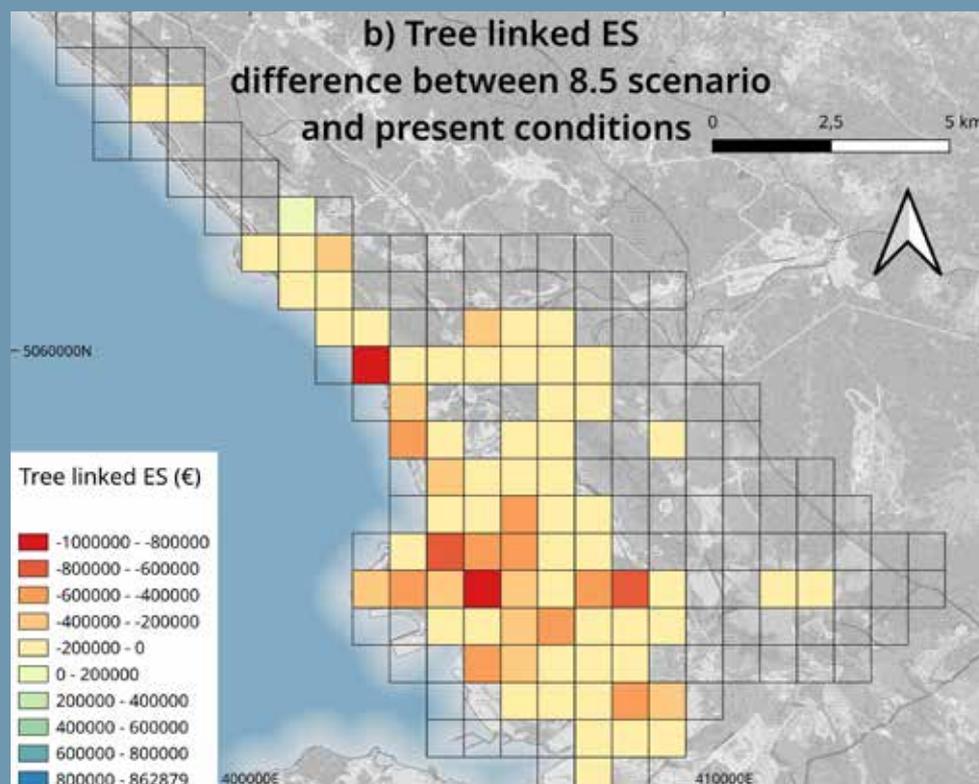
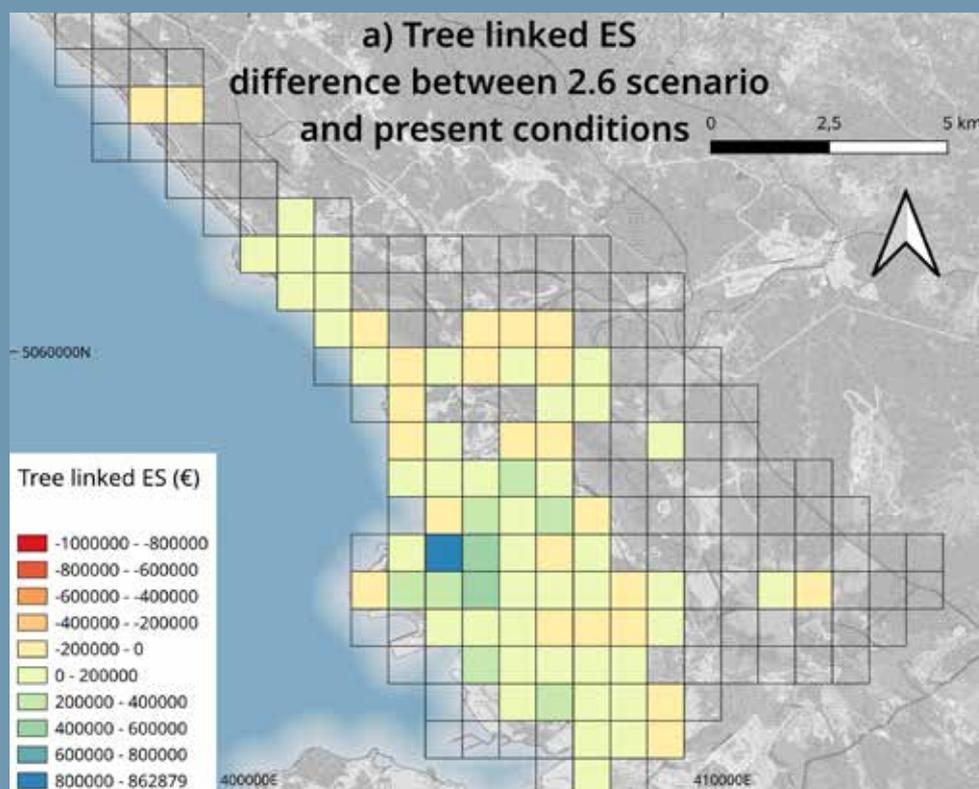
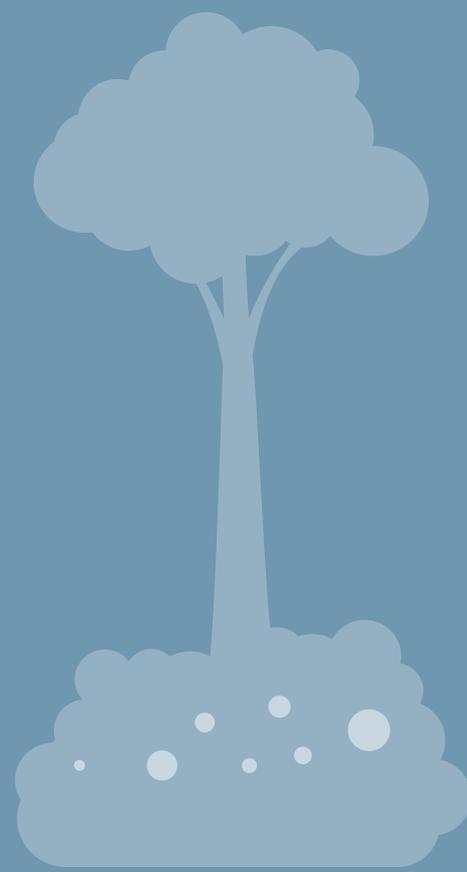


Figura 4

Servizi Ecosistemici legati agli alberi (espressi in €).

In (a), differenza dei valori tra lo scenario RPC2.6 e le condizioni attuali a Trieste. In (b), differenza dei valori tra lo scenario 8.5 e le condizioni attuali a Trieste. È evidente la forte riduzione attesa (con associata perdita economica) di servizi ecosistemici nello scenario climatico peggiore (RCP8.5).

Elaborazione Dipartimento di Scienze della Vita, Università di Trieste.



STRATEGIE DI ADATTAMENTO PER CONSERVARE LA FORESTA URBANA E I SERVIZI ECOSISTEMICI

I risultati emersi pongono in evidenza la necessità di un'attenta pianificazione nella **selezione delle specie da utilizzare nei futuri interventi di forestazione urbana**. La scelta delle specie dovrà prioritariamente basarsi sulla considerazione delle condizioni ambientali di vincolanti previste per il futuro, come ad esempio lo spazio disponibile per le radici, la vulnerabilità ai patogeni, o di carattere pratico come la disponibilità nei vivai e la manutenzione della specie.

Insieme a questi criteri si dovranno considerare le caratteristiche ecofisiologiche delle specie, come la tipologia di suolo richiesta e la tolleranza sia al ristagno idrico che alla siccità.

Nel complesso, si è evidenziato che il cambiamento climatico, se non adeguatamente contrastato, comporterà una riduzione generalizzata della funzionalità ecologica della foresta urbana triestina. La perdita di individui e specie vulnerabili comprometterà la capacità del sistema forestale urbano di garantire benefici fondamentali per la salute, il benessere e la resilienza ambientale della città. Diventa pertanto urgente integrare strategie adattive e di gestione proattiva nella pianificazione urbana, **promuovendo la diversificazione funzionale delle specie e potenziando le aree verdi urbane**. Solo in questo modo sarà possibile assicurare la continuità nella fornitura dei servizi ecosistemici urbani e mantenere la foresta urbana come elemento strategico per la sostenibilità delle nostre città.

**Giovanni Bacaro, Valentina Olmo,
Miris Castello, Francesco Bagnolini**
Università degli Studi di Trieste
Roberto Prodan, Anna Trani, Eddi Dalla Betta
Comune di Trieste

SOLUZIONI BASATE SULLA NATURA PER L'ADATTAMENTO CLIMATICO: IL SUPPORTO DELLA REGIONE FVG AI COMUNI PER IL VERDE URBANO

Foto: Silvia Stefanelli

Le città sono molto vulnerabili ai cambiamenti climatici e agli eventi estremi quali piogge intense e ondate di calore.

L'effetto "*isola di calore urbana*" accentua i rischi per la salute umana.

Infrastrutture verdi e blu e soluzioni basate sulla natura attenuano questi effetti con una vasta gamma di interventi: dal verde urbano tradizionale a giardini pluviali, parcheggi verdi e corridoi di ventilazione.

In FVG la Regione supporta i Comuni con finanziamenti per azioni di mitigazione e adattamento climatico basate sulla natura.

Giardino pluviale (dettaglio) a Mechelen, Fiandre - Belgio.

Le città sono in prima linea nell'adattamento al cambiamento climatico, un fenomeno globale che ha un impatto notevole sulla vita urbana. L'aumento delle temperature globali determina un incremento del numero di eventi meteorologici estremi, come alluvioni e siccità. Tutti questi fattori hanno un impatto sui servizi di base delle città, sulle infrastrutture, sugli alloggi e sulla salute delle persone.

Tra gli eventi estremi che si intensificano in città, ci sono le ondate di calore. L'effetto "*isola di calore urbana*", causato da un diffuso sviluppo edilizio e da un consumo di suolo, può portare a temperature molto più elevate rispetto a quelle delle aree rurali. A questo fenomeno consegue che le città si stanno riscaldando a un ritmo doppio rispetto alla media globale...

Le ondate di calore peggiorano la qualità dell'aria nelle città e comportano rischi specifici per la salute, aggravando l'impatto climatico attraverso la formazione di ozono, [un gas serra dannoso per le vie respiratorie](#), a livello del suolo.

L'IMPORTANZA DEL VERDE URBANO E IL SUPPORTO DELLA REGIONE AI COMUNI

Gli spazi verdi urbani come parchi, giardini pluviali, tetti e muri verdi, sono ottimi esempi di **soluzioni basate sulla natura per ridurre l'impatto di eventi climatici estremi**: migliorano la qualità dell'aria, riducono le isole di calore urbane, promuovono la biodiversità, offrono aree ricreative ai residenti e contrastano il cambiamento climatico. Integrando più spazi verdi nella pianificazione

Panchina in legno a protezione del suolo - Mechelen, Fiandre, Belgio.



Foto: Silvia Stefanelli

urbanistica, le città possono aumentare la loro resilienza ai cambiamenti climatici, migliorare la salute pubblica e creare ambienti di vita più sostenibili.

Per proteggere le popolazioni urbane e le infrastrutture da queste sfide in continua evoluzione, è fondamentale attuare misure di adattamento e **rafforzare la resilienza delle città e dei loro residenti**.

Questo articolo esplora l'ampia gamma di **soluzioni basate sulla natura promosse e finanziate dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia** e rivolte ai Comuni, al fine di coinvolgerli nell'adattamento climatico e di integrare le infrastrutture blu e verdi nella pianificazione urbana.

Dal 2021, due bandi regionali hanno incoraggiato i Comuni a pianificare e attuare misure volte a ridurre l'impatto delle inondazioni, quali sistemi sostenibili di drenaggio delle acque e giardini pluviali, e l'impatto delle isole di calore, realizzando parcheggi verdi, parchi urbani e prati. Quasi sessanta Comuni hanno richiesto queste sovvenzioni e stanno implementando soluzioni basate sulla natura, in alcuni casi integrandole nei piani locali di adattamento al clima.

IL CALDO ESTREMO IN EUROPA E LE CITTÀ VULNERABILI

Negli ultimi decenni, il caldo estremo è stato di gran lunga la causa principale dei decessi causati da eventi meteorologici e climatici estremi in Europa. Si stima che tra 55.000 e 72.000 decessi siano stati registrati in ogni estate del 2003, 2010 e 2022 a causa delle ondate di calore. Nella regione europea, secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità, la **mortalità correlata al caldo** è aumentata di circa il 30% negli ultimi 20 anni.

Le aree urbane sono particolarmente vulnerabili alle ondate di calore a causa dell'artificializzazione del suolo, della densità di popolazione, delle infrastrutture grigie diffuse e delle attività economiche. La combinazione di tali fattori contribuisce ad amplificare gli effetti degli eventi meteorologici estremi, mettendo a repentaglio la salute degli abitanti delle città. Infatti, sebbene le aree urbane coprano solo il 3% della superficie terrestre, ospitano oltre il 50% della popolazione mondiale e contribuiscono fino al 70% dei gas serra globali emessi, utilizzando circa il 75% delle risorse mondiali.



Foto: Silvia Stefanelli



Foto: Silvia Stefanelli

Dall'alto: Parcheggio verde con trincee drenanti – Mechelen Fiandre Belgio; Piede d'albero vegetalizzato – Bruxelles.

I BENEFICI DELLA VEGETAZIONE IN CITTÀ

Le infrastrutture verdi, ovvero **la vegetazione integrata nelle infrastrutture urbane**, forniscono un effetto rinfrescante in grado di mitigare l'effetto isola di calore urbana. Uno studio del 2022 ha stimato che la **capacità di raffreddamento degli alberi** in più di 600 città europee varia in media tra 1,1 °C e un massimo di 2,9 °C. La legge europea sul ripristino della natura racco-

manda **una copertura arborea minima del 10% per le città europee**, mentre studi recenti hanno raccomandato che i quartieri urbani dovrebbero puntare a una copertura arborea **del 30% per migliorare il microclima, la qualità dell'aria e la salute**.

La presenza diffusa di alberature in città è relativamente semplice ed economica da implementare, affermano i ricercatori che hanno condotto lo studio sui benefici che gli alberi potrebbero conferire alla riduzione della mortalità estiva.

LA FINALITÀ DELLE MISURE FINANZIATE DALLA REGIONE

La Regione, a partire dal 2021, ha predisposto dei finanziamenti – fino a un massimo di 200.000 euro per Comune - dedicati alle amministrazioni che decidono di intraprendere delle **azioni di adattamento ispirate a soluzioni basate sulla natura**.

L'obiettivo è stato di incoraggiare l'implementazione di un ampio portafoglio di misure di adatta-

mento climatico, seguendo un concetto di **verde diffuso integrato alla pianificazione urbanistica e alle infrastrutture di supporto alla mobilità**. La finalità del bando, rivolto a tutti i Comuni della Regione, è stata di supportare azioni di mitigazione e adattamento climatico basate sulla natura, con un costo contenuto e che potessero adattarsi a diversi contesti climatici, geografici e di esposizione ai rischi climatici.



Foto: Silvia Stefanelli



Foto: Silvia Stefanelli

Realizzazione di un'area alberata peri-urbana – Comune di Fontanafredda.

UN FORUM SU VERDE PUBBLICO E ADATTAMENTO PER IL COMUNI

Nel maggio 2021 è stato organizzato dalla Regione un Forum digitale sul verde pubblico e l'adattamento ai cambiamenti climatici, destinato ai Comuni. Esso ha avuto come finalità l'illustrazione degli interventi possibili in base agli obiettivi di adattamento. Tra le misure possibili, ampio spazio è stato destinato alle **infrastrutture blu come i bacini pluviali, le trincee drenanti, le pavimentazioni permeabili e i bacini di ritenzione**. Il Comune di Santorso Vicentino, tramite il Progetto LIFE Beware, ha illustrato i risultati positivi, nella riduzione dell'impatto di eventi alluvionali, ottenuti dall'implementazione di infrastrutture blu in ambito urbano e periurbano.

Sono stati illustrati gli strumenti europei, predisposti dalla **piattaforma europea per l'adattamento climatico *Climate Adapt***, per visualizzare tramite il GIS (*Geographical Information Systems*) "**Urban Adaptation Map Viewer**" le isole di calore urbane con **Indice di calore urbano**. In aggiunta il **GIS predisposto dall'ISPRA** sul consumo di suolo consente ai Comuni di visualizzare le **mappe sul consumo di suolo** - tendenzialmente aree artificializzate dove gli eventi estremi hanno maggiore impatto - e di diffusione del verde urbano. In questo modo i Comuni possono definire delle aree prioritarie dove implementare le misure di verde urbano ma anche cercare di sviluppare il verde in modo diffuso nella città, con lo scopo di **ridurre le disuguaglianze sociali urbane generate dal vivere in zone con verde diffuso o meno**.

Investire in infrastrutture urbane verdi e costruirle richiede approcci intelligenti e integrati alla gestione del suolo, al design urbano e alla pianificazione spaziale strategica, prendendo in considerazione le caratteristiche locali e la distribuzione spaziale delle vulnerabilità ai cambiamenti climatici.

LE SOLUZIONI BASATE SULLA NATURA PROPOSTE NEL BANDO

Le soluzioni basate sulla natura hanno incluso i seguenti interventi volti a integrare **misure di adattamento, mitigazione e biodiversità in ambito urbano e periurbano**

- **Realizzare infrastrutture blu e reti fluviali:** opere di ritenzione naturale delle acque, gestione

sostenibile dei deflussi di pioggia e riduzione del loro impatto, riutilizzo di acqua piovana. Tra le misure finanziate ci sono i giardini pluviali, i sistemi di drenaggio sostenibili, le trincee drenanti, la rinaturalizzazione di canali, la realizzazione di bacini di bio-ritenzione

- **Ripristinare la connettività ecologica e la biodiversità urbana,** inclusa la fauna selvatica, con corridoi ecologici, la rigenerazione verde di scarpate e aiuole, gli ecodotti - passaggi faunistici e per anfibi- i dissuasori ottici riflettenti per uccelli e pipistrelli
- **Realizzazione di infrastrutture verdi** tra cui parcheggi, tetti, muri e marciapiedi verdi.
- **Realizzazione di parchi e aree verdi:** alberature e siepi, parchi urbani e corridoi di ventilazione

OLTRE IL VERDE URBANO TRADIZIONALE: GIARDINI PLUVIALI, PARCHEGGI VERDI E CORRIDOI DI VENTILAZIONE

Tra le misure proposte nel bando, sono state inserite delle soluzioni a basso costo e a ridotta esigenza di spazio come **i giardini pluviali e i parcheggi verdi**, per convertire i parcheggi, aree che tipicamente rappresentano isole di calore nel periodo estivo, in aree verdi che assorbono la CO₂, l'acqua in eccesso e raffrescano l'area.

- **I giardini pluviali sono un sistema di drenaggio che cattura l'acqua piovana** prima che entri nella rete di tubazioni e la rilascia lentamente nella rete o ne consente l'infiltrazione nel terreno. I giardini pluviali possono contribuire a migliorare la gestione delle acque superficiali mentre svolgono una serie di altre funzioni come comfort climatico, riduzione dell'inquinamento e miglioramento della biodiversità.
- **I parcheggi verdi sono la versione verde di un parcheggio tradizionale,** realizzato con materiali non riflettenti e infrastrutture non permeabili e che amplificano l'isola di calore. I parcheggi verdi utilizzano la vegetazione per la gestione delle acque piovane e per raffrescare l'area. Sono caratterizzati dalla presenza diffusa di alberature, arbusti, aree inerbiti ed erbe aromatiche. Nelle aree di transito si utilizzano materiali chiari, riflettenti come i bio-asfalti e drenanti.

In aggiunta, una misura innovativa ed efficace per contrastare le isole di calore è rappresentata dai **corridoi di ventilazione**. Tale misura, benché ancora non utilizzata dai Comuni, rappresenterebbe un'ottima opportunità per potenziare il raffrescamento naturale nelle città nel periodo estivo e ridurre l'inquinamento.

- **I corridoi di ventilazione urbana possono ridurre efficacemente le isole di calore urbane.**

A livello urbano, secondo studi recenti, le infrastrutture che hanno maggiore influenza nel ridurre le isole di calore sono gli spazi verdi molto grandi, i corsi d'acqua e i viali molto ampi. I corridoi verdi di ventilazione sono lunghi spazi verdi, anche intesi come corridoi tra spazi esistenti, che possono modificare i micro climi dell'area e migliorare la ventilazione urbana: creano un corridoio per l'aria più fresca affinché possa penetrare dall'esterno verso le aree più densamente edificate, riducendo anche l'effetto isole di calore. I corridoi verdi sono anche parchi lineari che collegano tra loro le aree verdi per formare reti di infrastrutture verdi urbane e corridoi ecologici. Spesso vengono adattati a infrastrutture stradali abbandonate, linee ferroviarie dismesse e realizzati lungo corsi d'acqua per creare parchi interconnessi. I corridoi verdi sono particolarmente utili per la biodiversità urbana, contribuiscono al raffreddamento delle città e al miglioramento della qualità dell'aria, poiché favoriscono la ventilazione.

SVILUPPI FUTURI

È auspicabile che in futuro i Comuni integrino nella pianificazione urbanistica anche la **pianificazione climatica**, a cui appartengono le soluzioni basate sulla natura, che la Regione continuerà a supportare. In Regione uno sviluppo potrebbe essere rappresentato dall'**integrazione delle misure descritte nell'attuazione della Rete Ecologica Locale prevista dal Piano Paesaggistico Regionale**.

Uno sviluppo significativo potrebbe essere la creazione di un **Atlante del clima cittadino**, che fornisca valutazioni climatiche standardizzate per le città e i Comuni. L'Atlante comprende mappe che mostrano i modelli eolici regionali, i flussi di aria fredda, le concentrazioni di inquinamento atmosferico e altre informazioni pertinenti necessarie

per informare i pianificatori su come migliorare le condizioni climatiche che potrebbero informare i nuovi progetti e l'adattamento climatico. L'Atlante classifica le aree urbane sulla base del ruolo che svolgono nello scambio d'aria e nel flusso d'aria fresco, così come la loro topografia, densità di sviluppo e presenza di spazio verde. L'Atlante distingue diverse zone della città non solo sulla base della destinazione urbanistica tradizionale ma per ciascuna di esse vengono fornite diverse misure di pianificazione e raccomandazioni in base al clima, il consumo di suolo e la presenza o meno di verde.

Ulteriori sviluppi sono rappresentati dalla **sostituzione di materiali come cemento e asfalto con materiali riflettenti e permeabili** nelle pavimentazioni e sui tetti per ridurre al minimo l'assorbimento del calore.

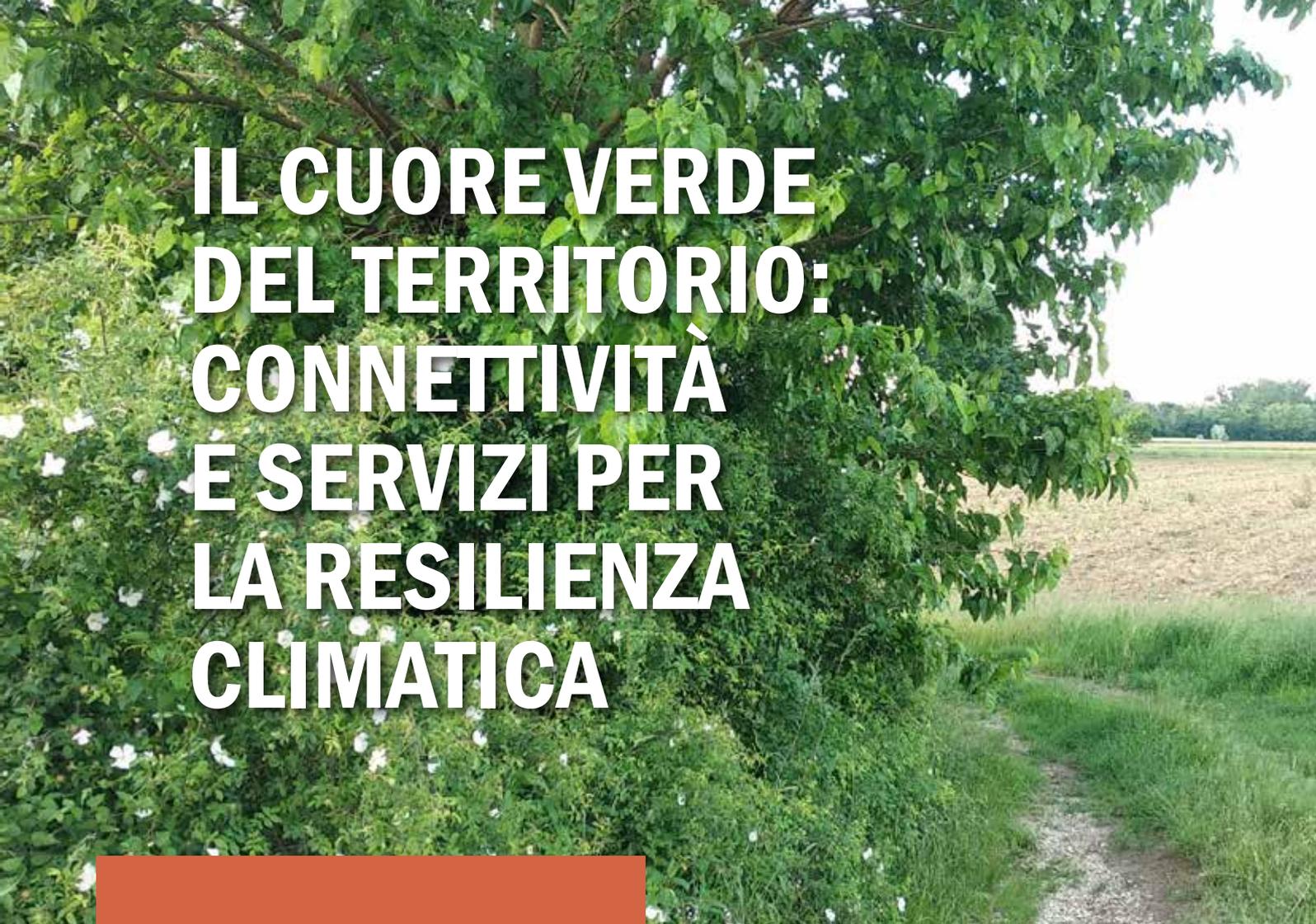
Le infrastrutture di mobilità e l'edilizia possono tenere conto nella progettazione di soluzioni per migliorare il flusso d'aria e ridurre gli effetti dell'intrappolamento del calore negli spazi urbani ristretti. Adottare una pianificazione urbanistica intelligente per **migliorare l'illuminazione e l'ombreggiatura naturale** aiuta a ridurre la necessità di raffrescamento artificiale.

Infine, le infrastrutture blu e verdi urbane e le soluzioni basate sulla natura rappresentano un **portafoglio imprescindibile di misure di adattamento climatico** e devono essere ampliate nell'ambito di un pacchetto di protezione del clima, tra cui: inverdimento degli edifici, ombreggiamento dei percorsi di traffico con sentieri pedonali e piste ciclabili, ombreggiamento delle facciate di edifici attraverso alberature stradali e ammodernamento di aree pubbliche con "punti freddi", quali aree dotate di acqua potabile, fontane d'acqua, spruzzi d'acqua e zone ombreggiate. Inoltre, le città devono migliorare le infrastrutture blu urbane, con sistemi di drenaggio come trincee e rotonde drenanti ma anche attraverso fontane e altri elementi d'acqua. Le superfici d'acqua e l'acqua in movimento contribuiscono a ridurre i carichi termici attraverso l'evaporazione.

Solo in questo modo avremo **città preparate ad adattarsi a un clima che cambia**.

Silvia Stefanelli

Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia



IL CUORE VERDE DEL TERRITORIO: CONNETTIVITÀ E SERVIZI PER LA RESILIENZA CLIMATICA

Urbanizzazione e agricoltura intensiva frammentano gli habitat naturali, compromettendone la biodiversità, sempre più minacciata anche dal cambiamento climatico.

La rete ecologica e l'infrastruttura verde, che fornisce importanti servizi ecosistemici, contrastano questi impatti, favorendo il movimento delle specie e la resilienza degli ecosistemi.

Mappare le siepi con immagini satellitari aiuta a proteggere gli habitat e pianificare strategie sostenibili per il territorio.

L'intensificazione agricola, l'urbanizzazione e in generale i processi di antropizzazione del territorio hanno rimodellato massicciamente i paesaggi, causando una diffusa perdita e frammentazione di habitat naturali e seminaturali: ciò ha portato a un progressivo declino della biodiversità, che è ora messa ancora più a rischio a causa dei cambiamenti climatici. L'aumento delle temperature, le piogge sempre più imprevedibili e gli eventi estremi come incendi, siccità e alluvioni stanno modificando profondamente gli ambienti naturali. Di conseguenza, molte specie animali e vegetali faticano ad adattarsi, alcune vedono ridursi il proprio habitat, altre tendono a spostarsi verso zone più favorevoli. Questo movimento è però spesso reso difficile da fattori come la frammentazione degli ambienti naturali, che diventano più piccoli e isolati, e la presenza di infrastrutture artificiali, come autostrade, centri urbani e industriali, che rappresentano vere e proprie barriere.

CONNETTIVITÀ ECOLOGICA

La connettività ecologica, esprime quanto un paesaggio sia “permeabile” agli spostamenti delle specie e ai processi naturali. Nei paesaggi antropizzati le limitate porzioni di spazi naturali e seminaturali, (es boschi residuali, siepi e filari di alberi, verde urbano) non sono sufficientemente grandi e complessi per sostenere singolarmente la diversità di fauna e flora. Tuttavia, se messi in connessione tra loro possono permettere il movimento delle specie per l’utilizzo delle risorse presenti nell’insieme degli ambienti frammentati, facilitando lo scambio genetico e il successo riproduttivo delle popolazioni e aumentando complessivamente la biodiversità.

CONNETTIVITÀ STRUTTURALE

La connettività strutturale è data dalla presenza di elementi del paesaggio che collegano tra loro gli habitat naturali di maggiori estensione. Ne sono un esempio i corridoi ecologici, come siepi, filari alberati, aree ripariali, fasce boscate o zone umide che formano una rete attraverso la quale gli organismi possono spostarsi. Anche infrastrutture artificiali, opportunamente progettate per facilitare il passaggio della fauna, come i sottopassi faunistici, contribuiscono alla connettività strutturale. Allo stesso modo, zone agricole gestite in modo sostenibile possono rappresentare ambienti di passaggio che non interrompono completamente la continuità ecologica del territorio.

CONNETTIVITÀ FUNZIONALE

La connettività funzionale, riguarda invece il comportamento e le esigenze degli organismi presenti all’interno del paesaggio. Infatti, la capacità di muoversi tra habitat non dipende solo dalla presenza dei collegamenti ambientali, ma anche dalle caratteristiche delle singole specie. Alcune sono in grado di attraversare spazi aperti, o aree disturbate dall’uomo, come i campi coltivati o le strade, mentre altre risultano più sensibili e necessitano di ambienti più protetti. Per esempio, una farfalla può sorvolare una strada per raggiungere un prato fiorito, mentre un piccolo anfibio potrebbe avere bisogno di una copertura vegetale del suolo continua per spostarsi in sicurezza.

LA CONNETTIVITÀ ECOLOGICA

Per far fronte a questi ostacoli, entra in gioco il concetto di connettività ecologica, ovvero la capacità del paesaggio di **permettere agli organismi di muoversi liberamente tra diversi habitat**, sia per motivi stagionali (migrazione), sia per trovare cibo e rifugio, riprodursi o colonizzare nuove aree.

Ma da cosa dipende questa capacità? **Dipende dalle caratteristiche delle specie, ma soprattutto da come è strutturato il paesaggio stesso**, ossia da come sono organizzati gli spazi naturali e artificiali che lo compongono e dalle relazioni che instaurano tra di loro. Infatti, si parla di connettività, sia in termini strutturali, sia funzionali (come spiegato nel box a sinistra dedicato alla **CONNETTIVITÀ ECOLOGICA**).

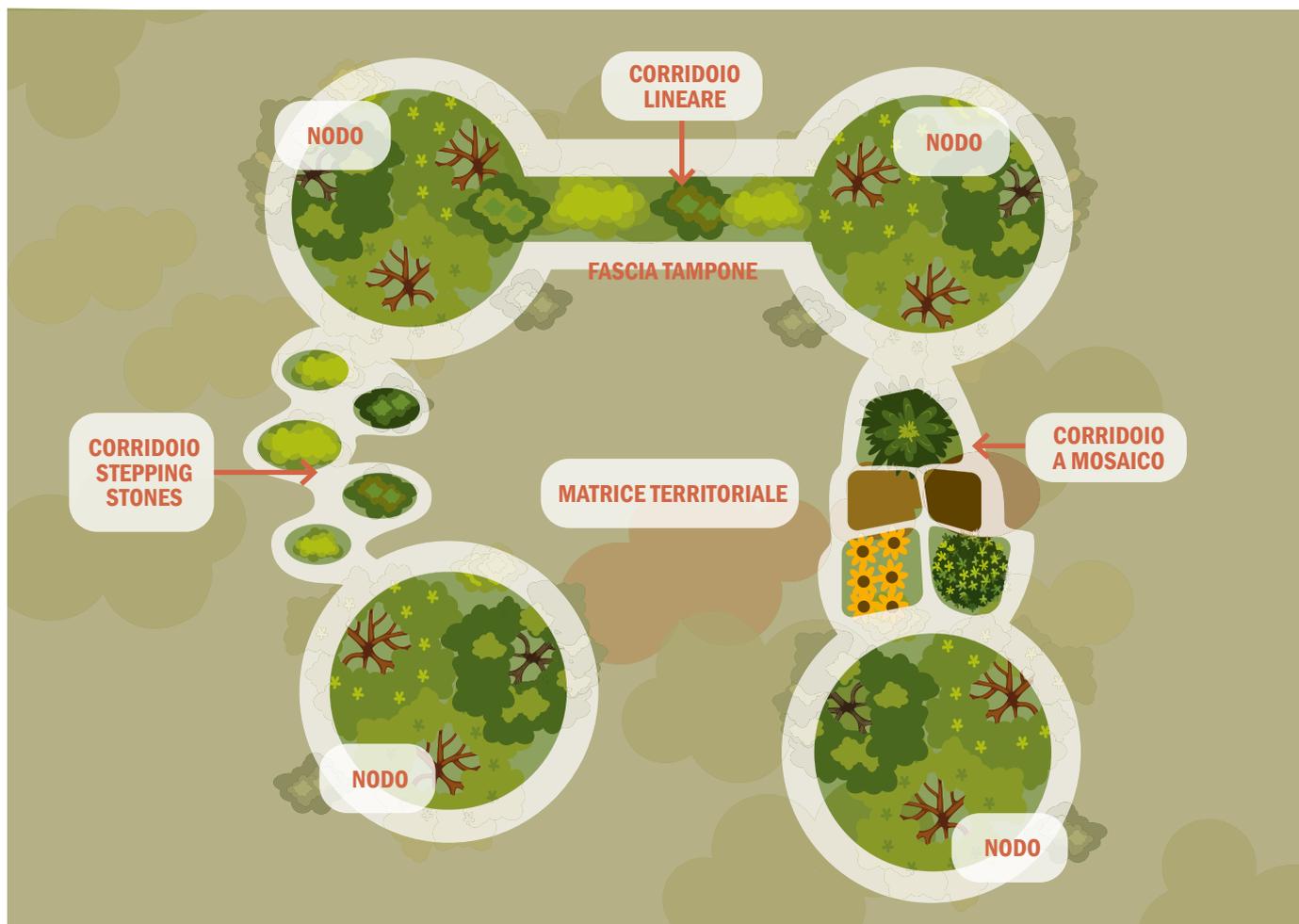
LA RETE ECOLOGICA GARANTISCE LA CONNETTIVITÀ

Per garantire la connettività ecologica del paesaggio è fondamentale riconoscere il ruolo della **rete ecologica**. Con questo termine si intende la messa a sistema delle aree naturali, semi-naturali del territorio che, nel loro insieme, formano una **struttura reticolare che permea la matrice territoriale** ed è capace di sostenere la biodiversità e i processi ecologici nel lungo periodo. Tale rete è composta da **nodi**, ovvero ecosistemi principali, che per estensione e caratteristiche assumono una elevata valenza ecologica, e da **corridoi ecologici**, che permettono il movimento delle specie tra i nodi.

I DIVERSI TIPI DI “CORRIDOI ECOLOGICI”

Diversi sono i tipi di corridoio ecologico che possiamo riconoscere, come il **corridoio lineare**, che consiste in una fascia continua di vegetazione, come una siepe, un filare di alberi o una fascia boscata lungo un fiume. Questi corridoi rappresentano vere e proprie vie naturali di passaggio per molte specie, soprattutto quelle di piccole dimensioni, come insetti, rettili, piccoli mammiferi e uccelli, poiché offrono rifugio, cibo e protezione lungo il tragitto.

LA RETE ECOLOGICA



In altri casi, i collegamenti tra habitat non sono lineari e continui, ma si realizzano attraverso una porzione di territorio costellata di ambienti naturali e semi-naturali, come prati, boschetti e campi coltivati. Questi possono costituire **corridoi stepping stones** (pietre nel ruscello), che pur non essendo continui risultano efficaci per le specie più mobili che riescono a spostarsi sfruttando le varie aree naturali come punti di sosta o di passaggio, oppure **corridoi a mosaico**, ossia porzioni più ampie di territorio in cui si concentrano una serie di habitat frammentati che nel loro insieme formano un mosaico di ecosistemi diversi.

Accanto a questi elementi ricchi di naturalità, possono essere sviluppati anche **corridoi artificiali**, cioè infrastrutture costruite appositamente per superare le barriere create dall'uomo, come strade o ferrovie. Si tratta, ad esempio, di ponti verdi che attraversano le autostrade, o di sottopassi faunistici realizzati per permettere il passaggio in sicurezza degli animali. **Anche piccoli interventi**, come tunnel per anfibi lungo le strade, **possono fare una grande differenza** in contesti frammentati.



Foto: Maurizia Sigura

Sottopassaggio per anfibi e piccoli animali.

LA MATRICE TERRITORIALE

Oltre agli elementi che compongono la rete ecologica, non va dimenticato che anche la **matrice territoriale**, ovvero l'elemento più diffuso e dominante del paesaggio spesso legato a specifiche coperture del suolo, **influenza la permeabilità del paesaggio**. Infatti, questa a seconda del contesto, assume caratteristiche diverse che possono favorire, o limitare la presenza e la diffusione della biodiversità:

- **in pianura**, la matrice è rappresentata dagli ambienti trasformati, con città, infrastrutture e coltivazioni intensive, che generano una matrice generalmente inospitale,
- **in montagna**, l'abbandono progressivo delle attività agro-pastorali favorisce l'espansione dei boschi, che rappresentano la copertura del suolo più diffusa, ma penalizza le specie legate agli ambienti aperti e alla diversità delle formazioni forestali,
- **in contesti urbanizzati**, la matrice è rappresentata dalle superfici impermeabilizzate in cui si inseriscono gli spazi verdi residuali come parchi, giardini, corsi d'acqua e aree non edificate.

LA RETE ECOLOGICA ACCRESCE LA RESILIENZA CLIMATICA

Ma come la rete ecologica può essere d'aiuto in uno scenario di cambiamento climatico? Perché **favorisce lo scambio genetico tra popolazioni isolate**, mantenendo la diversità genetica, un elemento essenziale per l'adattamento delle specie alle nuove condizioni ambientali. Popolazioni isolate, al contrario, sono più vulnerabili a malattie, eventi estremi o cambiamenti improvvisi del loro habitat. D'altra parte, **ecosistemi ben connessi possono funzionare in modo più efficiente**, poiché gli scambi di nutrienti, energia e specie tra gli stessi li rendono più equilibrati e resilienti. Ciò significa che **riescono ad assorbire meglio gli shock** – come ondate di calore, incendi, siccità o inquinamento – e a ritornare a uno stato di equilibrio mantenendo le loro funzioni.

Tuttavia, va detto che la sfida posta dal cambiamento climatico impone una visione più ampia e integrata della pianificazione del territorio, orientata alla **sostenibilità ambientale, ecologica e sociale**. Infatti, attualmente, accanto a quello della rete ecologica, sta emergendo il concetto di infrastruttura verde.

SERVIZI ECOSISTEMICI

La natura non è solo bella da vedere, ci offre costantemente molti benefici, spesso sottovalutati o dei quali abbiamo scarsa consapevolezza. Questi benefici si chiamano servizi ecosistemici: derivano dai processi e dalle funzioni ecologiche che la natura svolge e da cui l'uomo trae vantaggio diretto o indiretto.

I servizi ecosistemici possono essere suddivisi in quattro grandi categorie:

SERVIZI DI APPROVVIGIONAMENTO

forniscono risorse materiali che i sistemi viventi producono e che possono essere usati dalla società umana come acqua potabile, cibo, legname, fibre e medicinali.

SERVIZI DI SUPPORTO

mantengono le condizioni di base per la vita sulla Terra, attraverso processi biotici e abiotici (biologici, fisici e chimici) come la formazione del suolo, il ciclo dei nutrienti e la fotosintesi clorofilliana

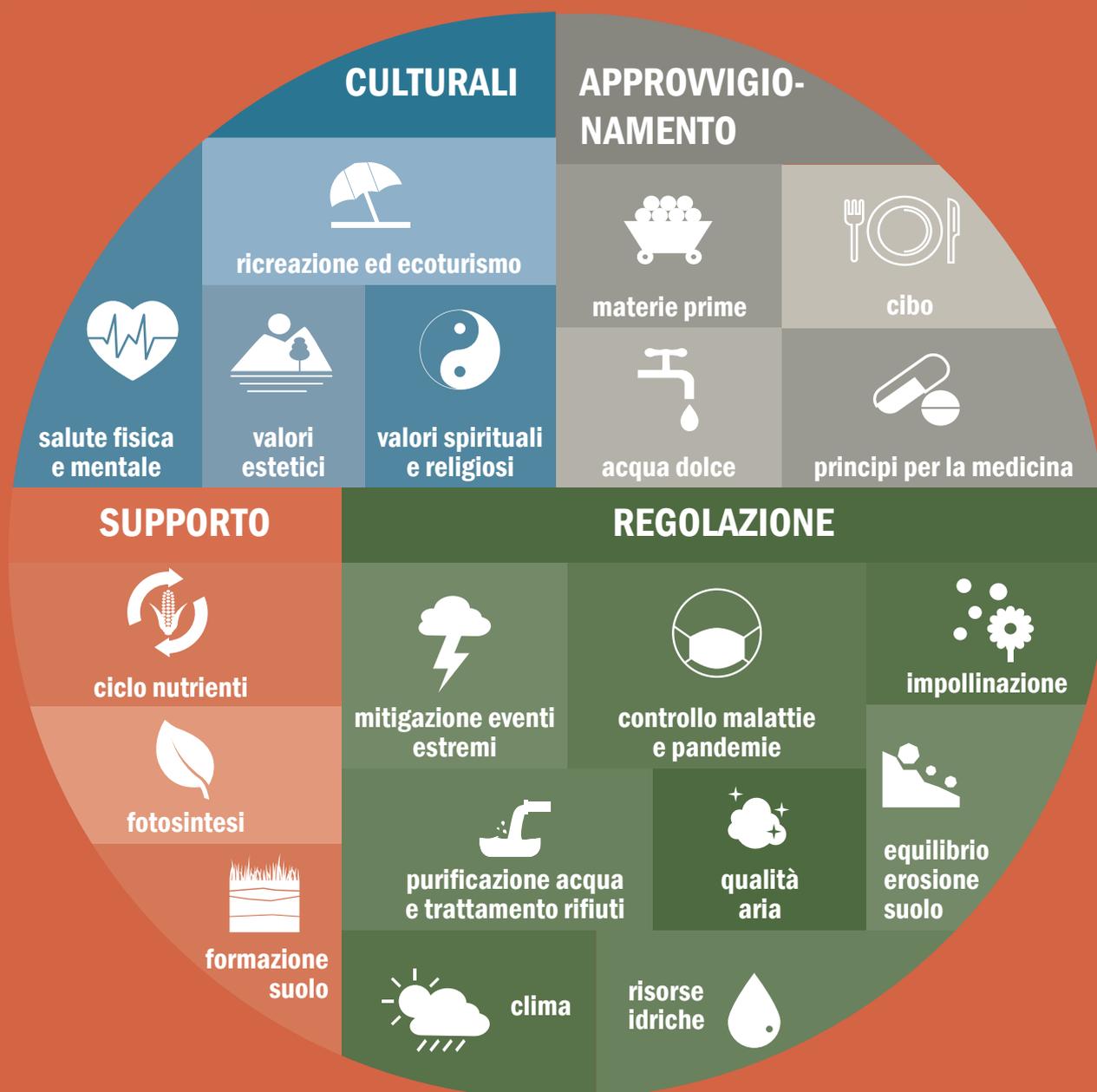
SERVIZI DI REGOLAZIONE

contribuiscono a regolare il clima, la qualità dell'aria e dell'acqua, l'impollinazione, il controllo dei patogeni delle piante (controllo biologico) e delle inondazioni, mantenendo le condizioni dell'ambiente di cui beneficia la popolazione umana.

SERVIZI CULTURALI

comprendono benefici immateriali che influenzano lo stato mentale e fisico della popolazione come il valore ricreativo, spirituale, educativo e estetico degli ecosistemi.

Solo riconoscendo l'importanza dei servizi ecosistemici possiamo comprendere davvero il valore dell'ambiente che ci circonda



La descrizione e quantificazione dei servizi ecosistemici fornisce informazioni fondamentali per prendere decisioni basate sulla conoscenza di ogni componente del complesso sistema socio-economico-ecologico.

Il concetto di “servizi ecosistemici” fornisce quindi un quadro di riferimento fondamentale per politiche e strategie di pianificazione volte a promuovere lo sviluppo sostenibile e la conservazione della biodiversità, che sono il presupposto per accrescere la resilienza del territorio e della società di fronte ai rischi e alle sfide poste dai cambiamenti climatici.

Bisogna però tener presente che questo approccio ha un carattere antropocentrico e

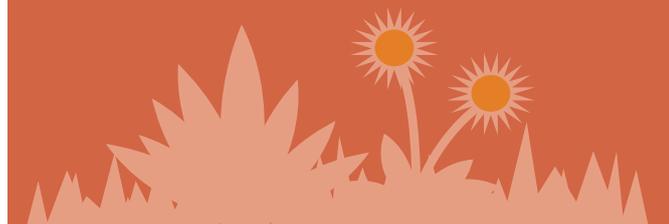
può comportare il rischio di escludere l'idea che ecosistemi e biodiversità possedano un valore intrinseco indipendente dai bisogni umani. Per salvaguardare la multifunzionalità del sistema è invece necessario tener conto di tutte le relazioni e degli ecosistemi coinvolti e salvaguardare la biodiversità nel suo complesso. Solo ecosistemi ricchi in biodiversità possono fornire servizi ecosistemici nel lungo periodo.

In altre parole: più diverse sono le specie presenti in un ecosistema, più quell'ecosistema è in grado di svolgere le sue funzioni ecologiche e mantenere i flussi di energia e materia, continuando a offrirci i suoi benefici nel tempo.

LA MULTIFUNZIONALITÀ DELLE AREE VERDI

La multifunzionalità, esprime la capacità di svolgere funzioni multiple attivando sinergie tra i diversi utilizzi degli spazi verdi consentendo di aumentarne l'efficacia, in particolare dove la loro disponibilità è limitata come nei centri urbani o in paesaggi fortemente antropizzati.

Ad esempio il bosco assolve a una vasta gamma di funzioni, riconducibili ad altrettanti servizi ecosistemici, legati alla produzione di legno, alla regolazione del clima (es assorbimento anidride carbonica dall'atmosfera, produzione di ossigeno, attenuazione delle alte temperature estive), alla protezione del suolo (produzione di sostanza organica, limitazione dell'erosione), al valore culturale e ricreativo (benessere psico-fisico, riconoscibilità del paesaggio), ecc.



DALLA RETE ECOLOGICA ALL'INFRASTRUTTURA VERDE

La rete ecologica si concentra principalmente sulla capacità del paesaggio di permettere il movimento e la sopravvivenza delle specie attraverso una rete di habitat interconnessi. L'**infrastruttura verde** (IV), invece, amplia questa visione, integrando la dimensione ecologica con quella dei servizi ecosistemici, ossia dei benefici che la natura fornisce all'uomo, gratuitamente e spesso senza che ce ne accorgiamo. L'infrastruttura verde, viene definita come **una rete strategica di spazi naturali, seminaturali, o ripristinati progettata e gestita in modo da fornire una vasta gamma di servizi ecosistemici**, dalla regolazione climatica e delle acque meteoriche, al miglioramento della qualità dell'aria, alla produzione di alimenti e fibre, fino al benessere psico-fisico e alla fruizione sociale e ricreativa degli spazi aperti. Essa rappresenta una

vera e propria infrastruttura territoriale progettata e gestita, con l'obiettivo di garantire la fornitura di servizi ecosistemici nel lungo periodo, come presupposto per la **multifunzionalità del territorio**.

LE DIVERSE SCALE SPAZIALI DELL'INFRASTRUTTURA VERDE

Ma dove nel territorio possiamo ritrovare l'infrastruttura verde e i servizi ecosistemici a essa collegati? L'infrastruttura verde agisce e genera benefici a diverse scale spaziali, dal singolo edificio fino al territorio più ampio regionale, nazionale e globale.

- **A livello di singolo edificio**, l'infrastruttura verde può concretizzarsi sotto forma di **tetti verdi, giardini pensili, o pareti vegetali**, contribuendo a migliorare la qualità dell'aria, a mitigare i picchi di calore e a favorire la biodiversità urbana.
- **A scala di quartiere**, può **riguardare le aree verdi, la riqualificazione di aree degradate**, la creazione di parchi urbani, oppure la realizzazione di **sistemi di drenaggio** basati su coperture verdi a favore di aree impermeabilizzate (esempio parcheggi, piazze, ...) per la gestione delle acque meteoriche superficiali.
- **Alla scala di intera città** l'IV può essere pianificata per creare **nuove aree di verde urbano, corridoi ecologici** e di fruizione tra gli spazi del verde pubblico, contribuendo a migliorare la **qualità della vita** dei cittadini, e a mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici (esempio mitigazione dell'effetto isola di calore).
- **Alla scala regionale** concorre al raggiungimento degli obiettivi di supporto alla **biodiversità** della rete ecologica, accompagna lo sviluppo della **mobilità dolce** (piste ciclabili, ippovie), consente una **migliore gestione della risorsa idrica** ecc.

L'organizzazione a diverse "scale spaziali" dell'infrastruttura verde consente di leggerla come una **struttura nidificata**, in cui ogni suo elemento costituente è formato da singole parti, che nel loro insieme creano una sorta di gerarchia in cui i diversi livelli sono collegati tra loro, e a cui corrisponde un insieme di relazioni complesse. Questo legame fa sì che **anche il singolo elemento**, come una siepe, un gruppo di alberi, le scarpate stradali, all'apparenza di scarso valore, **diventa importante** per la struttura complessiva.

SIEPI, FILARI, FASCE BOScate: ELEMENTI CRUCIALI DEL PAESAGGIO IN FVG

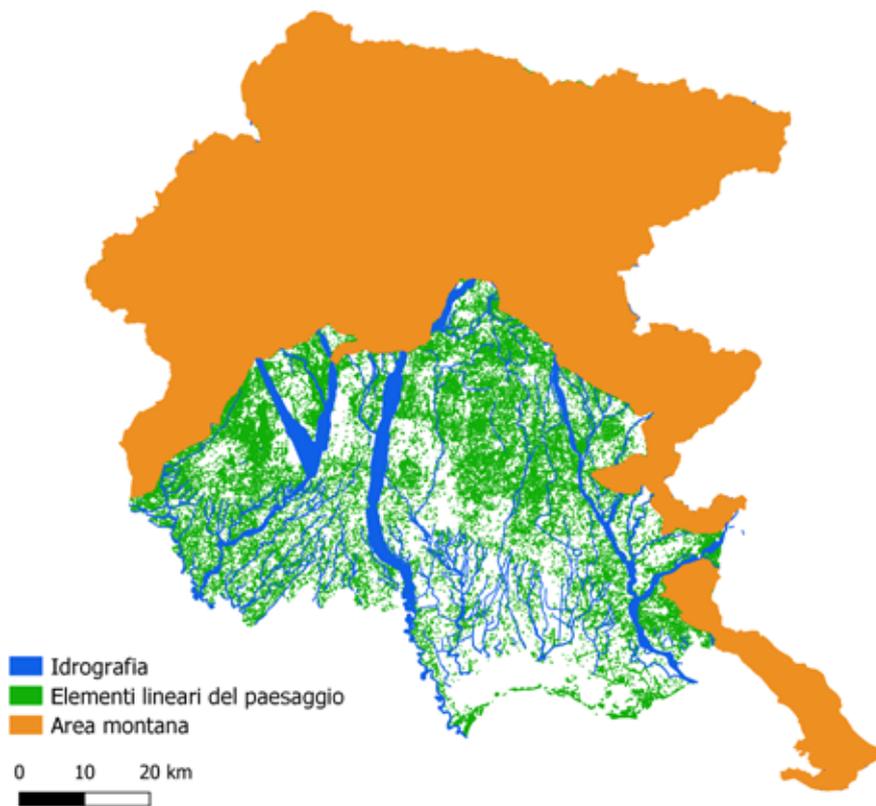
Quanto gli elementi lineari del paesaggio come siepi, filari di alberi, fasce boscate, boschi residui contribuiscono all'infrastruttura verde in FVG?

Il *Land Monitoring Service* del progetto Europeo Copernicus rende disponibile il **database aggiornato degli elementi lineari arborei/arbustivi del paesaggio** (filari di alberi, siepi, fasce boscate, boschetti residui) presenti in Europa (<https://land.copernicus.eu/en/products/high-resolution-layer-small-woody-features>).

Da questi dati emerge che **nell'area di collina e pianura della regione Friuli Venezia Giulia** sono presenti **più di 60.600 elementi lineari**, che occupano complessivamente 14.460 ettari di superficie, e sono distribuiti nel territorio a dare un mosaico disomogeneo. Si tratta dei così detti "elementi minori del paesaggio" poiché modesti in dimensioni, a volte piantumati, ma molto spesso cresciuti spontaneamente in prossimità degli appezzamenti coltivati, o occupando le tare, ossia le superfici agricole non produttive. Questi elementi rappresentano **componenti cruciali del paesaggio** poiché forniscono numerosi **servizi ecosistemici**, fungendo da oasi di habitat per la biodiversità e il controllo biologico, aiutando nella prevenzione dell'erosione superficiale, contribuendo alla conservazione della qualità del suolo. Anche il loro **valore estetico e culturale** è significativo, in quanto elementi delle pratiche agricole tradizionali e parte del patrimonio rurale, basti pensare al significato dei filari di gelso, o di salici della campagna regionale.

Per una mappatura ancora più dettagliata degli elementi verdi lineari si possono utilizzare analisi più sofisticate come descritto nell'approfondimento **UN OCCHIO SUL VERDE: LO STUDIO CHE MAPPA LE SIEPI DALLO SPAZIO**.

DISTRIBUZIONE DEGLI ELEMENTI LINEARI DEL PAESAGGIO NELLE AREE DI COLLINA E PIANURA IN FRIULI VENEZIA GIULIA



Maurizia Sigura, elaborato da dati Small Woody Features 2018.

Sebbene abbiano origini e finalità specifiche, entrambi i concetti, di rete ecologica e di infrastruttura verde, condividono l'obiettivo comune di arrivare a **un territorio** caratterizzato da un maggiore equilibrio tra presenza umana e sistemi naturali, **multifunzionale e resiliente rispetto alle sfide imposte dai cambiamenti climatici**.

Maurizia Sigura, Anna Lilian Gardossi, Antonio Tomao
Università degli Studi di Udine

UN OCCHIO SUL VERDE: LO STUDIO CHE MAPPA LE SIEPI DALLO SPAZIO

Gli elementi lineari arborei come le siepi, i filari di alberi, piccoli boschi relitti, situati al di fuori delle aree forestali propriamente dette, formano un mosaico di risorse ecosistemiche interconnesse, influenzando significativamente i processi ecologici del paesaggio.

La loro importanza ecologica va oltre la loro estensione spaziale, poiché contribuiscono alla connettività e alla conservazione della biodiversità mitigando la frammentazione degli habitat e migliorando la complessità strutturale. Oltre a questo forniscono servizi ecosistemici essenziali, tra cui il sequestro del carbonio (contribuendo a ridurre i gas serra dell'atmosfera), la filtrazione dell'acqua, il controllo dell'erosione e la regolazione del microclima.

Ma come facciamo a sapere dove si trovano tutte queste siepi, queste componenti di paesaggio così piccole e disperse e a monitorarle? È qui che entra in gioco la tecnologia. **Un recente studio, realizzato dal gruppo di ricerca "Biodiversità, servizi ecosistemici e cambiamenti climatici"** del Dipartimento di Scienze Agroalimentari, Ambientali e Animali dell'Università di Udine si è concentrato proprio su questo: trovare un modo semi-automatico per identificare le siepi usando immagini satellitari ad alta risoluzione. Si tratta del progetto di rilevante interesse nazionale *Eye-Land* "A crowd-sensing geospatial database for the monitoring of rural areas" (PRIN 2020 – Settore ERC LS9 – Bando 2020 Prot. 2020EMLWTN). I ricercatori hanno utilizzato un sistema di analisi di immagini basato sugli oggetti chiamato OBIA

(*Object-Based Image Analysis*), che consente di raggruppare elementi simili per identificare oggetti completi come, appunto, le siepi. Per mettere alla prova questo metodo, sono stati utilizzati dati di due diversi satelliti: *PlanetScope* e *Copernicus Sentinel-2*. Entrambi forniscono immagini multitemporali, cioè scattate in diversi momenti, permettendo di osservare i cambiamenti e distinguere meglio le caratteristiche del territorio.

I risultati sono stati promettenti. L'algoritmo è riuscito a classificare e individuare le siepi con un'ottima precisione. Con i dati di *PlanetScope*, sono stati individuati correttamente il 95% degli elementi, mentre con i dati di *Sentinel-2* (che hanno una risoluzione leggermente inferiore) si è comunque ottenuto un buon 85%.

Questo significa che l'approccio utilizzato è molto efficace nell'utilizzare le immagini satellitari, per creare mappe dettagliate degli elementi lineari. Saper esattamente dove si trovano le siepi e come sono distribuite è fondamentale per supportare le scelte di cambiamento nell'utilizzo delle risorse del territorio e per migliorare le "infrastrutture verdi" del paesaggio. In altre parole, la tecnologia ci offre nuovi strumenti per prenderci cura delle risorse del territorio.



Individuazione semi-automatica delle siepi da immagini satellitari mediante OBIA (*Object-Based Image Analysis*).

UNA NUOVA TECNOLOGIA PER “ASCOLTARE” GLI ALBERI: I TREETALKERS®

Il cambiamento climatico pone nuove sfide per la sopravvivenza delle foreste.

Per valutare la loro capacità di adattamento è necessario monitorare la loro salute e crescita nel tempo: ora è possibile farlo in continuo e in tempo reale grazie a sensori innovativi, i *TreeTalkers*.

La rete italiana di monitoraggio include tre siti in FVG, che contribuiscono a creare “foreste intelligenti” più resilienti ai cambiamenti climatici.

Le foreste sono tra gli ecosistemi che maggiormente contribuiscono alla conservazione della biodiversità e all’assorbimento del carbonio atmosferico. Inoltre, hanno un ruolo chiave nel supportare il benessere delle popolazioni che abitano e visitano i nostri territori. Oggi, tuttavia, la loro capacità di fornire questi benefici è sempre più compromessa a causa del cambiamento climatico. In particolare, i regimi di temperatura e piovosità stanno cambiando radicalmente, con eventi siccitosi sempre più frequenti, tali da determinare lunghi periodi di stress nella vegetazione. Ciò innesca **effetti a catena sulle foreste**, in quanto gli alberi sottoposti a stress prolungato sono più vulnerabili all’attacco di “patogeni di debolezza” come insetti e funghi, che possono causarne la morte, rallentarne la capacità di ripresa e ridurre il tasso di crescita (e quindi di assorbimento di CO₂).

In generale, tutte le foreste sono esposte a queste problematiche, ma quelle **in area montana** risultano **particolarmente a rischio**, poiché il riscaldamento globale avanza più rapidamente in queste aree rispetto alle pianure.

SENSORI INNOVATIVI PER STUDIARE LE FORESTE IN TEMPO REALE

Per affrontare queste sfide, il primo passo da compiere è valutare la capacità di adattamento delle foreste al clima che cambia, monitorandone lo stato di salute e la crescita nel tempo. Attualmente, questi parametri sono valutati effettuando **rilievi in bosco** durante gli inventari forestali*. Tuttavia i dati raccolti in questo modo non hanno una risoluzione spaziale e temporale sufficiente (i rilievi, visti i costi, sono **eseguiti con cadenza decennale**) né misurano direttamente lo stato fisiologico delle piante, ma registrano solamente l'accrescimento cumulato nel periodo considerato, la mortalità o lo stato di sofferenza dei singoli individui o delle foreste.

Per ovviare a questo limite, di recente è stato proposto **un monitoraggio con una maggiore risoluzione temporale**, che analizzi i **singoli alberi** e la loro capacità di adattarsi alle nuove condizioni climatiche. Una *start-up* innovativa dell'Università della Tuscia (Natura 4.0) ha sviluppato una nuova tipologia di sensori che consentono un monitoraggio **in continuo e in tempo reale: i TreeTalker®** ("l'albero che parla"). Questi dispositivi sono progettati per essere installati sugli alberi e raccogliere una varietà di dati fondamentali per descrivere lo stato di salute delle foreste.

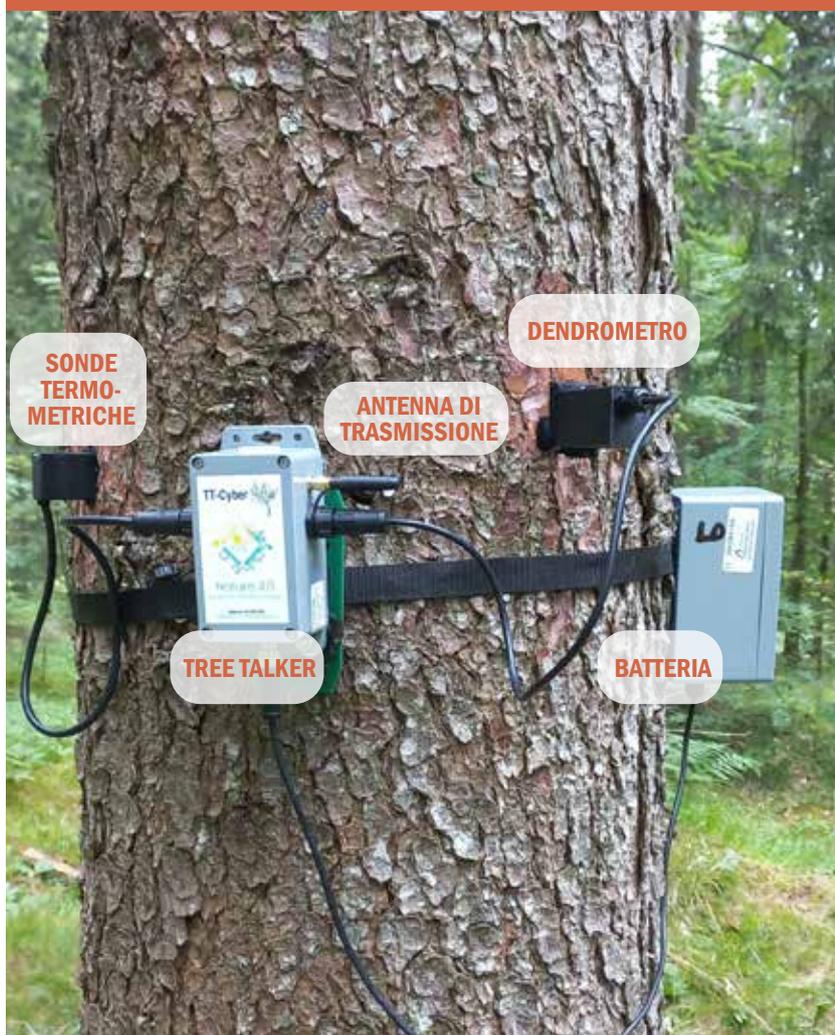
"INTERNET OF TREES" E GESTIONE FORESTALE SMART

Grazie alla tecnologia di connessione *wireless* a lungo raggio (LoRa), i dati raccolti da ciascun albero sono trasmessi verso **centraline esterne al bosco**, per poi essere immessi in rete e consultati facilmente su computer o smartphone. Gli utenti possono monitorare quindi l'andamento dei parametri ambientali con tabelle e grafici dedicati, ottenendo una **visione chiara e immediata dell'evoluzione delle condizioni della foresta**. Questa innovazione segna il passaggio dal cosiddetto *Internet of Things* (IoT), ovvero quella tecnologia che permette agli oggetti di comunicare tra loro e con noi tramite Internet, all'**Internet of Trees**, rendendo la gestione forestale più smart e accessibile.

I TREETALKERS: COME SONO FATTI E COSA MISURANO

I *TreeTalkers* sono direttamente installati sugli alberi e sono formati da un'unità centrale, che al suo interno ha un processore e una scheda di memoria collegata a diversi sensori, che misurano a una data frequenza (generalmente, un'ora) alcuni parametri tra cui:

- accrescimento radiale, tramite un "dendrometro" equipaggiato con piccolo pistone fissato sulla corteccia, che registra l'aumento del diametro del fusto con precisione del centesimo di millimetro;
- quantità di acqua che scorre attraverso il fusto (traspirazione);
- spostamento della pianta rispetto all'asse verticale, grazie a un sensore di movimento (accelerometro);
- qualità della radiazione luminosa trasmessa dalla chioma, grazie a un sensore che misura non solo la radiazione visibile, ma anche quella infrarossa;
- caratteristiche ambientali, tra cui temperatura e umidità dell'aria.

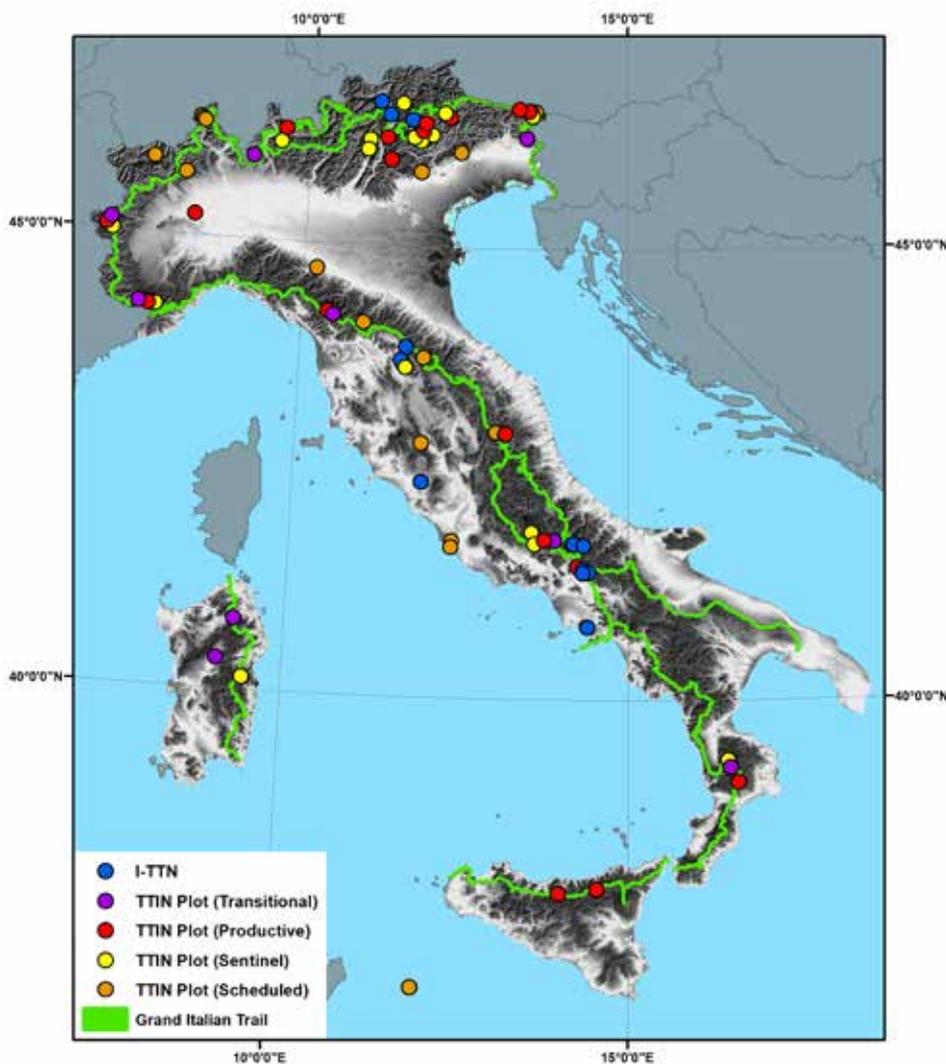


LA RETE TREETALKER ITALIA E I TRE TIPI DI BOSCO MONITORATI

Nell'ambito di due progetti finanziati dal Piano Nazionale di Resistenza e Resilienza (Geoscience IR e il Centro nazionale per la biodiversità) e con il supporto scientifico della Società Italiana di Selvicoltura ed Ecologia Forestale (SISEF) è stata costituita una **rete italiana di siti per il monitoraggio in tempo reale delle foreste** utilizzando i *TreeTalker®* (*Italian TreeTalker network*). La rete è costituita da una serie di aree sperimentali distribuite tra le Alpi e gli Appennini seguendo "Il sentiero Italia", la più famosa infrastruttura escursionistica a livello nazionale.

Dal momento che non tutte le foreste reagiscono allo stesso modo al cambiamento climatico, ogni area sperimentale prevede il monitoraggio di **tre tipologie di bosco**:

- un bosco sottoposto a gestione forestale ordinaria;
- un bosco al limite superiore della vegetazione (bosco "sentinella");
- e un bosco di neo-formazione, ovvero che si è insediato su terreni agricoli o pascoli abbandonati negli ultimi 50-60 anni.



La rete italiana di siti per il monitoraggio in tempo reale delle foreste tramite i *TreeTalker®*.

I SITI IN FVG

Nel caso della regione **Friuli Venezia Giulia**, il bosco sentinella e il bosco produttivo sono stati individuati nel Tarvisiano. Il primo si trova al limite superiore della vegetazione presso **Sella Acomizza**, in uno spazio limitrofo al confine orografico italiano-austriaco, il secondo nel territorio della **foresta di Tarvisio**. Il bosco di neo-formazione è stato invece individuato nei pressi di **Passo Pramollo**, nel Comune di Pontebba.

In ciascun sito, i *TreeTalkers* sono stati installati su **cinque alberi rappresentativi**, scelti tra quelli dominanti e disposti secondo un preciso disegno sperimentale. I soprassuoli* attorno a ciascun albero sono stati caratterizzati con elevato dettaglio attraverso misure dendrometriche*

realizzate con un protocollo comune all'intera rete di monitoraggio. In FVG l'attività di ricerca è condotta dal gruppo di ricerca coordinato dal Prof. Giorgio Alberti e dal Prof. Antonio Tomao, docenti di selvicoltura e assestamento forestale presso il Dipartimento di Scienze Agroalimentari, Ambientali e Animali (Di4A) dell'**Università di Udine** con la **collaborazione della Regione Friuli Venezia Giulia**, che ha messo a disposizione una foresta di proprietà regionale per l'installazione dei sensori.

I DIVERSI TIPI DI FORESTA

Le foreste non sono tutte uguali: la loro struttura e la capacità di resistere ai cambiamenti climatici dipendono da fattori come l'altitudine, la gestione umana e il loro stadio di crescita.

FORESTE PRODUTTIVE

Sono foreste gestite attivamente dall'uomo, spesso situate a media altitudine.

Grazie alla gestione regolare, ci si aspetta una minore vulnerabilità agli effetti climatici nel breve e medio termine, ma la loro evoluzione dipende molto dalle attività umane e solo un monitoraggio in continuo può consentire di valutarne la capacità di adattamento.



Foto: Antonio Tomao

Bosco gestito in Val Alba nel comune di Moggio Udinese.

FORESTE DI NEO-FORMAZIONE

Si trovano in aree in cui il bosco sta ricrescendo dopo un cambiamento nell'uso del suolo, ad esempio dopo l'abbandono di terreni agricoli.

Essendo ancora giovani e in evoluzione, queste foreste possono risultare più sensibili agli impatti climatici.



Foto: Lorenzo Orzan

Bosco di neoformazione presso Lusevera.

FORESTE SENTINELLA

Crescono ad altitudini elevate, vicino al limite degli alberi.

Queste foreste, spesso poco o per nulla sfruttate dall'uomo, sono tra le più vulnerabili al cambiamento climatico: il clima più caldo e secco degli ultimi anni le sta trasformando rapidamente.



Foto: Antonio Tomao

Bosco "sentinella", al limite superiore della vegetazione, in prossimità di Monte Acomizza (Tarvisio, UD).

DIAGNOSI PREVENTIVA, INTERVENTI TEMPESTIVI

Nonostante il finanziamento iniziale per la realizzazione della rete sia avvenuto grazie a progetti finanziati principalmente dal PNRR, l'obiettivo della rete è quello di realizzare una infrastruttura di ricerca aperta, in continuo allargamento e innovazione e da mantenere in modo continuo nel tempo.

L'obiettivo finale della rete di monitoraggio è quello di **creare foreste "intelligenti" dal punto di vista climatico**, capaci di resistere meglio agli stress ambientali e di continuare a svolgere il loro ruolo fondamentale per l'ecosistema e il benessere umano. I dispositivi, infatti, permettono di **individuare prontamente stress ambientali** come siccità o malattie, consentendo **interventi mirati e tempestivi**. Inoltre, i dati raccolti dai *TreeTalkers* sulle condizioni ambientali e sulla traspirazione degli alberi contribuiscono a migliorare le proiezioni climatiche in quanto possono essere utilizzati per validare gli attuali modelli di previsione a una scala temporale di elevato dettaglio. Inoltre, le informazioni raccolte, analizzando come gli alberi reagiscono a stress termici, siccità o eventi estremi, possono aiutare a sviluppare strategie di adattamento ai cambiamenti climatici.

Antonio Tomao, Luca Cadez, Giorgio Alberti

Università degli Studi di Udine

Vittorio Garfi, Marco Ottaviano

Università degli Studi del Molise

Marco Marchetti

Sapienza, Università di Roma

Fondazione Alberitalia



PAROLE CHIAVE

INVENTARI FORESTALI

Gli inventari forestali, come l'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio (INFC) sono indagini campionarie periodiche finalizzate alla conoscenza della qualità e quantità delle risorse forestali del Paese, fonte di statistiche forestali a livello nazionale e regionale. L'INFC è uno strumento di monitoraggio che produce conoscenza concreta a supporto della politica forestale e ambientale realizzato dall'Arma dei Carabinieri tramite il Comando Unità Forestali Ambientali e Agroalimentari in collaborazione con partner scientifico il CREA (Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi per l'economia agraria) e il contributo dei Corpi Forestali delle Regioni e Province Autonome.

DENDROMETRIA

La dendrometria (dal greco *déndron*, che significa "albero" e *métron*, che significa "misura") è la scienza che si occupa di misurare e quantificare le caratteristiche degli alberi e delle foreste. È una disciplina fondamentale per chi lavora nella gestione forestale, nell'industria del legno e nella conservazione dell'ambiente. Attraverso la dendrometria, è possibile determinare grandezze come il diametro e l'altezza degli alberi, il volume del legname e persino la quantità di carbonio immagazzinata nelle foreste. Questi dati sono essenziali per monitorare la crescita delle piante, valutare la produttività di un bosco e pianificare interventi selvicolturali sostenibili.

SOPRASSUOLO FORESTALE

Il soprassuolo forestale è l'insieme della vegetazione arborea e arbustiva presente in un'area boschiva in un determinato momento. Comprende tutti gli alberi e gli arbusti, indipendentemente dall'età, dalle dimensioni e dallo stato di salute. Il soprassuolo forestale è una componente fondamentale dell'ecosistema forestale, in quanto influisce sul microclima, sulla biodiversità e sulla produttività del bosco.



REGIONE AUTONOMA
FRIULI VENEZIA GIULIA

Questo contributo è stato realizzato con il supporto del Centro Nazionale per la Biodiversità (National Biodiversity Future Centre - NBFC - Missione 4 Componente 2, Investimento 1.4 - D.D. 1034 17/06/2022, CN00000033) e di GeoSciencesIR: un'infrastruttura di ricerca per la Rete Italiana dei Servizi Geologici - PNRR per la Missione 4, Componente 2, Investimento 3.1, Avviso 3264/2021. CUP I53C22000800006 - IR0000037. Finanziato dall'Unione europea - Next Generation EU



LE STRATEGIE DELLE SPECIE FORESTALI PER ADATTARSI AI CAMBIAMENTI CLIMATICI

I cambiamenti climatici hanno effetti sia positivi che negativi sulle foreste. Gli alberi possono adattarsi alle nuove condizioni in vari modi: variabilità genetica, modifica delle caratteristiche morfologiche e funzionali, migrazione verso nuove aree.

La migrazione delle specie può essere “assistita” da interventi che favoriscono il trasferimento di individui con geni più adatti alle nuove condizioni climatiche, come, in FVG, nel progetto delle Università di Udine e Trieste supportato dalla Regione.

Il cambiamento climatico in atto sta esercitando un impatto significativo su composizione, struttura e funzionamento degli ecosistemi forestali. Guardando il **bicchiere mezzo pieno**, l'aumento della temperatura media del nostro pianeta, combinato con l'effetto fertilizzante della maggiore concentrazione di CO₂ in atmosfera e delle deposizioni azotate, ha determinato un **aumento dell'accrescimento delle nostre foreste negli ultimi decenni**, andando a modificare la lunghezza della stagione vegetativa e le fasi fenologiche (per esempio anticipando la fioritura e/o ritardando la caduta delle foglie). Infatti, diversi studi hanno messo in evidenza come le foreste europee nei primi anni duemila crescessero fino al 67% in più rispetto agli anni cinquanta del secolo scorso. Dal punto di vista dell'estensione delle foreste, l'aumento della temperatura media favorisce anche un'**espansione della vegetazione forestale verso quote superiori** andando a innalzare il limite superiore della vegetazione arborea.

IMPATTI NEGATIVI E POSSIBILI ADATTAMENTI

Tuttavia, guardando al **bicchiere mezzo vuoto**, il cambiamento climatico in atto sta esponendo le foreste a **eventi estremi** (fattori di stress) che stanno aumentando in frequenza e intensità e che possono portare alla morte di singoli individui arborei o all'insorgenza di fenomeni di disturbo come gli incendi o gli attacchi parassitari (come spieghiamo nel box **FATTORI DI STRESS E DISTURBI**). Inoltre, il maggiore accrescimento degli alberi richiamato in precedenza si traduce spesso in una **più precoce mortalità** legata al fatto che le piante, investendo maggiori risorse nel loro sviluppo in altezza e in diametro, investono meno nelle loro difese o a conferire maggiore resistenza meccanica al legno.

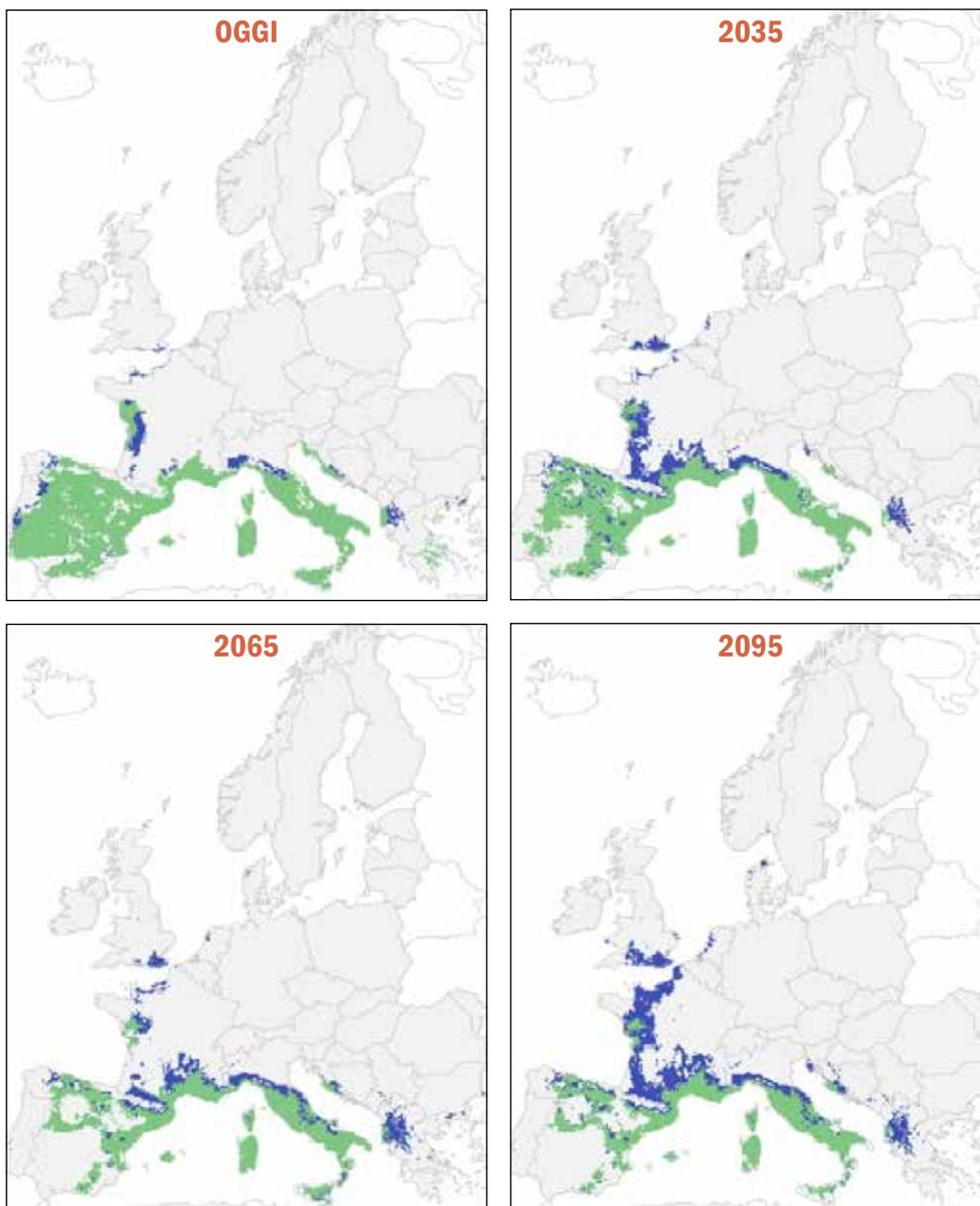
Alcune specie saranno in grado di tollerare le condizioni ambientali in rapido cambiamento attraverso la **variabilità genetica** (plasticità genotipica*) già esistente all'interno delle popolazioni. In alternativa, è possibile che i singoli individui riescano ad acclimatarsi all'ambiente mutato grazie alla propria **plasticità fenotipica***, ovvero la capacità degli individui di sviluppare un diverso fenotipo (l'insieme delle loro caratteristiche morfologiche e funzionali) in relazione a differenti condizioni ambientali. Un'ulteriore possibilità di risposta per le specie è rappresentata dalla **migrazione verso nuove aree** che presentano condizioni ambientali compatibili con le loro esigenze ecologiche (come vediamo nella figura che illustra l'areale potenziale del leccio).

AREALE POTENZIALE DEL LECCIO

Esempio di variazione nell'areale di distribuzione potenziale del leccio (*Quercus ilex*) a scala europea (verde + blu) secondo le proiezioni climatiche per lo scenario emissivo intermedio (RCP4.5, con emissioni né fortemente ridotte né crescenti).

L'area blu rappresenta l'areale potenzialmente idoneo non occupato dalla specie a causa dei limiti nella sua dispersione.

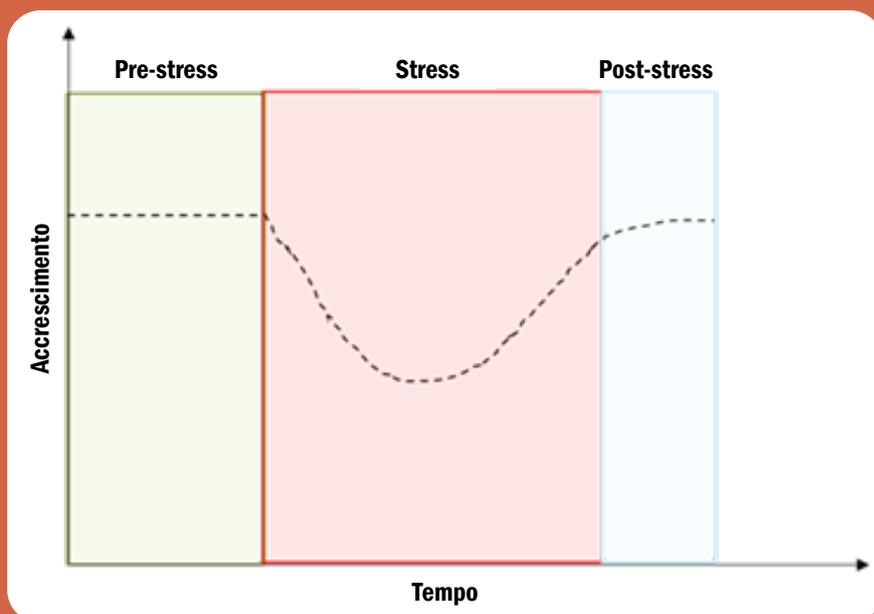
Immagine (licenza Creative Commons CC-BY 4.0) tratta e tradotta da Mauri, A., Girardello, M., Strona, G. et al. *EU-Trees4F, a dataset on the future distribution of European tree species*. *Sci Data* 9, 37 (2022) - <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01128-5>



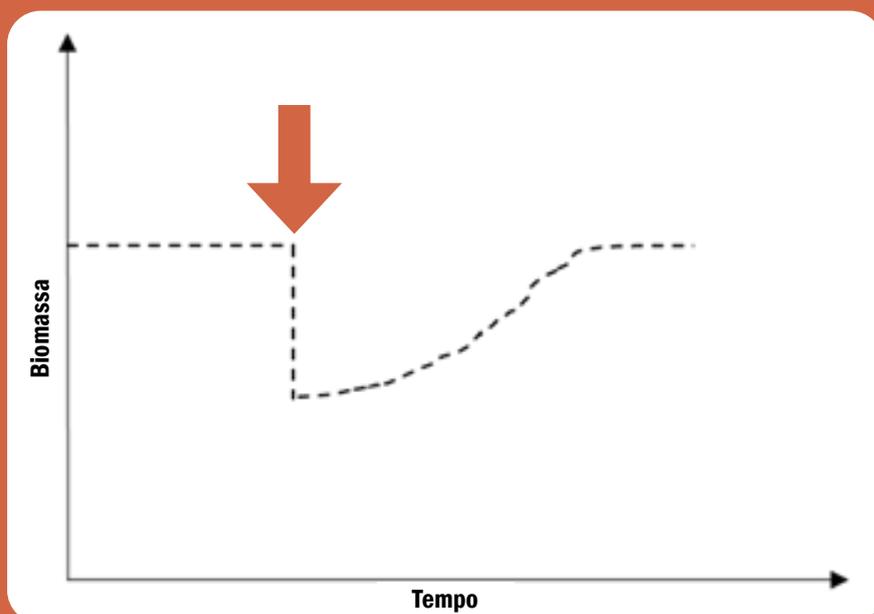
FATTORI DI STRESS E DISTURBI

In ecologia forestale, i termini “fattore di stress” e “disturbo” sono utilizzati per descrivere eventi o condizioni che influenzano gli ecosistemi forestali, ma si riferiscono a concetti diversi. Un fattore di stress è una condizione ambientale che agisce sugli alberi riducendo la loro capacità di crescere. I fattori di stress (per esempio, siccità, temperature estreme, inquinanti atmosferici) non portano necessariamente alla morte immediata degli organismi ma li indeboliscono o compromettono la salute degli individui e degli ecosistemi, aumentando la loro vulnerabilità ad altri fattori di stress o disturbi.

Un disturbo è un evento che causa un'alterazione drastica e immediata della struttura o della composizione dell'ecosistema. I disturbi (per esempio, vento, parassiti, incendi) sono spesso brevi e intensi e comportano la morte di organismi, la perdita di biomassa e la modifica permanente della struttura dell'ecosistema forestale. I disturbi sono fattori ecologici estremamente importanti perché portano a una rigenerazione o a una rinnovata diversità dell'ecosistema nel lungo periodo. Le specie forestali si sono evolute per rispondere e adattarsi ai disturbi attraverso varie strategie, ma la modifica nella frequenza e nell'intensità di questi eventi a seguito del cambiamento climatico sta mettendo a dura prova tali strategie e quindi la resistenza (capacità di opporsi al disturbo) e la resilienza (capacità di riprendersi dal disturbo) degli ecosistemi forestali.



Effetto di un fattore di stress (siccità) sull'accrescimento delle specie forestali nel tempo.



Effetto di un fattore di disturbo (per esempio, tromba d'aria; freccia rossa) sulla biomassa dell'ecosistema forestale nel tempo.

LA MIGRAZIONE SPONTANEA

Il fenomeno della migrazione delle specie non è nuovo, in quanto tutte le **modifiche passate del clima hanno portato le specie a “muoversi” verso sud o nord**. Ciò ha interessato non solo gli animali ma anche le piante. Infatti, sebbene queste ultime non possano migrare in modo attivo come gli animali, lo fanno tramite meccanismi di dispersione dei semi e altre modalità di propagazione. **Nel corso dell’ultima glaciazione**, ad esempio, alcune specie forestali tipiche dei climi freddi (quali abeti o betulle) sono migrate verso sud e hanno raggiunto anche le isole del Mediterraneo. Al mutare del clima e con la fine del periodo di glaciazione (20.000-11.700 anni fa) sono rimaste confinate alle aree montane più alte, dove ora rappresentano dei **“relitti glaciali”** e col tempo sono diventate delle vere e proprie nuove specie. È il caso ad esempio dell’abete bianco dei Nebrodi o *Abies nebrodensis*, parente dell’abete bianco (*Abies alba*), che attualmente sopravvive in qualche centinaio di esemplari solamente sulle cime più elevate delle Madonie in Sicilia. **Con l’aumento delle temperature globali** degli ultimi decenni **stiamo osservando il fenomeno inverso**: molte specie arboree stanno cercando di spostarsi verso latitudini settentrionali o a quote più elevate, in cerca di condizioni climatiche più fresche. Altre specie, tuttavia non saranno in grado di tollerare questo cambiamento e, conseguentemente, diminuiranno in abbondanza e/o si estingueranno.

LA “MIGRAZIONE ASSISTITA”

In generale, **le specie arboree possono impiegare secoli o millenni per migrare** su lunghe distanze naturali, come nel caso degli esempi citati in precedenza. Le modalità e i tempi con cui le specie forestali possono migrare dipendono dalle **modalità di dispersione** adottate dalle specie, dalla **frammentazione dell’habitat** (le aree urbane, agricole o altre barriere artificiali limitano la capacità delle specie arboree di migrare liberamente) e dalla **velocità con cui il clima cambia** (se il cambiamento climatico avviene troppo velocemente, molte specie potrebbero non essere in grado di adattarsi o spostarsi abbastanza rapidamente, con il rischio di estinzione in alcune regioni). Ciò ha determinato la necessità di valutare l’opportunità di un intervento umano volto a **favorire il trasferimento di individui con geni più adatti alle nuove condizioni climatiche**.

In particolare, la migrazione assistita di specie forestali è una strategia di conservazione e gestione ecologica che prevede il trasferimento deliberato di **individui resistenti** all’interno dell’areale della specie verso aree che sono state colpite dal cambiamento climatico o di individui della stessa specie o di altre specie in ambienti che non sono il loro habitat naturale, ma che potrebbero diventarlo a causa di cambiamenti climatici o altre minacce ambientali. Questo processo è principalmente utilizzato per **aiutare le specie a far fronte al cambiamento climatico** e ad altri disturbi ambientali che potrebbero compromettere la loro capacità di adattarsi autonomamente.

Nonostante i benefici, la **migrazione assistita con sostituzione di specie** presenta una serie di **sfide e rischi** che comprendono l’adattabilità delle specie ai nuovi habitat, i rischi per gli ecosistemi locali legati all’introduzione di specie forestali diverse, l’etica e gestione della biodiversità in quanto alcuni esperti ritengono che si debba cercare di preservare gli ecosistemi nel loro stato naturale, evitando di interferire con i processi evolutivi naturali, il rischio di perdita di adattamento locale.

COME INDIVIDUARE LE POPOLAZIONI RESISTENTI O RESILIENTI AL CAMBIAMENTO CLIMATICO

L’individuazione di **popolazioni resistenti* o resilienti*** ai cambiamenti climatici in atto può oggi avvalersi di diversi approcci, tra cui quelli basati su studi empirici condotti attraverso **piantagioni sperimentali** in condizioni ambientali condivise, utilizzando materiale di base proveniente da popolazioni presenti in località geografiche distinte (**“common garden experiments”**), eventualmente abbinati alla manipolazione dei fattori ambientali come la disponibilità idrica, la temperatura o la concentrazione di CO₂ in atmosfera.

Un recente **progetto di ricerca, finanziato dalla Regione FVG** e condotto in collaborazione dalle Università di Udine e di Trieste, si è posto l’obiettivo di identificare materiali selezionati per la loro capacità di rispondere al cambiamento delle variabili climatiche e, in particolare, alle condizioni che conducono allo stress idrico. A tal fine, il progetto ha lo scopo di caratterizzare popolazioni di specie forestali di interesse per la vivaistica regionale attraverso un confronto diretto con popolazioni provenienti da altre località italiane.

LO SCHEMA SPERIMENTALE DELLA RICERCA IN FVG

L'attività di ricerca si svolge seguendo uno schema sperimentale che prevede innanzitutto di individuare con l'Amministrazione regionale **tre specie forestali di particolare interesse vivaistico**. La prima specie scelta è stato il **faggio** (*Fagus sylvatica*), per la diffusione sul territorio regionale e per la rilevanza per la produzione di legname con molteplici utilizzi. Il faggio inoltre è una delle specie che ci si attende sia maggiormente favorita dall'innalzamento delle temperature nelle aree montane, a discapito dell'abete bianco e dell'abete rosso. La seconda specie scelta è l'**orniello** (*Fraxinus ornus*), per il suo interesse negli impianti su terreni poveri, anche finalizzati alla produzione di legna da ardere. La terza specie è il **carpino bianco** (*Carpinus betulus*), di rilevanza per le alberature urbane e per il suo utilizzo negli impianti nelle aree di pianura.

Per ciascuna specie si è proceduto a selezionare **molteplici popolazioni a livello nazionale** utilizzando le informazioni geografiche contenute nel Registro nazionale dei materiali di base in modo da coprire un ampio spettro di valori di precipitazioni e temperature. Tra le popolazioni studiate, sono state considerate anche alcune presenti in FVG in modo da confrontarle con le popolazioni extra-regionali. D'accordo con i vivai delle regioni interessate, si è proceduto alla **raccolta dei semi** da almeno 5 alberi selezionati casualmente per ciascuna popolazione. I semi sono stati opportunamente conservati per la successiva semina con l'assistenza del **vivaio regionale Pascu**.

Dopo la semina sono state effettuate misure relative ai principali parametri morfologici e fisiologici delle foglie che la letteratura indica come correlati al livello di tolleranza all'aridità.

L'esperimento permetterà quindi di ottenere dati importanti per **comprendere come le specie selezionate rispondano allo stress idrico**, utili sia per la gestione dell'allevamento in vivaio che per progetti di reintroduzione in ambiente naturale o di impianto.



FAGGIO (1)



ORNIELLO (2)



CARPINO BIANCO (3)

Giovani piante di *Fagus sylvatica* L. (1), *Fraxinus ornus* L. (2) e *Carpinus betulus* L. (3) allevate nel vivaio regionale Pascu di Tarcento (UD).Foto: Luca Redivo.



Foto: Luca Redivo

Specie forestali allevate nel vivaio regionale Pascul di Tarcento (UD).

LE MISURE EFFETTUATE E PREVISTE

Nel corso dell'estate 2024 sono state effettuate misure relative di area fogliare (LA) e area fogliare specifica (SLA), e misure del punto di perdita di turgore fogliare (TLP). Quest'ultimo parametro, espresso in MPa, indica il potenziale idrico al quale le foglie iniziano ad appassire ed è un indicatore chiave della resistenza alla siccità nelle diverse specie e popolazioni di alberi. Infatti, le piante caratterizzate da un TLP più basso mantengono le funzioni cellulari più a lungo anche in condizioni di limitata disponibilità idrica, dimostrando una maggiore resilienza in scenari di stress idrico.

Le prime misure, effettuate sulle diverse provenienze di *Carpinus betulus*, sono incoraggianti, indicando una certa variabilità di questo parametro nelle diverse popolazioni.

Nel corso dell'anno 2025 saranno eseguite ulteriori misurazioni per approfondire la caratterizzazione di questa e delle altre specie. Verranno analizzati altri tratti morfometrici, come l'altezza e il diametro del fusto, la biomassa totale e il rapporto tra biomassa radicale ed epigea, che forniscono indicazioni cruciali sulla strategia di allocazione delle risorse e sullo sviluppo strutturale degli individui. Inoltre, saranno valutati ulteriori parametri fisiologici fondamentali, tra cui l'efficienza degli scambi gassosi, la tolleranza dell'apparato fotosintetico allo stress termico, e la vulnerabilità all'embolia xilematica.

COMPRENDERE LA BASE GENETICA DELLA VARIABILITÀ

Assieme a questa attività in vivaio è necessario comprendere la base genetica di tale variabilità, distinguendo tra la componente geografica e quella ecologica, dovute alla diversa provenienza. Questo obiettivo sarà raggiunto mediante il **sequenziamento del genoma** di singole piante rappresentanti le diverse famiglie di **ogni popolazione (provenienza)** in ciascuna delle specie considerate.

Attraverso la tecnologia *Next Generation Sequencing* denominata ddRAD-seq, sarà possibile ottenere una **mappa genetica dettagliata** delle piante studiate, di comprendere meglio la loro variabilità genetica e di sviluppare in futuro varietà più resistenti e adatte ai cambiamenti ambientali, accelerando il processo di selezione e riducendo i costi.

I BOSCHI DA SEME SELEZIONATI PER L'ADATTAMENTO

Accanto a queste attività in ambiente controllato, si è anche proceduto all'identificazione sul territorio regionale di boschi da seme qualificati ossia di popolamenti forestali di almeno 10 ha con **potenzialità di crescita superiore** a quella che si considera come media in analoghe condizioni ecologiche e di gestione selvicolturale, con un'**elevata resistenza** a fattori di stress come la siccità e con individui caratterizzati da **caratteri morfologici particolarmente favorevoli**, con particolare riferimento al fusto che deve essere diritto e circolare.

LA TECNOLOGIA NEXT GENERATION SEQUENCING

La tecnologia ddRAD-seq è una tecnica avanzata che permette di “leggere” il DNA delle piante in modo molto preciso, ma concentrandosi su una parte selezionata del loro genoma, piuttosto che sequenziarlo tutto. In pratica, si ottiene una “fotografia” del DNA che rappresenta in modo efficace e informativo le informazioni genetiche principali di ogni pianta analizzata.

Una volta che il DNA è stato sequenziato con questa tecnologia, i dati raccolti vengono analizzati usando strumenti bioinformatici (cioè software e algoritmi) che permettono di assegnare un’identità genotipica a ciascuna pianta, valutare le relazioni genetiche tra piante di diverse popolazioni aiutando in questo modo a capire quanto siano simili o diverse le piante provenienti da luoghi differenti e misurare la diversità genetica nelle piante analizzate, cioè quanto è ampia e varia la base genetica che viene studiata.

La successiva identificazione di piccole variazioni nel DNA tra gli individui (polimorfismi di sequenza) consentirà in futuro di aiutare a scegliere le piante migliori in base alle loro caratteristiche genetiche (selezione assistita) e di sviluppare nuove varietà di piante più resistenti più velocemente e con minori costi (selezione genomica).



Foto: Alessandro Foscarì

Bosco da seme di faggio in Val Alba.

Combinando dati rilevati da remoto circa le capacità produttive dei boschi della regione (accrescimento in volume) con quelli relativi alla resistenza alla siccità utilizzando specifici indici di risposta da satellite e successive osservazioni in campo, sono stati **individuati 13 popolamenti** che comprendono al loro interno le principali specie di interesse economico a scala regionale (**abete rosso, abete bianco e faggio**). Dai dati raccolti, si può comunque affermare che i boschi da seme identificati nel presente studio, oltre a presentare elevati valori di accrescimento (incremento corrente superiore al novantesimo percentile della categoria forestale di appartenenza) e una buona resistenza agli stress idrici, hanno anche dimo-

strato di avere una ottima percentuale di fusti di elevata qualità in termini di rettilineità del fusto, di circolarità dello stesso, dell’assenza di biforcazioni critiche, di andamento della fibratura e di altezza di inserzione della chioma (auto-potatura) nonché di dimensione dei nodi.

IN CONCLUSIONE

Coniugando esperimenti in vivaio, indagini genetiche e selezione di boschi da seme, con questa ricerca si stanno quindi ponendo le basi per facilitare l’adattamento delle nostre foreste al cambiamento attuale e futuro delle condizioni climatiche in Friuli Venezia Giulia.

PAROLE CHIAVE

RESISTENZA

è la capacità di una specie vegetale di limitare l'impatto negativo di fattori di stress (abiotici, come siccità o gelo, o biotici, come parassiti o patogeni) o di disturbi (es. gli incendi) mantenendo le proprie funzioni fisiologiche senza subire danni significativi.

RESILIENZA

è la capacità di una specie vegetale di reazione, di auto-riparazione e rinnovamento dopo un evento di disturbo o stress, anche se ha subito dei danni iniziali. Comprende sia la capacità di rigenerazione sia l'adattabilità a lungo termine.



GENOTIPO

è l'insieme delle informazioni genetiche (cioè il DNA) contenute nel corredo genetico di una pianta. Il genotipo determina il potenziale ereditario della pianta, ovvero le sue caratteristiche possibili, come l'altezza, il colore dei fiori, la resistenza a certe malattie, ecc.

FENOTIPO

è l'insieme delle caratteristiche osservabili di una pianta, cioè come il genotipo si esprime nell'ambiente reale. Il fenotipo è il risultato dell'interazione tra genotipo e ambiente. Ad esempio, una specie di albero può avere un genotipo che la predispone a una crescita rapida. Tuttavia, se viene trovata a crescere in un terreno povero, con poca disponibilità d'acqua o in una zona con alta competizione per la luce, il suo fenotipo potrebbe risultare in una pianta che cresce lentamente, con un fusto più sottile e una chioma ridotta.

Luca Redivo

Università degli Studi di Udine e di Trieste

Antonio Tomao, Emanuele De Paoli, Giorgio Alberti

Università degli Studi di Udine

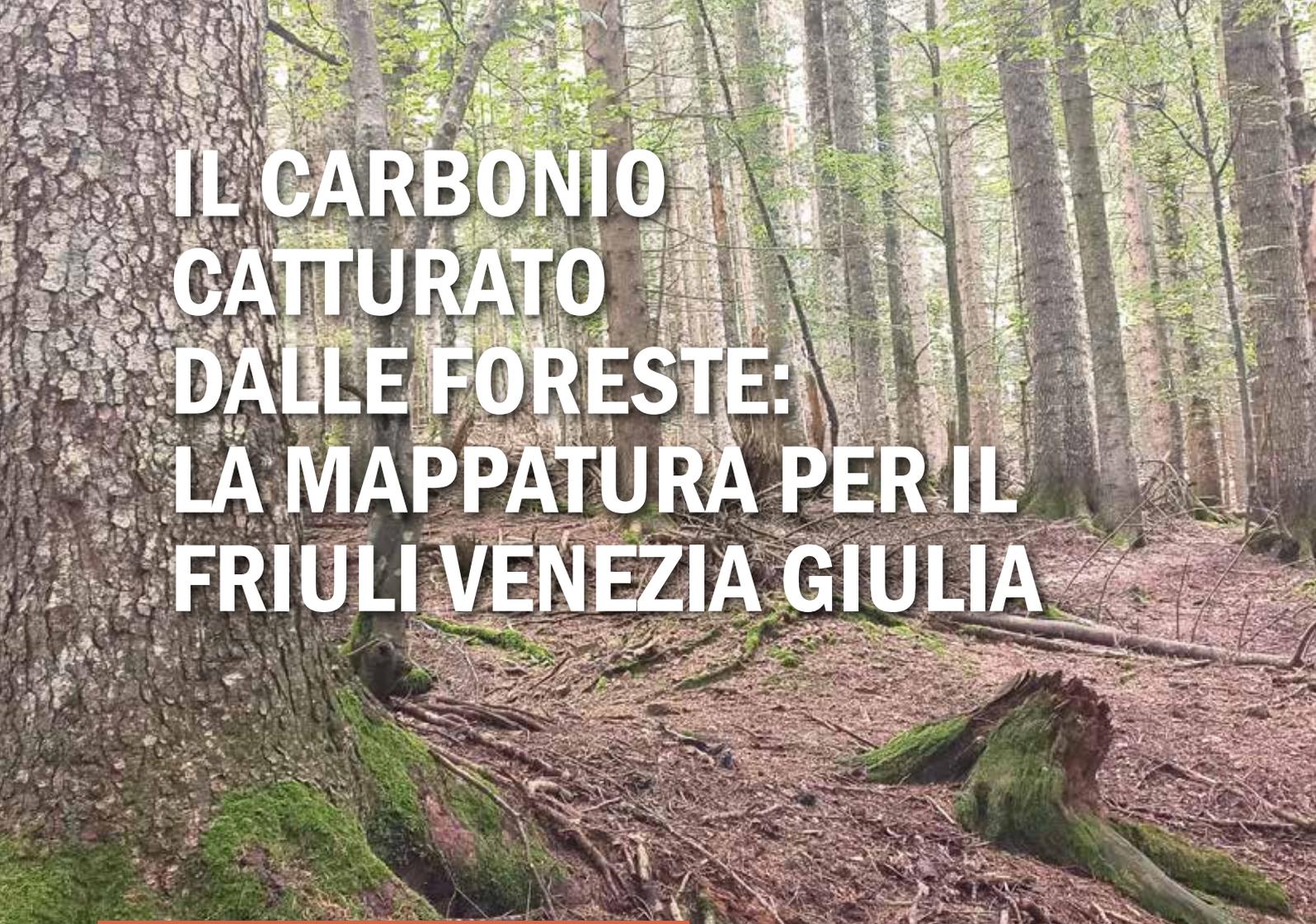
Andrea Nardini

Università degli Studi di Trieste



REGIONE AUTONOMA
FRIULI VENEZIA GIULIA

Questo contributo è stato realizzato con il supporto della Direzione centrale risorse agroalimentari, forestali e ittiche della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia nell'ambito della convenzione di ricerca per la gestione, la tutela e l'identificazione delle aree definibili come boschi vetusti e di revisione e/o integrazione degli attuali materiali di base (CUP G23C23000690002).



IL CARBONIO CATTURATO DALLE FORESTE: LA MAPPATURA PER IL FRIULI VENEZIA GIULIA

Per limitare il riscaldamento globale è necessario sia ridurre le emissioni di gas serra che aumentare la rimozione del carbonio presente in atmosfera: a ciò le foreste contribuiscono in modo importante per la loro capacità di assorbire e fissare la CO₂.

Con il telerilevamento è possibile stimare questa capacità con precisione e su ampia scala, come si sta facendo in FVG, per pianificare una gestione delle foreste che favorisca la loro capacità di stoccare carbonio e di contribuire, così, alla regolazione del clima.

Due delle principali sfide che l'umanità si trova ad affrontare sono:

- ridurre e adattarsi ai cambiamenti climatici e
- prevenire la perdita di biodiversità.

Per quanto riguarda il primo aspetto, raggiungere emissioni nette di gas serra pari a zero entro il 2050 è ritenuto un obiettivo fondamentale per limitare il riscaldamento globale a 1,5 °C e per raggiungere gli obiettivi fissati nell'Accordo di Parigi sul clima. Per fare ciò, l'Europa deve ridurre le sue emissioni di gas serra, passando da 58 Gt (Gigatonnellate ossia miliardi di tonnellate) di CO₂ equivalente (anno di riferimento 2019) a 25 Gt di CO₂ equivalente entro il 2030. Questo obiettivo ambizioso richiede cambiamenti nei nostri stili di vita e transizioni rapide e profonde nella gestione dell'energia, del territorio e delle città, nonché sistemi infrastrutturali e industriali adeguati. Ma anche le foreste possono dare un importante contributo.

Infatti, le tecniche tradizionali di mitigazione, come l'uso delle energie rinnovabili e l'indipendenza dai combustibili fossili, devono essere integrate con **strategie attive di rimozione del carbonio** per compensare le emissioni residue e addirittura raggiungere emissioni nette negative. Tra queste, le cosiddette **soluzioni basate sulla natura** possono essere in grado di compensare, almeno parzialmente, le emissioni antropiche di gas climalteranti.

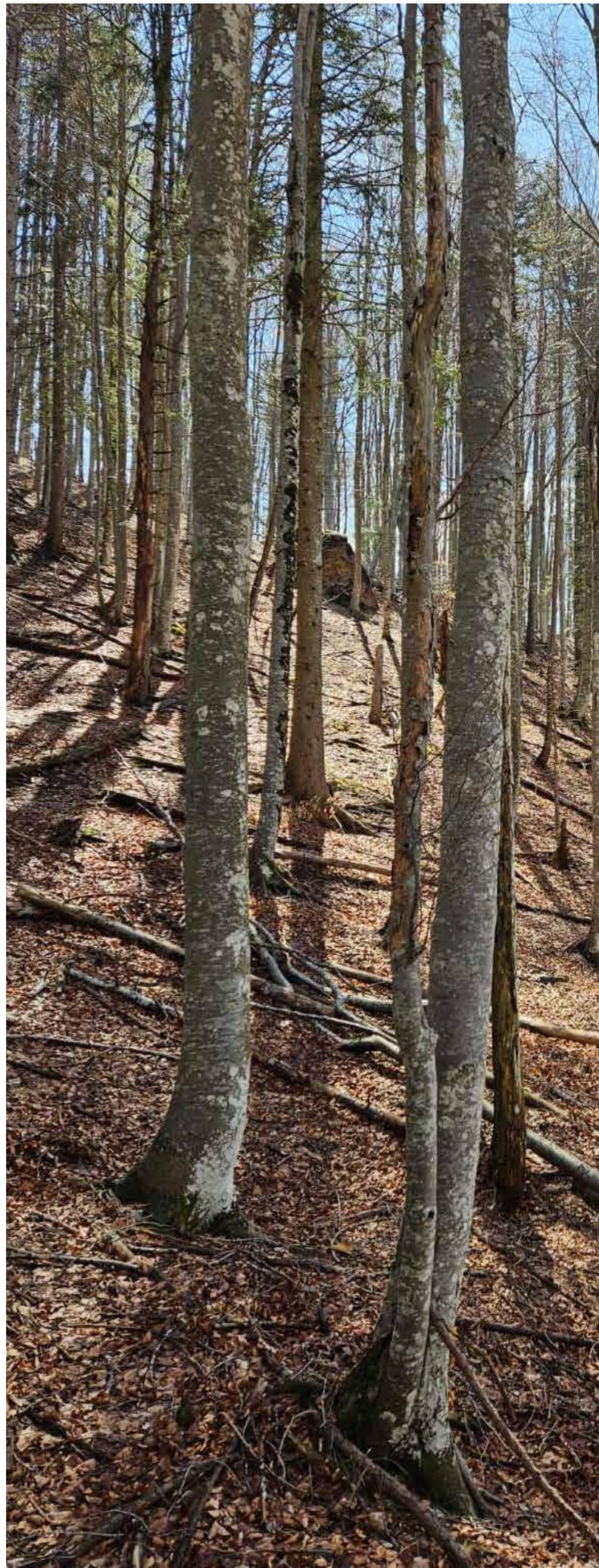
LE FORESTE: UN IMPORTANTE SERBATOIO DI CARBONIO

In questo contesto, le foreste sono un importante serbatoio di carbonio, con una capacità di rimozione netta stimata di circa 7,5 Gt di CO₂ equivalente all'anno a scala globale (15,6 Gt sono rimosse attraverso la fotosintesi e 8,1 Gt sono rimesse attraverso processi respiratori). Per questo motivo, **l'aumento della superficie forestale** attraverso rimboschimenti e piantumazioni, se attentamente pianificata per non entrare in conflitto con altri usi del suolo, può rappresentare una misura attiva ed efficace di rimozione del carbonio.

Accanto a ciò, la **conservazione degli ecosistemi forestali esistenti**, anche attraverso politiche volte alla riduzione della deforestazione nei Paesi della fascia tropicale e sub-tropicale e alla gestione sostenibile a scala globale, è uno strumento fondamentale per conservare gli stock di carbonio attualmente presenti, evitando ulteriori emissioni di CO₂ in atmosfera, e per aumentare il contributo di questi ecosistemi al bilanciamento delle emissioni antropiche nell'attesa di mettere in atto strategie efficaci per ridurre queste ultime. Infatti, si stima che **le foreste potrebbero contribuire a circa il 10% della riduzione** necessaria delle emissioni di **gas serra** nel periodo 2020-2030 a scala globale.

STIMARE LA CAPACITÀ DELLE FORESTE DI CATTURARE IL CARBONIO

Da queste premesse, appare evidente come una stima accurata della capacità delle foreste di fissare carbonio e sequestrarlo nel lungo periodo, sia a scala locale che globale, sia fondamentale per fornire ai decisori politici e coloro che si occupano della gestione del territorio **informazioni affidabili e aggiornate** al fine di elaborare strategie efficaci





per contribuire al bilanciamento delle emissioni antropiche di CO₂ in atmosfera.

I **metodi attualmente impiegati** sono generalmente basati su schemi di campionamento statistico e sulla misura di variabili dendrometriche (es. altezza e diametro degli alberi) in aree di saggio a terra attraverso gli inventari forestali. Tali metodi, sebbene precisi, **non sono pratici per valutazioni su vasta scala** poiché consentono di stimare gli stock di carbonio e la crescita delle foreste solo a livello di provincia o regione e, generalmente, consentono di arrivare a una ripartizione a livello di singola categoria forestale.

INFORMAZIONI PIÙ PRECISE GRAZIE AL TELERILEVAMENTO

Per ottenere informazioni più precise e spazialmente esplicite, **oggi sono disponibili nuove tecnologie**. Tra queste, il telerilevamento è emerso come uno strumento cruciale per stimare e mappare la biomassa forestale a diverse scale spaziali e con un'elevata risoluzione. Il **telerilevamento (remote sensing)** rappresenta l'insieme delle tecnologie che consentono l'ottenimento di dati da oggetti a terra senza entrare in diretto contatto con essi. Esso utilizza **satelliti, aerei e droni** per osservare e analizzare caratteristiche qualitative e quantitative da lontano, fornendo dati su ampie aree e permettendo l'accesso a luoghi difficili da raggiungere.

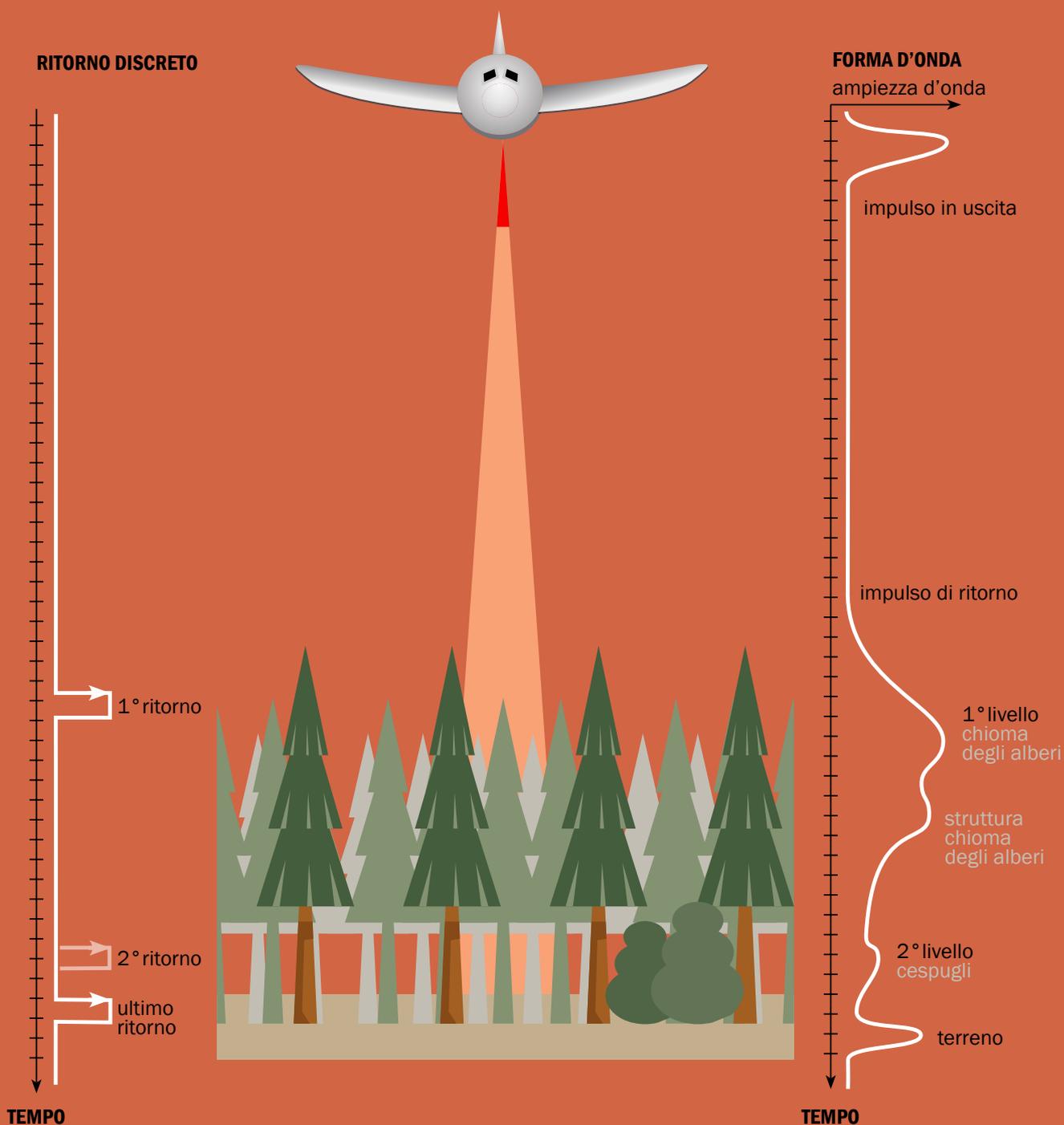
IL FVG ALL'AVANGUARDIA NELL'IMPIEGO DEI RILEVAMENTI TRAMITE LASER (LIDAR)

Tra le diverse tecniche utilizzate, il **LiDAR (Light Detection and Ranging)** è un approccio particolarmente promettente. Si tratta di una tecnica di telerilevamento che utilizza impulsi laser per misurare la distanza tra il sensore e gli oggetti sulla superficie terrestre per creare **mappe tridimensionali** molto precise del terreno, delle foreste e di altre caratteristiche geografiche, fornendo dati dettagliati sulla forma e sull'altezza degli oggetti e, nel caso delle foreste, sulla biomassa presente. Tuttavia, la disponibilità dei dati LiDAR è ancora limitata in termini di copertura spaziale e temporale a causa dei costi elevati di acquisizione, dei volumi di dati e

IL LIDAR: COS'È E COME FUNZIONA

Il LiDAR (*Light Detection and Ranging*) è una tecnologia di telerilevamento che utilizza impulsi laser per misurare con elevata precisione la distanza tra un sensore e un oggetto o una superficie.

I sensori LiDAR emettono impulsi di luce e misurano il tempo impiegato per il loro ritorno dopo essere stati riflessi dagli oggetti circostanti. Conoscendo il tempo che l'impulso impiega a tornare al sensore si riesce facilmente a calcolare la distanza con l'oggetto. I sensori LiDAR possono essere montati su satelliti, aerei e, di recente, anche su droni a pilotaggio remoto.



Schema di funzionamento di un LiDAR in versione aerotrasportata (rielaborazione dello schema proposto da [CNR-IRPI](#))

delle alte esigenze di pre-elaborazione dei dati. In questo contesto, però, la nostra regione è una delle poche dove, nel tempo, sono stati condotti **due voli LiDAR sull'intera superficie regionale** (l'ultimo risale al 2018-2020) e questi dati sono stati utilizzati come **base per l'elaborazione di strumenti di pianificazione specifici**, come i piani di gestione forestale a scala di comprensorio o di singola proprietà forestale.

UNA REGIONE RICCA DI FORESTE...

Il Friuli Venezia Giulia è sicuramente una regione ricca di foreste. Esse, infatti, occupano più di 330.000 ha, ossia il **42% del territorio regionale**, e la loro estensione è praticamente duplicata nel secondo dopoguerra, principalmente a causa dello spopolamento della montagna e dell'abbandono delle pratiche agricole tradizionali. Al contrario, la presenza di boschi nelle zone di pianura è relativamente bassa, principalmente a causa dell'intensificazione delle attività agricole e dell'espansione dei centri urbani.

... CHE CATTURANO MOLTO CARBONIO

Combinando tecniche di **intelligenza artificiale**, **dati rilevati a terra** durante l'ultimo inventario forestale nazionale (2015) con dati telerilevati (indici spettrali derivati da immagini satellitari Sentinel 2 e modelli digitali delle altezze delle superfici boscate derivati dal volo LiDAR a scala regionale del 2018), è stato possibile realizzare delle **mappe ad alta risoluzione** (23x23 m la dimensione del pixel) della distribuzione degli **stock di carbonio nelle foreste regionali** e della loro capacità di fissazione annua della CO₂ come vediamo nella figura.

Da questa analisi è emerso che le foreste regionali hanno, complessivamente, uno stock di carbonio pari a 25.504.581 tC (tonnellate di carbonio), corrispondenti a circa 71 tC per ettaro in media, e la capacità di fissare ogni anno 549.360 tC (=2.014.320 tonnellate di CO₂ equivalente all'anno).

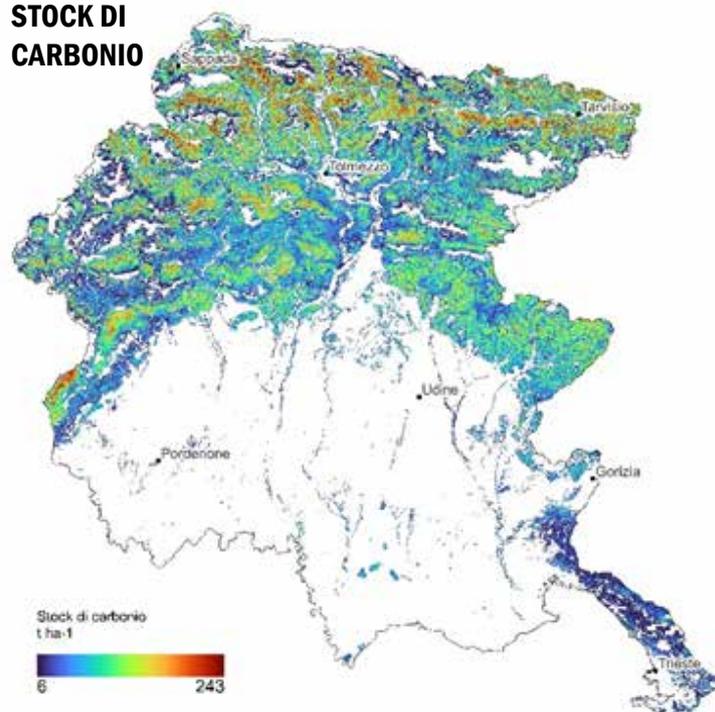
Quindi ogni ettaro delle nostre foreste cattura in media 1,52 tC per ettaro all'anno (=5.6 tCO₂ equivalente per ettaro all'anno).

I valori più elevati per entrambe le variabili - stock di carbonio e fissazione annua - sono stati

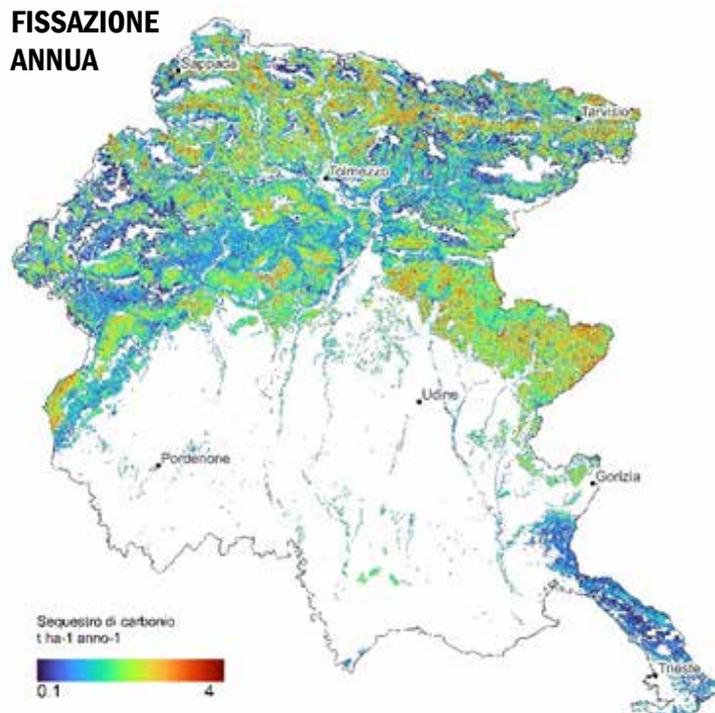
registrati nei boschi di abete bianco e **nei boschi misti di abete rosso e faggio** nella parte interna delle Alpi. Valori di stock e di fissazione annua di poco inferiori sono stati misurati per le faggete e i boschi misti di acero e frassino della zona prealpina.

FORESTE DEL FRIULI VENEZIA GIULIA

STOCK DI CARBONIO



FISSAZIONE ANNUA



Stock di carbonio a ettaro (tC ha⁻¹; sinistra) e fissazione annua (tC ha⁻¹ anno⁻¹; destra) nelle foreste del Friuli Venezia Giulia.

QUANTE EMISSIONI REGIONALI BILANCIANO LE FORESTE DEL FVG

Da queste stime, è possibile concludere che il nostro patrimonio forestale contribuisce, annualmente, a bilanciare **circa il 23% delle emissioni di CO₂** a scala regionale che sono pari a 8.798.483 tonnellate di CO₂ equivalente all'anno (dati ARPA FVG - [Emissioni Regionali Dirette dei Gas Serra 2021](#)).

Se si considerano le sole emissioni da parte delle automobili, assumendo un fattore di emissione medio pari a circa 162 g CO₂ per ogni kilometro percorso, **un ettaro di bosco** è in grado di bilanciare le emissioni di **quasi due automobili** che percorrono poco più di **15.000 km all'anno**.

Bisogna considerare anche che le nostre foreste contribuiscono allo stoccaggio del carbonio anche quando gli alberi sono tagliati. Infatti **se il legname estratto viene trasformato in prodotti legnosi durevoli** (es. legno strutturale per costruzioni, legname per manifattura), **il carbonio rimane catturato nel legno** anche oltre l'asportazione dell'albero dal bosco.

Questi dati e le mappe che sono state prodotte ci fanno quindi capire l'importanza che le foreste regionali svolgono nel ciclo del carbonio e come questo **servizio ecosistemico** sia distribuito a scala regionale. Tuttavia, **i cambiamenti climatici in atto**, e in particolare l'aumento della frequenza di fattori di stress (per esempio, la siccità) o di disturbo (per esempio, gli incendi e gli attacchi parassitari), **potrebbero ridurre lo stock di carbonio** presente in questi ecosistemi e la loro capacità di stoccare carbonio e di contribuire, così, alla regolazione del clima. Per questo, un'attenta **pianificazione forestale** basata su una conoscenza approfondita delle risorse e sulla loro distribuzione a scala territoriale può favorire l'adozione di tecniche gestionali appropriate volte alla loro conservazione e alla valorizzazione delle loro molteplici funzioni ecosistemiche.

**Luca Cadez, Mehdi Fasihi,
Antonio Tomao, Giuseppe Serra, Giorgio Alberti**
Università degli Studi di Udine



Questo contributo è stato realizzato con il supporto del Programma Europeo di Sviluppo Rurale della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, misura 16.1.1, decreto n. 422/AGFOR del 22/01/2020; del Piano Nazionale di Recupero e Resilienza (PNRR), Missione 4 Componente 2 Investimento 1.4, Centro Nazionale Agritech; della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione Centrale del Territorio e delle Infrastrutture, Servizio Territorio, Paesaggio e Pianificazione Strategica, Accordo Quadro "Vegetazione per l'erogazione di servizi ecosistemici a scala regionale" CUP G55F21001140002 (2021).



IL *REWILDING* PER CONTRASTARE LA PERDITA DI BIODIVERSITÀ E PER MITIGARE IL CAMBIAMENTO CLIMATICO

Foto: Luca Cadez

Possiamo affrontare perdita di biodiversità e cambiamento climatico, due crisi interconnesse, con una strategia comune: ripristinare la natura.

Il *rewilding* può avvenire con l'espansione naturale del bosco o la pro-forestazione: porta molteplici benefici, ma servono studi - come quelli in corso in FVG - per valutarne il contributo all'assorbimento della CO₂ e promuovere un nuovo equilibrio tra il recupero degli ecosistemi e le attività umane.

L'umanità si trova a un punto cruciale, di fronte a due crisi tra loro interconnesse: la perdita di biodiversità e il cambiamento climatico. Mentre questo ultimo sta accelerando e le specie vegetali e animali scompaiono a un ritmo sempre più rapido, è essenziale ripensare radicalmente il nostro rapporto con la natura e rivedere le nostre strategie di gestione del territorio (come spieghiamo nel box **DUE APPROCCI PER BILANCIARE LE ATTIVITÀ UMANE CON LA PROTEZIONE DELLA NATURA**).

È NECESSARIO RIPRISTINARE LA NATURA

Gli sforzi di conservazione rivolti alla protezione delle specie e degli habitat hanno prodotto risultati contrastanti in termini di efficacia, e per questo è sempre maggiore la consapevolezza che la protezione della biodiversità a lungo termine richieda azioni di ripristino della natura, che vadano a **integrare la semplice conservazione degli habitat e delle specie**. In questa direzione, l'Assemblea Generale delle Nazioni Unite (ONU) ha proclamato il periodo dal 2021 al 2030 come il **Decennio delle Nazioni Unite per il Ripristino degli Ecosistemi**, con l'obiettivo di *“prevenire, fermare e invertire il degrado degli ecosistemi a livello globale”*. Inoltre, nel tentativo di fermare e invertire la perdita di biodiversità sia a livello nazionale che internazionale, il Parlamento Europeo ha recentemente approvato una regolamentazione specifica: la legge sul ripristino della natura (il regolamento noto come **Nature Restoration Law**, NRL). Sebbene alcuni degli obiettivi e degli approcci della NRL si sovrappongano con altre direttive e politiche dell'UE, la NRL interessa la maggior parte degli ecosistemi presenti in Europa, e ha come obiettivo principale **il ripristino e l'introduzione di obiettivi vincolanti** per gli Stati membri entro tempistiche certe. Infatti, la NRL stabilisce chiari obiettivi quantitativi per le aree da ripristinare, con obiettivi fissati per il 2030, il 2040 e il 2050, e definisce indicatori quantitativi per valutare il successo del ripristino.

DUE APPROCCI PER BILANCIARE LE ATTIVITÀ UMANE CON LA PROTEZIONE DELLA NATURA

Oggi esistono due approcci differenti all'uso del suolo e alla conservazione che mirano a bilanciare le attività umane con la protezione della natura:

LAND SHARING (CONDIVISIONE DEL TERRITORIO)

questo approccio promuove l'integrazione di attività agricole e conservazione della biodiversità nello stesso spazio. In pratica, significa che le terre agricole vengono gestite in modo da ridurre l'impatto negativo sull'ambiente, cercando di mantenere la biodiversità all'interno delle aree agricole stesse. Ad esempio, si possono adottare pratiche agricole più sostenibili, come l'agricoltura biologica, l'uso di colture miste o la conservazione di aree naturali all'interno delle terre agricole.

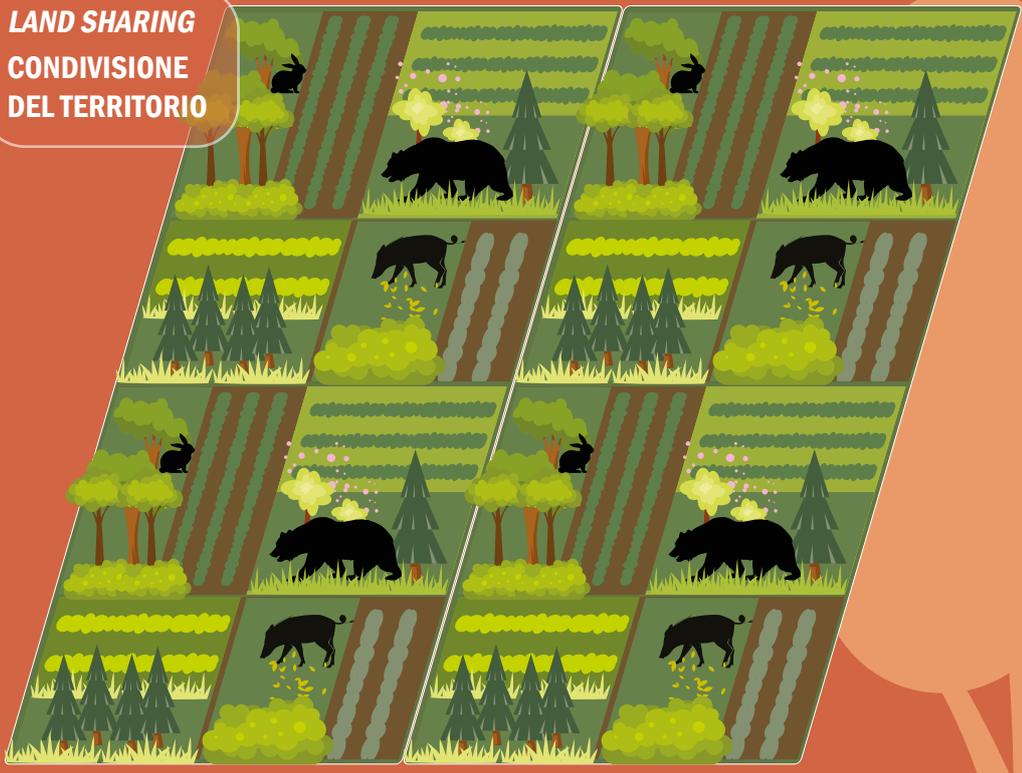
L'idea è che la produzione agricola e la conservazione della natura possano coesistere senza separare le due attività

LAND SPARING (RISPARMIO DEL TERRITORIO)

questo approccio, al contrario, prevede la separazione netta tra terre agricole e aree dedicate alla conservazione della biodiversità. In pratica, significa destinare aree specifiche, come parchi naturali o riserve, esclusivamente alla conservazione della natura, mentre le terre agricole sono utilizzate intensivamente per produrre cibo in modo da ridurre al minimo la necessità di espandere l'uso del suolo agricolo a scapito delle risorse naturali.

L'idea alla base del *land sparing* è che l'intensificazione dell'agricoltura in alcune aree possa liberare altre terre da dedicare esclusivamente alla protezione della biodiversità.

LAND SHARING
CONDIVISIONE
DEL TERRITORIO



Aree agricole "amiche della natura" diffuse su tutto il territori

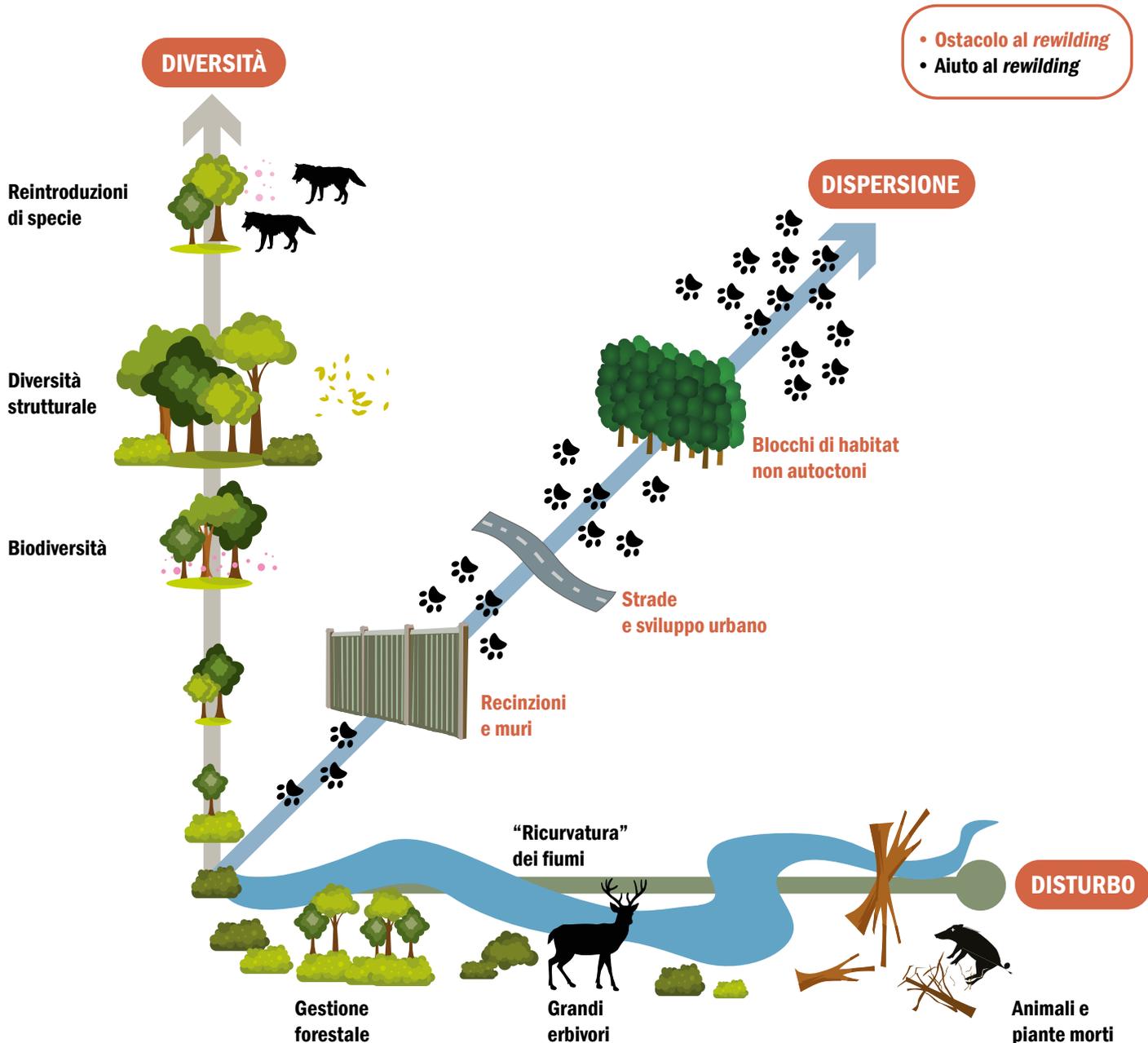
LAND SPARING
RISPARMIO
DEL TERRITORIO



Alcuni habitat "naturali" e alcune aree agricole utilizzate intensivamente



LE TRE DIMENSIONI DEL REWILDING



RIPRISTINARE GLI ECOSISTEMI ATTRAVERSO IL REWILDING

Il ripristino della natura è inteso dalla NRL come un **processo attivo o passivo di recupero degli ecosistemi**, finalizzato a migliorarne la struttura e le funzioni, con l’obiettivo di conservare o rafforzare la biodiversità e la resilienza degli ecosistemi. Tra le misure passive, è possibile anche includere il **rewilding**, una strategia che punta a **ripristinare ecosistemi complessi e autosostenibili**, riducendo progressivamente gli interventi umani. Più nello specifico, il **rewilding** mira a ripristinare la complessità trofica (rete

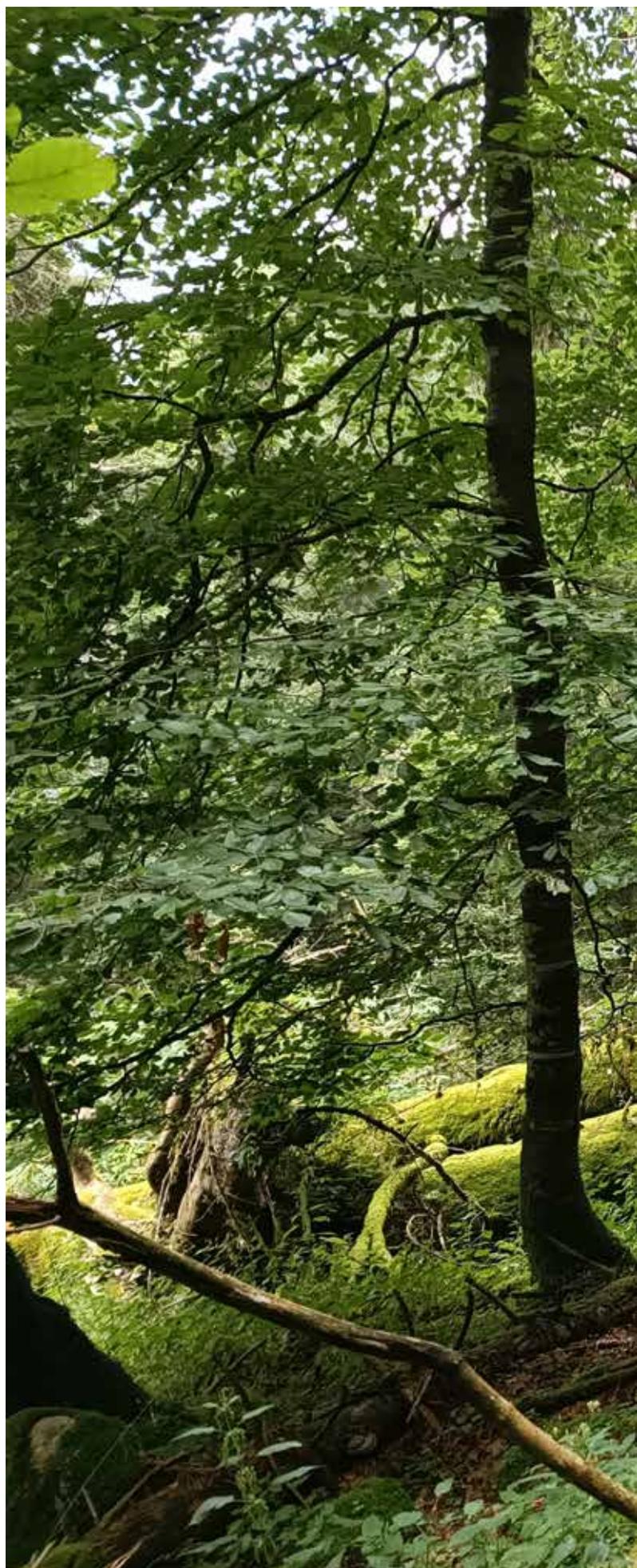
alimentare) degli ecosistemi, la dispersione delle specie, i regimi di disturbo naturali e le loro interazioni, al fine di mantenere la biodiversità e garantire la resilienza degli ecosistemi di fronte ai cambiamenti globali in atto.

- **La complessità delle reti alimentari** Le specie che occupano i livelli trofici superiori (**grandi erbivori, carnivori**) sono particolarmente connesse e funzionalmente cruciali per gli ecosistemi, poiché possono influenzare notevolmente la diversità e l’abbondanza di altri gruppi tassonomici. Specialmente nell’ultimo secolo, gli esseri umani hanno

contribuito a causare cambiamenti nella composizione delle specie e nelle loro interazioni attraverso attività come la caccia, la raccolta e la piantagione di specie vegetali. Il *rewilding* cerca di aumentare la complessità trofica attraverso **azioni che siano mirate per ciascun ecosistema** e che spaziano dalla creazione di aree di protezione totale, come le zone di divieto di caccia, alla reintroduzione di grandi mammiferi.

- **La dispersione delle specie** Per quanto riguarda la dispersione delle specie, le popolazioni all'interno di un ecosistema dipendono dalla possibilità di spostarsi e diffondersi tra gli habitat per evitare un eccessivo sfruttamento delle risorse disponibili, un'eccessiva competizione intraspecifica e/o una perdita di diversità genetica. Il **degrado degli habitat** e le **barriere antropiche** (strade, insediamenti, ecc.) riducono la connettività tra gli habitat e quindi la capacità di dispersione delle specie. Il *rewilding* mira a **migliorare la connettività** sia tra gli ecosistemi che al loro interno.
- **I disturbi naturali** Infine, per quanto riguarda i disturbi naturali, nei paesaggi dominati dall'uomo, essi sono spesso soppressi o alterati nella loro intensità e frequenza (e.g. mitigazione dell'infestazione da bostrico o la soppressione del fuoco), **sostituiti da disturbi prevedibili e costanti** come, per esempio, il prelievo del legname. Il *rewilding* punta a liberare gli ecosistemi da disturbi antropici continui e controllati, per **favorire la variabilità naturale e la casualità** insita nei disturbi naturali.

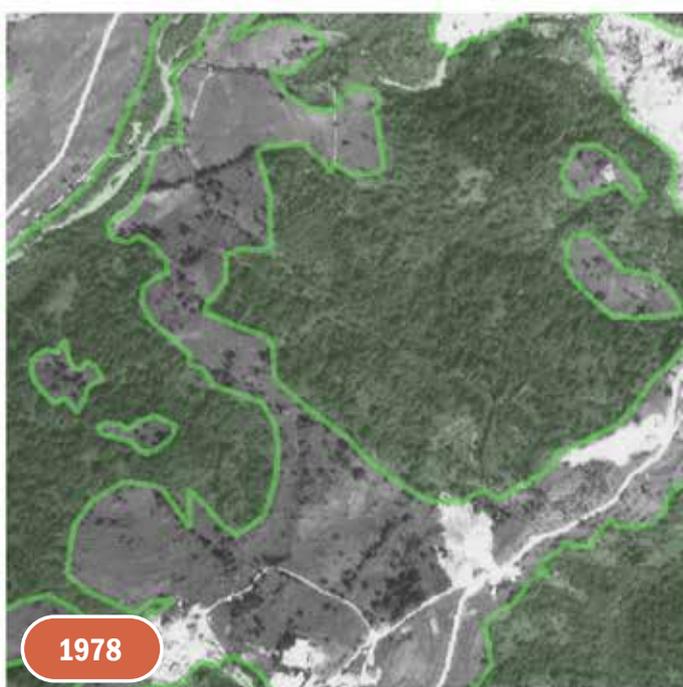
Sebbene il *rewilding* possa essere considerato complementare al ripristino attivo degli ecosistemi, **mancano ancora solide evidenze scientifiche sul suo potenziale contributo alla mitigazione del cambiamento climatico** attraverso la rimozione della CO₂ atmosferica, così come sull'impatto sul mantenimento della biodiversità e dei servizi ecosistemici a scala europea. Questo ha impedito di includere il *rewilding* come parte integrante della strategia europea di mitigazione del cambiamento climatico.



L'ESPANSIONE NATURALE DEL BOSCO

Per millenni, l'umanità ha modellato i paesaggi europei, in particolare tramite l'agricoltura, il pascolo e la gestione dei boschi. Oggi, però, ampie aree agricole vengono abbandonate, soprattutto nelle regioni più remote, favorendo in questo modo l'espansione naturale delle foreste. Parimenti stiamo assistendo all'**innalzamento del limite superiore del bosco** come **effetto combinato dell'abbandono dei pascoli in quota**

e del riscaldamento globale. Infatti, nel periodo 1990-2020, l'area forestale nell'UE è aumentata di quasi 14 milioni di ettari (+10%) e si prevede che tra il 2000 e il 2030 verranno abbandonati ulteriori 10-29 milioni di ettari di terreni agricoli. Se guardiamo anche al Friuli Venezia Giulia, **negli ultimi 50-60 anni, la superficie forestale è praticamente raddoppiata**, raggiungendo quasi il 40% della superficie regionale. Questo fenomeno non è il risultato di rimboschimenti artificiali, bensì di una lenta e costante espansione del bosco.

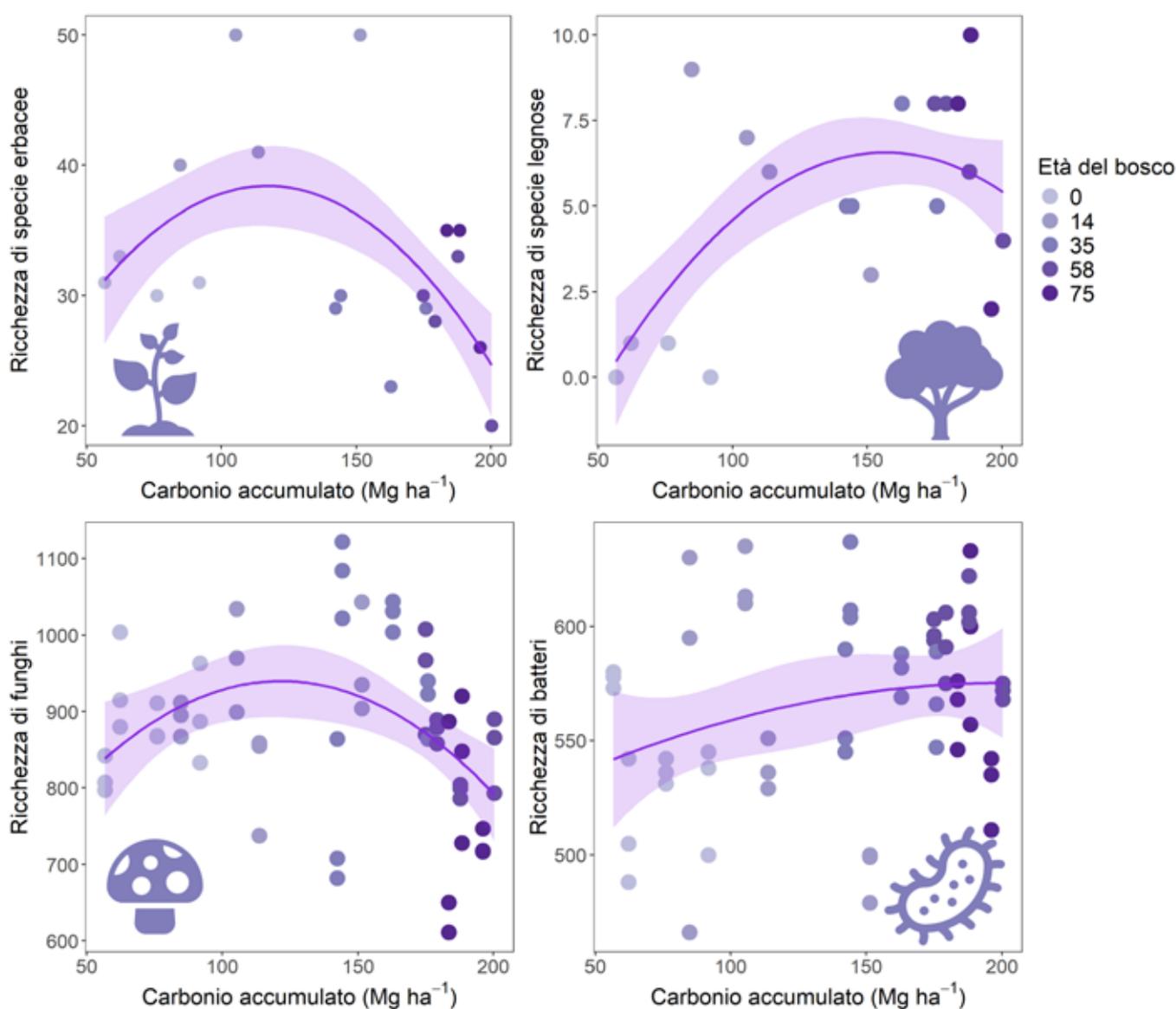


Esempio di ricolonizzazione di prati abbandonati da parte della vegetazione forestale nel comune di Taipana, Udine. (Elaborazione: Luca Cadez).

ANALIZZARE I PRO E I CONTRO DEL REWILDING

La perdita dei paesaggi agricoli tradizionali e le sue conseguenze sulla biodiversità e sugli altri servizi ecosistemici non sono sempre positivi ed è per questo che numerosi progetti nazionali (per esempio, il Centro Nazionale per la Biodiversità (NBFC) finanziato dal PNRR e il progetto PRIN “Rewildfire”) e internazionali (per esempio, il progetto *Horizon EU* “Wildcard”) stanno investigando non solo **gli impatti della**

riforestazione naturale sulle dinamiche degli stock di carbonio nelle diverse componenti dell’ecosistema (piante, legno morto, lettiera e suolo) e sulla biodiversità vegetale e dei microorganismi, ma stanno anche verificando il **livello di accettabilità** di questi processi di **rewilding da parte delle popolazioni locali** e i possibili *trade-off* di tipo economico. A tale riguardo, i primi risultati ottenuti hanno evidenziato come le traiettorie della biodiversità vegetale e microbica del suolo (funghi e batteri) e quelle del carbonio non sono sempre coincidenti o sempre positive.



La linea viola nei quattro grafici riportati rappresenta l’andamento della ricchezza (numero di specie) di piante erbacee, piante legnose, funghi e batteri all’aumentare del carbonio accumulato in popolamenti forestali di diversa età, originati dall’abbandono di terreni agricoli. Si osserva che il numero di specie, in particolare di piante e funghi, aumenta con l’incremento del carbonio accumulato (e dell’età del popolamento) fino a un certo punto, per poi diminuire. Per quanto riguarda i batteri, invece, si nota una crescita quasi lineare in relazione al carbonio accumulato. Questo suggerisce che non sempre gli ecosistemi con maggiore accumulo di carbonio sono anche i più favorevoli alla tutela della biodiversità, e che questa relazione dipende dagli organismi considerati (elaborazione: Lorenzo Orzan).

LA “PROFORESTAZIONE” E LO STUDIO IN FVG

Parimenti, per quanto riguarda la pianificazione forestale, la proforestazione, cioè la **sospensione della gestione forestale per permettere lo sviluppo spontaneo dell’ecosistema**, è un altro approccio di rewilding a basso costo **che può incrementare il sequestro del carbonio atmosferico**, con potenziali benefici a lungo termine per la biodiversità attraverso un aumento del legno morto in piedi e a terra e la creazione di micro-habitat favorevoli a numerose specie. Anche in questo caso, i cambiamenti indotti dall’assenza di gestione forestale nonché le modifiche nella **resistenza e resilienza di questi ecosistemi al**

cambiamento climatico sono oggetto di studio nell’ambito del **progetto Wildcard** e dell’appena istituito **registro dei boschi vetusti** finanziato dal Ministero e realizzato dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia. In questo caso, l’applicazione della proforestazione su ampia scala deve anche tener conto degli **aspetti produttivi**, e quindi economici, connessi alle foreste e degli **altri servizi** che questi ecosistemi erogano alla società (regolazione delle acque, difesa del suolo, servizi turistico-ricreativi).

È pertanto necessario un confronto tra scienziati, pianificatori e portatori di interesse al fine di trovare un punto di equilibrio tra le diverse esigenze e posizioni.

**Lorenzo Orzan, Speranza C. Panico,
Natalie Piazza, Guido Incerti,
Antonio Tomao, Giorgio Alberti**
Università degli Studi di Udine



Foto: Luca Cadez

Esempio di accumulo di legno morto nel caso di boschi non gestiti (proforestazione) come serbatoio di carbonio e di biodiversità (funghi, insetti e micro-organismi). Pian delle Stele (Polcenigo – PN).



Questo contributo è stato realizzato con il supporto del Centro Nazionale per la Biodiversità (National Biodiversity Future Centre - NBFC – Missione 4 Componente 2, Investimento 1.4 – D.D. 1034 17/06/2022, CN00000033), del progetto Wildcard finanziato dall’European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency (CINEA) dell’Unione Europea con il contratto numero 101081177 e dal progetto “Rewilding policies for carbon sequestration under increasing fire risk (REWILD-FIRE)” (2022R7F259) finanziato dalla Missione 4 “Istruzione e Ricerca” - Componente C2, Investimento 1.1 “Fondo per il Programma Nazionale di Ricerca e Progetti di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN)”.

CONSERVARE LA BIODIVERSITÀ DEL FUTURO

Piante e animali cercano nuovi ambienti per adattarsi ai cambiamenti climatici causati dall'uomo, ma i loro spostamenti incontrano limiti geografici.

Le specie più flessibili e invasive tendono a prevalere, mentre quelle specializzate rischiano di scomparire.

Migliorando la conservazione di habitat e specie si favoriscono i processi naturali di adattamento, ma per affrontare la crisi della biodiversità servono interventi attivi, strategie adattative e forme di conservazione dinamiche che seguano i cambiamenti degli habitat.

Boschi di Muzzana (UD), boschi umidi che risentono gravemente delle prolungate siccità.

Foto: Pierpaolo Zanchetta

Il giorno 16 giugno 2023 e il giorno 8 novembre 2024 rispettivamente a Socchieve e a Cimolais, si sono tenuti due appuntamenti della Dolomiti Mountain School che hanno affrontato il tema dell'effetto del riscaldamento globale sulla vegetazione e sulla fauna. Sono stati due momenti utili per approfondire le strategie di adattamento che vengono perseguite dalle specie vegetali e animali spinte a cercare in altri luoghi la stabilità climatica che noi umani abbiamo invece modificato drasticamente. Si sale di quota, si cercano i versanti più freschi si penetra nelle parti più interne delle Alpi ma con il rischio che prima o poi tale fuga si arresti di fronte ai limiti altitudinali e morfologici dello stesso sistema montuoso alpino.

Intanto per fortuna altre specie risalgono dalle pianure e delle coste, ma attenzione, perché l'entropia del sistema porta inevitabilmente a **favorire le specie più generaliste** e con maggiore capacità di adattamento rispetto a quelle che si sono coevolute in sistemi specifici non riproducibili a diversa quota o latitudine. Prevalgono così le specie più ruderali e meno esigenti, capaci di adattarsi a condizioni diverse, o le specie alloctone e invasive che ritrovano anche in contesti sempre nuovi gli spazi ideali per la loro diffusione.

GESTIRE LA BIODIVERSITÀ IN UN CLIMA CHE CAMBIA

Come funzionari regionali, responsabili della conservazione della biodiversità, non abbiamo il ruolo che hanno ricercatori e studiosi il cui impegno è quello di interpretare le dinamiche ecologiche in evoluzione, ma abbiamo il compito di gestire operativamente, e sulla base di quadri normativi ben definiti, il sistema delle aree naturali protette, attraverso **una gestione attiva e adattativa** per mantenere, ripristinare, migliorare ambienti naturali ad alta biodiversità.

È ormai accettato da tutto il mondo scientifico e tecnico-gestionale che la protezione passiva non produce effetti sufficienti a una conservazione di lungo periodo e che l'esigenza di **conservare e possibilmente incrementare la biodiversità** è una sfida ben più ardua, ma necessaria, rispetto alla generica conservazione della Natura o della naturalità. Tuttavia su questo obiettivo generalmente condivisibile si insinua il dubbio relativamente a quale assetto naturale e a quale livello di biodiversità siamo tenuti a conservare e ripristinare **nel contesto di una evoluzione climatica che modifica uno dei fattori cardine di ogni equilibrio ecosistemico**. Pensiamo che la direttiva 92/43/CEE Habitat risale al 1992 e la direttiva 79/142/CEE Uccelli addirittura al 1979 senza che abbiano subito sostanziali aggiornamenti. Direttive comunitarie con una grande capacità di inquadrare i temi e le possibili soluzioni con grande anticipo rispetto alle legislazioni di altri paesi del mondo ma oggi decisamente carenti rispetto all'**accelerazione della crisi della biodiversità** dovuta da una parte dalla globalizzazione delle merci, compresi organismi viventi spostati consapevolmente o accidentalmente, dall'altra dal riscaldamento globale che modificando e rendendo instabile il

clima agisce come un macrotrend su una delle principali forzanti che determinano l'assetto di un territorio.

LA CRISI DEGLI HABITAT

Velocità di cambiamento e instabilità climatica portano a una **crisi dei diversi habitat** in particolare di **quelli connessi alla presenza di acqua nelle falde superficiali** il cui livello si è progressivamente abbassato per gli emungimenti generalizzati e ora subisce una ulteriore crisi dovuta alla mancata ricarica da monte a causa della scarsità del manto nevoso invernale.

L'**innalzamento del mare e l'ingressione del cuneo salino**, a sua volta condizionato dalla minore pressione delle falde artesiane, porta alla **scomparsa degli ambienti di transizione dulciacquicoli costieri** che, nel mosaico di condizioni di salinità delle lagune e fasce costiere, costituiscono un fattore di esaltazione della diversità di habitat e quindi di presenze floristiche e faunistiche.

L'ampio sistema di drenaggio e bonifica idraulica della **bassa pianura**, determina effetti anche sulle **porzioni di boschi di origine altomedievale** che ora subiscono un ulteriore fattore di pressione dalla riduzione della presenza idrica al suolo, da ondate di calore che alterano l'apparato fogliare, da tempeste estreme che si abbattono su organismi già debilitati. Fitopatogeni trovano dunque la strada aperta per debilitare ulteriormente le singole piante frammentando l'unitarietà del bosco. La consequenzialità tra la tempesta Vaia del 2018 e lo svilupparsi di un esteso proliferare del bostrico tipografo, probabilmente ulteriormente favorito da ripetute estati siccitose, è solo il caso più evidente di come il riscaldamento globale agisce determinando diverse forme di catene di pressione che amplificano l'effetto critico sulle componenti biologiche.

ACCOMPAGNARE I PROCESSI DI ADATTAMENTO NATURALI

Come gli ambienti naturali reagiscono attraverso processi di adattamento e come possiamo aiutare questi processi con pratiche di accompagnamento verso nuovi equilibri?

Si sa che entro certi limiti le pressioni selettive dell'ambiente tendono a far emergere individui più resistenti o adattabili alle nuove condizioni

BOSCHI UMIDI: IL DECLINO DEGLI ONTANI NERI

Casi di impatto meno noti ma in fase di veloce espansione riguardano anche i boschi umidi, ritenuti un tempo immuni dalla siccità o dalle alte temperature. Nell'ambito della realizzazione di un ripristino ambientale nelle Risorgive del Vinchiaruzzo (Cordenons) è stata osservata la diffusa presenza di ontani neri in gravi condizioni fitosanitarie, dove le iniziali clorosi e rarefazioni della chioma portavano rapidamente al **disseccamento degli individui**. Le indagini effettuate dai ricercatori dell'Università di Padova su campioni di rizosfera raccolti alla base delle piante hanno evidenziato la presenza di **due funghi patogeni** (*Phytophthora plurivora* e *P. pseudocryptogea*) responsabili del declino dell'ontano nero in Europa.

Il primo rappresenta un patogeno polifago e invasivo diffuso in tutto il continente, segnalato come agente di gravi marciumi radicali su moltissime specie di interesse forestale e agrario, il secondo è stato descritto nel 2015 in Australia e si è diffuso in numerose aree del pianeta tra cui l'Italia.

Anche l'ontano nero, albero autoctono e caratteristico degli ambienti palustri nonché specie costitutiva di boschi riconosciuti come habitat prioritario, **risente dei cambiamenti del clima**. Ricerche francesi sulla diffusione di queste malattie hanno rilevato come un'influenza importante possa derivare dalle maggiori temperature invernali ed estive dell'anno precedente; la calda e siccitosa estate del 2022 potrebbe essere stata la causa dell'incremento della moria rilevata nell'inverno 2023.

Giovani piante colpite dal patogeno (a sinistra) e particolare del cancro basale (a destra).



Foto: Davide Pasut



Foto: Davide Pasut

che potrebbero venire favoriti da pratiche gestionali di supporto allo sviluppo di popolazioni in grado di adattarsi. Ma **adattarsi a cosa?** Le previsioni sull'evoluzione del clima ci parlano di una temperatura media in progressiva crescita e di una variazione del regime pluviometrico in costante mutamento che non prevede, o è difficile da prevedere, un raggiungimento di un nuovo equilibrio, se le emissioni di gas climalteranti continueranno ad aumentare.

Sistemi complessi, come l'ecosfera, possono innescare processi di feedback che spostano l'equilibrio, in questo caso climatico, da un livello a un altro, mantenendo una stabilità complessiva del sistema (danni all'assetto della antroposfera a parte), ma la possibilità che tali feedback si inneschino è al momento sconosciuta e non scontata, non essendo l'ecosfera retta da un disegno finalistico. Ma se restringiamo le nostre previsioni a un periodo di alcuni decenni è evidente che dovremmo già ora assecondare una **espansione verso nord della regione biogeografica mediterranea** a fronte di una **migrazione verso il contesto alpino della regione biogeografica continentale** con perdita, per mancanza di alternative spaziali, di vaste parti di quella alpina. Quindi una strategia di adattamento non dovrebbe perseguire la conservazione dell'attuale assetto biologico ma la sua progressiva sostituzione da parte di popolazioni più adatte al cambiamento dinamico. Ma questa forma di **conservazione dinamica** non è quella prevista dalle vigenti direttive comunitarie risalenti al secolo scorso.

SERVONO RIPRISTINI ADATTATIVI DINAMICI

Più recentemente la Strategia europea per la biodiversità per il 2030 (COM(2020) 380 final del 20/5/2020), la Strategia nazionale per la biodiversità al 2030 (Decreto Ministeriale 252 del 3/8/2023) e la **Restoration law (Regulation (EU) 2024/1991)** aggiornano le primigenie direttive introducendo l'obiettivo del taumaturgico valore del numero 3 (30% di aree protette al 2030, ripristino del 30% di ecosistemi degradati al 2030) **ma non risolvono il problema della migrazione ecosistemica**, parlando genericamente di ripristino di ecosistemi (e il riferimento è sempre all'allegato 1 della direttiva Habitat) ma non di come **le diverse condizioni climatiche rendono**

necessario un adattamento anche del modo in cui si effettuano i ripristini che potremmo definire ripristini adattativi dinamici. La previsione sembra invece essere quella di aumentare la superficie di aree protette e in queste, prioritariamente ma non esclusivamente, effettuare ripristini di habitat degradati, perseguendo l'idea, e la speranza, che ecosistemi ad alta biodiversità estesi, continui e interconnessi aumentino la resilienza degli stessi (termine abusato a sproposito ma qui invece appropriato) in modo da resistere al riscaldamento globale o essere più efficaci in un processo di adattamento spontaneo.

GLI INTERVENTI E LE STRATEGIE ATTUALI

Un esempio tipico di tale problematica attiene agli investimenti e all'organizzazione per **contenere e se possibile eradicare le specie alloctone invasive (IAS)** che limitano un ulteriore elemento di pressione sugli ecosistemi naturali ma probabilmente non riescono ad agire sui fattori determinanti che generano la diffusione delle IAS e ne favoriscono l'espansione. D'altra parte va segnalato che lo scarso uso nelle pratiche amministrative e negli studi tecnici del modello logico DPSIR, che consente di inquadrare un determinato tema ambientale rappresentando le relazioni tra le sue diverse componenti: Determinanti-Pressioni-Stato dell'ambiente-Impatti-Risposte) porta a nascondere molte volte i fattori determinanti che generano un problema. Si pone molta attenzione agli elementi del problema e meno al processo che genera tale problema.

Quindi la strategia che perseguiamo, per ora, è quella di **garantire buone condizioni iniziali portando gli habitat e le specie a uno stato di conservazione migliore possibile**, per lasciare che poi l'adattamento naturale alle nuove condizioni inneschi possibili evoluzioni adattative.

Più massa critica e soprattutto più interconnessioni territoriali sono sicuramente fattori fondamentali per una salvaguardia della biodiversità europea che tuttavia non sarà esattamente la biodiversità che conosciamo oggi.

Pierpaolo Zanchetta
Servizio biodiversità
della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia
Davide Pasut
Dottore forestale
Biosfera SRL STP

*Un ringraziamento a tutti coloro
che hanno contribuito alla realizzazione
dei “Segnali dal Clima in FVG”,
sia con i loro testi, dati e immagini,
sia con le loro riflessioni, osservazioni
e disponibilità a condividere
idee e conoscenze.*

**Il pdf integrale e i pdf tematici di Segnali dal clima in FVG 2025,
insieme a quelli delle precedenti edizioni, sono disponibili su:**

<https://www.arpa.fvg.it/temi/temi/meteo-e-clima/sezioni-principali/cambiamenti-climatici/segnali-dal-clima-in-fvg/>

