

FORESTE E CARBONIO

GESTIONE FORESTALE PER LA MITIGAZIONE CLIMATICA
E CREDITI DI CARBONIO



LA CRISI CLIMATICA *2

CAUSE E IMPATTI

Tutti sperimentiamo il “tempo meteorologico”, cioè le variazioni orarie o giornaliere delle condizioni atmosferiche. Tutti sperimentiamo anche il clima, cioè la media delle condizioni meteorologiche di un luogo, calcolata su diversi decenni (almeno 30 anni secondo l'Organizzazione Meteorologica Mondiale). Il cambiamento climatico si verifica quando queste condizioni medie iniziano a cambiare.

Il clima della Terra è sempre stato in costante cambiamento, ma ciò che importa è la **velocità** con cui il cambiamento avviene. Negli ultimi 150 anni la temperatura media globale è aumentata di 1,2 gradi, **1,7 sulle terre emerse** e oltre 2,5 nelle zone polari e le montagne - una velocità 20 volte superiore a quella associata alla fine dell'ultima era glaciale. Non è solo l'atmosfera a riscaldarsi, ma anche gli oceani e le calotte polari. Il riscaldamento intensifica e prolunga gli **eventi meteorologici estremi** (ondate di calore e siccità, incendi boschivi, tempeste e alluvioni) e determina altri effetti dal forte impatto negativo

sulla società: l'innalzamento del livello dei mari, la riduzione della disponibilità idrica e della produttività dei raccolti, il degrado degli habitat per molte specie animali e vegetali, l'aumento dell'instabilità idrogeologica, l'aggravarsi dei rischi per la salute, la sicurezza alimentare ed energetica per le comunità e le nazioni più vulnerabili. Per questi motivi è opportuno parlare di **“crisi climatica”**.

La causa della crisi è inequivocabile: l'immissione in atmosfera da parte dell'umanità di grandi quantità di **gas capaci di aumentare l'effetto serra**. L'anidride carbonica, il cui potere riscaldante è noto dal 1856, è aumentata del 50% rispetto all'epoca preindustriale a causa della **combustione di petrolio, carbone e gas** (per il 90% delle emissioni) e della deforestazione tropicale (10%). Il metano, un gas serra 30 volte più potente della CO₂, è aumentato del 160%. **Nessun'altra causa naturale** (attività solare, movimenti orbitali della Terra, eruzioni vulcaniche) può spiegare il riscaldamento misurato negli ultimi 150 anni.

L'esclusiva responsabilità umana nella crisi climatica in corso è in realtà **una buona notizia**: significa che possiamo risolvere e persino invertire il problema!

Secondo l'IPCC (Comitato Intergovernativo per i Cambiamenti Climatici presso l'ONU), per evitare che il riscaldamento superi la soglia di pericolo di +1,5 gradi, è necessario **azzerare le emissioni di gas serra** entro la metà di questo secolo,

un obiettivo che è già alla nostra portata dal punto di vista tecnologico, sociale ed economico. Quando cesseranno le emissioni, la temperatura globale cesserà di aumentare entro pochi anni.

ANOMALIA DI TEMPERATURA E EMISSIONI DI GAS SERRA

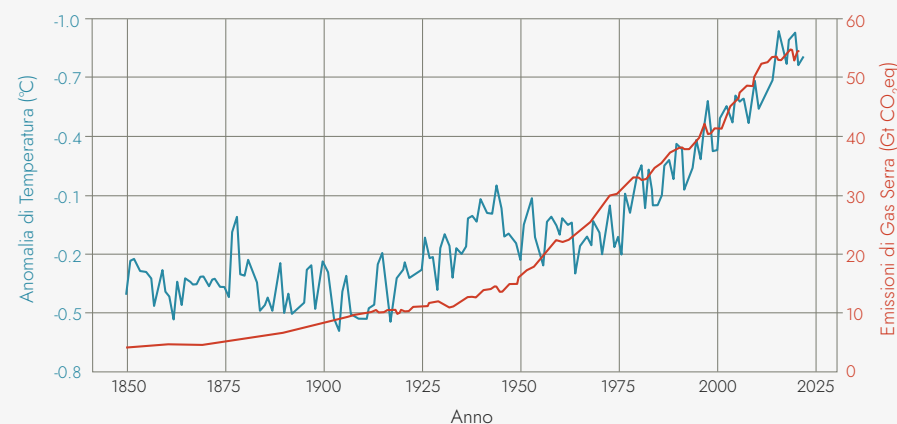


GRAFICO 1 - Temperatura e emissioni di gas serra dal 1850 a oggi. Sono rappresentate in blu la differenza tra la temperatura media globale di ogni anno rispetto alla temperatura media del periodo 1961-1990, convenzionalmente fissata come “zero” di riferimento, e in rosso le emissioni annuali di gas serra a scala globale espresse in miliardi di tonnellate (Gt) di CO₂ equivalente, una misura che esprime l'impatto sul riscaldamento globale di una certa quantità di gas serra (CO₂, metano, protossido di azoto, clorofluorocarburi e altri gas) rispetto alla stessa quantità di anidride carbonica. Le fonti di dati sono, per la temperatura, il dataset [HadCRUT5](#) del Met Office Hadley Centre e della Climatic Research Unit alla University of East Anglia, e per le emissioni il [dataset di emissioni nazionali](#) compilato da MATTHEW JONES della University of East Anglia, a cui sono stati applicati i coefficienti di conversione in CO₂ equivalente su 100 anni indicati dal report IPCC AR6.

GESTIRE LE FORESTE PER MITIGAZIONE E ADATTAMENTO*2

Esistono due approcci per affrontare la crisi climatica: la mitigazione, con l'obiettivo di limitare la quantità di gas serra rilasciati nell'atmosfera o aumentare il loro assorbimento da parte degli ecosistemi terrestri e marini, e l'adattamento, che comprende le azioni per limitare gli impatti negativi della crisi del clima.

Le foreste giocano un ruolo chiave: da un lato **assorbono il 30% delle emissioni di CO₂ fossile**, un contributo che deve essere mantenuto e potenziato con azioni di conservazione, ripristino, e miglioramento della loro gestione. Dall'altro contribuiscono a limitare gli impatti delle inondazioni, del calore eccessivo e delle siccità, regolano il ciclo idrologico, proteggono il suolo e i bacini idrografici, e possono ridurre la vulnerabilità climatica delle comunità.

STRATEGIE DI MITIGAZIONE BASATE SULLA NATURA

Le strategie di mitigazione della crisi climatica basate sulla natura (NCS) intendono mantenere e potenziare la capacità degli ecosistemi naturali di assorbire l'anidride carbonica, il principale gas serra antropogenico, e aumentare la resilienza delle comunità ai cambiamenti climatici.

Queste strategie sono spesso meno costose rispetto alle soluzioni basate sulle tecnologie industriali, offrono benefici

multipli in termini di benessere umano e possono essere implementate in vari contesti geografici e socio-economici. La Commissione Europea sottolinea che le NCS possono trasformare le sfide ambientali e sociali in **opportunità di innovazione**, trasformando il capitale naturale in una fonte di crescita verde, **occupazione**, sviluppo sostenibile e **coinvolgimento della comunità**. Per contenere l'aumento della temperatura globale entro 1,5 gradi e raggiungere la neutralità carbonica entro il 2050 (emissioni nette zero) il contributo della NCS è necessario, **a condizione di**

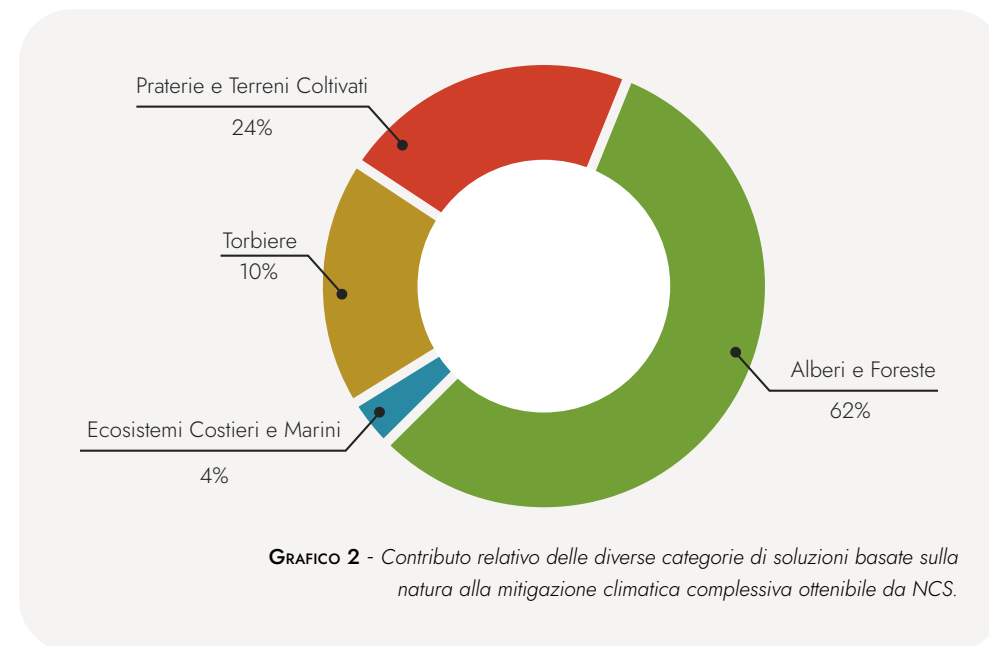


GRAFICO 2 - Contributo relativo delle diverse categorie di soluzioni basate sulla natura alla mitigazione climatica complessiva ottenibile da NCS.

ridurre le emissioni alla fonte - tramite una rapida decarbonizzazione di tutti i settori produttivi - prima di chiedere agli ecosistemi di assorbire quelle residue. Entro il 2030, le NCS potranno assorbire da 5 a 12 miliardi di tonnellate di CO₂ equivalente (Gt CO₂eq) all'anno e 10-18 entro il 2050, un contributo pari al **30% della mitigazione necessaria** per contenere il riscaldamento entro +1,5 gradi⁽¹⁾. Si stima che il 62% di queste soluzioni siano relative ad alberi e foreste,

il 24% in praterie e terreni coltivati, il 10% nelle torbiere e il 4% negli ecosistemi costieri e marini. La realizzazione di questo potenziale richiede finanziamenti adeguati, sia pubblici che privati, incentivi per riconoscere il valore della natura nelle decisioni economiche e politiche, regole certe per garantire l'equità sociale e economica delle NCS, e una più forte integrazione tra le agende sulla biodiversità, i cambiamenti climatici e lo sviluppo economico.

⁽¹⁾ MILES et al. (2021) Nature-based solutions for climate change mitigation. IUCN. <https://bit.ly/3qMeRVa>



LE SOLUZIONI FORESTALI: PROTEGGERE, RIPRISTINARE, GESTIRE

L'uso del suolo e la gestione della vegetazione influiscono notevolmente sulla capacità degli ecosistemi terrestri di sequestrare e immagazzinare carbonio.

Tra le principali soluzioni, quelle basate sulle foreste, in particolare la prevenzione

della deforestazione, l'afforestazione e riforestazione e il miglioramento della gestione forestale hanno il potenziale di contribuire fino al 50% dell'assorbimento di carbonio possibile attraverso le NCS a livello globale⁽²⁾. La maggior parte delle soluzioni di mitigazione forestale sono disponibili tecnologicamente e **pronte per essere attuate**.

● **Ridurre la deforestazione e il degrado forestale** conservando i depositi di carbonio esistenti nella vegetazione e nel suolo. La riduzione della deforestazione offre numerosi co-benefici, preservando la biodiversità e i servizi ecosistemici. Proteggere le foreste comporta la lotta alle cause della deforestazione (come l'agricoltura commerciale e di sussistenza, l'estrazione mineraria, l'espansione urbana) e del degrado forestale (come la raccolta eccessiva di legno, il sovrapascolo, gli attacchi di insetti e gli incendi estremi), nonché l'istituzione di aree protette ben progettate, gestite e finanziate, un incremento dell'applicazione della legge e della pianificazione forestale nonché della gestione forestale comunitaria e della certificazione forestale. Il potenziale di mitigazione è 4,5 Gt CO₂eq all'anno entro il 2050, di cui **3,4 Gt CO₂eq all'anno** disponibili a un costo inferiore di 100 dollari per tonnellata. La riduzione della deforestazione rappresenta una parte significativa degli impegni nazionali per l'Accordo di Parigi per mantenere il riscaldamento globale al di sotto di +1,5 gradi. Tuttavia, è difficile quantificare con precisione le emissioni evitate dalle azioni di contrasto alla deforestazione, al punto da sollevare su queste attività sospetti di *greenwashing*.

● **L'afforestazione e la riforestazione** consentono l'incremento della superficie coperta da foreste, rispettivamente su terreni precedentemente non boscati oppure già coperti da foreste in passato. A seconda della localizzazione e scelta delle specie utilizzate, possono determinare vari effetti collaterali positivi ma anche negativi. Nel migliore dei casi, il ripristino delle superfici forestali aumenta la resilienza climatica e sostiene la biodiversità, fornendo vari servizi ecosistemici. Se non ben eseguita, l'afforestazione può determinare perdita di biodiversità, ridurre la disponibilità idrica e l'albedo superficiale, minacciare la sicurezza alimentare ed esacerbare le disuguaglianze economiche e sociali. Recentemente, l'attenzione a volte esclusiva dell'opinione pubblica sull'afforestazione ha portato a una forte polarizzazione del dibattito. Il potenziale di mitigazione realizzabile a un costo inferiore a 100 dollari a tonnellata è di **1,6 Gt CO₂eq all'anno**, e richiede una superficie disponibile stimata di circa 200 milioni di ettari.

● **Il miglioramento della gestione forestale (IFM)** può aumentare la capacità di assorbimento di carbonio da parte delle foreste, prolungare la durata dello stoccaggio di carbonio nell'ecosistema forestale, nel suolo e dei prodotti legnosi, e contrastare gli impatti degli eventi estremi sul carbonio forestale. Offre inoltre benefici per l'adattamento ai cambiamenti climatici, la conservazione della biodiversità, la regio-

⁽²⁾ NABUURS et al. (2022). *Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU)*. In IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://bit.ly/45lfjsM>

lazione microclimatica, la protezione del suolo e la regolazione delle acque. Rispetto alle azioni precedenti, l'IFM ha il vantaggio di poter essere implementato localmente, in territori facilmente controllabili, e di poter coinvolgere le comunità locali attivando strategie di economia circolare e sviluppo territoriale legato alle foreste. Cambiare la gestione forestale richiede non solo un riconoscimento del valore economico del carbonio assorbito, ma anche conoscenze, azioni politiche e manodopera qualificata. Gli effetti di mitigazione complessivi possono essere valutati solo analizzando **l'intera filiera foresta legno**, ovvero i cambiamenti dello stoccaggio di carbonio negli alberi in piedi, nel suolo, nei prodotti legnosi e nella sostituzione di combustibili fossili o materiali clima-impattanti. A livello globale, il potenziale di mitigazione realizzabile a un costo inferiore a 100 dollari a tonnellata è stato stimato in **1,1 Gt CO₂eq all'anno** entro il 2050. Alcuni studi concludono che la riduzione dello stoccaggio di carbonio forestale causata dai prelievi legnosi superiori per decenni i vantaggi legati al carbonio stoccato nei prodotti legnosi e ai loro effetti di sostituzione, mentre altre ricerche sottolineano esempi opposti a livello locale. In Europa, una selvicoltura più attenta al clima potrebbe mitigare ulteriori 0,19 Gt CO₂eq all'anno entro il 2050.

IL CARBONIO NELLE FORESTE ITALIANE E LOMBARDE

Uno dei processi principali di un ecosistema forestale è il ciclo del carbonio: tale ciclo si può descrivere mediante i concetti di stock e sink.

I **pool** principali in una foresta sono cinque:

- ① **biomassa epigea** (fusti, rami e foglie);
- ② **biomassa ipogea** (radici);
- ③ **legno morto o necromassa**;
- ④ **lettiera**;
- ⑤ **carbonio organico nel suolo**.

Lo **stock** consiste nella quantità di carbonio contenuta nei diversi compartimenti della foresta (*pool*). Il **sink** è la variazione dello stock nel tempo e consiste nel bilancio netto dello scambio tra ecosistema forestale e atmosfera.

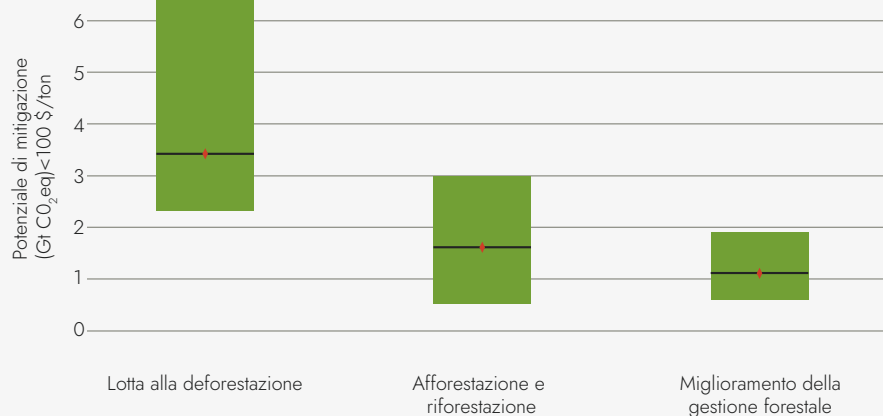
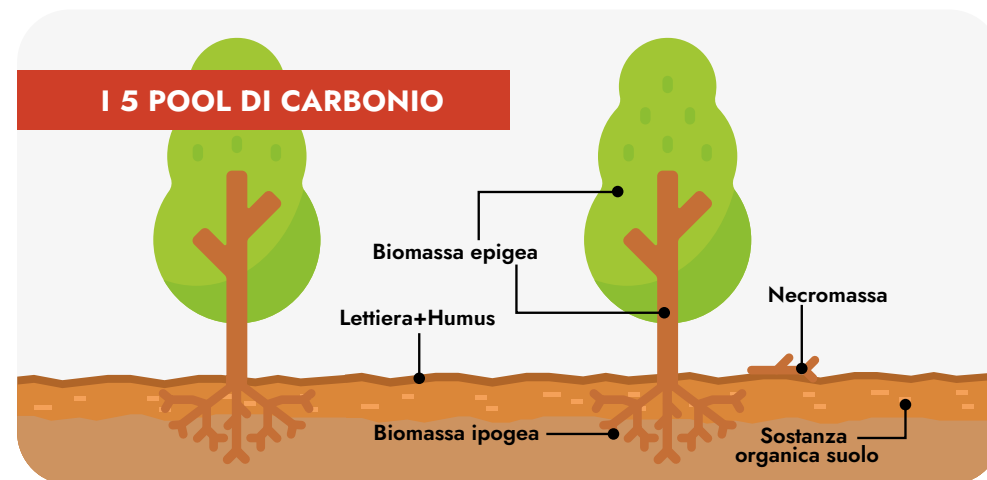


GRAFICO 3 - Potenziale di mitigazione realizzabile con NCS forestali a un costo inferiore a 100 \$ per tonnellata di CO₂eq (range e valore medio atteso) secondo IPCC^[2].



I *pool* contengono carbonio in diverse forme, più o meno stabili: la biomassa epigea e ipogea sono composte principalmente da legno e il carbonio in questo *pool* ha una vita media pari a

quella degli alberi stessi. La necromassa contenuta in legno morto e lettiera ha una vita media minore ed è soggetta a fenomeni di decomposizione. Infine i suoli contengono grandi quantità

di carbonio sotto forma di composti organici, in parte molto stabili nel tempo e capaci di creare quindi un serbatoio duraturo di carbonio.

Stando all'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio (INFC) del 2015, le foreste italiane occupano 11 milioni di ettari, corrispondenti al 36,7% del territorio nazionale. La Lombardia ha 692.000 ettari di superficie forestale, corrispondenti al 29% della superficie regionale. Le tipologie forestali che occupano maggiore superficie sono le peccete di abete rosso (87.900 ettari), seguite dai castagneti (82.000 ettari) e dalle faggete (66.600 ettari). In termini di carbonio, i boschi italiani contengono nella propria **biomassa epigea** un totale di **522,1 milioni di tonnellate di carbonio**, con una media di **57,5 tonnellate a ettaro**.

Le foreste lombarde contengono da sole 41,4 milioni di tonnellate di carbonio, con una media di 66,5 tonnellate a ettaro (dato superiore a quello nazionale). Le tipologie forestali che contengono più

carbonio in termini assoluti in Lombardia sono i boschi di abete rosso (8,9 milioni di tonnellate di C), seguite da castagno (6,8 milioni) e faggio (5,7). Rispetto allo *stock* a ettaro, **la tipologia forestale capace di stoccare più carbonio in Lombardia è l'abetina di abete bianco**, con una media regionale di 126,6 tonnellate di C per ettaro, seguita da peccete (101,9) e faggete (85,3).

Per stimare l'efficacia complessiva del *sink* è tuttavia necessario tenere conto dei disturbi antropici e naturali: prelievi, incendi, schianti da vento e mortalità per siccità e patogeni comportano la riduzione del *sink* degli ecosistemi forestali. Secondo l'Inventario Nazionale delle Emissioni di Gas Serra⁽³⁾ redatto ogni anno dall'Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca sull'Ambiente (ISPRA), nel 2021 le foreste italiane hanno assorbito **28,4 milioni di tonnellate di CO₂** con una media nazionale di 3,11 tonnellate a ettaro. Negli ultimi 10 anni l'assorbimento netto è variato da un minimo di 24,2 a un massimo di 40,4 Mt CO₂eq, soprattutto in funzione della severità degli incendi boschivi.

STRATEGIE SELVICOLTURALI PER LA MITIGAZIONE CLIMATICA

- ◆ **Estensione dei turni.** Allungando i cicli di taglio, le piante hanno più tempo per crescere e accumulare carbonio, aumentando così lo stock di carbonio nella foresta.
- ◆ **Riduzione del prelievo di biomassa.** Riducendo il volume legnoso prelevato nel taglio la biomassa forestale residua incrementa, continuando ad agire come serbatoio di carbonio.
- ◆ **Adozione di forme di governo a copertura continua.** Convertire cedui invecchiati o abbandonati in alto fusto può migliorare la capacità della foresta di immagazzinare carbonio, poiché diminuisce la frequenza del disturbo selvicolturale che può trasformare il suolo forestale in un emettitore di carbonio per un periodo di qualche anno dopo il taglio.
- ◆ **Aumento dell'uso dei prodotti legnosi e della conservazione del carbonio nei prodotti legnosi.** Sostituendo materiali ad alta intensità di energia fossile con prodotti legnosi, si riduce la domanda di energie fossili e si immagazzina carbonio in prodotti a lunga durata.
- ◆ **Uso di combustibili legnosi.** Sostituendo i combustibili fossili con quelli legnosi, in particolare utilizzando assortimento residuali o di scarto, si possono ridurre le emissioni di carbonio e utilizzando al contempo una risorsa rinnovabile.
- ◆ **Prevenzione delle emissioni da eventi estremi.** Interventi proattivi per prevenire incendi boschivi e danni da eventi meteorologici estremi possono ridurre significativamente le emissioni di carbonio.
- ◆ **Rimboschimento e afforestazione.** Attività di rimboschimento dopo disturbi come incendi o tempeste, afforestazione di terreni non boscati, implementazione di impianti da arboricoltura policiclici o azioni di agroforestazione possono aiutare a ripristinare o aumentare l'assorbimento di carbonio.
- ◆ **Gestione del carbonio nel suolo.** Adottare pratiche che aumentino il contenuto di carbonio nel suolo o riducano le sue emissioni può avere un impatto significativo sul bilancio del carbonio forestale.
- ◆ **Promozione dei boschi misti.** I boschi misti spesso mostrano una maggiore resilienza e capacità di stoccaggio del carbonio rispetto a quelli monospecifici, grazie agli effetti di complementarità ecologica.
- ◆ **Scelta di specie o provenienze climaticamente adattate.** Selezionando specie o provenienze meglio adattate al clima attuale e futuro, si può garantire che la foresta rimanga resiliente e continui ad assorbire carbonio in modo efficiente.

⁽³⁾ ROMANO et al. (2023). Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2021. National Inventory Report 2023. ISPRA. https://www.isprambiente.gov.it/files2023/pubblicazioni/rapporti/rapporto_383_2023.pdf

QUANTIFICARE IL CARBONIO FORESTALE ^{*1,2,3}



La quantificazione del carbonio forestale, sia in termini di stock che di flussi in entrata e uscita, è fondamentale per comprendere e monitorare l'impatto delle foreste sul bilancio globale del carbonio e sul cambiamento climatico.

A livello nazionale, la contabilizzazione accurata del carbonio forestale permette ai paesi di definire strategie di mitigazione efficaci e di adempiere agli impegni internazionali in materia di cambiamenti climatici. A livello locale, il monitoraggio

dei flussi di carbonio forestale può guidare la gestione sostenibile delle risorse forestali, promuovendo pratiche che massimizzano la capacità delle foreste di assorbire e immagazzinare il carbonio. Mentre la contabilità del carbonio (*accounting*) si riferisce al processo sistematico di quantificazione e registrazione delle quantità di carbonio immagazzinate e rilasciate, il resoconto (*reporting*) riguarda la comunicazione e la presentazione di queste informazioni alle autorità competenti, alle parti interessate o al pubblico, garantendo trasparenza e responsabilità.

STIMARE LO STOCK DI CARBONIO DELLA FORESTA

Il carbonio in foresta può essere suddiviso in 5 pool principali: 1) biomassa epigea; 2) biomassa ipogea; 3) necromassa; 4) lettiera e 5) suolo e può essere stimato attraverso metodi diretti o indiretti.

I metodi diretti si basano sul rilievo distruttivo di campioni dei diversi pool, perciò, per ragioni economiche, am-

bientali e logistiche, sono spesso applicati solo ai pool di lettiera e suolo. I metodi indiretti, invece, fanno riferimento all'impiego di equazioni allometriche. Le equazioni allometriche permettono di ricavare il volume del fusto di singoli alberi, o quello per unità di superficie, partendo dalle caratteristiche dimensionali degli alberi stessi (specie, diametro, altezza), misurate a partire da **rilievi in campo** e/o **dati derivati da satellite**. A

sua volta, il volume del fusto può essere convertito in massa epigea e ipogea tramite la *basic wood density* e stimando la biomassa aggiuntiva per i rami (*biomass expansion factor*) e per le radici (*root:shoot ratio*). Il carbonio totale si ottiene moltiplicando la biomassa per il suo contenuto di carbonio (**0,47 grammi di C per grammo di sostanza secca**). Il carbonio contenuto negli altri pool può essere calcolato a partire da quello delle piante vive, utilizzando opportuni fattori o equazioni di conversione⁽⁴⁾⁽⁵⁾. Per ottenere la massa della CO₂ stoccata **si moltiplica la massa del carbonio per 3,67. Per l'Italia,**

l'INFC fornisce equazioni allometriche per le principali specie italiane⁽⁶⁾, coefficienti di *basic wood density*, *biomass expansion factors* e *root:shoot ratio*⁽⁷⁾, equazioni empiriche per calcolare il carbonio contenuto nella lettiera e nel suolo a partire da quello epigeo⁽⁷⁾, e dati medi di *stock* a ettaro per tutte le regioni e le categorie forestali italiane, elaborati su dati riferiti all'anno 2015⁽⁸⁾ (cfr. Appendice). Inoltre, un *dataset* geografico nazionale degli *stock* di carbonio epigei alla risoluzione spaziale di 23 m per il periodo 2005-2018 è stato elaborato dall'Università di Firenze⁽⁹⁾ unendo dati inventariali e telerilevati.

⁽⁴⁾ EGLESTON *et al.* (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>

⁽⁵⁾ PENMAN *et al.* (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/GPG_LULUCF_FULLEN.pdf

⁽⁶⁾ TABACCHI *et al.* (2011). *Stima del volume e della fitomassa delle principali specie forestali italiane. Equazioni di previsione, tavole del volume e tavole della fitomassa arborea epigea*. Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura, Unità di Ricerca per il monitoraggio e la pianificazione Forestale, Trento. https://www.inventarioforestale.org/wp-content/uploads/2022/10/tavole_cubatura.pdf

⁽⁷⁾ VITULLO *et al.* (2007). *La contabilità del carbonio contenuto nelle foreste italiane*. *Silvae* 3(9): 1-14. <https://bit.ly/45IN2SG>

⁽⁸⁾ Cotenuto di carbonio nella vegetazione <https://bit.ly/44vFV3> e nel legno morto <https://bit.ly/3OTIOIf>

⁽⁹⁾ VANGI *et al.* (2023). *Large-scale high-resolution yearly modeling of forest growing stock volume and above-ground carbon pool*. *Env Model Soft* 159: 105580. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815222002808>

Esempio: Carbonio stoccato in un ettaro di pecceta montana con volume cormometrico di 300 m³/ha.

Basic wood density (Abete rosso): 0,38 t per m³ [VITULLO *et al.* 2007]⁽⁷⁾

Biomass expansion factor (Abete rosso): 1,29 [VITULLO *et al.* 2007]⁽⁷⁾

Root:shoot ratio (Abete rosso): 0,29 [VITULLO *et al.* 2007]⁽⁷⁾

Dead:live biomass ratio per conifere: 0,20 [PENMAN *et al.* 2003]⁽⁵⁾

Eq. C nella lettiera (Abete rosso): 0,0659 x volume epigeo + 1,5045 [VITULLO *et al.* 2007]⁽⁷⁾

Eq. C nel suolo (Abete rosso): 0,4041 x volume epigeo + 57,874 [VITULLO *et al.* 2007]⁽⁷⁾

Carbon density: 0,47

Stock biomassa arborea epigea: $300 \times 1,29 \times 0,38 \times 0,47 \times 3,67 = 253,7 \text{ t CO}_2$

Stock biomassa arborea ipogea: $300 \times 1,29 \times 0,38 \times 0,29 \times 0,47 \times 3,67 = 73,6 \text{ t CO}_2$

Stock necromassa: $300 \times 1,29 \times 0,38 \times 0,20 \times 0,47 \times 3,67 = 50,7 \text{ t CO}_2$

Stock lettiera: $0,0659 \times 253,7 + 1,5045 = 18,2 \text{ t CO}_2$

Stock suolo: $0,4041 \times 253,7 + 57,874 = 160,4 \text{ t CO}_2$

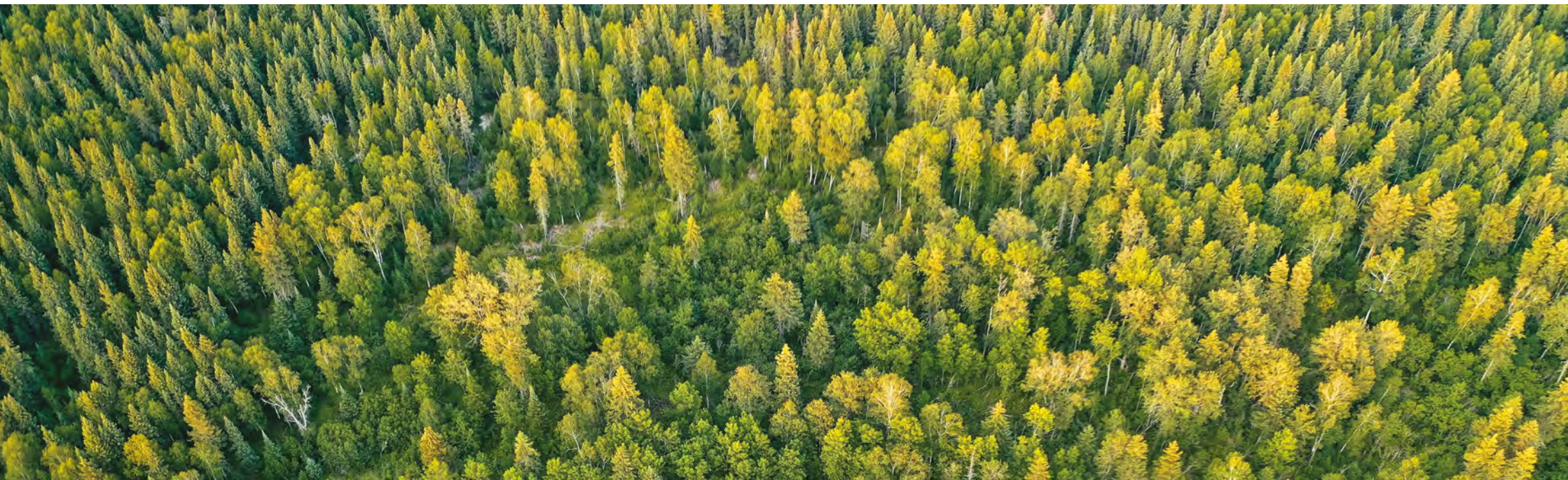
Stock totale: $253,7 + 73,6 + 50,7 + 18,2 + 160,4 = 556,5 \text{ t CO}_2$

Per il progetto USEFOL è stato **realizzato e testato un modello di calcolo chiamato "WOody biomass and Carbon ASsessment (WOCAS)"**.

WOCAS quantifica - secondo un approccio "gain-loss" coerente con le più recenti Linee Guida internazionali dell'Intergovernmental Panel on Climate Change - le **masse di legno** (t/ha di sostanza secca per anno) e **carbonio** (t/ha di C per anno) a scala di **singola particella forestale** impiegando - come dati di *input* - quelli derivanti dai **Piani di Assestamento Forestale (PAF)**. Per ciascuna particella e per ciascun anno analizzato le masse sono calcolate dall'anno di entrata in vigore del PAF fino a un anno di riferimento, in funzione dell'incremento annuo degli alberi (curve di accrescimento basate su parametri con valori calibrati

per la Regione Lombardia) e delle perdite dovute a: 1) **mortalità naturale** (autodiradamento e competizione per luce, acqua ed elementi nutritivi), 2) **disturbi naturali** (a esempio: incendi, schianti da vento, attacchi di parassiti o patogeni), e 3) **interventi selvicolturali**. Tali masse sono poi annualmente ripartite in: (a) **biomassa legnosa epigea** e (b) **ipogea**, e (c) **sostanza organica morta** (legno morto e lettiera).

Per la Valle Camonica WOCAS è stato testato su 2.019 particelle censite in 45 PAF (superficie forestale complessiva: 36.700 ha) per il periodo dal 1984 (anno di entrata in vigore del PAF più vecchio) al 2021; per la Valtellina, invece, l'analisi ha riguardato 493 particelle censite in 7 PAF (superficie forestale complessiva: 10.545 ha) per il periodo 2005 - 2021.



STIMARE I FLUSSI DI CARBONIO NELLA FORESTA

La stima dei flussi di carbonio è un processo più articolato rispetto alla stima dello stock di carbonio poiché richiede misurazioni protratte nel tempo.

Sono tre i tipi di flusso che è possibile calcolare, a seconda dei confini del sistema di riferimento: la **produttività primaria netta (NPP)**, ovvero la differenza

tra il carbonio assorbito con la fotosintesi e quello rilasciato dalla respirazione autotrofa; la **produttività ecosistemica netta (NEP)**, ovvero la differenza tra NPP e il carbonio rilasciato dalla respirazione eterotrofa; o la **produttività primaria del bioma (NBP)**, che si ottiene sottraendo alla NEP le perdite da disturbi e rappresenta l'assorbimento di carbonio a lungo termine della foresta.



IMMAGINE 1 - Le principali componenti del ciclo naturale del carbonio tra atmosfera e ecosistemi terrestri.

Il metodo di misura più semplice è quello degli **inventari ripetuti**, calcolando la differenza tra **stock** di carbonio stimati in due momenti successivi. Se l'inventario comprende la misura ripetuta del carbonio in tutti e cinque i **pool** forestali, è in grado di stimare direttamente la NBP. Un altro metodo basato sui dati di campo è l'**eddy covariance** che

prevede la misurazione degli scambi di CO₂, vapore acqueo ed energia tra la biosfera e l'atmosfera. Questa tecnica permette di misurare in modo diretto la NEP sia sul breve che sul lungo periodo.

L'INFC fornisce stime di incremento medio di carbonio per tutte le categorie forestali e le regioni italiane, calcolate

da dati di campo misurati nel 2015⁽¹⁰⁾. Per quanto riguarda la sola componente arborea, è possibile stimare l'incremento corrente in volume dalla **misura degli ultimi anelli legnosi**, ottenibili con un prelievo incrementale, applicando metodi dendrometrici (equazioni di Pressler o di Schneider) e convertire quindi l'incremento corrente in NPP con calcoli simili a quelli necessari a convertire il volume in **stock** di carbonio. Una alternativa ai metodi di campo è l'utilizzo di **modelli di stima** basati su dati inventariali - come il **modello For-Est**⁽¹¹⁾ che stima l'incremento corrente in volume in funzione della provvigione del bosco, della specie, e della regione in cui è situata l'area di studio, o su elaborazioni di dati

telerilevati (es. FOREST-BGC, C-FIX), quali NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e LAI (*Leaf Area Index*), cioè indici in grado di fornire stime affidabili di produttività degli ecosistemi. È possibile, infine, quantificare alcuni tipi di flussi di carbonio direttamente da dati telerilevati, come nel caso delle **stime di NPP fornite dai satelliti MODIS** alla risoluzione di 500-1.000 metri, utili per l'analisi a scala regionale dei flussi di carbonio. In tutti questi casi sarà necessario sottrarre all'incremento stimato la **mortalità attesa per disturbi naturali**, quantificabile in **-1,16% annuo per le conifere e -1,17% annuo per le latifoglie**⁽⁵⁾, e al **carbonio rimosso con eventuali prelievi selvicolturali** durante il periodo di conteggio.

⁽¹⁰⁾ Incremento annuo di carbonio nella fitomassa arborea epigea: <https://bit.ly/45rkyKu>

⁽¹¹⁾ FEDERICI et al. (2008). An approach to estimate carbon stocks change in forest carbon pools under the UNFCCC: the Italian case. iForest 1: 86-95. <https://iforest.sisef.org/contents/?id=ifor0457-0010086>

PREVEDERE STOCK E SINK FUTURI

La previsione delle dinamiche forestali è oggetto di studio da parte di una branca della modellistica dedicata agli ecosistemi forestali. Esiste una moltitudine di modelli con caratteristiche tecniche specifiche legate al fine principale di applicazione o alla zona geografica.

Due importanti tipologie di modelli sono i modelli empirici e i modelli basati sui processi fisiologici delle piante (*Process Based model*).

I **modelli empirici** si basano sulle tendenze osservate nel passato e usano dati inventariali per simulare la crescita delle foreste in base alle osservazioni fatte nel tempo. I **modelli basati sui processi**, invece, possono includere diverse tipologie di processi tipici delle foreste come la fotosintesi, l'allocatione del carbonio, l'accrescimento legnoso, la dispersione dei semi, la mortalità da disturbi naturali, le pratiche selvicolturali, o il cambiamento climatico. Lo stato della foresta in un certo istante di tempo è quindi il risultato di equazioni i cui *input* rappresentano le condizioni iniziali della foresta e i cui parametri riguardano caratteristiche specifiche di specie, suolo e clima. I modelli empirici tendono a non essere sensibili ai cambiamenti climatici, per cui vengono spesso accoppiati a modelli *process-*

based così da avere una simulazione il più aderente possibile alla realtà attesa.

Il progetto USEFOL ha fatto uso di due modelli: il **Carbon budget Model** del Canadian Forest Service (CBM), e il modello *process-based* **3PG**. CBM è un modello empirico basato su dati inventariali e **curve di accrescimento legnoso** fornite dall'utente. Tali curve possono essere calcolate mediante interpolazione statistica di dati di provvigione ricavati da inventari o piani di assestamento, dalla stima di campo degli incrementi in volume per popolamenti di diversa età, o desunte da tavole alometriche se esistenti. Questo modello è utilizzato per studiare i flussi di carbonio tra i diversi *pool* in base ai processi fisiologici di fotosintesi, respirazione e decomposizione e ai disturbi come incendi, schianti e tagli. CBM richiede come *input* un inventario delle particelle oggetto di studio contenente informazioni sull'età del popolamento e i disturbi passati. Successivamente è necessario pianificare un **calendario dei disturbi**, contenente informazioni legate ai trattamenti selvicolturali pianificati e ai disturbi previsti. L'*output* del modello consiste in una previsione dello *stock* e del *sink* di carbonio nelle diverse categorie forestali. Per rendere la simulazione sensibile ai cambiamenti climatici è stato necessario

accoppiarla al modello *process-based* 3PG. Quest'ultimo richiede informazioni legate al sito di crescita della pianta, al clima e ai parametri fisiologici delle diverse specie simulate. Effettuando simulazioni con diversi scenari climatici (crisi climatica di intensità moderata o elevata) è stato possibile evidenziare le differenze di crescita dovute ai cambiamenti attesi in temperatura e precipitazioni. Le simulazioni effettuate in Valtellina e Valle Camonica mostrano come **la crescita delle latifoglie sarà avvantaggiata dalle temperature più elevate** dovute ai cambiamenti climatici

(con aumenti di produttività compresi tra il 6 e il 15%), mentre per le conifere l'effetto sulla crescita sarà nullo o solo leggermente positivo. L'aumento di eventi siccitosi comporterà probabilmente aumenti della mortalità da carenza idrica e delle superfici percorse da incendio. Le foreste più giovani di abete rosso garantiranno uno *stock* in crescita, mentre l'età avanzata delle foreste di larice e delle peccete mature ridurranno la loro capacità di assorbire carbonio in seguito alle utilizzazioni forestali, a fronte di provvigioni comunque elevate.



GRAFICO 4 - Previsione dello stock di carbonio a ettaro nei boschi della alta Val Camonica e Alta Valtellina con scenari di cambiamento climatico (media delle simulazioni con RCP 4,5 e RCP 8,5) e tre alternative selvicolturali: prelievi massimi concessi dal Regolamento Forestale regionale (BaU, linea blu), selvicoltura di prevenzione dei disturbi forestali (verde), selvicoltura di prevenzione e di produzione di assortimenti legnosi di lunga durata (rosso). Le simulazioni sono state ottenute accoppiando i modelli CBM e 3PG. I valori non comprendono il carbonio stoccato nei prodotti legnosi e le emissioni evitate grazie agli effetti di sostituzione.



IL CONTRIBUTO CLIMATICO DELLA BIOMASSA PER ENERGIA

La combustione di biomasse a fini energetici può avere un ruolo nella mitigazione dei cambiamenti climatici. Tuttavia è erronea la convinzione secondo cui bruciare biomasse sia climaticamente neutro: infatti la filiera del legno può far uso di energia proveniente da fonti fossili e possono esserci emissioni legate alla perdita di carbonio di pool come il suolo in seguito ai prelievi forestali.

Per valutare il reale impatto climatico delle emissioni della filiera legno-energia è necessario utilizzare approcci come il Life Cycle Assessment (LCA).

Altro aspetto importante riguarda il fatto che effettuare prelievi legnosi genera un temporaneo **debito carbonico**: esiste cioè uno scarto temporale tra l'emissione di CO₂ al punto di combustione e il suo successivo riassorbimento grazie all'accrescimento del bosco dopo il prelievo. Il debito carbonico viene ripagato nel tempo necessario alla foresta per ricostituire la biomassa prelevata e compensare tutto l'assorbimento che si sarebbe verificato in assenza di prelievo legnoso (**tempo di parità carbonica**). È necessario pertanto pianificare i prelievi in modo da ridurre al minimo il tempo nel quale il debito carbonico viene ripagato. Ciò può essere fatto ad esempio privilegiando l'utilizzo di scarti e di prodotti legnosi a fine vita per la

produzione di energie da biomasse. Tale tipo di utilizzo prende il nome di **uso a cascata del legno** e prevede che il legname venga utilizzato prima per fini

materiali poi via via per fini sempre meno nobili fino ad arrivare all'utilizzo dei soli scarti o residui per scopi energetici. Le biomasse legnose possono effica-

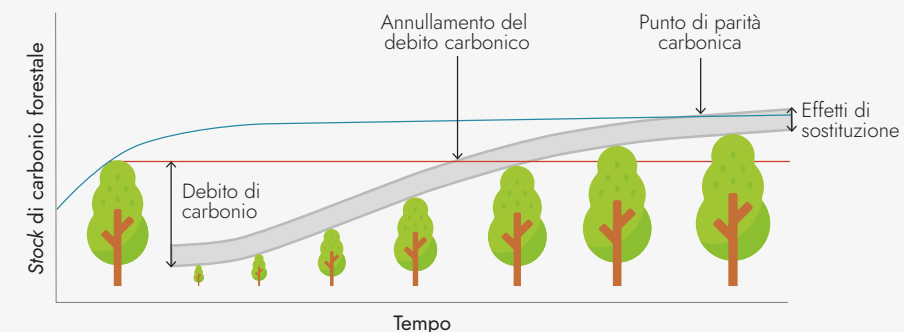


IMMAGINE 2 - Definizione di tempo di parità carbonica. In rosso lo stock di carbonio della foresta al momento del prelievo legnoso; in blu l'ipotetica evoluzione dello stock di carbonio forestale in assenza di prelievi.

cemento sostituire l'utilizzo di energie fossili quando il tempo di parità carbonica è il più breve possibile, quando l'approvvigionamento è garantito in modo sostenibile da foreste vicine al punto di combustione e nelle situazioni in cui l'installazione di altre rinnovabili risulti di difficile applicazione. In queste condizioni si riesce a ottenere una riduzione delle emissioni climalteranti, poiché le emissioni nette dell'energia ottenuta dal legno sono minori di quelle dei combustibili fossili. Il beneficio complessivo della sostituzione di energia fossile con energia da biomasse

può essere quantificato tramite l'utilizzo di **coefficienti di sostituzione**, che in genere hanno però valore strettamente locale. Allo stesso modo, è possibile quantificare gli **effetti di sostituzione per usi materiali** del legno, calcolando la differenza tra le emissioni di gas serra generate dall'uso del legno per scopi strutturali o materiali e quelle che si sarebbero verificate durante la produzione, uso e smaltimento di materiali che il legno ha sostituito, come acciaio, cemento o plastica.

IL MERCATO DEI CREDITI DI CARBONIO ^{*2,3}

I mercati di scambio delle emissioni e degli assorbimenti di carbonio rappresentano un meccanismo economico che mira a limitare e ridurre le emissioni di gas serra.

Ai soggetti pubblici e privati responsabili di azioni di riduzione delle emis-

sioni o aumento degli assorbimenti rispetto a uno scenario consuetudinario (*business as usual*) sono riconosciuti **crediti di carbonio (CC)**, che possono essere venduti dietro compenso economico a soggetti pubblici e privati interessati alla compensazione delle loro emissioni residue. Un CC corrisponde alla mitigazione di **1 tonnellata di CO₂** emessa in atmosfera.

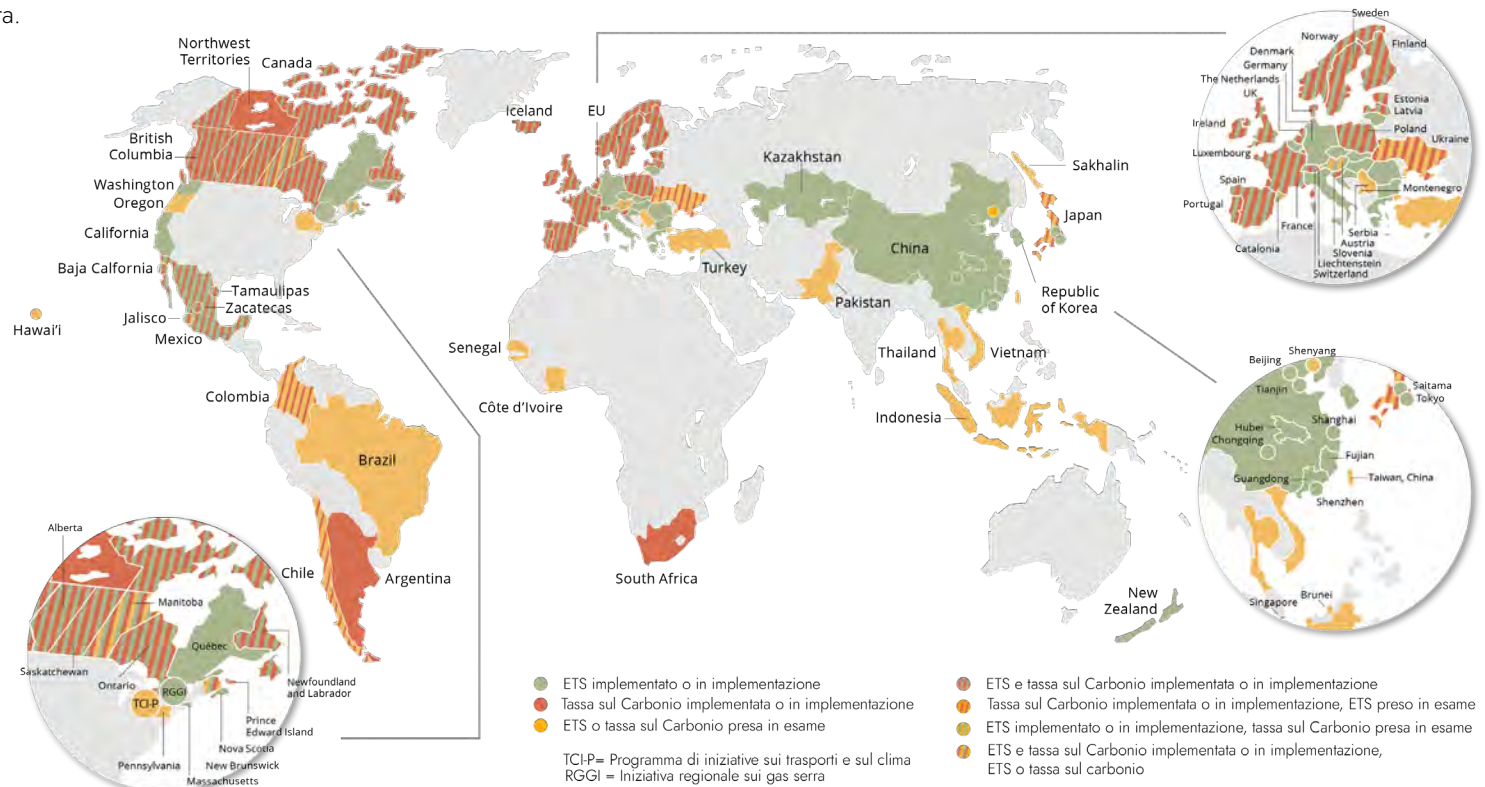
MERCATI OBBLIGATORI

*Per limitare le emissioni in atmosfera dei gas serra di origine antropica è stata sottoscritta la **Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC)**, un trattato internazionale ratificato da tutti i **196 Paesi membri dell'ONU**.*

Il trattato non pone limiti obbligatori per le emissioni di gas serra alle singole nazioni, ma include la possibilità che le parti firmatarie adottino, in apposite conferenze delle parti (COP) e solo all'unanimità, atti ulteriori (denominati

"protocolli") per porre limiti di emissioni vincolanti. Il principale di questi è stato il Protocollo di Kyoto, adottato nel 1997 e in vigore dal 2005 al 2020, che ha dato origine al primo mercato regolamentato di crediti di carbonio. In tale mercato, per i Paesi industrializzati sono stati fissati obiettivi vincolanti di riduzione delle emissioni di diversi gas serra. Al mancato raggiungimento degli obiettivi i Paesi potevano sopperire con l'acquisto di crediti di carbonio. I Paesi in via di sviluppo non avevano invece obiettivi vincolanti. Nel 2015, durante

la COP21 di Parigi, è stato approvato l'**Accordo di Parigi** che contempla per la prima volta un obiettivo concreto di limitazione del riscaldamento terrestre a meno di +2 °C, possibilmente +1,5 °C, rispetto al valore preindustriale del 1750. L'Accordo di Parigi stabilisce che tutti gli Stati firmatari, non solo quelli industrializzati come nel Protocollo di Kyoto, decidano i propri obiettivi vincolanti di riduzione delle emissioni, che vengono verificati e rinnovati ogni cinque anni, per tendere con un'ambizione sempre crescente all'obiettivo di emissioni zero.



L'Accordo di Parigi, all'**Articolo 6**, prevede tre meccanismi volti a creare un sistema di scambio delle emissioni tra i Paesi, attraverso il quale chi inquina meno compensa chi sfora i limiti o ha bisogno di aiuto per non superarli. Mentre il primo meccanismo prevede un sistema internazionale e bilaterale di scambio di crediti, denominati ITMO (*Internationally Transferred Mitigation Outcomes*), con il secondo si crea un nuovo mercato internazionale del carbonio, governato da un organismo delle Nazioni Unite, per lo scambio di riduzioni di emissioni create ovunque nel mondo, tanto dal settore pubblico quanto da quello privato. Questo nuovo mercato è denominato **Meccanismo di sviluppo sostenibile** (SDM) e sostituisce il "Clean development mechanism" (CDM) istituito dal Protocollo di Kyoto (i cui crediti generati dopo il 2013 restano comunque ancora vendibili dagli Stati che li hanno generati). Il terzo meccanismo, ancora a livello di *roadmap*, riguarda invece i cosiddetti "approcci non di mercato", e si propone di favorire la cooperazione climatica tra i Paesi in contesti non commerciali, come ad esempio quelli degli aiuti allo sviluppo. Il regolamento adottato alla COP26 di Glasgow ha inoltre eliminato il problema del doppio conteggio, chiarendo che i Paesi in cui viene generato un CC devono depennare la riduzione di emissioni dal proprio bilancio globale di emissioni (**adeguamento corrispondente**) se un altro Paese la utilizza per rispettare il proprio limite di emissioni autorizzate (*Nationally Determined Contribution*, NDC).

Anche singoli Stati o gruppi di Stati hanno recentemente attivato sistemi obbligatori di scambio delle emissioni. Ne è un esempio l'**Emission Trading System** (ETS) dell'Unione Europea. Iniziato nel 2005, l'ETS copre le emissioni di CO₂ di circa 11.000 impianti industriali in 31 paesi, rappresentando quasi la metà delle emissioni di gas serra dell'UE. Questo sistema ha fissato un tetto massimo sulle emissioni totali a livello europeo e nazionale e ha distribuito **permessi di emissione**, noti anche come quote, che possono essere scambiati tra le aziende. Se un'azienda riduce le sue emissioni al di sotto della quota assegnata, può vendere il *surplus* ad altre aziende. Il valore di un credito di carbonio sul mercato ETS, dopo essersi mantenuto inferiore a 25 euro fino al 2020, è costantemente aumentato e ha superato nel 2023 i **100 euro a tonnellata di CO₂**. Questo meccanismo di mercato ha permesso di trovare un equilibrio tra efficienza economica e riduzione delle emissioni. Oltre all'ETS europeo, esistono altri esempi di mercati obbligatori del carbonio in tutto il mondo, come il Sistema di Scambio di Emissioni di Tokyo, il Sistema di Scambio di Emissioni della Nuova Zelanda e il Sistema di Scambio di Emissioni della California.

Questo manuale non tratta le procedure e le condizioni per il riconoscimento di crediti di carbonio da parte delle attività soggette a ETS, come le imprese che producono energia utilizzando biomasse legnose in sostituzione di combustibili fossili.

MERCATI VOLONTARI

Oltre ai mercati obbligatori dei CC, nel corso del tempo si sono diffusi anche mercati volontari del carbonio (MVC), promossi da una richiesta spontanea, non imposta da obiettivi vincolanti.

In tale mercato gli acquirenti sono enti pubblici o privati, organizzazioni no-profit o singoli cittadini interessati a mitigare le emissioni di gas serra causate dalle loro attività, o legate alla produzione di beni e/o servizi climaticamente impattanti, mentre i venditori sono proprietari e gestori forestali le cui attività promuovono la generazione di CC. Negli ultimi anni, i MVC sono stati caratterizzati da una **fase di forte espansione** - in termini sia di numero di operatori coinvolti, sia di CC scambiati - che ha portato a un accesso più facile e una maggiore flessibilità, dovuta principalmente all'assenza di una legislazione specifica e a **procedure semplificate per lo scambio dei crediti**.

Nei MVC le attività forestali che possono produrre CC sono:

- 1 **afforestazione**;
- 2 **riforestazione**;
- 3 **riduzione delle emissioni** di gas serra da **deforestazione e degrada-**

do forestale, compreso quello causato da incendi e altri eventi meteorologici estremi;

- 4 **sostituzione di materiali e combustibili fossili** con prodotti a base di legno;
- 5 **gestione forestale migliorata (IFM)**, con aumento dello stoccaggio del carbonio rispetto alla situazione ordinaria.

Il valore globale dei MVC supera oggi i due miliardi di euro. Secondo il rapporto [State and Trends of Carbon Pricing 2023](#) della Banca Mondiale, i prezzi del carbonio sul MVC variano da 1 a 119 dollari per tonnellata di CO₂eq, ma il prezzo per quasi la metà delle riduzioni di emissioni è inferiore a 10 dollari. I progetti di energia rinnovabile hanno i prezzi medi più bassi a 1,4 dollari per tonnellata di CO₂eq, quelli nel settore forestale e dell'uso del suolo hanno i prezzi maggiori (4,3 dollari a tonnellata). Per raggiungere gli obiettivi dell'Accordo di Parigi, l'OCSE stima che sia necessario un prezzo di 147 dollari a tonnellata entro il 2030. È tuttavia possibile che i prezzi continuino a salire rapidamente in seguito a un aumento vertiginoso della domanda di crediti su MVC: secondo la Taskforce on Scaling Voluntary Markets, il mercato crescerà di circa 15 volte nel 2030 e fino a un

massimo di 100 volte entro il 2050 (7-13 Gt CO₂eq all'anno). Nel 2022 il 54% delle registrazioni di nuovi progetti riguardava attività forestali e di uso del suolo, il che suggerisce un'espansione potenzialmente significativa dell'offerta in futuro. In Italia, nel 2021 il prezzo medio dei crediti di carbonio forestali su MVC è stato di **21 euro a tonnellata di CO₂eq**.

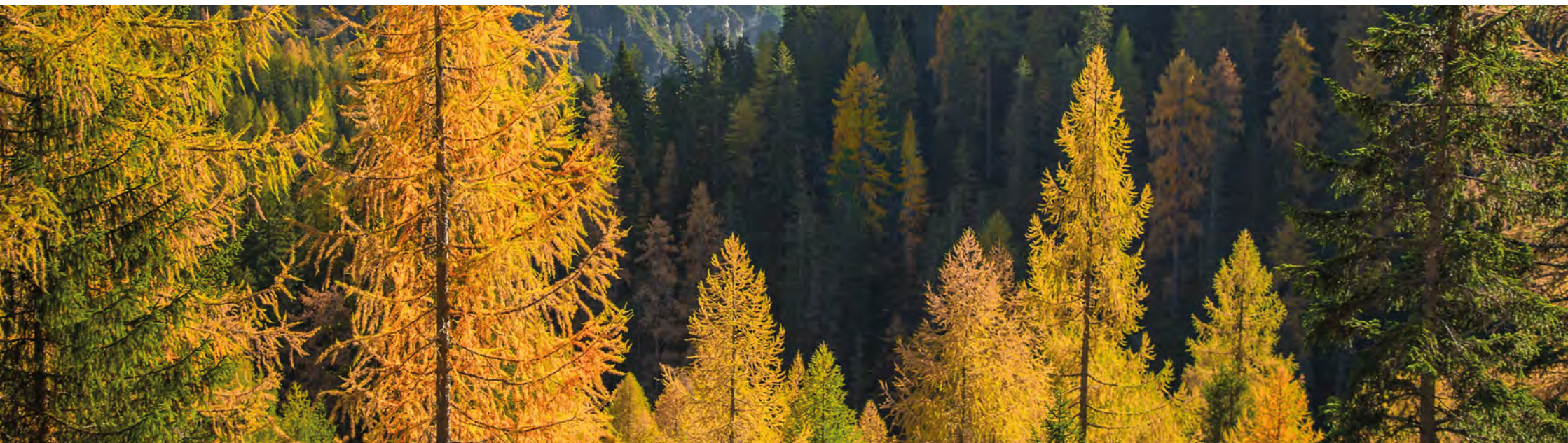
I mercati volontari del carbonio contribuiscono a incorporare nell'economia reale gli strumenti di lotta alla crisi climatica, attribuendo un costo, sebbene spesso ancora limitato, all'esternalità negativa dell'emissione in atmosfera di gas serra. Questo ha l'effetto di coinvolgere gli operatori economici nelle azioni di mitigazione, canalizzando finanziamenti verso progetti sostenibili, spesso in paesi in via di sviluppo, dove la riduzione delle emissioni può essere realizzata a

costi inferiori. I mercati del carbonio possono inoltre stimolare l'**innovazione tecnologica** e le soluzioni basate sulla natura, promuovendo pratiche sostenibili in vari settori. Al tempo stesso, non tutti i crediti di carbonio sono uguali. Alcuni progetti possono avere un impatto reale e misurabile, mentre altri possono essere meno efficaci o addirittura dannosi per l'ambiente o le comunità locali. Esiste inoltre il rischio che le riduzioni delle emissioni vengano conteggiate più volte, sia dal venditore che dall'acquirente del credito di carbonio, compromettendo l'integrità del sistema (**doppio conteggio**). Infine, i progetti di assorbimento del carbonio basati sulle foreste hanno una **limitata e incerta** permanenza (ad esempio, una foresta piantata per assorbire CO₂ potrebbe essere abbattuta o bruciata in futuro, rilasciando nuovamente il carbonio nell'atmosfera). Per questi motivi, il mercato delle compensazioni

delle emissioni deve essere disciplinato in modo rigoroso e trasparente, e **non può sostituire una riduzione reale delle emissioni**. È essenziale invece che sia integrato in una strategia più ampia che includa la transizione verso fonti di energia pulita, l'efficienza energetica e altre misure di riduzione delle emissioni. Una regolamentazione e certificazione rigorosa, la trasparenza e l'educazione del pubblico sono fondamentali per garantire che questi mercati siano efficaci e credibili, e per evitare che diventino esercizi di marketing privi di reali benefici ambientali.

Normalmente, il valore dei CC è riconosciuto **ex ante** al soggetto che li produce, cioè in anticipo rispetto alla loro produzione e a fronte di un impegno del produttore a generarli e mantenerli per un certo periodo (**permanenza**). Nell'ambito della discussione relativa

all'attuazione dell'Articolo 6 dell'Accordo di Parigi, non esistono al momento regole condivise globalmente per la compravendita di crediti su base volontaria. Nel frattempo sono nati numerosi standard indipendenti, che utilizzano diverse metodologie per misurare e verificare la riduzione delle emissioni di carbonio. Alcuni esempi: **Verra (Verified Carbon Standard)**, che detiene attualmente l'89% del mercato; Plan Vivo, Gold Standard. Questi standard forniscono un robusto processo di verifica per garantire la credibilità dei progetti di riduzione delle emissioni, ma differiscono tra loro per metodi di calcolo, stima della *baseline*, requisiti di permanenza temporale degli assorbimenti, anticipazione delle quote generate, registri e metodi per evitare il doppio conteggio, confini delle stime ed eco-benefici richiesti (ambientali e sociali).



ASPETTI LEGISLATIVI*2.3

POLITICHE CLIMATICHE EUROPEE

Le politiche sul clima sono diventate centrali nell'agenda internazionale, riflettendo la crescente consapevolezza dell'urgenza di affrontare i cambiamenti climatici.

L'Unione Europea, nell'ambito del *Green deal*, ha adottato una serie di politiche e regolamenti per tradurre questi obiettivi globali in azioni concrete. Il [regolamento EU 2018/841 LULUCF](#) (*Land Use, Land Use Change and Forestry*) stabilisce le regole per la contabilizzazione delle emissioni e degli assorbimenti di gas serra derivanti da attività legate all'uso del suolo, come l'agricoltura e la selvicoltura. Il regolamento LULUCF è stato rivisto nel 2023 per il periodo fino al 2030. Per il periodo fino al 2025 l'unico requisito vincolante per gli Stati membri è la **no debit rule**: ciascuno Stato garantisce che le emissioni derivanti dall'uso del suolo siano compensate da almeno un quantitativo equivalente di assorbimenti. La contabilizzazione del bilancio emissioni/assorbimenti nelle foreste avverrà secondo l'approccio del **Forest Reference Level (FRL)**, ossia degli assorbimenti attesi in funzione della dinamica di sviluppo delle foreste e in assenza di cambiamenti nella gestione consuetudinaria. Se gli assorbimenti di-

minuiscono rispetto a tale livello si genera un debito, se c'è invece un aumento degli assorbimenti si genera un credito. Dal 2026, invece, sarà introdotto un obiettivo vincolante a livello dell'UE di un assorbimento netto di 310 Mt CO₂eq entro il 2030, con un aumento del 15% rispetto ai livelli attuali, invertendo la tendenza al calo degli assorbimenti osservata negli ultimi anni, e di 450 Mt CO₂eq al 2050. Per l'Italia, l'obiettivo al 2030 è fissato in **35,7 Mt CO₂eq assorbite all'anno**.

Recentemente, la Commissione europea ha adottato una proposta di regolamento per certificare in modo affidabile gli assorbimenti di carbonio. La proposta promuoverà le tecnologie innovative per l'eliminazione del carbonio e le soluzioni basate sulla natura. La proposta stabilisce norme per la verifica indipendente dei **carbon removal** e per i sistemi di certificazione che possono essere utilizzati per dimostrare la conformità al quadro normativo dell'UE.

Per garantire la qualità dei *carbon removal*, la proposta di regolamento stabilisce quattro criteri:

1) Le attività di rimozione del carbonio devono essere misurate accuratamente

e produrre benefici inequivocabili per il clima;

2) devono andare oltre le pratiche esistenti e quanto richiesto dalla legge (**addizionalità**);

3) devono garantire uno stoccaggio a lungo termine;

4) devono preservare o contribuire a obiettivi di sostenibilità come l'adattamento ai cambiamenti climatici, l'economia circolare, la tutela delle risorse idriche e marine e della biodiversità.

Sulla base di questi criteri la Commissione svilupperà metodologie di certificazione su misura per i diversi tipi di attività di rimozione del carbonio. A quel punto gli schemi di certificazione che

saranno accreditati a livello nazionale degli Stati Membri e verificati da un ente di parte terza potranno essere utilizzati per certificare le attività di assorbimento del carbonio. I certificati saranno quindi pubblicati in **registri** in grado di rispettare i criteri di trasparenza e tracciabilità. A sua volta, questa proposta è strettamente collegata alla **Direttiva sull'energia da fonti rinnovabili** (RED III), la cui revisione, ancora in corso nel 2023, prevede criteri di sostenibilità più stringenti per il sostegno pubblico agli impianti di bioenergia al di sopra di 7,5 MW di potenza, applicabili dalle autorità nazionali competenti o da sistemi di certificazione privati riconosciuti dalla Commissione europea. Questi ultimi potrebbero certificare anche la conformità delle attività di assorbimento di carbonio.

POLITICHE CLIMATICHE NAZIONALI

L'Italia, in linea con gli sforzi europei e globali per combattere i cambiamenti climatici, ha sviluppato una serie di politiche e piani per ridurre le proprie emissioni di gas serra e promuovere la sostenibilità ambientale.

Il [Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima](#) (PNIEC) è un documento fondamentale in questo contesto, delineando gli obiettivi e le strategie del

Paese per raggiungere una transizione energetica sostenibile entro il 2030. Con l'introduzione del pacchetto EU "Fit for 55", l'Italia ha dovuto rivedere e intensificare i propri impegni, inviando nel 2023 alla Commissione Europea una revisione del PNIEC con l'obiettivo di ridurre le emissioni delle attività vincolate a ETS del 62% e di quelle non ETS del 37% rispetto ai livelli del 1990. Nel contesto della gestione e conservazione delle foreste, l'ISPRA ha redatto nel 2019 il [National Forest Accounting Plan](#) dove

ha definito un *Forest Reference Level* pari a 19,66 Mt CO₂eq. Inoltre, nel 2021 il Ministero dell'Ambiente ha pubblicato la [Strategia di lungo termine sulla riduzione delle emissioni dei gas serra](#), al cui interno è stato ipotizzato che la gestione forestale in Italia possa aumentare il prelievo legnoso fino ad un massimo del **40-45% dell'incremento annuo** nell'anno 2050, partendo dall'attuale utilizzo stimato del 33%. Secondo questa Strategia, con l'adozione di pratiche per l'aumento del carbonio immagazzinato nei suoli agricoli e per la prevenzione degli incendi boschivi, l'assorbimento del settore LULUCF potrebbe passare da 25 Mt CO₂eq (scenario di base) a oltre 45 Mt nel 2050, in linea con il massimo raggiunto nell'anno 2015.

Riguardo al riconoscimento economico della mitigazione forestale, già il D.lgs. 34/2018, all'articolo 7 prevedeva l'attivazione di sistemi di **pagamento dei servizi ecosistemici ed ambientali** generati dalle attività di gestione forestale sostenibile e dall'assunzione di specifici impegni silvo-ambientali.

Infine, la [Strategia Forestale Nazionale](#), approvata dal Ministero delle Politiche Agricole e Forestali nel 2022, prevede un'azione operativa finalizzata alla mitigazione e all'adattamento forestale ai cambiamenti climatici, articolata in alcune sotto-azioni:

- A.6.1.a) Migliorare le conoscenze sui cambiamenti climatici e sui loro impatti a danno del patrimonio forestale, mediante inventariazione, monitoraggio

e l'utilizzo di modelli e sistemi esperti di supporto alle decisioni gestionali;

- A.6.1.b) Promuovere la partecipazione ed aumentare la consapevolezza dei portatori di interesse nella definizione di strategie e piani di adattamento forestale;
- A.6.1.c) Adottare pratiche selvicolturali anche a macchiatico negativo volte a migliorare le capacità di resistenza e resilienza dei popolamenti forestali ai cambiamenti climatici;
- A.6.1.d) Coordinare le azioni di adattamento con le politiche, i piani e i programmi nazionali e regionali in materia di mitigazione, a partire da quelli per l'efficienza energetica e lo sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili;
- A.6.1.e) Riconoscere il ruolo svolto dal settore forestale nell'ambito delle strategie di mitigazione e adattamento climatico;
- A.6.1.f) Definire un Piano di Rischio delle foreste a cui collegare linee guida specifiche per le attività di gestione forestale volte a migliorarne la capacità di adattamento al cambiamento climatico.

REGISTRO NAZIONALE DEI CREDITI CLIMATICI

Negli ecosistemi dove la superficie forestale è molto estesa - e spesso non è possibile incrementare lo stoccaggio del carbonio mediante afforestazione o riforestazione - lo stoccaggio può essere incrementato attraverso pratiche di IFM.

Le principali sono:

1. estensione dei turni;
2. riduzione del prelievo di biomassa;
3. conversione di cedui invecchiati e/o abbandonati in alto fusto;
4. aumento dell'uso dei prodotti legnosi in sostituzione di materiali ad alta intensità di energia fossile;
5. aumento dello stoccaggio di C nei prodotti legnosi;
6. aumento dell'impiego di combustibili legnosi in sostituzione di quelli fossili;
7. prevenzione delle emissioni generate da eventi meteorologici estremi e incendi boschivi;
8. attività di rimboscimento post-disturbo, messa a dimora di impianti da arboricoltura policiclici, azioni di agroforestazione.

La [Legge 41 del 2023](#) ha istituito, presso il Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA), il **Registro pubblico dei crediti climatici generati su base volontaria dal settore agroforestale nazionale**, con lo scopo di dare va-

lore alle pratiche agricole e forestali, sostenibili e aggiuntive rispetto a quelle prescritte dalle norme, in grado di aumentare la capacità di assorbimento del carbonio atmosferico. Per la prima volta, i crediti di carbonio generati dalle attività di miglioramento della gestione agricola e forestale saranno **utilizzabili nell'ambito di un mercato volontario nazionale**, sul modello di simili iniziative già adottate in Francia ([Label Bas Carbone](#)) e Regno Unito ([Woodland Carbon Code](#)).

L'istituzione del registro supera il problema della doppia contabilizzazione dei crediti che impediva la vendita nell'ambito dei mercati volontari del carbonio di crediti prodotti dalle imprese agroforestali nel caso i corrispondenti assorbimenti fossero già stati contabilizzati dallo Stato per il conseguimento degli obiettivi climatici internazionali. Il nuovo mercato volontario rimane autonomo e i "crediti climatici" certificati e inseriti nel Registro nazionale non potranno essere utilizzati dalle aziende che hanno obblighi di riduzione nell'ambito del mercato EU-ETS, nel mercato CORSIA, e da aziende che operano all'estero o da altri stati nell'ambito degli obblighi internazionali ed europei. Tuttavia, gli assorbimenti di carbonio generati dalle attività volontarie potranno contribuire al raggiungimento degli obiettivi nazionali di riduzione delle emissioni concordati in ambito internazionale.



Saranno ammessi all'iscrizione nel Registro i crediti di carbonio generati e certificati, su richiesta dei soggetti proprietari o gestori che realizzano attività di imboscamento, rimboscamento e gestione sostenibile agricola e forestale aggiuntive rispetto a quelle previste dalla vigente normativa europea e nazionale di settore. I contenuti del progetto di generazione dei crediti e i requisiti per la certificazione degli assorbimenti saranno definiti attraverso la predisposizione di **linee guida** emanate con apposito decreto del MASAF nel corso del 2023. Infine, per rispettare la **gerarchia di mitigazione**, le linee guida suggeriranno alle aziende private che vogliono avviare un percorso di riduzione delle emissioni di seguire le procedure previste dalla [Science Based Target Initiative](#).

Anche [PEFC](#) e [FSC](#), i due principali enti di certificazione di gestione forestale sostenibile, hanno recentemente adottato disciplinari per la quantificazione e la certificazione dei crediti di carbonio forestale. Al loro interno sono contenute le regole per l'accesso alla certificazione dei CC e **formule per il calcolo dei crediti aggiuntivi** per diverse attività selvicolturali. Questi disciplinari, o protocolli simili, sono già stati sperimentati per alcune iniziative pilota per la generazione e compravendita di crediti di carbonio da miglioramento della gestione forestale, come il progetto **Life+ CO₂ PES&PEF** coordinato dalla Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa, il progetto **Life+ ClimatePositive** coordinato da ETIFOR e la realizzazione di un mercato di **crediti di sostenibilità** nel Parco Nazionale dell'Appennino Tosco-Emiliano.

REQUISITI PER L'ACCESSO AL REGISTRO NAZIONALE DEI CREDITI

- ◆ **Addizionalità:** i crediti climatici si calcolano come differenza tra gli assorbimenti netti generati dal progetto e quelli che si verificherebbero applicando lo scenario legislativo minimo (Regolamenti forestali regionali).
- ◆ **Permanenza:** le pratiche che generano assorbimenti o riduzioni di emissioni dovranno essere mantenute per almeno 30 anni.
- ◆ **Co-benefici:** la generazione dei crediti non potrà prescindere da un impatto neutro o positivo nei confronti delle risorse idriche, della biodiversità degli ecosistemi, della prevenzione e controllo degli inquinanti e dell'economia circolare.
- ◆ **Leakage:** il progetto deve dimostrare di non generare emissioni aggiuntive di gas serra in aree al di fuori di quelle oggetto di intervento.
- ◆ **Buffer:** il progetto deve sottrarre agli assorbimenti previsti una quota necessaria a compensare eventuali perdite di *stock* a causa di eventi meteorologici estremi o imprevisti di altra natura.

CONCLUSIONI ^{*1,2,3}

Il progetto USEFOL ha dimostrato l'importanza cruciale delle foreste nel contesto della crisi climatica, sottolineando come una gestione forestale efficace e sostenibile possa contribuire significativamente alla mitigazione dei cambiamenti climatici.

Questo manuale ha offerto una panoramica delle strategie e delle pratiche per massimizzare la cattura di carbonio attraverso la gestione forestale, del quadro normativo attuale e dei metodi per quantificare il carbonio addizionale assorbito in seguito a interventi di miglioramento delle pratiche forestali.

Abbiamo esplorato il crescente mercato dei crediti di carbonio, evidenziando come la generazione di crediti di carbonio volontari da una gestione forestale migliorata possa rappresentare una soluzione vincente sia dal punto di vista ambientale, sia economico. Tuttavia, è fondamentale affrontare questo tema con un approccio basato sulla scienza, sulla trasparenza e sull'integrità, come delineato nelle sezioni dedicate alla quantificazione del carbonio forestale e ai criteri di certificazione, e rispettare la gerarchia di mitigazione: primo, ridurre le emissioni alla fonte.

Infine, le politiche e le normative, sia a livello comunitario che nazionale, giocano un ruolo determinante nel plasmare l'ambito della gestione forestale e dei crediti di carbonio.

È interesse dei tecnici forestali rimanere aggiornati sulle ultime evoluzioni legislative e strategiche, diventando i professionisti di riferimento per la corretta quantificazione dei crediti di carbonio forestale, garantendo che le loro azioni siano sempre allineate agli obiettivi di sostenibilità climatica, sociale e economica e armonizzati con una gestione e una pianificazione forestale multifunzionale e partecipata. Nell'era della crisi climatica, le foreste rappresentano una delle nostre migliori alleate. Attraverso una gestione attenta e basata sulla conoscenza, possiamo garantire che continuino a svolgere questo ruolo cruciale per le generazioni future.

AUTORI

* 1 - ALESSIA BONO, RENZO MOTTA
Università degli Studi di Torino, Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Ambientali (DISAFA)

* 2 - SEBASTIAN BROCCO, GIORGIO VACCHIANO
Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali. Produzione, Territorio, Agroenergia (DiSAA)

* 3 - LUCA NONINI, MARCO FIALA
Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali. Produzione, Territorio, Agroenergia (DiSAA)



APPENDICE

TABELLE DI COEFFICIENTI

Tipologia inventariale		BEF Biomassa epigea/ growing stock	Densità basale Peso secco/peso fresco	R Rapporto root/shoot	
Fustaie	peccete	1,29	0,38	0,29	
	abetine	1,34	0,38	0,28	
	laricete	1,22	0,56	0,29	
	pini montani	1,33	0,47	0,36	
	pini mediterranei	1,53	0,53	0,33	
	altre conifere	1,37	0,43	0,29	
	faggete	1,36	0,61	0,20	
	cerrete	1,45	0,69	0,24	
	altri querceti	1,42	0,67	0,20	
	altre latifoglie	1,47	0,53	0,24	
	subtotale	1,35	0,51	0,28	
	Cedui	faggete	1,36	0,61	0,20
		castagneti	1,33	0,49	0,28
carpineti		1,28	0,66	0,26	
altre quercete caducifoglie		1,39	0,65	0,20	
cerrete		1,23	0,69	0,24	
querceti sempreverdi		1,45	0,72	1,00	
altre latifoglie		1,53	0,53	0,24	
cedui coniferae		1,38	0,43	0,29	
subtotale		1,39	0,56	0,27	
Piantagioni	eucalipteti	1,33	0,54	0,43	
	altre latifoglie	1,45	0,53	0,24	
	pioppi	1,24	0,29	0,21	
	altre latifoglie	1,53	0,53	0,24	
	conifere	1,41	0,43	0,29	
	altre piantagioni	1,46	0,48	0,28	
	subtotale	1,36	0,40	0,25	
Formazioni protettive	formazioni rupestri	1,44	0,52	0,42	
	formazioni riparie	1,39	0,41	0,23	
	macchia	1,49	0,63	0,62	
	subtotale	1,46	0,56	0,50	
TOTALE	1,38	0,53	0,30		

TABELLA 1 - Biomass Expansion Factors, Basic Wood Density e Root:Shoot Ratio per le principali categorie forestali e forme di governo in Italia [VITULLO et al. 2007].

Tipologia inventariale	Relazioni C lettiera - C epigeo per ha	Relazioni C suolo - C epigeo per ha	
Fustaie	peccete	$y=0,0659 \cdot x+1,5045$	$y=0,4041 \cdot x+57,874$
	abetine	$y=0,0659 \cdot x+1,5045$	$y=0,4041 \cdot x+57,874$
	laricete	$y=0,0659 \cdot x+1,5045$	$y=0,4041 \cdot x+57,874$
	pini montani	$y=0,0659 \cdot x+1,5045$	$y=0,4041 \cdot x+57,874$
	pini mediterranei	$y=0,0659 \cdot x+1,5045$	$y=0,4041 \cdot x+57,874$
	altre conifere	$y=0,0659 \cdot x+1,5045$	$y=0,4041 \cdot x+57,874$
	faggete	$y=0,0299 \cdot x+9,3665$	$y=0,9843 \cdot x+5,0746$
	cerrete	$y=0,0299 \cdot x+9,3665$	$y=0,9843 \cdot x+5,0746$
	altri querceti	$y=0,0299 \cdot x+9,3665$	$y=0,9843 \cdot x+5,0746$
	altre latifoglie	$y=0,0299 \cdot x+9,3665$	$y=0,9843 \cdot x+5,0746$
Cedui	faggete	$y=0,0299 \cdot x+9,3665$	$y=0,3922 \cdot x+65,356$
	castagneti	$y=0,0299 \cdot x+9,3665$	$y=0,3922 \cdot x+65,356$
	carpineti	$y=0,0299 \cdot x+9,3665$	$y=0,3922 \cdot x+65,356$
	altre quercete caducifoglie	$y=0,0299 \cdot x+9,3665$	$y=0,3922 \cdot x+65,356$
	cerrete	$y=0,0299 \cdot x+9,3665$	$y=0,3922 \cdot x+65,356$
	querceti sempreverdi	$y=0,0299 \cdot x+9,3665$	$y=0,3922 \cdot x+65,356$
	altre latifoglie	$y=0,0299 \cdot x+9,3665$	$y=0,3922 \cdot x+65,356$
	cedui coniferae	$y=0,0659 \cdot x+1,5045$	$y=0,4041 \cdot x+57,874$
Piantagioni	eucalipteti	$y=0,0299 \cdot x+9,3665$	$y=0,3922 \cdot x+65,356$
	altre latifoglie	$y=0,0299 \cdot x+9,3665$	$y=0,3922 \cdot x+65,356$
	pioppi	$y=0,0299 \cdot x+9,3665$	$y=0,9843 \cdot x+5,0746$
	altre latifoglie	$y=0,0299 \cdot x+9,3665$	$y=0,9843 \cdot x+5,0746$
	conifere	$y=0,0659 \cdot x+1,5045$	$y=0,4041 \cdot x+57,874$
	altre piantagioni	$y=0,0165 \cdot x+7,3285$	$y=0,7647 \cdot x+33,638$
	formazioni rupestri	$y=0,0165 \cdot x+7,3285$	$y=0,7647 \cdot x+33,638$
Formazioni protettive	formazioni riparie	$y=0,0299 \cdot x+9,3665$	$y=0,9843 \cdot x+5,0746$
	macchia	$y=0,0299 \cdot x+9,3665$	$y=0,3922 \cdot x+65,356$

TABELLA 2 - Equazioni empiriche per il calcolo del carbonio stoccato nella lettiera e nel suolo (y) in funzione del carbonio epigeo (x) per le principali categorie forestali e forme di governo in Italia [VITULLO et al. 2007].

Governo	Categoria	a	v	k	y ₀
Fustaie	peccete	978,65	-0,28	0,01	0,06
	abetine	1.106,84	-0,25	0,02	0,03
	lariceti	446,19	0,49	0,03	0,22
	pinete montane	2.468,19	0,40	0,03	0,07
	pinete mediterranee	0,00	0,00	0,00	0,00
	altre conifere	1.564,83	-0,41	0,01	0,15
	faggete	1.268,40	-0,09	0,02	0,06
	cerrete	699,33	-0,54	0,01	0,94
	altri querceti	185,51	1,30	0,08	1,62
	altre latifoglie	1.539,30	-0,33	0,01	1,62
Cedui	faggete	549,11	0,03	0,03	0,31
	castagneti	834,70	0,00	0,04	4,11
	carpineti	132,25	-0,88	0,02	0,76
	altre quercete caducifoglie	427,06	-0,77	0,01	0,54
	cerrete	102,11	0,01	0,01	2,37
	querceti sempreverdi	0,00	0,00	0,00	0,00
	altre latifoglie	185,51	1,30	0,08	3,89
Piantagioni	pioppeti	586,86	0,24	0,17	4,17
	altre latifoglie	1.539,30	-0,33	0,01	1,62
	conifere	1.221,84	0,24	0,06	0,89
Altri	formazioni rupestri	1.126,27	-0,01	0,02	0,31
	formazioni riparie	1.139,69	0,03	0,02	0,53
	macchia	108,71	-0,73	0,04	0,01

TABELLA 3 - Coefficienti del modello For-Est per stimare l'incremento corrente i_c in funzione della provvigione y per le principali categorie forestali e forme di governo in Lombardia. L'equazione del modello è $i_c = y_0 + ky/v [1 - y/a]^v$.

Categoria forestale	Stock (tC/ha)	Sink (tC/ha per anno)
Boschi di larici e cembro	70,5	1,2
Boschi di abete rosso	101,9	2,4
Boschi di abete bianco	126,6	2,6
Pinete di pino silvestre e montano	57,6	1,2
Pinete di pino nero, laricio e loricato	79,3	2,3
Altri boschi di conifere, pure o miste	66,8	1,4
Faggete	85,3	2,1
Querceti di rovere, roverella e farnia	53,1	2,0
Cerrete, boschi di farnetto, fragno e vallonea	76,0	2,7
Castagneti	83,0	2,5
Ostietti, carpineti	36,1	1,3
Boschi igrofilii	41,6	1,9
Altri boschi caducifogli	52,7	2,1
Altri boschi di latifoglie e sempreverdi	62,9	1,0
Totale boschi alti	68,4	2,0
Pioppeti artificiali	17,7	3,4
Piantagioni di altre latifoglie	30,0	2,4
Piantagioni di conifere	110,7	4,0
Totale impianti di arboricoltura da legno	22,4	3,2

TABELLA 4 - Valori medi al 2015 di stock e sink di carbonio nella **biomassa arborea epigea** per le principali categorie forestali in Lombardia.



**Regione
Lombardia**



Il Progetto “USEFOL – Approcci innovativi per la valutazione della fornitura di servizi ecosistemici in foreste lombarde” è finanziato dalla Regione Lombardia (Progetti di ricerca in campo agricolo e forestale – BANDO 2018)

COORDINATORE

Dipartimento di Scienze Agrarie Forestali e Alimentari (DISAFA)



**UNIVERSITÀ
DI TORINO**



Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali - Produzione, Territorio e Agroenergia (DiSAA)



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI MILANO**



DiSAA
DIPARTIMENTO
di SCIENZE
AGRICOLE e
AMBIENTALI

fiper

FEDERAZIONE ITALIANA PRODUTTORI
DI ENERGIA DA FONTI RINNOVABILI



**Associazione Consorzi
Forestali della Lombardia**

Per maggiori informazioni visita il sito www.usefol.it



Progetto grafico Compagnia delle Foreste Srl - Arezzo

Stampato da Pixartprintig S.p.a. - Quarto d'Altino VE a Settembre 2023