Valorizzazione del Capitale Naturale e dei Servizi Ecosistemici: approccio generale e casi studio

di Claudia Gregori, Stefano Banini (CURSA)

Sommario

Introduzione 1
Obiettivo della Ricerca 2
Metodologia 2
Risultati e Discussione 2
La Valutazione Economica dei Servizi Ecosistemici 2
Benefici Economici degli Investimenti nella Natura 3
Valore economico e sociale delle Nature based Solution nella gestione idrica 6
Infrastrutture tecnologiche e Nature based Solutions: sinergie per la sicurezza idrica urbana 7
Aree protette e sviluppo locale: il potenziale economico del Forest Care 10
Gestione forestale sostenibile: Ritorni economici tra Economia circolare e crediti di Carbonio 11
Caso studio: Stockholm Biochar Project 13
Caso studio: Minneapolis Park and Recreation Board Planting Project 2024 15
Dalla valutazione al decision-making: il ruolo della tecnologia nella gestione del capitale naturale 16
Conclusioni 17
BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA 18

Introduzione

La crescente consapevolezza dei limiti del modello economico lineare, basato sullo sfruttamento intensivo delle risorse naturali, sta spingendo istituzioni, imprese e società civile a ripensare il rapporto tra economia e ambiente. Il capitale naturale, inteso come l'insieme degli ecosistemi e delle risorse naturali da cui derivano i beni e servizi fondamentali per il benessere umano, sta subendo un progressivo degrado. Questo fenomeno compromette la capacità della natura di fornire servizi ecosistemici (SE), ossia quei benefici, sia materiali che immateriali, che contribuiscono alla regolazione del clima, al supporto della produzione alimentare, alla garanzia della qualità ambientale, alla conservazione della biodiversità e al miglioramento della qualità della vita.

La sfida attuale consiste nel valorizzare tali servizi ecosistemici non solo dal punto di vista ecologico, ma anche in termini economici e sociali. Integrare la tutela del capitale naturale nelle decisioni politiche e aziendali non deve essere percepito come un costo, bensì come un'opportunità per

generare valore condiviso, promuovendo uno sviluppo economico più resiliente, inclusivo e sostenibile.

Obiettivo della Ricerca

L'obiettivo della presente ricerca è dimostrare, mediante un'analisi multidisciplinare di casi studio e modelli economici, che la valorizzazione del capitale naturale e dei servizi ecosistemici può generare benefici economici misurabili (in termini di PIL, occupazione e risparmi) e vantaggi immateriali legati al benessere sociale, alla salute, alla coesione territoriale e alla resilienza ecologica.

Metodologia

L'analisi condotta si basa su una revisione di articoli scientifici selezionati per la loro rilevanza nei settori della valutazione economica dei servizi ecosistemici, della governance delle risorse naturali e dell'applicazione di politiche ambientali innovative. I casi studio presi in esame coprono diverse tipologie di ecosistemi (quali foreste, bacini idrici, aree agricole e aree protette) e differenti scale di intervento (locale, nazionale e globale). Le metodologie applicate spaziano dal trasferimento di valore alla modellazione economica integrata, dall'analisi costi-benefici alle valutazioni di impatto socioeconomico.

Risultati e Discussione

La Valutazione Economica dei Servizi Ecosistemici

Nel lavoro di Brander et al., 2024 viene quantificato il valore economico dei servizi ecosistemici, sottolineando come la loro monetizzazione sia cruciale per comunicare il valore della natura in termini comprensibili ai decisori politici e agli attori economici. Gli autori presentano l'**Ecosystem Services Valuation Database (ESVD)**, uno strumento tecnologico che, rendendo i benefici offerti dalla natura visibili e quantificabili, si rivela utile per supportare le decisioni in materia di conservazione e ripristino degli ecosistemi, orientando la pianificazione territoriale e la gestione sostenibile delle risorse. Il database, istituito nel 2010 e aggiornato successivamente con il contributo di diverse istituzioni internazionali – tra cui FAO, ELD, UNED, Commissione Europea e varie Convenzioni delle Nazioni Unite (ad esempio la CBD) – mette oggi a disposizione un'interfaccia online pubblica e gratuita. In essa sono raccolte circa **9.400 stime economiche** provenienti da oltre **1.300 studi** e da più di trent'anni di ricerca accademica, elaborate attraverso metodi di valutazione primaria e trasferimenti di valore. Questo strumento, liberamente accessibile, è stato sviluppato con l'obiettivo di fornire informazioni solide e facilmente consultabili, così da favorire l'integrazione strutturale del valore dei servizi ecosistemici nei processi decisionali quotidiani di governi, imprese e cittadini. L'obiettivo ultimo è contribuire a **fermare la perdita di biodiversità e il degrado degli ecosistemi**.

Nella tabella seguente (Tabella 1) viene riportato un estratto del database, che presenta stime relative al valore economico di diversi servizi ecosistemici nei vari biomi terrestri. La valuta di riferimento utilizzata per il database ESVD è il dollaro internazionale (Int$), il quale rappresenta il valore del dollaro statunitense negli Stati Uniti in termini di potere d'acquisto.

L'ESVD rappresenta dunque uno strumento fondamentale per supportare le decisioni ambientali e orientare gli investimenti (DSS), colmando il divario tra scienza e politica e rendendo visibili i benefici economici sia ai decisori pubblici sia ai potenziali investitori.

Tuttavia, la valutazione economica dei servizi ecosistemici non può prescindere dall'integrazione con dati biofisici e sociali, condizione necessaria per garantire scelte equilibrate e rappresentative delle diverse dimensioni del capitale naturale.

Benefici Economici degli Investimenti nella Natura

Lo studio "Investing in nature can improve equity and economic returns", (Johnson et al., 2023) dimostra come le politiche che prevedono investimenti nella conservazione ambientale, se adeguatamente strutturate, possano portare a un aumento del prodotto interno lordo (PIL) e a una maggiore equità tra paesi. Il degrado del capitale naturale, infatti, genera ingenti perdite economiche, colpendo in modo più severo i paesi a basso reddito.

Lo studio applica un modello economico-ambientale integrato denominato GTAP-InVEST, il quale analizza le interazioni tra condizioni macroeconomiche, politiche governative e stato degli ecosistemi, valutando come queste dinamiche influenzino la fornitura di servizi ecosistemici e, di conseguenza, gli indicatori macroeconomici quali PIL, occupazione e commercio.

Il **GTAP-InVEST** combina due strumenti: il modello di equilibrio economico globale (**Global Trade Analysis Project - GTAP**) e il sistema di valutazione spaziale dei servizi ecosistemici (**InVEST - Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs**). Quest'ultimo, sviluppato dal Natural Capital Project, consente di mappare e quantificare i flussi di servizi ecosistemici in scenari alternativi, facilitando analisi costi–benefici e la definizione di priorità di intervento. In diversi contesti questa suite open source è stato applicata per supportare il greening delle città e la progettazione di infrastrutture verdi, mostrando la sua utilità operativa per i decisori politici (Hamel et al., 2021; *InVEST | Natural Capital Project*, s.d.). Nell'analisi presentata vengono considerati quattro servizi ecosistemici chiave: l'impollinazione delle colture da parte di impollinatori selvatici, la fornitura di legname dalle foreste, la pesca marina e il sequestro del carbonio.

Lo studio analizza gli impatti economici derivanti dall'applicazione di cinque differenti politiche ambientali:

- Eliminazione dei sussidi agricoli con compensazioni forfettarie ai proprietari terrieri (Subs Land);
- Eliminazione dei sussidi agricoli con reimpiego dei fondi per incrementare gli investimenti in ricerca e sviluppo agricolo (Sub Agricultural R&D);
- Implementazione di pagamenti per i servizi ecosistemici (PES) finanziati da trasferimenti internazionali dai paesi ad alto reddito a quelli a basso reddito (Global PES);
- Implementazione di PES a livello nazionale, con finanziamento a carico dei singoli Stati (National PES);
- Combinazione delle politiche di ricerca e sviluppo agricolo con il PES globale (Combined Policies).

Tabella 1 - Mean values (int$ 2020/ha/year) per ecosystem service biome combination

	Marine	Coral reefs	Coastal systems	Man-groves	Inland wetlands	Rivers and lakes	Tropical & sub-tropical forests	Temp-erate forest and woodland	Boreal and montane forests & woodland	Shrubland and shrubby woodland	Rangeland, natural grasslands & savannas	Polar-alpine	Intensive land uses	Urban and industrial areas
Food	71 (4)	741 (68)	2,398 (42)	6,791 (215)	612 (17)	364 (18)	76 (74)	98 (20)	355 (16)	32 (13)	474 (8)	684 (10)	1,409 (82)	1,043 (2)
Water	25 (1)		7,344 (6)	1,623 (3)	873 (8)	8,618 (28)	99 (11)	353 (35)	79 (2)	132 (1)	177 (4)	19 (4)	348 (12)	1,456 (2)
Raw materials	0.34 (1)	18,514 (4)	321 (17)	5,729 (114)	18 (56)	88 (8)	433 (82)	891 (32)	275 (34)	12 (35)	191 (16)	100 (11)	8,750 (73)	514 (3)
Genetic resources			11 (1)		229 (4)		508 (4)							
Medicinal resources							7 (54)		31 (1)	5.6 (4)	1.1 (1)	0.01 (1)	9.9 (3)	
Ornamental resources		34 (2)					0.29 (8)		675 (3)					
Air quality regulation			195 (8)	1,323 (2)	2,485 (9)		15 (1)	1,124 (302)	1,726 (1)		3.1 (8)	1.3 (1)	506 (7)	10,384 (93)
Climate regulation	183 (2)	2 (4)	111 (15)	1,375 (42)	185 (14)	236 (4)	748 (35)	475 (42)	1,425 (9)	54 (6)	414 (12)	671 (5)	515 (79)	870 (15)
Moderation of extreme events		14,369 (17)	7,472 (3)	14,388 (36)	4,969 (20)	8,077 (7)	77 (26)	39 (2)	711 (2)	42 (3)			607 (21)	8,991 (5)
Regulation of water flows			82 (1)	1.6 (2)	1,314 (9)	1,657 (4)	2.5 (7)	940 (3)		115 (1)	36 (6)		649 (27)	620 (4)
Waste treatment	111 (2)	4,078 (8)	1,980 (39)	3,189 (17)	2,603 (18)	2,189 (6)	11 (1)	10 (3)					965 (22)	98 (5)
Erosion prevention		3,418 (11)		7,030 (19)			47 (13)	138 (10)	67 (2)	21 (1)	26 (2)	32 (2)	39 (27)	
Maintenance of soil fertility		1,551 (3)	6,179 (2)	1,028 (5)	812 (1)	23 (2)	1.4 (5)	48 (8)	208 (2)		1,429 (2)	0.53 (3)	410 (79)	
Pollination							260 (67)	8,993 (4)		1 (1)	58 (2)		211 (34)	
Biological control						314 (1)	14 (1)			0.29 (1)			921 (51)	
Maintenance of life cycles		1,385 (2)	77 (7)	4,078 (10)	4,759 (2)	631 (4)	19 (1)					0.11 (1)	1.5 (4)	
Maintenance of genetic diversity		9,432 (5)	40 (1)	5,982 (10)	1,483 (4)		6.8 (4)	323 (4)			117 (6)			
Aesthetic information		5,580 (11)	723 (26)	334 (1)	493 (10)	1,214 (7)		35 (1)		33 (3)	2,114 (1)		86 (12)	17,505 (5)
Opportunities for recreation and tourism	2,022 (116)	6,271 (205)	5,563 (71)	6,118 (63)	12,899 (26)	2,347 (31)	37 (23)	227 (27)	6.7 (6)	56 (4)	238 (14)	3.1 (1)	216 (18)	19,972 (16)
Existence, bequest values	22 (9)	18,793 (108)	2,042 (4)	14,299 (16)	63 (9)	3,420 (2)	5,795 (33)	1,676 (9)		3.7 (3)	225 (4)	257 (1)	1,701 (16)	481 (6)
Inspiration for culture, art and design		917 (1)	0.09 (12)	3,890 (1)	101 (18)	2,672 (5)	2.2 (3)			67 (9)	284 (8)		14 (19)	
Spiritual experience						80 (1)								
Information for cognitive development	0.13 (1)	2,126 (12)	1,488 (12)	749 (6)	120 (3)	1,517 (4)	6.9 (2)	200 (1)		153 (2)	147 (4)	0.62 (1)	1.9 (4)	2,233 (4)
Sum	**2,434** (136)	**87,211** (461)	**36,026** (267)	**77,928** (562)	**34,018** (228)	**33,447** (132)	**8,166** (455)	**15,570** (503)	**5,559** (78)	**728** (87)	**5,934** (98)	**1,769** (41)	**17,360** (590)	**64,167** (160)

Tali scenari vengono confrontati con la prosecuzione delle attuali politiche (scenario Business As Usual - BAU).

I risultati (mostrati in figura 1) evidenziano che il mantenimento delle politiche attuali comporterà inevitabilmente una perdita di capitale naturale e di servizi ecosistemici, con conseguenze economiche significative: entro il 2030, il PIL globale risulterebbe inferiore di 75 miliardi di dollari rispetto a uno scenario in cui tali perdite non si verifichino. I paesi a basso reddito risulterebbero i più colpiti, subendo una perdita di benessere quasi tre volte superiore rispetto ai paesi ad alto reddito.

Le cinque politiche ambientali esaminate, al contrario, apporterebbero un incremento del PIL globale, con benefici economici stimati tra i 100 e i 200 miliardi di dollari annui entro il 2030. Tali politiche, inoltre, incrementano la capacità di sequestro del carbonio. Se si considera il valore sociale del carbonio (185 USD/tonnellata), i benefici economici si ampliano ulteriormente di 10–150 miliardi di dollari annui. Queste politiche si dimostrano particolarmente efficaci nel proteggere le aree ad alto stoccaggio di carbonio, limitando l'espansione agricola e salvaguardando habitat ed ecosistemi critici.

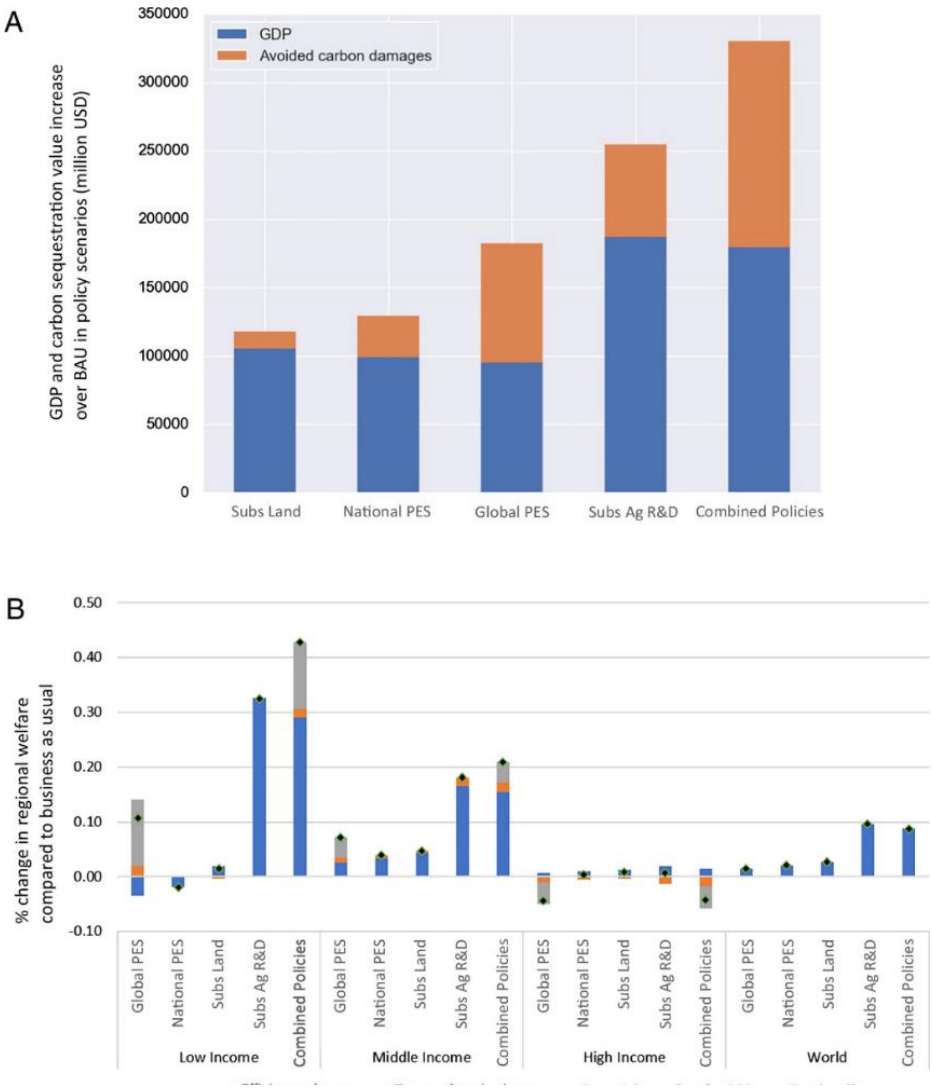


Figura 1 - Impatti economici delle diverse politiche ambientali

Gli autori sottolineano come tali stime potrebbero essere significativamente più elevate qualora venissero inclusi un numero maggiore di servizi ecosistemici, si considerassero le soglie di non ritorno ecologico e si riducessero le assunzioni di sostituibilità tra capitale naturale e altri fattori produttivi. Lo studio mette pertanto in evidenza la necessità di rafforzare i modelli economico-ambientali e di integrare in maniera strutturale le informazioni ambientali nei processi di analisi economica e nella definizione delle politiche pubbliche.

Valore economico e sociale delle Nature based Solution nella gestione idrica

Tutela ambientale e sviluppo economico non solo possono andare d'accordo, ma rappresentano la chiave per uno sviluppo sostenibile a lungo termine. La combinazione vincente risiede nell'integrazione sistematica delle Nature-Based Solutions (NbS) nelle politiche di pianificazione territoriale. Esse, infatti, non solo rappresentano strumenti strategici per affrontare le sfide ambientali e sociali contemporanee — come la gestione delle risorse idriche, l'adattamento ai cambiamenti climatici e la protezione della biodiversità — ma apportano benefici multipli sia per la società che per gli ecosistemi, con ricadute positive a livello economico, ambientale e sociale (García-Herrero et al., 2022; Morri & Santolini, 2021).

Numerosi studi scientifici confermano che la gestione sostenibile delle acque attraverso NbS e infrastrutture verdi non solo garantisce benefici economici consolidati nel lungo termine, ma risulta anche più apprezzata dalle comunità locali rispetto alle pratiche tradizionali. In Italia, i casi studio sulle zone umide artificiali ("constructed wetlands") mostrano rapporti costi/benefici (BCR) tra 4 e 10 e ritorni sull'investimento (ROI) tra 5 e 9, evidenziando come tali soluzioni possano offrire ritorni concreti grazie ai servizi ecosistemici generati, come la depurazione naturale delle acque e la valorizzazione del paesaggio(García-Herrero et al., 2022). Analogamente, nel bacino del Foglia (Marche), l'applicazione di NbS in ambito agroambientale ha prodotto un valore economico stimato di 0,35 €/m³ di acqua naturalmente restituita all'ambiente, contribuendo alla prevenzione del dissesto idrogeologico e al miglioramento della qualità delle acque (Morri & Santolini, 2021).

Reynaud et al, (2017) confermano e ampliano queste evidenze, mostrando come le infrastrutture verdi e multifunzionali, rispetto alle infrastrutture grigie tradizionali, siano maggiormente valorizzate dalla popolazione locale. L'analisi ex-post la costruzione del Gorla Maggiore Water Park ha infatti rivelato che gli utenti attribuiscono un valore superiore non solo agli aspetti economici e funzionali, ma anche agli impatti positivi sul paesaggio, sulla biodiversità e sulla qualità della vita. Questo maggiore apprezzamento sociale si traduce in un consenso più ampio verso interventi infrastrutturali che integrano componenti naturali, favorendo la sostenibilità ambientale e la resilienza del territorio. Tale preferenza sociale, combinata con la dimostrata efficacia economica e ambientale, suggerisce che le NbS rappresentano un modello di gestione idrica in grado di coniugare efficienza tecnica, sostenibilità e coesione sociale nel medio-lungo termine.

Inoltre, lo studio di (Keesstra et al., 2018) evidenzia il "superior effect" delle NbS nella gestione del terreno e del territorio: attraverso esempi pratici che includono costruzione di zone umide artificiali in vari contesti europei si dimostra che le NbS rappresentano soluzioni a lungo termine altamente cost-effective.

Tali interventi migliorano le funzioni ecosistemiche — dalla regolazione dell'acqua alla prevenzione dell'erosione — restituendo valore sociale e apportando benefici economici complessivi stimati tra i 1.5 e i 3 milioni di euro annui per bacini idrografici di medie dimensioni.

Il capitolo "Nature-Based Solutions: Opportunities and Challenges for Water Treatment" (Adeoba et al., 2025) evidenzia come le NbS si stiano affermando come valide alternative o complementi ai sistemi tradizionali di trattamento idrico. Rispetto alle infrastrutture grigie, le NbS offrono soluzioni meno energivore, più resilienti ai cambiamenti climatici e capaci di rigenerare gli ecosistemi locali. Tuttavia, la loro efficacia dipende dalla progettazione contestualizzata, dalla disponibilità di spazi e dalla presenza di normative adeguate. Tra le sfide principali vi sono la mancanza di standard prestazionali univoci e la difficoltà di integrare metriche ambientali ed economiche nei processi decisionali di scala territoriale (Adeoba et al., 2025).

Per superare questi ostacoli, strumenti come i Pagamenti per i Servizi Ecosistemici (PES) e i Green Water Credits stanno emergendo come leve efficaci per promuovere la gestione sostenibile delle risorse idriche. Nel bacino dell'Upper Tana (Kenya), l'adozione dei Green Water Credits ha permesso di ottenere ritorni economici fino a 10 volte superiori ai costi di investimento, dimostrando come meccanismi di compensazione tra attori upstream e downstream possano incentivare azioni di tutela ambientale e migliorare la qualità delle risorse idriche lungo l'intera filiera (Adeoba et al., 2025; Ndungu et al., 2023).

In conclusione, una gestione idrica basata su soluzioni nature-based rappresenta non solo una strategia sostenibile e resiliente, ma anche un'opportunità concreta per coniugare sviluppo economico, tutela ambientale e coesione sociale. Affinché questo approccio possa esprimere pienamente il proprio potenziale, è necessario favorire un'integrazione profonda tra pianificazione territoriale, strumenti finanziari innovativi e aggiornamenti normativi (Adeoba et al., 2025; García-Herrero et al., 2022; Morri & Santolini, 2021).

Infrastrutture tecnologiche e Nature based Solutions: sinergie per la sicurezza idrica urbana

Sebbene le infrastrutture tecnologiche per la gestione delle risorse idriche quali gli impianti di depurazione e di desalinizzazione siano spesso percepite come soluzioni costose e ad elevato consumo energetico, esse hanno dimostrato negli ultimi decenni un'efficace capacità di garantire la sicurezza idrica. In numerosi contesti urbani, le cosiddette infrastrutture "grigie" hanno consentito di affrontare situazioni di crisi idriche e di prevenire rilevanti impatti economici.

A Perth, in Australia, ad esempio, il cambiamento climatico la forte riduzione delle precipitazioni hanno reso non più affidabili dighe e falde superficiali come principali fonti di approvvigionamento. Per questo motivo, la Water Corporation ha ripensato il sistema idrico della città elaborando un piano decennale con l'obiettivo di rendere "drought-proof" l'area metropolitana entro il 2022. Nello specifico il programma ha coinvolto: impianti di desalinizzazione alimentati da energia rinnovabile, impianti di trattamento e riciclo dei reflui con lo scopo di fornire acqua riciclata di alta qualità alle industrie e un sistema di pozzi per sfruttare le falde profonde in modo da gravare meno sulle falde superficiali (*Water Forever, Whatever the Weather*, 2011).

Ad oggi il 47 % della fornitura idrica di Perth deriva da desalinizzazione, il 46 % da acque sotterranee e solo il 7 % da acque superficiali/dighe. Questo è un cambiamento radicale rispetto al passato, quando le dighe e le acque superficiali rappresentavano le fonti principali (Stone, 2017).

A Barcellona, invece, la gestione della siccità è diventata un laboratorio di innovazione guidato dall'Agència Catalana de l'Aigua (ACA), che ha avviato una trasformazione radicale del sistema idrico per ridurre la dipendenza dalle piogge. Se nel 2021 il 97% dell'approvvigionamento proveniva ancora da fiumi e falde, nel 2023 questa quota è scesa al 42%, mentre il 58% del fabbisogno è stato coperto da acqua desalinizzata e rigenerata (Agència Catalana de l'Aigua, 2025). L'impianto di El Prat de Llobregat ha svolto un ruolo centrale, garantendo circa un terzo dei consumi metropolitani e producendo acqua rigenerata per usi agricoli, industriali, ambientali e per il riuso potabile indiretto, tramite l'infiltrazione nel fiume Llobregat che alimenta l'impianto di potabilizzazione di Sant Joan Despí (March et al., 2023). Nel complesso, la strategia dell'ACA punta a costruire un modello autosufficiente, resiliente e meno dipendente dalle piogge, in cui la combinazione di desalinizzazione, riuso e gestione delle falde profonde e reti più efficienti rappresentano il pilastro della sicurezza idrica futura (Agència Catalana de l'Aigua, 2025).

Tuttavia, anche se tali esperienze dimostrano che le infrastrutture tecnologiche hanno contribuito in modo significativo alla sicurezza idrica urbana, la prospettiva futura risiede nella loro **integrazione con le Nature-Based Solutions (NbS)**. Le NbS non rappresentano alternative escludenti, ma strumenti complementari in grado di rafforzare l'efficacia, la fattibilità economica e la sostenibilità delle soluzioni tecnologiche (Seidu et al., 2025; Zhang et al., 2025). Come evidenziato nel report *Nature-Based Solutions for Wastewater Management* (UNEP Caribbean Environment Programme & The Nature Conservancy (TNC), 2021) i sistemi ibridi permettono di combinare la capacità di trattamento e la continuità operativa delle infrastrutture grigie con i benefici ecologici, economici e sociali derivanti dalle NbS, riducendo i costi operativi, migliorando la resilienza climatica e restituendo valore agli ecosistemi locali.

Diversi casi studio documentano l'efficacia di questo approccio integrato.

In California, il *Groundwater Replenishment System* della contea di Orange ricarica le falde con acqua depurata avanzata, sfruttando la capacità naturale degli acquiferi come serbatoi e riducendo la necessità di nuove dighe o invasi artificiali. Si tratta del più grande impianto al mondo di riuso potabile indiretto, in grado di produrre fino a 158 milioni di m^3 di acqua rigenerata, che viene utilizzata anche come barriera contro l'intrusione salina lungo la costa. Grazie a queste sinergie tra tecnologia e processi naturali, il GWRS è diventato un modello internazionale di sicurezza idrica urbana, dimostrando come l'integrazione di infrastrutture grigie e NbS possa rappresentare la chiave per la resilienza delle grandi aree metropolitane (Orange County Water District (OCWD), 2025). Ad Haiti, invece, presso il *Caracol Industrial Park*, è stato introdotto un sistema ibrido per trattare i reflui derivanti dalle attività tessili. Qui un impianto meccanico di trattamento è stato affiancato da lagune di stabilizzazione e zone umide artificiali, progettate per ridurre l'impatto degli scarichi sul fiume Trou du Nord e, in ultima istanza, sulla Baia di Caracol.

L'iniziativa ha contribuito a generare circa 9.000 posti di lavoro, mostrando l'interconnessione tra investimenti infrastrutturali, sviluppo economico e benefici ambientali (UNEP Caribbean Environment Programme & The Nature Conservancy (TNC), 2021). Una struttura simile è il Dunns River Falls and Park una delle attrazioni turistiche più visitate dell'isola. Il parco rappresenta un sistema ibrido composto da septic tank (fosse settiche) e reed beds (letti filtranti vegetati con canne palustri) che consente di trattare reflui turistici a costi contenuti e con maggiore accettabilità sociale.

Questo approccio ha permesso di garantire un trattamento efficace con costi di costruzione e di gestione contenuti, senza la necessità di alimentazione elettrica continua (UNEP Caribbean Environment Programme & The Nature Conservancy (TNC), 2021). Infine, in Repubblica Domenicana, a Santiago, il programma promosso dal Yaque del Norte Water Fund (Repubblica Dominicana) ha installato 16 zone umide artificiali collegate al sistema fognario urbano, che da solo era in grado di gestire solo il 20% delle acque reflue prodotte nella città di Santiago, trattando oltre 250.000 m^3/anno di reflui con una riduzione media del carico di inquinanti organici del 85-90% secondo i dati degli ultimi monitoraggi e generando benefici ambientali addizionali (UNEP Caribbean Environment Programme & The Nature Conservancy (TNC), 2021). Questi esempi mostrano come i sistemi ibridi possano costituire una risposta strutturale e resiliente all'emergenza idrica, coniugando efficienza tecnica, benefici ecosistemici e coesione sociale.

Parallelamente, sebbene energivore e potenzialmente impattanti, le infrastrutture tecnologiche possono fungere da **motori di ecosistemi verdi rigenerativi**, alimentando con acque trattate boschi urbani, parchi e infrastrutture verdi. In questa prospettiva, il ciclo idrico assume una dimensione circolare e rigenerativa, trasformando i sistemi tecnologici in leve per la valorizzazione del capitale naturale.

Esperienze in diversi contesti urbani confermano questo potenziale. A Madrid e Barcellona l'impiego di acque depurate per l'irrigazione di parchi e aree verdi pubbliche ha ridotto i prelievi da fonti convenzionali, contribuendo a migliorare la resilienza urbana (Angelakis & Snyder, 2015). A Milano il Parco Nord utilizza le acque trattate dall'impianto di Niguarda-Bresso per sostenere la crescita di oltre un milione di alberi, con effetti positivi sul microclima, sulla qualità dell'aria e sulla capacità di assorbimento della CO_2(Gruppo CAP, 2022). A Panaji, in India, l'impiego degli effluenti trattati per l'irrigazione di parchi e giardini ha favorito un incremento della copertura vegetale, con conseguente intensificazione dei processi di evapotraspirazione e ombreggiamento.

Secondo le stime riportate, tali dinamiche hanno determinato una riduzione della temperatura superficiale urbana (LST) compresa tra 3 e 4 °C, evidenziando come l'utilizzo delle acque rigenerate possa costituire una misura efficace di mitigazione dell'effetto isola di calore urbano.(Ramaiah et al., 2022). Ancora a Madrid, studi empirici hanno dimostrato che l'uso continuativo di acque depurate per l'irrigazione dei parchi urbani modifica le proprietà fisiche del suolo (Zalacáin et al., 2019a) e può comportare accumuli salini in suoli e piante (Zalacáin et al., 2019b) effetti che, se gestiti correttamente, consentono di mantenere vitale la vegetazione e di garantire servizi ecosistemici essenziali quali raffrescamento urbano e miglioramento della qualità dell'aria.

A Los Angeles, analisi condotte mediante telerilevamento e modellazione microclimatica hanno evidenziato come le aree urbane irrigate registrino una riduzione delle temperature superficiali fino a 3,2 K rispetto a quelle non irrigate.

Tale raffrescamento, attribuibile all'intensificazione dei processi di evapotraspirazione di suoli e vegetazione, si manifesta con particolare rilevanza nei quartieri ad alta densità edilizia, contribuendo a mitigare l'intensità dell'effetto isola di calore. Questo risultato è stato reso possibile dal ricorso diffuso alle acque riciclate per usi paesaggistici, che ha garantito la continuità delle pratiche irrigue anche in condizioni di scarsità idrica (Reyes et al., 2018).

In prospettiva, questa combinazione di impianti tecnologici e NbS consente di sviluppare un modello di **ciclo chiuso dell'acqua**, in cui i risparmi generati dalla sicurezza idrica e dalla prevenzione dei danni economici vengono reinvestiti nella rigenerazione ecologica, attivando un circolo virtuoso capace di coniugare sicurezza idrica, sostenibilità economica e resilienza ambientale.

Aree protette e sviluppo locale: il potenziale economico del Forest Care

Numerosi studi empirici dimostrano come le aree naturali protette, come i Parchi Nazionali italiani, possano generare impatti socioeconomici vantaggiosi per i comuni ospitanti, promuovendo il benessere economico senza compromettere la tutela ambientale. Le ricerche di (D'Alberto et al., 2023, 2024) evidenziano come la presenza di un parco nazionale possa tradursi in un incremento del reddito pro capite, nella crescita delle unità produttive legate al turismo e nell'aumento dell'occupazione locale, specie nei settori legati ai servizi ecosistemici e al turismo sostenibile.

Tuttavia, questi benefici non emergono in maniera automatica né uniforme su tutto il territorio: come sottolineato da (Paletto et al., 2024), l'efficacia delle aree naturali nel sostenere lo sviluppo socio-economico locale dipende fortemente dalla capacità di integrare le politiche di conservazione con strategie di sviluppo locale mirate, capaci di valorizzare le risorse endogene e incentivare la partecipazione attiva delle comunità locali.

In quest'ottica, pratiche di turismo esperienziale come il **forest bathing** (bagno di foresta) e, più in generale, le iniziative di **forest care** si configurano come strumenti strategici per accrescere il valore economico di un'area protetta, stimolando forme di fruizione consapevole e sostenibile. Come dimostrato da (Visintin et al., 2024)e da (Paletto et al., 2024), il forest bathing non solo valorizza il patrimonio naturale dal punto di vista del benessere psicofisico dei visitatori, ma può generare significativi ritorni economici per i territori attraverso l'incremento della domanda di servizi turistici qualificati, favorendo la destagionalizzazione dei flussi turistici e la nascita di nuove professionalità legate alla gestione delle esperienze immersive nella natura.

(Doimo et al., 2021) evidenziano come anche i boschi urbani e periurbani possano essere inclusi in percorsi di forest bathing e forest care, amplificando le ricadute economiche su aree che solitamente non beneficiano dei tradizionali flussi turistici naturalistici, e migliorando la qualità della vita dei residenti. Tuttavia, emerge un'importante criticità: molte iniziative di forest care sono attualmente promosse da attori privati (associazioni, imprese, cooperative sociali) in assenza di una strategia pubblica coordinata che ne riconosca e valorizzi il ruolo a livello di governance locale.

Questo scenario evidenzia la necessità di politiche pubbliche più incisive, capaci di integrare le pratiche di forest care nei piani di sviluppo territoriale, favorendo sinergie tra il settore pubblico e privato.

È quindi essenziale che la pianificazione territoriale promuova forme di ecoturismo esperienziale e inclusivo, supportate da investimenti in infrastrutture, formazione professionale e reti di cooperazione tra enti locali, operatori turistici e stakeholders ambientali, affinché i benefici delle aree protette e delle pratiche come il forest bathing e il forest care si traducano in reali opportunità di sviluppo locale sostenibile.

Gestione forestale sostenibile: Ritorni economici tra Economia circolare e crediti di Carbonio

La **gestione forestale sostenibile** si configura come uno strumento chiave per conciliare la tutela degli ecosistemi boschivi con la generazione di benefici economici, sia diretti sia indiretti.

Tra i vantaggi diretti di una gestione attiva meritano attenzione quelli derivanti dall'applicazione di pratiche di **economia circolare** al settore forestale: il riutilizzo dei residui della lavorazione del legno e degli scarti di manutenzione del bosco consentono di produrre bioprodotti a elevato valore aggiunto, riducendo al contempo sprechi e ottimizzando la redditività delle filiere locali. Un caso esemplificativo è rappresentato dai **materiali compositi a base di legno e plastica riciclata** (Wood–Plastic Composites, WPC), che garantiscono un risparmio sui costi dei materiali pari a circa 3,99 €/m³ rispetto ai tradizionali pannelli di truciolato, promuovendo così modelli produttivi circolari e competitivi (Osvaldová & Potkány, 2024).

Accanto a questi, anche il **biochar,** un carbone vegetale ottenuto attraverso la pirolisi di residui legnosi e scarti di potatura, rappresenta un materiale innovativo, capace di stoccare carbonio in forma stabile e di migliorare la qualità dei suoli, aumentandone la fertilità, la ritenzione idrica e la resilienza della vegetazione. Inoltre, la sua commercializzazione sui mercati volontari del carbonio può generare ricavi economici da reinvestire nella stessa gestione degli spazi verdi che forniscono la biomassa di partenza, chiudendo il ciclo in un'ottica pienamente circolare (El Afandi et al., 2025). Occorre altresì considerare che durante il processo di pirolisi, oltre al biochar vengono generati anche gas e oli pirolitici, che possono essere sfruttati per la produzione di energia o per alimentare sistemi di riscaldamento urbano, contribuendo così a incrementare ulteriormente i benefici ambientali ed economici associati a questo approccio (Varkolu et al., 2025).

Oltre ai vantaggi diretti, la gestione forestale sostenibile può produrre anche **ritorni economici indiretti**, grazie a strumenti di mercato pensati per premiare chi fornisce servizi ecosistemici. In questo quadro, due meccanismi assumono particolare rilievo: i **Payments for Ecosystem Services (PES)** e i **crediti di carbonio**. I **PES** sono schemi volontari attraverso cui i beneficiari dei servizi ecosistemici – come la regolazione del ciclo idrico, la conservazione della biodiversità o lo stoccaggio di carbonio – riconoscono un compenso a chi gestisce il bosco affinché esso continui a garantire o potenziare tali funzioni. A livello europeo questo strumento è considerato una delle innovazioni più promettenti per sostenere la gestione forestale multifunzionale, poiché consente ai proprietari di diversificare le entrate e, al tempo stesso, di favorire pratiche più sostenibili e resilienti (Viszlai et al., 2016).

I **crediti di carbonio**, invece, possono essere scambiati sia nei mercati volontari sia in quelli regolamentati. La loro vendita genera risorse economiche significative, che possono contribuire a coprire i costi di manutenzione dei boschi e a incentivare ulteriori azioni di conservazione e di mitigazione climatica.

La rilevanza economica della gestione forestale sostenibile è ampiamente documentata in letteratura. Numerosi studi hanno dimostrato che interventi di gestione forestale attiva, quali ad esempio i diradamenti selettivi, incrementano la capacità degli ecosistemi forestali di erogare servizi ecosistemici valorizzabili economicamente. Un'analisi condotta in un bosco periurbano di pino nero dell'Italia centrale ha, ad esempio, quantificato benefici annuali pari a **223,3 €/ha derivanti dalla produzione di bioenergia, 231,9 €/ha dai servizi ricreativi e 36,2 €/ha dal sequestro di carbonio**, evidenziando come pratiche gestionali sostenibili possano generare ritorni significativi anche in contesti prossimi alle aree urbane (Paletto et al., 2017).

In una meta-analisi condotta da (Taye et al., 2021) si stima che il valore annuo dei servizi ecosistemici forestali, tra cui il sequestro di CO_2, la regolazione del ciclo idrologico e la protezione del suolo, può oscillare tra **1.500 e 7.000 USD/ha/anno**, in funzione delle tipologie forestali e delle condizioni ecologiche.

La ricerca più recente si è inoltre concentrata sulle strategie di compensazione economica mirate a incentivare la gestione orientata al sequestro di carbonio. In uno studio sui programmi di carbon sink forestali a base di larice in Gansu (Cina nord-occidentale), (Chang et al., 2022) hanno stimato un compenso ottimale pari a **157,7 yuan (circa 21,5 USD)** per tonnellata di CO_2 sequestrata. Tali risultati evidenziano come schemi di eco-compensazione calibrati sulle effettive performance ecologiche possano rappresentare strumenti efficaci per promuovere pratiche di riforestazione e gestione sostenibile.

Anche il tema della "carbon additionality" delle foreste produttive (working forests) è stato recentemente indagato: secondo (Mei et al., 2025), la gestione attiva dei boschi da lavoro può incrementare significativamente la capacità di sequestro di carbonio rispetto scenari di non intervento. Secondo i loro modelli, la carbon additionality netta delle foreste gestite risulta superiore di circa **2-3 tCO_2/ha/anno** rispetto alle foreste lasciate a evoluzione naturale, rafforzando la tesi secondo cui la gestione forestale attiva, se orientata alla sostenibilità, può offrire benefici climatici tangibili, oltre a ritorni economici attraverso i mercati dei crediti di carbonio.

In sintesi, una gestione forestale sostenibile integrata con modelli di economia circolare e strumenti di valorizzazione dei servizi ecosistemici come i crediti di carbonio, offre un doppio vantaggio: genera profitti diretti attraverso la produzione di materiali innovativi e bioenergia, e allo stesso tempo garantisce ritorni indiretti legati alla fornitura di servizi ecosistemici, configurandosi come un modello efficace di bioeconomia rigenerativa.

Caso studio: Stockholm Biochar Project

Lo *Stockholm Biochar Project* è considerato un modello pionieristico a livello internazionale per l'impiego del biochar come *urban nature-based solution.* Avviato nel 2015 grazie a un finanziamento del programma europeo Climate-KIC e al sostegno della città di Stoccolma il progetto si fonda su un'idea tanto semplice quanto innovativa: trasformare i residui provenienti dalle potature e dalla manutenzione del verde urbano, insieme ad altri scarti organici, in biochar attraverso processi di pirolisi. Tale approccio consente di ottenere quattro benefici simultanei che contribuiscono a rafforzare la sostenibilità economica del sistema:

- L'azzeramento delle emissioni di CO_2 che altrimenti si sarebbero generate dalla decomposizione naturale di questi materiali (Stockholm Biochar Project, 2019);
- La produzione di un ammendante carbonioso stabile che, una volta applicato nei suoli urbani (aiuole, alberature, tetti verdi), ne può migliorare la fertilità, la capacità di trattenere acqua e la resilienza al calore (Stockholm Biochar Project, 2019);
- La generazione di energia termica utilizzata nella rete di teleriscaldamento cittadina (Stockholm Biochar Project, 2019);
- La riduzione della produzione di rifiuti con un conseguente risparmio sui costi di stoccaggio e smaltimento grazie alla valorizzazione dei residui verdi e organici che, anziché essere smaltiti come scarti, vengono trasformati in una risorsa a valore aggiunto, in linea con i principi dell'economia circolare (Azzi et al., 2019).

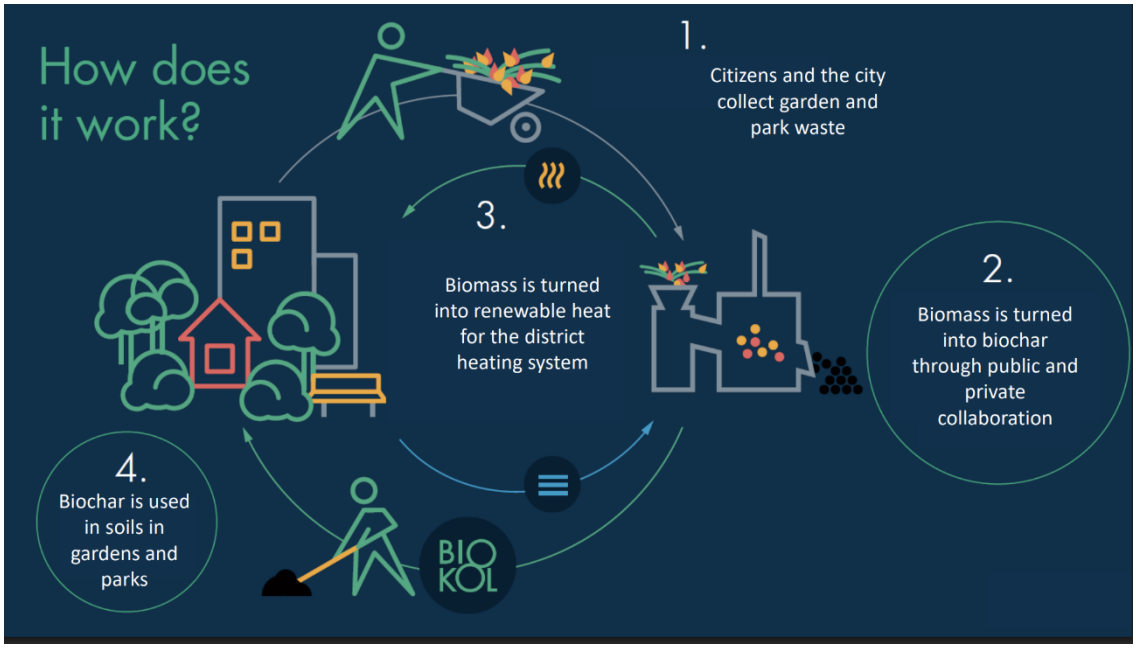


Figura 2 - Ciclo di trasformazione dei residui verdi urbani in biochar e calore rinnovabile (Fonte: Stockholm Biochar Project, 2019)

In aggiunta, il sequestro stabile del carbonio ottenuto tramite la produzione di biochar ha reso possibile la creazione di **crediti di rimozione del carbonio**, venduti sul mercato volontario e capaci di generare nuove entrate economiche a sostegno della gestione del verde urbano.

Questo aspetto ha attirato l'attenzione internazionale poiché i ricavi derivati della vendita dei crediti di carbonio e dell'energia termica, insieme ai risparmi sui costi di smaltimento dei rifiuti verdi, vengono reinvestiti per sostenere il progetto stesso: tali entrate permettono di coprire non solo le spese di gestione e manutenzione (O&M) dell'impianto di pirolisi, ma anche i costi operativi legati alla raccolta della biomassa e alla cura degli spazi verdi cittadini (Azzi et al., 2019).

Non a caso, lo *Stockholm Biochar Project* è stato presentato come esempio replicabile in altre città, e infatti ha ispirato programmi analoghi a Helsinki, Amburgo, Darmstadt e Cincinnati.

Tra i principali vantaggi derivanti dall'uso del biochar si possono evidenziare:

- **Miglioramento dei suoli agricoli e urbani**: aumento della fertilità, della capacità di ritenzione idrica e della crescita e sopravvivenza della vegetazione, rafforzandone al contempo la resilienza agli stress climatici (ondate di calore, siccità ecc…) (Azzi et al., 2019; Varkolu et al., 2025);
- **Risanamento dei suoli contaminati** mediante immobilizzazione di inquinanti organici e inorganici, inclusi metalli pesanti e idrocarburi policiclici aromatici (Varkolu et al., 2025);
- **Sequestro stabile del carbonio** (*carbon sink*), che consente di ridurre in maniera significativa la concentrazione di CO_2 atmosferica e di generare crediti di carbonio con valore economico sul mercato volontario (Azzi et al., 2019; Varkolu et al., 2025);
- **Trattamento delle acque reflue e miglioramento della gestione delle acque piovane,** tramite adsorbimento e fissazione di contaminanti, nutrienti e metalli pesanti, migliorando la qualità dell'acqua e la capacità del suolo di intercettare il deflusso superficiale(Stockholm Biochar Project, 2019; Varkolu et al., 2025);
- **Recupero energetico**, poiché la pirolisi produce anche syngas e bio-olio, che possono essere utilizzati sia per la generazione di energia sia nei sistemi di teleriscaldamento urbano (Stockholm Biochar Project, 2019);
- **Supporto catalitico nella produzione di biocarburanti**, con impieghi come catalizzatore o carrier nella sintesi di biodiesek e bio-olio (Varkolu et al., 2025);
- **Dispositivi di accumulo energetico:** grazie alle sua caratteristica porosità può migliorare la capacità di accumulare energia elettrice e quindi essere impiegato nella produzione di supercondensatori e batterie agli ioni di litio o sodio (Varkolu et al., 2025);
- **Altre applicazioni emergenti:** integrazione nei materiali da costruzione per migliorarne l'isolamento termico e ridurne il peso, integrazione nei fertilizzanti a lento rilascio e impiego come vettore per microrganismi benefici (Plant Growth Promoting Rhizobacteria, PGPR) che favoriscono la crescita delle piante e la salute del suolo (Varkolu et al., 2025).

Da questa vasta gamma di applicazioni emerge come progetti di questo tipo non debbano essere valutati solo per i benefici ambientali, ma anche per la loro capacità di generare valore economico stabile, condizione fondamentale per garantire la manutenzione e la replicabilità delle *nature-based solutions* nel tempo (Azzi et al., 2021).

In sintesi, il progetto di Stoccolma non è solo una tecnologia ambientale, ma un nuovo modello di economia circolare urbana: riduce i rifiuti, cattura carbonio, rafforza la salute degli spazi verdi e crea entrate economiche che rendono possibile autosostenere la gestione e la manutenzione delle aree verdi urbane e di altre nature-based solutions, attraverso la valorizzazione dei residui forestali e la generazione di crediti di carbonio (Azzi et al., 2019, 2021; Stockholm Biochar Project, 2019).

Caso studio: Minneapolis Park and Recreation Board Planting Project 2024

Il **Minneapolis Park and Recreation Board Planting Project 2024** rappresenta un esempio concreto di come un ente municipale possa utilizzare il meccanismo dei crediti di carbonio per finanziare la piantumazione e la manutenzione del verde urbano, riducendo così la dipendenza dai fondi pubblici ordinari.

Il progetto MPRB 2024, registrato sotto il protocollo *City Forest Credits* e inserito nel più ampio *Tree Carbon Offset Program*, è il quarto della serie annuale sviluppata in partnership tra Green Cities Accord (GSA), un'organizzazione non governativa che promuove infrastrutture verdi urbane e resilienza climatica, e il Minneapolis Park and Recreation Board Planting (MPRB). Tutti i progetti della serie (MPRB 2021, 2022, 2023 e 2024) fanno parte di un'iniziativa più ampia, nota come *Twin Cities Climate Resiliency Initiative*, un partenariato pubblico-privato nato per affrontare gli impatti dei cambiamenti climatici e per espandere in modo significativo la copertura arborea urbana a Minneapolis (*Minneapolis Park and Recreation Board Planting Project 2024*, 2025) .

Con una durata contrattuale di 26 anni, il progetto assegna al Minneapolis Park and Recreation Board, in qualità di *Tree Owner*, la responsabilità sia della messa a dimora di 6.576 nuovi alberi all'interno di parchi, bordure stradali e altre aree pubbliche della città, sia la loro cura e manutenzione a lungo termine. Parallelamente, la Green Cities Accord, in qualità di *Project Operator*, ha seguito la validazione, la registrazione e la vendita dei crediti di carbonio generati. Questi crediti corrispondono alla CO_2 sequestrata dagli alberi nel corso del loro ciclo di vita e possono essere acquistati da aziende e privati interessati a compensare le proprie emissioni. I proventi derivanti dalla loro vendita vengono reinvestiti per l'80% direttamente nelle attività di piantumazione e manutenzione del verde, garantendo così la sostenibilità economica dell'intero progetto(*Minneapolis Park and Recreation Board Planting Project 2024*, 2025)

Oltre al sequestro di carbonio, il progetto genera anche una serie di co-benefici ambientali, riconducibili ai servizi ecosistemici forniti dagli alberi urbani. Tra questi vi sono la riduzione dell'effetto isola di calore, il miglioramento della qualità dell'aria, il risparmio energetico legato all'ombreggiamento degli edifici e l'intercettazione dell'acqua piovana. Secondo le valutazioni condotte da *City Forest Credits*, il valore economico complessivo di questi servizi supera i 470.000 dollari all'anno (*Minneapolis Park and Recreation Board Planting Project 2024*, 2025).

In questa prospettiva, quindi, il MPRB non solo contribuisce agli obiettivi climatici globali (Obiettivi di Sviluppo Sostenibile, in particolare OSS 3, 11 e 13) ma si configura come un modello innovativo di economia circolare urbana in cui gli alberi diventano al tempo stesso infrastrutture verdi, strumenti di mitigazione climatica e risorsa finanziaria per sostenere la manutenzione del patrimonio naturale della città(*Minneapolis Park and Recreation Board Planting Project 2024*, 2025).

Un modello di questo tipo potrebbe risultare interessante anche nel contesto italiano, dove le imprese sono sempre più chiamate ad allinearsi ai criteri **ESG** (*Environmental, Social, Governance*), che guidano le strategie aziendali verso pratiche sostenibili dal punto di vista ambientale, sociale e gestionale.

Con l'entrata in vigore della nuova direttiva europea **CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive, 2022/2464/UE)** sulla rendicontazione di sostenibilità, l'acquisto di crediti di carbonio generati da iniziative urbane – come programmi di piantumazione e gestione del verde cittadino – potrebbe costituire per le aziende uno strumento tangibile per attestare il proprio impegno ambientale, contribuendo nel contempo al finanziamento della manutenzione degli spazi verdi pubblici.

Per le amministrazioni locali ciò significherebbe avere accesso a risorse aggiuntive da destinare non solo alla cura del verde, ma anche allo sviluppo di ulteriori **nature-based solutions**, favorendo così l'incontro tra obiettivi climatici e sostenibilità economica, e rafforzando la collaborazione tra settore pubblico e privato all'interno di un modello di **economia circolare urbana** (*Direttiva - 2022/2464 - IT - Direttiva CSRD - EUR-Lex*, s.d.; «ESG», 2025) .

Dalla valutazione al decision-making: il ruolo della tecnologia nella gestione del capitale naturale

Oltre all'ESVD e InVEST esistono anche altre piattaforme tecnologiche in grado di trasformare dati ambientali in indicatori e mappe utili per la pianificazione ambientale e per le scelte di investimento. Tra queste la piattaforma open source di modellazione integrata **AIRES for SEEA** (Artificial Intelligence for Ecosystem Accounting) sviluppata in collaborazione con le Nazioni Unite, che permette, secondo il quadro SEEA-EA, di misurare, registrare e integrare nei conti economici ufficiali il valore e lo stato degli ecosistemi, integrando dati complessi in un formato accessibile ai decisori (*ARIES per SEEA | Sistema di contabilità economica ambientale*, s.d.).

Un altro strumento consolidato è **Co$ting Nature**, sistema web-based per misurare il capitale naturale, analizzare i servizi ecosistemici forniti dalla natura, identificare i benefici di tali servizi e valutare gli effetti dell'intervento umano (Mulligan & van Soesbergen, 2017). Tale strumento è stato usato anche per la valutazione degli impatti di diversi scenari di uso del suolo, con applicazioni pratiche in materia di gestione del rischio idro-climatico e pianificazione di Nature-based Solutions (Prybutok et al., 2021).

Accanto a queste piattaforme sono disponibili modelli ambientali specifici che possono supportare la pianificazione territoriale. Tra tutti i modelli esistenti i modelli di chioma ad esempio, sono in grado di calcolare i servizi di purificazione dell'aria e più in generale i servizi ecosistemici forniti dal verde.

Nel dettaglio questi modelli utilizzano variabili biometriche, come il Leaf Area Index (LAI) o le dimensioni della chioma arborea, e variabili ambientali come input di modelli empirici o semi-empirici per simulare i processi di sequestro di anidride carbonica e inquinanti atmosferici da parte delle specie arboree. Tra questi quelli maggiormente utilizzati sono il modello EMEP/MSC-W (Simpson et al., 2012) e il modello UFORE (i-Tree)(Nowak & Crane, 2000).

Il modello **EMEP/MSC-W** è un modello di trasporto chimico, fondamentale per le politiche europee sull'inquinamento atmosferico. Opera su scala regionale (griglia 50×50 km) stimando la deposizione e la rimozione degli inquinanti, da parte di suolo e vegetazione, in base a condizioni ambientali.

Il software **i-Tree**, una suite di programmi informatici open source pubblicata per la prima volta nel 2006 e ampiamente utilizzata a livello internazionale, operando a livello locale, permette di quantificare e monetizzare i benefici ambientali, sociali ed economici delle foreste urbane e periurbane, fornendo dati utili per orientare strategie di gestione e investimenti nel verde urbano (Nowak et al., 2016). Il modello AIRTREE (Fares et al., 2019) è invece specificamente sviluppato per la stima del sequestro di anidride carbonica e altri inquinanti da parte delle foreste in ambiente Mediterraneo. Esso, pertanto, consente di valutare i benefici ambientali degli alberi urbani, in particolare in termini di qualità ambientale e condizioni microclimatiche.

Oltre agli strumenti già citati, la ricerca accademica mostra chiaramente che strumenti tecnologici avanzati rappresentano leve cruciali per accelerare la transizione verso modelli sostenibili. Per esempio, il concetto di **"twin transition"** evidenzia come la convergenza tra trasformazione digitale e verde possa generare sinergie virtuose: soluzioni come smart grid, sensori IoT in agricoltura di precisione e smart city permettono di migliorare l'efficienza energetica, ridurre emissioni e aumentare la resilienza ambientale (Knell, 2026).

In questa prospettiva, la letteratura scientifica più recente mostra che la **digitalizzazione e l'innovazione tecnologica** sono motori centrali per il miglioramento della qualità ambientale e la valorizzazione economica del capitale naturale. Ad esempio, (Liu & Imran, 2024) dimostrano come l'integrazione tra digitalizzazione e risorse naturali favorisca resilienza e competitività, contribuendo a una governance più sostenibile. Parallelamente, (Popescu et al., 2024) evidenziano come **AI e IoT** possano rivoluzionare il monitoraggio ambientale attraverso sensori intelligenti e algoritmi predittivi, rendendo possibile una gestione proattiva e basata sui dati di inquinamento atmosferico, idrico e del suolo. Infine,(Hamdouna & Khmelyarchuk, 2025), in una systematic review, confermano che le **innovazioni tecnologiche** – dall'Industry 4.0 all'economia circolare – migliorano le performance operative, ambientali ed economiche delle imprese, consolidando il legame tra competitività e sostenibilità.

Queste evidenze dimostrano come gli strumenti digitali, oltre a fungere da **Decision Support Systems (DSS)**, rappresentino infrastrutture strategiche per rendere i servizi ecosistemici **visibili, monetizzabili e integrabili** nei processi decisionali di governi, imprese e comunità. In tal modo, la tecnologia si configura come un elemento imprescindibile per una pianificazione territoriale evoluta, una governance ambientale sostenibile e, più in generale, per la valorizzazione economica e sociale del capitale naturale.

Conclusioni

La ricerca conferma che la valorizzazione economica del capitale naturale e dei servizi ecosistemici non rappresenta soltanto una necessità etica ed ecologica, ma anche una leva strategica per la competitività economica e la resilienza sociale dei territori. Integrare il valore della natura nelle decisioni politiche e aziendali consente di orientare gli investimenti verso modelli di sviluppo più equilibrati e sostenibili, riducendo le disuguaglianze e migliorando il benessere collettivo.

Le **Nature-Based Solutions**, le pratiche di **forest care**, la gestione forestale sostenibile e i meccanismi di mercato per la valorizzazione dei servizi ecosistemici (come i **PES** e i **crediti di carbonio**) rappresentano strumenti concreti per generare valore condiviso. Tuttavia, per tradurre il potenziale teorico in risultati reali e tangibili è necessario un cambio di paradigma nelle politiche pubbliche, nella pianificazione territoriale e nei modelli di governance, cambio che deve essere accompagnato da incentivi normativi e finanziari adeguati.

In questo quadro, la ricerca ha messo in evidenza anche il ruolo sempre più cruciale delle **tecnologie digitali e dei sistemi informativi avanzati**. Gli strumenti tecnologici consentono di rendere visibili e quantificabili i benefici offerti dagli ecosistemi, trasformando dati complessi in informazioni utili per la pianificazione e per la definizione delle priorità di investimento. Più in generale, la convergenza tra digitalizzazione e transizione verde – la cosiddetta **"twin transition"** – mostra come piattaforme digitali, sensori IoT, intelligenza artificiale e strumenti di modellazione predittiva possano supportare la gestione sostenibile delle risorse, migliorando l'efficienza, riducendo gli sprechi e favorendo la resilienza ambientale ed economica.

Queste evidenze dimostrano che la tecnologia non è un semplice supporto tecnico, ma una vera e propria **infrastruttura strategica** che consente di integrare il valore del capitale naturale nei processi decisionali quotidiani di governi, imprese e comunità. In tal senso, tutela ambientale e sviluppo economico possono coesistere e rafforzarsi reciprocamente, trasformando la protezione della natura da costo percepito a **investimento strategico** per il futuro.

In conclusione, il futuro della competitività economica e della coesione sociale dipenderà dalla nostra capacità di riconoscere e valorizzare il ruolo cruciale degli ecosistemi nel garantire il benessere umano, trasformando la tutela ambientale da costo a investimento strategico. Nel farlo il successo dipenderà dalla nostra capacità di combinare innovazione tecnologica, politiche pubbliche lungimiranti e partecipazione attiva delle comunità locali, così da costruire un'economia capace di generare benessere rispettando i limiti ecologici del pianeta.

BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA

Adeoba, M. I., Odjegba, E. E., & Pandelani, T. (2025). Nature-based solutions: Opportunities and challenges for water treatment. In *Smart Nanomaterials for Environmental Applications* (pp. 575–596). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21794-4.00011-9

Agència Catalana de l'Aigua. (2025, luglio 10). Catalunya construeix una gestió de l'aigua autosuficient per deixar de dependre de les pluges. *Agència Catalana de l'Aigua*. https://aigua.blog.gencat.cat/2025/07/10/catalunya-construeix-una-gestio-de-laigua-autosuficient-i-deixant-de-dependre-de-les-pluges/

Angelakis, A., & Snyder, S. (2015). Wastewater Treatment and Reuse: Past, Present, and Future. *Water*, *7*(9), 4887–4895. https://doi.org/10.3390/w7094887

ARIES per SEEA | Sistema di contabilità economica ambientale. (s.d.). Recuperato 29 agosto 2025, da https://seea.un.org/content/aries-for-seea?utm_source=chatgpt.com

Azzi, E. S., Karltun, E., & Sundberg, C. (2019). Prospective Life Cycle Assessment of Large-Scale Biochar Production and Use for Negative Emissions in Stockholm. *Environmental Science & Technology*, *53*(14), 8466–8476. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01615

Azzi, E. S., Karltun, E., & Sundberg, C. (2021). Assessing the diverse environmental effects of biochar systems: An evaluation framework. *Journal of Environmental Management*, *286*, 112154. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112154

Brander, L. M., De Groot, R., Schägner, J. P., Guisado-Goñi, V., Van 'T Hoff, V., Solomonides, S., McVittie, A., Eppink, F., Sposato, M., Do, L., Ghermandi, A., Sinclair, M., & Thomas, R. (2024). Economic values for ecosystem services: A global synthesis and way forward. *Ecosystem Services*, *66*, 101606. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101606

Chang, W.-Y., Li, Z., Lu, K., & Chang, S. J. (2022). Optimal Eco-Compensation for Forest-Based Carbon Sequestration Programs: A Case Study of Larch Carbon Sink Plantations in Gansu, Northwest China. *Forests*, *13*(2), 268. https://doi.org/10.3390/f13020268

D'Alberto, R., Pagliacci, F., & Zavalloni, M. (2023). A socioeconomic impact assessment of three Italian national parks. *Journal of Regional Science*, *63*(1), 114–147. https://doi.org/10.1111/jors.12618

D'Alberto, R., Zavalloni, M., & Pagliacci, F. (2024). The environmental and socioeconomic impacts of the Italian National Parks: Time and spillover effects across different geographical contexts. *Global Environmental Change*, *86*, 102838. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2024.102838

Direttiva—2022/2464—IT - Direttiva CSRD - EUR-Lex. (s.d.). European Union. Recuperato 24 settembre 2025, da https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2464/oj/eng

Doimo, I., Masiero, M., & Gatto, P. (2021). Disentangling the Diversity of Forest Care Initiatives: A Novel Research Framework Applied to the Italian Context. *Sustainability*, *13*(2), 492. https://doi.org/10.3390/su13020492

El Afandi, G., Irfan, M., Moustafa, A., Ibrahim, S., & Sapkota, S. (2025). A Review on Carbon-Negative Woody Biomass Biochar System for Sustainable Urban Management in the United States of America. *Urban Science*, *9*(6), 214. https://doi.org/10.3390/urbansci9060214

ESG: Cos'è, criteri e guida agli investimenti sostenibili. (2025, agosto 19). *ESG360*. https://www.esg360.it/environmental/esg-tutto-quello-che-ce-da-sapere-per-orientarsi-su-environmental-social-governance/

Fares, S., Alivernini, A., Conte, A., & Maggi, F. (2019). Ozone and particle fluxes in a Mediterranean forest predicted by the AIRTREE model. *Science of The Total Environment*, *682*, 494–504. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.109

García-Herrero, L., Lavrnić, S., Guerrieri, V., Toscano, A., Milani, M., Cirelli, G. L., & Vittuari, M. (2022). Cost-benefit of green infrastructures for water management: A sustainability assessment of full-scale constructed wetlands in Northern and Southern Italy. *Ecological Engineering*, *185*, 106797. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106797

Gruppo CAP. (2022, luglio). *Acqua depurata per il Parco Nord Milano*. Gruppo CAP. https://www.gruppocap.it/content/dam/groupcap/assets/documents/documents-web/media-e-comunicazione/comunicati-stampa/2022/luglio/Acqua%20depurata%20per%20il%20Parco%20Nord.pdf

Hamdouna, M., & Khmelyarchuk, M. (2025). Technological Innovations Shaping Sustainable Competitiveness—A Systematic Review. *Sustainability*, *17*(5), 1953. https://doi.org/10.3390/su17051953

Hamel, P., Guerry, A. D., Polasky, S., Han, B., Douglass, J. A., Hamann, M., Janke, B., Kuiper, J. J., Levrel, H., Liu, H., Lonsdorf, E., McDonald, R. I., Nootenboom, C., Ouyang, Z., Remme, R. P., Sharp, R. P., Tardieu, L., Viguié, V., Xu, D., … Daily, G. C. (2021). Mapping the benefits of nature in cities with the InVEST software. *Npj Urban Sustainability*, *1*(1), 25. https://doi.org/10.1038/s42949-021-00027-9

InVEST | Natural Capital Project. (s.d.). Recuperato 29 agosto 2025, da https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest

Johnson, J. A., Baldos, U. L., Corong, E., Hertel, T., Polasky, S., Cervigni, R., Roxburgh, T., Ruta, G., Salemi, C., & Thakrar, S. (2023). Investing in nature can improve equity and economic returns. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *120*(27). https://doi.org/10.1073/pnas.2220401120

Keesstra, S., Nunes, J., Novara, A., Finger, D., Avelar, D., Kalantari, Z., & Cerdà, A. (2018). The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of The Total Environment*, *610–611*, 997–1009. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.077

Knell, M. (2026). Technological Revolutions and the Co-Evolution of Green and Digital Transformation Processes: Tapping the Potential of Diversified Energy Networks: *Journal of Innovation Economics & Management*, *Prépublication*(0), I174-XXV. https://doi.org/10.3917/jie.pr1.0174

Liu, T., & Imran, A. (2024). Green Economy Advancement: Evaluating the Role of Digitalization, Technological Innovation, and Natural Resources in Shaping Environmental Quality Amid Globalizations. *Sustainability*, *16*(23), 10673. https://doi.org/10.3390/su162310673

March, H., Gorostiza, S., & Saurí, D. (2023). *Redrawing the hydrosocial cycle through treated wastewater reuse in the metropolitan area of Barcelona*. *16*(2).

Mei, B., Ezekiel, M., Sun, C., & Li, Y. (2025). On the carbon additionality of working forests. *Forestry Economics Review*, *7*(1), 23–34. https://doi.org/10.1108/FER-07-2024-0008

Minneapolis Park and Recreation Board Planting Project 2024. (2025). City Forest Credits. https://www.cityforestcredits.org/carbon-credits/carbon-registry/minneapolis-forest-carbon-offsets-4-forest-carbon-offsets/

Morri, E., & Santolini, R. (2021). Ecosystem Services Valuation for the Sustainable Land Use Management by Nature-Based Solution (NbS) in the Common Agricultural Policy Actions: A Case Study on the Foglia River Basin (Marche Region, Italy). *Land*, *11*(1), 57. https://doi.org/10.3390/land11010057

Mulligan, M., & van Soesbergen, A. (2017). *Mapping ecosystem services in the Volta basin using Co$ting nature ES assessment model.* (p. 10). CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems. https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/80192165-acd4-4700-808d-8d8c10617b4d/content

Nowak, D. J., & Crane, D. E. (2000). *The Urban Forest Effects (UFORE) Model: Quantifying urban forest structure and functions*.

Nowak, D. J., Hoehn, R. E., Bodine, A. R., Greenfield, E. J., & O'Neil-Dunne, J. (2016). Urban forest structure, ecosystem services and change in Syracuse, NY. *Urban Ecosystems*, *19*, 1455–1477.

Orange County Water District (OCWD). (2025). *Report Fiscal Year 2024-25*.

Osvaldová, M., & Potkány, M. (2024). Circular Economy and Technological Innovation in the Forest-Based Sector: A Study on Wood–Plastic Composites Business Plan and Cost Calculations. *Forests*, *16*(1), 52. https://doi.org/10.3390/f16010052

Paletto, A., De Meo, I., Grilli, G., & Nikodinoska, N. (2017). Selective and traditional forest management options for black pine forests in Central Italy: Effects on ecosystem services. *Annals of Forest Research*, *60*(2). https://doi.org/10.15287/afr.2017.799

Paletto, A., Notaro, S., Sergiacomi, C., & Di Mascio, F. (2024). The Economic Value of Forest Bathing: An Example Case of the Italian Alps. *Forests*, *15*(3), 543. https://doi.org/10.3390/f15030543

Popescu, S. M., Mansoor, S., Wani, O. A., Kumar, S. S., Sharma, V., Sharma, A., Arya, V. M., Kirkham, M. B., Hou, D., Bolan, N., & Chung, Y. S. (2024). Artificial intelligence and IoT driven technologies for environmental pollution monitoring and management. *Frontiers in Environmental Science*, *12*, 1336088. https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1336088

Prybutok, S., Newman, G., Atoba, K., Sansom, G., & Tao, Z. (2021). Combining Co$ting Nature and Suitability Modeling to Identify High Flood Risk Areas in Need of Nature-Based Services. *Land*, *10*(8), 853. https://doi.org/10.3390/land10080853

Ramaiah, M., Avtar, R., & Kumar, P. (2022). Treated Wastewater Use for Maintenance of Urban Green Spaces for Enhancing Regulatory Ecosystem Services and Securing Groundwater. *Hydrology*, *9*(10), 180. https://doi.org/10.3390/hydrology9100180

Reyes, B., Hogue, T., & Maxwell, R. (2018). Urban Irrigation Suppresses Land Surface Temperature and Changes the Hydrologic Regime in Semi-Arid Regions. *Water*, *10*(11), 1563. https://doi.org/10.3390/w10111563

Reynaud, A., Lanzanova, D., Liquete, C., & Grizzetti, B. (2017). Going green? Ex-post valuation of a multipurpose water infrastructure in Northern Italy. *Ecosystem Services*, *27*(Pt A), 70–81. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.07.015

Seidu, S., Chan, D. W. M., & Taiwo, R. (2025). Integrating green and grey infrastructure systems in dense urban regions: A synthesis of critical barriers and effective implementation guidelines. *Clean Technologies and Environmental Policy*. https://doi.org/10.1007/s10098-025-03309-3

Simpson, D., Benedictow, A., Berge, H., Bergström, R., Emberson, L. D., Fagerli, H., Flechard, C. R., Hayman, G. D., Gauss, M., Jonson, J. E., Jenkin, M. E., Nyíri, A., Richter, C., Semeena, V. S., Tsyro, S., Tuovinen, J.-P., Valdebenito, Á., & Wind, P. (2012). The EMEP MSC-W chemical transport model – technical description. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *12*(16), 7825–7865. https://doi.org/10.5194/acp-12-7825-2012

Stockholm Biochar Project. (2019). https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2019/09/Stockholm-Biochar-Project.pdf

Stone, R. (2017). *Water-scare Cities, Perth case study, Department of Water and Environmental Regulation, Perth, Western Australia.*

Taye, F. A., Folkersen, M. V., Fleming, C. M., Buckwell, A., Mackey, B., Diwakar, K. C., Le, D., Hasan, S., & Ange, C. S. (2021). The economic values of global forest ecosystem services: A meta-analysis. *Ecological Economics*, *189*, 107145. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107145

UNEP Caribbean Environment Programme, & The Nature Conservancy (TNC). (2021). *United Nations Environment Programme Cartagena Convention Secretariat Nature-based Solutions for Wastewater Management: Barriers and Opportunities in the Caribbean*. https://wedocs.unep.org/20.500.11822/36282

Varkolu, M., Gundekari, S., Omvesh, Palla, V. C. S., Kumar, P., Bhattacharjee, S., & Vinodkumar, T. (2025). Recent Advances in Biochar Production, Characterization, and Environmental Applications. *Catalysts*, *15*(3), 243. https://doi.org/10.3390/catal15030243

Visintin, F., Bassi, I., Deotto, V., & Iseppi, L. (2024). The Demand of Forest Bathing in Northern Italy's Regions: An Assessment of the Economic Value. *Forests*, *15*(8), 1350. https://doi.org/10.3390/f15081350

Viszlai, I., Barredo, J. I., & San-Miguel-Ayanz, J. (2016). *Payments for forest ecosystem services: SWOT analysis and possibilities for implementation.* [JRC Technical Reports]. Publications Office. https://data.europa.eu/doi/10.2788/957929

Water forever, whatever the weather: Drought-proofing Perth. (2011). Water Corporation.

Zalacáin, D., Bienes, R., Sastre-Merlín, A., Martínez-Pérez, S., & García-Díaz, A. (2019). Influence of reclaimed water irrigation in soil physical properties of urban parks: A case study in Madrid (Spain). *CATENA*, *180*, 333–340. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.05.012

Zhang, H., Hong, Q., Jiang, Y., & Xie, Y. (2025). The synergistic effects of green-blue-gray infrastructure for flood risk management in plain river network areas. *Journal of Environmental Management*, *392*, 126671. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126671