Journal of Inclusive Methodology and Technology in Learning and Teaching
ISSN 2785-5104
Anno 6 n.2 (2026)

EDIZIONI UNIVERSITARIE ROMANE
editoria scientifica dal 1952

Il ruolo della trasformazione digitale nella valorizzazione del capitale naturale. Un framework per l'economia sostenibile nelle aree urbane.

Luigi Lemme [1]

[1] Unipegaso; luigi.lemme1974@gmail.com

Abstract: La crescente urbanizzazione globale e l'accelerazione della crisi climatica ed ecologica impongono un ripensamento dei modelli di sviluppo urbano. Questo articolo presenta un framework concettuale innovativo che integra trasformazione digitale, capitale naturale, aree urbane ed economia sostenibile in un paradigma denominato «Convergenza digitale-ecologica». Attraverso un'approfondita revisione della letteratura scientifica recente (2018-2025) e un'analisi critica di 37 fonti scientifiche selezionate, prevalentemente sottoposte a revisione tra pari, l'articolo evidenzia come le tecnologie digitali emergenti possano favorire nuove forme di monitoraggio, valorizzazione e governance del capitale naturale urbano, contribuendo alla transizione verso modelli di economia sostenibile. Il framework proposto si articola su tre livelli interconnessi: (1) il livello strumentale, nel quale le tecnologie digitali agiscono come un sistema nervoso per la raccolta e l'elaborazione dei dati ambientali; (2) il livello sistemico, nel quale il capitale naturale urbano viene concepito come un'infrastruttura intelligente e adattiva; (3) il livello finalistico, nel quale l'economia sostenibile rappresenta l'orizzonte di riferimento e il criterio per la valutazione delle scelte politiche. L'articolo affronta le principali sfide legate all'implementazione del modello e propone raccomandazioni operative rivolte ai decisori politici e ai ricercatori. Il contributo principale consiste nell'offrire una sintesi teorica rigorosa e una roadmap operativa per integrare la trasformazione digitale e la valorizzazione del capitale naturale nelle aree urbane, superando la frammentazione che caratterizza il dibattito scientifico.

Parole chiave: trasformazione digitale, tecnologie digitali, capitale naturale, aree urbane, economia sostenibile.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Contesto di riferimento

L'umanità sta vivendo un periodo di cambiamento senza precedenti, segnato dalla fusione di due fenomeni globali, quali l'urbanizzazione rapida e la transizione digitale. Secondo le stime delle Nazioni Unite, entro il 2050 più del 68% della popolazione mondiale risiederà in aree urbane (UN-Habitat, 2025), creando una crescente domanda di risorse naturali, energia e servizi ecosistemici in spazi ristretti. Allo stesso tempo, la trasformazione digitale sta cambiando profondamente i modelli di produzione, consumo e *governance*, fornendo strumenti tecnologici sempre più avanzati per la raccolta, l'analisi e l'uso di dati in tempo reale (Bibri et al., 2024; Margherita et al., 2023).

Questa doppia transizione avviene in un contesto di crescente urgenza ecologica. La crisi climatica, la perdita di biodiversità e il degrado degli ecosistemi

urbani pongono sfide esistenziali che richiedono risposte innovative e sistemiche (Cook et al., 2025). In questo contesto, il capitale naturale, che comprende le risorse naturali e i servizi ecosistemici che sostengono il benessere umano e la vitalità economica (Ruijs et al., 2019; Wackernagel et al., 1999), diventa un elemento fondamentale per ripensare i modelli di sviluppo urbano, anche se il capitale naturale urbano è stato spesso sottovalutato nelle decisioni politiche, considerato un'esternalità piuttosto che un bene strategico da proteggere e valorizzare (Obst, 2015).

Le tecnologie digitali offrono oggi opportunità senza precedenti per colmare questa lacuna. Sensori *IoT*, piattaforme di analisi dei *big data*, modelli di intelligenza artificiale, gemelli digitali e sistemi *blockchain* possono consentire forme di monitoraggio, valutazione e gestione del capitale naturale urbano che erano impensabili solo dieci anni fa (Cao et al., 2025; Peldon et al., 2024). Queste tecnologie non solo forniscono dati più precisi e tempestivi, ma possono anche trasformare radicalmente i processi di governance urbana, rendendo visibili le connessioni tra ecosistemi naturali, infrastrutture costruite e dinamiche socio-economiche (Grace et al., 2021).

La connessione tra trasformazione digitale e capitale naturale nelle aree urbane, però, è ancora poco esplorata. La letteratura scientifica tende a trattare questi argomenti in modo frammentato: da un lato, gli studi sulle *smart cities* si focalizzano principalmente su efficienza energetica, mobilità e servizi digitali, trascurando gli aspetti ecologici (Evans et al., 2019; Martin et al., 2019); dall'altro, la ricerca sul capitale naturale e sui servizi ecosistemici urbani raramente integra in modo sistematico le opportunità offerte dalle tecnologie digitali (Hamel et al., 2021). Questa mancanza di integrazione limita la nostra capacità di comprendere e gestire le sinergie tra trasformazione digitale e sostenibilità ecologica.

Nonostante l'aumento dell'interesse per le *smart cities* e la sostenibilità urbana, ci sono ancora notevoli lacune nella ricerca che collegano la trasformazione digitale, le tecnologie digitali, il capitale naturale, le aree urbane e l'economia sostenibile, ovvero lacuna teorico-concettuale, poiché non esiste un *framework* integrato che delinei in modo sistematico le relazioni tra queste cinque dimensioni, superando la frammentazione disciplinare e fornendo una visione d'insieme coerente; lacuna metodologica, in quanto gli approcci per valutare il capitale naturale urbano tendono ad essere statici e basati su dati aggregati, mentre le tecnologie digitali potrebbero consentire monitoraggi dinamici, dettagliati e in tempo reale, anche se in realtà mancano metodologie consolidate per integrare questi flussi di dati nei processi decisionali; lacuna empirica, poiché gli studi che analizzano in modo rigoroso l'impatto delle tecnologie digitali sulla valorizzazione del capitale naturale urbano e sulla transizione verso modelli di economia sostenibile sono ancora limitati; lacuna di governance, dato che non è chiaro come le tecnologie digitali possano essere incorporate nei processi di governance urbana per promuovere equità, partecipazione e trasparenza, evitando derive tecnocratiche o l'aggravamento del *digital divide*.

Partendo da queste lacune, l'articolo si propone di rispondere alle seguenti domande di ricerca:

"In che modo le tecnologie digitali possono favorire forme innovative di monitoraggio, valutazione e valorizzazione del capitale naturale nelle aree urbane?" e "Quali sono le interconnessioni tra trasformazione digitale, capitale naturale urbano

ed economia sostenibile, e come possono essere concettualizzate in un *framework* integrato?", ed ancora "Quali sono le principali sfide per l'implementazione e le condizioni favorevoli per integrare le tecnologie digitali e il capitale naturale nei processi di *governance* urbana?".

L'obiettivo principale di questo articolo è presentare un *framework* concettuale innovativo ed integrato che unisce cinque dimensioni chiave, quali trasformazione digitale, tecnologie digitali, capitale naturale, aree urbane, economia sostenibile, in un unico paradigma chiamato "Convergenza digitale-ecologica", fornendo una *roadmap* operativa per la loro integrazione nei processi di governance urbana. Questo *framework* si sviluppa su tre livelli interconnessi, ossia strumentale, dove le tecnologie digitali fungono da sistema nervoso per la raccolta, l'elaborazione e la condivisione di dati riguardanti il capitale naturale urbano; sistemico, in base al quale il capitale naturale urbano è visto come un'infrastruttura intelligente e adattiva, in grado di fornire servizi ecosistemici fondamentali per il benessere umano e la resilienza delle città; finalistico, nel quale l'economia sostenibile rappresenta un orizzonte di senso e un criterio per valutare le scelte politiche, focalizzandosi sulla valorizzazione del capitale naturale e sulla giustizia intergenerazionale.

Il contributo dell'articolo si articola su tre dimensioni, cioè teorica, in quanto l'articolo offre una sintesi critica della letteratura recente (2018-2025) e propone un *framework* concettuale che supera la frammentazione disciplinare, mettendo in luce le sinergie tra trasformazione digitale e valorizzazione del capitale naturale; metodologica, tenuto conto che l'articolo identifica le principali tecnologie digitali applicabili al monitoraggio e alla gestione del capitale naturale urbano, analizzandone potenzialità, limiti e condizioni di applicabilità; pratica, considerando che l'articolo fornisce raccomandazioni operative per *policy maker* e ricercatori, delineando una *roadmap* per integrare tecnologie digitali e capitale naturale nei processi di *governance* urbana.

2. Stato dell'arte attraverso una revisione critica della letteratura

Questa sezione offre una revisione sistematica e critica della letteratura scientifica recente (2018-2025) che esplora l'intersezione tra trasformazione digitale, tecnologie digitali, capitale naturale, aree urbane ed economia sostenibile.

La revisione della letteratura ha messo in luce notevoli progressi nella comprensione delle relazioni tra trasformazione digitale, tecnologie digitali, capitale naturale, aree urbane ed economia sostenibile. Nonostante ciò, ci sono ancora importanti lacune nella ricerca, dati dalla frammentazione disciplinare, poiché la letteratura tende a trattare questi argomenti in modo isolato, con poca integrazione tra gli studi sulle *smart cities*, la ricerca sul capitale naturale e gli studi sull'economia sostenibile; mancanza di *framework* integrati, dato che non esistono *framework* concettuali che delineino in modo sistematico le interconnessioni tra le cinque dimensioni fondamentali; scarsa evidenza empirica, tenuto conto che sono ancora pochi gli studi che documentano in modo rigoroso l'impatto delle tecnologie digitali sulla valorizzazione del capitale naturale urbano e sulla transizione verso un'economia sostenibile; sottorappresentazione del capitale naturale, poiché nelle ricerche sulle *smart cities*, il capitale naturale è spesso trascurato rispetto a temi come l'efficienza energetica, la mobilità e i servizi digitali; questioni di governance irrisolte, in quanto non è chiaro come le tecnologie digitali possano essere integrate nei processi di *governance* urbana per promuovere equità, partecipazione e trasparenza.

L'obiettivo è duplice, ovvero da un lato mappare lo stato attuale delle conoscenze disponibili, e dall'altro individuare le lacune nella ricerca e le opportunità per un avanzamento teorico ed empirico.

2.1 Trasformazione digitale e aree urbane, verso le smart sustainable cities

La trasformazione digitale delle aree urbane è uno dei fenomeni più significativi del XXI secolo. Essa si caratterizza per l'integrazione diffusa delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) nei processi di pianificazione, gestione e governance delle città (Qin, 2021). Negli ultimi dieci anni, il concetto di smart cities ha dominato il dibattito accademico e politico, promettendo di sfruttare le tecnologie digitali per migliorare l'efficienza dei servizi urbani, ridurre il consumo energetico e aumentare la qualità della vita dei cittadini (Kaiser, 2024).

La letteratura recente ha sviluppato una visione sempre più critica e sfumata del paradigma smart city. Martin et al. (2019) introducono il concetto di "smart-sustainability", evidenziando come l'enfasi sulla tecnologia rischi di oscurare le dimensioni sociali ed ecologiche della sostenibilità urbana. Gli autori argomentano che molte iniziative *smart city* si concentrano su obiettivi di efficienza economica e ottimizzazione tecnologica, trascurando questioni di equità sociale, partecipazione democratica e protezione degli ecosistemi. Evans et al. (2019) rafforzano questa critica, sottolineando il rischio di "soluzioni alla ricerca di problemi" e la necessità di ancorare le tecnologie digitali a visioni di sostenibilità urbana più olistiche e contestualizzate.

Sul versante empirico, l'indagine condotta da Margherita, Escobar, Esposito e Crutzen (2023) offre uno dei contributi più solidi disponibili. Applicando lo *structural topic modelling* a un *corpus* di 89 iniziative *smart city* realizzate in Belgio, gli autori ricostruiscono la geografia degli effetti che le tecnologie urbane producono sulle tre dimensioni classiche della sostenibilità. Ne emerge un quadro fortemente selettivo: soltanto nove raggruppamenti tecnologici incidono su almeno due dimensioni, e la sola mobilità intelligente riesce a produrre benefici simultanei su tutte e tre. Il dato merita attenzione perché smentisce l'assunto implicito in molte agende urbane, secondo cui la digitalizzazione genererebbe vantaggi ambientali, economici e sociali in modo indifferenziato. Al contrario, l'esito dipende in misura decisiva dalla natura specifica della tecnologia adottata e dalle condizioni istituzionali e territoriali in cui viene inserita.

Jiang et al. (2023) presentano prove empiriche su come la trasformazione digitale urbana influenzi la sostenibilità delle risorse, sulla base di dati panel provenienti da 279 città cinesi. I loro risultati indicano che la trasformazione digitale ha un significativo effetto positivo sulla sostenibilità delle risorse urbane, facilitato da meccanismi quali l'innovazione tecnologica, una migliore allocazione delle risorse e una migliore *governance* ambientale. Gli autori, però, sottolineano anche notevoli disparità regionali, con città di diverse dimensioni e livelli di sviluppo economico che mostrano modelli di impatto distinti.

Zhang et al. (2022) esaminano l'effetto della governance digitale sull'inquinamento ambientale urbano in Cina, utilizzando un approccio sperimentale naturale basato sulla politica pilota "Città nazionale dell'informazione per il servizio pubblico". I loro risultati mostrano che la digitalizzazione della governance urbana riduce significativamente l'inquinamento atmosferico, grazie a un monitoraggio

ambientale più efficace, a un'applicazione più rigorosa delle normative e a una maggiore trasparenza delle informazioni.

Un tema di crescente interesse nella letteratura è la governance digitale e le sue implicazioni per la sostenibilità urbana. Kaiser (2024) propongono un modello di "smart governance" che combina tecnologie digitali, coinvolgimento dei cittadini e meccanismi di responsabilità democratica. Gli autori evidenziano che la trasformazione digitale non è neutra; essa riflette specifiche visioni sociali e può sia potenziare che limitare le capacità di azione collettiva dei cittadini. Qin e Qi (2021) esaminano l'evoluzione della governance digitale nelle città cinesi, mettendo in luce le tensioni tra efficienza amministrativa, controllo sociale e partecipazione democratica.

Un contributo significativo per il nostro modello proviene da Li e Xu (2024), che studiano l'effetto del governo digitale sulla trasformazione delle imprese in un contesto di sviluppo economico urbano sostenibile. La ricerca dimostra che le politiche di digitalizzazione governativa generano effetti positivi a catena sulla trasformazione digitale del settore privato, creando ecosistemi di innovazione che facilitano la transizione verso modelli economici sostenibili.

La letteratura sulla trasformazione digitale urbana ha evoluto la sua visione, superando le narrazioni iniziali che tendevano ad essere troppo ottimistiche riguardo alla tecnologia. Oggi, si riconosce che la trasformazione digitale non è un processo neutro o sempre positivo, ma che richiede decisioni di *governance* ben ponderate, mirate ad obiettivi di sostenibilità ecologica, giustizia sociale e partecipazione democratica.

2.2 Tecnologie digitali per il monitoraggio e la gestione del capitale naturale

Le tecnologie digitali oggi ci forniscono strumenti senza precedenti per monitorare, valutare e gestire il capitale naturale nelle città. In questa sezione, esploreremo le principali categorie tecnologiche e come vengono applicate specificamente al contesto del capitale naturale urbano.

I gemelli digitali rappresentano una delle innovazioni più promettenti per la gestione del capitale naturale nelle città. Un *digital twin* è una replica virtuale di un sistema fisico, alimentato da dati in tempo reale e in grado di simulare scenari futuri per supportare decisioni strategiche (Peldon et al., 2024). In ambito urbano, i *digital twin* possono integrare dati da sensori ambientali, immagini satellitari, modelli climatici e *database* socio-economici, offrendo una visione completa e aggiornata dello stato del capitale naturale.

Peldon et al. (2024) forniscono una revisione del ruolo trasformativo dei gemelli digitali nello sviluppo delle città intelligenti, identificando 76 studi pertinenti pubblicati tra il 2018 e il 2024. Gli autori sottolineano che i gemelli digitali urbani possono supportare diverse applicazioni, come la pianificazione delle infrastrutture verdi, la gestione delle risorse idriche, il monitoraggio della qualità dell'aria e la simulazione degli effetti del cambiamento climatico. Molte delle applicazioni attuali, però, si concentrano su infrastrutture costruite, quali edifici, reti energetiche, trasporti, con una rappresentazione ancora limitata degli ecosistemi naturali e dei servizi ecosistemici.

Cao et al. (2025) propongono approcci innovativi per lo sviluppo di "green digital twin", progettati per integrare la dimensione ecologica nella pianificazione urbana sostenibile. Gli autori sostengono che i green digital twin devono includere

modelli ecologici dinamici, capacità di rappresentare i processi di crescita vegetale, i cicli biogeochimici e le interazioni tra specie. Questo richiede un'integrazione di competenze interdisciplinari, combinando scienze ambientali, ingegneria informatica e pianificazione urbana.

Zhu e Jin (2025) esaminano l'uso dei digital twin urbani basati sui dati per la gestione delle infrastrutture critiche, comprese quelle verdi e blu. Lo studio mette in luce come i gemelli digitali possano facilitare una gestione adattiva, in cui le decisioni operative vengono costantemente aggiornate in base ai dati in tempo reale e alle simulazioni di scenari futuri. Questo approccio è particolarmente importante per la gestione del capitale naturale urbano, caratterizzato da una notevole variabilità spaziale e temporale e da dinamiche non lineari.

Omrany e Al-Obaidi (2025) propongono un framework concettuale per applicare i gemelli digitali nella mitigazione delle isole di calore urbane, un problema ambientale significativo nelle aree urbane densamente popolate. Gli autori dimostrano come i gemelli digitali possano integrare dati microclimatici, modelli di vegetazione urbana e simulazioni di scenari di intervento, come la piantagione di alberi e l'installazione di tetti verdi, fornendo ai decisori strumenti per valutare in anticipo l'efficacia delle diverse opzioni.

Al-Sehrawy et al. (2021) sviluppano un sistema di classificazione per gli usi dei digital twin nella pianificazione urbana e nella gestione delle infrastrutture cittadine. Questo sistema identifica tre categorie principali di utilizzo: (1) monitoraggio e diagnostica in tempo reale; (2) simulazione e previsione di scenari futuri; (3) ottimizzazione e supporto decisionale. Questo quadro è utile per comprendere come i gemelli digitali possano essere applicati al capitale naturale urbano in modi diversi e complementari.

La critica sui *digital twins* evidenzia come questa tecnologia possa rappresentare un'opportunità interessante per connettere la trasformazione digitale con il capitale naturale urbano, anche se la loro applicazione in questo contesto è ancora nelle fasi iniziali e necessita di importanti progressi metodologici, come lo sviluppo di modelli ecologici dinamici, l'integrazione di dati provenienti da fonti diverse come sensori, satelliti e citizen science, e la creazione di interfacce *user-friendly* per i decisori non esperti in tecnologia.

L'intelligenza artificiale (AI) e il *machine learning* (ML) stanno diventando strumenti fondamentali per analizzare, prevedere e gestire i servizi ecosistemici nelle città. Questi metodi consentono di elaborare enormi quantità di dati diversi, riconoscere schemi complessi e creare modelli predittivi che sarebbero difficili da realizzare con le tecniche statistiche tradizionali.

Bibri et al. (2024) offrono una revisione approfondita delle applicazioni di AI e AIoT (Artificial Intelligence of Things) nelle eco-città intelligenti, concentrandosi in particolare sulla sostenibilità ambientale. Lo studio, che ha esaminato oltre 300 pubblicazioni, individua 513 applicazioni significative di AI per la gestione ambientale urbana, come il monitoraggio della qualità dell'aria, l'ottimizzazione della gestione dei rifiuti, la previsione del consumo energetico e la pianificazione delle infrastrutture verdi. Gli autori sottolineano che l'AI può favorire una gestione urbana più proattiva e adattiva, anticipando i problemi ambientali prima che si presentino e migliorando l'allocazione delle risorse.

Willcock et al. (2018) presentano una delle prime revisioni sistematiche sull'uso del machine learning per i servizi ecosistemici. Gli autori sostengono che il ML può

affrontare tre sfide cruciali nella ricerca sui servizi ecosistemici: (1) la scalabilità spaziale, che consente di estendere le stime locali a scala regionale o globale; (2) l'integrazione di dati eterogenei, combinando osservazioni in situ, dati di telerilevamento e modelli di processo; (3) la gestione dell'incertezza, offrendo stime probabilistiche invece di valori fissi. Lo studio identifica diverse famiglie di algoritmi ML particolarmente promettenti, come le foreste casuali, le reti neurali e le macchine a vettori di supporto.

Scowen et al. (2021) ampliano questa analisi, esplorando gli attuali e futuri utilizzi del machine learning (ML) nella ricerca sui servizi ecosistemici. Lo studio mette in evidenza che il ML è stato principalmente applicato a tre categorie di problemi: (1) la mappatura e la quantificazione dei servizi ecosistemici a diverse scale spaziali; (2) la previsione di cambiamenti futuri nei servizi ecosistemici in base a vari scenari di cambiamento ambientale e uso del suolo; (3) l'identificazione di trade-off e sinergie tra diversi servizi ecosistemici. Gli autori, però, evidenziano che l'uso del ML nella ricerca sui servizi ecosistemici è ancora ostacolato da carenze nei dati di formazione di alta qualità, difficoltà nell'interpretazione dei modelli "black box" e sfide nell'integrazione con la conoscenza ecologica teorica.

Manley et al. (2022) esaminano come il machine learning e i big data possano colmare gap specifici nella ricerca sui servizi ecosistemici, concentrandosi su tre aspetti principali: (1) la risoluzione spaziale e temporale, che consente analisi dettagliate in grado di catturare la variabilità locale; (2) l'integrazione multi-scala, che collega i processi ecologici locali alle dinamiche regionali e globali; (3) la valutazione economica, che sviluppa modelli predittivi per il valore dei servizi ecosistemici in contesti con pochi dati.

Rahmati (2024) propongono un quadro specifico per l'uso dell'intelligenza artificiale nella conservazione della biodiversità urbana. Lo studio identifica quattro aree prioritarie di applicazione: (1) monitoraggio automatizzato della biodiversità urbana tramite tecniche di computer vision e monitoraggio acustico; (2) previsione di hotspot di biodiversità e corridoi ecologici; (3) ottimizzazione della pianificazione delle aree urbane protette; (4) valutazione dell'impatto delle politiche urbane sulla biodiversità. Gli autori segnalano che i modelli di intelligenza artificiale possono raggiungere un'accuratezza superiore al 90% nell'identificazione automatica delle specie urbane, riducendo notevolmente i costi e i tempi del monitoraggio tradizionale.

L'intelligenza artificiale e il *machine learning* possono fornire strumenti efficaci per affrontare le difficoltà dei metodi tradizionali nella valutazione e gestione del capitale naturale urbano, prestando attenzione a questioni come la trasparenza, l'interpretabilità e la validazione ecologica. I modelli di *machine learning* dovrebbero essere utilizzati in sinergia con la conoscenza ecologica teorica, piuttosto che come sostituti, e dovrebbero essere supportati da meccanismi di governance che garantiscono equità, partecipazione e responsabilità.

L'Internet delle cose (IoT) è una delle tecnologie chiave per il monitoraggio in tempo reale del capitale naturale nelle aree urbane. I sensori IoT sono in grado di misurare vari parametri ambientali, come la qualità dell'aria, la temperatura, l'umidità, il rumore, la qualità dell'acqua e i parametri ecofisiologici delle piante, con un'alta risoluzione sia spaziale che temporale. Questi sensori generano flussi continui di dati che alimentano i sistemi di analisi e supporto decisionale.

Matasov et al. (2020) hanno condotto uno studio innovativo sull'uso dei dispositivi IoT per monitorare i servizi ecosistemici degli alberi urbani. Gli autori hanno installato 16 dispositivi IoT su alberi a Mosca, monitorando parametri ecofisiologici come il flusso di linfa, la temperatura del tronco e l'umidità del suolo per cinque mesi. I dati raccolti hanno permesso di quantificare la variabilità spaziale e temporale dei servizi ecosistemici forniti dagli alberi, dimostrando che gli alberi della stessa specie possono avere prestazioni molto diverse a seconda della loro posizione, delle condizioni microclimatiche e delle pratiche di gestione. Questo studio ha aperto la strada a nuove ricerche sull'uso dei sensori IoT per la gestione del verde urbano.

La letteratura recente ha esaminato varie applicazioni dei sensori *IoT* nel monitoraggio ambientale urbano. Diversi studi hanno evidenziato l'efficacia delle reti di sensori *IoT* per il monitoraggio in tempo reale della qualità dell'aria, consentendo di identificare aree con alti livelli di inquinamento, valutare l'esposizione della popolazione e supportare interventi di mitigazione mirati. Altri studi hanno impiegato sensori *IoT* per monitorare la qualità dell'acqua nei fiumi urbani e sistemi di drenaggio, attivando sistemi di allerta precoce per eventi di inquinamento acuto.

Un tema attuale è l'integrazione tra sensori *IoT* e *citizen science*, dove i cittadini partecipano attivamente alla raccolta di dati ambientali utilizzando dispositivi personali o sensori a basso costo. Questo metodo può ampliare notevolmente la copertura del monitoraggio ambientale e aumentare la consapevolezza e il coinvolgimento dei cittadini riguardo alle questioni ecologiche nelle aree urbane. Tuttavia, presenta anche sfide relative alla qualità dei dati, alla *privacy* e alla *governance*.

L'*IoT* offre opportunità uniche per un monitoraggio dettagliato e continuo del capitale naturale nelle città, anche se la sua attuazione richiede investimenti significativi nelle infrastrutture di rete, nella gestione dei dati e nella manutenzione dei sensori, nonché sviluppare standard di interoperabilità per consentire l'integrazione di dati provenienti da sensori diversi e garantire la qualità e l'affidabilità delle misurazioni.

2.3 Capitale naturale urbano

Il concetto di capitale naturale è diventato sempre più importante nel dibattito scientifico e politico, poiché offre un modo per riconoscere il valore economico e sociale degli ecosistemi e dei servizi che forniscono (Ruijs et al., 2019; Wackernagel et al., 1999). In un contesto urbano, il capitale naturale comprende una varietà di risorse naturali, come spazi verdi, alberi, corpi idrici, suoli e biodiversità. Questi elementi offrono servizi ecosistemici fondamentali per il benessere umano, come la regolazione del microclima, la purificazione dell'aria e dell'acqua, il controllo delle inondazioni, il sequestro del carbonio, opportunità ricreative e benefici per la salute mentale e fisica.

2.3.1 Natural capital accounting

La contabilità del capitale naturale (Natural Capital Accounting, NCA) è un metodo che cerca di integrare il valore degli ecosistemi nei sistemi di contabilità economica, sia a livello nazionale che locale (Obst, 2015). Il *System of Environmental-Economic Accounting* (SEEA), adottato dalle Nazioni Unite, offre un *framework*

standard per misurare in modo coerente gli *stock* e i flussi di capitale naturale, allineandosi con i conti economici tradizionali.

Ruijs et al. (2019) esaminano come la *NCA* possa migliorare le politiche pubbliche, sottolineando che questa forma di contabilità rende evidenti i compromessi tra sviluppo economico e conservazione ambientale. Inoltre, supporta la valutazione delle politiche sia prima che dopo la loro attuazione, promuovendo una maggiore responsabilità da parte dei decisori. Gli autori presentano casi studio di vari paesi che hanno adottato sistemi di *NCA*, dimostrando che integrare il capitale naturale nei processi decisionali può portare a scelte più sostenibili e a una migliore allocazione delle risorse pubbliche.

Wackernagel et al. (1999) hanno introdotto il concetto di impronta ecologica come strumento per la contabilità del capitale naturale a livello nazionale. Questa misura calcola la domanda umana di risorse naturali in termini di superficie di terra e acqua biologicamente produttiva necessaria per produrre le risorse consumate e per assorbire i rifiuti generati. Sebbene questo approccio sia intuitivo e facilmente comunicabile, ha ricevuto critiche per alcune semplificazioni metodologiche e per le difficoltà di applicazione a livello locale.

Nel contesto urbano, la *NCA* affronta sfide specifiche dovute all'elevata eterogeneità spaziale, alla frammentazione degli ecosistemi e alla complessità delle interazioni tra sistemi naturali e costruiti. O'Keeffe et al. (2022) propongono un *framework* di dinamiche di sistema per valutare la *performance* del capitale naturale nello sviluppo urbano, utilizzando Londra come caso studio. Gli autori dimostrano che l'integrazione di modelli dinamici può catturare le retroazioni tra sviluppo urbano, cambiamenti nel capitale naturale e fornitura di servizi ecosistemici, offrendo ai decisori strumenti per valutare gli impatti a lungo termine delle scelte di pianificazione.

La contabilità del capitale naturale rappresenta un passo significativo verso il riconoscimento del valore economico degli ecosistemi, pure se la sua attuazione richiede dati di alta qualità, competenze interdisciplinari e volontà politica. Le tecnologie digitali possono agevolare la raccolta e l'elaborazione dei dati necessari, ma devono essere integrate in processi di *governance* partecipativi e trasparenti.

2.3.2 Valutazione economica dei servizi ecosistemici

La valutazione economica dei servizi ecosistemici è un campo di ricerca ben consolidato, che impiega diverse metodologie per stimare il valore monetario dei benefici offerti dagli ecosistemi. Brander et al. (2024) hanno creato *l'Ecosystem Services Valuation Database* (ESVD), un archivio che raccoglie oltre 9.400 stime di valore provenienti da più di 1.300 studi scientifici. Questo *database* è una risorsa cruciale per i decisori che devono analizzare i costi e i benefici di interventi che influenzano il capitale naturale.

Hamel et al. (2021) illustrano come il modello *InVEST* (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) venga utilizzato per mappare i benefici del capitale naturale urbano in tre città (Cina, Francia, Stati Uniti). Il modello *InVEST* sfrutta dati spaziali riguardanti la copertura del suolo, la topografia, il clima e la popolazione per stimare la fornitura di vari servizi ecosistemici e il loro valore economico. I risultati indicano che le infrastrutture verdi urbane offrono benefici economici significativi, spesso superiori ai costi di implementazione e manutenzione.

La valutazione economica dei servizi ecosistemici necessita di investimenti nel capitale naturale urbano, pur sollevando questioni etiche e metodologiche riguardanti la monetizzazione della natura e il rischio di riduzionismo economico, nonché di essere affiancata da altre forme di valutazione, ecologica, sociale, culturale, e che i processi decisionali non siano guidati esclusivamente da criteri di efficienza economica.

2.4 Economia sostenibile e circular economy nelle aree urbane

La transizione verso un'economia sostenibile è una delle sfide più importanti del XXI secolo, richiedendo un cambiamento significativo nei nostri modelli di produzione, consumo e distribuzione delle risorse. Nelle aree urbane, questa transizione è particolarmente fondamentale, poiché le città ospitano la maggior parte delle attività economiche e consumano una grande quantità di risorse a livello globale.

2.4.1 Circular economy e trasformazione digitale

Il paradigma dell'economia circolare propone di superare il tradizionale modello lineare "estrai-produci-consuma-smaltisci", sostituendolo con cicli chiusi in cui i materiali vengono costantemente riutilizzati, riparati, rigenerati e riciclati (Chauhan & Parida, 2022). Le tecnologie digitali possono facilitare questa transizione verso l'economia circolare attraverso vari meccanismi, come la tracciabilità dei materiali lungo le catene del valore, piattaforme digitali per la condivisione e il riuso di beni, ottimizzazione della logistica inversa e sistemi di *product-as-a-service*.

Una revisione sistematica condotta da Chauhan et al. (2022) analizza 748 studi pubblicati tra il 2010 e il 2021, evidenziando i legami tra economia circolare e tecnologie digitali. Gli autori identificano quattro categorie di tecnologie digitali particolarmente significative per l'economia circolare: (1) big data e analytics, per ottimizzare i flussi di materiali e scoprire opportunità di circolarità; (2) blockchain, per garantire trasparenza e tracciabilità; (3) Internet of Things, per monitorare lo stato e l'utilizzo dei prodotti; (4) intelligenza artificiale, per prevedere la domanda, ottimizzare la manutenzione predittiva e supportare la progettazione di prodotti circolari (Chauhan & Parida, 2022).

Nel contesto urbano, l'economia circolare può essere applicata a vari settori come la gestione dei rifiuti, le costruzioni, la mobilità, l'alimentazione e l'energia. Numerosi studi hanno documentato esempi di successo di città che hanno adottato strategie di economia circolare, mostrando vantaggi economici, ambientali e sociali. La letteratura, però, mette in luce anche importanti ostacoli all'implementazione, come la mancanza di infrastrutture adeguate, l'assenza di incentivi economici, resistenze culturali e la complessità nel coordinamento tra i diversi attori.

L'economia circolare rappresenta un paradigma promettente per la transizione verso modelli di sviluppo urbano più sostenibili, con le tecnologie digitali che possono agevolare questa transizione, ma che non sono sufficienti da sole, ma è necessario adottare un approccio sistemico che integri innovazione tecnologica, politiche pubbliche, cambiamenti nei modelli di business e trasformazioni culturali.

2.4.2 Green finance e valorizzazione del capitale naturale

Il green finance comprende una serie di strumenti finanziari e meccanismi di mercato creati per indirizzare gli investimenti verso attività economiche che siano sostenibili dal punto di vista ambientale (Song, 2024). Nel contesto del capitale naturale urbano, la finanza verde può manifestarsi in vari modi, quali obbligazioni verdi per finanziare infrastrutture ecologiche, pagamenti per servizi ecosistemici, crediti di biodiversità e meccanismi di compensazione ambientale.

Song e Du (2024) esaminano i meccanismi di finanza verde per valorizzare i prodotti ecologici, utilizzando dati provenienti da città cinesi. La loro ricerca evidenzia che le politiche di finanza verde hanno un effetto positivo e significativo sulla valorizzazione dei prodotti ecologici, grazie a meccanismi che riducono il costo del capitale per progetti verdi, aumentano la domanda di mercato per prodotti sostenibili e migliorano la trasparenza e la responsabilità ambientale.

Wu et al. (2024) esaminano se le politiche di green finance possano favorire la valorizzazione dei prodotti ecosistemici in Cina. I risultati indicano che le zone pilota di green finance hanno portato a un significativo aumento nella valorizzazione dei prodotti ecosistemici, con effetti positivi che si mantengono nel tempo e si estendono anche alle regioni circostanti.

Wang et al. (2023) analizzano la relazione tra green finance e domanda di servizi ecosistemici in Cina, utilizzando un modello di coordinamento avanzato. Lo studio mette in evidenza notevoli differenze regionali nel grado di coordinamento, con alcune province che mostrano una forte integrazione tra lo sviluppo del green finance e la soddisfazione della domanda di servizi ecosistemici, mentre altre evidenziano disallineamenti che necessitano di interventi politici specifici.

Il green finance si presenta come uno strumento potenzialmente efficace per attrarre capitali privati verso la conservazione e il ripristino del capitale naturale urbano, pur considerando che la sua efficacia è legata alla capacità di sviluppare metriche affidabili per la performance ambientale, garantire trasparenza e prevenire il greenwashing. Le tecnologie digitali, in particolare la blockchain, possono giocare un ruolo chiave nel rafforzare la credibilità e la trasparenza dei meccanismi di green finance.

2.5 Blockchain e trasparenza nella valorizzazione del capitale naturale

La tecnologia blockchain e i sistemi di *distributed ledger (DLT)* stanno guadagnando attenzione come strumenti promettenti per migliorare la trasparenza, la tracciabilità e la fiducia nei meccanismi di valorizzazione del capitale naturale e nei mercati ambientali (Boumaiza, 2024).

Boumaiza e Maher (2024) esaminano come la blockchain possa aumentare la trasparenza nella contabilità del carbonio. Gli autori dimostrano che questa tecnologia può affrontare problemi critici nei mercati del carbonio, come il conteggio doppio delle riduzioni di emissioni, la mancanza di trasparenza nelle transazioni e le difficoltà nel verificare l'addizionalità dei progetti. Grazie alla sua natura immutabile e distribuita, la blockchain assicura che ogni credito di carbonio sia identificabile e tracciabile lungo l'intera catena di custodia, riducendo così il rischio di frodi e aumentando la fiducia degli investitori.

Wang et al. (2024) suggeriscono di integrare la blockchain nella contabilità del PIL verde in Cina, sostenendo che questa tecnologia può migliorare l'accuratezza, la

trasparenza e la credibilità dei dati ambientali utilizzati per calcolare indicatori di sviluppo sostenibile. Gli autori sottolineano che la manipolazione dei dati ambientali è un problema comune in molti contesti, e che la blockchain può offrire un registro immutabile e verificabile delle informazioni ambientali.

Pons (2025) presenta un framework per l'uso della blockchain e delle tecnologie di registro distribuito (DLT) nella gestione dei crediti di carbonio e biodiversità. Lo studio evidenzia tre funzioni principali della blockchain in questo ambito: (1) la registrazione immutabile delle transazioni, che garantisce trasparenza e previene il double counting; (2) l'uso di smart contracts per automatizzare i pagamenti e ridurre i costi di transazione; (3) la tokenizzazione degli asset naturali, che consente la frazionabilità e aumenta la liquidità nei mercati ambientali.

Shukla et al. (2025) analizzano le applicazioni della blockchain per la conservazione ambientale, focalizzandosi sui meccanismi di pagamento per i servizi ecosistemici (PES) e sui mercati di crediti di biodiversità. Gli autori sostengono che la blockchain può affrontare problemi di fiducia e coordinamento che hanno storicamente limitato l'efficacia dei meccanismi PES, specialmente nei contesti transnazionali dove mancano istituzioni di enforcement solide.

La *blockchain,* in conclusione, offre soluzioni promettenti per migliorare la trasparenza e la fiducia nei meccanismi di valorizzazione del capitale naturale, anche se la sua implementazione richiede attenzione a questioni di scalabilità, consumo energetico (per le *blockchain proof-of-work*), *governance* e accessibilità, nonché nel progettare i sistemi *blockchain* in modo inclusivo, assicurando che anche gli attori con capacità tecniche limitate possano partecipare ai mercati ambientali.

3. Framework concettuale: la convergenza digitale-ecologica

Questa sezione delinea il *framework* concettuale della convergenza digitale-ecologica, che rappresenta il principale contributo teorico dell'articolo. Questo *framework* unisce cinque dimensioni fondamentali, trasformazione digitale, tecnologie digitali, capitale naturale, aree urbane ed economia sostenibile, creando un paradigma coeso, strutturato su tre livelli interconnessi: strumentale, sistemico e finalistico.

3.1 Presupposti teorici e posizionamento epistemologico

Il *framework* della convergenza digitale-ecologica si basa su tre presupposti teorici chiave, quali interdipendenza sistemica, in base alla quale le aree urbane sono sistemi complessi che uniscono aspetti sociali, tecnologici ed ecologici (STES - Sistemi Socio-Tecnico-Ecologici). Questi sistemi presentano molteplici interconnessioni tra le loro componenti (Grace et al., 2021). Le tecnologie digitali, il capitale naturale e le dinamiche economiche non possono essere analizzati separatamente, ma devono essere considerati come parti di un sistema integrato, dove i cambiamenti in un'area influenzano le altre; mediazione tecnologica, poiché le tecnologie digitali non sono strumenti neutrali; portano con sé visioni del mondo, valori e rapporti di potere specifici (Martin et al., 2019). La trasformazione digitale nelle aree urbane non è un processo automatico, ma è influenzata da decisioni di *design*, *governance* e implementazione che riflettono priorità politiche, economiche e sociali. Di conseguenza, l'integrazione tra tecnologie digitali e capitale naturale richiede scelte consapevoli, orientate verso obiettivi di sostenibilità ecologica e

giustizia sociale; orientamento finalistico, in quanto l'economia sostenibile non è solo un obiettivo desiderabile, ma deve essere il principio guida per le decisioni riguardanti la trasformazione digitale e la gestione del capitale naturale. Questo presupposto si basa su un'etica della responsabilità intergenerazionale, che riconosce il diritto delle generazioni future di avere accesso a un capitale naturale intatto e a condizioni di vita dignitose.

3.2 Architettura del framework

Il *framework* della convergenza digitale-ecologica si sviluppa su tre livelli interconnessi, che rappresentano aspetti complementari dell'integrazione tra la trasformazione digitale e il capitale naturale urbano, ossia livello strumentale, nel quale le tecnologie digitali agiscono come un sistema nervoso per raccogliere, elaborare, condividere e utilizzare dati sul capitale naturale urbano. Questo aspetto include l'infrastruttura tecnologica che consente il monitoraggio continuo, l'analisi avanzata e il supporto decisionale basato su evidenze. Le principali componenti tecnologiche di questo livello sono rappresentate da sensori e dispositivi *IoT*, strumenti raccolgono dati in tempo reale su vari parametri ambientali, come la qualità dell'aria, la temperatura, l'umidità, il rumore e la qualità dell'acqua, oltre a parametri ecofisiologici della vegetazione urbana, come il flusso di linfa, la fotosintesi e lo stress idrico; piattaforme di *big data* e *analytics*, che aggregano, integrano e analizzano flussi di dati eterogenei provenienti da sensori, satelliti, citizen science e database amministrativi, trasformando dati grezzi in informazioni utili per il processo decisionale; modelli di intelligenza artificiale e *machine learning*, I quali identificano schemi complessi, sviluppano previsioni, ottimizzano l'allocazione delle risorse e supportano la valutazione anticipata degli impatti di interventi sul capitale naturale; d*igital twins* e gemelli digitali, che creano repliche virtuali dinamiche del capitale naturale urbano, consentendo simulazioni di scenari futuri e valutazioni comparative di diverse opzioni di intervento; sistemi *blockchain* e *distributed ledger*, sistemi che garantiscono trasparenza, tracciabilità e fiducia nei meccanismi di valorizzazione del capitale naturale, prevenendo frodi e conteggi doppi.

La funzione principale di questo livello è quella di rendere visibili aspetti che solitamente sfuggono all'osservazione, ovvero trasformare processi ecologici complessi e spesso invisibili, come il sequestro del carbonio, la purificazione dell'aria e la regolazione del microclima, in dati quantitativi, visualizzazioni intuitive e indicatori di *performance* che possano guidare le decisioni politiche.

Appare necessario, però, riconoscere anche i rischi e i limiti di questo approccio. La semplice disponibilità di dati non garantisce decisioni più informate, ma è fondamentale sviluppare capacità di interpretazione critica, evitare la "tirannia delle metriche" e comprendere che non tutto ciò che è significativo può essere misurato. Inoltre, l'accesso alle tecnologie digitali non è uniforme, e il divario digitale può accentuare le disuguaglianze già esistenti nell'accesso al capitale naturale urbano; livello sistemico, nel quale il capitale naturale urbano è riconosciuto e gestito come un'infrastruttura intelligente e adattiva, in grado di fornire servizi ecosistemici fondamentali per il benessere umano e la resilienza delle città. Questo approccio segna un cambiamento significativo rispetto alle visioni tradizionali che considerano il capitale naturale come un'esternalità o un ostacolo allo sviluppo urbano.

Il concetto di "infrastruttura intelligente" applicato al capitale naturale presenta tre caratteristiche chiave, ossia, multifunzionalità, dato che il capitale naturale urbano

offre diversi servizi ecosistemici contemporaneamente, come la regolazione del microclima, la purificazione dell'aria e dell'acqua, il controllo delle inondazioni, il sequestro del carbonio, il supporto alla biodiversità, opportunità ricreative e benefici per la salute mentale e fisica. Questa multifunzionalità rappresenta un vantaggio rispetto alle infrastrutture grigie, che tendono a essere mono-funzionali; l'adattabilità, considerato che gli ecosistemi urbani sono sistemi dinamici, capaci di adattarsi ai cambiamenti ambientali e di continuare a fornire servizi anche in situazioni di stress. Le tecnologie digitali possono migliorare questa adattabilità, consentendo una gestione flessibile in cui le decisioni operative vengono aggiornate costantemente in base ai dati in tempo reale e alle previsioni future; l'interconnessione, poiché il capitale naturale urbano non è composto da elementi isolati, ma da reti ecologiche interconnesse, come corridoi verdi, sistemi di drenaggio naturale e reti di impollinatori. Le tecnologie digitali possono rendere queste interconnessioni più visibili, supportando una pianificazione integrata delle infrastrutture verdi e blu, piuttosto che frammentate.

Il nuovo concetto delle "Nature-Positive Smart Cities" (Russo, 2025) rappresenta un'applicazione pratica di questo livello del framework. Le Nature-Positive Smart Cities combinano soluzioni basate sulla natura (Nature-Based Solutions, NbS) con tecnologie digitali avanzate, creando sinergie tra efficienza tecnologica e resilienza ecologica. Questo approccio va oltre la semplice distinzione tra "smart" e "green", riconoscendo che le città più intelligenti sono quelle che valorizzano e rafforzano il loro capitale naturale.

Grace et al. (2021) propongono il concetto di "Smart-Natural City Interface", che enfatizza l'integrazione tra approcci data-led (Smart) e nature-based (Natural) nella pianificazione e governance urbana. Gli autori argomentano che questa integrazione può generare valore aggiunto su tre dimensioni: (1) efficienza, attraverso l'ottimizzazione della gestione delle risorse naturali; (2) resilienza, attraverso la diversificazione delle strategie di adattamento; (3) equità, attraverso la democratizzazione dell'accesso ai benefici del capitale naturale; livello finalistico, in base al quale l'economia sostenibile rappresenta un obiettivo chiaro e un criterio guida per le scelte relative alla trasformazione digitale e alla gestione del capitale naturale. Questo aspetto risponde a una domanda cruciale: "Qual è lo scopo della trasformazione digitale e della valorizzazione del capitale naturale?" In questo contesto, l'economia sostenibile si basa su tre principi fondamentali, ovvero il principio di rigenerazione, secondo il quale le attività economiche devono operare all'interno dei limiti di rigenerazione degli ecosistemi, evitando di compromettere il capitale naturale. Questo implica una transizione da modelli estrattivi e lineari a modelli circolari e rigenerativi, dove i materiali vengono riutilizzati continuamente e gli ecosistemi vengono attivamente ripristinati; il principio di equità intergenerazionale, in base al quale le generazioni attuali hanno la responsabilità di lasciare alle future generazioni un capitale naturale intatto e opportunità di vita dignitose. Questo principio si basa su un'etica della responsabilità che va oltre le scadenze del mercato e della politica elettorale; il principio di giustizia distributiva, per il quale i benefici derivanti dal capitale naturale urbano e dalla trasformazione digitale devono essere distribuiti equamente, evitando che si concentrino in particolari gruppi sociali o aree geografiche. Questo richiede attenzione alle dinamiche di gentrificazione verde, al divario digitale e alle disuguaglianze nell'esposizione ai rischi ambientali.

La valorizzazione del capitale naturale attraverso meccanismi di mercato, come i pagamenti per servizi ecosistemici, i crediti di biodiversità e i *green bonds*, può davvero aiutare nella transizione verso un'economia sostenibile, purché questi meccanismi siano progettati tenendo conto dei tre principi menzionati in precedenza. Le tecnologie digitali, in particolare la *blockchain*, possono migliorare la trasparenza e l'efficienza di questi sistemi, ma non possono sostituire decisioni politiche cruciali riguardo alla distribuzione dei benefici e dei costi legati alla transizione ecologica.

3.3 Dinamiche di interazione tra i tre livelli

I tre livelli del *framework* non sono isolati, ma interagiscono attraverso molteplici retroazioni e meccanismi di co-evoluzione. Ci sono tre dinamiche di interazione che meritano particolare attenzione, cioè quelle relative a *feedback* informativo (Strumentale → Sistemico), nel quale I dati generati dalle tecnologie digitali rendono visibili le dinamiche del capitale naturale urbano, consentendo di quantificare i servizi ecosistemici offerti, identificare aree critiche e valutare l'efficacia degli interventi. Questo tipo di *feedback* può cambiare la percezione del capitale naturale, trasformandolo da vincolo a risorsa strategica, e influenzare le priorità di investimento e le decisioni di pianificazione; *feedback* normativo (Finalistico → Strumentale), secondo il quale gli obiettivi di economia sostenibile guidano le scelte di design e implementazione delle tecnologie digitali, stabilendo quali dati vengono raccolti, come vengono analizzati e chi ha accesso alle informazioni. Questo *feedback* è fondamentale per garantire che la trasformazione digitale non sia guidata solo da logiche di efficienza economica o controllo sociale, ma anche da obiettivi di sostenibilità ecologica e giustizia sociale; *feedback* adattivo (Sistemico → Finalistico), nel quale lo stato del capitale naturale urbano e la sua capacità di fornire servizi ecosistemici influenzano le reali possibilità di transizione verso un'economia sostenibile. Un capitale naturale degradato limita le opzioni di sviluppo sostenibile, mentre un capitale naturale ben conservato e valorizzato crea opportunità economiche, come il turismo verde, l'agricoltura urbana e la bioeconomia, e migliora la qualità della vita.

Queste dinamiche di interazione dimostrano che la Convergenza Digitale-Ecologica non è un processo lineare o deterministico, ma piuttosto un processo complesso di co-evoluzione, in cui le trasformazioni in un livello generano effetti a cascata sugli altri livelli, creando sia opportunità che rischi.

4. Analisi comparativa tra tecnologie digitali per il capitale naturale urbano

Un'analisi approfondita delle principali tecnologie digitali utilizzate per il monitoraggio, la valutazione e la gestione del capitale naturale urbano, è presentata in una tabella comparativa che riassume le caratteristiche, le applicazioni, i vantaggi, i limiti e il grado di maturità tecnologica di ciascuna categoria tecnologica.

4.1 Tabella Comparativa delle Tecnologie Digitali

Tecnologia	Applicazioni al Capitale Naturale Urbano	Vantaggi Principali	Limiti e Sfide	Maturità Tecnologica	Esempi di Implementazione
Sensori IoT	Monitoraggio in tempo reale della qualità dell'aria, della temperatura, dell'umidità, dei parametri ecofisiologici	Risoluzione spaziale e temporale elevata; dati in tempo reale; opportunità di early warning.	Costi per installazione, manutenzione, gestione di grandi volumi di dati e calibrazione della qualità dei	Alta (tecnologia matura).	Matasov et al. (2020) - Mosca; reti di monitoraggio qualità dell'aria in città europee.

	della vegetazione e della qualità dell'acqua.		dati sono aspetti cruciali da considerare.		
Digital Twins	Simulazione di scenari futuri, valutazione anticipata degli interventi e pianificazione integrata delle infrastrutture verdi e grigie.	Approccio olistico; abilità di previsione; supporto avanzato per le decisioni.	Sviluppo complesso; richiesta di dati di alta qualità; costi elevati.	Media (in rapida evoluzione).	Progetti pilota in Singapore, Helsinki, Rotterdam per pianificazione urbana integrata.
AI e Machine Learning	Mappatura e quantificazione di servizi ecosistemici; previsione di futuri mutamenti; identificazione di trade-off; ottimizzazione della gestione.	Capacità di elaborazione di dati complessi; identificazione di pattern non lineari; scalabilità.	Necessari dati di training di alta qualità; interpretabilità limitata (black box); rischio di bias.	Media-Alta.	Rahmati (2024) - monitoraggio biodiversità urbana con accuratezza >90%.
Blockchain	Tracciabilità di crediti di carbonio e biodiversità; trasparenza nei mercati ambientali; smart contracts per PES.	Immutabilità; trasparenza; diminuzione del double counting; automazione.	Scalabilità limitata; consumo energetico (PoW); governance complessa.	Media (in fase di sperimentazione).	Progetti pilota per i crediti di carbonio forestale e tokenizzazione degli asset naturali.
Big Data Analytics	Integrazione di dati eterogenei; identificazione di correlazioni; supporto alla valutazione economica.	Capacità di elaborazione di volumi massivi; integrazione multi-sorgente; analisi in tempo reale.	Privacy e sicurezza dei dati; necessità di competenze avanzate; rischio di information overload.	Alta.	Piattaforme urbane integrate (Barcellona, Amsterdam) per monitoraggio ambientale.
Telerilevamento e Satelliti	Mappatura della copertura vegetale; monitoraggio dei cambiamenti d'uso del suolo; stima della biomassa.	Copertura spaziale vasta; serie storiche lunghe; costi moderatamente contenuti.	Limitata risoluzione spaziale per analisi locali; dipendenza da condizioni meteo; interpretazione complessa.	Alta (tecnologia consolidata).	Programmi Copernicus (EU), Landsat (USA) per monitoraggio urbano.
Citizen Science Platforms	Coinvolgimento della popolazione nella raccolta dati; monitoraggio partecipativo della biodiversità; valutazione percettiva.	Copertura spaziale ampia; engagement civico; costi bassi.	Variabilità della qualità e affidabilità dei dati; necessità di validazione; digital divide.	Media.	iNaturalist, eBird per monitoraggio biodiversità urbana; app per segnalare problemi ambientali.

4.2 Sinergie e complementarità tra tecnologie

Le tecnologie digitali menzionate nella tabella non funzionano in modo isolato, ma possono essere integrate in ecosistemi tecnologici che sfruttano le sinergie e le complementarità tra diverse famiglie tecnologiche. Ci sono tre tipi di integrazione che si rivelano particolarmente promettenti, come quella tra *IoT* + *AI* + *Digital Twins*, dato che i sensori *IoT* producono flussi continui di dati sul capitale naturale urbano; gli algoritmi di intelligenza artificiale analizzano questi dati per identificare schemi, anomalie e fare previsioni; i *digital twins* combinano i risultati in modelli virtuali dinamici che consentono simulazioni di scenari futuri. Questa integrazione genera un ciclo virtuoso di monitoraggio-analisi-simulazione-decisione, supportando forme di gestione adattiva del capitale naturale; un'altra tra *Blockchain* + *Big Data* + *PES*, tenuto conto che le piattaforme di analisi dei *big data* quantificano i servizi ecosistemici forniti da specifiche aree o interventi; la *blockchain* registra in modo immutabile e trasparente le transazioni nei mercati di pagamenti per servizi ecosistemici (PES); gli *smart contracts* automatizzano i pagamenti in base a indicatori di performance verificabili. Questa integrazione può migliorare l'efficienza e la credibilità dei meccanismi di valorizzazione economica del capitale naturale; ed infine quella tra *Citizen Science* + *IoT* + *AI*, dato che I cittadini partecipano alla raccolta di dati tramite app e sensori a basso costo; i sensori *IoT* professionali

forniscono dati di riferimento per la calibrazione e la validazione; gli algoritmi di intelligenza artificiale integrano dati eterogenei e identificano schemi significativi. Questa integrazione può democratizzare il monitoraggio ambientale e promuovere l'impegno civico, mantenendo al contempo standard di qualità dei dati.

4.3 Criteri per la selezione e la implementazione

La scelta delle tecnologie digitali da implementare in un contesto urbano specifico dovrebbe seguire cinque principali criteri chiari e contestualizzati, quali la rilevanza per gli obiettivi di *policy*, secondo il quale le tecnologie devono essere scelte in base alla loro capacità di sostenere obiettivi di *policy* specifici, come la riduzione delle isole di calore, l'aumento della biodiversità e il miglioramento della qualità dell'aria; il rapporto costi-benefici, con i costi di implementazione e manutenzione che devono essere proporzionati ai benefici attesi, in termini di miglioramento delle decisioni e degli esiti ambientali; la maturità tecnologica e disponibilità di competenze, in base alla quale è preferibile optare per tecnologie consolidate e per le quali ci siano competenze locali, evitando così dipendenze da fornitori esterni; l'inclusività e accessibilità, con le tecnologie che devono essere progettate per essere accessibili a diversi gruppi di utenti, evitando di amplificare il divario digitale; l'interoperabilità e scalabilità, secondo le quali le tecnologie dovrebbero basarsi su standard aperti che consentano l'integrazione con altri sistemi e la possibilità di scalabilità in futuro

5. Sfide implementative e condizioni abilitanti

L'integrazione delle tecnologie digitali con il capitale naturale urbano offre opportunità significative, ma comporta anche diverse sfide pratiche, di carattere tecnico e di *governance* che devono essere riconosciute e affrontate. Le sfide tecniche concernono la qualità e l'interoperabilità dei dati, poiché integrare dati da diverse fonti come sensori, satelliti, citizen science e database amministrativi richiede standard di interoperabilità, protocolli di validazione e meccanismi di assicurazione della qualità, e l'assenza di *standard* comuni rappresenta una barriera significativa all'integrazione sistemica; scalabilità e sostenibilità economica, tenuto conto che molte tecnologie digitali necessitano di investimenti iniziali considerevoli e di costi di manutenzione continui, per cui è fondamentale sviluppare modelli di *business* sostenibili che garantiscano la manutenzione delle infrastrutture tecnologiche a lungo termine, evitando dipendenze da finanziamenti temporanei o da fornitori privati; competenze e capacità, poiché l'implementazione e la gestione di tecnologie digitali avanzate richiedono competenze interdisciplinari che uniscono scienze ambientali, *data science*, ingegneria informatica e pianificazione urbana. La mancanza di queste competenze rappresenta un collo di bottiglia in molti contesti urbani. Le sfide di *governance* riguardano, invece, la *privacy* e sicurezza dei dati, considerato che il monitoraggio del capitale naturale urbano può raccogliere informazioni sensibili sulla posizione e sui comportamenti dei cittadini, attraverso la creazione di linee guida per la gestione dei dati che trovino un equilibrio tra l'utilità pubblica del monitoraggio ambientale e il rispetto della *privacy* individuale; partecipazione ed *accountability*, in quanto le tecnologie digitali possono promuovere una partecipazione cittadina più ampia e informata, ma rischiano anche di generare processi decisionali tecnocratici che escludono i cittadini, così che risulta essere importante progettare

sistemi di governance che uniscano le tecnologie digitali a meccanismi di partecipazione democratica e responsabilità; equità e *digital divide*, dato che l'accesso alle tecnologie digitali e ai vantaggi del capitale naturale urbano non è distribuito in modo equo, ma c'è il rischio che la trasformazione digitale amplifichi le disuguaglianze esistenti, concentrando i benefici in aree e gruppi sociali già avvantaggiati, un fenomeno noto come "gentrificazione verde digitale".

Per affrontare queste sfide, è importante identificare cinque condizioni fondamentali che possono abilitare il cambiamento, date da una visione strategica integrata, essenziale sviluppare strategie urbane che uniscano in modo chiaro la trasformazione digitale, la valorizzazione del capitale naturale e la transizione verso un'economia sostenibile, evitando la frammentazione settoriale; investimenti pubblici sostenuti e significativi in infrastrutture tecnologiche, competenze e processi di governance, che dovrebbero essere considerati come strategie a lungo termine, piuttosto che come spese correnti; partenariati *multi-stakeholder*, che possono mobilitare risorse complementari e garantire che le soluzioni tecnologiche rispondano ad esigenze reali, considerato che l'integrazione tra tecnologie digitali e capitale naturale necessita della collaborazione tra attori pubblici, privati, accademici e della società civile; sperimentazione e apprendimento, poiché data la complessità e l'incertezza dei processi di trasformazione digitale ed ecologica, è fondamentale adottare approcci di sperimentazione iterativa, in cui le soluzioni vengono testate su scala ridotta, valutate con attenzione e adattate in base ai risultati ottenuti; *framework* normativi e di incentivazione, con le politiche pubbliche che devono creare incentivi per l'integrazione tra tecnologie digitali e capitale naturale, attraverso regolamentazioni, *standard*, sussidi e meccanismi di mercato come i *green bonds* e i *PES*.

6. Conclusioni

Questo articolo presenta un innovativo *framework* concettuale chiamato Convergenza Digitale-Ecologica, che unisce la trasformazione digitale, le tecnologie digitali, il capitale naturale, le aree urbane e l'economia sostenibile in un unico paradigma. Il *framework* è strutturato su tre livelli interconnessi, cioè quello strumentale, nel quale le tecnologie digitali fungono da sistema nervoso per monitorare e gestire il capitale naturale urbano; sistemico, dove il capitale naturale urbano è visto come un'infrastruttura intelligente e adattiva; finalistico, all'interno del quale l'economia sostenibile rappresenta un orizzonte normativo e un criterio di valutazione.

L'articolo offre una revisione sistematica della letteratura recente (2018-2025), analizzando 37 fonti scientifiche e identificando progressi significativi nella comprensione delle relazioni tra le cinque dimensioni chiave, seppur la revisione ha anche messo in luce alcuni *gap* di ricerca, come la frammentazione disciplinare, la mancanza di *framework* integrati, la scarsità di evidenze empiriche e questioni di *governance* irrisolte.

L'analisi comparativa delle tecnologie digitali ha rivelato che oggi esistono strumenti tecnologici sia maturi che promettenti, come sensori *IoT*, *digital twins*, intelligenza artificiale e *machine learning*, *blockchain* e *big data analytics*, che possono favorire forme innovative di valorizzazione del capitale naturale urbano. Tuttavia, l'efficacia di queste tecnologie dipende fortemente dalle modalità di

implementazione, dai processi di *governance* e dall'integrazione con approcci partecipativi.

Il punto centrale dell'articolo è fornire una sintesi teorica ben strutturata che supera la frammentazione tipica del dibattito attuale. Il *framework* della Convergenza Digitale-Ecologica offre un linguaggio comune e una visione complessiva che può agevolare il dialogo tra ricercatori, decisori politici, urbanisti e cittadini.

Sul piano pratico, l'articolo propone una guida operativa per integrare le tecnologie digitali con il capitale naturale nei processi di governance urbana, identificando le principali categorie tecnologiche, le loro applicazioni, i criteri di selezione e le condizioni necessarie per il successo.

Questo articolo evidenzia alcuni limiti che meritano attenzione. In primo luogo, il *framework* proposto è di natura concettuale e necessita di una validazione empirica attraverso studi di caso approfonditi. In secondo luogo, l'articolo si basa principalmente su letteratura pubblicata in inglese, il che potrebbe portare a una sottorappresentazione di esperienze e conoscenze provenienti da altri contesti linguistici e culturali. Infine, l'analisi delle tecnologie digitali risulta necessariamente incompleta, considerando il rapido ritmo di innovazione tecnologica che caratterizza questo settore.

Sulla base dei risultati e dei limiti identificati, proponiamo cinque direzioni prioritarie per la ricerca futura, basate su studi di caso comparativi e dettagliati che documentino come il *framework* della Convergenza Digitale-Ecologica venga implementato in vari contesti urbani, analizzando i fattori di successo, le barriere affrontate e gli impatti generati; sviluppo di metriche e indicatori che consentano di monitorare e valutare i progressi nell'integrazione tra trasformazione digitale, capitale naturale ed economia sostenibile, superando le limitazioni degli indicatori settoriali tradizionali; analisi degli effetti distributivi della trasformazione digitale-ecologica, prestando particolare attenzione alle dinamiche di gentrificazione verde, al *digital divide* e alle disuguaglianze nell'accesso ai benefici del capitale naturale; modelli di governance innovativi che integrino tecnologie digitali, partecipazione dei cittadini e meccanismi di responsabilità democratica, superando sia approcci tecnocratici che puramente deliberativi; valutazione economica integrata, consistente nello sviluppare metodologie di valutazione economica che uniscano i benefici della trasformazione digitale e della valorizzazione del capitale naturale, superando approcci settoriali e incorporando dimensioni di equità e sostenibilità a lungo termine.

References

Al-Sehrawy, R., Kumar, B., & Watson, R. (2021). A digital twin uses classification system for urban planning & city infrastructure management. *Journal of Information Technology in Construction*, *26*, 832-862. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.045

Bibri, S. E., Krogstie, J., Kaboli, A., & Alahi, A. (2024). Smarter eco-cities and their leading-edge artificial intelligence of things solutions for environmental sustainability: A comprehensive systematic review. *Environmental Science and Ecotechnology*, *19*, 100330. https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100330

Boumaiza, A., & Maher, K. (2024). Leveraging blockchain technology to enhance transparency and efficiency in carbon trading markets. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *162*, 110225. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110225

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

Cao, J., Spulbar, C., Eti, S., Horobet, A., Yüksel, S., & Dinçer, H. (2025). Innovative approaches to green digital twin technologies of sustainable smart cities using a novel hybrid decision-making system. *Journal of Innovation & Knowledge*, *10*(1), 100651. https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100651

Chauhan, C., Parida, V., & Dhir, A. (2022). Linking circular economy and digitalisation technologies: A systematic literature review of past achievements and future promises. *Technological Forecasting and Social Change*, *177*, 121508. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121508

Cook, E. M., Kim, Y., Grimm, N. B., McPhearson, T., Anderson, P., Bulkeley, H., Collier, M. J., Diep, L., Morató, J., & Zhou, W. (2025). Nature-based solutions for urban sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *122*(29), e2315909122. https://doi.org/10.1073/pnas.2315909122

Evans, J., Karvonen, A., Luque-Ayala, A., Martin, C., McCormick, K., Raven, R., & Voytenko Palgan, Y. (2019). Smart and sustainable cities? Pipedreams, practicalities and possibilities. *Local Environment*, *24*(7), 557-564. https://doi.org/10.1080/13549839.2019.1624701

Grace, M., Scott, A. J., Sadler, J. P., Proverbs, D. G., & Grayson, N. (2021). Exploring the smart-natural city interface; re-imagining and re-integrating urban planning and governance. *Emerald Open Research*, *2*, 7. https://doi.org/10.35241/emeraldopenres.13226.2

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., Zheng, H., & 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

Jiang, Z., Zhang, X., Zhao, Y., Li, C., & Wang, Z. (2023). The impact of urban digital transformation on resource sustainability: Evidence from a quasi-natural experiment in China. *Resources Policy*, *85*, 103784. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103784

Kaiser, Z. R. M. A. (2024). Smart governance for smart cities and nations. *Journal of Economy and Technology*, *2*, 216-234. https://doi.org/10.1016/j.ject.2024.07.003

Li, H., & Xu, J. (2024). Impact of digital government on digital transformation of enterprises from the perspective of urban economic sustainable development. *Sustainability*, *16*(7), 2667. https://doi.org/10.3390/su16072667

Manley, K., Nyelele, C., & Egoh, B. N. (2022). A review of machine learning and big data applications in addressing ecosystem service research gaps. *Ecosystem Services*, *57*, 101478. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101478

Margherita, E. G., Escobar, S. D., Esposito, G., & Crutzen, N. (2023). Exploring the potential impact of smart urban technologies on urban sustainability using structural topic modelling: Evidence from Belgium. *Cities*, *141*, 104475. https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104475

Martin, C., Evans, J., Karvonen, A., Paskaleva, K., Yang, D., & Linjordet, T. (2019). Smart-sustainability: A new urban fix? Sustainable Cities and Society, 45, 640-648. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.028

Matasov, V., Belelli Marchesini, L., Yaroslavtsev, A., Sala, G., Fareeva, O., Seregin, I., Castaldi, S., Vasenev, V., & Valentini, R. (2020). IoT monitoring of urban tree ecosystem services: Possibilities and challenges. *Forests*, *11*(7), 775. https://doi.org/10.3390/f11070775

Obst, C. G. (2015). Reflections on natural capital accounting at the national level: Advances in the system of environmental-economic accounting. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, *6*(3), 315-339. https://doi.org/10.1108/SAMPJ-04-2014-0020

Omrany, H., & Al-Obaidi, K. M. (2025). Application of digital twin technology for Urban Heat Island mitigation: Review and conceptual framework. *Smart and Sustainable Built Environment*, *14*(7), 2145-2175. https://doi.org/10.1108/SASBE-05-2024-0189

O'Keeffe, J., Rojas Arias, J. C., Bassani, C., Casaroli, D., De Boeck, H. J., & Verstraeten, W. W. (2022). Evaluating natural capital performance of urban development through system dynamics: A case study from London. *Science of The Total Environment*, *824*, 153673. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153673

Peldon, D., Banihashemi, S., LeNguyen, K., & Derrible, S. (2024). Navigating urban complexity: The transformative role of digital twins in smart city development. *Sustainable Cities and Society*, *111*, 105583. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105583

Pons, J. R. D. (2025). Trust creation with blockchain and Distributed Ledger Technology (DLT) for carbon and biodiversity credit management. BlockStand European Project (Grant Agreement n. 101102757).

Qin, B., & Qi, S. (2021). Digital transformation of urban governance in China: The emergence and evolution of smart cities. *Digital Law Journal*, *2*(1), 29-47. https://doi.org/10.38044/2686-9136-2021-2-1-29-47

Rahmati, Y. (2024). Artificial intelligence for sustainable urban biodiversity: A framework for monitoring and conservation. arXiv preprint arXiv:2501.14766. https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.14766

Ruijs, A., Vardon, M., Bass, S., & Ahlroth, S. (2019). Natural capital accounting for better policy. *Ambio*, *48*(7), 714-725. https://doi.org/10.1007/s13280-018-1107-y

Russo, A. (2025). Towards nature-positive smart cities: Bridging the gap between technology and ecology. *Smart Cities*, *8*(1), 26. https://doi.org/10.3390/smartcities8010026

Scowen, M., Athanasiadis, I. N., Bullock, J. M., Eigenbrod, F., & Willcock, S. (2021). The current and future uses of machine learning in ecosystem service research. *Science of The Total Environment*, *799*, 149263. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149263

Shukla, S., Abiha, U., Bhutani, R., Kapoor, N., & Shukla, S. K. (2025). Blockchain technology for environmental conservation. In A. Kumar & M. K. Solanki (Eds.), Microbial Biocontrol Techniques (pp. 323-362). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-8739-5_17

Song, M., & Du, J. (2024). Mechanisms for realizing the ecological products value: Green finance intervention and support. *International Journal of Production Economics*, *271*, 109210. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109210

UN-Habitat. (2025). Future Cities Advisory Outlook 2024: Digital Urban Governance. United Nations Human Settlements Programme.

Wackernagel, M., Onisto, L., Bello, P., Callejas Linares, A., López Falfán, I. S., Méndez García, J., Suárez Guerrero, A. I., & Suárez Guerrero, M. G. (1999). National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, *29*(3), 375-390. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(98)90063-5

Wang, H., Zhao, D., Zhou, Q., Ke, Q., & Dong, G. (2023). The coupling relationship between green finance and ecosystem service demand in China based on an improved coupling coordination degree model. *Land*, *12*(3), 529. https://doi.org/10.3390/land12030529

Wang, N., Zhao, Y., Li, J., & Cai, G. (2024). Enhancing China's green GDP accounting through blockchain and artificial neural networks (ANNs) and machine learning (ML) modeling. *Scientific Reports*, *14*, 29235. https://doi.org/10.1038/s41598-024-75994-x

Willcock, S., Martínez-López, J., Hooftman, D. A. P., Bagstad, K. J., Balbi, S., Marzo, A., Prato, C., Sciandrello, S., Signorello, G., Voigt, B., Villa, F., Bullock, J. M., & Athanasiadis, I. N. (2018). Machine learning for ecosystem services. *Ecosystem Services*, *33*, 165-174. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.04.004

Wu, G., Cheng, J., Yang, F., & Chen, G. (2024). Can green finance policy promote ecosystem product value realization? Evidence from a quasi-natural experiment in China. *Humanities and Social Sciences Communications*, *11*(1), 377. https://doi.org/10.1057/s41599-024-02849-1

Zhang, B., Dong, W., & Yao, J. (2022). How does digital transformation of city governance affect environmental pollution: A natural experiment from the pilot policy of "National Information City for Public Service" in China. *Sustainability*, *14*(21), 14158. https://doi.org/10.3390/su142114158

Zhu, M., & Jin, J. (2025). Data-driven urban digital twins and critical infrastructure under climate change: A review of frameworks and applications. *Urban Planning*, *10*, 10109. https://doi.org/10.17645/up.10109