

Valutazione della pericolosità idraulica, servizi ecosistemici e innovazione nella pianificazione. Il caso dei bacini Ombrone Pistoiese e Bisenzio

Tommaso Toccafondi

Università degli Studi di Firenze
DIDA – Dipartimento di Architettura
tommaso.toccafondi1@edu.unifi.it

David Fanfani

Università degli Studi di Firenze
DIDA – Dipartimento di Architettura
david.fanfani@unifi.it

Claudio Fagarazzi

Università degli Studi di Firenze
DAGRI – Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali
claudio.fagarazzi@unifi.it

Abstract

Gli eventi meteorici estremi, sempre più frequenti a causa del cambiamento climatico, rappresentano una delle sfide più critiche per i sistemi urbani e territoriali. Tra i loro impatti, il deflusso superficiale e le alluvioni rivestono un ruolo centrale, amplificando i rischi a causa dell'impermeabilizzazione dei suoli urbani. La ricerca propone di analizzare il *runoff* in senso dinamico, fondando l'approccio su multidisciplinarietà e servizi ecosistemici, in modo da offrire un supporto innovativo agli strumenti di pianificazione territoriale. Il caso studio riguarda i bacini dell'Ombrone Pistoiese e del Bisenzio (Toscana), colpiti dall'alluvione del novembre 2023. È stato sviluppato un framework GIS che integra il metodo *SCS Curve Number* con il modello *Urban Flood Risk Mitigation* di InVEST. Così è stato possibile stimare i volumi di deflusso e le portate di picco dalla scala di sottobacino a quella di bacino, considerando sia le condizioni "statiche" (pioggia netta) sia quelle dinamiche (flussi di piena). Successivamente sono stati simulati quattro scenari: i) pratiche agricole sostenibili, ii) potenziamento delle soluzioni di ritenzione idrica lungo il reticolo idrografico, iii) sistemi urbani di raccolta delle acque meteoriche e iv) attuazione integrata di tutte le strategie. I risultati mostrano una riduzione significativa di volumi e portate in tutti gli scenari, evidenziando la replicabilità e l'adattabilità dell'approccio. Il modello proposto costituisce uno strumento place-sensitive per integrare le dinamiche idrologiche naturali negli strumenti di pianificazione, contribuendo a politiche territoriali resilienti e in linea con un governo sostenibile del territorio.

Parole chiave: cambiamento climatico, resilienza, pianificazione territoriale

1 | Introduzione

Il genere umano si trova oggi a confrontarsi con le conseguenze di uno sfruttamento eccessivo delle risorse naturali, che ha amplificato gli effetti del cambiamento climatico e alterato i cicli naturali. Negli ultimi decenni gli eventi meteorici estremi sono cresciuti in frequenza e intensità (McSweeney & Tandon, 2024), con impatti rilevanti su popolazioni, ambiente ed economia. Le alluvioni che hanno colpito l'Emilia-Romagna nel maggio 2023 e la Toscana nel novembre dello stesso anno hanno evidenziato la vulnerabilità di territori densamente urbanizzati, dove l'impermeabilizzazione del suolo amplifica il deflusso superficiale e accresce il rischio idraulico (IPCC, 2022). Tale condizione risulta ancora più critica se consideriamo che i livelli di consumo di suolo in Italia restano elevati nonostante i recenti segnali di rallentamento (SNPA, 2024). Il *runoff*, o deflusso superficiale, rappresenta un indicatore chiave della capacità di un territorio di rispondere a precipitazioni intense, poiché condiziona la formazione di piene e la diffusione del rischio idrogeologico. In questo quadro risulta essenziale integrare i servizi ecosistemici negli strumenti di pianificazione, riconoscendo il ruolo di suolo e vegetazione nella regolazione idrologica e nella resilienza dei sistemi territoriali (Daily, 1997; Gomez-Baggethun & Barton, 2013). Tuttavia, gli strumenti attuali restano ancorati a un approccio "statico", fondato su indicatori normativi difficilmente aggiornabili, incapaci di cogliere la complessità dei processi idrologici e le differenze locali. La ricerca qui presentata propone un modello dinamico per l'analisi del *runoff*, fondato su un approccio multidisciplinare e replicabile, che intende

colmare il divario tra conoscenze idrologiche e strumenti di governo del territorio. In particolare, si esaminano i servizi ecosistemici legati alla regimazione dei deflussi superficiali, considerando il contributo delle pratiche agricole (scenario i), lo sviluppo di interventi di regimazione idrica tramite casse di espansione (scenario ii) e la creazione di sistemi di stoccaggio urbani (scenario iii). L'obiettivo è superare una visione frammentata e settoriale della gestione delle acque, riconoscendo alla pianificazione un ruolo centrale quale leva per mitigare gli eventi estremi e promuovere un rapporto uomo-natura improntato a una coevoluzione virtuosa.

2 | Materiali e metodo

2.1 | Inquadramento territoriale

L'area di studio si colloca nella Piana Firenze-Prato-Pistoia, uno degli ambiti più urbanizzati della Toscana centrale. Qui, lo sviluppo industriale e infrastrutturale ha profondamente trasformato l'assetto territoriale nel corso del Novecento, lasciando un segno evidente nel paesaggio e nei suoi equilibri ecologici. La presenza del distretto tessile di Prato, dell'area metropolitana fiorentina e di importanti assi di mobilità ha contribuito infatti a una progressiva impermeabilizzazione del suolo (ISPRA – Munafò, 2020). Secondo il Rapporto SNPA 2024, proprio in quest'area si registrano alcuni dei valori più elevati di consumo di suolo a livello regionale, con incrementi significativi nel biennio 2022-2023 (SNPA 2024). Già l'IRPET (2018) aveva segnalato come tali pressioni avessero ridotto la disponibilità di spazi aperti e compromesso la funzionalità dei servizi ecosistemici, in particolare quelli legati alla regolazione idrologica (*Figura 1*).

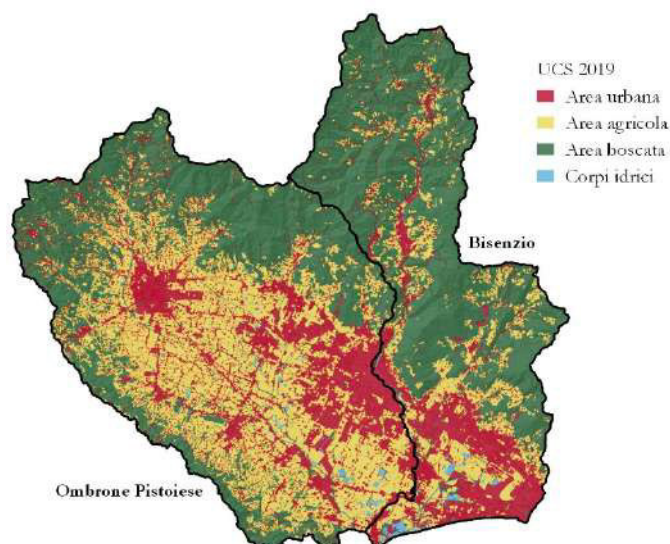


Figura 1 | Classificazione secondo il primo livello dell'Uso e Copertura del Suolo al 2019 (elaborazione degli autori a partire dall'UCS della Regione Toscana).

Dal punto di vista idrografico, la Piana è attraversata da corsi d'acqua di primaria importanza, tra cui l'Ombrone Pistoiese e il Bisenzio, che confluiscono nell'Arno a valle di Firenze. I due bacini presentano caratteristiche morfologiche e territoriali differenti che riflettono la complessità del territorio: l'Ombrone Pistoiese scorre prevalentemente in un contesto pianeggiante e densamente urbanizzato, ampiamente influenzato dall'attività vivaistica; mentre il Bisenzio raccoglie le acque dei versanti montuosi e forestali della valle omonima, per poi attraversare una pianura segnata da una crescente pressione antropica (*Figura 2*). La compresenza di bacini così diversi, ma strettamente interconnessi, contribuisce a definire una situazione idraulica complessa, nella quale elementi naturali e trasformazioni antropiche si intrecciano indistricabilmente. Oltre all'inquadramento sopra descritto, per comprendere a pieno la ricerca, è necessario eseguire un altro passaggio di scala; infatti, al fine di minimizzare gli errori ed eseguire un'analisi più dettagliata, sono stati identificati 40 sottobacini idrografici, per ognuno dei quali sono stati stimati i parametri di misurazione dell'evento. La vulnerabilità idraulica di questo contesto è stata drammaticamente evidenziata dall'evento alluvionale dei primi giorni di novembre 2023, quando precipitazioni eccezionali – fino a 187 mm in sole 24 ore – hanno provocato esondazioni diffuse e danni ingenti nei centri urbani. Questo episodio ha evidenziato come l'urbanizzazione spinta, combinata a condizioni morfologiche critiche, renda la Piana particolarmente esposta al rischio idraulico. Proprio in contesti del genere si ritiene necessaria l'integrazione di un approccio dinamico *ES-based* e *place-sensitive* nella pianificazione territoriale, che permetta di

comprendere la reale natura dei fenomeni e di sviluppare strategie e soluzioni efficaci nella mitigazione di questi eventi catastrofici.

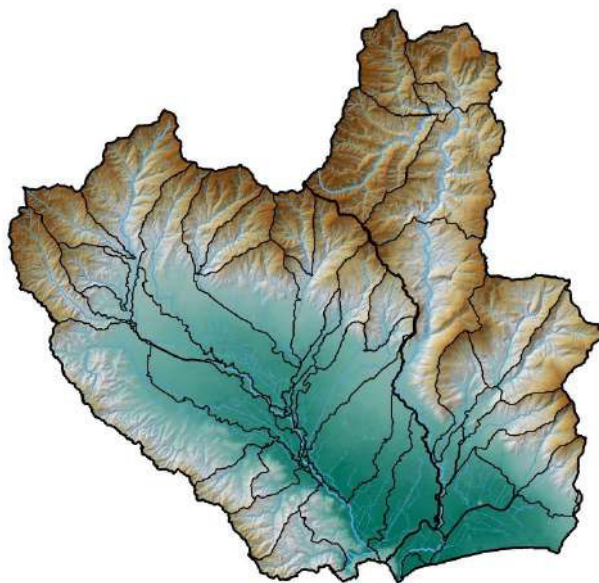


Figura 2 | Rappresentazione oroidrografica dei 40 bacini idrografici (elaborazione degli autori).

2.2 | Raccolta e preparazione dei dati per la ricostruzione del fenomeno

La ricostruzione dello stato di fatto dell'evento alluvionale del 2 novembre 2023 è stata preceduta dalla raccolta di un insieme articolato di dati territoriali e climatici, necessari a restituire un quadro realistico del fenomeno. In particolare, sono stati utilizzati dati pluviometrici, che hanno permesso di costruire una mappa delle isoiete per la giornata del 2 novembre 2023, dati cartografici sull'uso e copertura del suolo (UCS) e informazioni pedologiche per la classificazione dei gruppi idrologici del suolo. A questi si sono aggiunti i confini territoriali dei bacini idrografici e una tabella biofisica, volta ad attribuire ad ogni classe di uso del suolo un valore diverso di *Curve Number* (CN) a seconda del gruppo idrologico. L'elaborazione è stata condotta tramite il modello *Urban Flood Risk Mitigation* (UFRM) di InVEST (v. 3.14.1), sviluppato per la valutazione di eventi meteorici estremi, a differenza di *Urban Stormwater Retention* che si adatta ad analisi di bilancio idrologico su scale temporali più ampie. UFRM consente di stimare, a partire dai dati raccolti, i volumi di deflusso superficiale, o pioggia netta, producendo outputs cartografici e tabellari che permettono di descrivere l'entità dell'evento, individuando le aree più vulnerabili e quantificando il fenomeno in modo statico. L'applicazione di UFRM all'evento del 2 novembre 2023 ha restituito valori di pioggia netta particolarmente elevati, con picchi prossimi a 150 mm in sole 24 ore (Figura 3).

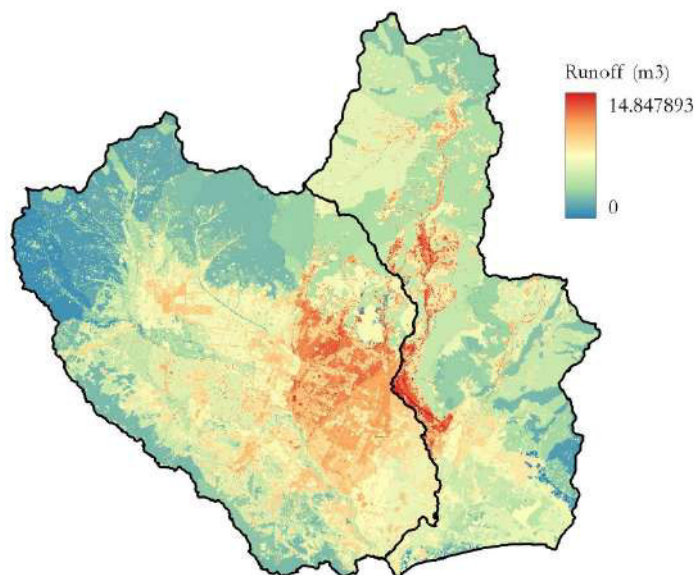


Figura 3 | Output Q_m3 prodotto tramite InVEST per indicare i volumi di pioggia netta (elaborazione degli autori).

Questi risultati hanno confermato la natura eccezionale dell'evento e costituiscono la base quantitativa su cui si fonda la fase successiva della ricerca, ossia comprendere la componente dinamica dei flussi – con le portate di piena – e testare le strategie di mitigazione in ottica pianificatoria.

2.3 | Analisi quali-quantitativa del fenomeno

L'analisi quali-quantitativa del fenomeno alluvionale è stata condotta secondo due parametri fondamentali: i volumi di deflusso superficiale (m³) e le portate di picco (m³/s). La distinzione tra questi due livelli si è rivelata essenziale, poiché consente di cogliere al tempo stesso la dimensione “statica” dell'evento, legata alla quantità complessiva di acqua non infiltrata, e quella “dinamica”, che descrive il modo in cui tali volumi si muovono nel reticolo idrografico. I volumi di deflusso sono stati ricavati direttamente dagli outputs di InVEST – nello specifico sono contenuti nel dato Q_m3 – che fornisce per ciascun sottobacino i valori di pioggia netta espressi in m³. La somma dei valori ottenuti ha permesso di stimare la quantità totale di acqua non assorbita dai bacini dell'Ombrone Pistoiese e del Bisenzio, restituendo così un primo quadro quantitativo dello stato di fatto. Questo indicatore, seppur semplice nella sua formulazione, costituisce un elemento di riferimento imprescindibile, poiché misura la capacità effettiva del territorio di assorbire precipitazioni estreme e rappresenta la base per qualsiasi valutazione successiva. La stima delle portate di picco, invece, risulta più articolata e necessita di tre dati: i volumi di pioggia netta, già ottenuti, il tempo di corrivazione (Tc) e un fattore di sfasamento temporale (Rs). Per quanto riguarda il tempo di corrivazione, è stato ottenuto attraverso l'impiego di alcune variabili morfometriche dei bacini e del reticolo idrografico (estensione areale, pendenza del bacino e dell'asta fluviale principale, ecc.) all'interno di alcune formule matematiche ¹, da cui è stato estrapolato un valore medio unico per ogni sottobacino. Questo ha consentito di stimare in quanto tempo le acque giunte al suolo defluiscono fino alla sezione di chiusura del bacino, alimentando le portate del reticolo idrografico. Il terzo ed ultimo dato, ossia Rs, è stato introdotto per tenere conto della possibile asincronia dei deflussi, modulando così il contributo dei bacini a monte rispetto a quelli a valle. I bacini idrografici, infatti, non differiscono solo per orografia, forma, condizioni climatiche, pedologia o uso del suolo, ma anche per la loro collocazione territoriale, che condiziona fortemente le dinamiche dei flussi. L'aggregazione progressiva dei sottobacini lungo le aste principali ha permesso di ricostruire la dinamica complessiva del fenomeno, simulando come i diversi contributi idrologici si cumulino o si compensino in funzione delle condizioni temporali e morfologiche. In sostanza, il fattore Rs viene espresso tramite il rapporto tra Tc_{min} e il Tc_{max} dei due bacini coinvolti ed indica cumulazioni sincrone per Tc=1 e cumulazioni asincrone per 0<Tc<1. In questo modo è stato possibile stimare le portate di picco non solo alle sezioni terminali dei bacini principali, ma anche in corrispondenza di punti intermedi, ottenendo una rappresentazione più articolata del comportamento idraulico durante l'evento. Una volta ottenuti tutti i dati descritti è stato possibile stimare le portate di picco tramite la formula seguente (*Figura 4*).

$$Qp_n = \frac{Flood\ Volume_n\ (mc)}{Tc_n \cdot 3600\ (s)} + \sum (Qp_{m_i} \cdot Rs_{m_i})$$

Figura 4 | La formula esplica come alla portata di picco di un bacino *n* sia possibile sommare i contributi dei bacini *m*, a monte, di grado *i* (con *i* che varia da 1 a 4 sulle linee dell'ordine di *Strahler*).

Il metodo proposto, pur fondato su alcune semplificazioni necessarie, ha consentito di superare la tradizionale rappresentazione statica del ruscellamento, offrendo una lettura dinamica dei processi di propagazione dei flussi. Questa doppia chiave di lettura – statica e dinamica – restituisce non soltanto una descrizione più completa dell'evento, ma costituisce anche un supporto operativo per la pianificazione territoriale, in quanto permette di individuare le aree più vulnerabili e di valutare con maggiore efficacia l'impatto potenziale di strategie di mitigazione.

2.4 | Applicazione delle strategie

Dopo aver ricostruito lo stato di fatto dell'evento alluvionale, la ricerca ha previsto una fase applicativa volta a sperimentare l'efficacia di diverse strategie di mitigazione. Ovviamente, l'interesse non risiede solo nel valutare in che modo le strategie permettono di contrastare l'evento, ma anche nel riflettere sulla possibile integrazione di queste negli strumenti di pianificazione, offrendo soluzioni replicabili e *place-sensitive*. Le strategie considerate originano scenari distinti e si articolano lungo tre direttrici principali: aree agricole,

¹ Tra le formule matematiche impiegate per il Tc ci sono: Ventura, Turazza, Ferro, Puglisi, Pasini, Pezzoli e Torunon. Ogni formula si adatta a bacini di dimensioni e forme diverse, per cui in fase di mediazione dei valori non sempre sono state tutte utilizzate, ma si è ponderato quali potessero funzionare caso per caso.

reticolo idrografico e area urbana. Il I scenario consiste nell'applicazione di pratiche di gestione del suolo ispirate all'agricoltura conservativa, come il *no-tillage* e il *cover crops*. Tali pratiche, ampiamente documentate in letteratura (Carretta et al., 2021; Magdoff & van Es, 2021), contribuiscono significativamente a migliorare la qualità del suolo, favoriscono l'infiltrazione delle acque e riducono sensibilmente il ruscellamento. Altrettanto interessante risulta la loro combinazione (NT-CC), che in diversi studi ha mostrato riduzioni di deflusso particolarmente consistenti (Sitting & Sur, 2024). Il II scenario, invece, ha interessato il reticolo idrografico, con la valutazione del potenziale delle casse di espansione e laminazione. In questo caso, pur in assenza di dati volumetrici ufficiali, le simulazioni hanno consentito di evidenziare come tali interventi possano incidere in modo significativo sia sui volumi complessivi sia, soprattutto, sulle portate di picco, riducendo l'impatto delle piene lungo tratti più vulnerabili. Il III scenario ha riguardato l'ambito urbano, attraverso l'ipotesi di sistemi di raccolta delle acque meteoriche in prossimità degli edifici e, sebbene l'efficacia di questa misura risulti più contenuta rispetto ad altre strategie, essa evidenzia il valore di interventi diffusi e capillari (Gomez-Baggethun & Barton, 2013). Infine, è stato considerato un quarto scenario integrato, che combina le migliori strategie dei tre scenari – applicando contemporaneamente NT-CC, casse di espansione e laminazione e vasche di raccolta - e mostra come la loro applicazione congiunta possa produrre effetti significativi in termini di riduzione del deflusso e delle portate. Nel complesso, la simulazione degli scenari ha consentito di mettere in luce come soluzioni diversificate e complementari possano agire a scale differenti e su componenti eterogenee del territorio. La modellazione, in questo senso, non si limita a quantificare riduzioni numeriche, ma si configura come strumento di supporto alla pianificazione, capace di orientare politiche di adattamento che valorizzino i servizi ecosistemici e le specificità locali.

3 | Risultati

Sebbene il cuore della ricerca risieda nello sviluppo e nell'applicazione del metodo di analisi dinamico, è essenziale presentare i risultati quali-quantitativi ottenuti, che consentono di valutarne la capacità di produrre esiti concreti e la potenziale integrazione negli strumenti di pianificazione. In particolare, gli scenari mostrano che le riduzioni più consistenti si ottengono attraverso gli interventi sul reticolo idrografico, che, seppur caratterizzati da alcune semplificazioni, determinano un abbattimento significativo sia dei volumi di deflusso sia delle portate di picco. Anche le pratiche agricole, soprattutto nella combinazione NT-CC, confermano un contributo rilevante, coerente con quanto riportato in letteratura (Carretta et al., 2021; Sitting & Sur, 2024). Più contenuti risultano invece gli effetti delle strategie applicate in ambito urbano, che tuttavia evidenziano l'importanza di soluzioni diffuse e capillari a supporto di misure strutturali più incisive. Lo scenario integrato, che combina le diverse strategie di intervento, ha ulteriormente evidenziato il potenziale del modello, mostrando riduzioni sensibili in entrambi i parametri osservati. In sintesi, lo studio evidenzia come le pratiche agricole contribuiscano alla riduzione del deflusso superficiale, le casse di espansione riducano efficacemente le portate di picco e i sistemi urbani di stoccaggio offrano un contributo diffuso ma complementare. I dati sono riportati dettagliatamente nelle tabelle seguenti (Tabella 1 e Tabella 2), che sintetizzano le percentuali di riduzione di volumi e portate a seconda delle strategie applicate.

Tabella 1 | Riduzione percentuale della pioggia netta a seguito dell'applicazione delle strategie proposte.

Scenari	Strategie	Riduzioni % dei volumi di deflusso	
		Bisenzio	Ombrone Pistoiese
I scenario	No-tillage	4.55	9.99
	Cover crops	4.79	10.53
	NT-CC	6.45	14.29
II scenario	Casse esistenti	18.26	10.59
	Casse di progetto	32.09	27.53
III scenario	Vasche di raccolta	1.43	2.28
IV scenario	Combinazione delle strategie precedenti	33.53	29.80

Tabella II | Riduzione percentuale delle portate di picco a seguito dell'applicazione delle strategie proposte.

Scenari	Strategie	Riduzioni % delle portate di picco	
		Bisenzio	Ombrone Pistoiese
I scenario	No-tillage	3.63	10.53
	Cover crops	3.81	11.10
	NT-CC	5.11	15.06
II scenario	Casse esistenti	17.06	11.20
	Casse di progetto	25.03	32.33
III scenario	Vasche di raccolta	1.37	2.25
IV scenario	Combinazione delle strategie precedenti	26.39	34.58

4 | Discussione

I risultati ottenuti evidenziano implicazioni rilevanti per la pianificazione territoriale e la gestione del rischio idraulico. L'adozione di strumenti di valutazione *place-sensitive*, capaci di integrare le dinamiche idrologiche naturali, si conferma essenziale per supportare processi decisionali orientati alla resilienza e alla sostenibilità territoriale. L'approccio sperimentato, basato su un modello dinamico *ES-based* e *place-sensitive*, dimostra infatti la possibilità di essere integrato nei processi di valutazione e programmazione, fornendo uno strumento aggiornabile e adattabile a differenti contesti. In particolare, la metodologia si presta per l'impiego nelle procedure di VAS, dove consentirebbe di valutare in modo dinamico e localizzato gli impatti delle trasformazioni urbanistiche, oltre a offrire un possibile contributo al rinnovamento degli standard urbanistici nazionali, tradizionalmente focalizzati su parametri quantitativi statici. Allo stesso modo, il modello si inserisce nel dibattito sulle NBS e sui sistemi PES, proponendo una quantificazione concreta del valore regolativo del suolo e della vegetazione (Daily, 1997; Gomez-Baggethun & Barton, 2013). È tuttavia necessario considerare alcuni limiti della ricerca, legati in primo luogo alla qualità e disponibilità dei dati territoriali, non sempre omogenei o aggiornati, e a semplificazioni metodologiche che riducono la possibilità di rappresentare pienamente la complessità dei processi idrologici. Questi aspetti aprono spazi per sviluppi futuri, che potrebbero concentrarsi sull'affinamento dei parametri di input e sull'integrazione di componenti temporali più avanzate e precise. Nel complesso, la ricerca mostra come strumenti di questo tipo possano rappresentare un contributo concreto all'innovazione delle pratiche di pianificazione, rafforzando la capacità di leggere e governare il territorio in una prospettiva di adattamento climatico e resilienza.

5 | Conclusione

Il contributo mostra come l'applicazione di un modello di analisi dinamico di questo tipo consenta di ricostruire con maggiore realismo i processi di deflusso superficiale e di evidenziare le criticità idrauliche del territorio. La sperimentazione ha confermato la coerenza scientifica dell'approccio e ne ha evidenziato la potenziale utilità come supporto alle pratiche di pianificazione, che potrebbero così disporre di strumenti in grado di cogliere le dinamiche locali e di integrare la dimensione ecosistemica nei processi decisionali. Un aspetto centrale emerso riguarda la flessibilità del modello, che può essere aggiornato in funzione della disponibilità dei dati ed esteso a contesti territoriali differenti. Questa caratteristica apre la strada a futuri sviluppi, dall'affinamento dei parametri di input fino all'integrazione con sistemi idrologici più avanzati che integrino maggiormente la componente temporale. Queste caratteristiche rendono il modello non solo un esercizio meramente tecnico, bensì un ponte tra analisi ambientale e governo del territorio. In sintesi, i risultati suggeriscono che approcci di questo tipo possano offrire un contributo concreto all'innovazione delle pratiche di pianificazione e alla costruzione di territori più resilienti di fronte alle sfide poste dal cambiamento climatico.

Riferimenti bibliografici

- Carretta L., Tarolli P., Cardinali A., Nasta P., Romano N., Masin R. (2021), “Evaluation of runoff and soil erosion under conventional tillage and no-till management: A case study in northeast Italy”, in *Catena*, vol. 206, 105537.
- Daily G.C. (ed., 1997), *Nature’s Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*, Island Press, Washington DC.
- Gómez-Baggethun E., Barton D.N. (2013), “Classifying and valuing ecosystem services for urban planning”, in *Ecological Economics*, no. 86, pp. 235–245.
- IPCC (2022), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- IRPET – Istituto Regionale Programmazione Economica Toscana (2018), *La Piana Firenze–Prato–Pistoia. Scenari di trasformazione territoriale*, IRPET, Firenze.
- ISPRA – Munafò M. (a cura di, 2020), *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2020*, Report SNPA 15/20, ISPRA, Roma.
- Magdoff F., van Es H. (2021), *Building Soils for Better Crops. Ecological Management for Healthy Soils, Sustainable Agriculture Research and Education (SARE)*, Burlington.
- McSweeney R., Tandon A. (2024), “Mapped: How climate change affects extreme weather around the world”, *Carbon Brief*, 18 novembre 2024.
- SNPA – Sistema Nazionale per la Protezione dell’Ambiente (2024), *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2024*, Report Ambientali n. 43/2024, ISPRA, Roma.
- Sitting S., Sur R. (2024), “Runoff and erosion mitigation via conservation tillage and cover crops – derivation of model input parameters from literature”, in *Environmental Challenges*, vol. 7, 100625.