



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELL'AQUILA

Department of Civil, Construction-Architectural and
Environmental Engineering

DOCTORAL THESIS

**Cambiamenti di uso del suolo e
mitigazione del rischio idraulico:
modelli a supporto di una
pianificazione territoriale
sostenibile**

Ph.D Course in Civil, Construction-Architectural
and Environmental Engineering

XXXVIII cycle

Candidate

Annamaria Felli

SSD

CEAR-12/A

Course Coordinator

Prof. Federico De Matteis

Thesis Tutor

Prof. Francesco Zullo



CAMBIAMENTI DI USO DEL
SUOLO E MITIGAZIONE DEL
RISCHIO IDRAULICO: MODELLI
A SUPPORTO DI UNA
PIANIFICAZIONE
TERRITORIALE SOSTENIBILE

Annamaria Felli

Prof. Francesco Zullo

Cambiamenti di uso del suolo e mitigazione del rischio idraulico: modelli a supporto di una pianificazione territoriale sostenibile

Annamaria Felli
Candidate ID number: 289597

Department of Civil, Construction-Architectural and Environmental Engineering-
DICEAA
University of L'Aquila

Copyright © 2025, Annamaria Felli. All rights reserved.

Material for which the author is the copyright owner cannot be used without the written permission of the author. The permission to reproduce copyright protected material does not extend to any material that is copyright of a third party; authorization to reproduce such material must be obtained from the copyright owners concerned. This thesis has been typeset by L^AT_EX and phdiceaa class.

Website: <http://diceaa.univaq.it/>

*“Man is a part of nature, and his war against nature is inevitably a
war against himself.”*

Rachel Carson, Silent Spring (1962)

*A tutte le vittime delle alluvioni e dei disastri,
in un tempo in cui la conoscenza esiste,
ma il cambiamento resta ancora una scelta mancata.*

This contribution is realized within the framework of the PNRR project "Geo-sciencesIR" funded by the European Union Next Generation EU (PNRR "Geo-SciencesIR" – Missione 4, "Istruzione e Ricerca" – Componente 2, "Dalla ricerca all'impresa" – Linea di investimento 3.1, "Fondo per la realizzazione di un sistema integrato di infrastrutture di ricerca e innovazione". Finanziato dall'Unione Europea NextGenerationEU CUP I53C22000800006).

ABSTRACT

The scientific literature has widely demonstrated that land take and surface sealing significantly affect hydrological processes, increasing peak discharges and flood risk, particularly in small- to medium-sized catchments. These effects highlight the integration of flood risk management into spatial planning, through effective measures for urban transformations, assessing their impacts in advance.

In Italy, regional planning has different approaches and application criteria, while at the European level, there is a common set of guidelines towards sustainability and the reduction of land consumption.

Within this context, the doctoral research aims to define a replicable territorial analysis methodology to assess the impacts of land-use changes on surface runoff, hydraulic hazard, and ecosystem services. The proposed approach integrates ecosystem service assessment models (InVEST) with hydrological modelling tools (HEC-HMS), allowing for a joint analysis of territorial transformations and system response to intense rainfall events. The research develops a replicable methodological framework intended to evaluate the effects of land-use change on surface runoff and on the territory's capacity to respond to extreme events.

The Emilia-Romagna region was selected as a pilot area due to the wide availability of historical datasets, testing a methodological approach that can be applied to other contexts. Emilia-Romagna is confirmed as one of the Italian regions most exposed to flood events and significant hydrogeological phenomena, as demonstrated by numerous historical records of widespread damage and inundation. The analysis focuses in particular on the recent flood events of May 2023, which affected especially the provinces of Bologna, Ravenna, and Forlì-Cesena, within the Reno, Lamone, and Fiumi Uniti river basins.

Analyses were carried out at two planning scales: the provincial–intermunicipal scale (wide-area scale) and the intermunicipal scale (basin scale). At both scales, two scenarios were analyzed: one based on current land use (2020, PRE scenario) and one assuming the full implementation of planned land-use transformations (POST scenario). Although based on different conceptual structures, the models provide consistent results, highlighting an increase in surface runoff associated with urbanization. The results prove that land-use transformations over time have led to a significant increase in surface runoff, closely linked to urban growth and the progressive reduction of permeable surfaces. This effect is particularly critical in lowland areas, where drainage networks—originally designed to convey runoff generated by natural or agricultural soils—are now often inadequate to cope with higher discharge levels. Basin-scale analysis also reveals that the impacts of urban planning choices extend beyond municipal boundaries, generating significant effects on downstream territories.

SOMMARIO

La letteratura scientifica ha ampiamente dimostrato come il consumo di suolo e l'impermeabilizzazione delle superfici incidano in modo significativo sui processi idrologici, aumentando le portate di piena e il rischio di alluvioni, in particolare nei bacini di piccola e media dimensione. Questi effetti evidenziano la necessità di integrare in modo più efficace la gestione del rischio idraulico nella pianificazione territoriale, attraverso misure capaci di compensare le trasformazioni urbanistiche e di valutare preventivamente le loro conseguenze. In Italia, la competenza regionale in materia di pianificazione ha prodotto approcci e criteri applicativi differenti, mentre a livello europeo, pur in presenza di indirizzi comuni orientati alla sostenibilità e alla riduzione del consumo di suolo, le modalità di applicazione variano in modo significativo.

In questo contesto si colloca la ricerca di dottorato, che ha come obiettivo la definizione di una metodologia di analisi territoriale replicabile per valutare l'impatto dei cambiamenti d'uso del suolo sul deflusso superficiale, sulla pericolosità idraulica e sui servizi ecosistemici. L'approccio proposto integra modelli per la valutazione dei servizi ecosistemici (modello InVEST) e strumenti di modellazione idrologica (modello HEC-HMS), consentendo di analizzare in modo congiunto le trasformazioni territoriali e la risposta del sistema agli eventi meteorici intensi. La ricerca propone un impianto metodologico replicabile che ha lo scopo di valutare gli effetti del cambiamento d'uso del suolo sul deflusso superficiale e sulla capacità di risposta del territorio agli eventi estremi. In particolare, l'indagine si concentra sull'Emilia-Romagna come territorio pilota, grazie alla grande disponibilità di dataset storici, per testare un approccio metodologico che potrà essere successivamente trasferito in altri contesti. L'Emilia-Romagna si conferma una delle regioni italiane più esposte a eventi alluvionali e fenomeni idrogeologici di rilievo, come dimostrano le numerose testimonianze storiche di danni e allagamenti diffusi. L'attenzione della ricerca si è concentrata in particolare sui recenti eventi alluvionali del maggio 2023 che hanno colpito in particolare le province di Bologna, Ravenna e Forlì-Cesena, nei bacini del Reno, Lamone e Fiumi Uniti. Si sono effettuate analisi a due scale di pianificazione: provinciale-intercomunale (scala di area vasta) e intercomunale (scala di bacino); in entrambe si sono analizzati due scenari, uno con l'uso del suolo attuale, relativo al 2020 (scenario PRE) e uno con l'ipotesi che tutte le trasformazioni delle previsioni di piano vengano attuate (scenario POST). Pur fondandosi su strutture concettuali differenti, i modelli restituiscono risultati coerenti, evidenziando un aumento del deflusso superficiale associato all'urbanizzazione. I risultati mostrano inoltre come le trasformazioni intervenute nel tempo abbiano prodotto un aumento significativo del deflusso superficiale, strettamente legato alla crescita dell'urbanizzazione e alla progressiva riduzione delle superfici permeabili. Tale effetto risulta particolarmente critico nelle aree di pianura, dove le reti di drenaggio, progettate per condizioni di deflusso associate a suoli naturali o agricoli, risultano oggi spesso inadeguate a fronte di portate più elevate. L'analisi a scala di bacino evidenzia inoltre come gli effetti delle scelte urbanistiche superino i confini comunali, producendo impatti anche sui territori posti a valle.

INDICE

1	Introduzione	1
1.1	Research questions e obiettivi della ricerca	2
1.2	Struttura della tesi	3
2	Ricognizione normativa in Europa e in Italia	5
2.1	Inquadramento scientifico dei concetti	6
2.2	Quadro normativo europeo	7
2.2.1	Spagna.....	9
2.2.2	Germania.....	12
2.2.3	Francia.....	14
2.3	Quadro normativo italiano	17
2.3.1	Il consumo di suolo.....	18
2.3.2	La rigenerazione urbana e le tecniche di monitoraggio	20
2.3.3	Mitigazione del rischio idraulico tra Direttiva Alluvioni e piani di bacino	23
3	Area di studio: la regione Emilia–Romagna	26
3.1	Inquadramento territoriale.....	27
3.2	Gli eventi alluvionali in Emilia-Romagna	32
3.3	I cambiamenti dell’uso del suolo dagli anni ‘50 ad oggi	34
4	Materiali e metodi.....	40
4.1	Workflow metodologico	41
4.1.1	Costruzione e armonizzazione del database territoriale.....	44
4.1.2	Definizione dei valori del Curve Number in base ai gruppi idrologici del suolo	49
4.1.3	Delimitazione dei bacini primari.....	53
4.2	Il modello InVEST.....	54
4.2.1	Urban Flood Risk Mitigation (UFRM)	55
4.2.2	Sediment Delivery Ratio (SDR)	59
4.2.3	Urban Stormwater Retention (USR).....	62
4.3	Il modello HEC-HMS	65

5	Risultati.....	70
5.1	Pianificazione area vasta – scala provinciale-intercomunale.....	71
5.1.1	Modello InVEST.....	71
5.1.1.1	Modello UFRM.....	71
5.1.1.2	Modello SDR.....	78
5.1.1.3	Modello USR.....	83
5.2	Pianificazione a scala di bacino – scala intercomunale.....	91
5.2.1	Modello InVEST.....	91
5.2.1.1	Modello UFRM.....	91
5.2.1.2	Modello SDR.....	94
5.2.1.3	Modello USR.....	97
5.2.2	Modello HEC-HMS.....	101
6	Discussioni.....	108
	Conclusioni.....	118
	Bibliografia.....	121
	APPENDICE A – LEGGI REGIONALI SU CONSUMO DI SUOLO E RIGENERAZIONE URBANA.....	138
	APPENDICE B - ACRONIMI.....	152

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 2.1: Leggi sulla rigenerazione urbana in Italia negli ultimi 23 anni.	21
Figura 3.1: Idrografia principale dell'Emilia-Romagna.....	28
Figura 3.2:Piano d'Assetto Idrogeologico (PAI) nei bacini Reno e Regionali Romagnoli.	28
Figura 3.3: Mosaicatura ISPRA delle aree a bassa pericolosità idraulica nella regione Emilia-Romagna.	29
Figura 3.4: Mosaicatura ISPRA delle aree a media pericolosità idraulica nella regione Emilia-Romagna.	29
Figura 3.5: Mosaicatura ISPRA delle aree ad alta pericolosità idraulica nella regione Emilia-Romagna.	30
Figura 3.6: Mappa delle aree allagabili del fiume Po in Emilia-Romagna.	31
Figura 3.7: Dettaglio della mappa delle aree allagabili del fiume Po in Emilia-Romagna.	31
Figura 3.8: Perimetrazioni delle aree colpite dall'alluvione nel maggio 2023 e settembre 2024.	33
Figura 3.9: Sovrapposizione tra PAI ed eventi alluvionali verificatisi nel 2023 e 2024.....	34
Figura 3.10: Uso del suolo della regione Emilia-Romagna nel 1954.	35
Figura 3.11: Uso del suolo della regione Emilia-Romagna nel 1976.	35
Figura 3.12: Uso del suolo della regione Emilia-Romagna nel 1994.	36
Figura 3.13: Uso del suolo della regione Emilia-Romagna nel 2003.	36
Figura 3.14: Uso del suolo della regione Emilia-Romagna nel 2008.	37
Figura 3.15: Uso del suolo della regione Emilia-Romagna nel 2018.	37
Figura 3.16: Evoluzioni delle macroclassi Corine Land Cover nelle cronosezioni indagate.....	38
Figura 4.1: Bacini primari analizzati.....	42
Figura 4.2: Inquadramento spaziale dell'area di studio e classificazione dei comuni intersecanti il bacino del Lamone in funzione della percentuale di superficie comunale inclusa nel bacino (prioritari $\geq 15\%$; marginali $<15\%$).	43
Figura 4.3: Workflow metodologico.....	44
Figura 4.4: Categorie di uso del suolo (lucode) relative al 2018 (scenario PRE).	48
Figura 4.5: Categorie di uso del suolo (lucode) relative alle previsioni di piano (scenario POST).	49
Figura 4.6: Mappa dei gruppi idrologici dei suoli (HSG) riclassificata per la Regione Emilia-Romagna.	51
Figura 4.7: Flow accumulation nei bacini analizzati.....	54

Figura 4.8: Mappa del Curve Number nello scenario PRE.....	66
Figura 4.9: Mappa del Curve Number nello scenario POST.	67
Figura 5.1: Deflusso superficiale Q [mm] – Modello UFRM - Scenario PRE	72
Figura 5.2: Ritenzione [m ³ /unità di superficie] – Modello UFRM - Scenario PRE.....	72
Figura 5.3: Dettaglio del deflusso superficiale Q [mm] – Modello UFRM - Scenario PRE	73
Figura 5.4: Deflusso superficiale Q [mm] – Modello UFRM - Scenario POST.....	74
Figura 5.5: Ritenzione [m ³ /unità di superficie] – Modello UFRM - Scenario POST	75
Figura 5.6: Contributo del runoff rispetto all'area del bacino (%).	75
Figura 5.7: Indici calcolati in seguito al modello SDR di InVEST tra lo scenario PRE e POST.	82
Figura 5.8: Retention volume [m ³ /unità di superficie] - Modello USR - Scenario PRE.....	83
Figura 5.9: Runoff volume [m ³ /unità di superficie] - Modello USR - Scenario PRE.....	84
Figura 5.10: Confronto tra i coefficienti medi di retention e runoff nei bacini analizzati - Modello USR - Scenario PRE	85
Figura 5.11: Influenza della scala del bacino sui volumi annui di deflusso. (Gli assi sono rappresentati in scala logaritmica).	85
Figura 5.12: Retention volume [m ³ /unità di superficie] - Modello USR di InVEST - Scenario POST	87
Figura 5.13: Runoff volume [m ³ /unità di superficie] - Modello USR di InVEST - Scenario POST	88
Figura 5.14: Confronto tra i coefficienti medi di retention e runoff nei bacini analizzati - Modello USR - Scenario POST	89
Figura 5.15: Confronto del coefficiente di retention tra scenario PRE e POST.	90
Figura 5.16: Confronto del coefficiente di runoff tra scenario PRE e POST.....	90
Figura 5.17: Deflusso superficiale Q [mm] – Bacino Lamone - Modello UFRM - Scenari PRE- POST	92
Figura 5.18: Ritenzione [m ³ /unità di superficie] – Bacino Lamone - Modello UFRM - Scenari PRE-POST	92
Figura 5.19: Confronto tra variazione di runoff nei due scenari rispetto all'estensione comunale (%)......	93
Figura 5.20: Confronto tra i valori di deflusso superficiale negli scenari PRE e POST.	94
Figura 5.21: Rapporto dell'erosione potenziale tra scenario POST e PRE per ciascun comune del bacino Lamone.	95
Figura 5.22: Rapporto dei sedimenti esportati e depositati tra scenario POST e PRE per ciascun comune del bacino Lamone.	96

Figura 5.23: Retention volume [m ³ /unità di superficie] - Bacino Lamone - Modello USR - Scenari PRE-POST	98
Figura 5.24: Runoff volume [m ³ /unità di superficie] - Bacino Lamone - Modello USR - Scenari PRE-POST	98
Figura 5.25: Confronto dei valori di retention negli scenari PRE e POST nei comuni del bacino LAMONE.....	99
Figura 5.26: Confronto dei valori di runoff negli scenari PRE e POST nei comuni del bacino LAMONE.....	99
Figura 5.27: Rappresentazione del bacino Lamone nel modello HEC-HMS.	101
Figura 5.28: Valori di Curve Number nei subbasin analizzati per il bacino Lamone. I grafici rappresentano i valori di CN presenti nei sub-basins - Scenario PRE	102
Figura 5.29: Valori di Curve Number nei subbasin analizzati per il bacino Lamone. I grafici rappresentano i valori di CN presenti nei sub-basins - Scenario POST.....	103
Figura 5.30: Idrogramma di piena simulato - Scenario PRE	104
Figura 5.31: Idrogramma di piena simulato - Scenario POST	104
Figura 5.32: Confronto tra gli idrogrammi di piena negli scenari PRE (in blu) e POST (in rosso).	105
Figura 5.33: Focus 1 sul confronto degli idrogrammi di piena negli scenari PRE e POST.....	106
Figura 5.34: Focus 2 sul confronto degli idrogrammi di piena negli scenari PRE e POST.....	106
Figura 6.1: Aggregati strutturali nelle province di Ravenna e Forlì-Cesena, con uno zoom sulla città di Faenza.	109
Figura 6.2: Aree critiche individuate dai risultati dei modelli InVEST - Scenario PRE.....	114
Figura 6.3: Aree critiche individuate dai risultati dei modelli InVEST - Scenario POST	115

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 2.1: Distretti idrografici in Italia (fonte: MASE (Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza energetica (MASE)).....	25
Tabella 3.1: Matrice di transizione in termini percentuali nelle cronosezioni indagate.....	39
Tabella 4.1: Riclassificazione delle classi di uso del suolo.....	48
Tabella 4.2: Valori di Curve Number associati agli usi del suolo (lucode)	53
Tabella 4.3: Tabella biofisica per il modello UFRM di InVEST.....	57
Tabella 4.4: Tabella biofisica per il modello SDR di InVEST.	61
Tabella 4.5: Tabella biofisica per il modello USR di InVEST.	64
Tabella 5.1: Variazione pre–post della ritenzione idrica specifica e dei volumi di piena specifici nei bacini analizzati. I valori negativi indicano una riduzione della capacità di ritenzione, mentre i valori positivi indicano un incremento del deflusso di piena.....	78
Tabella 5.2: Valori ottenuti con il modello SDR di InVEST per lo scenario PRE.	79
Tabella 5.3: Commenti ai valori ottenuti con il modello SDR di InVEST per lo scenario PRE.	80
Tabella 5.4: Valori ottenuti con il modello SDR di InVEST per lo scenario POST.....	80
Tabella 5.5: Commenti ai valori ottenuti con il modello SDR di InVEST per lo scenario POST.	81
Tabella 5.6: Valori ottenuti dal modello USR di InVEST - Scenario PRE.....	86
Tabella 5.7: Contributo % di ciascun comune alla variazione complessiva degli indicatori a scala di bacino, calcolata come differenza tra lo scenario POST e lo scenario PRE.	97
Tabella 5.8: Confronto dei valori ottenuti nel modello USR di InVEST per gli scenari PRE e POST, in base ai comuni del bacino Lamone.	101
Tabella 5.9: Valori di input utilizzati per ogni sottobacino nel modello HEC-HMS.....	103
Tabella 5.10: Risultati ottenuti dalla simulazione in HEC-HMS per gli scenari PRE e POST.	105

1 INTRODUZIONE

La ricerca di dottorato si inserisce nel contesto più ampio delle attività del progetto Geosciences IR, ponendosi l'obiettivo di costruire una metodologia di analisi territoriale replicabile, finalizzata alla valutazione dell'impatto dei cambiamenti d'uso del suolo sulla pericolosità idraulica e sulla dinamica dei servizi ecosistemici. La ricerca propone un impianto metodologico volto a valutare le conseguenze del cambiamento d'uso del suolo sul deflusso superficiale e sulla capacità di risposta del territorio agli eventi estremi. L'approccio si fonda sull'impiego combinato di strumenti GIS, modello InVEST e modello HEC-HMS, finalizzati alla costruzione di analisi diacroniche di trasformazione di uso del suolo. In particolare, l'indagine si concentra sull'Emilia-Romagna come territorio pilota per testare un approccio metodologico che potrà essere successivamente trasferito in altri contesti, sostituendo i dati e mantenendo invariata la struttura dell'analisi. L'impostazione del lavoro muove dalla constatazione che le trasformazioni territoriali e i processi di urbanizzazione hanno influito in maniera rilevante sull'equilibrio ecosistemico e sul livello di rischio idraulico, specialmente in aree soggette a espansione edilizia o infrastrutturale.

1.1 Research questions e obiettivi della ricerca

Il progetto di dottorato di ricerca rientra tra le attività inerenti di un progetto finanziato dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) denominato GeoSciences-IR (ISPRA, 2022b). Il progetto realizzerà un'infrastruttura di ricerca per la Rete Italiana dei Servizi Geologici per mettere a disposizione dei servizi geologici regionali e non solo, i dati, i servizi e gli strumenti necessari per lo svolgimento delle funzioni di monitoraggio e controllo del territorio nei diversi ambiti delle scienze della Terra. Il progetto, al quale partecipano 16 partner (13 Università e 3 Enti di Ricerca) è coordinato da ISPRA. È strutturato in 8 Work Packages e l'Università degli Studi dell'Aquila fornisce il proprio contributo all'interno del WP5 "Georesources and land monitoring", ed in particolare con l'azione 5.2 "Land consumption, land cover and land use". In particolare, tra gli obiettivi del progetto rientrano le tematiche relative alla gestione sostenibile del suolo ed al controllo e monitoraggio del suo utilizzo e consumo in termini urbanistici.

La ricerca di dottorato nasce dall'esigenza di comprendere e quantificare le relazioni tra consumo di suolo, trasformazioni urbane e vulnerabilità idrologica in un contesto territoriale sempre più esposto agli effetti dei cambiamenti climatici e dei processi di urbanizzazione diffusa. In Europa e in Italia, infatti, i processi di urbanizzazione e di impermeabilizzazione del suolo rappresentano una delle cause principali del degrado di una risorsa naturale non rinnovabile in tempi brevi, essenziale per la fornitura di servizi ecosistemici fondamentali (Felli & Zullo, 2024). La perdita di suolo incide direttamente sulla produzione di cibo, sulla qualità dell'aria, sulla capacità di ritenzione delle acque e sulla regolazione del clima locale, contribuendo all'aumento dei fenomeni di dissesto idrogeologico e, più in generale, all'aggravarsi delle crisi climatiche e ambientali. In questo quadro, considerare le regolamentazioni sul consumo di suolo e sulla rigenerazione urbana diventa un passaggio cruciale per prevedere l'impatto di diversi modelli di gestione territoriale sul rischio idraulico, ottimizzando la pianificazione e la progettazione delle soluzioni di mitigazione. Tale prospettiva consente di proporre strumenti di supporto alle decisioni efficaci, capaci di guidare le amministrazioni locali verso interventi mirati, coerenti con la normativa vigente e fondati su analisi quantitative e spaziali. La ricerca si inserisce in un contesto di frammentazione normativa che, in Italia, tende ancora a separare gli strumenti dedicati al contenimento del consumo di suolo da quelli destinati alla rigenerazione urbana. L'analisi comparata dei principali riferimenti europei e nazionali evidenzia la necessità di promuovere un approccio integrato alla pianificazione, in cui la gestione sostenibile delle acque, la tutela del suolo

e la rigenerazione urbana siano affrontate come componenti interdipendenti di un'unica strategia di resilienza territoriale. In questo contesto, l'Emilia-Romagna è stata individuata come caso di studio per la sua elevata esposizione a eventi alluvionali e per la ricchezza di dati territoriali disponibili. La regione ha subito ripetuti episodi di allagamento, con eventi particolarmente gravi nel maggio 2023 e nell'ottobre 2024, che hanno messo in luce la vulnerabilità idrologica di ampi settori della pianura e la necessità di un approccio più integrato alla gestione del rischio. L'obiettivo complessivo della ricerca è quello di modellare il deflusso e la sedimentazione nei principali bacini della regione, valutando gli effetti delle trasformazioni del suolo, attraverso il confronto tra scenari pre- e post-urbanizzazione, elaborati sulla base dei dati storici e dei piani urbanistici comunali. L'approccio proposto si fonda su una modellazione multi-scala e multi-modello, che combina strumenti di valutazione dei servizi ecosistemici (InVEST) e di simulazione idrologica a scala di bacino (HEC-HMS). Questa integrazione consente di analizzare in modo coordinato la risposta del territorio alle trasformazioni urbanistiche, stimando in termini quantitativi l'impatto sull'equilibrio idrologico e la capacità di ritenzione dei suoli. I risultati ottenuti possono essere di supporto per la redazione di politiche di pianificazione strategica, ma anche più di dettaglio e quindi a livello comunale. Inoltre, lo schema metodologico proposto può essere replicato in altre aree geografiche rappresentando un punto di forza dell'attività di ricerca svolta.

1.2 Struttura della tesi

- **Introduzione:** questa sezione presenta una breve panoramica della ricerca condotta e gli obiettivi che si vogliono raggiungere.
- **Ricognizione normativa in Europa e in Italia:** fornisce una panoramica delle politiche europee ed italiane sui temi del consumo di suolo, della rigenerazione urbana e sulle strategie di mitigazione del rischio idraulico.
- **Area di studio:** inquadramento territoriale dell'area, con un focus sugli eventi alluvionali accaduti negli ultimi anni, analizzando i cambiamenti di uso del suolo degli ultimi 70 anni.
- **Materiali e metodi:** descrive lo schema metodologico utilizzato, replicabile in altre zone, i modelli utilizzati (InVEST, HEC-HMS) e i dati impiegati.
- **Risultati:** presenta i risultati delle metodologie applicate in due diversi contesti territoriali, la scala provinciale-intercomunale e la scala di bacino.

- **Discussione:** evidenzia i principali risultati, individuando le correlazioni ottenute dai diversi modelli utilizzati, i limiti delle metodologie e dei dati utilizzati.
- **Conclusioni:** sintetizza i risultati principali e le loro implicazioni, suggerendo sviluppi futuri di ricerca.

2 RICOGNIZIONE NORMATIVA IN EUROPA E IN ITALIA

Il suolo è oggi una questione centrale sia nell'agenda politica europea sia in quella nazionale, in quanto rappresenta un ecosistema fondamentale per la sopravvivenza umana sul pianeta. Oggi, più che mai, la sua tutela e il suo corretto utilizzo nei diversi contesti (agricolo, naturale, urbano) richiedono politiche rigorose e immediatamente attuabili. La difficile reversibilità delle trasformazioni urbane costituisce la principale minaccia all'integrità ecosistemica del suolo. Partendo da questa premessa, nel presente capitolo si analizza come alcuni tra i principali Paesi europei (Italia, Francia, Germania e Spagna) stiano affrontando il tema del raggiungimento dell'obiettivo di consumo di suolo netto zero entro il 2050, attraverso l'esame delle normative e delle strategie attualmente in vigore. I risultati evidenziano come l'aspetto regolativo svolga un ruolo chiave nella gestione del fenomeno e come l'assenza di una legge quadro nazionale possa generare forti distorsioni e interpretazioni divergenti del suolo come ecosistema. L'analisi della Nature Restoration Law, adottata dalla Commissione europea nel luglio 2023, consente di valutare se le normative e le misure adottate dai principali Paesi europei siano coerenti con gli orientamenti dell'Unione europea. Viene inoltre analizzata la Direttiva Alluvioni, direttiva europea in materia di acque, che introduce l'obbligo di predisporre piani di gestione dei bacini idrografici per tutti i distretti idrografici al fine di realizzare un buono stato ecologico e chimico delle acque e contribuire a mitigare gli effetti delle alluvioni. Questa ricognizione normativa è necessaria perché, una volta definiti con chiarezza gli obiettivi della ricerca, consente di inquadrare correttamente il contesto normativo, in particolare quello italiano, chiarendo il quadro di riferimento entro cui ci si muove dal punto di vista delle norme.

2.1 Inquadramento scientifico dei concetti

Prima di procedere alla ricognizione dei quadri normativi europeo e italiano, si ritiene opportuno richiamare sinteticamente i principali concetti scientifici che costituiscono il riferimento della ricerca, con particolare riguardo al consumo di suolo, alla rigenerazione urbana e al rapporto tra trasformazioni insediative e rischio idraulico. Nel contesto europeo, il tema del consumo di suolo e della rigenerazione urbana è affrontato attraverso un insieme di strategie, regolamenti e direttive che orientano le politiche degli Stati membri. Nel dibattito contemporaneo sulla pianificazione territoriale e urbanistica, le politiche di contenimento del consumo di suolo e di rigenerazione urbana assumono un ruolo centrale non solo in relazione alla tutela ambientale e paesaggistica, ma anche rispetto alla riduzione dei rischi naturali e, in particolare, del rischio idraulico. Numerosi studi (Poelmans & Van Rompaey, 2011; Salvati et al., 2017) hanno evidenziato come la progressiva impermeabilizzazione delle superfici, associata a modelli di urbanizzazione diffusa e a bassa densità, alteri in modo significativo i processi idrologici, incrementando il deflusso superficiale, riducendo la capacità di infiltrazione e amplificando la risposta dei bacini idrografici agli eventi di precipitazione intensa (Poelmans & Van Rompaey, 2011; Salvati et al., 2017). Il consumo di suolo è definito, secondo la Direzione Generale Ambiente della Commissione Europea, come “l’aumento nel tempo delle superfici artificiali (aree residenziali; aree verdi urbane; unità industriali, commerciali e di trasporto; reti stradali e ferroviarie)” (Prokop et al., 2011). Questa definizione può essere messa in discussione: parlare di aumento delle superfici artificiali implica infatti che lo stato precedente di tali superfici fosse, per contrasto, “naturale” (Decoville & Schneider, 2016). La rigenerazione urbana, soprattutto in Italia, è talvolta ancora fraintesa come unica risposta al contenimento del consumo di suolo ed è associata esclusivamente al recupero del patrimonio edilizio. Per essere sostenibile, la rigenerazione urbana deve partire da ciò che esiste già, senza generare nuovo consumo di suolo. Le porzioni di territorio non ancora artificializzate sono risorse finite e non rinnovabili che devono essere valorizzate attraverso iniziative che promuovano la rigenerazione. La letteratura scientifica (Dietz, 2007; Dietz & Clausen, 2008; Fan et al., 2022; Fletcher et al., 2015; Riechel et al., 2020; Rosso et al., 2019; Zahmatkesh et al., 2015; Zhou, 2014) riconosce infatti che strategie come le Low Impact Development (LID) e, più in generale, i Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), possono contribuire in modo significativo alla riduzione dei picchi di deflusso e al miglioramento della resilienza idrologica dei contesti urbanizzati. La definizione di “consumo di suolo” identifica il fenomeno della conversione urbana del territorio, con la rimozione degli strati superficiali del suolo e la

loro sostituzione con coperture artificiali (Romano et al., 2015). È un fenomeno connesso a dinamiche insediative e infrastrutturali, dovuto principalmente alla costruzione di nuovi edifici e insediamenti, all'espansione delle città, alla densificazione o conversione di suoli all'interno di aree urbane e allo sviluppo infrastrutturale del territorio (Munafò, 2023).

2.2 Quadro normativo europeo

L'Europa presenta un mosaico diversificato di paesaggi, dove è visibile l'impatto dei cambiamenti d'uso del suolo nel tempo. Il territorio dell'Unione Europea (UE) è intensamente utilizzato, con circa l'80% destinato a insediamenti, infrastrutture, agricoltura e foreste. I modelli d'uso del suolo e le loro trasformazioni sono influenzati da numerosi fattori interrelati, come dinamiche demografiche, mercati globali, trend economici e specificità topografiche e climatiche (Diogo et al., 2017). Rigenerazione urbana e sviluppo sostenibile sono due temi chiave e intrecciati nell'agenda politica, nelle pratiche di pianificazione e nella ricerca. Per “rendere le città inclusive, sicure, resilienti e sostenibili”, l'Obiettivo di Sviluppo Sostenibile (SDG) n. 11 dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite si concentra sull'ambiente urbano, e la New Urban Agenda sostiene tale obiettivo promuovendo la pianificazione urbana come strumento influente per lo sviluppo sostenibile (Carrà et al., 2023). L'esame delle migliori pratiche in Germania, Francia e Spagna offre spunti preziosi su modelli di rigenerazione urbana efficaci. La Nature Restoration Law (NRL) è stata adottata dal Parlamento Europeo nel luglio 2023 e il 18 agosto 2024 è entrata in vigore come Regolamento sul ripristino della natura (Nature Restoration Regulation - NRR) approvato con regolamento del Parlamento Europeo e del Consiglio del 24 giugno 2024, e il cui principale obiettivo è fermare l'attuale perdita e ripristinare la biodiversità dell'UE, per raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 e adattarsi ai cambiamenti climatici, e per migliorare la sicurezza alimentare. Il regolamento stabilisce obblighi specifici per i diversi tipi di ecosistema, fra cui terreni agricoli (SNPA (Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente), 2025), foreste ed ecosistemi urbani. Riconosce che i suoli sono parte integrante degli ecosistemi terrestri e istituisce un quadro all'interno del quale gli Stati membri attuano misure di ripristino efficaci allo scopo di

- ripristinare il 20% degli ecosistemi degradati entro il 2030 e tutti gli ecosistemi che necessitano di ripristino entro il 2050;
- ripristinare almeno il 30% degli ecosistemi terrestri, costieri, d'acqua dolce e marini che non sono in buono stato entro il 2030, con particolare attenzione agli habitat protetti e alle aree della rete Natura 2000;

- rimuovere barriere artificiali per ripristinare almeno 25.000 km di fiumi a scorrimento libero;
- piantare almeno tre miliardi di alberi entro il 2030 per migliorare la biodiversità e l'ecosistema urbano.

Lo scopo del regolamento è porre rimedio alle alterazioni causate dall'antropizzazione; pertanto, la NRR trova la sua maggiore applicazione nel tipo di intervento che ha modificato le condizioni naturali originarie, cioè negli spazi trasformati prima dell'insediamento e dello sfruttamento della natura. Questa politica è rivolta anche alle aree urbanizzate, collocandosi al centro della pianificazione urbana e territoriale: interviene esplicitamente sul verde urbano, ma implicitamente coinvolge anche corsi d'acqua, agricoltura urbana e produzione di energia da fonti rinnovabili, costituendo uno strumento per la creazione di infrastrutture verdi e blu (SNPA (Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente), 2025). Comprendere i potenziali impatti e i limiti della legge è essenziale per orientare futuri aggiustamenti e miglioramenti delle politiche. La NRR contribuirà a ripristinare aree degradate e ad allineare l'Europa agli obiettivi del Green New Deal e della Strategia Europea per la Biodiversità. La NRR, sebbene indirettamente, è strettamente connessa al concetto di consumo di suolo. Le misure previste possono essere integrate senza particolari difficoltà nel quadro legislativo francese, dove la nozione di consumo di suolo assume prevalentemente un significato ecologico. La Francia privilegia un uso prudente del suolo e il rinnovamento urbano rispetto all'espansione, definendo obiettivi ambiziosi per raggiungere l'azzeramento dell'artificializzazione entro il 2050. La Spagna presenta alcune convergenze con la NRR, sebbene la legislazione esistente richieda integrazioni per allinearsi agli obiettivi dell'Unione Europea. In Germania si osserva un notevole allineamento con i principi sostenuti dalla NRR. Tuttavia, la situazione in Italia risulta più complessa, a causa dell'assenza di una legge nazionale che affronti specificamente consumo di suolo e rigenerazione urbana. Sebbene alcune regioni italiane possano essere in linea con le disposizioni della NRR, l'intero sistema legislativo richiede aggiornamenti e, in alcuni casi, costruzione ex novo, per allinearsi pienamente alle azioni proposte. Un ulteriore aspetto cruciale riguarda la varietà di tipologie insediative presenti nei Paesi analizzati. In particolare, Germania e Francia condividono una morfologia urbana relativamente simile, che contrasta nettamente con i casi di Italia e Spagna. In Spagna non esiste una definizione chiara di consumo di suolo a livello nazionale: vengono fornite definizioni specifiche di suolo urbanizzato o decentrato, senza un quadro concettuale complessivo per il concetto di uso del suolo. In Germania, il consumo di suolo valuta la trasformazione

di territori non artificiali in aree residenziali e reti di trasporto. In Francia, il concetto è intrinsecamente legato a un valore ecologico, enfatizzando un approccio orientato alla protezione ambientale. In Germania e Francia, i paesaggi urbani mostrano caratteristiche comparabili, riflettendo un'impostazione condivisa dello sviluppo urbano. Tale affinità morfologica può influenzare il modo in cui queste nazioni affrontano sfide diverse e implementano politiche legate a uso e sviluppo del suolo. Un esempio è la Germania, che ha introdotto un quadro nazionale diversi anni fa: non solo ha raggiunto alcuni obiettivi in anticipo, ma sta anche perfezionando attivamente le strategie per conseguire il traguardo finale di azzeramento del consumo netto di suolo. Questo risultato costituisce un esempio rilevante dell'efficacia di un quadro normativo complessivo. Al contrario, Italia e Spagna mostrano pattern insediativi altamente distinti. Numerosi studi internazionali hanno evidenziato come gli insediamenti urbani italiani seguano uno dei modelli più dispersi d'Europa, generando sfide numerose, eterogenee e gravi (Romano et al., 2019).

La gestione del rischio idraulico e alluvionale nei Paesi europei si inserisce in un quadro normativo comune definito dalla Unione Europea, in particolare dalla Direttiva 2007/60/CE, nota come *Direttiva Alluvioni*. Tale direttiva istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque, introduce l'obbligo di predisporre piani di gestione dei bacini idrografici per tutti i distretti idrografici al fine di realizzare un buono stato ecologico e chimico delle acque e contribuire a mitigare gli effetti delle alluvioni (Parlamento Europeo, 2007). La Direttiva ha introdotto un approccio ciclico e integrato alla gestione del rischio, fondato sulla valutazione preliminare della pericolosità, sulla redazione di mappe di pericolosità e di rischio e sull'elaborazione dei Piani di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA), con l'obiettivo di ridurre le conseguenze negative delle alluvioni sulla salute umana, sull'ambiente, sul patrimonio culturale e sulle attività economiche.

2.2.1 Spagna

La Spagna è definita come uno Stato quasi federale con quattro livelli di governo: governo nazionale, 17 comunità autonome, 50 province e 8119 comuni. Le comunità autonome sviluppano e integrano la legislazione quadro nazionale in materia di uso del suolo stabilendo il proprio quadro legislativo per la pianificazione territoriale (OECD, 2017). In Spagna, le responsabilità regolative sull'uso del suolo sono condivise tra diversi livelli di governo. Il governo centrale stabilisce il riferimento normativo (in particolare per la protezione delle aree designate come "non edificabili"), mentre i governi locali

sono responsabili dell'approvazione dei piani urbanistici comunali (Gómez-Antonio et al., 2016). Dall'approvazione della Costituzione spagnola del 1978, il Paese opera su tre livelli — nazionale, regionale e locale — con poteri legislativi distribuiti tra governo centrale e governi regionali. Sebbene le autorità locali non dispongano di poteri legislativi, assumono responsabilità rilevanti di governance e gestione. Sviluppo urbano, pianificazione territoriale e politiche abitative rientrano nelle competenze delle regioni, impedendo al governo centrale di legiferare su tali materie. Tuttavia, gli strumenti regionali di pianificazione derivano in larga parte dalla *Land Act* del 1956 e la pianificazione territoriale agisce spesso come cornice restrittiva della pianificazione urbanistica. I piani urbanistici generali stabiliscono diritti e obblighi dei proprietari fondiari, e i piani successivi si basano su di essi e li specificano. La decentralizzazione mira ad adattare lo sviluppo urbano alla diversità culturale, climatica e territoriale della Spagna. Differenze insediative, costruttive e ambientali tra regioni come Asturie, Estremadura, Catalogna, Madrid e Valencia rendono impraticabile un approccio uniforme. Le differenze nella pianificazione territoriale sono particolarmente marcate tra comunità autonome, e spesso gli sforzi legislativi risultano prioritari rispetto all'implementazione. L'incapacità del Governo regionale di Madrid di approvare il Piano Strategico Territoriale Regionale è un esempio della difficoltà: la pianificazione territoriale rimane prevalentemente affidata a piani settoriali, senza una visione territoriale integrata per il coordinamento (Tojo & Naredo, 2010). Il Real Decreto Legislativo 7/2015, emanato il 30 ottobre, approva il testo consolidato della Legge del 2015 sul Suolo e sulla Riabilitazione Urbana. Secondo la Costituzione spagnola, l'uso del suolo e la pianificazione urbanistica rientrano nella competenza delle comunità autonome. Di conseguenza, tutte le comunità autonome includono tali poteri legislativi nei rispettivi statuti di autonomia, mentre gli enti locali mantengono poteri gestionali, ma non sulla disciplina del regime proprietario (Postiguillo, 2020). La gestione del suolo in Spagna è stata complessa e lenta. Attualmente, alcune leggi regionali mirano a facilitare una migliore gestione del suolo, introducendo nuove regolazioni che promuovono lo sviluppo professionale (J. Ponce, 2004). La Spagna affronta un degrado del territorio esteso, causato da cambiamenti di uso e copertura del suolo, ad esempio per l'abbandono dei terreni e per condizioni geo-ecologiche locali (van Leeuwen et al., 2019). L'Agenda Urbana Spagnola 2030 stabilisce che la pianificazione territoriale debba fare un uso razionale del suolo e che lo sprawl urbano vada evitato, rivitalizzando le aree urbane esistenti. La definizione di politiche di pianificazione rigorose e la loro attuazione sono necessarie per prevenire futuro degrado del suolo e mantenere la compattezza urbana

nelle città spagnole (Domingo et al., 2021). Ricerche hanno mostrato che tra il 2000 e il 2012 la Spagna è stata di gran lunga il Paese con la maggiore crescita di consumo di suolo (218.000 ha, pari al 19% del totale europeo). Ciò è avvenuto anche a un ritmo più rapido. Questo è coerente con altre evidenze, come l'aumento dei prezzi dell'urbanizzazione nel decennio precedente, "sostanzialmente più marcato che in Europa nel suo complesso". Da un punto di vista quantitativo e a scala europea, nello stesso periodo la Spagna ha registrato la maggiore quantità di suolo artificializzato in Europa (218.200 ha), sviluppando più di Germania, Regno Unito e Italia messi insieme, e il 47% in più rispetto al Paese al secondo posto, la Francia. In 22 anni, la superficie urbanizzata della Spagna è aumentata di 504.543 ha, equivalenti a metà del suolo già occupato da città, centri e infrastrutture prima del 1990 (Echavarrí et al., 1990). Negli ultimi decenni, riabilitazione e rigenerazione urbana sono state priorità per il governo spagnolo a tutti i livelli: dall'organo centrale che definisce linee guida e strategie, fino agli organi regionali che le implementano operativamente. La "Ley de Rehabilitación, Regeneración y Renovación Urbanas" (2013) rappresenta l'indicatore più importante di tale attenzione. Questa legge quadro modifica e integra la normativa esistente e propone una nuova prospettiva per l'azione pubblica in urbanistica, centrata su interventi nelle aree esistenti e sulla creazione di condizioni ambientali, sociali ed economiche favorevoli allo sviluppo sostenibile e alla qualità della vita. Questo rinnovato interesse per la città riguarda spesso aree urbane colpite da abbandono e decadimento fisico e sociale, utilizzando elementi naturali e culturali come strumenti di rigenerazione (Angel et al., 2023). L'Agenda Urbana Española (2019) è uno strumento strategico importante che contiene un decalogo di obiettivi rilevanti per promuovere e migliorare gli spazi urbani in Spagna. La scomposizione di tali obiettivi in 30 obiettivi specifici e 291 linee d'azione è particolarmente dettagliata e offre un quadro completo di priorità e ambiti di intervento. Questa struttura organizzata non solo fornisce chiarezza nella definizione degli obiettivi, ma anche flessibilità nell'approccio pratico. La concezione dell'Agenda come un "menù à la carte" sottolinea la sua adattabilità alle diverse esigenze e contesti locali e consente ai soggetti coinvolti di selezionare e adattare gli obiettivi in base alle specificità del proprio comune o area urbana. In questo modo, l'Agenda Urbana Española non solo orienta il cambiamento urbano, ma incoraggia anche la partecipazione attiva e personalizzata delle autorità locali e degli stakeholder, rafforzando efficacia e sostenibilità delle iniziative (UN-Habitat, 2022). In Spagna, la Direttiva Alluvioni è stata recepita con il *Real Decreto 903/2010* (Gobierno de España, 2010), che disciplina la valutazione preliminare del rischio di inondazione, la produzione delle mappe di

pericolosità e rischio e l'elaborazione dei *Planes de Gestión del Riesgo de Inundación*. Tale normativa si integra con il *Texto Refundido de la Ley de Aguas* (Real Decreto Legislativo 1/2001), che regola il dominio pubblico idraulico e introduce limitazioni all'uso del suolo nelle zone inondabili, riconoscendo esplicitamente il ruolo della pianificazione urbanistica nella prevenzione del rischio. A completamento del quadro normativo, il *Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones* definisce le procedure di gestione dell'emergenza, rafforzando il coordinamento tra pianificazione preventiva e risposta operativa agli eventi estremi.

2.2.2 Germania

Il consumo di suolo è particolarmente rilevante in Germania, che registra uno dei tassi più elevati nell'Unione Europea. Anche in aree con popolazione in calo, l'espansione delle aree urbanizzate continua in tutto il Paese (Hagenauer & Helbich, 2018). Il consumo di suolo è quantificato sulla base di due dataset: l'"Authoritative Real Estate Cadastre Information System" e il "Digital Basic Landscape Model of the Authoritative Topographic and Cartographic Information System" (Nicolau & Condessa, 2022; Schorch et al., 2016). In Germania, il consumo di suolo comprende la conversione di aree non artificiali in insediamenti e reti di trasporto (escludendo, ad esempio, la creazione di siti minerari su suolo non sviluppato) (Nicolau & Condessa, 2022). Gli obiettivi nazionali miravano a ridurre il consumo da 56 ettari/giorno nel 2018 a 30 ettari/giorno nel 2020 (Mascarenhas et al., 2019b). Questo target non è stato raggiunto ed è ora in revisione per il 2030, in linea con l'SDG n. 11. Tali obiettivi, a livello nazionale o federale, difficilmente si traducono in impatti locali mirati, a causa del loro carattere non vincolante e della sovranità pianificatoria dei comuni tedeschi. Pertanto, la riduzione del consumo è raggiungibile solo tramite autoimpegno delle autorità locali. Anche se alcuni comuni riducono il proprio consumo, altri possono trarne vantaggio attirando utilizzatori di suolo provenienti dai comuni "virtuosi" (Meyer et al., 2021). Così, i guadagni di efficienza nelle regioni in crescita vengono controbilanciati da inefficienze altrove, probabilmente per effetto di prezzi fondiari più bassi nelle aree con sprawl a bassa densità (Mascarenhas et al., 2019a). Questo "leakage" rende la governance del consumo di suolo particolarmente difficile, e richiede quindi un approccio efficace e accettato nella pratica (Meyer et al., 2021). Le attuali iniziative di rinnovo urbano nelle principali città tedesche perseguono un duplice obiettivo: da un lato la riqualificazione energetica, dall'altro la riconsiderazione della morfologia urbana. Queste iniziative esplorano nuove opportunità trasformando quartieri periferici per contrastare l'urbanizzazione rurale e preservare spazi naturali, migliorando il benessere sociale e mobilitando risorse per una

rivitalizzazione complessiva. Grandi centri amministrativi oggi sottoutilizzati vengono individuati come opportunità di rinnovo urbano, attraverso la conversione in quartieri residenziali, rappresentando un nuovo punto di partenza nelle politiche di riforma suburbana tedesca. Le città sono intese come entità dinamiche, capaci di adattarsi a diverse forme architettoniche. I progetti si trasformano in “spazi di vita” orientati ad aumentare la densità e ripristinare la complessità morfologica con strade e piazze vive. Inoltre, mediante rigenerazione basata sulla natura e una rinnovata connessione con essa, questi progetti offrono ai quartieri l’opportunità di aumentare il proprio valore e diventare elementi identitari o poli attrattivi nei paesaggi suburbani. Insediamenti originariamente isolati vengono reintegrati nella vita urbana, riflettendo un nuovo concetto di stratificazione sociale (Il Giornale dell’Architettura, 2020). Nella Repubblica Federale Tedesca, i primi sforzi di rinnovo urbano emersero in seguito a progetti pilota regionali, in particolare a Berlino e nel Nord Reno-Westfalia. Il culmine fu l’adozione nel 1971 della Urban Development Promotion Act, che pose le basi per la stabilizzazione di misure di rinnovo urbano area-specifiche, centrali nel sistema di promozione dello sviluppo urbano. Il quadro si fonda sul diritto urbanistico speciale del Federal Building Code, che consente disposizioni particolari per aree di riqualificazione designate da regolamenti comunali, al fine di affrontare in tempi definiti questioni di sviluppo urbano. Esso conferisce alle autorità locali opzioni giuridiche, tra cui autorizzazioni condizionate e diritti di prelazione durante costruzioni o demolizioni, facilitando il raggiungimento degli obiettivi. Inoltre, supporta progetti con fondi federali e statali per compensare costi non redditizi derivanti da attività regolative o edilizie. Si ritiene che i fondi pubblici abbiano importanti effetti di innesco e aggregazione, mobilitando ulteriori risorse nelle aree in rinnovo (Altrock, 2018). Il programma Urban Redevelopment Program East fu introdotto nel 2002 e quello West nel 2004, con l’obiettivo di creare e mantenere città funzionanti di tutte le dimensioni. L’attuale varietà di programmi è essenziale per finanziare pianificazione e rivitalizzazione urbana, indipendentemente dalla dimensione o dalla natura urbana/rurale delle comunità beneficiarie. Tale diversità riflette bisogni differenti di periodi e territori. Un vantaggio è la possibilità di erogare fondi in base alle esigenze dettagliate di ciascun progetto e comunità. La precondizione di un concetto di sviluppo integrato garantisce che i progetti considerino le “linee guida” delle decisioni nazionali ed europee in materia di ecologia, sostenibilità e cambiamento climatico. Inoltre, i distretti dovrebbero rispondere ai bisogni di tutti i residenti e tener conto dei cambiamenti strutturali demografici ed economici. Nei centri urbani, il programma sostiene la conservazione degli edifici storici e la rivitalizzazione di aree ed edifici degradati, in

coerenza con requisiti di sostenibilità e cambiamento climatico (Zabel & Kwon, 2021). Tra la legislazione recente si trovano la “German Strategy for Sustainable Development” (2021) e il “Federal Action Plan for Nature-based Solutions for Climate and Biodiversity” (2023). In Germania, il recepimento della Direttiva Alluvioni è avvenuto principalmente attraverso il Wasserhaushaltsgesetz (WHG), la legge federale sulle risorse idriche (Bundesrepublik Deutschland, 2009). In particolare, i paragrafi 74 e 75 del WHG disciplinano la redazione delle mappe di pericolosità e di rischio e dei piani di gestione del rischio alluvionale, mentre il paragrafo 76 introduce la definizione e la tutela giuridica delle Überschwemmungsgebiete, ovvero le aree inondabili. In tali aree sono previste limitazioni stringenti all’uso del suolo e allo sviluppo urbanistico, con l’obiettivo di ridurre l’esposizione al rischio e preservare la funzione di laminazione naturale delle piene. A seguito degli eventi alluvionali estremi degli ultimi anni, il quadro normativo è stato ulteriormente rafforzato con il Hochwasserschutzgesetz II (2017), che ha introdotto misure volte a migliorare la prevenzione, semplificare le procedure per gli interventi di protezione e rafforzare l’integrazione tra pianificazione idraulica e pianificazione territoriale. Il modello tedesco si caratterizza dunque per un forte ancoraggio normativo alla regolazione dell’uso del suolo nelle aree a rischio.

2.2.3 Francia

La pianificazione urbana e territoriale svolge un ruolo importante nella comprensione e nella gestione dello sprawl urbano (Gibelli, 2012). Il sistema di pianificazione francese ha subito cambiamenti rilevanti negli ultimi decenni, basati su diverse leggi promosse dal governo centrale per adattarsi meglio ai nuovi paradigmi della società (Giudice et al., 2017). A partire dagli anni '80, con l'autonomia decisionale attribuita ai comuni dalle leggi di decentramento, sono stati avviati investimenti nella cooperazione intercomunale per contenere l'aumento dello sprawl urbano. Con la legge del 1999 (Legge n. 586 del 12 luglio 1999), gli obiettivi della cooperazione sono stati ampliati e orientati al raggiungimento della sostenibilità, della coesione territoriale, della pianificazione al livello adeguato (città propriamente detta o *bassin de vie*), di una governance effettiva tramite delega ampia di competenze in materia di pianificazione urbana e di settore, all'implementazione di progetti integrati e, soprattutto, alla solidarietà fiscale. Quest'ultima rappresenta un'innovazione importante perché, senza perequazione territoriale, è irrealistico contenere il consumo di suolo, limitare la dipendenza dei comuni dai sussidi per l'edilizia residenziale e migliorare efficienza economica e qualità territoriale se è consentita una competizione frammentata tra comuni. La *Taxe Professionnelle Unique* (TPU), obbligatoria per le grandi aree metropolitane e facoltativa

per i piccoli comuni, ha introdotto un modello efficiente di perequazione territoriale che rialloca circa il 40% delle entrate fiscali locali alle *Communautés*. Il sostegno statale alla perequazione territoriale consiste nel sovvenzionare i comuni attraverso un fondo perequativo legato all'intensità della cooperazione intercomunale (DGF: *Dotation Globale de Fonctionnement*) (Gibelli, 2006). L'attuazione della legge ha comportato diverse criticità, tra cui un significativo aumento della spesa pubblica, l'emergere di *intercommunalités de rassemblement* territorialmente limitate e caratterizzate da dinamiche sociali e politiche omogenee, e il rischio di "malthusianismo fondiario" in *Communautés* con livelli sociali e ambientali elevati, che ostacola opportunità di urbanizzazione per funzioni e gruppi vulnerabili (Charmes, 2007; Gibelli, 2006). La legge francese "Loi de solidarité et du renouvellement urbain" (Legge n. 1208 del 13 dicembre 2000) è la prima legge urbanistica in Francia che promuove il rinnovamento urbano invece dell'espansione delle aree urbane, favorendo così la densificazione delle città anziché l'uso di suolo non edificato per lo sviluppo urbano (Naumann et al., 2019). Questa legge riorganizza le missioni del piano metropolitano (SCOT/*Schéma de la Cohérence Territoriale*) introducendo una regola per il consumo prudente delle aree periurbane, la cosiddetta "regola dei 15 km". Secondo tale regola, se i comuni di un'agglomerazione urbana non si accordano e non approvano lo SCOT, tutti i comuni situati a meno di 15 km dai centri urbani con almeno 50.000 abitanti o dalle coste non possono realizzare interventi significativi di urbanizzazione in nuove aree periferiche né creare grandi aree commerciali. La progettazione accurata dei confini urbano-rurali per proteggere aree agricole e spazi naturali è di importanza centrale in diversi contesti. In Francia, ad esempio, viene prestata particolare attenzione alle linee di contatto tra spazi urbani e spazi naturali e agricoli, in quanto interpretate come limiti dell'urbanizzazione, spazi di transizione e di valorizzazione reciproca tra città e natura. Le migliori pratiche in questo ambito hanno beneficiato di rilevanti sforzi finanziari e di coordinamento da parte dei governi centrali (Gibelli, 2012). Una delle svolte più importanti è stata la promulgazione nel 2010, da parte del Ministero francese dell'Ecologia, della legge "Engagement National pour l'Environnement" (più nota come legge Grenelle II), che ha rafforzato i requisiti ambientali da integrare nei documenti di pianificazione (Giudice et al., 2017). La legge ha istituito un nuovo strumento per la protezione della biodiversità, la *Trame Verte et Bleue*, il primo tentativo di integrare i concetti dell'ecologia del paesaggio nella legislazione e negli strumenti di pianificazione territoriale (Novarina, 2015). La Grenelle II deriva dalla Strategia Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile, avviata nel 2006 per ridurre la crescita delle superfici artificiali incoraggiando nuove

infrastrutture su suolo già sviluppato. La Grenelle II include una linea d'azione per la riduzione del consumo di suolo (Prokop et al., 2011). L'obiettivo francese è ambizioso: entro il 2050 dovrà essere raggiunto un livello zero di artificializzazione, cioè non ci saranno più aree intatte trasformate in aree urbanizzate, ma solo aree già urbanizzate che vengono trasformate. A tal fine, il governo francese ha istituito un fondo di 750 milioni di euro per finanziare progetti di riqualificazione di brownfield, in particolare nelle ex regioni industriali, spesso descritte come un "setaccio ecologico" difficile da contenere (La Svolta, 2023). La lotta contro l'artificializzazione del suolo è un punto centrale del "Piano Biodiversità" (2018), per conseguire la "neutralità" (o "zero netto") dell'artificializzazione. L'obiettivo è limitare il più possibile il consumo di nuovo suolo e, se ciò non è possibile, "restituire alla natura" un valore equivalente di suolo rispetto a quello consumato. La sfida è vigilare il più possibile sulle modalità di urbanizzazione: consumare meno suolo naturale, agricolo e forestale possibile; promuovere il riuso del suolo già urbanizzato (alloggi sfitti, aree industriali o commerciali dismesse); e progettare operazioni più compatte che integrino spazi verdi. La legge Élan (2018) incoraggia gli enti locali a sviluppare progetti di intensificazione urbana per ridurre lo sprawl incontrollato (Sannolo, 2020). A ciò è seguito nel 2019 un rapporto denominato "France Relance", che ha previsto 650 milioni di euro per due misure principali. La prima, di "concentrazione urbana" (densificazione), destina 350 milioni ai sindaci dei comuni con la maggiore espansione (quindi con consumo di suolo), ad esempio concedendo aiuti — basati sui permessi di costruire e all'interno dei limiti urbani — per sopraelevare un edificio di uno o due piani, passando ad esempio da 20 a 30 nuovi appartamenti, invece di consumare suolo non urbanizzato (*greenfields*). La seconda istituisce un fondo di 300 milioni per brownfield o aree urbane sottoutilizzate (circa 1375 in Francia), per spostare lì la domanda di nuove costruzioni. Il piano di ripresa francese aggiunge poi un'azione complessa mirata alla rivitalizzazione dei centri storici, in relativo declino in alcune aree del Paese. Alcuni strumenti e programmi nazionali vengono sostenuti o accelerati, sia per le "piccole città del futuro" sia per i "centri città". La legge Clima e Resilienza (2021) fissa l'obiettivo di raggiungere "l'assenza di qualsiasi artificializzazione del suolo" entro il 2050, noto come *Zero Net Artificialization* (ZAN). Essa stabilisce anche un obiettivo intermedio iniziale: dimezzare il tasso di artificializzazione in dieci anni (2021–2031). Lo ZAN non implica la cessazione di ogni costruzione; al contrario, lo sviluppo deve essere conciliato con il rilancio dell'offerta abitativa (Sannolo, 2020). La legge Clima e Resilienza definisce il consumo di suolo all'articolo n. 194 come segue: "per consumo di spazi naturali, agricoli e forestali si intende la creazione o l'estensione effettiva di aree

urbanizzate nel territorio interessato. Nello stesso territorio, la trasformazione effettiva di aree urbanizzate o edificate in spazi naturali, agricoli e forestali, quale risultato della rinaturalizzazione, può essere detratta da tale consumo” (Sannolo, 2020). In Francia, la Direttiva Alluvioni è stata recepita nel *Code de l'environnement* (Legge n. 2010-788 del 12 luglio 2010, artt. L.566-1 e seguenti), che costituisce il riferimento normativo principale per la politica nazionale di prevenzione del rischio di inondazione (République Française, 2011). Il sistema francese si fonda su una pianificazione a scala di bacino, attraverso i *Plans de Gestion des Risques d'Inondation*, che integrano le mappe di pericolosità e rischio con misure di prevenzione, protezione e preparazione. Un aspetto particolarmente rilevante del modello francese è l'introduzione della competenza GEMAPI (*Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations*), formalizzata con la legge MAPTAM del 2014 (République Française, 2014), che attribuisce agli enti locali e intercomunali la responsabilità diretta della gestione dei corsi d'acqua e della prevenzione delle alluvioni. Questo assetto rafforza il legame tra gestione del rischio idraulico, governo del territorio e politiche locali di uso del suolo, promuovendo soluzioni basate sulla gestione integrata dei bacini e sulla valorizzazione delle aree di espansione naturale delle piene.

2.3 Quadro normativo italiano

In Italia non esiste una legge nazionale sulla riduzione del consumo di suolo o sulla rigenerazione urbana. L'assenza di un approccio unitario ha prodotto leggi regionali molto diverse per contenuti e obiettivi. L'obiettivo della maggior parte delle leggi attuali in Italia, differenti da regione a regione nelle modalità di gestione del territorio, non pone la pianificazione al centro e interpreta la rigenerazione urbana come mera riqualificazione di parti del territorio urbanizzato, tramite interventi di riassetto fisico-spaziale e urbanistico-edilizio, talvolta incentivati da bonus volumetrici o economici (Il Giornale dell'Architettura, 2020). Molte leggi regionali fanno riferimento a definizioni che non considerano il consumo di suolo che avviene entro i confini delle aree urbanizzate o su suoli destinati all'urbanizzazione. L'intensa attività normativa si è complessivamente stabilizzata, e le politiche regionali hanno puntato all'obiettivo di ridurre gradualmente la sottrazione di suolo incolto per insediamenti e infrastrutture, in linea con l'obiettivo europeo di azzerare tale consumo entro il 2050. Tuttavia, al momento, non sembra essere riuscita a fermare questa corsa al suolo (Munafò, 2023). Il diverso trattamento dei concetti di “consumo di suolo” e “rigenerazione urbana” nelle singole regioni rende evidente la necessità di una strategia nazionale coerente. In questo quadro, il consumo di suolo non

rappresenta soltanto una trasformazione fisica del territorio, ma diviene un vero e proprio fattore strutturale di rischio, capace di generare nuove condizioni di vulnerabilità anche in aree storicamente non esposte a fenomeni alluvionali. Le politiche di rigenerazione urbana, se interpretate in una prospettiva integrata, offrono un'importante opportunità per intervenire su tali criticità, promuovendo il riuso del patrimonio edilizio esistente, la riduzione delle superfici impermeabili e l'introduzione di soluzioni basate sulla natura e su sistemi di drenaggio urbano sostenibile. Affinché tali politiche possano tradursi in un'effettiva riduzione del rischio idraulico, risulta tuttavia fondamentale il supporto di tecniche di monitoraggio territoriale e ambientale, in grado di fornire una conoscenza aggiornata e dinamica delle trasformazioni in atto. Il monitoraggio dell'uso del suolo, della pericolosità idraulica e degli elementi esposti, attraverso sistemi informativi geografici, banche dati territoriali e strumenti cartografici interoperabili, consente di raccordare gli obiettivi normativi con le scelte operative, fornendo una base conoscitiva solida per la valutazione degli effetti delle trasformazioni urbane sul ciclo idrologico. In questa prospettiva, il monitoraggio diviene l'elemento di connessione tra le politiche di tutela del suolo, la rigenerazione urbana e l'adozione di strumenti modellistici e indicatori territoriali a supporto dei processi decisionali.

2.3.1 Il consumo di suolo

Il consumo di suolo continua a trasformare il territorio nazionale a velocità elevate e crescenti. Nel 2024, le nuove coperture artificiali hanno interessato 83,7 km² ovvero, in media, 22,9 ettari al giorno, il 15,6% in più dell'anno precedente. Un incremento del suolo consumato, quindi, in forte accelerazione rispetto al dato dello scorso anno e che si conferma nettamente al di sopra della media dell'ultimo periodo (2012-2023), pari a 18,9 ettari al giorno (SNPA (Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente), 2025). Nel 2024 l'Italia ha perso oltre 2,7 m² di suolo ogni secondo: una crescita delle superfici artificiali solo in piccola parte compensata dal ripristino di aree naturali, pari a 5,2 km², dovuta al passaggio da suolo consumato a suolo non consumato (nella maggior parte dei casi grazie al recupero di aree di cantiere o di superfici che erano state già classificate come consumo di suolo reversibile e, solo in piccolissima parte, per azioni di deimpermeabilizzazione) (SNPA (Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente), 2025). In 15 regioni il suolo consumato stimato al 2024 supera il 5%, con i valori percentuali più elevati che si confermano in Lombardia (12,22%), Veneto (11,86%) e Campania (10,61%). Sopra alla media nazionale ci sono anche Emilia-Romagna, Lazio, Puglia, Friuli-Venezia Giulia e Liguria. La Valle d'Aosta rimane la regione con la percentuale più bassa (2,16%) (SNPA (Sistema Nazionale per la Protezione

dell'Ambiente), 2025). Ogni regione può avere decine di piani che coprono sia l'intero territorio regionale sia aree di tutela speciale, oltre a centinaia di piani urbanistici comunali (Montaldi, 2023). Ciascuno di questi piani presenta regole differenti, scale territoriali diverse e organi competenti differenti. Un punto strategico è quindi la mosaicatura e il monitoraggio degli strumenti urbanistici comunali e dei loro aggiornamenti, poiché essi rappresentano gli strumenti con maggiore potere decisionale nelle trasformazioni territoriali in Italia. La transizione verso un quadro chiaro e immediato delle potenziali future destinazioni insediative del territorio sarebbe legata a una mosaicatura in tempo reale dei contenuti dei piani regolatori generali aggiornati; tuttavia, ciò è fortemente ostacolato dall'attuale mancanza di protocolli relativi a legende uniformi degli strumenti comunali. Tutto ciò rende impossibile monitorare gli scenari previsionali regionali rispetto alle intenzioni di trasformazione dei comuni (Romano et al., 2017). Sebbene si cerchi di semplificare quanto più possibile ogni procedura, appare evidente che una misura efficace di contenimento del consumo di suolo non può essere concepita come immediata, né tanto meno elementare, nell'attuale quadro strumentale italiano, oggi quasi del tutto privo di dotazioni in materia. Una procedura efficiente richiederebbe dunque un percorso preparatorio che dovrebbe rivedere paradigmi apparentemente immutabili, tra cui, in primo luogo, l'eccessiva funzione garantista dei piani rispetto alla proprietà e ai diritti privati (Petroselli & Ioannilli, 2019). L'obiettivo di azzeramento del consumo netto di suolo (ossia l'equilibrio tra consumo di suolo e incremento di aree agricole, naturali e seminaturali tramite interventi di recupero, demolizione, de-impermeabilizzazione e rinaturalizzazione) deve essere visto anche come motore di rigenerazione e ridisegno del tessuto urbano e come opportunità di riqualificazione urbana e territoriale; esso va raggiunto attraverso l'implementazione simultanea di tutte le possibili azioni per allinearsi agli obiettivi nazionali, europei e globali (Munafò, 2023). Alla luce di questo sistema complesso e articolato di obiettivi, politiche e azioni attuate a vari livelli, è difficile formulare una valutazione scientifica degli scenari possibili di trasformazione del territorio italiano. Molte leggi regionali, pur avendo lo scopo di contenere il consumo di suolo, fanno riferimento a definizioni che non considerano il consumo realizzato entro i perimetri delle aree urbanizzate o su suoli destinati all'urbanizzazione, anche se ancora liberi (Montaldi, 2023). Questo tipo di classificazione, divergente rispetto a quella consolidata e ufficiale a livello nazionale ed europeo, finisce per incoraggiare ulteriore artificializzazione mascherata come utilizzo di aree già "occupate", mentre in realtà produce consumo di suolo e perdita di servizi ecosistemici, frustrando lo sforzo di raggiungere l'obiettivo fondamentale della tutela del

suolo, anche in ambito urbano (Munafò, 2023). A settembre 2025, sono state presentate più di 60 proposte di legge alle Camere, 38 delle quali non definiscono il fenomeno che intendono contrastare e le restanti contengono definizioni differenti.

2.3.2 La rigenerazione urbana e le tecniche di monitoraggio

L'assenza di un approccio unitario ha generato leggi regionali molto eterogenee per contenuti e focus. L'obiettivo di molte leggi attuali in Italia, che differiscono tra regioni nella gestione del territorio, non pone la pianificazione al centro e intende la rigenerazione urbana come mera riqualificazione di porzioni di suolo urbanizzato, attraverso interventi fisico-spaziali e urbanistico-edilizi, talvolta promossi da incentivi volumetrici o economici (Pellegrini, 2021). I processi di rigenerazione urbana devono coinvolgere tutti gli attori pubblici e privati interessati. Questi ultimi dovrebbero disporre delle competenze necessarie: conoscenza del territorio e tecniche utili a delineare caratteristiche degli insediamenti urbani, dello spazio, degli enti e del potenziale di rigenerazione del contesto, oltre alle risorse economiche disponibili (Petroselli & Ioannilli, 2019). Il corpus normativo sulla rigenerazione urbana comprende un quadro articolato di disposizioni, dalla definizione di un set di concetti all'introduzione di strumenti specifici, inclusi strumenti finanziari e di monitoraggio. Riguarda anche la dispersione insediativa e affronta aspetti di implementazione e coordinamento. I dati annuali di monitoraggio del territorio in Italia evidenziano come i suoli urbani, ossia quelli su cui si dovrebbe intervenire con la rigenerazione, abbiano registrato negli ultimi anni gli incrementi più significativi di consumo di suolo. Ciò ha determinato la scomparsa di preziose aree permeabili, aggravando frequenza e intensità di alluvioni e ondate di calore e causando la perdita di aree verdi accessibili ai cittadini, biodiversità e servizi ecosistemici. La rilevanza della rigenerazione urbana deriva anche dal dibattito su come proteggere il suolo da ulteriori consumi, garantendo che le aree non ancora artificializzate, beni preziosi per la comunità dentro e fuori il tessuto urbano, mantengano o migliorino le loro funzioni naturali. La rigenerazione urbana sostenibile, in sostanza, è rigenerazione senza consumo di suolo (Munafò, 2023). Nonostante l'assenza di una legge nazionale, in molte regioni sono state approvate leggi a supporto della rigenerazione urbana (Figura 2.1), introducendo misure eterogenee, prevalentemente di natura quantitativa (Pellegrini, 2021).

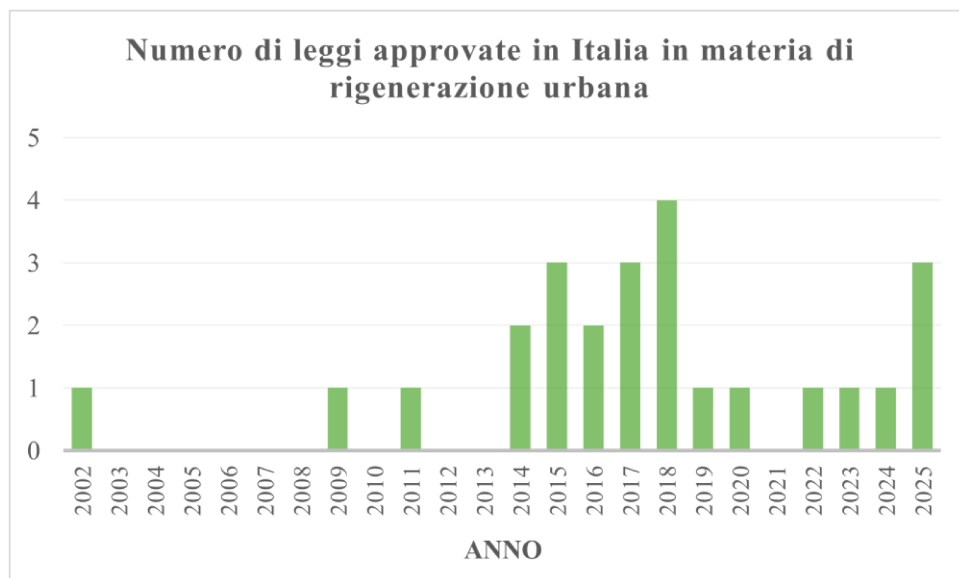


Figura 2.1: Leggi sulla rigenerazione urbana in Italia negli ultimi 23 anni.

La logica delle scelte politiche degli amministratori regionali è stata quella di conciliare l’obiettivo dichiarato di raggiungere un consumo netto di suolo pari a zero entro il 2050 con la necessità di tutelare il tessuto economico e sociale dei territori. Le regioni hanno orientato azioni legislative e politiche verso una maggiore protezione del territorio regionale, promuovendo trasformazioni urbane di qualità, riducendo il consumo di suolo e definendo strategie integrate di rigenerazione urbana. Questa rigenerazione è intesa come complesso sistematico di trasformazioni urbanistiche ed edilizie riguardanti aree e complessi caratterizzati da degrado urbano, edilizio, ambientale o socio-economico, senza causare consumo di suolo. Tali trasformazioni devono essere attuate con metodologie e tecniche di sostenibilità ambientale, rinaturalizzazione reversibile, recupero di servizi ecosistemici perduti, de-impermeabilizzazione, bonifica, incremento del potenziale ecologico e ambientale e della biodiversità urbana, dando priorità al riuso. All’interno del territorio urbanizzato, il riuso e la rigenerazione degli edifici esistenti sono spesso agevolati tramite deroghe a standard normativi (distanze, altezze, densità), semplificazioni procedurali e altri strumenti (ricostruzione e successiva demolizione, opere incongrue, catasto, usi temporanei). Alcune regioni (Sicilia, Friuli-Venezia Giulia) hanno emanato disposizioni specifiche per il recupero di edifici esistenti abbandonati in aree rurali e centri storici, per garantire sviluppo sostenibile in risposta a trasformazioni territoriali indotte, evitando nuovo consumo di suolo attraverso riqualificazione e riorganizzazione dell’esistente. L’impegno è quindi volto a una riqualificazione e rigenerazione urbana complessiva, includendo aspetti sociali, culturali, economici, urbanistici ed edilizi, per promuovere o rivitalizzare aree in difficoltà o degrado,

favorendo forme di co-housing e spazi condivisi. In questo quadro, Calabria, Puglia e Abruzzo considerano la rigenerazione uno strumento non solo per qualità urbana e architettonica, ma anche per valorizzazione territoriale, paesaggistica e ambientale, efficienza energetica e idrica, sicurezza sismica, infrastrutturazione tecnologica e sicurezza in aree esposte a rischi territoriali. Nel complessivo quadro di produzione normativa emergono alcuni punti di forza e potenziali criticità irrisolte (Munafò, 2023). Il diverso trattamento dei concetti di “consumo di suolo” e “rigenerazione urbana” nelle singole regioni rende evidente la necessità di una strategia nazionale coerente. Le regioni hanno sviluppato propri metodi di monitoraggio per valutare gli effetti delle politiche, sebbene su scale relativamente più ridotte rispetto al contesto europeo. Ad esempio, sia la Provincia Autonoma di Trento sia la Regione Emilia-Romagna hanno implementato sistemi di monitoraggio adattati ai rispettivi contesti. A Trento, i metodi includono il Sistema Informativo Ambientale e Territoriale, base obbligatoria per la redazione degli strumenti urbanistici. Inoltre, l’istituzione dell’Osservatorio del Paesaggio consente documentazione, studio, analisi e monitoraggio dell’evoluzione del paesaggio trentino. Trento utilizza anche un sistema di monitoraggio delle trasformazioni previste dal piano vigente, con i comuni che trasmettono periodicamente gli esiti alla Provincia per ulteriori valutazioni. La Provincia è responsabile del monitoraggio del consumo di suolo e della diffusione dei dati sul proprio sito web. A supporto, utilizza la banca dati topografica regionale, che funge da base informativa territoriale per la raccolta e gestione dei dati a sostegno delle funzioni di pianificazione. Analogamente, in Emilia-Romagna i comuni monitorano le trasformazioni in attuazione del piano vigente e trasmettono regolarmente gli esiti alla Regione per la valutazione. La Regione assume la responsabilità del monitoraggio del consumo di suolo ai sensi della legge e pubblica i dati sul proprio sito. A supporto, ha istituito la Banca Dati Topografica Regionale, che serve da base informativa territoriale per raccogliere e gestire dati utili alla pianificazione. Tale banca dati, insieme al Catasto Immobiliare Comunale, consente raccolta e rappresentazione delle trasformazioni edilizie e urbane, essenziali per il calcolo del consumo di suolo. Entrambi i contesti hanno adottato misure per monitorare i cambiamenti d’uso del suolo e promuovere uno sviluppo sostenibile; tuttavia, possono emergere differenze nelle metodologie e nelle strutture amministrative, riflettendo caratteristiche e priorità specifiche. La natura decentrata della gestione del territorio, in assenza di una legislazione nazionale unitaria, determina una varietà di approcci e strategie tra regioni. Ad esempio, in Umbria il monitoraggio non è esplicitamente previsto: la verifica avviene solo in fase preventiva, durante la formulazione e l’approvazione del Piano Comunale. Tuttavia,

esiste un sistema conoscitivo articolato, il SIAT — Sistema Informativo Ambientale e Territoriale (Munafò, 2023). La differenza di morfologia urbana osservata tra i Paesi europei esaminati comporta l'adozione di politiche e tecniche diverse per affrontare il fenomeno. Gestire un insediamento frammentato e disperso, come in Italia, richiede approcci differenti rispetto a un territorio caratterizzato da insediamenti con margini ben definiti.

2.3.3 Mitigazione del rischio idraulico tra Direttiva Alluvioni e piani di bacino

In Italia, la Direttiva Alluvioni è stata recepita con il Decreto Legislativo 23 febbraio 2010, n. 49, che definisce un quadro organico per la pianificazione e la gestione del rischio di alluvioni, superando una visione limitata alle sole opere idrauliche e adottando un approccio integrato fondato su prevenzione, protezione, preparazione (inclusi previsione e allertamento), nonché sulle fasi di risposta e ripristino post-evento (Normattiva, 2010, 2014). Il processo normativo è articolato in tre fasi principali. La valutazione preliminare del rischio di alluvioni è finalizzata all'individuazione delle aree a potenziale rischio significativo e richiede di considerare, oltre alle informazioni storiche sugli eventi alluvionali, anche i fattori territoriali e fisici del bacino, quali la topografia, le caratteristiche idromorfologiche, l'uso del suolo e le trasformazioni insediative, nonché l'evoluzione attesa degli scenari climatici (ISPRA, 2015; Normattiva, 2014). Tale impostazione è coerente con numerosi studi che evidenziano come le modifiche dell'uso e copertura del suolo incidano in modo diretto sulla risposta idrologica dei bacini e sui picchi di deflusso superficiale (Pappalardo et al., 2017; Poelmans & Van Rompaey, 2011). La seconda fase riguarda l'elaborazione delle mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni, predisposte dalle Autorità di bacino distrettuali. Le mappe di pericolosità rappresentano scenari caratterizzati da diversa probabilità di accadimento (eventi frequenti, poco frequenti e rari o estremi) e descrivono l'estensione dell'allagamento, i livelli idrici e le principali caratteristiche del deflusso. Le mappe del rischio integrano tali informazioni con l'analisi delle conseguenze potenziali in termini di popolazione esposta, attività economiche, beni ambientali e culturali, infrastrutture strategiche e impianti a rischio di inquinamento (ISPRA, 2015). Questi strumenti costituiscono una base conoscitiva fondamentale per orientare le scelte di pianificazione territoriale e urbanistica nelle aree esposte a rischio idraulico. La terza fase è rappresentata dai Piani di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA), che costituiscono lo strumento operativo per la definizione delle strategie di mitigazione del rischio a scala distrettuale. L'articolo 7 del D.Lgs. 49/2010 assume particolare rilievo per gli studi di pianificazione e uso del suolo,

poiché prevede esplicitamente l'inclusione, accanto agli interventi strutturali, di misure non strutturali, quali pratiche sostenibili di uso del suolo, il miglioramento della capacità di ritenzione idrica del territorio e, ove opportuno, la restituzione di spazi alle dinamiche naturali dei corsi d'acqua e l'inondazione controllata di aree selezionate (Normattiva, 2014). I PGRA si inseriscono nel sistema della pianificazione di bacino, istituito in Italia con la Legge n. 183/1989, che assume il bacino idrografico come unità territoriale di riferimento per la difesa del suolo e la gestione integrata delle risorse idriche (Normattiva, 1989). L'approvazione del D.lgs. 3 aprile 2006, n. 152 "Norme in materia ambientale" ha modificato l'impianto organizzativo ed istituzionale della legge 183/1989 prevedendo, all'articolo 63, la soppressione, a far data dal 30 aprile 2006, delle Autorità di Bacino sostituendole con le Autorità di bacino distrettuale (Tabella 2.1). Il 17 febbraio 2017 con l'entrata in vigore il D.M. 25 ottobre 2016, sono state soppresse le Autorità di bacino nazionali, interregionali e regionali, e tutte le relative funzioni sono state trasferite alle Autorità di Bacino Distrettuali. In tale quadro, i Piani di Bacino Distrettuali e i Piani per l'Assetto Idrogeologico (PAI) forniscono il riferimento normativo e conoscitivo per la regolazione delle trasformazioni territoriali nelle aree a pericolosità idraulica e geomorfologica, imponendo vincoli, indirizzi e criteri di compatibilità per gli strumenti urbanistici locali (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza energetica (MASE), 2025). Il modello italiano di gestione del rischio idraulico interpreta la mitigazione come l'esito di un insieme coordinato di misure capaci di agire sulla pericolosità, sulla vulnerabilità e sull'esposizione degli elementi a rischio. Tale impostazione è esplicitata anche nella Disciplina di Piano, che definisce la gestione del rischio come l'attuazione integrata di misure di prevenzione, protezione, preparazione e risposta/ripristino, orientate alla riduzione delle componenti del rischio e assumendo frequentemente come riferimento operativo eventi con tempo di ritorno pari a 200 anni (AUTORITÀ DI BACINO DISTRETTUALE DELL'APPENNINO SETTENTRIONALE, 2021; ISPRA, 2015). In APPENDICE A vengono riportati i riferimenti normativi italiani differenziati per regione riguardanti i temi di consumo di suolo e rigenerazione urbana.

DISTRETTO IDROGRAFICO	REGIONI	RIFERIMENTO
Distretto del Fiume Po	Piemonte Valle d'Aosta Lombardia Emilia-Romagna Veneto Liguria Toscana Provincia Autonoma di Trento	https://www.adbpo.it/
Distretto delle Alpi Orientali	Friuli-Venezia Giulia Veneto Provincia Autonoma di Bolzano Provincia Autonoma di Trento	https://distrettoalpiorientali.it/
Distretto dell'Appennino Settentrionale	Liguria Toscana	https://www.appenninoseptentrionale.it/itc/
Distretto dell'Appennino Centrale	Toscana Umbria Marche Lazio Abruzzo Molise	https://aubac.it/
Distretto dell'Appennino Meridionale	Campania Basilicata Puglia Calabria Molise Lazio	https://www.distrettoappenninomeridionale.it/
Distretto della Sardegna	Sardegna	https://autoritadibacino.regione.sardegna.it/
Distretto della Sicilia	Sicilia	https://www.regione.sicilia.it/istituzioni/regione/strutture-regionali/presidenza-regione/autorita-bacino-distretto-idrografico-sicilia

Tabella 2.1: Distretti idrografici in Italia (fonte: MASE (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza energetica (MASE))).

3 AREA DI STUDIO: LA REGIONE EMILIA– ROMAGNA

In questo capitolo viene analizzata l'area studio, la regione Emilia-Romagna, individuata come caso di studio per l'elevata esposizione a eventi alluvionali e la grande disponibilità di dati territoriali storici. L'inquadramento territoriale ha evidenziato la complessità morfologica e idrografica della regione, distinguendo tra l'area appenninica e la Pianura Padana e mettendo in luce una fitta rete di corsi d'acqua naturali e artificiali. L'analisi dell'evoluzione dell'uso del suolo dal 1954 al 2020 ha documentato una progressiva espansione delle superfici urbanizzate a discapito di quelle agricole e naturali, determinando un incremento del grado di impermeabilizzazione e della vulnerabilità idrologica. La disponibilità di un'ampia base di dati ha rappresentato un elemento fondamentale per l'analisi, poiché ha permesso di costruire matrici di transizione dell'uso del suolo per ciascun intervallo temporale e di quantificare le superfici effettivamente modificate nel corso del tempo. L'attenzione della ricerca si è concentrata in particolare sui recenti eventi alluvionali del maggio 2023 e del settembre–ottobre 2024, che hanno colpito in particolare le province di Bologna, Ravenna e Forlì-Cesena, nei bacini del Reno, Lamone e Fiumi Uniti.

3.1 Inquadramento territoriale

La Regione Emilia-Romagna è stata scelta come caso studio per questa tesi per la grande disponibilità di dati territoriali presenti sul Geoportale regionale, ma anche per l'elevata esposizione a eventi alluvionali. La regione ha una superficie complessiva di 22.500 km² e presenta una complessa articolazione morfologica, comprendendo il settore appenninico tosco-emiliano, la Pianura Padana e il litorale adriatico orientale (Pistocchi et al., 2015); in dettaglio, l'area agricola copre il 53% dell'estensione regionale. L'area urbanizzata al 2020 è di 2757.72 km² con una densità di urbanizzazione del 12,25%. Al 2024, la regione presenta il maggior consumo di suolo a livello nazionale, 1013 ettari (SNPA (Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente), 2025). La regione presenta una complessa idrografia, con una fitta rete di corsi d'acqua naturali e artificiali (Figura 3.1); tutti i dati sono stati reperiti dal Geoportale INSPIRE (Arpa Emilia-Romagna, 2022). In Emilia-Romagna le Autorità di Bacino presenti (AdB Po, Reno, Regionali Romagnoli e Marecchia-Conca) sono confluite nell'Autorità di bacino distrettuale del Fiume Po con l'entrata in vigore del D.M. 25 ottobre 2016 (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza energetica (MASE), 2025). Attualmente, nel Distretto del fiume Po, sono vigenti diversi Piani di bacino che erano stati predisposti dalle ex Autorità di Bacino ma che vengono periodicamente aggiornati dall'Autorità di bacino distrettuale del Fiume Po attraverso varianti che recepiscono la revisione e l'implementazione del quadro conoscitivo (Regione Emilia-Romagna, 2025c). In Figura 3.2 viene riportato il Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) per il Bacino del Reno e i Bacini Romagnoli (Regione Emilia-Romagna, 2025b, 2025a) rielaborato in ambiente GIS.

La mosaicatura nazionale ISPRA delle aree a pericolosità idraulica (ISPRA, 2020) mostra come l'Emilia-Romagna rappresenti la regione con la più elevata percentuale di comuni con almeno il 20% della superficie in area allagabile negli scenari di pericolosità media e bassa. In particolare, oltre il 50% dei comuni regionali ricade in tale condizione nello scenario di bassa probabilità, con valori prossimi al 95% per i comuni della provincia di Ferrara (ISPRA, 2022a). Nelle Figure 3.3, 3.4, 3.5 vengono riportati gli scenari di pericolosità (bassa, media, alta) per l'Emilia-Romagna provenienti dai dati ISPRA e rielaborati in ambiente GIS.

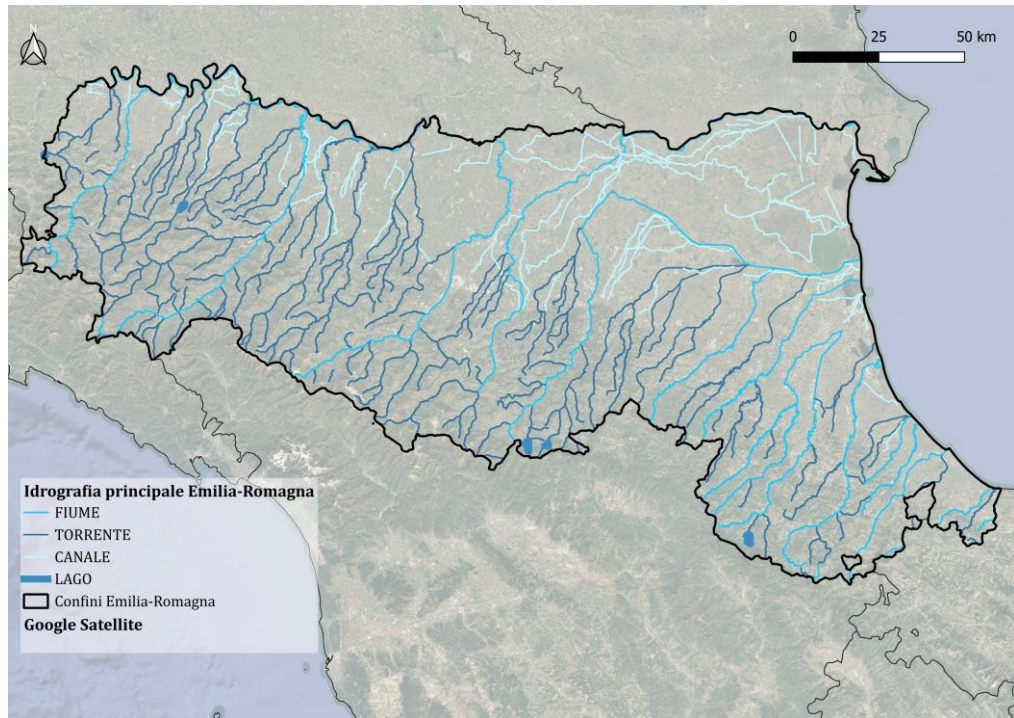


Figura 3.1: Idrografia principale dell'Emilia-Romagna.

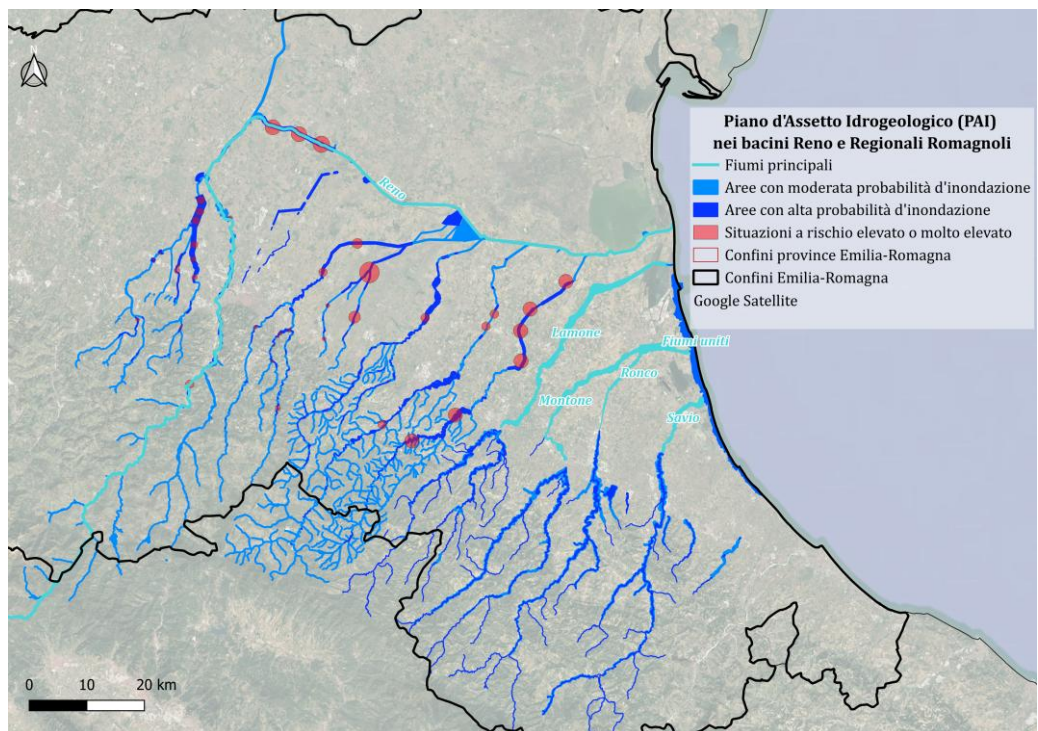


Figura 3.2: Piano d'Assetto Idrogeologico (PAI) nei bacini Reno e Regionali Romagnoli.

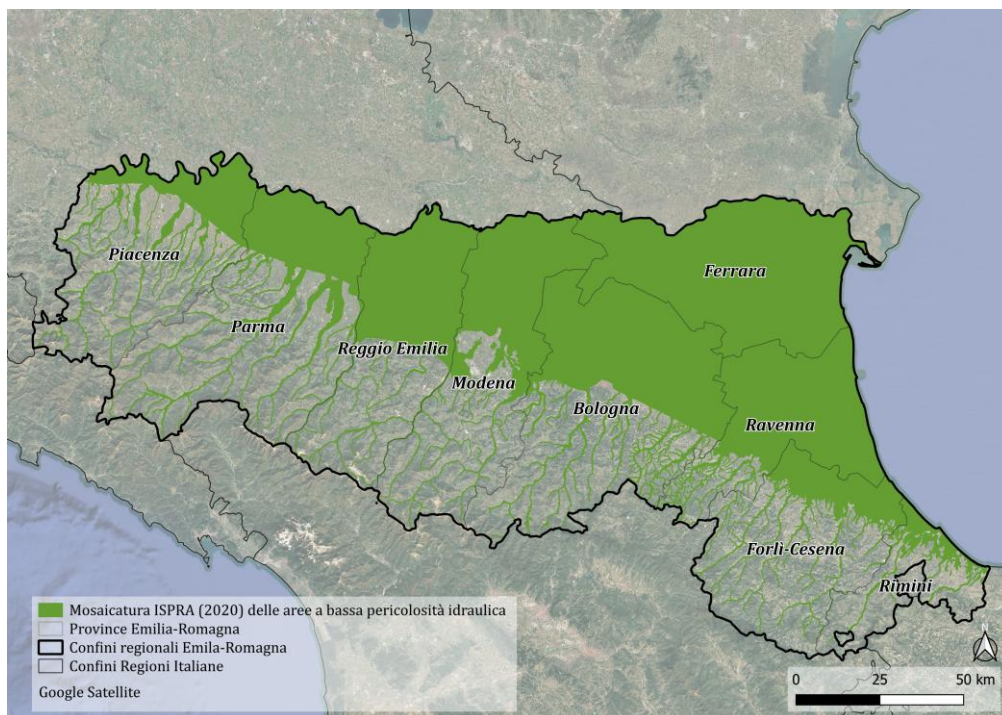


Figura 3.3: Mosaicatura ISPRA delle aree a bassa pericolosità idraulica nella regione Emilia-Romagna.

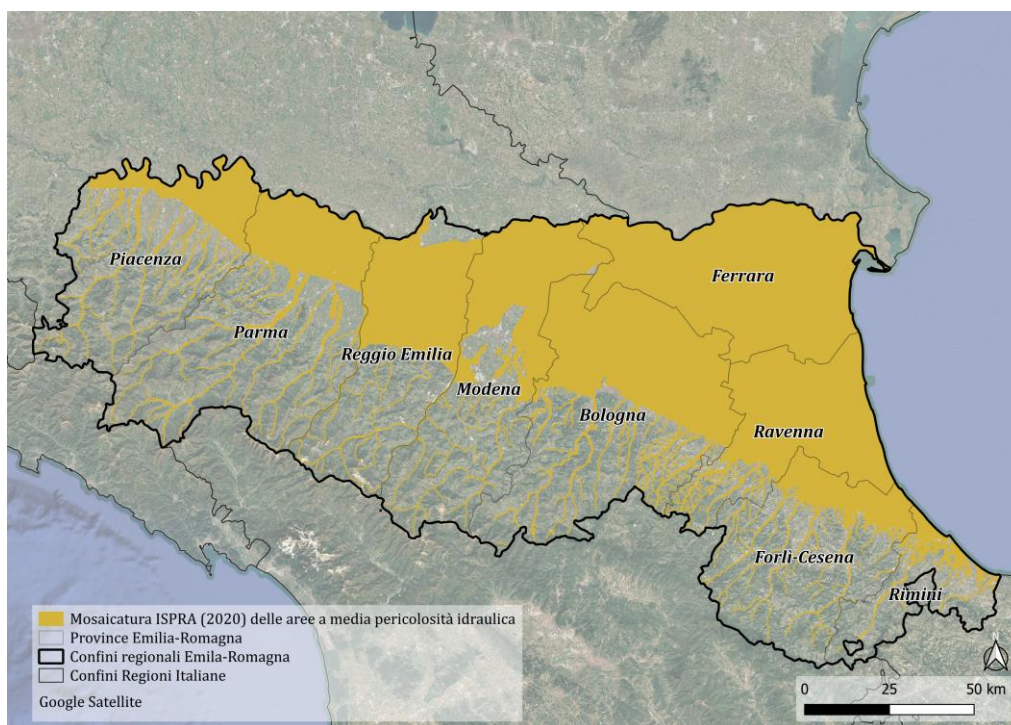


Figura 3.4: Mosaicatura ISPRA delle aree a media pericolosità idraulica nella regione Emilia-Romagna.

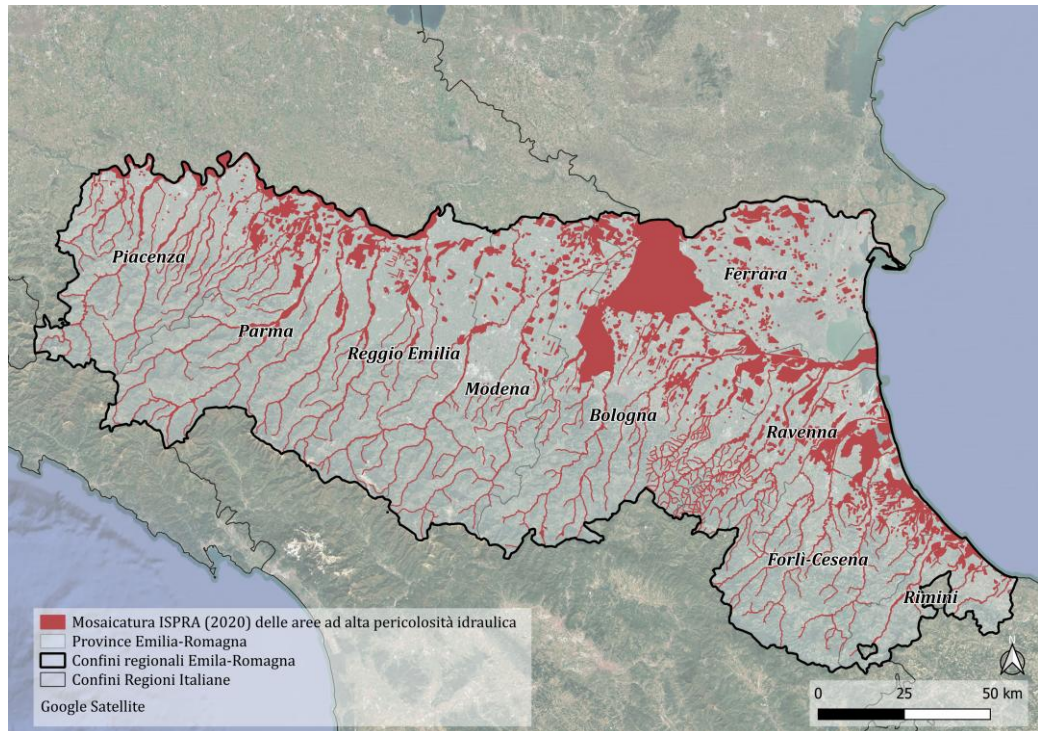


Figura 3.5: Mosaicatura ISPRA delle aree ad alta pericolosità idraulica nella regione Emilia-Romagna.

È stato preso in considerazione anche il PGRA (Piano Di Gestione Rischio Alluvioni) aggiornato al 2023 (Autorità di Bacino distrettuale del fiume Po, 2023), in cui sono mappate le aree allagabili complessive con scenari di scarsa probabilità L (Pericolosità P1), Media probabilità M (Pericolosità P2), Elevata probabilità H (Pericolosità P3). In Figura 3.6 e 3.7 sono mostrate rispettivamente le aree allagabili secondo PGRA del fiume Po in Emilia-Romagna e un dettaglio di queste sull'area studio analizzata.

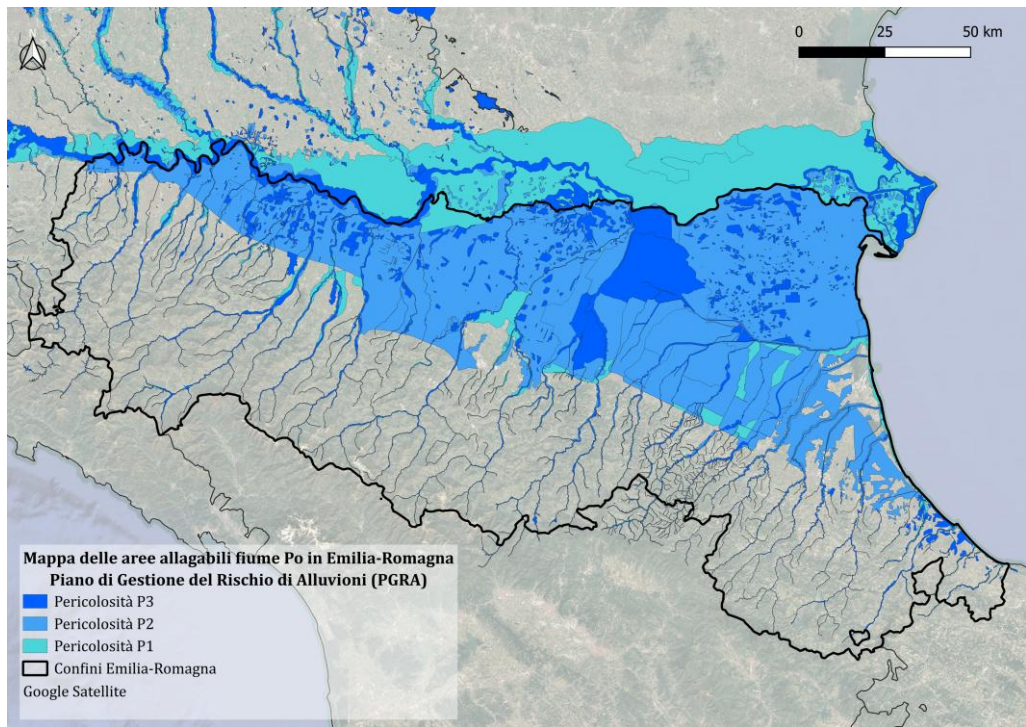


Figura 3.6: Mapa delle aree allagabili del fiume Po in Emilia-Romagna.

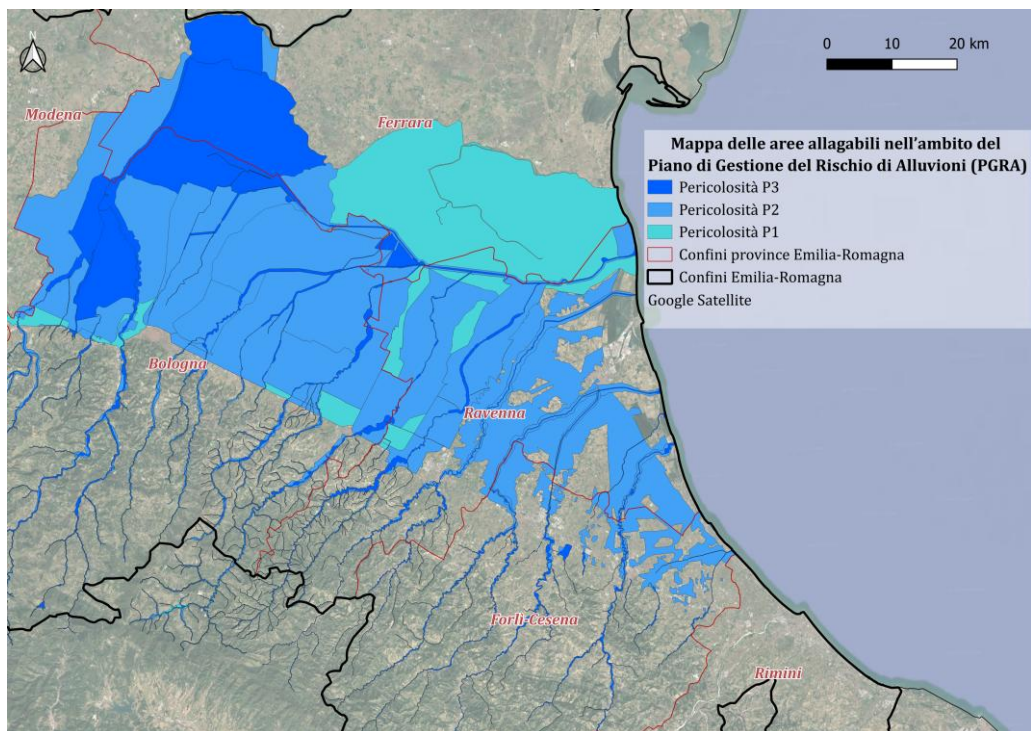


Figura 3.7: Dettaglio della mappa delle aree allagabili del fiume Po in Emilia-Romagna.

3.2 Gli eventi alluvionali in Emilia-Romagna

L'analisi degli eventi alluvionali che hanno interessato la Regione Emilia-Romagna nel periodo 2023–2024 assume un ruolo centrale nel presente lavoro, poiché consente di collegare le simulazioni modellistiche sviluppate nei capitoli successivi a fenomeni reali, documentati e di elevata rilevanza territoriale. Tale analisi è stata concepita non come una semplice descrizione degli eventi, bensì come uno strumento di validazione spaziale e concettuale dell'impianto metodologico, oltre che come supporto alla selezione dei bacini e dei contesti di studio più significativi. La scelta di concentrare l'attenzione sugli eventi del 2023 e del 2024 è motivata dal loro carattere eccezionale in termini di intensità pluviometrica (Arpae Emilia-Romagna, 2023a, 2023b, 2023; Fassi et al., 2023; Valente et al., 2025). Nel periodo compreso tra l'1 e il 17 maggio 2023, ampie aree della regione Emilia-Romagna, in particolare le province di Bologna, Ravenna, Forlì-Cesena e Rimini, sono state colpite da un evento idrometeorologico di eccezionale intensità, determinato da due distinti episodi di precipitazioni estreme verificatisi tra l'1 e il 3 maggio, e il 16 e 17 maggio (Arpae Emilia-Romagna, 2023b, 2023; Fassi et al., 2023). La precipitazione cumulata media regionale ha raggiunto 221,4 mm, il valore più elevato mai registrato su un intervallo di 17 giorni dal 1961 (Arpae Emilia-Romagna, 2023, 2023b). Le piogge intense e persistenti registrate tra l'1 e il 3 maggio hanno innescato una risposta idrologica simultanea su numerosi corsi d'acqua del settore centro-orientale della regione. In questo contesto, nella provincia di Bologna si sono misurati circa 190 mm di pioggia in meno di 48 ore, mentre nelle province di Ravenna e Forlì-Cesena il rapido innalzamento dei livelli idrometrici ha determinato condizioni di criticità diffuse (Fassi et al., 2023). Un caso particolarmente significativo è rappresentato dal fiume Lamone che attraversa la città di Faenza, e che ha registrato un incremento di circa 10 m in meno di 24 ore, provocando la rottura di un argine in prossimità di Faenza e l'allagamento del centro urbano. L'entità degli impatti su popolazione e infrastrutture ha condotto alla dichiarazione dello stato di emergenza per l'intero territorio regionale (Fassi et al., 2023). Le precipitazioni del 16–17 maggio si sono concentrate prevalentemente nelle zone collinari e pedecollinari centro-orientali, dove in diverse stazioni, come Monte Albano (Imola), Trebbio (Forlì) e San Cassiano sul Lamone (Faenza) sono stati registrati accumuli superiori a 250 mm in due giorni (ARPAE Emilia-Romagna - Struttura Idro-Meteo-Clima, 2024; Fassi et al., 2023).

Nella Figura 3.8 sono rappresentate le perimetrazioni dell'aree colpite dall'alluvione, scaricate dal Geoportale della regione Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna, 2023a) e rielaborate in ambiente GIS.

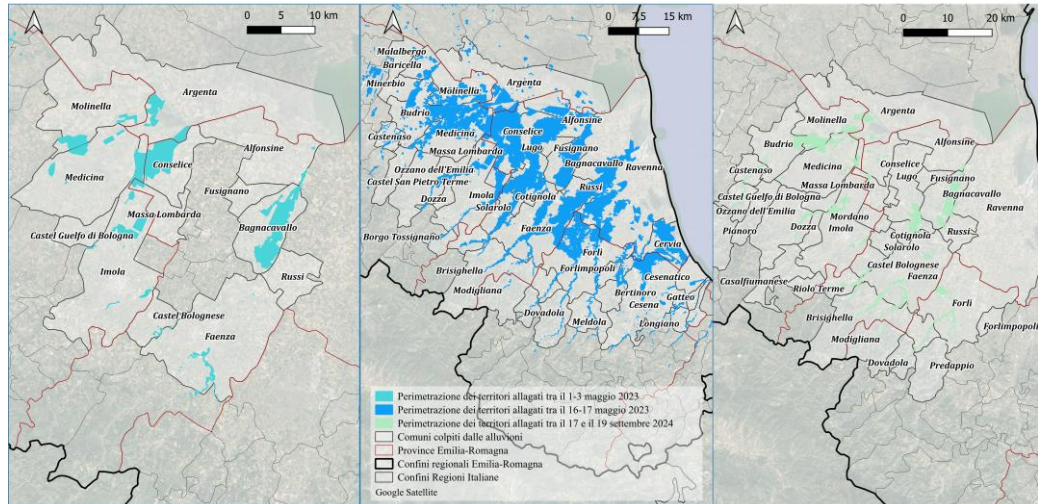


Figura 3.8: Perimetrazioni delle aree colpite dall'alluvione nel maggio 2023 e settembre 2024.

Le perimetrazioni ufficiali delle aree allagate nel settembre 2024 mostrano una significativa sovrapposizione con le aree colpite nel 2023, con particolare severità nei comuni di Faenza, Cotignola e Modigliana. Il ripetersi degli impatti negli stessi bacini può indicare l'esistenza di condizioni di vulnerabilità idraulica strutturale, che sembrano andare oltre la semplice eccezionalità dei singoli eventi. Il confronto tra le aree allagate durante gli eventi del 2023 e del 2024 e le cartografie ufficiali di pericolosità idraulica, derivate dalla mosaicatura nazionale ISPRA (ISPRA, 2020) e dai Piani di Assetto Idrogeologico (PAI) (Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po, 2021), evidenzia una chiara corrispondenza spaziale, come illustrato nella Figura 3.9.

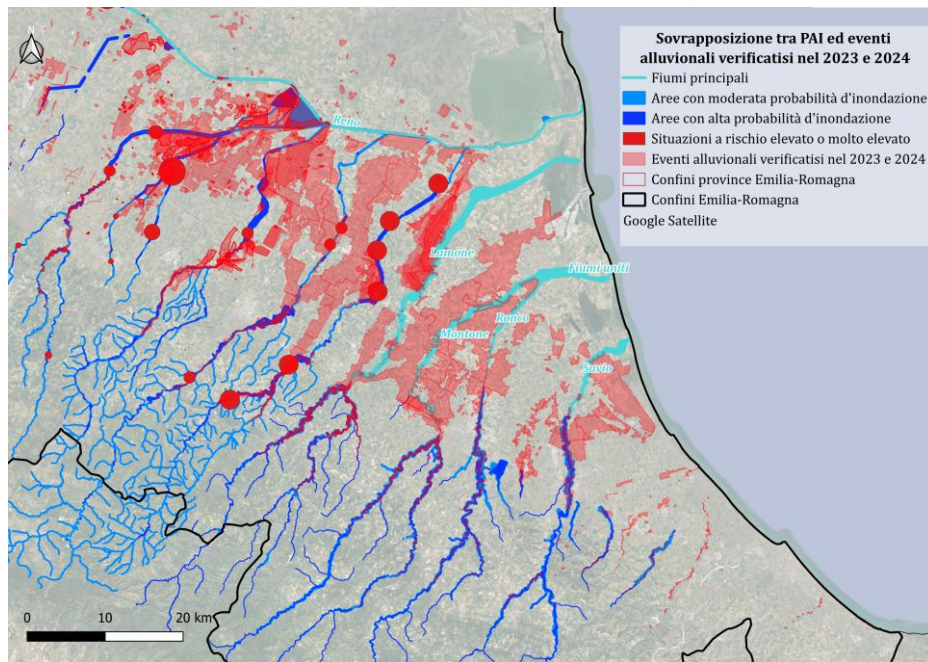


Figura 3.9: Sovrapposizione tra PAI ed eventi alluvionali verificatisi nel 2023 e 2024.

3.3 I cambiamenti dell'uso del suolo dagli anni '50 ad oggi

La disponibilità di una serie storica regionale di mappe di uso e copertura del suolo, estesa dal 1954 al 2018 e aggiornata al 2020, con una risoluzione di 10 metri e un'unità minima cartografabile (MMU) pari a 1.600 m², ha permesso di costruire un quadro evolutivo continuo delle trasformazioni territoriali, con particolare riferimento ai processi di urbanizzazione, infrastrutturazione e modifica delle superfici agricole. Le cartografie di uso del suolo sono scaricabili dal Geoportale dell'Emilia-Romagna (*Uso del suolo — Geoportale*, 2024) e sono caratterizzate da un elevato dettaglio tematico, fino al livello 4 della Legenda Corine Land Cover (CLC) (Copernicus Land Monitoring Service, 2018). In dettaglio, sono state analizzate le mappe di uso del suolo del 1954, 1976, 1994, 2003, 2008, 2018 (aggiornato al 2020). In una prima fase, i diversi dataset sono stati sottoposti ad una articolata fase di pre-elaborazione finalizzata a garantire la confrontabilità tra epoche differenti. Questa fase ha incluso la verifica della coerenza topologica delle geometrie, la correzione di eventuali incongruenze spaziali e la riclassificazione delle categorie tematiche per renderle omogenee nel tempo. Le classi di uso del suolo dei diversi dataset sono state raggruppate nelle macroclassi di primo livello della Legenda Corine Land Cover (Superfici artificiali, aree agricole, foreste e aree seminaturali, zone umide, corpi idrici), per rendere i risultati più leggibili e soprattutto utili per poter quantificare le transizioni di uso del suolo da una cronosezione all'altra. Le Figure 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 riportano l'uso del suolo per le cronosezioni analizzate, mentre

nel grafico in Figura 3.16 è riportata l'evoluzione delle macroclassi di uso del suolo in termini di area (km²).

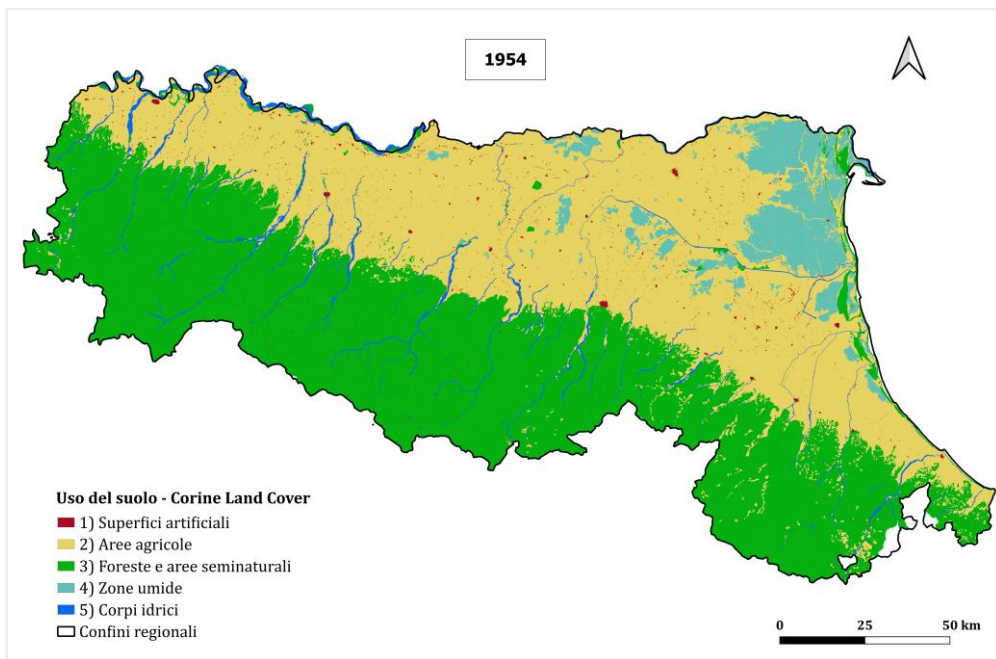


Figura 3.10: Uso del suolo della regione Emilia-Romagna nel 1954.

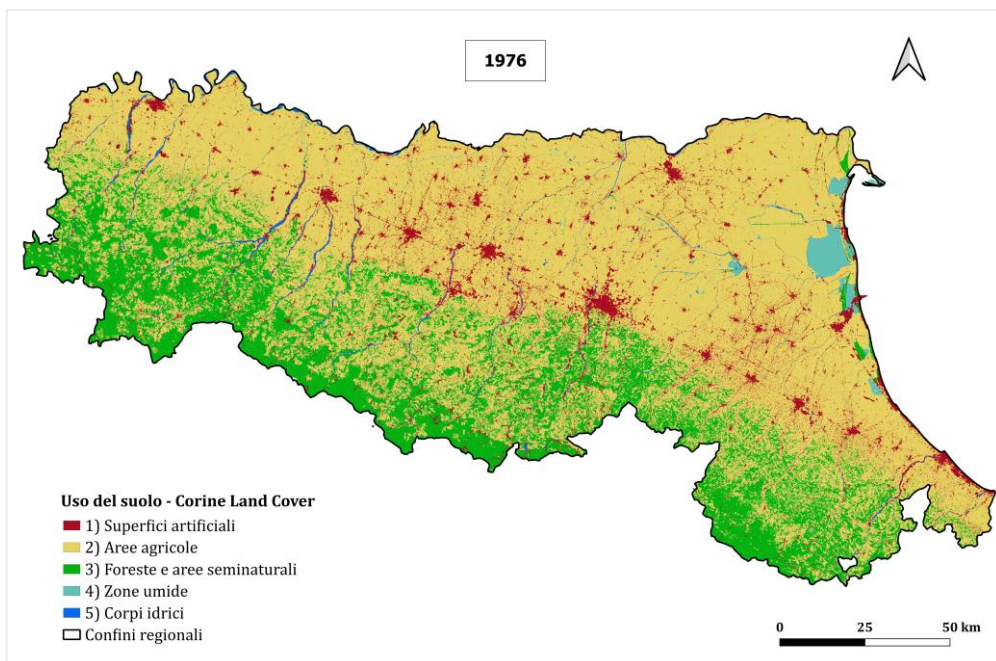


Figura 3.11: Uso del suolo della regione Emilia-Romagna nel 1976.

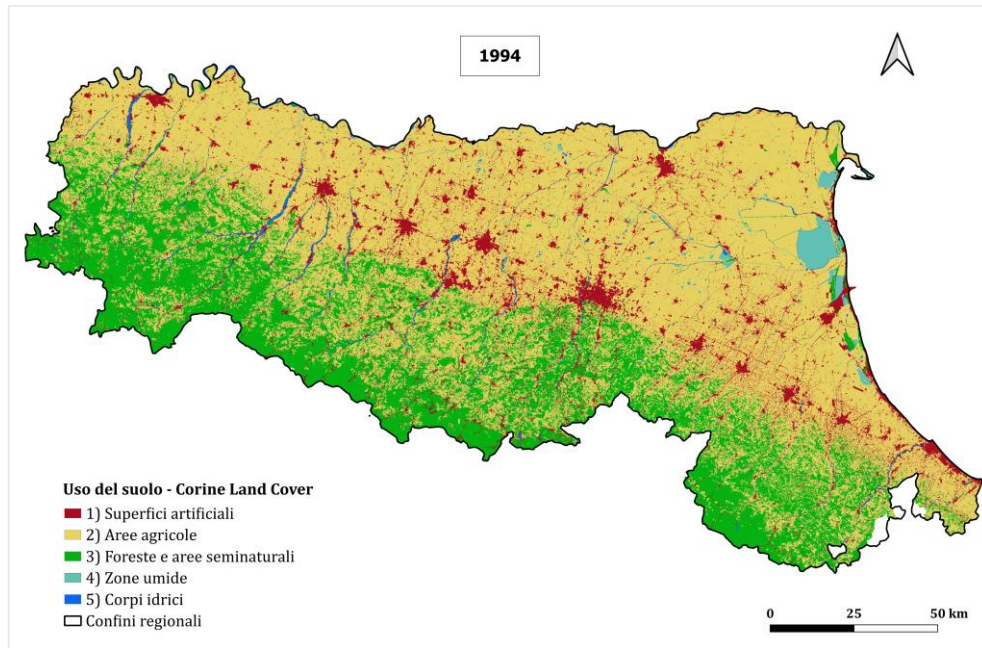


Figura 3.12: Uso del suolo della regione Emilia-Romagna nel 1994.

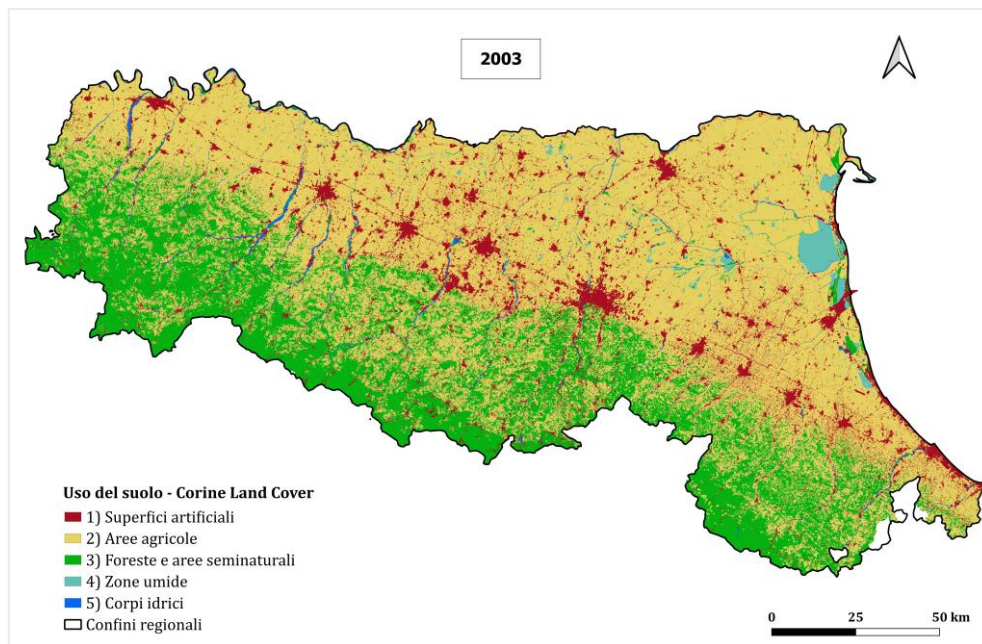


Figura 3.13: Uso del suolo della regione Emilia-Romagna nel 2003.

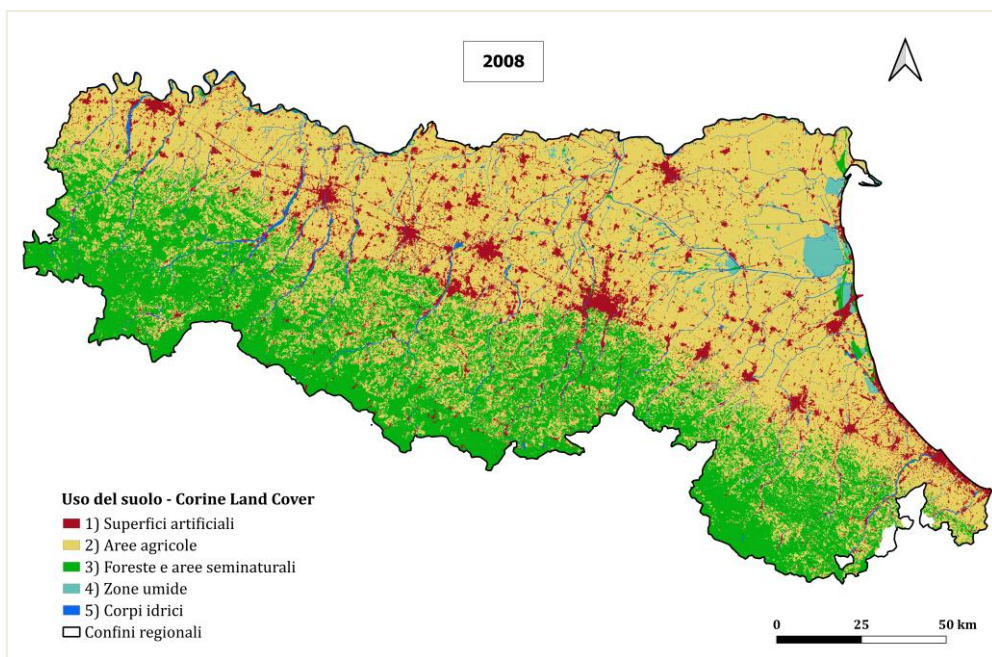


Figura 3.14: Uso del suolo della regione Emilia-Romagna nel 2008.

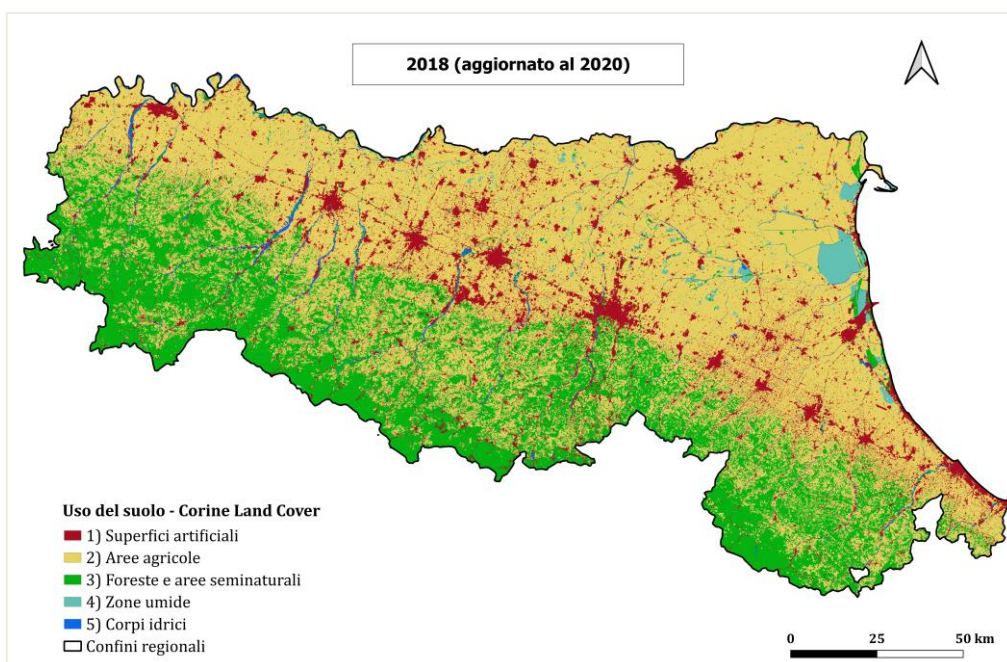


Figura 3.15: Uso del suolo della regione Emilia-Romagna nel 2018.

La macroclasse 1 (Superfici artificiali) mostra un incremento netto e continuo nel tempo, con una crescita particolarmente marcata tra il 1954 e il 1976, in corrispondenza del boom edilizio degli anni Settanta. Tra il 1976 e il 2008 la macroclasse 2 (Aree agricole) diminuisce di circa 1200 km².

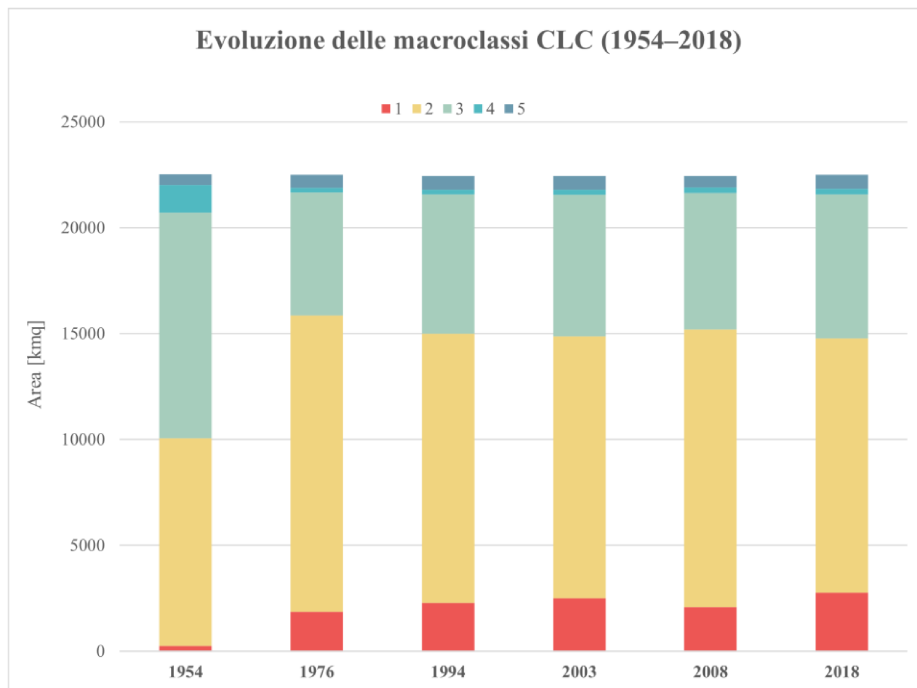


Figura 3.16: Evoluzioni delle macroclassi Corine Land Cover nelle cronosezioni indagate.

Inoltre, sono state costruite matrici di transizione per ciascuna coppia di cronosezioni (1954-1976, 1976-1994, 1994-2003, 2003-2008, 2008-2018), in grado di quantificare, in termini di superficie assoluta e percentuale, i cambiamenti di uso del suolo tra le diverse macro-categorie. In particolare, l'attenzione è stata focalizzata soprattutto sulle transizioni da superfici agricole o naturali verso superfici urbanizzate e infrastrutturali, poiché tali passaggi determinano una modifica sostanziale dei parametri idrologici di base del territorio. In Tabella 3.1 viene riportata la matrice di transizione complessiva per tutte le cronosezioni indagate in termini percentuali.

Cronosezioni	Classe iniziale	→1	→2	→3	→4	→5
1954-1976	1	92%	3%	2%	2%	1%
	2	58%	28%	10%	3%	1%
	3	8%	8%	78%	4%	2%
	4	6%	10%	12%	70%	2%
	5	1%	2%	2%	3%	92%
	1	95%	3%	1%	1%	—

Cronosezioni	Classe iniziale	→1	→2	→3	→4	→5
1976–1994	2	18%	70%	9%	2%	1%
	3	4%	6%	86%	3%	1%
	4	5%	8%	5%	80%	2%
	5	1%	1%	1%	2%	95%
1994–2003	1	96%	2%	1%	1%	—
	2	10%	78%	8%	3%	1%
	3	2%	5%	88%	4%	1%
	4	4%	6%	6%	82%	2%
	5	—	1%	1%	2%	96%
2003–2008	1	97%	2%	1%	—	—
	2	8%	80%	9%	2%	1%
	3	2%	5%	88%	4%	1%
	4	3%	5%	5%	85%	2%
	5	—	1%	1%	2%	96%
2008–2018	1	97%	2%	1%	—	—
	2	7%	81%	9%	2%	1%
	3	2%	4%	89%	4%	1%
	4	3%	4%	5%	86%	2%
	5	—	1%	1%	2%	96%

Tabella 3.1: Matrice di transizione in termini percentuali nelle cronosezioni indagate.

4 MATERIALI E METODI

Il presente capitolo descrive in modo sistematico e dettagliato i materiali informativi e le procedure operative adottate per la costruzione di una metodologia replicabile, finalizzata alla valutazione degli effetti dei cambiamenti di uso e copertura del suolo sulla pericolosità idraulica associata ai fenomeni di ruscellamento superficiale e allagamento. La ricerca si inserisce nell'ambito dell'ingegneria del territorio e dell'idrologia applicata e propone un approccio quantitativo volto a integrare dati territoriali multi-temporali, modellazione idrologica semplificata e scenari di trasformazione urbana, operando a una scala coerente con il supporto alle decisioni in ambito pianificatorio. L'assunto metodologico di base è che le trasformazioni dell'uso del suolo, in particolare l'aumento delle superfici impermeabili e la frammentazione delle coperture naturali, rappresentino una delle principali forzanti antropiche in grado di alterare il bilancio idrologico superficiale, incrementando il deflusso diretto e riducendo la capacità di infiltrazione e ritenzione dei suoli. Tali dinamiche si traducono in un aumento della probabilità e dell'estensione dei fenomeni di allagamento, anche in contesti non storicamente classificati come a elevata pericolosità idraulica. In questo quadro, la metodologia adottata non mira a una ricostruzione deterministica dei fenomeni idraulici, ma alla costruzione di un sistema di valutazione comparativa e di scenario, basato sull'analisi diacronica delle trasformazioni territoriali, sull'individuazione di unità idrologicamente significative e sulla modellazione quantitativa del deflusso superficiale e dei servizi ecosistemici di regolazione idrica.

4.1 Workflow metodologico

La scelta della scala di analisi per questa tesi di dottorato è un elemento fondante della metodologia scelta: in alternativa ad usare un approccio su unità amministrative, quali il comune o la provincia, l'analisi è strutturata su unità idrografiche, in particolare bacini e sub-bacini. Tale scelta risponde alla necessità di rappresentare correttamente i processi fisici che governano la generazione del deflusso superficiale e la sua propagazione, processi che risultano intrinsecamente legati alla morfologia del territorio e alla struttura del reticolo di drenaggio, piuttosto che ai confini amministrativi. L'adozione della scala di bacino consente inoltre di evidenziare le relazioni di causa-effetto tra trasformazioni localizzate e impatti a valle, aspetto particolarmente rilevante in contesti caratterizzati da urbanizzazione diffusa e da una progressiva artificializzazione dei sistemi di drenaggio. In tale prospettiva, l'impermeabilizzazione di superfici limitate, se collocata in porzioni strategiche del bacino, può determinare incrementi significativi del deflusso concentrato e contribuire all'innesco di criticità idrauliche anche a distanze considerevoli dal punto di origine (Botticelli et al., 2018; Chow, 1965; Gao et al., 2020; Parisay et al., 2014; Pistocchi et al., 2015). L'approccio metodologico assume inoltre che la valutazione della pericolosità idraulica non possa prescindere da una lettura integrata dei servizi ecosistemici di regolazione idrologica. La capacità del territorio di trattenere, infiltrare e rallentare il deflusso superficiale è infatti strettamente legata alla presenza e alla continuità delle coperture vegetate, alla struttura del suolo e alla configurazione spaziale degli elementi naturali e seminaturali (Naumann et al., 2019; Prokop et al., 2011). In questo senso, la modellazione dei servizi ecosistemici non è intesa come un esercizio valutativo fine a sé stesso, ma come una chiave interpretativa per leggere in modo quantitativo il contributo delle diverse coperture del suolo alla mitigazione del rischio idraulico. Dal punto di vista operativo, la metodologia è rappresentata da un workflow sequenziale e replicabile, articolato in fasi successive che comprendono: la costruzione e armonizzazione di un database territoriale multi-sorgente; la derivazione dei bacini primari a partire da modelli digitali del terreno; l'analisi diacronica dei cambiamenti di uso e copertura del suolo mediante matrici di transizione; la definizione di scenari pluviometrici rappresentativi di condizioni critiche; la modellazione quantitativa del deflusso superficiale e della ritenzione idrica. La metodologia utilizzata vuole garantire un equilibrio tra rigore fisico dei modelli adottati e operatività applicativa. In tale ottica, la scelta di modelli idrologici semplificati, come quelli basati sul metodo del Curve Number (H. A. F. Jaafar, 2019; H. H. Jaafar et al., 2019; Konstantinos X. Soulis., 2021; Mishra et al., 2018; V. M. Ponce & Hawkins, 1996; Soomro et al., 2019), è motivata dalla

possibilità di integrare in modo coerente informazioni territoriali eterogenee e di produrre output spazializzati confrontabili tra scenari e crono-sezioni. Sebbene tali modelli non consentano una simulazione dettagliata delle dinamiche idrauliche locali, essi risultano adeguati per analisi comparative e per la valutazione degli effetti cumulativi delle trasformazioni territoriali su bacini di dimensione medio-piccola. L'Emilia-Romagna diventa quindi un territorio pilota per testare un approccio metodologico che potrà essere successivamente trasferito in altri contesti, sostituendo i dati e mantenendo invariata la struttura dell'analisi.

In dettaglio, nella presente tesi sono state analizzate due scale di dettaglio:

1. Scala provinciale – intercomunale (Pianificazione area vasta);
2. Scala intercomunale (Pianificazione a scala di bacino).

Per la scala provinciale-intercomunale si sono presi in considerazione i bacini primari dell'Emilia-Romagna più colpiti dalle alluvioni di maggio 2023 (Figura 4.1).

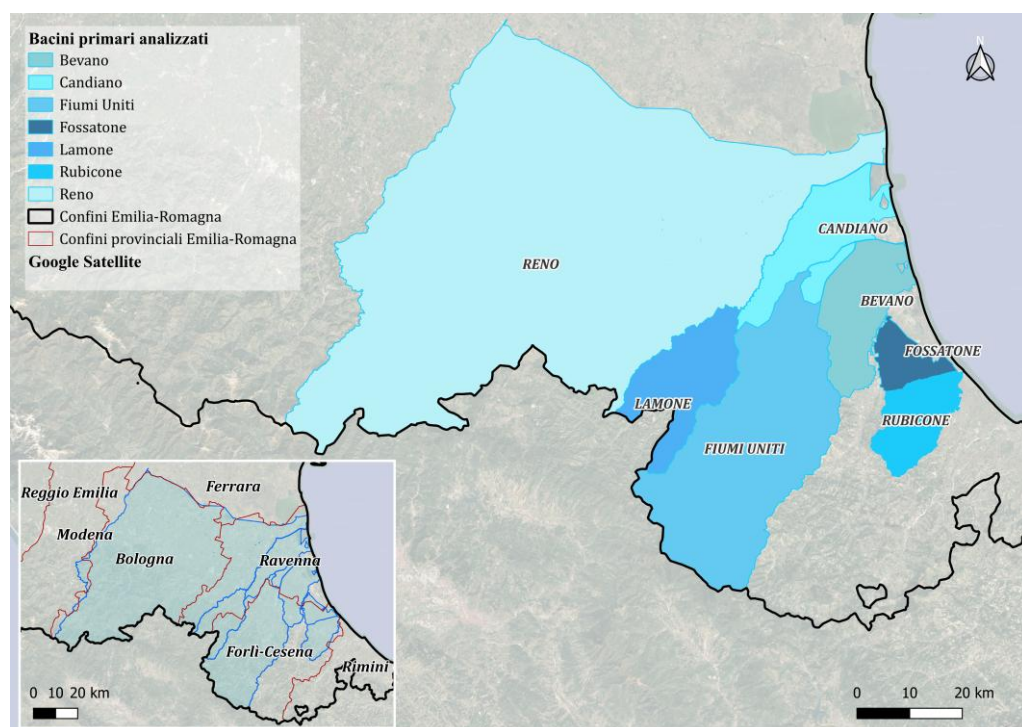


Figura 4.1: Bacini primari analizzati.

Per la scala intercomunale, invece, si è analizzato il bacino del Lamone e i comuni ricadenti all'interno della sua area (Figura 4.2); questi ultimi ricadono su province differenti (Ravenna e Forlì-Cesena), ed hanno un'estensione territoriale maggiore rispetto ai limiti del bacino del Lamone. Per questo motivo, i comuni sono stati classificati in

funzione della percentuale di superficie comunale ricadente all'interno del bacino idrografico. A tal fine, i layer comunali sono stati ritagliati sui confini del bacino in ambiente GIS e, per ciascun comune, è stata calcolata l'area effettivamente inclusa nel bacino. Poiché, a seguito dell'intersezione spaziale, i comuni presentano estensioni territoriali molto differenti all'interno del bacino, rendendo poco confrontabile il loro peso relativo, si è scelto di distinguere i comuni in due categorie: comuni prioritari e comuni marginali. La classificazione è stata effettuata adottando una soglia pari al 15% della superficie comunale ricadente nel bacino: i comuni con una quota superiore a tale valore sono stati classificati come prioritari, mentre quelli con una percentuale inferiore sono stati considerati marginali.

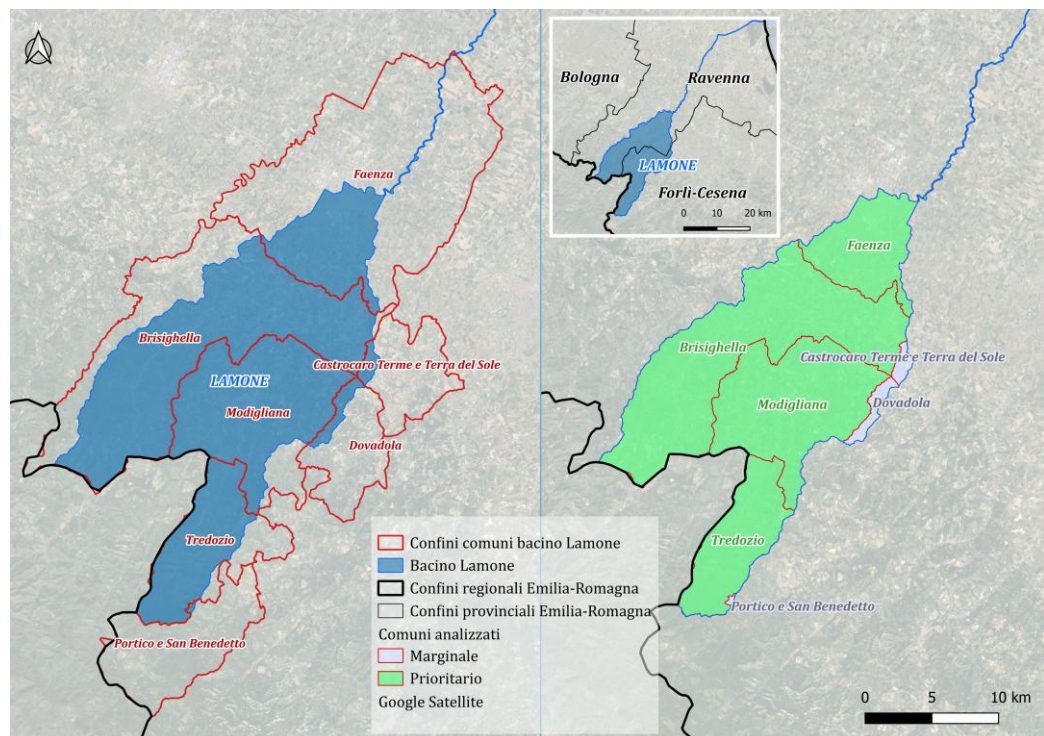


Figura 4.2: Inquadramento spaziale dell'area di studio e classificazione dei comuni intersecanti il bacino del Lamone in funzione della percentuale di superficie comunale inclusa nel bacino (prioritari $\geq 15\%$; marginali $< 15\%$).

In base a questo criterio, i comuni di Modigliana, Tredozio, Brisighella e Faenza, per i quali la quota di superficie inclusa nel bacino risulta rispettivamente pari a circa 89,5%, 77,5%, 74,0% e 21,2%, sono stati classificati come comuni prioritari. Al contrario, i comuni di Castrocaro Terme e Terra del Sole, Dovadola e Portico e San Benedetto, caratterizzati da percentuali inferiori alla soglia ($\leq 12,3\%$), sono stati considerati comuni marginali. Tutti i comuni che intersecano il bacino sono stati inclusi nell'analisi spaziale, così da mantenere la continuità tra monte e valle e considerare il contributo dell'intero

territorio ai processi di generazione del deflusso a scala di bacino. Tuttavia, le analisi comparative e la discussione quantitativa dei risultati si concentrano principalmente sui comuni prioritari, in modo da rendere i confronti più omogenei e ridurre l'influenza di effetti di bordo legati a porzioni di territorio di estensione molto limitata.

Tutte le analisi, sia a scala provinciale che a scala intercomunale, sono state condotte attraverso il confronto tra due scenari. Il primo scenario (PRE) è basato sull'uso del suolo 2018, aggiornato al 2020, e rappresenta lo stato attuale del territorio. Il secondo scenario (POST) ipotizza la completa attuazione delle previsioni di piano, assumendo quindi un livello di realizzazione pari al 100% delle trasformazioni urbanistiche previste. I dati relativi alle previsioni di piani sono disponibili in parte dal Portale minERVA della regione Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna, 2024b) e in parte nei siti dei singoli comuni. L'adozione dello scenario POST consente di simulare una condizione potenziale in cui le nuove trasformazioni urbane e la conseguente impermeabilizzazione dei suoli previste dagli strumenti urbanistici siano interamente realizzate. In questo modo, il modello permette di quantificare l'incremento di carico idrologico associato alle scelte pianificatorie, rendendo possibile una valutazione comparativa degli effetti delle trasformazioni previste sul deflusso superficiale a scala di bacino.

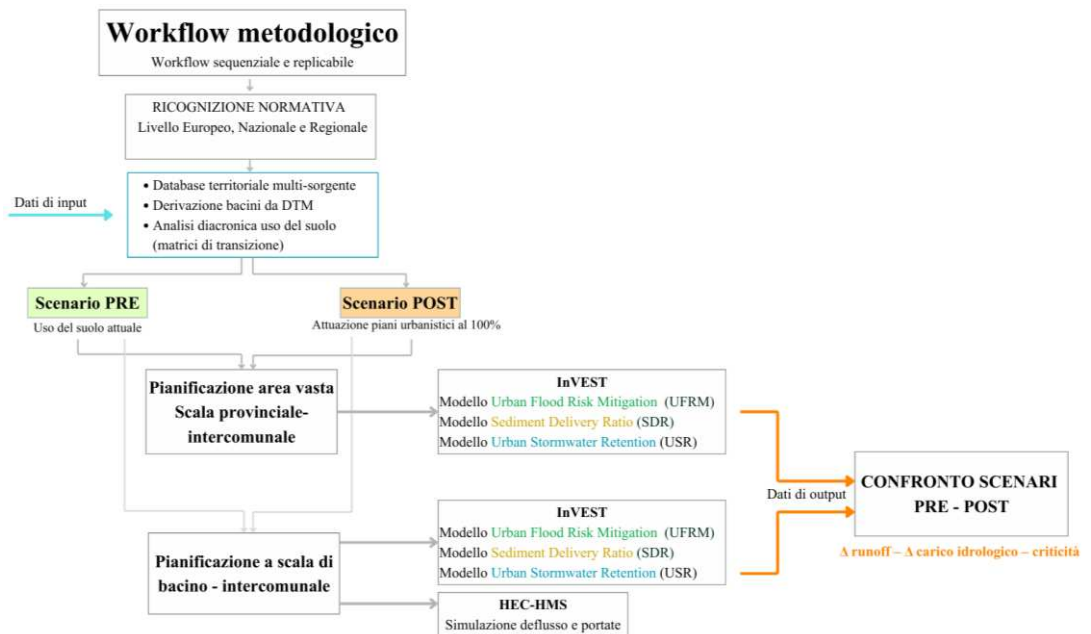


Figura 4.3: Workflow metodologico.

4.1.1 Costruzione e armonizzazione del database territoriale

La costruzione del database territoriale rappresenta una fase cruciale dell'intera metodologia, in quanto costituisce la base informativa comune su cui si innestano sia

l'analisi diacronica delle trasformazioni territoriali sia le successive fasi di modellazione idrologica. Il database territoriale, identificato nel sistema UTM WGS84, zona 32N (EPSG: 32632), è stato strutturato secondo un approccio gerarchico, organizzando i layer informativi in macro-categorie funzionali coerenti con gli obiettivi dell'analisi idrologica e con i requisiti dei modelli adottati. Le cartografie di uso e copertura del suolo disponibili (Capitolo 3.3), basate sulla nomenclatura Corine Land Cover (CLC), sono state utilizzate come base informativa di partenza. Tuttavia, poiché il sistema CLC ha finalità prevalentemente descrittive e non è direttamente compatibile con la parametrizzazione dei modelli idrologici adottati, si è resa necessaria una fase di riclassificazione tematica. In particolare, le classi Corine sono state riclassificate e aggregate in un set di classi di uso del suolo funzionali, definite in base al loro comportamento idrologico e alla loro coerenza con i parametri richiesti dai modelli basati sul metodo del Curve Number. Il processo di riclassificazione è stato supportato da un confronto critico tra la letteratura scientifica di riferimento (Kachhawa & Agnihotri, 2023; Narayan Shrestha, 2003; Pal et al., 2012; Raju R. et al., 2018; Thakuriah, 2023; U.S. Department of the Interior, 2005; Vallet et al., 2024), il dataset ESA WorldCover 2021 (Land Cover, risoluzione 10 m) (Zanaga et al., 2022), utilizzato come riferimento ad alta risoluzione per la copertura del suolo, e i dataset prodotti dal United States Department of Agriculture (USDA) (U.S. Department of Agriculture, 2024), in particolare quelli orientati alla classificazione funzionale delle superfici in relazione ai processi idrologici e agricoli. Al termine della riclassificazione si è ottenuto un database costituito da 12 macro-categorie funzionali, codificate attraverso un campo univoco (lucode). Successivamente, i layer vettoriali riclassificati sono stati nuovamente uniti e rasterizzati in ambiente GIS con risoluzione 10×10 m, mantenendo un unico campo informativo (lucode) e ritagliando il risultato sull'area studio indagata. Il raster finale dell'uso del suolo costituisce l'input diretto sia per la costruzione della tabella biofisica sia per le successive elaborazioni modellistiche.

In Tabella 4.1 vengono riportate le 87 classi di uso del suolo riclassificate nel nuovo dataset, mentre in Figura 4.4 e Figura 4.5 sono riportati i *lucode* relativi agli scenari PRE e POST nell'area dei bacini primari analizzati.

Classe di uso del suolo (CLC) – 4 livello	Descrizione	Lucode
1111	Tessuto residenziale compatto e denso	
1112	Tessuto residenziale rado	

Classe di uso del suolo (CLC) – 4 livello	Descrizione	Lucode
1121	Tessuto residenziale urbano	1
1122	Strutture residenziali isolate	
1211	Insedimenti produttivi	2
1212	Insedimenti agro-zootecnici	
1213	Insedimenti commerciali	
1214	Insedimenti di servizi	
1215	Insedimenti ospedalieri	
1216	Impianti tecnologici	
1221	Autostrade e superstrade	3
1222	Reti stradali	
1223	Aree verdi associate alla rete stradale	
1224	Reti ferroviarie	
1225	Impianti di smistamento merci	
1226	Aree per impianti delle telecomunicazioni	
1227	Reti per la distribuzione e produzione di energia	
1228	Impianti fotovoltaici	
1229	Reti per la distribuzione idrica	
1231	Aree portuali commerciali	4
1232	Aree portuali per il diporto	
1233	Aree portuali per la pesca	
1241	Aeroporti commerciali	
1242	Aeroporti per volo sportivo e eliporti	
1243	Aeroporti militari	
1311	Aree estrattive attive	5
1312	Aree estrattive inattive	
1321	Discariche e depositi di cave, miniere e industrie	
1322	Discariche di rifiuti solidi urbani	
1323	Depositi di rottami	
1331	Cantieri e scavi	
1332	Suoli rimaneggiati e artefatti	
1411	Parchi	
1412	Ville	
1413	Aree incolte urbane	
1421	Campeggi e strutture turistico-ricettive	
1422	Aree sportive	

Classe di uso del suolo (CLC) – 4 livello	Descrizione	Lucode
1423	Parchi di divertimento	6
1424	Campi da golf	
1425	Ippodromi	
1426	Autodromi	
1427	Aree archeologiche	
1430	Cimiteri	
2110	Seminativi non irrigui	7
2121	Seminativi semplici irrigui	
2122	Vivai	
2123	Colture orticole	
2130	Risaie	
2210	Vigneti	8
2220	Frutteti	
2230	Oliveti	
2241	Pioppeti colturali	
2242	Altre colture da legno	
2310	Prati	9
2410	Colture temporanee associate a colture permanenti	
2420	Sistemi colturali e particellari complessi	
2430	Aree con colture agricole e spazi naturali importanti	
3111	Boschi a prevalenza di faggi	10
3112	Boschi a prevalenza di querce, carpini e castagni	
3113	Boschi a prevalenza di salici e pioppi	
3114	Boschi planiziari a prevalenza di farnie e frassini	
3115	Castagneti da frutto	
3116	Boscaglie ruderali	
3120	Boschi di conifere	
3130	Boschi misti di conifere e latifoglie	
3210	Praterie e brughiere di alta quota	
3220	Cespuglieti e arbusteti	
3231	Vegetazione arbustiva e arborea in evoluzione	
3232	Rimboschimenti recenti	
3310	Spiagge, dune e sabbie	
3320	Rocce nude, falesie e affioramenti	
3331	Aree calanchive	

Classe di uso del suolo (CLC) – 4 livello	Descrizione	Lucode
3332	Aree con vegetazione rada di altro tipo	
4110	Zone umide interne	12
4120	Torbiere	
4211	Zone umide salmastre	
4212	Valli salmastre	
4213	Acquaculture	
4220	Saline	
5111	Alvei di fiumi e torrenti con vegetazione scarsa	
5112	Alvei di fiumi e torrenti con vegetazione abbondante	
5113	Argini	
5114	Canali e idrovie	
5121	Bacini naturali	
5122	Bacini produttivi	
5123	Bacini artificiali	
5124	Acquaculture in ambiente continentale	

Tabella 4.1: Riclassificazione delle classi di uso del suolo.

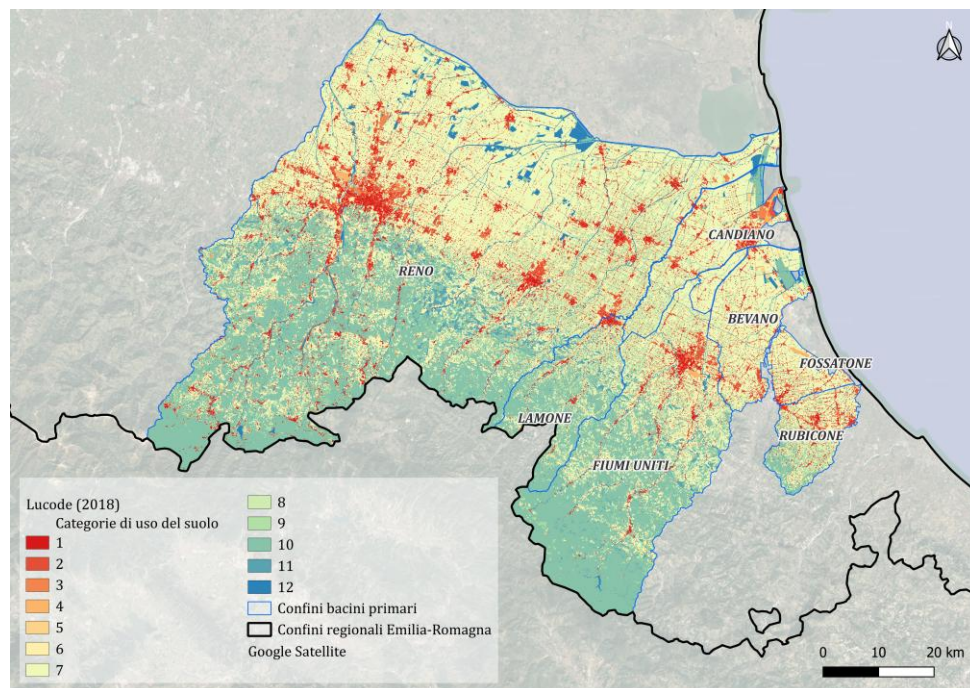


Figura 4.4: Categorie di uso del suolo (lucode) relative al 2018 (scenario PRE).

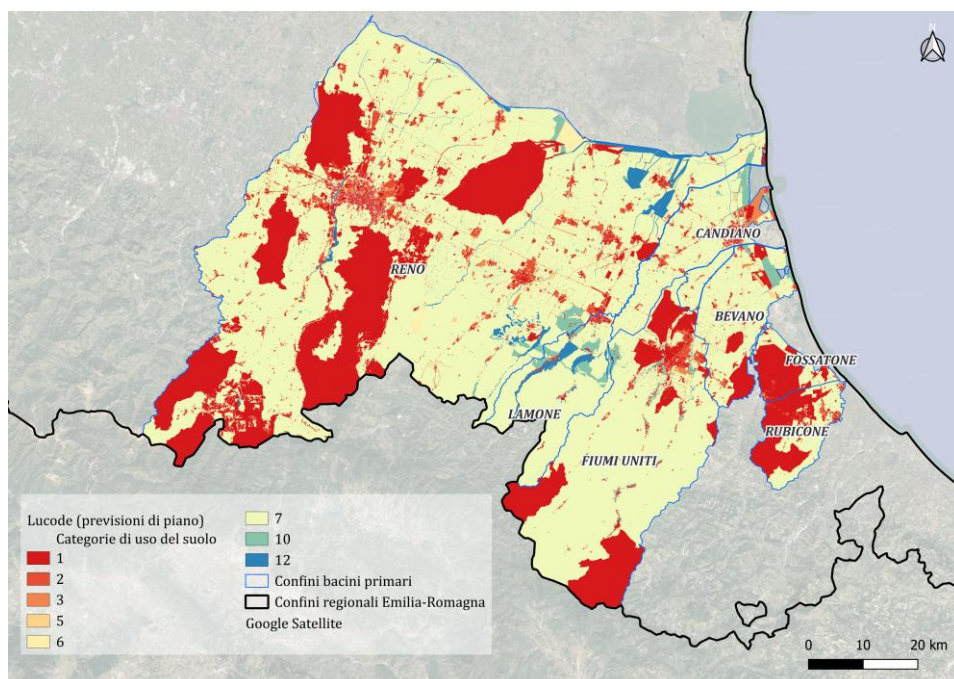


Figura 4.5: Categorie di uso del suolo (lucode) relative alle previsioni di piano (scenario POST).

4.1.2 Definizione dei valori del Curve Number in base ai gruppi idrologici del suolo

Una volta uniformato il database relativo all'uso del suolo secondo una classificazione funzionale e non più secondo la classificazione **Corine Land Cover (CLC)** si è proceduto a valutare il **Curve Number (CN)** da assegnare per ciascuna tipologia di suolo; questo è un parametro empirico sviluppato dal Soil Conservation Service (SCS) del United States Department of Agriculture (USDA) a partire dall'analisi sistematica di dati sperimentali pioggia-deflusso in piccoli bacini, con l'obiettivo di sintetizzare in un unico indicatore la capacità del suolo e della copertura superficiale di trattenere l'acqua prima dell'innesco del deflusso (H. H. Jaafar et al., 2019; Konstantinos X. Soulis., 2021; Mishra et al., 2018; V. M. Ponce & Hawkins, 1996). I valori di CN variano approssimativamente da 30 (per suoli molto permeabili con alta capacità di infiltrazione) fino a 100 (per superfici impermeabili o con alta produzione di deflusso). Tuttavia, il CN non è un parametro univoco, ma dipende da più fattori, tra cui l'uso del suolo, il trattamento della superficie, le condizioni di umidità antecedente e, in modo determinante, le proprietà idrologiche del suolo. Per rendere sistematica e riproducibile l'attribuzione dei valori di CN, l'USDA ha introdotto la classificazione dei suoli in gruppi idrologici dei suoli (Hydrologic Soil Groups, HSG), definita all'interno del *National Engineering Handbook* (United States Department of Agriculture, 2004). I gruppi idrologici rappresentano una sintesi delle caratteristiche fisiche del suolo che influenzano l'infiltrazione e il

ruscellamento, in particolare la conducibilità idraulica in condizioni di saturazione, la profondità del suolo, la presenza di strati impermeabili e le condizioni di drenaggio.

La classificazione prevede quattro gruppi principali:

- **Gruppo A**, suoli ad elevata infiltrazione e basso potenziale di ruscellamento;
- **Gruppo B**, suoli con infiltrazione moderata;
- **Gruppo C**, suoli con bassa infiltrazione;
- **Gruppo D**, suoli con infiltrazione molto ridotta e alto potenziale di deflusso.

Il legame tra Curve Number e gruppi idrologici dei suoli è diretto: per ciascuna classe di uso del suolo, il metodo USDA fornisce valori di CN distinti per ciascun gruppo idrologico (A, B, C e D). A parità di copertura del suolo, il valore di CN aumenta progressivamente passando dal gruppo A al gruppo D, riflettendo la riduzione della capacità infiltrativa e l'aumento della propensione al ruscellamento. In questo senso, i gruppi idrologici dei suoli costituiscono il fondamento fisico-pedologico su cui si basa la parametrizzazione del Curve Number.

Il dataset HYSOGs250m (Global Hydrologic Soil Groups) (Ross, 2018) ha una risoluzione spaziale pari a 250 m, è stato scaricato, importato in ambiente QGIS, ritagliato sui confini regionali e sottoposto a una fase di riclassificazione preliminare. Durante l'elaborazione è emersa una criticità tipica nell'utilizzo di dataset globali a scala regionale: nel caso studio, il raster originale dei gruppi idrologici conteneva esclusivamente le classi 3 (C), 4 (D), 13 (C/D) e 14 (D/D). Tuttavia, per poter poi effettuare le analisi tramite il modello InVEST è stato necessario avere un raster dei gruppi idrologici con valori univoci compresi tra 1 e 4, corrispondenti alle classi A, B, C e D. Si è pertanto resa necessaria una ricodifica delle classi "a doppia appartenenza", guidata dalle linee guida ufficiali dell'USDA. In particolare, le classi C/D e D/D rappresentano suoli che, in condizioni naturali, si comportano come appartenenti al gruppo D (bassa infiltrazione e alto potenziale di deflusso), ma che possono assumere il comportamento idrologico della prima lettera in presenza di drenaggio artificiale. Secondo le indicazioni dell'USDA, la scelta della classe finale deve quindi essere contestualizzata in base all'uso del suolo. Nel caso in esame, i pixel classificati come 13 (C/D) ricadevano esclusivamente in aree urbanizzate e sono stati pertanto trattati come suoli drenati, riclassificandoli nella classe 3 (C). I pixel 14 (D/D), invece, sono stati mantenuti nella classe 4 (D), in quanto anche in presenza di drenaggio continuano a manifestare un comportamento idrologico caratterizzato da elevata produzione di

deflusso. Al termine di questa procedura, il raster finale dei gruppi idrologici risulta composto unicamente dalle classi C e D, coerenti sia con l'effettiva distribuzione pedologica dell'area di studio sia con i requisiti formali del modello InVEST (Figura 4.6).

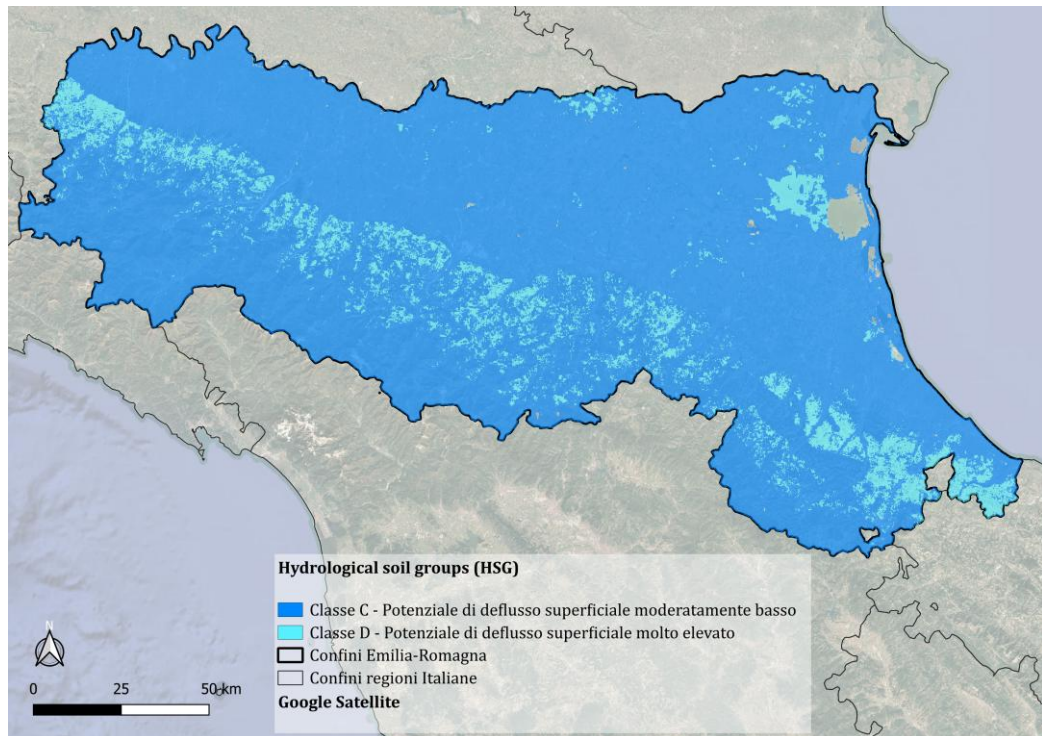


Figura 4.6: Mappa dei gruppi idrologici dei suoli (HSG) riclassificata per la Regione Emilia-Romagna.

Un ulteriore riferimento metodologico per la definizione e la verifica dei valori di Curve Number (CN) assegnati localmente è rappresentato dal dataset GCN250 – Global Curve Number datasets for hydrologic modeling and design, sviluppato da (H. H. Jaafar et al., 2019). Tale prodotto fornisce una mappatura globale dei Curve Number con risoluzione spaziale di circa 250 m, ottenuta mediante l'integrazione di una mappa globale di uso e copertura del suolo (European Space Agency Climate Change Initiative – Land Cover 2015), della mappa globale dei gruppi idrologici dei suoli (HYSOGs250m) e di tabelle di corrispondenza basate sul metodo dell'USDA Soil Conservation Service (SCS). Il dataset GCN250 è articolato in tre raster distinti, corrispondenti alle diverse condizioni antecedenti di ruscellamento (*Antecedent Runoff Conditions, ARC*): condizioni secche (ARC I), condizioni medie (ARC II) e condizioni umide o sature (ARC III). I valori medi globali di Curve Number risultano pari a circa 62, 78 e 90 rispettivamente per ARC I, ARC II e ARC III, evidenziando come, a scala globale, potenziali di ruscellamento da medi a elevati siano prevalenti. Sebbene la risoluzione spaziale del dataset non sia adeguata per analisi di dettaglio a scala di microbacino (<100 m), GCN250 rappresenta

un dataset di confronto utile per verificare la coerenza dei valori di CN assegnati a scala locale rispetto a un riferimento globale uniforme e metodologicamente consistente. Nella presente tesi, i raster GCN250 relativi alle tre condizioni ARC sono stati scaricati e utilizzati a scopo comparativo. A causa dell'estensione globale dei file, essi sono stati preventivamente ritagliati sull'area di interesse per ridurre la dimensione dei dataset e migliorare l'efficienza computazionale. Successivamente, al fine di ottenere valori rappresentativi a scala di bacino e sottobacino, è stata condotta un'analisi di statistica zonale in ambiente GIS, calcolando valori medi per ciascuna unità idrografica. Poiché il metodo SCS-CN è caratterizzato da una relazione non lineare tra Curve Number e deflusso superficiale, la media diretta dei valori di CN su aree eterogenee può introdurre distorsioni nella stima del runoff. Per questo motivo, basandosi anche su letteratura scientifica (Mishra et al., 2003; V. M. Ponce & Hawkins, 1996; Soulis & Valiantzas, 2012), è stata adottata una procedura metodologicamente più corretta, basata sulla trasformazione preliminare dei valori di CN nel corrispondente parametro di ritenzione potenziale massima del suolo (S), espresso in millimetri. I raster di Curve Number sono stati quindi convertiti in raster di S mediante la relazione standard del metodo SCS-CN; su tali raster sono state calcolate le statistiche zonali medie per ciascun bacino. I valori medi di S sono stati infine riconvertiti in Curve Number equivalenti, garantendo una rappresentazione più coerente della risposta idrologica media delle unità di analisi. Questa procedura ha consentito di ottenere, per ciascun bacino, tre valori medi di Curve Number corrispondenti alle condizioni ARC I, ARC II e ARC III, successivamente esportati in formato tabellare per le analisi comparative. L'uso del dataset GCN250 non è stato quindi finalizzato alla sostituzione dei valori di CN definiti localmente, ma al loro confronto e controllo di plausibilità, permettendo di valutare se i parametri adottati rientrassero in intervalli coerenti con il comportamento idrologico atteso su scala più ampia. In definitiva, l'attribuzione dei valori di Curve Number è stata guidata da tabelle e contributi di letteratura (Atharinafi & Wijaya, 2021; Cacal et al., 2023; Gilewski & Węglarz, 2018; H. H. Jaafar et al., 2019; Mishra et al., 2003; Moraes et al., 2013; Quagliolo et al., 2021; Raju et al., 2018; Soulis & Valiantzas, 2012; USACE Hydrologic Engineering Center, 2021) ed è stata integrata da valutazioni di coerenza con le caratteristiche dell'uso del suolo regionale e con le classi di uso del suolo riclassificate. Tale fase di armonizzazione ha richiesto un'attenta ricostruzione metodologica, poiché le classificazioni di uso del suolo regionali non presentano una corrispondenza diretta con le tassonomie statunitensi alla base del metodo dell'USDA. In Tabella 4.2 sono riportati

i valori di Curve Number attribuiti per questa tesi, differenziati in funzione dei gruppi idrologici dei suoli.

Lucode	CN_a	CN_b	CN_c	CN_d
1	89	92	94	95
2	81	88	91	93
3	98	98	98	98
4	81	88	91	93
5	68	79	86	89
6	39	61	74	80
7	67	78	85	89
8	43	65	76	82
9	30	58	71	78
10	35	56	70	77
11	68	79	86	89
12	100	100	100	100

Tabella 4.2: Valori di Curve Number associati agli usi del suolo (lucode)

4.1.3 Delimitazione dei bacini primari

La delimitazione delle unità idrologiche è stata condotta in ambiente GIS mediante algoritmi consolidati per l'analisi idrologica raster. Per l'inquadramento territoriale e il riferimento istituzionale è stato utilizzato il dataset "Bacini idrografici principali come da Direttiva 2000/60/CE – aggiornamento PdG 2021", reso disponibile da ARPAE attraverso il portale INSPIRE (Arpae Emilia-Romagna, 2022). Questo dato, in formato vettoriale e scala di riferimento 1:10.000, rappresenta i bacini idrografici principali della Regione Emilia-Romagna secondo criteri prevalentemente gestionali e amministrativi, che comportano l'accorpamento di più sottobacini. Sebbene il dataset sia utile, per le analisi è stato necessario delimitare i bacini su criteri morfologici. A tal fine, i bacini idrografici sono stati derivati a partire dal modello digitale del terreno TINITALY, versione 1.1 (aggiornata a gennaio 2023), con risoluzione spaziale di 10 m (Tarquini S., 2023),

Il DEM è stato preliminarmente ritagliato sull'area di studio individuata e per garantire la correttezza delle successive elaborazioni idrologiche è stato sottoposto a una fase di correzione delle depressioni topografiche artificiali (*sink filling*), mediante l'algoritmo SAGA Fill Sinks (Wang & Liu) (Wang & Liu, 2006), impostando una pendenza minima

pari a 0,05. Tale procedura ha consentito di eliminare le discontinuità non realistiche del modello e di ottenere un DEM idrologicamente coerente, idoneo al calcolo delle variabili di deflusso. A partire dal DEM corretto sono state quindi derivate le principali variabili idrologiche, tra cui l'accumulo di flusso (*flow accumulation*) (Figura 4.7), utilizzate nelle successive fasi di analisi.

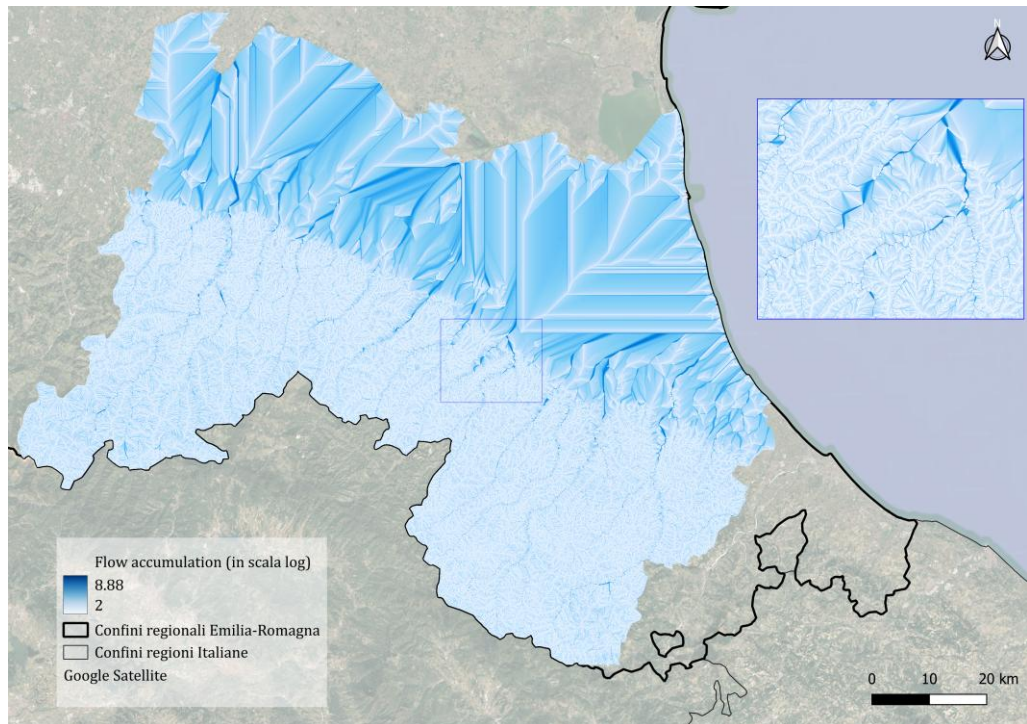


Figura 4.7: Flow accumulation nei bacini analizzati.

Il reticolo (channel) è stato calcolato per trovare la sezione di chiusura. La rete drenante così ottenuta è stata confrontata con il layer idrografico ufficiale disponibile sul geoportale regionale e, ove necessario, corretta mediante integrazioni vettoriali, per tenere conto delle principali interferenze antropiche non completamente rappresentate nel DEM. Le unità idrologiche derivate sono state vettorializzate in ambiente GIS. Per ciascun bacino sono stati calcolati indicatori geometrici e morfometrici di base (area, lunghezza del corso d'acqua principale, pendenza media e distribuzione altimetrica), utilizzati sia per la caratterizzazione preliminare sia per la verifica di coerenza dei risultati.

4.2 Il modello InVEST

L'impiego di modelli basati sui servizi ecosistemici a supporto della pianificazione territoriale e della gestione del rischio idrogeologico rappresenta un approccio sempre più consolidato, in particolare nei contesti caratterizzati da urbanizzazione diffusa e da un

aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi estremi (Atharinafi & Wijaya, 2021; Bose & Mazumdar, 2023; Cacal et al., 2023; Gilewski & Węglarz, 2018; Hamel et al., 2015, 2017; Moraes et al., 2013). In questo quadro, in questa tesi si è utilizzato il modello open source **InVEST** (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*), sviluppato dal Natural Capital Project (Natural Capital Project, 2024), come strumento di riferimento per la quantificazione spaziale dei servizi ecosistemici legati alla regolazione idrologica. InVEST consente di valutare in modo integrato il contributo delle diverse coperture del suolo alla capacità del territorio di intercettare, trattenere e gestire le acque meteoriche, fornendo indicazioni utili anche in termini di riduzione della pericolosità associata al deflusso superficiale. Il software include un insieme di modelli dedicati alla valutazione di specifici servizi ecosistemici, ciascuno dei quali richiede dati di input mirati; un elemento comune a tutti i modelli è rappresentato dalla mappa di uso e copertura del suolo, che costituisce la base informativa per la simulazione degli effetti delle trasformazioni territoriali. L'analisi si concentra in particolare sulla valutazione di tre servizi ecosistemici di regolazione idrica: la mitigazione del rischio di alluvione in ambito urbano, la generazione e il rilascio di sedimenti terrestri e la ritenzione urbana delle acque meteoriche. A tal fine, sono stati utilizzati i moduli **Urban Flood Risk Mitigation (UFRM)**, **Sediment Delivery Ratio (SDR)** e **Urban Stormwater Retention (USR)**, che permettono di analizzare in modo complementare le interazioni tra uso del suolo, processi idrologici e servizi ecosistemici. Come precedentemente detto nel Capitolo 4, sono state eseguite due simulazioni con uso del suolo differente, scenario PRE e POST, alle due scale di dettaglio analizzate (scala provinciale-intercomunale e scala intercomunale).

4.2.1 Urban Flood Risk Mitigation (UFRM)

Il modello **Urban Flood Risk Mitigation (UFRM)** di *InVEST* è uno strumento di valutazione spaziale progettato per stimare la capacità del suolo di trattenere il deflusso superficiale e, di conseguenza, il contributo delle diverse coperture del suolo alla mitigazione del rischio di alluvione urbano. In termini operativi, il modello utilizza un approccio semplificato basato sul **metodo del Curve Number (CN)** per calcolare la riduzione del deflusso generato da un evento di pioggia di progetto. Per ogni pixel del territorio, definito dalla combinazione di uso del suolo e caratteristiche del suolo, viene stimato il volume di deflusso e la porzione di pioggia trattenuta rispetto al totale di precipitazione.

$$Q_{p,i} = \begin{cases} \frac{(P - \lambda \cdot S_{max,i})^2}{P + (1 - \lambda) S_{max,i}} & \text{se } P > \lambda \cdot S_{max,i} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

dove P è l'altezza di pioggia dell'evento di progetto (mm), $S_{max,i}$ è la ritenzione potenziale (mm) e $\lambda \cdot S_{max}$ rappresenta l'altezza di pioggia necessaria per l'innesco del deflusso, detta anche **perdita iniziale** (*initial abstraction*), con $\lambda = 0,2$ assunta per semplificazione.

La ritenzione potenziale S_{max} (calcolata in mm) è funzione del **Curve Number** (CN):

$$S_{max,i} = \frac{25400}{CN_i} - 254$$

Pur essendo un modello relativamente semplice e con alcune semplificazioni (ad esempio l'uso di una singola profondità di precipitazione per l'intero bacino), UFRM è utile per confrontare scenari di uso del suolo e per supportare decisioni di pianificazione e gestione basate sui servizi ecosistemici di regolazione idrica.

I dati di input richiesti dal modello UFRM comprendono:

- **Area di interesse:** mappa delle aree sulle quali aggregare e sintetizzare i risultati finali del modello;
- **Altezza di pioggia** (unità: mm): profondità di precipitazione relativa all'evento di pioggia di progetto considerato. Questo parametro corrisponde alla variabile P nell'equazione di sopra;
- **Uso e copertura del suolo (LULC):** mappa dell'uso e copertura del suolo, riorganizzato secondo quanto descritto nel paragrafo 4.1.1. Tutti i valori presenti in questo raster hanno una corrispondente voce nella tabella biofisica.
- **Gruppi idrologici dei suoli:** mappa dei gruppi idrologici dei suoli. I pixel hanno valori pari a 1, 2, 3 o 4, corrispondenti rispettivamente ai gruppi idrologici A, B, C o D. Come già specificato nel paragrafo 4.1.2, gli unici gruppi idrologici presenti sono C e D;
- **Tabella biofisica:** tabella contenente i valori di Curve Number per ciascuna classe di uso del suolo. Tutti i codici LULC presenti nel raster di uso del suolo hanno una corrispondente voce in questa tabella per ciascun gruppo idrologico. In Tabella 4.3 sono riportati i valori scelti per questa tesi.

Lucode	CN_c	CN_d
1	94	95
2	91	93
3	98	98
4	91	93
5	86	89
6	74	80
7	85	89
8	76	82
9	71	78
10	70	77
11	86	89
12	100	100

Tabella 4.3: Tabella biofisica per il modello UFRM di InVEST.

I risultati che restituisce il modello sono 3 file raster, in particolare:

- **Runoff retention index** – percentuale di pioggia trattenuta - (*Runoff_retention_index.tif*), contenente i valori dell'indice di ritenzione del deflusso, adimensionale, con valori compresi tra 0 e 1, riferiti al volume di precipitazione;
- **Runoff volume** (*Q_mm.tif*), contenente la quantità di deflusso prodotto in mm;
- **Runoff retention volume** (*Runoff_retention_m3.tif*), contenente i valori del volume di ritenzione del deflusso (in m³) trattenuti per unità di superficie.

In particolare, il *Runoff retention index* può essere interpretato come una misura sintetica dell'efficienza idrologica del suolo: valori elevati indicano superfici in grado di intercettare, infiltrare o temporaneamente immagazzinare l'acqua meteorica, contribuendo a ritardare e ridurre il deflusso superficiale diretto; al contrario, valori bassi sono tipici di superfici impermeabili o fortemente compattate, che generano rapidamente deflusso e aumentano la pressione sul sistema di drenaggio urbano e sui corpi idrici recettori. Il *Runoff retention volume* (m³) fornisce una misura volumetrica assoluta dell'acqua trattenuta dal territorio in risposta a un evento di pioggia di progetto. Questo output è particolarmente rilevante in chiave progettuale, in quanto consente di stimare l'equivalente idraulico di interventi di laminazione diffusa. In altri termini, il volume trattenuto dalle superfici naturali o semi-naturali può essere confrontato con il volume di invasi, vasche di laminazione o opere di drenaggio urbano sostenibile (come le Low Impact Development - LID) che sarebbero necessari per ottenere lo stesso effetto di

riduzione del deflusso. Tale informazione è quindi utile per supportare valutazioni costi-benefici e per orientare le scelte di pianificazione verso soluzioni basate sulla natura. Il *Runoff volume* (Q_{mm}) descrive invece l'intensità del contributo idrologico superficiale prodotto da ciascuna porzione di territorio. Dal punto di vista ingegneristico, questo parametro è direttamente correlabile ai carichi idraulici imposti alle reti di drenaggio, ai corsi d'acqua e alle sezioni idrauliche. Aumenti localizzati o diffusi dei valori di Q_{mm} indicano aree potenzialmente critiche in termini di sovraccarico delle infrastrutture idrauliche e di incremento della probabilità di allagamento, soprattutto in presenza di reti fognarie sottodimensionate o di sezioni fluviali insufficienti. Nel loro insieme, questi output consentono quindi di passare da una valutazione qualitativa del rischio idraulico a una lettura quantitativa e comparativa delle prestazioni idrologiche del territorio. Essi risultano particolarmente utili per: (i) confrontare scenari alternativi di uso del suolo e di pianificazione urbanistica; (ii) individuare le aree in cui le trasformazioni previste possono produrre gli effetti più critici sul deflusso; (iii) supportare la progettazione di strategie di mitigazione basate sia su interventi strutturali tradizionali sia su soluzioni di drenaggio urbano sostenibile e infrastrutture verdi.

Come ulteriori risultati il modello fornisce a scala di bacino in formato shapefile:

- *rnf_rt_idx*: valore medio dell'indice di ritenzione del deflusso (adimensionale)
- *rnf_rt_m3*: volume totale di deflusso trattenuto (m^3)
- *flood_vol*: volume di piena generato (m^3)

In particolare, gli ultimi due possono essere normalizzati nel caso di analisi tra più bacini (pianificazione area vasta), ottenendo indicatori espressi in m^3/km^2 (*Ritenzione specifica* e *Flood specifico*).

Nell'analisi UFRM per le aree indagate in questa tesi sono state effettuate diverse simulazioni di eventi di pioggia (120 mm, 150 mm, 180 mm, 200 mm, 220 mm), al fine di analizzare la distribuzione spaziale del deflusso e della capacità di ritenzione all'interno dei bacini, consentendo di individuare le aree maggiormente soggette alla generazione di runoff superficiale. In tale contesto, il modello permette di evidenziare il ruolo delle diverse tipologie di copertura del suolo nella modulazione del deflusso, mettendo in relazione superfici urbanizzate, agricole e naturali con la loro capacità di trattenere o convogliare l'acqua meteorica. Al termine delle analisi però si è scelto di inserire nella presente tesi solo l'evento simulato con altezza di pioggia pari a 200 mm: questo risulta essere rappresentativo di un evento estremo di precipitazione giornaliera

nella regione, in linea con quanto riportato dalle osservazioni di ARPAE (ARPAE Emilia-Romagna - Struttura Idro-Meteo-Clima, 2024; Arpa Emilia-Romagna, 2023, 2023b, 2023a). Eventi con cumulate comprese tra 100 e 150 mm in 24 ore sono infatti frequentemente associati a criticità idrauliche e alluvionali nel territorio della regione Emilia-Romagna, che hanno raggiunto valori molto più elevati nell'alluvione di maggio 2023. La scelta di 200 mm consente quindi di lavorare con un valore realistico, ma allo stesso tempo prudenziale.

4.2.2 Sediment Delivery Ratio (SDR)

Il modello Sediment Delivery Ratio (SDR) di InVEST è progettato per quantificare e mappare la generazione di sedimenti superficiali e il loro trasporto nei corsi d'acqua all'interno di un bacino idrografico, fornendo una rappresentazione spaziale dei processi erosivi legati a pioggia, suolo, topografia e uso del suolo (Yang et al., 2024). Gli indici calcolati tramite questo modello esprimono la proporzione di sedimento eroso da ciascun pixel che viene effettivamente trasportata fino ai corsi d'acqua, tenendo conto della connettività idrologica del paesaggio. A differenza della semplice stima della perdita di suolo (erosione potenziale), il modello SDR distingue tra sedimento che resta localmente sul versante e quello che contribuisce alle perturbazioni nei canali fluviali. Questo approccio è stato proposto da Borselli et al. (2008) e ha ricevuto un crescente interesse (Cavalli et al., 2013; Desmet & Govers, 1996; López-Vicente et al., 2013; Sougnez et al., 2011).

La quantità di perdita annuale di suolo su pixel i , usle (unità: $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$), è data dalla Revised Universal Soil Loss Equation (Renard et al., 1997):

$$\text{USLE}_i = R_i \cdot K_i \cdot \text{LS}_i \cdot C_i \cdot P_i$$

Dove

- R_i è l'erosività delle precipitazioni (unità: $\text{MJ}\cdot\text{mm}(\text{ha}\cdot\text{hr}\cdot\text{yr})^{-1}$);
- K_i è l'erodibilità del suolo (unità: $\text{ton}\cdot\text{ha}\cdot\text{hr}(\text{MJ}\cdot\text{ha}\cdot\text{mm})^{-1}$);
- LS_i è un fattore pendenza lunghezza-gradiente sviluppato da Desmet & Govers, (1996) (senza unità);
- C_i è un fattore di gestione della copertura (senza unità);
- P_i è un fattore di supporto alla pratica (Panagos, Borrelli, Meusburger, van der Zanden, et al., 2015; Renard et al., 1997) (senza unità)

Per eseguire il modello SDR sono necessari i seguenti input spaziali e tabellari:

- **Modello Digitale del Terreno (DEM)** – raster (unità: m);
- **Mappa di uso del suolo:** mappa dei codici di uso del suolo/copertura del suolo. Tutti i valori in questo raster devono avere voci corrispondenti nella tabella biofisica;
- **Mappa di erosività delle piogge (R)** – raster (unità $MJ \cdot mm / (h \cdot ha \cdot year)$): mappa dell'erosività delle precipitazioni, che riflette l'intensità e la durata delle precipitazioni nell'area di interesse. avente una risoluzione di 30 arc secondi (circa 1 km), scaricabile dal sito dell'European Soil Data Centre (European Soil Data Centre (ESDAC) (Panagos et al., 2017). Maggiore è l'intensità e la durata della tempesta di pioggia, maggiore è il potenziale di erosione.
- **Mappa di erodibilità del suolo (K)** – raster (unità $t \cdot h \cdot ha / (ha \cdot MJ \cdot mm)$): rappresenta la suscettibilità delle particelle di suolo al distacco e al trasporto da parte della pioggia e del deflusso superficiale. Ha una risoluzione di 500 m/pixel scaricabile dal sito dell'European Soil Data Centre (ESDAC), edizione 2014 (Panagos et al., 2014);
- **Limiti del bacino idrografico di interesse (watersheds)** – per circoscrivere l'area di analisi
- **Tabella biofisica:** associa a ciascun codice di uso/copertura del suolo (LULC) le proprietà biofisiche della relativa classe. Tutti i valori presenti nel raster LULC devono avere una corrispondente voce all'interno di questa tabella. La tabella contiene:
 - **Lucode:** codici LULC derivati dal raster di uso del suolo descritto nel paragrafo 4.1;
 - **usle_c:** fattore di copertura e gestione del suolo (Cover-Management Factor) della Universal Soil Loss Equation (USLE) (Renard et al., 1997). Valori più bassi (prossimi a 0) indicano una minore propensione all'erosione per quella tipologia di uso/copertura del suolo; valori più prossimi a 1 indicano invece una maggiore probabilità di erosione associata alla classe LULC. La scelta dei valori del fattore di copertura proviene da fonti di letteratura (Panagos, Borrelli, Meusburger, Alewell, et al., 2015) a confronto con la mappa realizzata dalla regione Emilia-Romagna (Romagna & Staffilani, 2019);
 - **usle_p:** fattore delle pratiche di supporto (Support Practice Factor) della USLE. Un valore pari a 1 indica l'assenza di pratiche di riduzione dell'erosione (oppure la mancanza di informazioni in merito), nel qual

caso il fattore P non influisce sul risultato della USLE. Valori inferiori a 1 indicano invece la presenza di pratiche gestionali che contribuiscono a ridurre l'erosione. La scelta dei valori proviene da (Panagos, Borrelli, Meusburger, van der Zanden, et al., 2015)

La Tabella 4.4 contiene i valori di *usle_c* e *usle_p* associati alla categoria di uso del suolo utilizzati per questa tesi.

Lucode	usle_c	usle_p
1	0.178	0.94
2	0.179	0.92
3	0.162	0.94
4	0.179	0.94
5	0.19	0.94
6	0.173	0.93
7	0.21	0.95
8	0.2	0.9
9	0.15	1
10	0.04	0.99
11	0.09	1
12	0.001	1

Tabella 4.4: Tabella biofisica per il modello SDR di InVEST.

Una cosa da sottolineare è che il file raster di uso del suolo impiegato nel modello SDR deve essere lo stesso utilizzato per il modello UFRM per poter confrontare i risultati. I parametri di default adottati nel modello SDR sono stati scelti in base alla guida InVEST (*InVEST® User Guide — InVEST® documentation*, 2024) e comprendono: soglia di accumulo di flusso pari a 1000, valore del parametro *k* di Borselli pari a 2, valore del parametro *IC₀* pari a 0,5, valore massimo di SDR pari a 0,8 e valore massimo di *L* pari a 122.

I risultati generati dal modello sono rappresentati da un file in formato shapefile (*watershed_results_sdr.shp*) che racchiude per ogni bacino analizzato:

- **Sedimenti esportati** (*sed_export*, unità: t/km² anno): Quantità totale di sedimenti esportati verso il corso d'acqua per ciascun bacino idrografico;

- **Erosione totale** (*usle_tot*, unità: t/km² anno): Quantità totale di perdita potenziale di suolo in ciascun bacino idrografico, calcolata mediante l'equazione USLE;
- **Sedimenti esportati evitati** (*avoid_exp*, unità: t/km² anno): Somma dei sedimenti esportati evitati all'interno del bacino idrografico rispetto allo scenario di riferimento;
- **Erosione evitata** (*avoid_eros*, unità: t/km² anno): Somma dell'erosione locale evitata all'interno del bacino idrografico rispetto allo scenario di riferimento;
- **Sedimenti depositati** (*sed_dep*, unità: t/km² anno): Quantità totale di sedimenti depositati sul territorio all'interno di ciascun bacino idrografico, che non entrano nella rete idrografica.

Come quanto detto per il modello UFRM al paragrafo 4.2.1, gli indici sopra elencati possono essere normalizzati nel caso di analisi tra più bacini (pianificazione area vasta). A partire dagli indici a disposizione è possibile calcolare il Sediment Delivery Ratio medio di bacino (*SDR medio*) come rapporto tra i sedimenti esportati all'uscita del bacino (*sed_export*) e l'erosione totale (*usle_tot*): questo fornisce una misura sintetica dell'efficienza complessiva di trasferimento dei sedimenti a scala di bacino (Hamel et al., 2017; Yang et al., 2024). Inoltre, ai fini interpretativi, è stato introdotto un indicatore definito come *Deposition ratio*, calcolato come rapporto tra i sedimenti depositati all'interno del bacino (*sed_dep*) e l'erosione totale (*usle_tot*); tale rapporto non rappresenta un indice codificato in letteratura, ma una rielaborazione personale finalizzata a supportare l'interpretazione del bilancio sedimentario a scala di bacino. Sia l'*SDR medio* sia il *Deposition ratio* sono grandezze adimensionali, in quanto calcolate come rapporti tra variabili espresse nella stessa unità di misura.

4.2.3 Urban Stormwater Retention (USR)

Il modello *Urban Stormwater Retention* di InVEST consente l'analisi della gestione delle acque piovane nelle aree urbane fornendo informazioni su due servizi ecosistemici collegati alla gestione delle acque meteoriche:

1. Ritenzione delle acque di pioggia
2. Ricarica delle acque sotterranee

La ritenzione delle acque piovane riguarda sia la quantità che la qualità dell'acqua trattenuta, riducendo il volume e il trasporto di inquinanti verso corsi d'acqua e bacini riceventi. In questa tesi la componente inquinante non è stata calcolata. Questo modello

è diverso dall'UFRM, in quanto quest'ultimo analizza la riduzione del rischio di allagamento associata a eventi di pioggia intensa, mentre il modello USR stima la capacità del sistema urbano di trattenere e infiltrare le acque meteoriche su base annuale.

Per eseguire il modello USR sono necessari i seguenti input spaziali e tabellari:

- **Mappa di uso del suolo:** mappa dei codici di uso del suolo/copertura del suolo. Tutti i valori in questo raster devono avere voci corrispondenti nella tabella biofisica;
- **Gruppi idrologici dei suoli:** mappa dei gruppi idrologici dei suoli. I pixel hanno valori pari a 1, 2, 3 o 4, corrispondenti rispettivamente ai gruppi idrologici A, B, C o D. Come già specificato nel paragrafo 4.1.2, gli unici gruppi idrologici presenti sono C e D;
- **Precipitazione media annua** (raster, unità: mm/anno): estratta dal dataset ERA5-Land monthly averaged reanalysis del Copernicus Climate Data Store (*ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present, 2024*);
- **Tabella biofisica:** associa a ciascun codice di uso/copertura del suolo (LULC) le proprietà biofisiche della relativa classe. Tutti i valori presenti nel raster LULC devono avere una corrispondente voce all'interno di questa tabella. La tabella contiene:
 - **Lucode:** codici LULC derivati dal raster di uso del suolo descritto nel paragrafo 4.1.1;
 - **rc_a** (rapporto): coefficiente di ruscellamento delle acque meteoriche per suoli del gruppo idrologico A.
 - **rc_b** (rapporto): coefficiente di ruscellamento delle acque meteoriche per suoli del gruppo idrologico B.
 - **rc_c** (rapporto): coefficiente di ruscellamento delle acque meteoriche per suoli del gruppo idrologico C.
 - **rc_d** (rapporto): coefficiente di ruscellamento delle acque meteoriche per suoli del gruppo idrologico D.

Il modello USR richiede, per ciascuna classe di uso/copertura del suolo la definizione di coefficienti di runoff superficiale (rc) espressi come frazione della precipitazione totale, distinti per gruppo idrologico del suolo. In questa tesi, i coefficienti di runoff sono stati derivati a partire dai valori di Curve Number (CN), già disponibili in forma differenziata per ciascun gruppo idrologico (A, B, C e D), consentendo una rappresentazione più

accurata delle differenze di permeabilità e capacità di infiltrazione dei suoli. Poiché il metodo SCS–Curve Number è concepito per la stima del deflusso diretto a scala di evento, mentre il modello InVEST opera a scala media annuale, è stata adottata una conversione semplificata finalizzata a ottenere un coefficiente di runoff adimensionale coerente con l'impostazione concettuale del modello. In particolare, per ciascuna combinazione LULC–HSG, il coefficiente di runoff è stato calcolato mediante la relazione:

$$rc = \frac{CN - 20}{100}$$

Questa formulazione introduce una “soglia idrologica” minima, assumendo che valori di Curve Number prossimi a 20 rappresentino superfici ad elevata infiltrabilità, per le quali il deflusso superficiale risulta trascurabile. La successiva normalizzazione consente di ottenere coefficienti compresi tra 0 e 1, direttamente utilizzabili all'interno del modello InVEST. Coerentemente con la guida ufficiale di InVEST (*Urban Stormwater Retention – InVEST® documentation*, 2024), i coefficienti di runoff sono stati specificati separatamente per ciascun gruppo idrologico del suolo (rc_a, rc_b, rc_c, rc_d) all'interno della tabella biofisica.

La Tabella 4.5 contiene i valori di rc_a, rc_b, rc_c, rc_d associati alla categoria di uso del suolo utilizzati per questa tesi.

Lucode	rc_a	rc_b	rc_c	rc_d
1	0.69	0.72	0.74	0.75
2	0.61	0.68	0.71	0.73
3	0.78	0.78	0.78	0.78
4	0.61	0.68	0.71	0.73
5	0.48	0.59	0.66	0.69
6	0.19	0.41	0.54	0.06
7	0.47	0.58	0.64	0.69
8	0.23	0.45	0.56	0.62
9	0.01	0.38	0.51	0.58
10	0.15	0.36	0.5	0.57
11	0.48	0.59	0.66	0.69
12	0.07	0.73	0.76	0.78

Tabella 4.5: Tabella biofisica per il modello USR di InVEST.

La precipitazione media annua è stata derivata dal dataset ERA5-Land monthly averaged reanalysis del Copernicus Climate Data Store (Copernicus Climate Data Store, 2024) selezionando la variabile *Total Precipitation*. I dati mensili relativi all'anno di analisi (2022) sono stati scaricati in formato Network Common Data Form (NetCDF), formato standard ampiamente utilizzato per l'archiviazione e la distribuzione di dati geospaziali multidimensionali, in particolare per variabili atmosferiche e climatiche. Successivamente i dati sono stati importati in ambiente GIS, dove si è potuto notare che il dataset forniva la precipitazione media mensile (m/mese) con 12 bande a disposizione relative ai 12 mesi dell'anno; queste bande sono state sommate e convertite da metri a millimetri ottenendo la precipitazione annuale totale in millimetri. Il raster finale di precipitazione è stato quindi riproiettato nel sistema di riferimento del progetto UTM Zone 32N e ritagliato sull'area di studio, garantendo la coerenza spaziale con i raster di uso del suolo e gruppi idrologici.

I risultati generati dal modello sono:

- **Retention ratio:** raster derivato dal raster di uso del suolo e dalle colonne *rc_a*, *rc_b*, *rc_c*, *rc_d* della tabella biofisica, in cui il valore di ciascun pixel rappresenta il rapporto di ritenzione delle acque meteoriche nell'area considerata;
- **Retention volume:** mappa raster dei volumi di acqua trattenuta;
- **Runoff ratio:** raster derivato dal raster del rapporto di ritenzione, in cui il valore di ciascun pixel rappresenta il rapporto di deflusso superficiale nell'area considerata. Questo raster costituisce il complemento di *retention ratio* ($1 - \text{retention ratio}$);
- **Runoff volume:** mappa raster dei volumi di deflusso superficiale.

4.3 Il modello HEC-HMS

Il modello HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) è un software realizzato dall'U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (HEC) (U.S. Army Corps of Engineers, 2024). Il modello è in grado di simulare l'intero insieme dei processi idrologici che caratterizzano i bacini idrografici (Amini et al., 2011; Chow, 1965; Gao et al., 2020; *HEC-HMS Tutorials and Guides*, 2024; Motevalli et al., 2012; U.S. Army Corps of Engineers, 2024), grazie alla sua possibile integrazione con altri software (GIS, HEC-RAS, etc.).

Nel processo di costruzione dei dati di input per la modellazione idrologica, particolare attenzione è stata dedicata alla preparazione e all'integrazione dei raster relativi all'uso

del suolo e ai gruppi idrologici del suolo (Hydrologic Soil Groups, HSG), necessari per la derivazione del parametro Curve Number. I due dataset presentavano infatti caratteristiche spaziali differenti: il raster dell'uso del suolo era disponibile a elevata risoluzione spaziale (10 m), mentre il raster HSG era fornito a una scala più grossolana (250 m), coerente con la natura pedologica dell'informazione. In Figura 4.8 e Figura 4.9 sono riportate le riclassificazioni del CN per l'intera area dei bacini primari indagati.

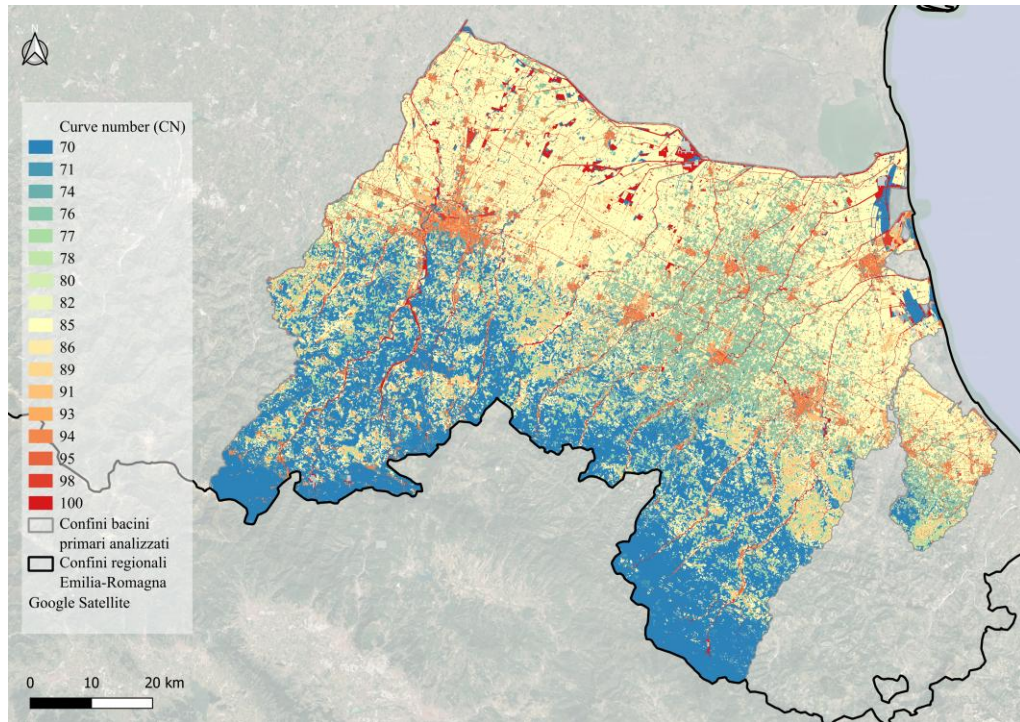


Figura 4.8: Mappa del Curve Number nello scenario PRE.

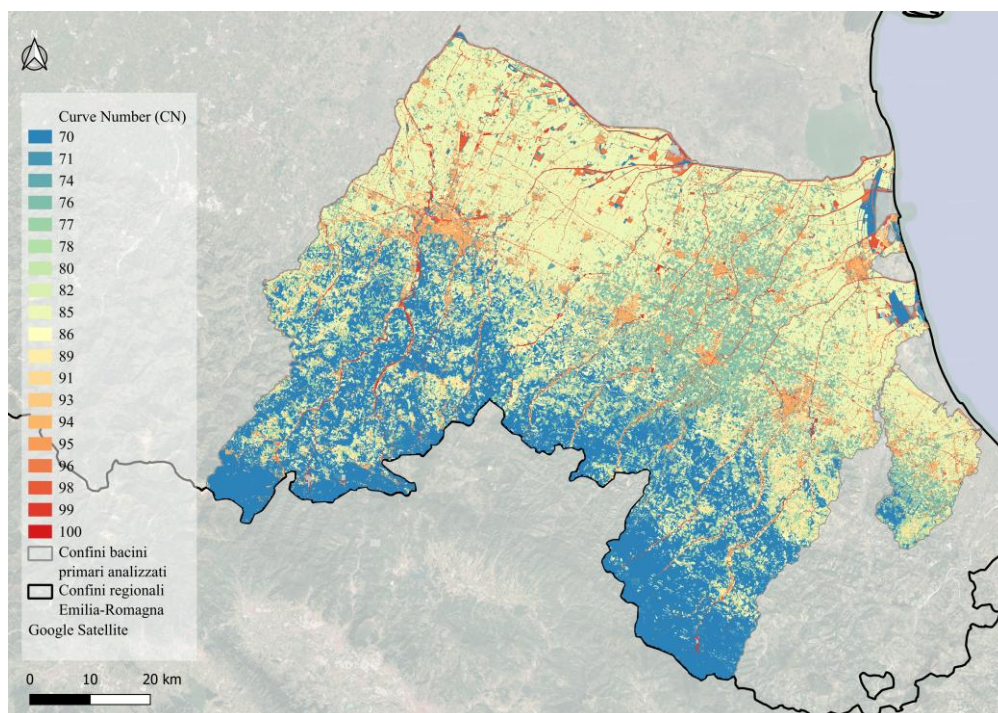


Figura 4.9: Mappa del Curve Number nello scenario POST.

L'utilizzo del modello HEC-HMS in questa tesi è stato adottato principalmente per vedere come varia la risposta di un bacino idrografico in seguito al cambiamento di uso del suolo (scenario PRE e POST), e quindi in relazione alla variazione di CN. A causa dell'elevata quantità di dati a disposizione e per poter testare il modello, si è scelto di effettuare l'analisi solo a scala intercomunale, in particolare per il bacino Lamone, in cui si è registrato il più alto valore di precipitazione in 15 minuti (Arpae Emilia-Romagna, 2023b, 2023, 2023a; Fassi et al., 2023). Si è scelto quindi di rappresentare un evento reale di precipitazione, in maniera però semplificata, ovvero scegliendo un'unica serie pluviometrica per tutto il bacino; questa semplificazione nasce dalle motivazioni della ricerca di dottorato condotta, in quanto non si vuole riprodurre in maniera dettagliata l'evento alluvionale in sé, quanto piuttosto valutare il cambiamento idrologico di un bacino in base alla tipologia di uso del suolo in caso di un evento estremo. Si è scelta la stazione pluviometrica di Monte Albano in prossimità del fiume Lamone, i cui dati sono estraibili in vari formati dal portale Dext3r di Arpae Emilia-Romagna (ARPAE Emilia-Romagna, 2024), considerando l'evento pluviometrico a 15 minuti dal 30 aprile 2023 alle ore 21:45 al 17 maggio 2023 alle ore 23:45. Il file estratto in formato .csv è stato successivamente modificato con HEC-DSSvue (*HEC-DSSvue*, 2024), un programma che consente di modificare i dati in un file di database HEC-DSS, su cui si basa il software HEC-HMS.

Il modello è stato configurato utilizzando il metodo Gridded SCS Curve Number (*Importing Gridded SCS Curve Number in HEC-HMS*, 2025; Mishra et al., 2003; Vecchietti, 2019) per la stima delle perdite e il metodo ModClark (Gharib et al., 2018) per la trasformazione afflussi–deflussi. Questa combinazione consente di rappresentare in modo spazialmente esplicito la variabilità dell’uso del suolo e delle caratteristiche pedologiche, permettendo allo stesso tempo di analizzare la propagazione delle onde di piena lungo il reticolo idrografico. L’impiego di Curve Number in forma grigliata risulta particolarmente appropriato nel contesto di analisi orientate alla pianificazione territoriale, in quanto consente un collegamento diretto tra trasformazioni urbanistiche e risposta idrologica. Il metodo ModClark è un metodo meno utilizzato rispetto agli approcci tradizionali basati sull’idrogramma unitario SCS (Abdelkebir et al., 2024; Kabeja et al., 2020; Parisay et al., 2014), ma è stato scelto perché, per le analisi che si intendono fare, restituisce risultati soddisfacenti nella trasformazione afflussi-deflussi in bacini naturali, utilizzando pochi parametri: la curva area-tempi del bacino, il tempo di corrivazione e la capacità di invaso della pioggia netta (R) (Kull & Feldman, 1998; Sabol, 1988). Il tempo di corrivazione (T_c) viene definito come il tempo che impiega una goccia d’acqua che parte da un punto assegnato del bacino per raggiungere la sezione di chiusura del bacino (Almeida et al., 2021; Chapter 3 Time of Concentration and Travel Time, 1986; Michailidi et al., 2018) e si può calcolare con la formula di Giandotti (1934):

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 L}{0.8 \sqrt{(H_m - h_0)}}$$

dove

A = area del bacino (km²)

L = lunghezza dell’asta/percorso idraulico principale (km)

H_m = quota media del bacino (m s.l.m.)

h_o = quota della sezione di chiusura/outlet (m s.l.m.).

I dati sono stati estrapolati in ambiente GIS, a partire dal DTM e dalla rete idrografica a disposizione.

Nel modello idrologico implementato in HEC-HMS il deflusso di base (*baseflow*) è stato esplicitamente rappresentato al fine di riprodurre in modo realistico le condizioni idrologiche antecedenti; è stato adottato il metodo *Recession*, che descrive il deflusso di

base come un processo di decadimento esponenziale controllato da un numero limitato di parametri fisicamente interpretabili. La portata iniziale (*Initial Discharge*) è stata impostata pari a 1,75 m³/s, valore coerente con la portata media giornaliera osservata nel periodo immediatamente precedente l'avvio della simulazione (30/04–01/05). Questa scelta consente di rappresentare in modo realistico le condizioni idrologiche iniziali del bacino ed evitare discontinuità artificiali tra lo stato osservato e quello simulato. La costante di recessione (*Recession Constant*), invece, è stata stimata a partire dai dati di portata media giornaliera, analizzando tratti di idrogramma caratterizzati da precipitazioni trascurabili e calcolata applicando la relazione

$$k_{day} = (Q_2/Q_1)^{1/\Delta t}$$

dove Q_1 e Q_2 rappresentano le portate all'inizio e alla fine del periodo di recessione, mentre Δt indica la durata dell'intervallo in giorni. L'analisi di più tratti indipendenti ha fornito valori tra loro coerenti, consentendo di adottare un valore medio pari a $k_{day} \approx 0,83$, corrispondente a $k_{15min} \approx 0,998$, avendo una serie temporale con passo di 15 minuti.

5 RISULTATI

Questo capitolo presenta i risultati ottenuti dai modelli scelti: InVEST, con i modelli Urban Flood Risk Mitigation (UFRM), Sediment Delivery Ratio (SDR) e Urban Stormwater Retention (USR), e il software HEC-HMS. In particolare, vengono descritti in modo dettagliato i risultati ottenuti, analizzandoli su due scale differenti, la scala provinciale-intercomunale e la scala di bacino, seguendo l'approccio adottato nel capitolo 4 *Materiali e metodi*.

5.1 Pianificazione area vasta – scala provinciale-intercomunale

Come detto nel paragrafo 4.1 per la scala provinciale-intercomunale si sono presi in considerazione i bacini primari dell'Emilia-Romagna più colpiti dalle alluvioni di maggio 2023, che comprendono:

- Bacino Reno
- Bacino Lamone
- Bacino Fossatone
- Bacino Rubicone
- Bacino Candiano
- Bacino Bevano
- Bacino Fiumi Uniti

5.1.1 Modello InVEST

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti con i modelli precedentemente elencati nel paragrafo 4.2.

5.1.1.1 Modello UFRM

Il modello UFRM consente di valutare la risposta di un territorio in termini di generazione del deflusso superficiale rispetto alle caratteristiche di uso del suolo. Nell'analisi UFRM per i bacini primari indagati è stata scelta un'altezza di pioggia pari a 200 mm, al fine di valutare la capacità di ritenzione del deflusso superficiale e la generazione di volumi di piena alla scala di bacino. Come prima analisi è stato preso in considerazione lo scenario con l'uso del suolo del 2018 aggiornato al 2020 (scenario PRE), successivamente è stata realizzata l'analisi nell'ipotesi post attuazione dei piani (scenario POST).

I risultati relativi allo scenario PRE evidenziano una marcata eterogeneità spaziale e funzionale tra i bacini analizzati (Figura 5.1, Figura 5.2).

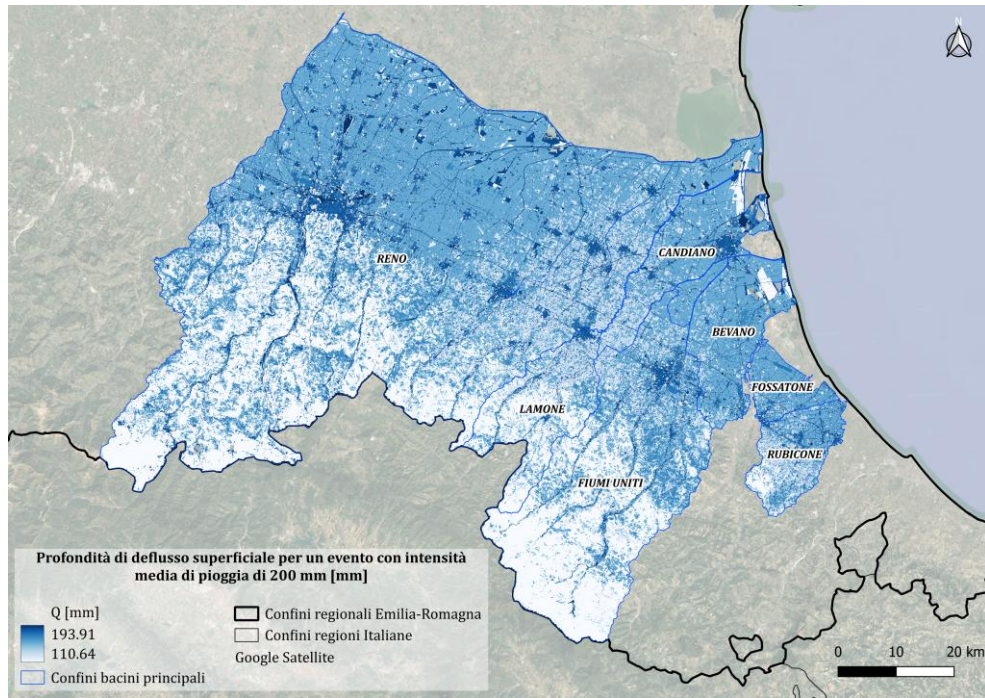


Figura 5.1: Deflusso superficiale Q [mm] – Modello UFRM - Scenario PRE

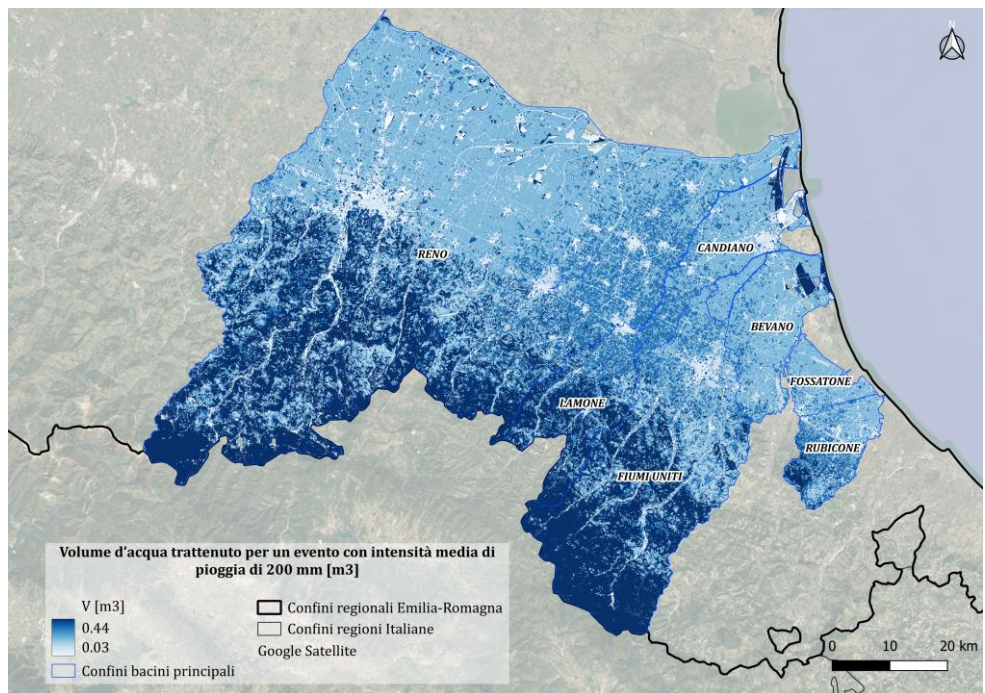


Figura 5.2: Ritenzione [m³/unità di superficie] – Modello UFRM - Scenario PRE

Le mappe di deflusso superficiale (Figura 5.1) e di ritenzione (Figura 5.2) mettono in evidenza una chiara distribuzione spaziale dei processi di deflusso e ritenzione. In particolare, le aree urbanizzate risultano chiaramente identificabili come aree a concentrazione elevata di deflusso superficiale, mostrando una scarsa capacità di ritenzione anche quando occupano porzioni limitate del bacino. L'analisi mette inoltre in evidenza un marcato gradiente monte-valle, con una maggiore capacità di ritenzione concentrata nelle aree appenniniche e una progressiva riduzione verso le zone di pianura e costiere (colore più chiaro in Figura 5.2). La distribuzione spaziale del deflusso mostra una forte concentrazione lungo il reticolo idrografico principale, suggerendo un effetto cumulativo dei contributi provenienti sia dalle aree a monte sia dalle superfici impermeabili. In dettaglio, andando a isolare valori elevati specifici di deflusso superficiale (maggiori di 160 mm), emerge una chiara corrispondenza tra le aree a maggiore generazione di runoff e la struttura del tessuto urbanizzato (Figura 5.3). Tale risultato non è una semplice conseguenza visiva dell'uso del suolo impermeabilizzato, ma deriva dall'assunzione di una precipitazione uniformemente distribuita sull'intero bacino, che consente di attribuire le differenze nella risposta idrologica esclusivamente alle caratteristiche superficiali del territorio.

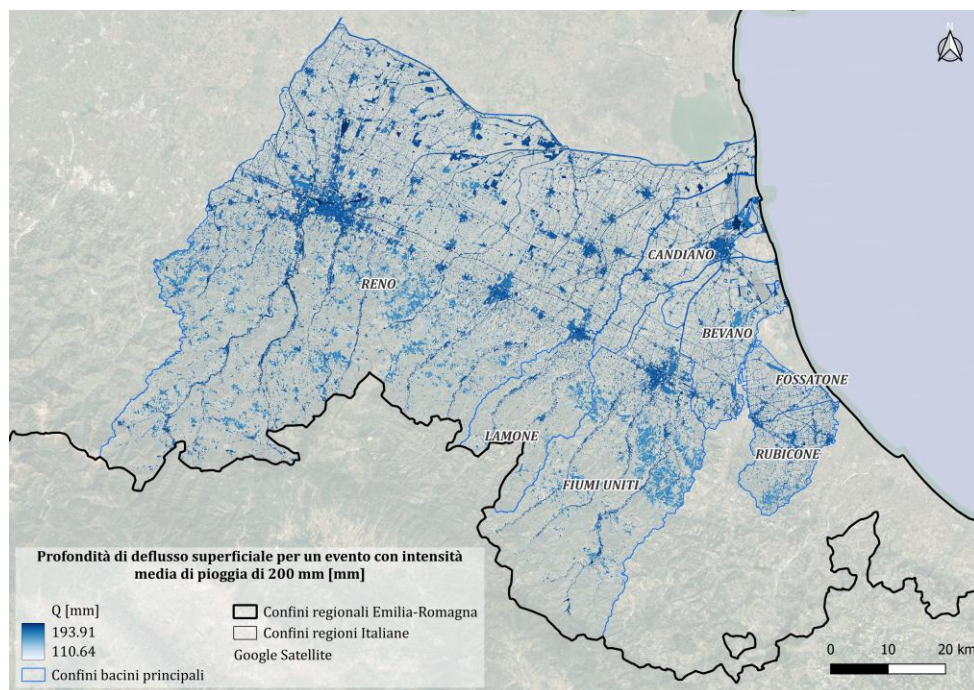


Figura 5.3: Dettaglio del deflusso superficiale Q [mm] – Modello UFRM - Scenario PRE

Questo comportamento evidenzia la capacità del modello di restituire una risposta idrologica coerente con la distribuzione degli usi del suolo, permettendo di individuare

non solo singole aree critiche, ma anche strutture territoriali continue che contribuiscono in modo significativo alla generazione del deflusso superficiale. Il fatto che la struttura urbana risulti chiaramente riconoscibile attraverso i valori del volume Q indica che il deflusso superficiale non è un fenomeno isolato, ma un processo legato alla continuità spaziale delle superfici impermeabilizzate.

Nella simulazione relativa allo scenario post attuazione dei piani, la situazione è molto diversa da quella precedente; la prima cosa che salta all'occhio è che sia la profondità di deflusso (runoff) sia il volume d'acqua trattenuto (retention) sono distribuiti in modo completamente differente rispetto alla simulazione precedente. Nello scenario post, infatti, si osserva una prevalenza di tonalità più chiare sia per il retention (Figura 5.4) che per il runoff (Figura 5.5). I valori di retention presentano gli stessi valori minimi e massimi, poiché lo scenario di piano modifica solo la redistribuzione dei valori all'interno dei bacini. Nella simulazione pre attuazione dei piani, i valori di runoff trattenuto risultano compresi tra 0.03 e 0.44 m³, distribuiti in modo frammentario sul territorio. Con l'attuazione dei piani, il volume di runoff trattenuto aumenta in modo significativo, raggiungendo valori compresi tra circa 0.60 e 8.93 m³; questo incremento risulta particolarmente evidente nei settori vallivi intermedi dei bacini del Reno, del Lamone e dei Fiumi Uniti, caratterizzate da pendenze moderate, da una rete idrografica secondaria ben sviluppata e da un uso del suolo "misto", agricolo e insediativo.

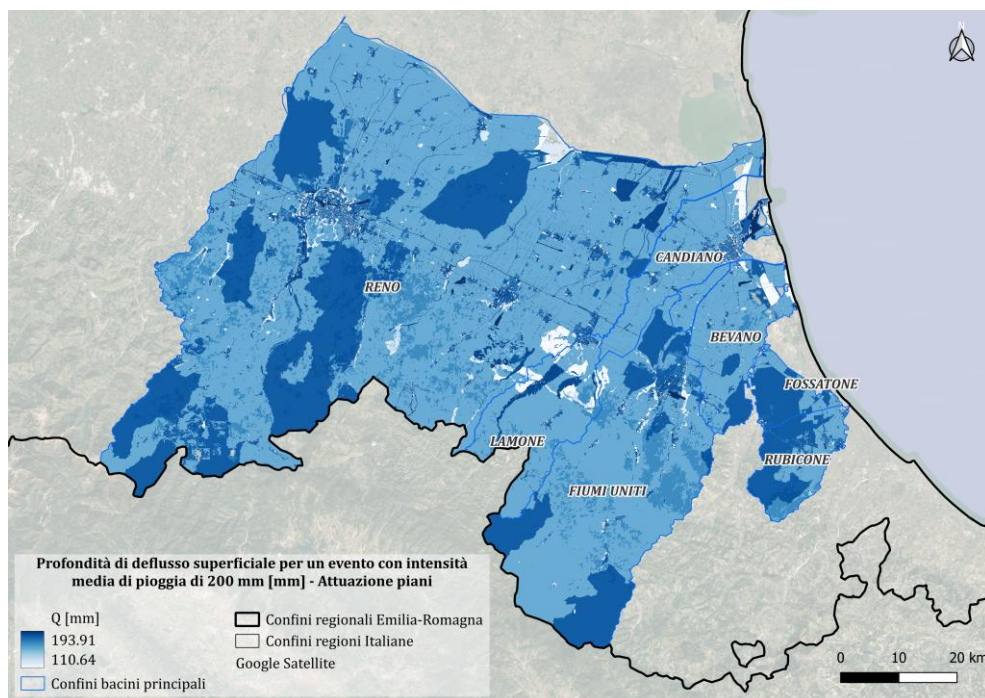


Figura 5.4: Deflusso superficiale Q [mm] – Modello UFRM - Scenario POST

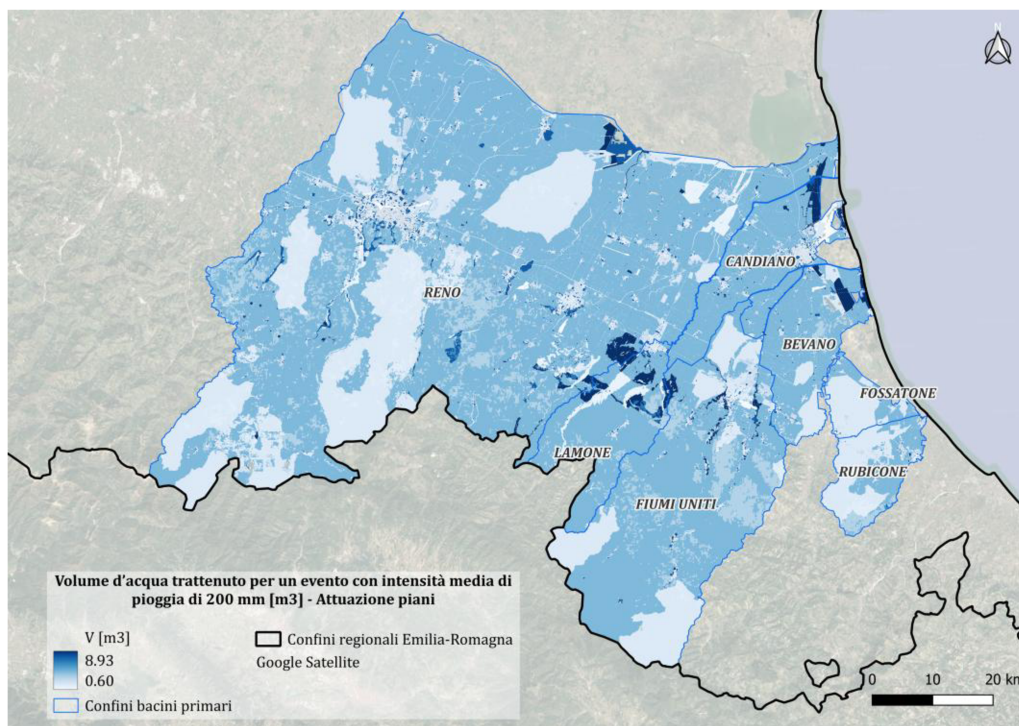


Figura 5.5: Ritenzione [m³/unità di superficie] – Modello UFRM - Scenario POST

Sulla base dei risultati ottenuti dal confronto con lo scenario PRE e POST attuazione dei piani, sono state effettuate delle analisi attraverso il calcolo di indici normalizzati per ciascun bacino primario analizzato (Figura 5.6).

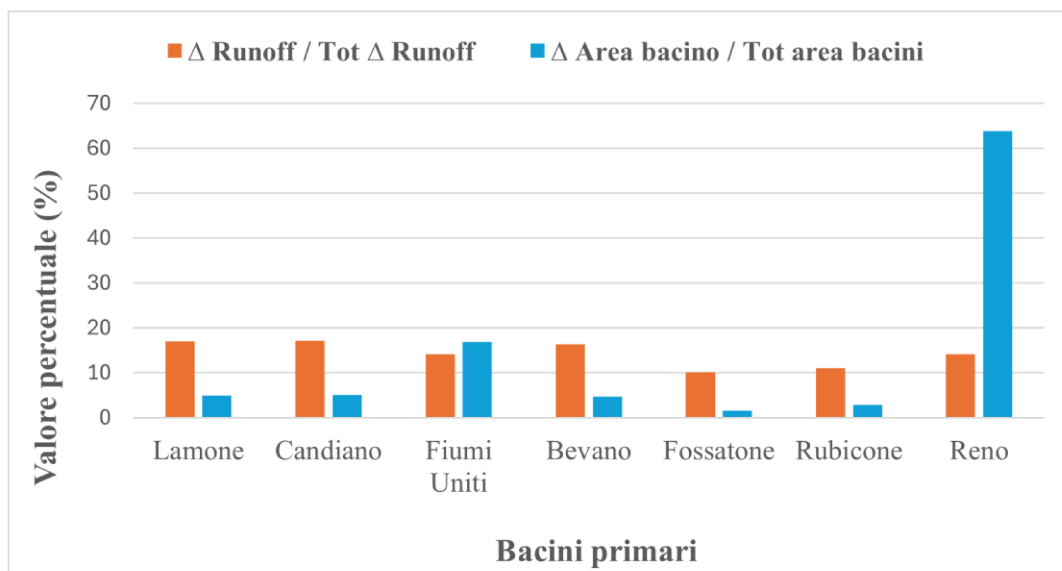


Figura 5.6: Contributo del runoff rispetto all'area del bacino (%).

Per ciascun bacino i , la variazione di runoff (ΔRunoff_i) è stata calcolata come differenza tra il valore ottenuto nello scenario di piano e quello dello scenario di riferimento. La

variazione complessiva di runoff ($\Sigma\Delta\text{Runoff}$) è stata quindi determinata come somma delle variazioni calcolate su tutti i bacini analizzati. Si è quindi calcolato il rapporto tra la variazione di runoff del singolo bacino e la variazione complessiva a scala sovra-bacinale e il rapporto tra la superficie del singolo bacino e la superficie totale considerata, ottenuta come somma delle aree di tutti i bacini analizzati. Entrambi gli indici sono stati espressi in termini percentuali al fine di facilitarne il confronto diretto. Il confronto tra questi indici consente di valutare se il contributo di ciascun bacino alla variazione complessiva del runoff sia proporzionale alla sua estensione territoriale oppure se alcuni bacini mostrino una risposta idrologica amplificata o attenuata rispetto alla propria dimensione. In Figura 5.6 si osserva, per ciascun bacino primario, la quota percentuale di variazione del runoff rispetto alla variazione complessiva calcolata su tutti i bacini ($\Delta\text{Runoff} / \text{Tot } \Delta\text{Runoff}$) con la quota percentuale di superficie del bacino rispetto all'area totale analizzata ($\Delta\text{Area} \text{ bacino} / \text{Tot area bacini}$). L'analisi evidenzia una marcata disomogeneità tra contributo idrologico e dimensione areale dei bacini. In particolare, i bacini del Lamone, Candiano, Bevano, Fossatone e Rubicone mostrano una quota di variazione del runoff nettamente superiore alla rispettiva quota di superficie, indicando un comportamento idrologico più sensibile alle trasformazioni di uso del suolo e una risposta non proporzionale alla dimensione del bacino. Il bacino dei Fiumi Uniti presenta invece un contributo al cambiamento del runoff ($\approx 14\%$) sostanzialmente proporzionale alla propria estensione areale ($\approx 17\%$), suggerendo una risposta più equilibrata del sistema territoriale. Al contrario, il bacino del Reno, pur rappresentando oltre la metà dell'area complessiva analizzata, contribuisce in misura relativamente contenuta alla variazione totale del runoff ($\approx 14\%$). Questo risultato indica che la dimensione del bacino non costituisce di per sé un fattore determinante nella risposta idrologica, evidenziando il ruolo chiave della distribuzione degli usi del suolo, delle caratteristiche geomorfologiche e della connettività idrologica.

Il modello UFRM fornisce inoltre il volume totale di deflusso trattenuto (rmf_rt_m3) e il volume di piena generato ($flood_vol$) a scala di bacino, ma, date le diverse dimensioni dei bacini analizzati, sono stati normalizzati rispetto all'area di ciascun bacino, ottenendo indicatori (*Ritenzione specifica* e *Flood specifico*) espressi in m^3/km^2 . Per ciascun bacino, gli indicatori sono stati calcolati sia per lo scenario di riferimento PRE sia per lo scenario di completa attuazione degli strumenti di pianificazione (POST). La variazione (Δ) è stata calcolata come differenza tra i valori dello scenario post e quelli dello scenario pre. Valori negativi di $\Delta\text{Ritenzione}$ indicano una riduzione della capacità di ritenzione idrica, mentre valori positivi di ΔFlood indicano un incremento dei volumi di piena nello scenario post.

In questo modo è possibile confrontare i risultati ottenuti nella simulazione pre con quella post attuazione dei piani (Tabella 5.1).

Bacino	PRE		POST		Δ Ritenzione (m ³ /km ²)	Δ Flood specifico (m ³ /km ²)	Commento
	Ritenzione specifica (m ³ /km ²)	Flood specifico (m ³ /km ²)	Ritenzione specifica (m ³ /km ²)	Flood specifico (m ³ /km ²)			
Lamone	68.790	130.193	44.402	154.308	-24.388	24.115	Bacino ancora efficiente nonostante il peggioramento: elevata capacità di ritenzione residua e incremento del flood relativamente contenuto.
Fiumi Uniti	66.986	132.427	42.965	152.813	-24.021	20.386	Buona resilienza idrologica su ampia estensione; risposta simile al Lamone, con capacità di mitigazione ancora significativa.
Reno	55.149	143.810	37.428	162.004	-17.721	18.194	Bacino esteso con risposta sensibile allo scenario di piano: buona ritenzione residua ma aumento non trascurabile dei volumi di piena.
Rubicone	52.810	145.932	41.255	155.591	-11.555	9.659	Prestazioni intermedie: riduzione moderata della ritenzione e incremento contenuto del flood; bacino di transizione.
Candiano	46.822	151.415	26.477	171.372	-20.345	19.957	Bacino critico: forte perdita di ritenzione e incremento marcato del flood specifico, elevata vulnerabilità idrologica.
Bevano	45.667	151.763	29.214	168.652	-16.453	16.889	Comportamento critico simile al Candiano, con ridotta capacità di ritenzione e forte risposta al deflusso superficiale.

Bacino	PRE		POST		Δ Ritenzione (m ³ /km ²)	Δ Flood specifico (m ³ /km ²)	Commento
	Ritenzione specifica (m ³ /km ²)	Flood specifico (m ³ /km ²)	Ritenzione specifica (m ³ /km ²)	Flood specifico (m ³ /km ²)			
Fossatone	42.525	155.796	36.682	161.213	-5.843	5.417	Bacino già strutturalmente critico: variazioni contenute ma condizioni di base sfavorevoli; priorità elevata per interventi.

Tabella 5.1: Variazione pre-post della ritenzione idrica specifica e dei volumi di piena specifici nei bacini analizzati. I valori negativi indicano una riduzione della capacità di ritenzione, mentre i valori positivi indicano un incremento del deflusso di piena.

5.1.1.2 Modello SDR

Il modello SDR di InVEST restituisce valori di erosione, deposizione ed esportazione dei sedimenti lungo il reticolo idrografico fino all'uscita del bacino, espressi per unità di superficie (pixel). Poiché i bacini analizzati presentano estensioni significativamente diverse, i valori aggregati di erosione totale, sedimenti esportati e sedimenti depositati sono stati normalizzati rispetto alla superficie del bacino ($t \cdot km^{-2} \cdot anno^{-1}$), al fine di consentire un confronto diretto tra bacini e di esprimere l'intensità dei processi sedimentari indipendentemente dalla dimensione areale. Tale normalizzazione non è prescritta esplicitamente dal modello InVEST-SDR, ma rappresenta una scelta metodologica adottata per garantire la comparabilità dei risultati. In dettaglio, nella Tabella 5.2 vengono riportati i valori normalizzati ottenuti per ciascun bacino nella simulazione con uso del suolo relativo al 2018 (scenario PRE).

Bacino	Area (km ²)	Erosione totale (t/km ² ·anno)	Sedimenti esportati (t/km ² ·anno)	Sedimenti depositati (t/km ² ·anno)	Sedimenti esportati evitati (t/km ² ·anno)	Erosione evitata (t/km ² ·anno)
Lamone	339,8	0,66	0,09	0,36	0,98	6,28
Candiano	348,9	0,22	0,01	0,21	0,21	1,30
Fiumi Uniti	1151,2	0,36	0,05	0,29	0,95	5,52
Bevano	314,5	0,19	0,02	0,17	0,21	0,99

Bacino	Area (km ²)	Erosione totale (t/km ² ·anno)	Sedimenti esportati (t/km ² ·anno)	Sedimenti depositati (t/km ² ·anno)	Sedimenti esportati evitati (t/km ² ·anno)	Erosione evitata (t/km ² ·anno)
Fossatone	110,1	0,21	0,01	0,20	0,19	1,08
Rubicone	199,2	0,36	0,03	0,33	0,39	1,68
Reno	4339,3	0,19	0,02	0,15	0,30	2,09

Tabella 5.2: Valori ottenuti con il modello SDR di InVEST per lo scenario PRE.

Sulla base dei valori presenti in Tabella 5.2 è stato calcolato il Sediment Delivery Ratio medio (*SDR medio*) medio di bacino, definito come il rapporto tra i sedimenti esportati all'uscita del bacino e l'erosione totale. Inoltre, a fini interpretativi, è stato introdotto un rapporto di deposizione (*deposition ratio*), definito come il rapporto tra i sedimenti depositati all'interno del bacino e l'erosione totale. Tale rapporto non rappresenta un indice standardizzato in letteratura, né un complemento diretto dell'*SDR medio* calcolato, ma costituisce una rielaborazione degli output del modello finalizzata a descrivere la capacità di ritenzione interna dei sedimenti simulata dal modello SDR di InVEST. Sia l'*SDR medio* che il *Deposition ratio* sono grandezze adimensionali, in quanto calcolate come rapporti tra variabili espresse nella stessa unità di misura. Nel complesso, l'analisi congiunta di *SDR medio* e *Deposition ratio* evidenzia come i bacini studiati siano caratterizzati da una bassa efficienza di trasferimento dei sedimenti e da una prevalenza dei processi di deposizione; con questo approccio è possibile distinguere in modo efficace i bacini più predisposti al trasporto dei sedimenti e quelli invece in cui prevale la funzione di ritenzione. I commenti inseriti in Tabella 5.3 sintetizzano il comportamento sedimentario dei bacini sulla base degli indici calcolati.

Bacino	Area (km ²)	SDR medio (-)	Deposition ratio (-)	Commento
Lamone	339,8	0,14	0,54	Produzione di sedimenti elevata, con trasferimento verso valle relativamente efficiente e ritenzione interna rilevante.
Candiano	348,9	0,05	0,94	Esportazione dei sedimenti limitata, con prevalenza dei processi di deposizione interna.
Fiumi Uniti	1151,2	0,14	0,81	Trasferimento dei sedimenti relativamente elevato, associato a una minore incidenza dei processi di ritenzione rispetto agli altri bacini.

Bacino	Area (km ²)	SDR medio (-)	Deposition ratio (-)	Commento
Bevano	314,5	0,11	0,91	Bilancio sedimentario complessivamente equilibrato, con ritenzione interna moderata e trasporto verso valle limitato.
Fossatone	110,1	0,05	0,94	Dinamica sedimentaria dominata dalla deposizione interna e da una ridotta esportazione dei sedimenti.
Rubicone	199,2	0,08	0,92	Produzione di sedimenti moderata, con ritenzione interna prevalente rispetto al trasferimento verso valle.
Reno	4339,3	0,11	0,80	Marcata capacità di ritenzione dei sedimenti, con trasferimento verso valle attenuato dall'estensione del bacino.

Tabella 5.3: Commenti ai valori ottenuti con il modello SDR di InVEST per lo scenario PRE.

Effettuando la simulazione relativa allo scenario post attuazione dei piani si ottengono valori assoluti di erosione potenziale e di sedimento esportato apparentemente elevati (Tabella 5.4); questi forniscono un'indicazione del comportamento sedimentario, ma non una stima puntuale della produzione di sedimenti, permettendo di confrontare la risposta del territorio a differenti configurazioni di uso del suolo.

Bacino	Area (km ²)	Erosione totale (t/km ² ·anno)	Sedimenti esportati (t/km ² ·anno)	Sedimenti depositati (t/km ² ·anno)	Sedimenti esportati evitati (t/km ² ·anno)	Erosione evitata (t/km ² ·anno)
Lamone	339,8	1169,45	160,25	971,47	1642,96	5407,23
Candiano	348,9	34,27	0,68	16,84	19,72	148,03
Fiumi Uniti	1151,2	1431,88	220,97	1197,66	2112,44	6041,52
Bevano	314,5	80,87	5,16	99,16	120,58	346,93
Fossatone	110,1	51,43	1,39	53,30	59,66	241,84
Rubicone	199,2	659,06	77,44	558,49	915,32	3063,08
Reno	4339,3	606,87	79,37	519,12	857,84	2669,53

Tabella 5.4: Valori ottenuti con il modello SDR di InVEST per lo scenario POST.

Lo scenario post attuazione dei piani (scenario POST) non aumenta l'esportazione sedimentaria, ma favorisce una maggiore ritenzione e deposizione interna, con effetti differenziati in funzione delle caratteristiche dei bacini. La tabella relativa allo scenario pre attuazione rappresenta la configurazione sedimentaria di riferimento, mentre i commenti allo scenario POST (Tabella 5.5) sono stati formulati in chiave comparativa al fine di evidenziare le differenze.

Bacino	Area (km ²)	SDR medio	Deposition ratio	Commento
Lamone	339,8	0,14	0,83	Maggiore ritenzione interna rispetto allo scenario PRE.
Candiano	348,9	0,02	0,49	Esportazione dei sedimenti limitata, con rafforzamento dei processi deposizionali rispetto allo scenario PRE.
Fiumi Uniti	1151,2	0,15	0,84	Trasferimento dei sedimenti elevato, ma riduzione dell'efficienza di esportazione rispetto allo scenario PRE.
Bevano	314,5	0,06	1,23	Bilancio sedimentario equilibrato, con incremento della ritenzione interna rispetto allo scenario PRE.
Fossatone	110,1	0,03	1,04	Deposizione interna accentuata rispetto allo scenario PRE.
Rubicone	199,2	0,12	0,85	Ritenzione interna più marcata rispetto allo scenario PRE.
Reno	4339,3	0,13	0,86	Capacità di ritenzione sedimentaria elevata, con trasferimento verso valle ulteriormente attenuato rispetto allo scenario PRE.

Tabella 5.5: Commenti ai valori ottenuti con il modello SDR di InVEST per lo scenario POST.

In seguito, sono stati definiti due indici normalizzati al fine di valutare il contributo relativo dei singoli bacini al cambiamento sedimentario tra lo scenario di riferimento (pre) e quello di attuazione dei piani (post). Il primo indice è stato calcolato come il rapporto tra la variazione di sedimento esportato di ciascun bacino e la variazione complessiva di sedimento esportato considerando tutti i bacini. Il secondo indice è stato definito in modo analogo, utilizzando la variazione della perdita di suolo potenziale stimata tramite USLE. Entrambi gli indici sono stati confrontati con la percentuale tra l'area di ciascun bacino rispetto all'area totale, al fine di verificare se il contributo al cambiamento sedimentario risulta proporzionale o meno alla dimensione areale dei bacini. Gli indici mostrano una distribuzione fortemente sbilanciata del contributo al cambiamento sedimentario

complessivo (Figura 5.7). In termini quantitativi, oltre l'85% della variazione totale dell'erosione potenziale e del sedimento esportato è concentrata in soli due bacini, Reno e Fiumi Uniti, mentre i restanti bacini contribuiscono in maniera marginale. Il bacino dei Fiumi Uniti rappresenta il caso più significativo: a fronte di una contributo in area pari a circa il 17%, esso concentra circa il 34% della variazione dell'erosione potenziale e quasi 38% della variazione del sedimento esportato; ciò significa che, nonostante l'estensione limitata, questo bacino incide in modo significativo sul cambiamento sedimentario complessivo stimato dal modello. Il Reno, pur essendo il bacino dominante per estensione (circa 64% dell'area totale), contribuisce alle variazioni complessive in misura inferiore alla propria dimensione, con valori compresi tra 51% e 54%. Questo scostamento indica che le variazioni tra scenari PRE e POST vengono in parte "assorbite" all'interno del bacino, probabilmente a causa della sua grande estensione e della presenza di ampie aree di accumulo. Al contrario, il bacino del Lamone, pur di dimensioni limitate, ha un ruolo attivo nel cambiamento sedimentario complessivo. I bacini di Candiano, Bevano e Fossatone presentano invece valori estremamente ridotti: ciascuno contribuisce a meno dell'1% della variazione complessiva, pur rappresentando complessivamente oltre il 10% dell'area totale. Dal punto di vista quantitativo, ciò indica che le variazioni tra scenari PRE e POST in questi bacini hanno un impatto trascurabile sul bilancio sedimentario complessivo, confermando che le modifiche di scenario producono effetti prevalentemente locali, senza tradursi in un incremento significativo del sedimento esportato.

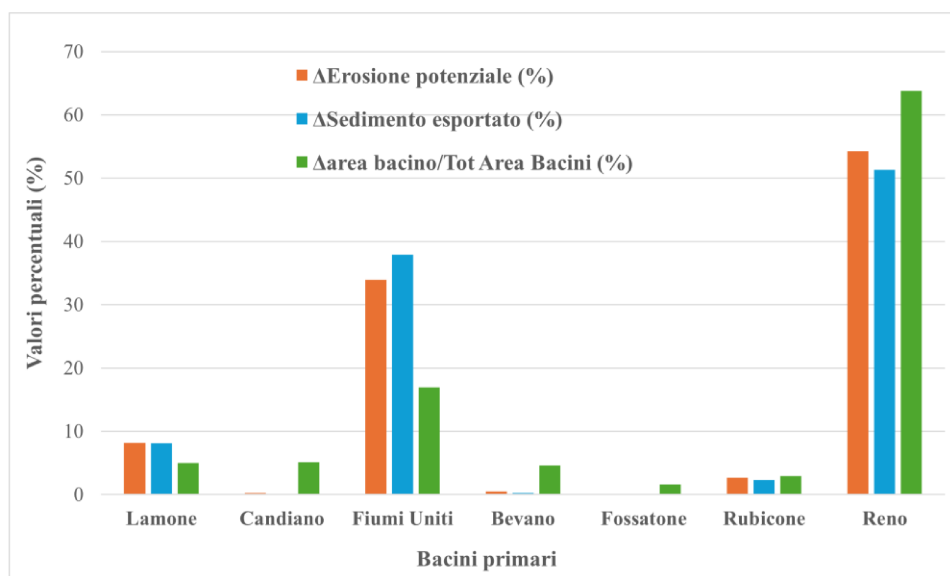


Figura 5.7: Indici calcolati in seguito al modello SDR di InVEST tra lo scenario PRE e POST.

5.1.1.3 Modello USR

Come già esplicitato nel paragrafo 4.2.3, per il modello USR si è presa in considerazione il dato della precipitazione media (mm/anno) riferita all'anno 2023 per la regione Emilia-Romagna (ARPAE Emilia-Romagna, 2024). Come risultati del modello si sono ottenuti i coefficienti i volumi espressi in metri cubi/anno di ritenzione (*retention*) e di deflusso (*runoff*) per i bacini primari indagati (Figura 5.8 e Figura 5.9).

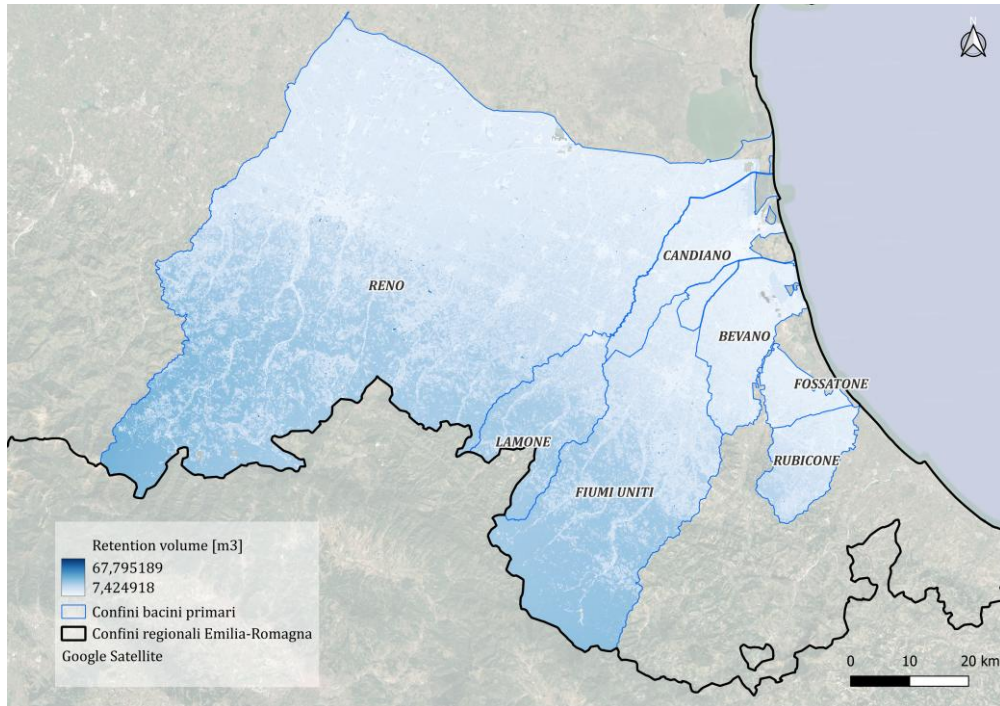


Figura 5.8: Retention volume [m³/unità di superficie] - Modello USR - Scenario PRE

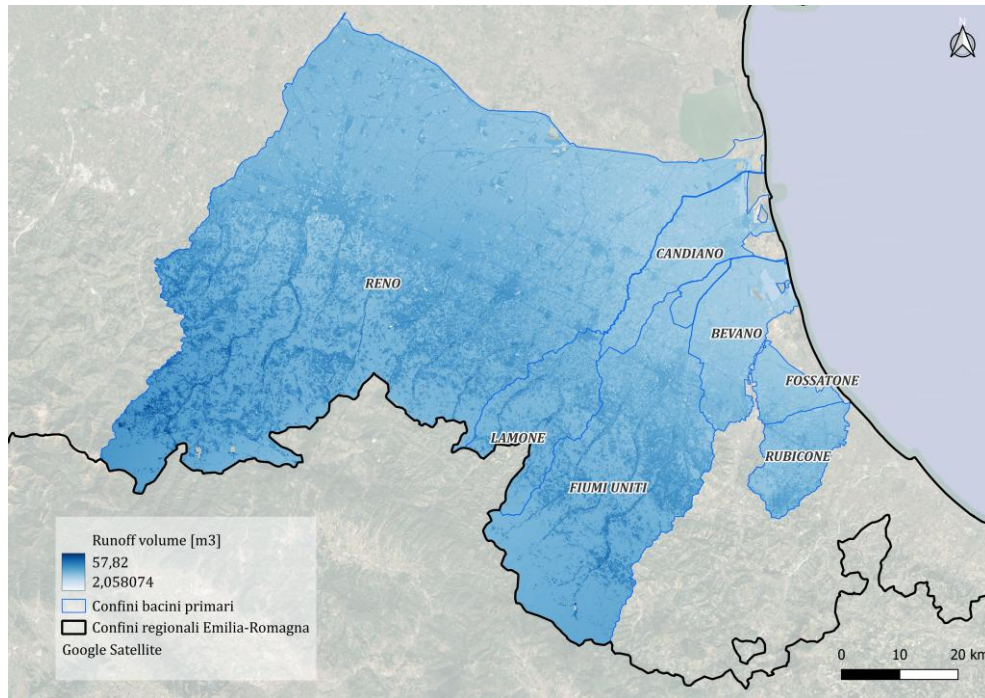


Figura 5.9: Runoff volume [$\text{m}^3/\text{unità di superficie}$] - Modello USR - Scenario PRE

L'analisi dei coefficienti medi di ritenzione e di deflusso (Figura 5.10) evidenzia, per tutti i bacini analizzati, una relazione di complementarità tra i due parametri, con valori che, per ciascun bacino, risultano coerenti e prossimi all'unità se considerati congiuntamente. In particolare, in tutti i casi si osserva una prevalenza del *runoff ratio* rispetto al *retention ratio*, indicando una generale propensione dei bacini a trasformare una quota significativa delle precipitazioni in deflusso superficiale. Tuttavia, emergono differenze rilevanti tra i bacini: Fossatone, Bevano e Candiano presentano i valori più elevati di runoff ratio, suggerendo una minore capacità di ritenzione legata alla configurazione dell'uso del suolo e al grado di impermeabilizzazione. Al contrario, Lamone e Fiumi Uniti mostrano coefficienti di ritenzione relativamente più elevati, evidenziando una maggiore efficienza del territorio nella regolazione idrologica. Ovviamente, per capire l'effettiva incidenza del deflusso sul territorio, è necessario valutare anche i volumi annui di runoff (Figura 5.11).

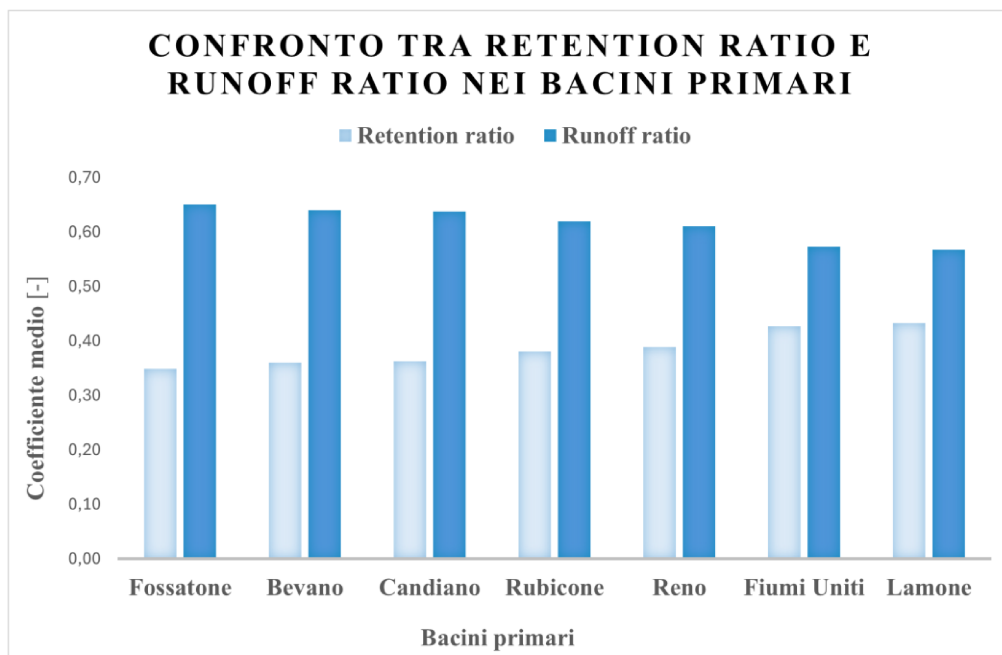


Figura 5.10: Confronto tra i coefficienti medi di retention e runoff nei bacini analizzati - Modello USR - Scenario PRE

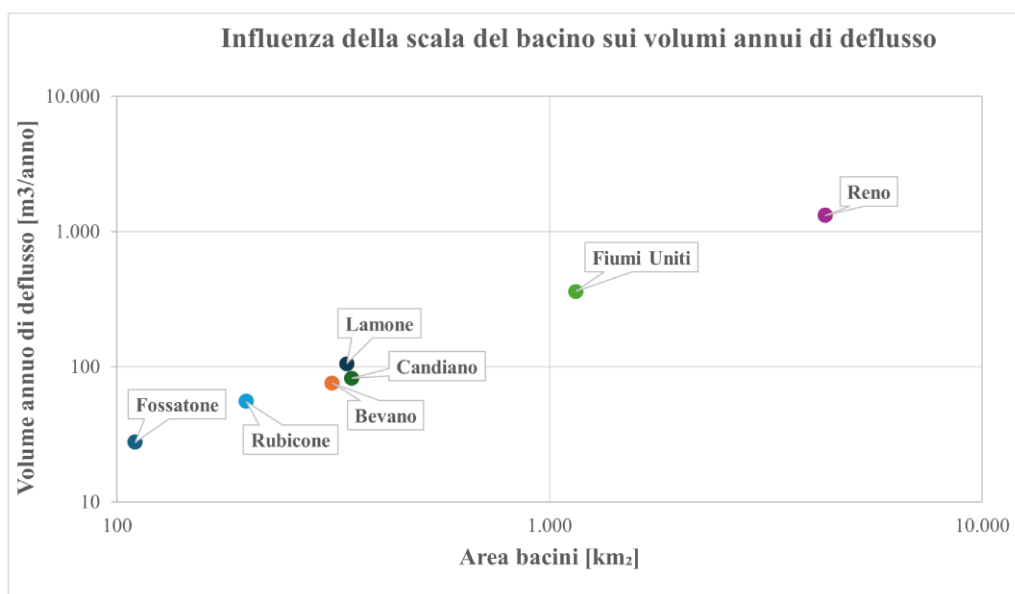


Figura 5.11: Influenza della scala del bacino sui volumi annui di deflusso. (Gli assi sono rappresentati in scala logaritmica).

La Figura 5.11 mostra la relazione tra l'estensione dei bacini idrografici e i volumi annui totali di deflusso superficiale, rappresentati in scala logaritmica per entrambi gli assi. I risultati evidenziano una chiara dipendenza dei volumi di deflusso dalla dimensione del bacino, con differenze di ordine di grandezza tra i sistemi analizzati. In particolare, il bacino del Reno presenta valori nettamente superiori rispetto agli altri, confermando

come l'estensione territoriale costituisca un fattore determinante nell'amplificazione dei volumi di deflusso, anche in presenza di coefficienti medi di runoff non estremi. I bacini di dimensioni intermedie, come Fiumi Uniti e Lamone, mostrano volumi coerenti con la loro scala, mentre i bacini più piccoli (Rubicone, Candiano, Fossatone) si collocano nelle classi inferiori di deflusso annuo. Nel complesso, la distribuzione dei punti suggerisce che la scala del bacino esercita un ruolo dominante nel controllo dei volumi di deflusso superficiale, evidenziando la necessità di affiancare all'analisi dei coefficienti medi una valutazione quantitativa dei volumi. In Tabella 5.6 sono rappresentati i valori ottenuti dal modello USR nei bacini primari analizzati, in cui si è inserita una colonna di commento interpretativo che sintetizza la lettura dei risultati in termini di comportamento idrologico e impatto territoriale.

Bacino	Area (km ²)	Retention ratio	Runoff ratio	Retention volume (m ³ /anno)	Runoff volume (m ³ /anno)	Commento
Fossatone	110,1	0,3491	0,6509	14,8 × 10 ⁶	27,7 × 10 ⁶	Marcata prevalenza del deflusso; bacino piccolo con bassa capacità di ritenzione e risposta idrologica rapida.
Bevano	314,5	0,3602	0,6398	42,6 × 10 ⁶	75,7 × 10 ⁶	Elevata propensione al deflusso; configurazione territoriale poco efficiente nella regolazione idrologica.
Candiano	348,9	0,3624	0,6376	47,1 × 10 ⁶	82,3 × 10 ⁶	Comportamento simile al Bevano, con prevalenza del runoff e volumi significativi per la scala del bacino.
Rubicone	199,2	0,3804	0,6196	34,4 × 10 ⁶	55,4 × 10 ⁶	Prevalenza del deflusso meno accentuata; capacità di ritenzione intermedia rispetto agli altri bacini costieri.
Reno	4339,3	0,3891	0,6109	860,9 × 10 ⁶	1,31 × 10 ⁹	Coefficiente medio ma volumi estremamente elevati; la scala del bacino domina l'impatto idrologico.
Fiumi Uniti	1151,2	0,4267	0,5733	274,9 × 10 ⁶	361,3 × 10 ⁶	Prevalenza del deflusso più contenuta; buona capacità di regolazione idrologica a scala di bacino.
Lamone	339,8	0,4328	0,5672	81,4 × 10 ⁶	105,6 × 10 ⁶	Bacino più equilibrato; maggiore efficienza di ritenzione pur in presenza di prevalenza del runoff.

Tabella 5.6: Valori ottenuti dal modello USR di InVEST - Scenario PRE

Come per gli altri modelli di InVEST, anche per il modello SDR è stata effettuata una simulazione con scenario post attuazione dei piani. In Figura 5.12 è riportata la mappa dei volumi di ritenzione (*retention volume*) e, confrontandola con quella ottenuta nello scenario pre attuazione dei piani, si osserva una riduzione generalizzata della capacità del territorio di trattenere l'acqua piovana; tale diminuzione è accompagnata da una maggiore

omogeneizzazione spaziale dei valori. Come conseguenza diretta di questa riduzione della ritenzione, si osserva un incremento dei volumi di deflusso (*runoff volume*) in Figura 5.13. Poiché le condizioni climatiche sono mantenute costanti nel modello, l'aumento del deflusso superficiale non è attribuibile a variazioni di precipitazione, ma è principalmente riconducibile all'incremento delle superfici impermeabili, che limita l'infiltrazione e favorisce il rapido convogliamento dell'acqua verso la rete idrografica. L'effetto risulta particolarmente marcato nei bacini di maggiore estensione.

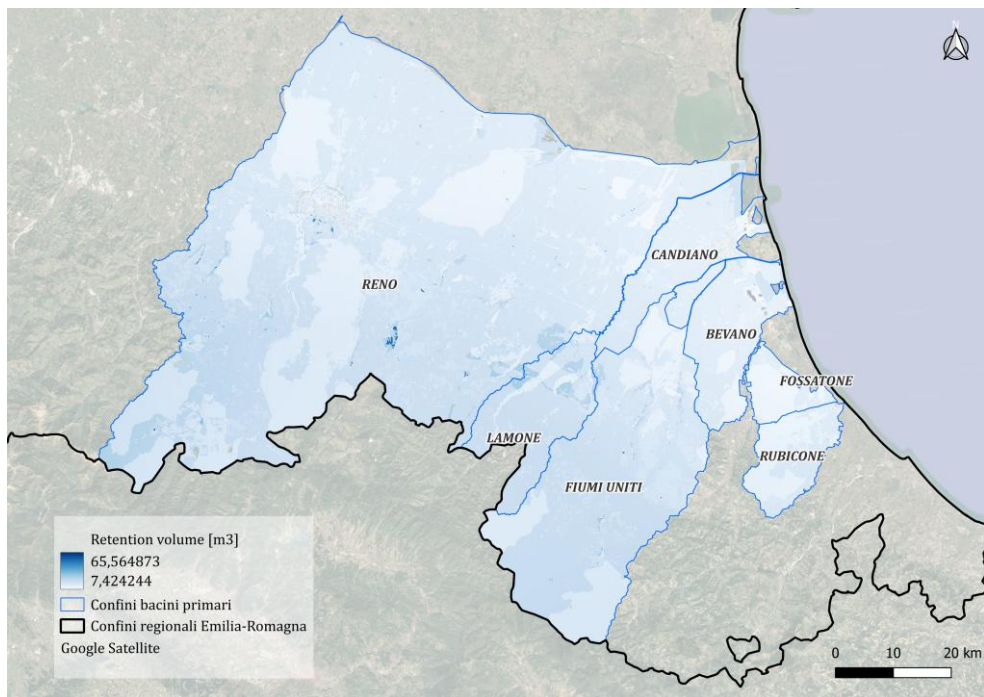


Figura 5.12: Retention volume [m³/unità di superficie] - Modello USR di InVEST - ScENARIO POST

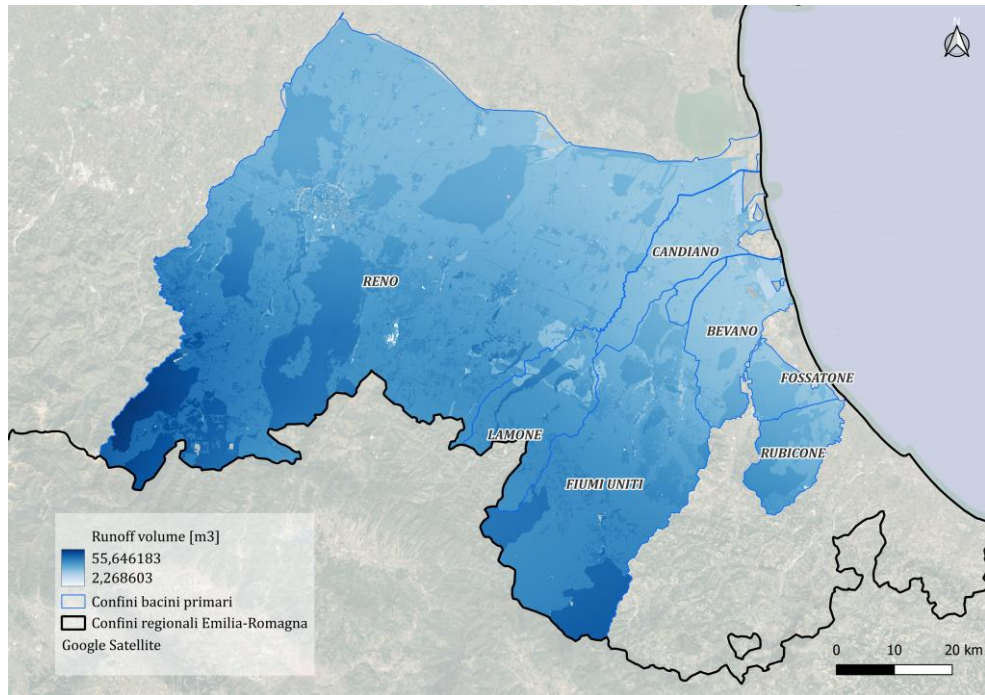


Figura 5.13: Runoff volume [m^3 /unità di superficie] - Modello USR di InVEST - Scenario POST

Il grafico in Figura 5.14 mostra che in questo scenario in tutti i bacini primari il *runoff ratio* è sistematicamente superiore al *retention ratio*, indicando una prevalenza del deflusso superficiale rispetto alla capacità di trattenere l'acqua piovana. I bacini più estesi e urbanizzati (Reno e Fiumi Uniti) presentano i valori più elevati di runoff ratio e, contestualmente, i valori più bassi di retention ratio, evidenziando una maggiore vulnerabilità agli effetti dell'impermeabilizzazione. I bacini minori (Fossatone, Bevano, Rubicone) mostrano rapporti più equilibrati.

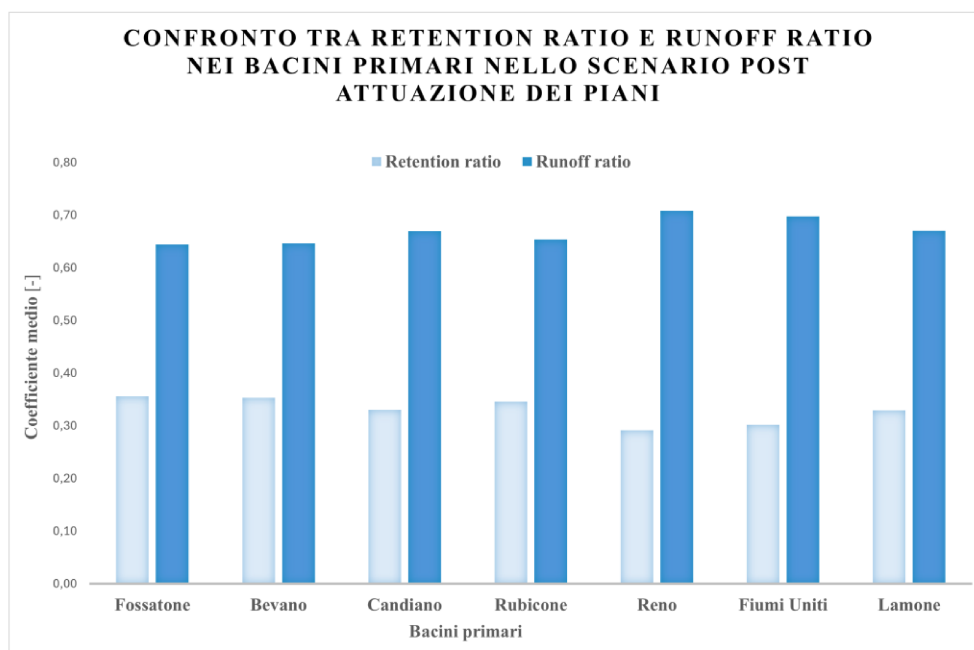


Figura 5.14: Confronto tra i coefficienti medi di retention e runoff nei bacini analizzati - Modello USR - Scenario POST

Confrontando ora lo scenario pre e post attuazione dei piani, ci si è focalizzati sul confronto dei coefficienti (ratio) di retention e runoff, evitando il confronto diretto dei volumi assoluti, che non risultano confrontabili a fronte di variazioni significative dell'uso del suolo. Il grafico relativo al retention ratio (Figura 5.15) evidenzia una riduzione complessiva della capacità di ritenzione idrologica nello scenario POST rispetto allo scenario PRE, con differenze marcate tra i bacini analizzati. Le diminuzioni più significative si osservano nei bacini del Reno, dei Fiumi Uniti e del Lamone, dove l'attuazione delle previsioni di piano comporta un aumento diffuso delle superfici impermeabili, soprattutto nelle aree di pianura, con conseguente riduzione dell'infiltrazione. Nei bacini di Candiano e Rubicone la riduzione del *retention ratio* risulta più contenuta. Un comportamento diverso si osserva invece nel bacino del Fossatone, che rappresenta l'unico caso in cui il *retention ratio medio* aumenta di circa +0,6% nello scenario POST; questo risultato non implica una riduzione dell'impermeabilizzazione complessiva, ma suggerisce piuttosto una diversa configurazione spaziale delle trasformazioni, con nuove superfici artificiali concentrate in aree già urbanizzate.

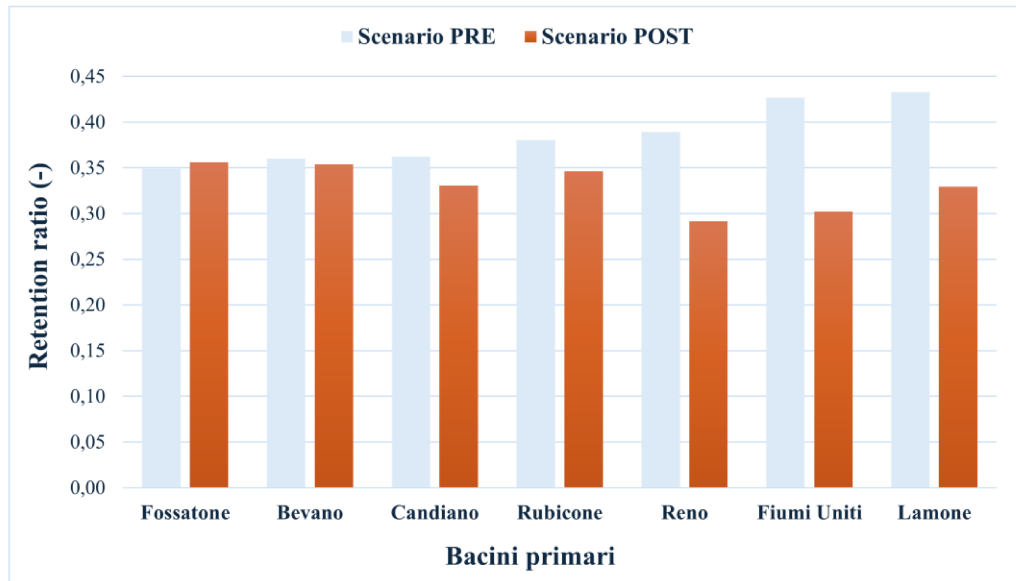


Figura 5.15: Confronto del coefficiente di retention tra scenario PRE e POST.

Il grafico del *runoff ratio* (Figura 5.16) mostra un andamento coerente e speculare rispetto a quello del *retention ratio*, con un incremento generalizzato nello scenario POST. I bacini del Reno, dei Fiumi Uniti e del Lamone registrano gli aumenti più marcati, con valori che si avvicinano e superano 0,65–0,70%, indicando che una quota crescente delle precipitazioni viene trasformata in deflusso superficiale. Nei bacini di Candiano e Rubicone l'aumento è più moderato, mentre il Bevano conferma una variazione limitata anche in termini di runoff.

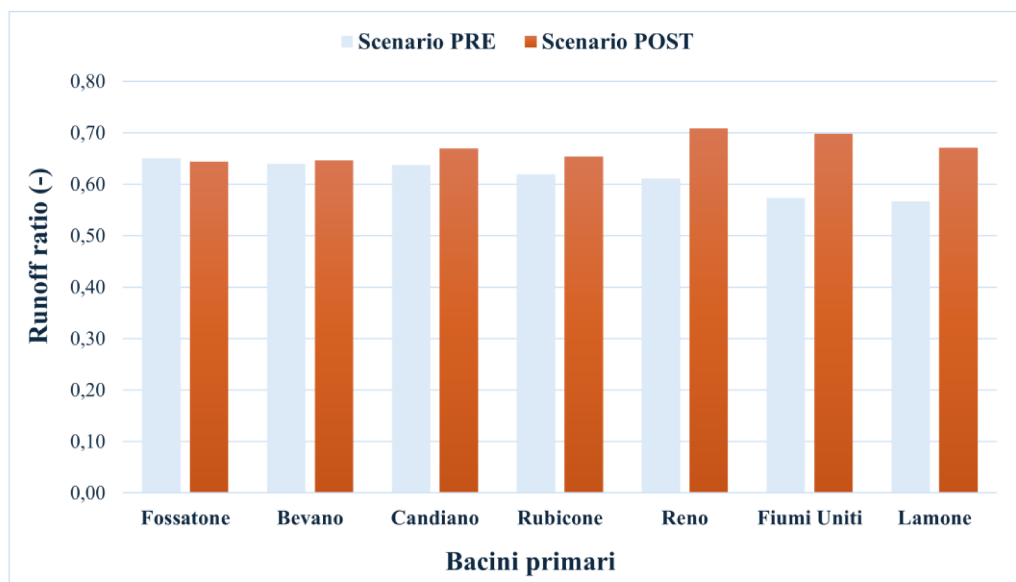


Figura 5.16: Confronto del coefficiente di runoff tra scenario PRE e POST.

Nel complesso, il confronto tra gli scenari PRE e POST evidenzia una riduzione della capacità del territorio di trattenere le precipitazioni, accompagnata da un aumento della quota di pioggia che si trasforma in deflusso superficiale. Le variazioni dei coefficienti medi di bacino indicano una perdita di ritenzione compresa tra circa l'1% e oltre il 12%, valori numericamente contenuti ma significativi dal punto di vista idrologico. I risultati mostrano che l'impatto delle previsioni di piano non è uniforme tra i bacini, ma dipende dalla dimensione del bacino, dalla continuità delle superfici impermeabili e dalla struttura del mosaico di uso del suolo, evidenziando come scelte di pianificazione più mirate possano limitare localmente gli effetti dell'impermeabilizzazione.

5.2 Pianificazione a scala di bacino – scala intercomunale

Come specificato nel paragrafo 4.1, per la scala intercomunale si è analizzato il bacino del Lamone e i comuni ricadenti all'interno della sua estensione.

5.2.1 Modello InVEST

5.2.1.1 Modello UFRM

I risultati del modello Urban Flood Risk Mitigation (UFRM) sono stati analizzati a scala comunale al fine di valutare le variazioni della propensione al ruscellamento superficiale e del volume complessivo di deflusso in relazione alle trasformazioni considerate. L'analisi è stata condotta, come già detto nel paragrafo 4.2.1, distinguendo tra comuni prioritari, caratterizzati da una quota significativa della superficie comunale ricadente all'interno del bacino del Lamone (> 15%), e comuni marginali, per i quali l'intersezione con il bacino risulta limitata. In una prima fase, i risultati sono stati esaminati attraverso il confronto tra le condizioni PRE e POT in termini di valori medi della profondità del deflusso superficiale Q (mm) (Figura 5.17) e il *runoff* - volume d'acqua trattenuto V (m³/unità di superficie) (Figura 5.18).

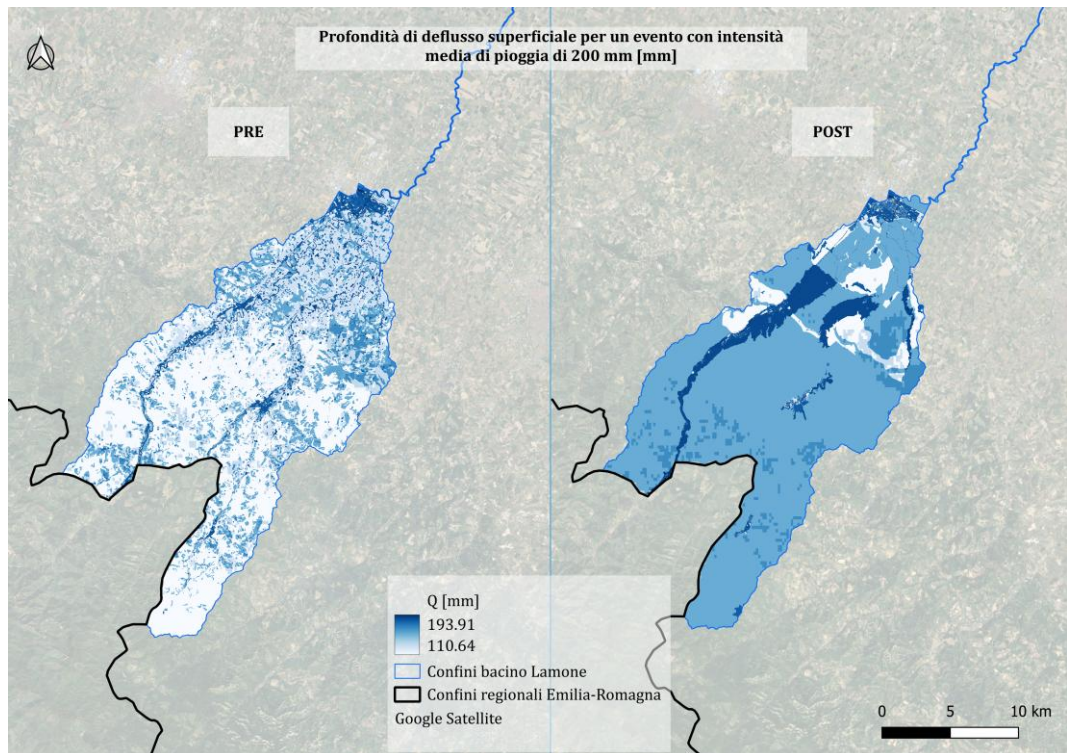


Figura 5.17: Deflusso superficiale Q [mm] – Bacino Lamone - Modello UFRM - Scenari PRE-POST

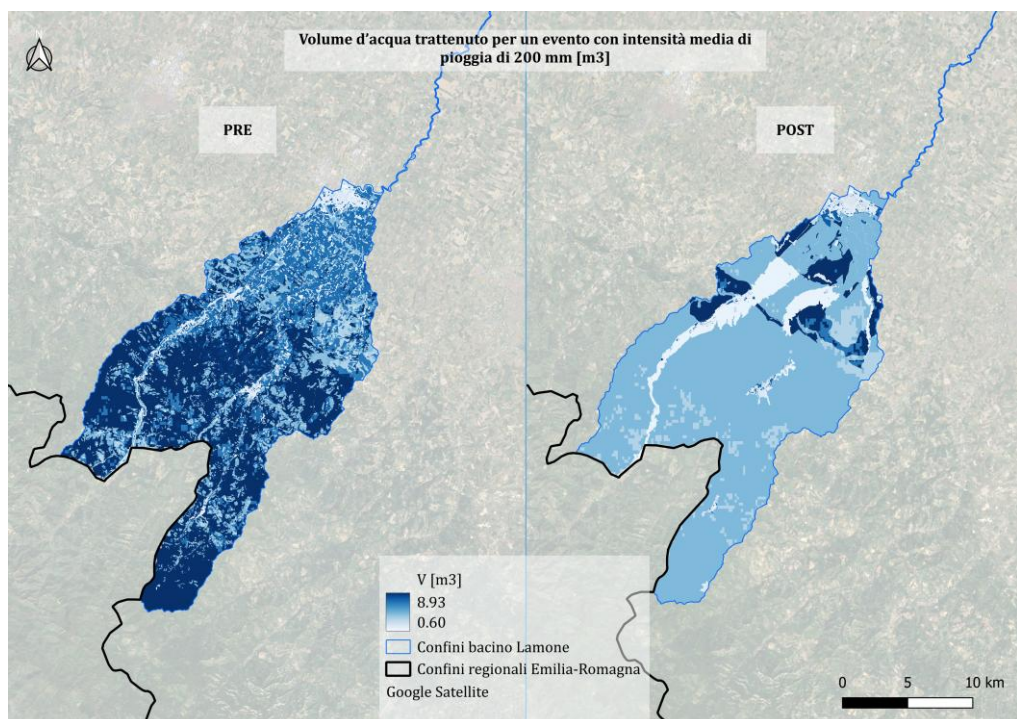


Figura 5.18: Ritenzione [m³/unità di superficie] – Bacino Lamone - Modello UFRM - Scenari PRE-POST

I risultati in output del modello UFRM rappresentati in Figura 5.17 e Figura 5.18, originariamente restituiti in forma raster, sono stati aggregati a scala comunale mediante

l'applicazione di statistiche zonali in ambiente GIS. In particolare, per ciascun comune sono stati estratti i valori medi di Q (mm) e i valori complessivi di *runoff* (m^3), consentendo una lettura coerente dei risultati rispetto alle unità amministrative di riferimento; questo approccio ha permesso di confrontare territori di diversa estensione. In generale, nei comuni prioritari l'analisi pre-post mostra un comportamento coerente caratterizzato da un incremento della profondità di deflusso superficiale Q , con variazioni comprese tra +1% e +28%, a fronte di una riduzione del volume totale di deflusso superficiale (Δ Runoff), che varia tra -3% e -44%. Questo risultato suggerisce una maggiore tendenza al ruscellamento superficiale, a fronte di una riduzione del volume complessivo di deflusso. Nei comuni marginali, invece, le variazioni risultano più estreme e maggiormente influenzate dalla ridotta estensione dell'area intersecante il bacino, confermando la necessità di una lettura prevalentemente descrittiva di tali risultati. La Figura 5.19 mostra il confronto tra la quota di area comunale inclusa nel bacino e il contributo alla variazione complessiva di *runoff* evidenzia differenze significative tra comuni prioritari e marginali.

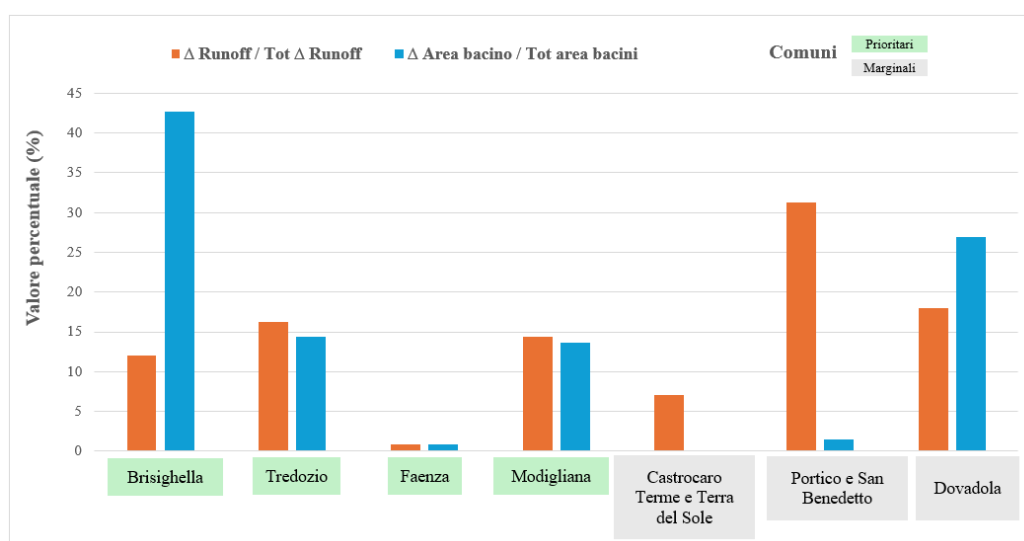


Figura 5.19: Confronto tra variazione di runoff nei due scenari rispetto all'estensione comunale (%)

Nei comuni prioritari, quali Brisighella ($\approx 43\%$ dell'area e $\approx 12\%$ del Δ Runoff), Tredozio ($\approx 15\%$ e $\approx 16\%$) e Modigliana ($\approx 14\%$ e $\approx 15\%$), il contributo alla variazione di deflusso risulta coerente o inferiore rispetto alla rispettiva estensione territoriale. Al contrario, nei comuni marginali si osservano contributi sproporzionati rispetto all'area inclusa nel bacino, come nel caso di Castrocaro Terme e Terra del Sole ($\approx 7\%$ del Δ Runoff a fronte di una quota di area trascurabile) e soprattutto di Portico e San Benedetto, che concentra

oltre il 30% della variazione totale pur rappresentando circa l'1–2% dell'area considerata. Questi risultati confermano la presenza di effetti di bordo legati alla ridotta estensione delle aree considerate.

La Figura 5.20, invece, mostra i valori medi del deflusso superficiale (Q) nei comuni analizzati nelle condizioni pre e post.

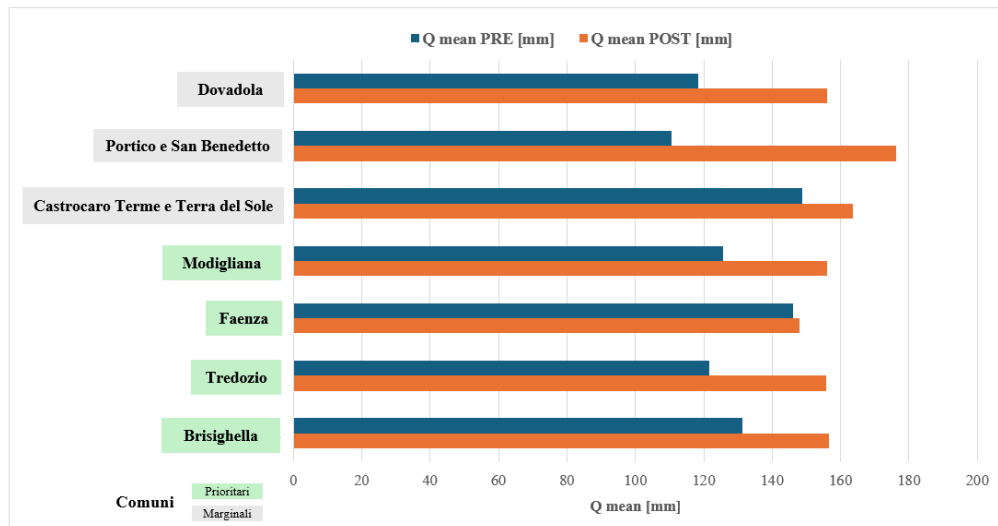


Figura 5.20: Confronto tra i valori di deflusso superficiale negli scenari PRE e POST.

Nei comuni prioritari si osserva un incremento generalizzato di Q , con aumenti compresi tra circa +2 mm nel caso di Faenza e oltre +30 mm nei comuni di Tredozio e Modigliana. In particolare, nella condizione post i valori di Q risultano più simili tra loro (circa 150–156 mm), mentre nella condizione pre erano più variabili. Nei comuni marginali gli incrementi risultano più disomogenei, con valori di Q che raggiungono circa 176 mm nel caso di Portico e San Benedetto, riflettendo di nuovo la dipendenza dagli effetti di bordo dovuti alla piccola estensione superficiale.

5.2.1.2 Modello SDR

Il modello SDR di InVEST restituisce valori di erosione, deposizione ed esportazione dei sedimenti lungo il reticolo idrografico fino all'uscita del bacino. Al fine di valutare l'intensità relativa delle variazioni dei processi idro-sedimentari dovute al cambiamento di scenario (da PRE a POST), i risultati sono stati ulteriormente rielaborati calcolando, per ciascun comune, il rapporto tra i valori dello scenario POST e quelli dello scenario PRE (POST/PRE). Tale rapporto, adimensionale, consente di confrontare in modo diretto l'entità del cambiamento indipendentemente dai valori assoluti e dalla dimensione territoriale dei singoli comuni, mentre il valore unitario ($R = 1$) rappresenta la condizione

di assenza di variazione tra gli scenari. Seguendo il criterio analogo a quello adottato per il modello UFRM, i comuni sono stati suddivisi in prioritari (colore verde) e marginali (colore grigio).

La Figura 5.21 mostra il rapporto POST/PRE dell'erosione potenziale calcolato per ciascun comune del bacino del Lamone. I risultati evidenziano come alcuni comuni presentino un'intensificazione marcata dei processi erosivi, con rapporti POST/PRE significativamente superiori all'unità. In particolare, Modigliana e Faenza mostrano i valori più elevati, indicando un incremento rilevante dell'erosione potenziale rispetto allo scenario di riferimento. Tali incrementi relativi suggeriscono una maggiore sensibilità di questi territori alle trasformazioni considerate, verosimilmente legata a modifiche dell'uso del suolo e delle condizioni di copertura superficiale. Al contrario, comuni come Brisighella e Tredozio, pur classificati come prioritari in base al contributo assoluto ai processi idro-sedimentari, presentano rapporti prossimi all'unità, indicando variazioni più contenute dell'erosione potenziale in termini relativi. I comuni classificati come marginali (Castrocaro Terme e Terra del Sole, Portico e San Benedetto e Dovadola) mostrano rapporti POST/PRE generalmente compresi tra 1 e 2, evidenziando incrementi relativi limitati o moderati. In questi contesti, le variazioni dell'erosione potenziale risultano meno significative rispetto ai comuni di monte, confermando un ruolo secondario nella dinamica erosiva complessiva del bacino, data la piccola estensione territoriale analizzata.

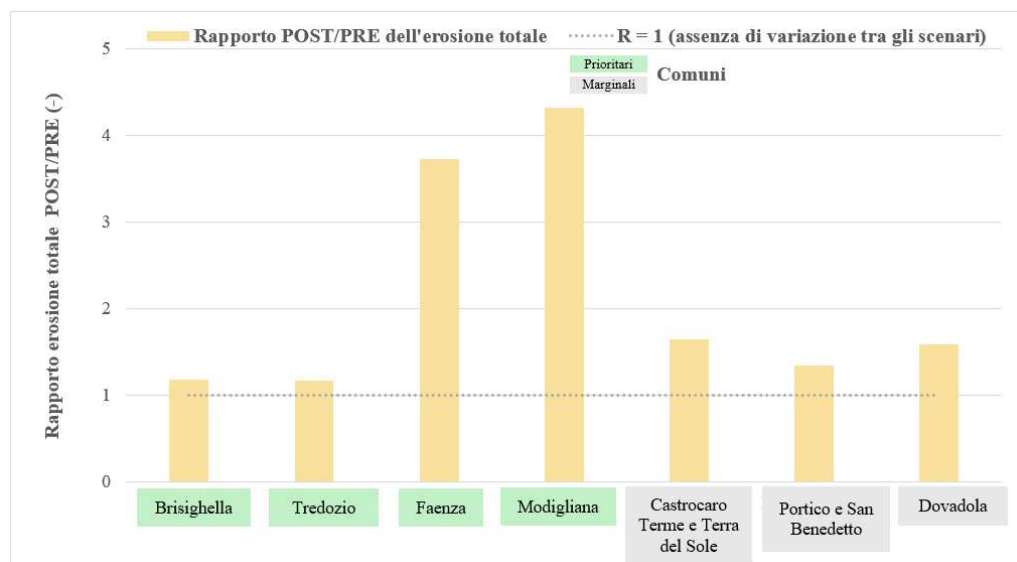


Figura 5.21: Rapporto dell'erosione potenziale tra scenario POST e PRE per ciascun comune del bacino Lamone.

La Figura 5.22 rappresenta i rapporti POST/PRE del sedimento esportato e depositato per ciascun comune del bacino del Lamone; i rapporti, adimensionali, sono sempre rappresentati insieme alla linea di riferimento $R = 1$, che indica l'assenza di variazione tra gli scenari PRE e POST. I risultati mostrano una differenza accentuata tra i comuni. Nei comuni prioritari, si osservano comportamenti contrastanti: Brisighella presenta un rapporto elevato per il sedimento esportato, a fronte di un valore prossimo all'unità per il sedimento depositato, indicando un incremento prevalentemente associato ai processi di trasporto. Modigliana mostra invece rapporti significativamente superiori all'unità per entrambe le componenti, suggerendo un comportamento simultaneo dei processi di erosione, trasporto e deposizione. Faenza evidenzia un rapporto molto elevato per il sedimento depositato e più contenuto per quello esportato, suggerendo un ruolo prevalentemente recettivo all'interno della dinamica di bacino, coerente con la sua collocazione nel settore di valle del bacino. I comuni marginali (Castrocaro Terme e Terra del Sole, Portico e San Benedetto e Dovadola) presentano rapporti prossimi all'unità o moderatamente superiori, indicando variazioni molto contenute dei processi idrosedimentari rispetto allo scenario di riferimento (PRE).

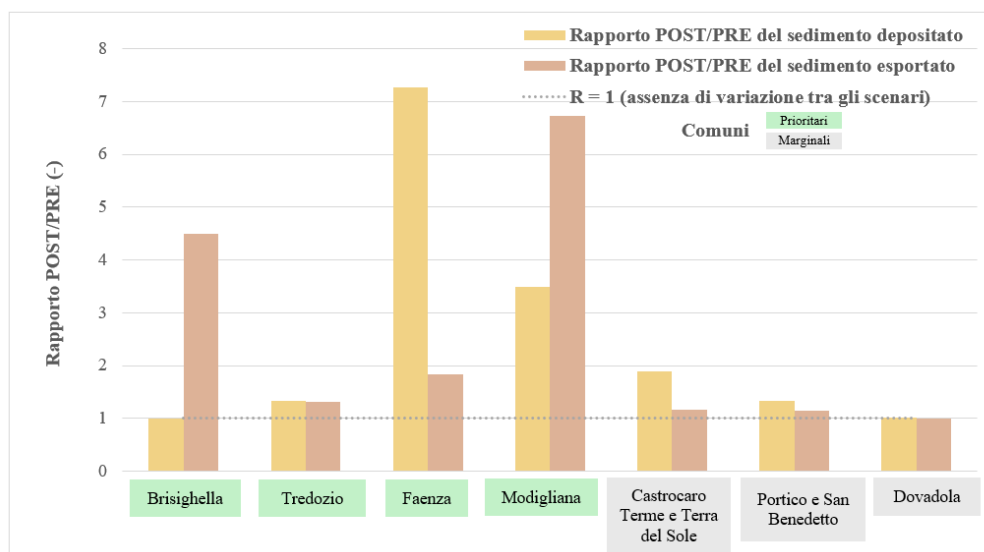


Figura 5.22: Rapporto dei sedimenti esportati e depositati tra scenario POST e PRE per ciascun comune del bacino Lamone.

La Tabella 5.7 riassume il contributo relativo dei comuni appartenenti al bacino del Lamone in termini di variazione percentuale dell'erosione totale, del sedimento esportato e del sedimento depositato negli scenari analizzati. I valori attribuiti a ciascun comune derivano dal confronto tra lo scenario POST e lo scenario PRE ($\Delta = POST - PRE$).

Successivamente, per ciascun indicatore, le variazioni comunali sono state normalizzate rispetto alla variazione complessiva del bacino, calcolando il rapporto (Δ valore del comune / Δ valore totale del bacino) $\times 100$. Brisighella si configura come principale area sorgente di sedimenti, contribuendo per circa il 19% all'incremento complessivo dell'erosione potenziale e per oltre il 74% all'aumento del sedimento esportato a scala di bacino, a fronte di una superficie territoriale relativamente contenuta. I comuni marginali, tra cui Castrocaro Terme e Terra del Sole, Portico e San Benedetto e Dovadola, presentano invece contributi ridotti alle variazioni complessive degli indicatori analizzati.

COMUNE	Area [km ²]	Δ Erosione totale (%)	Δ Sedimento esportato (%)	Δ Sedimento depositato(%)
Brisighella	143,72	18,91	74,52	14,64
Tredozio	48,19	11,11	4,94	29,62
Faenza	45,75	6,82	0,38	13,90
Modigliana	90,55	22,33	4,07	29,70
Castrocaro Terme e Terra del Sole	2,83	0,04	0,00	0,01
Portico e San Benedetto	0,38	2,46	0,11	1,09
Dovadola	4,78	38,33	0,04	1,23

Tabella 5.7: Contributo % di ciascun comune alla variazione complessiva degli indicatori a scala di bacino, calcolata come differenza tra lo scenario POST e lo scenario PRE.

5.2.1.3 Modello USR

Come precedente detto nel paragrafo 4.2.3, nel bacino del Lamone, con l'attuazione delle previsioni di piano (scenario POST) si ha un aumento diffuso delle superfici impermeabili, soprattutto nelle aree di pianura, con conseguente riduzione dell'infiltrazione. Le mappe di retention volume (Figura 5.23) e runoff volume (Figura 5.24) evidenziano che, a parità di precipitazione, lo scenario POST comporta una riduzione diffusa della capacità del bacino del Lamone di trattenere le acque meteoriche, accompagnata da un incremento del deflusso superficiale. Tale effetto non è limitato a singole aree puntuali, ma si manifesta in modo continuo e coerente sull'intero bacino, come mostrato dal generale schiarimento delle classi di retention volume e dal contestuale aumento dei valori di runoff volume nello scenario POST. In particolare, le mappe di runoff volume mostrano un rafforzamento dei valori di deflusso lungo gli assi principali del reticolo idrografico e nelle aree di pianura, dove l'impermeabilizzazione risulta più estesa e continua.

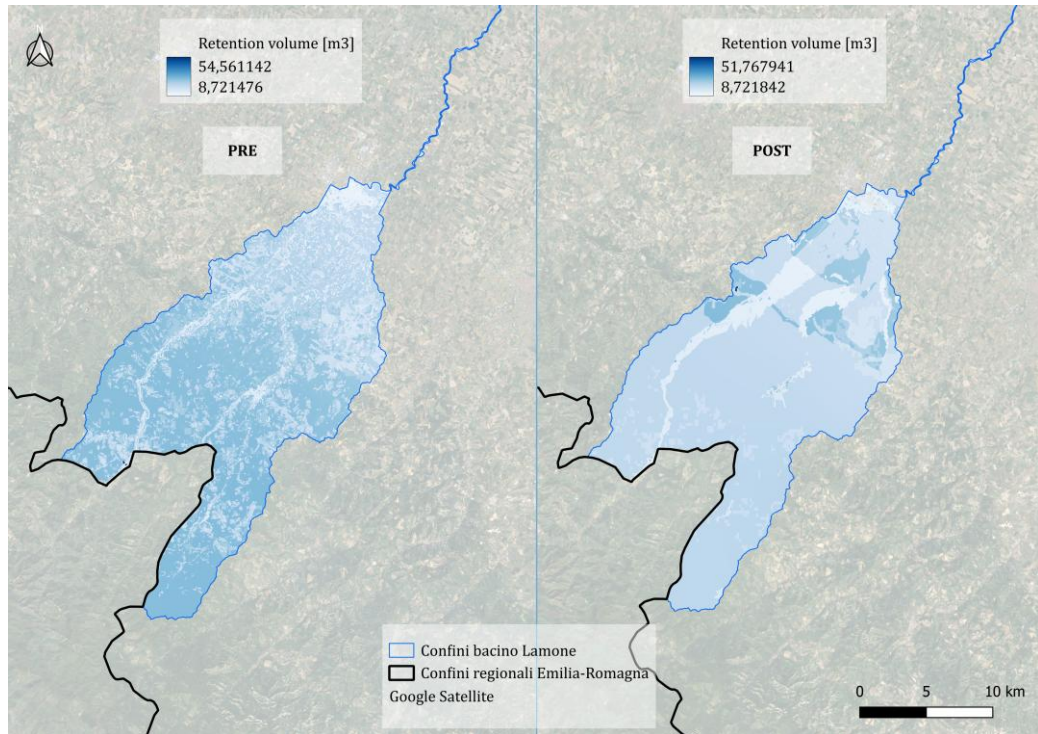


Figura 5.23: Retention volume [m³/unità di superficie] - Bacino Lamone - Modello USR - Scenari PRE-POST

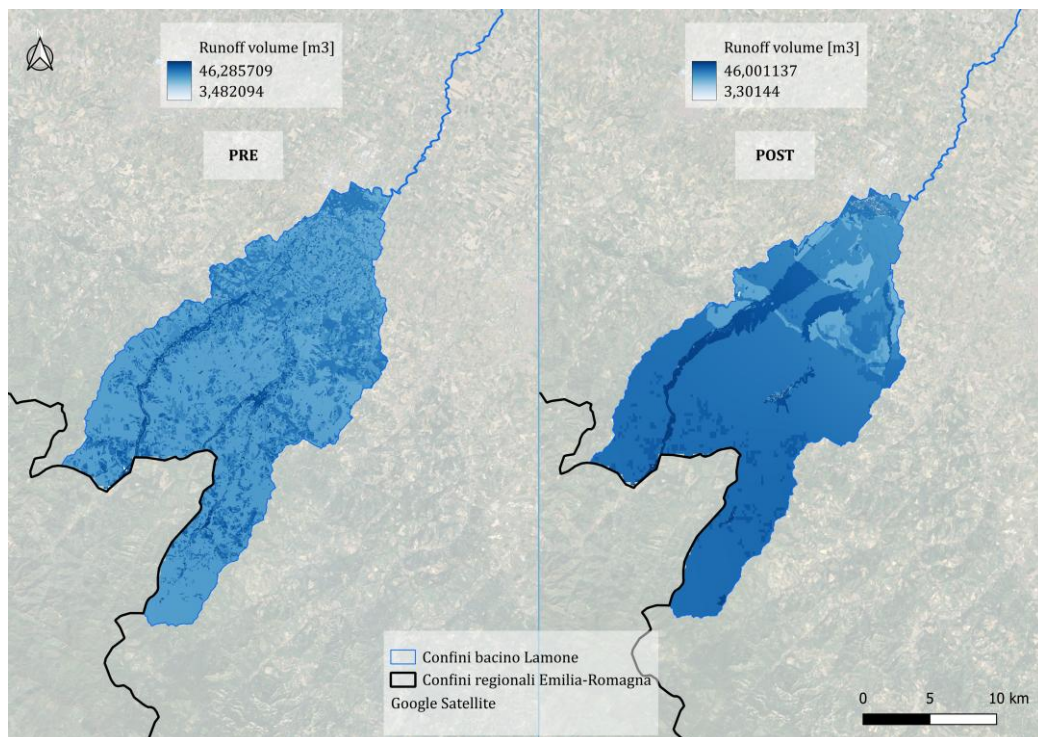


Figura 5.24: Runoff volume [m³/unità di superficie] - Bacino Lamone - Modello USR - Scenari PRE-POST

I grafici in Figura 5.25 e Figura 5.26 mostrano il confronto tra scenario PRE e POST dei valori medi di retention ratio e runoff ratio nei comuni del bacino del Lamone, distinguendo come già fatto per i precedenti modelli di InVEST tra comuni prioritari e marginali. In tutti i casi si osserva una riduzione del retention ratio nello scenario POST, accompagnata da un aumento speculare del runoff ratio, a conferma di una risposta idrologica complessivamente più orientata al deflusso superficiale. Le variazioni risultano più evidenti nei comuni prioritari, che incidono maggiormente sul comportamento idrologico del bacino, mentre nei comuni marginali le differenze appaiono più accentuate in termini percentuali ma riferite a superfici limitate.

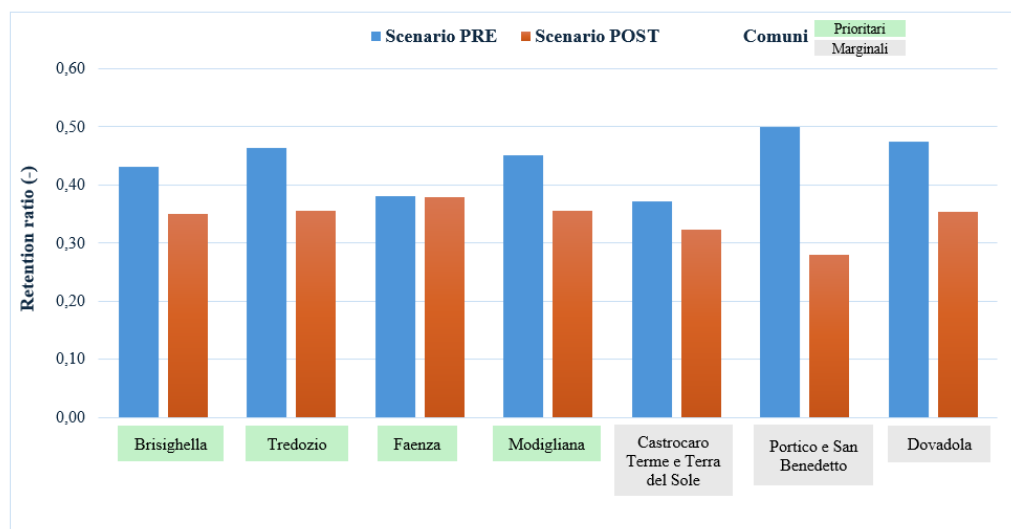


Figura 5.25: Confronto dei valori di retention negli scenari PRE e POST nei comuni del bacino LAMONE.

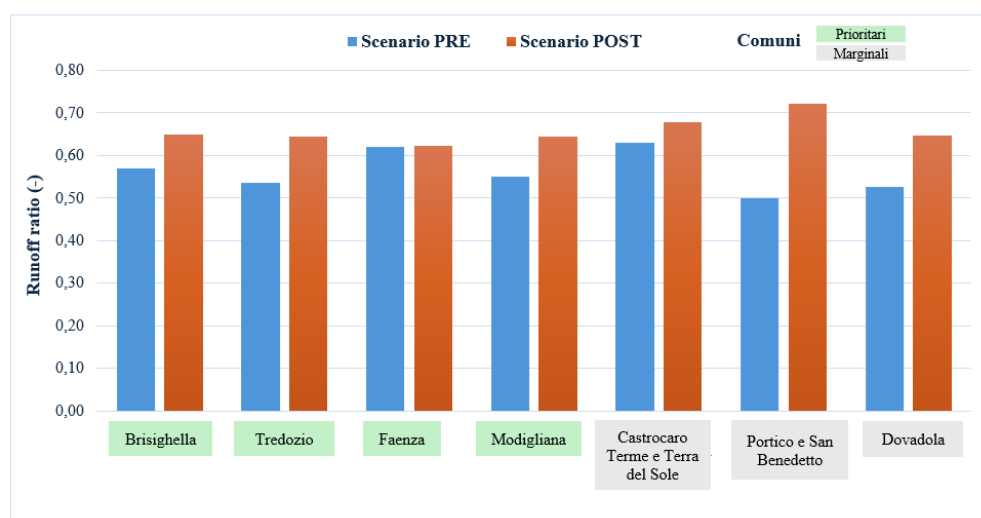


Figura 5.26: Confronto dei valori di runoff negli scenari PRE e POST nei comuni del bacino LAMONE.

Nella Tabella 5.8 sono riportati invece in dettaglio le variazioni tra gli scenari PRE e POST per ogni comune analizzato. Nei comuni prioritari (Brisighella, Trezzio, Faenza, Modigliana) emerge una riduzione del retention ratio, accompagnata da un incremento del runoff ratio, seppur con intensità differenti. Brisighella e Modigliana mostrano diminuzioni rilevanti della capacità di ritenzione (-18,7% e -21,2%), associate a un aumento del deflusso superficiale superiore al 14-17%. Trezzio presenta una delle variazioni più marcate, con una riduzione del retention ratio superiore al 23% e un incremento del runoff ratio di oltre il 20%, indicando una risposta idrologica particolarmente sensibile alle trasformazioni previste. Faenza rappresenta invece un caso di sostanziale stabilità, con variazioni molto contenute sia in termini di ritenzione (-0,5%) sia di deflusso (+0,3%), coerenti con un assetto urbanistico già fortemente consolidato e con trasformazioni di piano più limitate in termini relativi. Nei comuni marginali (Castrocaro Terme e Terra del Sole, Portico e San Benedetto, Dovadola) le variazioni percentuali risultano in alcuni casi molto elevate, in particolare per Portico e San Benedetto, che mostra una riduzione del retention ratio prossima al -44% e un incremento del runoff ratio di circa +44%. Tuttavia, questi valori devono essere interpretati con cautela, poiché riferiti a superfici molto ridotte, per le quali anche trasformazioni localizzate possono produrre variazioni percentuali amplificate. Castrocaro Terme e Terra del Sole e Dovadola mostrano comunque una perdita significativa di capacità di ritenzione (-13% e -25%), accompagnata da un aumento del deflusso, confermando una tendenza coerente con quella osservata nei comuni prioritari.

Comune	Area (km ²)	Retention ratio Scenario PRE (-)	Runoff ratio Scenario PRE (-)	Retention ratio Scenario POST (-)	Runoff ratio Scenario POST (-)	Δ Retention ratio %	Δ Runoff ratio %
Brisighella	143,72	0,431	0,568	0,350	0,6495	-18,70	14,16
Trezzio	48,19	0,464	0,535	0,355	0,644	-23,38	20,27
Faenza	45,75	0,381	0,6189	0,378	0,621	-0,54	0,33
Modigliana	90,55	0,450	0,549	0,354	0,645	-21,19	17,37
Castrocaro Terme e Terra del Sole	2,83	0,371	0,628	0,323	0,6768	-13	7,68

Comune	Area (km ²)	Retention ratio Scenario PRE (-)	Runoff ratio Scenario PRE (-)	Retention ratio Scenario POST (-)	Runoff ratio Scenario POST (-)	Δ Retention ratio %	Δ Runoff ratio %
Portico e San Benedetto	0,38	0,499	0,500	0,280	0,719	-43,97	43,94
Dovadola	4,78	0,474	0,525	0,354	0,645	-25,28	22,81

Tabella 5.8: Confronto dei valori ottenuti nel modello USR di InVEST per gli scenari PRE e POST, in base ai comuni del bacino Lamone.

5.2.2 Modello HEC-HMS

Come per il modello InVEST, si è scelto anche per il modello HEC-HMS di valutare esclusivamente il bacino Lamone ai fini di questa tesi. Il bacino è stato suddiviso in 4 sottobacini (*Sub-basin1*, *Sub-basin2*, *Sub-basin3*, *Sub-basin4*), ognuno con aree e caratteristiche morfologiche differenti, sfocianti in un unico punto (OUT) in corrispondenza della città di Faenza (Figura 5.27).

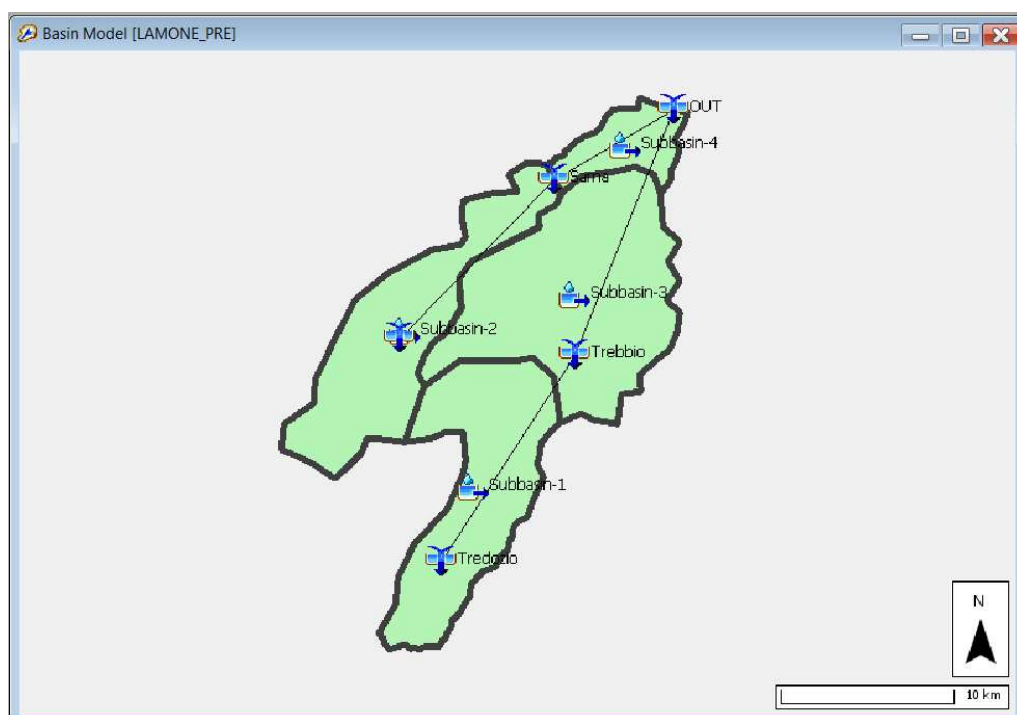


Figura 5.27: Rappresentazione del bacino Lamone nel modello HEC-HMS.

Per realizzare le simulazioni PRE e POST con il modello HEC-HMS è stato necessario riorganizzare i file raster relativi alle tipologie di uso del suolo. Tale operazione non è stata affatto semplice, poiché si è dovuto realizzare un unico file in formato geotiff che contenesse informazioni su uso del suolo e valore del Curve Number per ogni cella

(10x10 metri). Si è scelta quindi la strada “più complicata”, ovvero utilizzare il modello HEC-HMS gridded, ovvero con griglia georeferenziata; in questo modo ogni pixel 10x10 metri ha un proprio valore di CN, rendendo l’analisi più realistica possibile, avendo lo scopo di analizzare il comportamento del modello in base ai due scenari PRE e POST.

In Figura 5.28 e Figura 5.29 sono riportati i dati di CN nei due scenari distribuiti nei 4 sottobacini, accompagnati da grafici a torta che riportano la percentuale di valori di CN presente all’interno di ogni sottobacino.

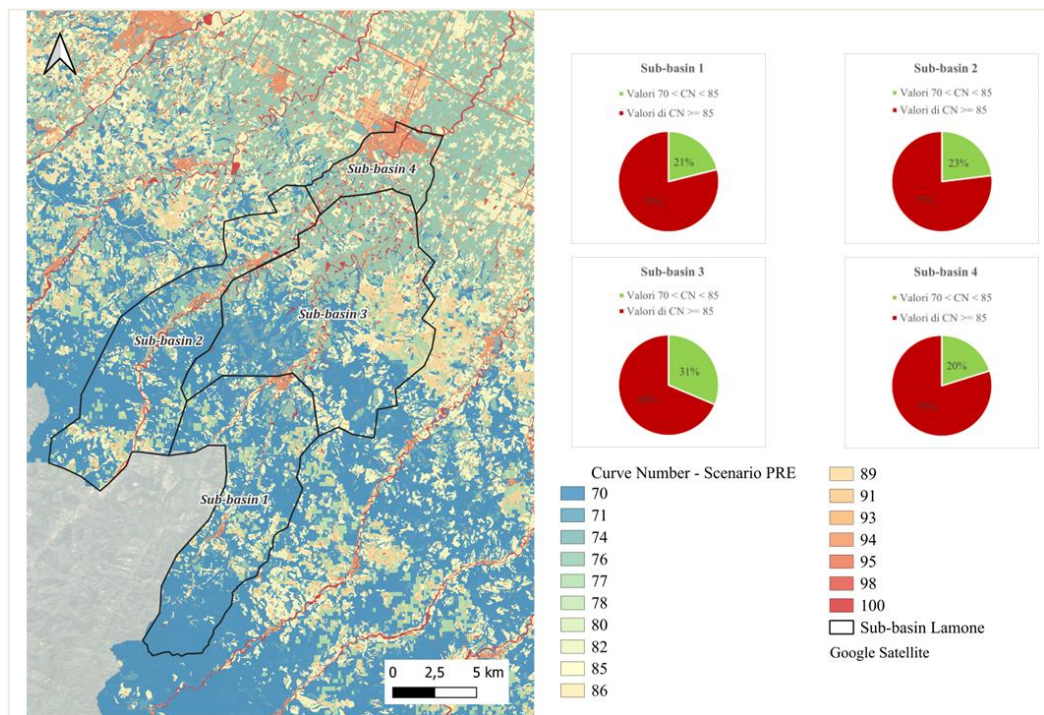


Figura 5.28: Valori di Curve Number nei subbasin analizzati per il bacino Lamone. I grafici rappresentano i valori di CN presenti nei sub-basins - Scenario PRE

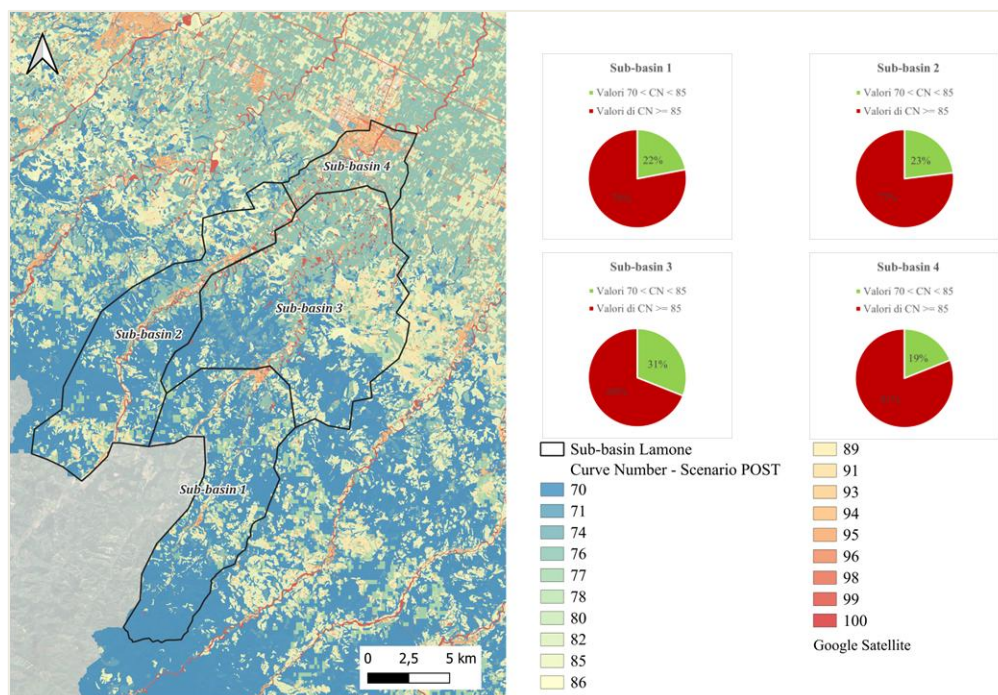


Figura 5.29: Valori di Curve Number nei subbasin analizzati per il bacino Lamone. I grafici rappresentano i valori di CN presenti nei sub-basins - Scenario POST

Come evento pluviometrico si è preso quello registrato dal 30 aprile 2023 h 21:45 al 17 maggio 2023 h 23:45, come precedentemente detto anche nel paragrafo 4.3.

In Tabella 5.9 vengono riportati i valori di input per ogni sottobacino analizzato.

	Sub-basin	Area [km ²]	L [km]	Δh [m]	Tc [h]	R [h]
LAMONE	1	88,85	9,531	1081,36	1,98	1,19
	2	88,138	14,983	760,97	2,72	1,63
	3	129,177	17,92	662,803	3,51	2,11
	4	23,501	8,56	200,018	2,85	1,71

Tabella 5.9: Valori di input utilizzati per ogni sottobacino nel modello HEC-HMS.

Uno dei risultati forniti dal modello HEC-HMS è l'idrogramma di piena simulato in uscita al bacino, che mostra l'andamento temporale della portata totale, data dalla somma dei contributi di deflusso diretto e baseflow) in risposta all'evento di precipitazione considerato. Il confronto tra gli idrogrammi degli scenari PRE (Figura 5.30) e POST (Figura 5.31) uniti in Figura 5.32, insieme ai valori sintetizzati nella Tabella 5.10, evidenzia come il cambiamento di uso del suolo nello scenario POST determini un cambiamento nella risposta idrologica del bacino. Le differenze osservate non riguardano solo l'intensità delle portate, il cui valore nello scenario POST è quasi il triplo rispetto

allo scenario PRE, ma anche il cambiamento della trasformazione della precipitazione in deflusso. È importante valutare inoltre che il tempo al picco resta invariato tra i due scenari (10 maggio 2023, ore 16:00), suggerendo che la risposta del bacino resta invariata, al contrario dell'intensità e durata della piena. Lo scenario POST quindi presenta una maggiore instabilità del deflusso.

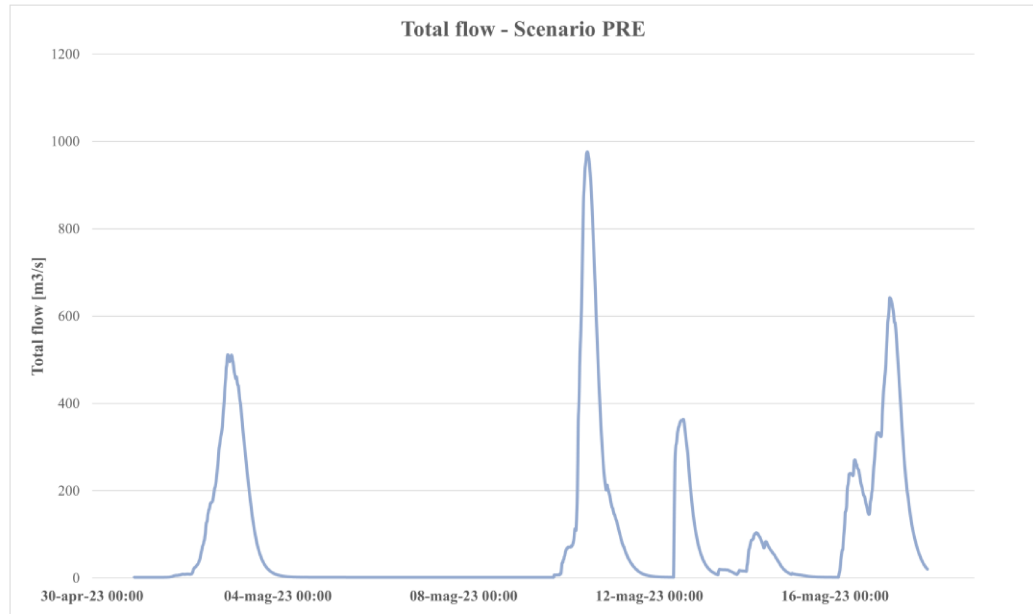


Figura 5.30: Idrogramma di piena simulato - Scenario PRE

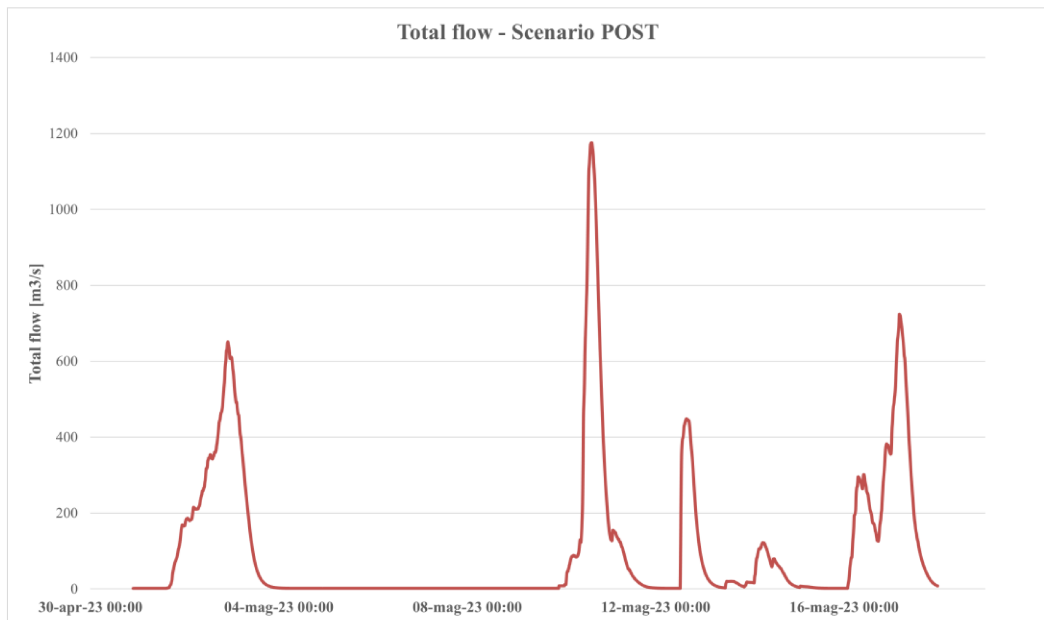


Figura 5.31: Idrogramma di piena simulato - Scenario POST

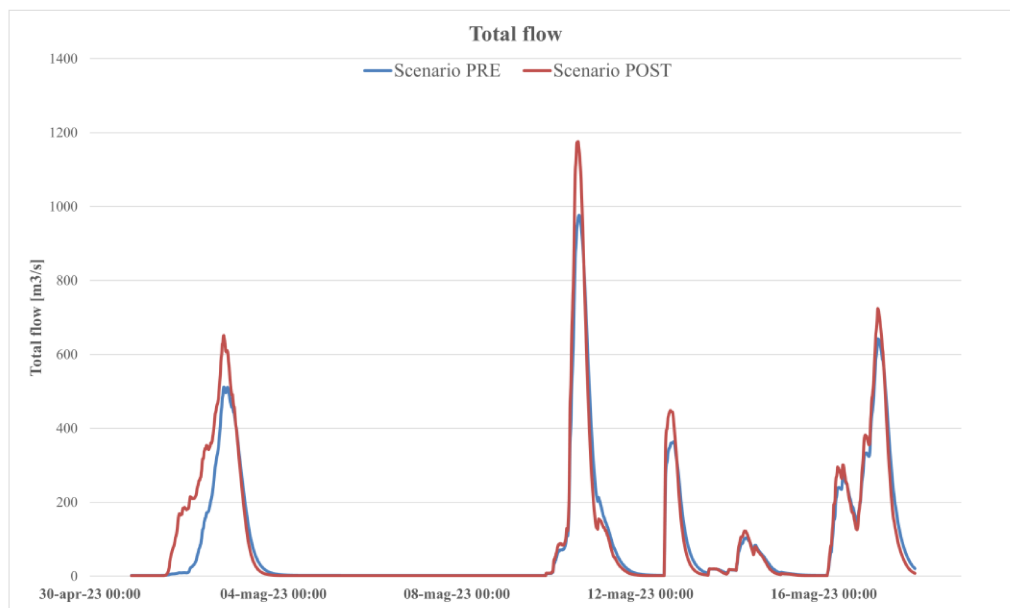


Figura 5.32: Confronto tra gli idrogrammi di piena negli scenari PRE (in blu) e POST (in rosso).

	Scenario PRE	Scenario POST
Portata di picco [m ³ /s]	360	976,3
Tempo al picco	10 maggio 2023, 16:00	10 maggio 2023, 16:00
Volume totale di deflusso [mm]	85,6	257,38
Durata evento [h]	240	410
Portata media evento [m ³ /s]	51,5	91,34

Tabella 5.10: Risultati ottenuti dalla simulazione in HEC-HMS per gli scenari PRE e POST.

In Figura 5.33 e Figura 5.34 viene rappresentato uno “zoom” della Figura 5.32; la Figura 5.33 rappresenta l’inizio della precipitazione analizzata, in particolare i giorni dal 30 aprile al 4 maggio, in cui è evidente nello scenario POST la risposta del bacino che inizia prima e con valori di portata già significativi, mentre nello scenario PRE il deflusso è ancora limitato. Questo anticipo della risposta non implica un diverso tempo al picco complessivo, ma è un segno evidente di una maggiore rapidità del deflusso, coerente con l’aumento delle superfici impermeabilizzate, o delle condizioni idrologiche che favoriscono il runoff. Il ramo di discesa è più ripido nello scenario POST, mentre nello scenario PRE la recessione è più lenta e distribuita nel tempo, segno di una maggiore capacità di laminazione. Nella Figura 5.34, invece, è rappresentato l’evento compreso tra il 16 e 18 maggio, in cui nello scenario POST la portata cresce più rapidamente già nelle fasi iniziali dell’evento. La curva rossa rappresentante lo scenario POST è al di sopra di quella blu durante il ramo di salita, indicando che una quota maggiore della pioggia viene immediatamente trasformata in deflusso superficiale. Questo comportamento è tipico di

un bacino caratterizzato da un Curve Number più elevato, in cui le perdite iniziali e l'infiltrazione risultano ridotte. Il picco di piena nello scenario POST è più alto e "acuto", mentre nello scenario PRE la crescita è più progressiva e il massimo risulta attenuato. Nella fase di recessione, lo scenario POST mostra un esaurimento più rapido della portata, suggerendo che il volume defluito è concentrato in un intervallo temporale più breve, con minore capacità di rilascio graduale.

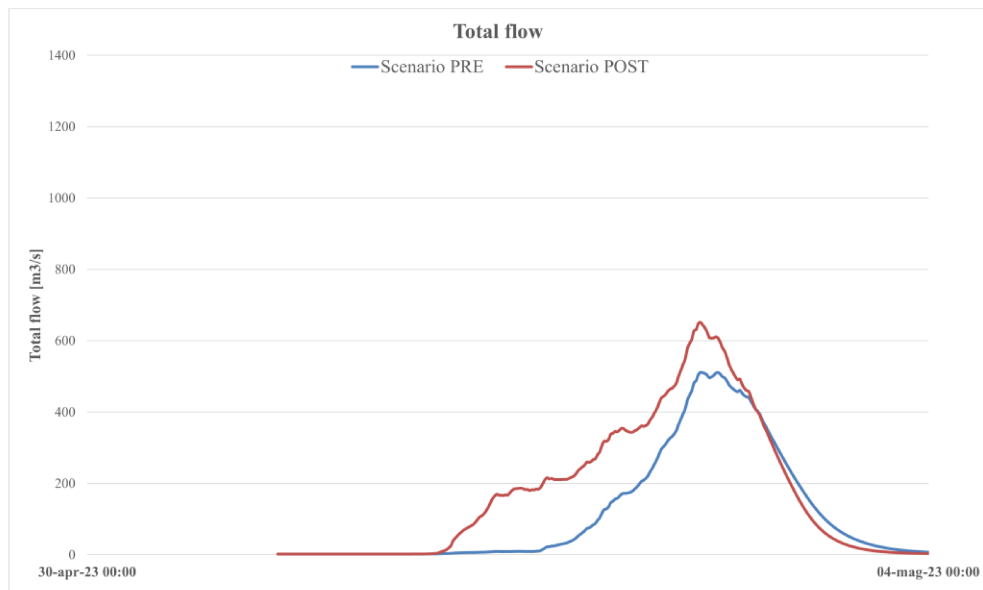


Figura 5.33: Focus 1 sul confronto degli idrogrammi di piena negli scenari PRE e POST.

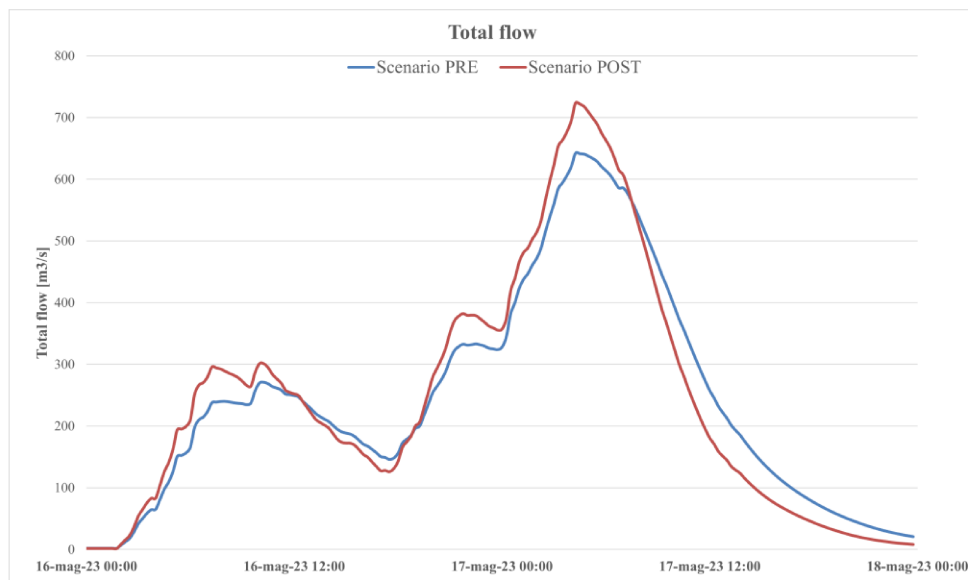


Figura 5.34: Focus 2 sul confronto degli idrogrammi di piena negli scenari PRE e POST.

Nel complesso, l'analisi congiunta degli idrogrammi e degli indicatori riportati in Tabella 5.10 mostra come lo scenario POST sia caratterizzato da una risposta idrologica più rapida, intensa e prolungata rispetto allo scenario PRE. Il bacino passa da un comportamento relativamente più regolato a uno più vulnerabile agli eventi di pioggia intensa.

6 DISCUSSIONI

Nel presente capitolo vengono discussi i risultati, che mostrano con chiarezza che le trasformazioni intervenute nel tempo hanno prodotto un aumento significativo del deflusso superficiale, strettamente legato alla crescita dell'urbanizzazione e alla conseguente riduzione delle superfici permeabili. Questo effetto risulta particolarmente critico nelle aree di pianura, dove le reti di drenaggio sono state progettate per smaltire deflussi generati da suoli naturali o agricoli e si rivelano oggi inadeguate a fronte di portate più elevate. L'urbanizzazione dispersa, di cui non si è tenuto conto nell'analisi, è costituita da una somma di interventi di piccola scala e contribuisce in modo sostanziale all'aumento complessivo del ruscellamento superficiale. L'analisi a scala di bacino mette inoltre in evidenza come gli effetti delle trasformazioni non si esauriscano a livello locale: le scelte operate da un singolo comune possono produrre impatti significativi anche su territori posti a valle, rendendo evidente la necessità di superare una visione esclusivamente comunale della pianificazione. Nei contesti già compromessi, il tema non è più quello della localizzazione delle nuove trasformazioni, ma della gestione degli impatti. I risultati mostrano che, in assenza di interventi di mitigazione, anche trasformazioni relativamente contenute possono contribuire a un ulteriore aumento del rischio idraulico. Di conseguenza, le strategie di pianificazione devono orientarsi verso misure di mitigazione e compensazione, finalizzate a ridurre il carico idrologico complessivo piuttosto che ad aggiungerne di nuovo.

Nel dibattito pubblico e tecnico sulle cause degli eventi estremi, si tende spesso a chiamare in causa fattori esterni, mentre raramente si analizza in modo critico il fatto che molti bacini e territori siano stati fortemente compromessi da un'urbanizzazione poco controllata. Basti vedere il cambiamento di uso del suolo negli anni, in cui le superfici impermeabilizzate dagli anni '50 allo stato attuale sono aumentate di oltre 10 volte, passando da un indice di area urbanizzata al 1954 di 235,3 km² a 2757,52 km² nel 2018, con una densità di urbanizzazione dall'1 al 12%. In questa analisi però, con i dataset a disposizione, non si è tenuto conto di tutti gli insediamenti dispersi presenti nel territorio, che, presi singolarmente, sembrano marginali, ma che nel loro insieme producono un impatto significativo. Questa componente non viene "intercettata" dagli strumenti di analisi utilizzati (*Uso del suolo — Geoportale, 2024*), poiché "sfugge" alle soglie dell'unità minima cartografabile. Il Dipartimento di Protezione Civile ha realizzato un dataset degli aggregati strutturali nel territorio italiano (Figura 6.1), un progetto che risponde ad una esigenza principale, quella legata alle situazioni di emergenza (Dataset nazionale degli aggregati strutturali italiani | Dipartimento della Protezione Civile, 2021).

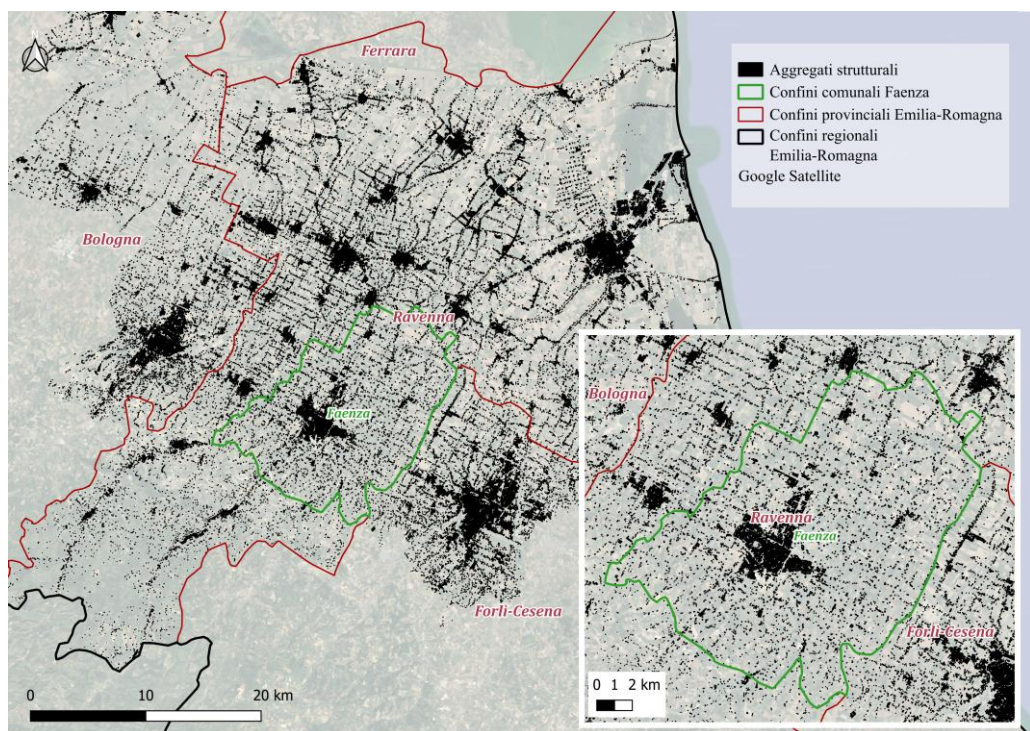


Figura 6.1: Aggregati strutturali nelle province di Ravenna e Forlì-Cesena, con uno zoom sulla città di Faenza.

Il problema non è solo quantitativo, ovvero capire quanto è urbanizzato un territorio, ma anche qualitativo, ovvero come è distribuito l'urbanizzato. Nelle fasi emergenziali, la presenza di edifici dispersi rappresenta una criticità rilevante, perché rende più complessa

la gestione del rischio e delle operazioni di soccorso. Tutto si collega direttamente al tema della mitigazione dei rischi, in particolare quelli legati ad alluvioni, frane e dissesto idrogeologico. È vero che molti dei problemi attuali derivano da scelte urbanistiche compiute 40 o 50 anni fa, ma è altrettanto vero che, nonostante l'introduzione di nuovi approcci continuano a verificarsi eventi critici. L'insieme delle analisi sviluppate in questa tesi fornisce un quadro molto complesso e articolato del comportamento idrologico dei bacini analizzati, mettendo in evidenza come le trasformazioni di uso del suolo e le scelte di pianificazione incidano sui processi di regolazione ecosistemica. Gli eventi alluvionali che hanno interessato la regione Emilia-Romagna negli ultimi anni non possono essere il risultato di semplici precipitazioni eccezionali, ma devono essere interpretati come l'esito di un'interazione cumulativa tra l'assetto del territorio, gli usi del suolo, la crescente e sempre più incontrollata impermeabilizzazione, ma anche la capacità, e spesso incapacità, dei sistemi di pianificazione del territorio. In questo senso, i risultati ottenuti assumono un significato che va oltre la sola interpretazione dei fenomeni idrologici, ponendo una questione più ampia relativa al ruolo e all'efficacia degli strumenti di pianificazione urbanistica e territoriale. L'attuale quadro normativo, pur ricco e tecnicamente avanzato, continua a privilegiare un approccio reattivo e basato su vincoli: si limita infatti a regolamentare le aree già riconosciute come pericolose, invece di guidare in modo preventivo le trasformazioni del territorio. L'analisi condotta mostra invece come il rischio si costruisca progressivamente attraverso le scelte di uso del suolo, evidenziando una discrepanza tra rischio formalmente riconosciuto e rischio effettivamente generato dalle dinamiche insediative. Ovviamente non si tratta di stabilire una relazione diretta di causa-effetto in senso stretto, poiché non è possibile affermare che un singolo cambiamento sia l'unica causa di una determinata risposta idrologica. Tuttavia, l'analisi del cambiamento dell'uso del suolo costituisce un ruolo rilevante nei processi analizzati. Realizzando uno scenario (scenario POST) in cui le aree di nuova espansione residenziale o produttiva previste dagli strumenti urbanistici vengano urbanizzate al 100%, è possibile valutare come queste trasformazioni inciderebbero sui risultati dei modelli. Le analisi effettuate hanno permesso di analizzare i contributi non solo a scala provinciale, ma anche comunale, poiché è stato possibile individuare quanto ciascun comune incida sul comportamento complessivo del bacino. La metodologia proposta, come già esposto in precedenza, è facilmente replicabile in altre zone.

I modelli utilizzati permettono di analizzare lo stesso fenomeno da diversi punti di vista: InVEST per analizzare i servizi ecosistemici, HEC-HMS per quantificare in termini di portata. Entrambi i modelli, pur avendo strutture molto differenti, restituiscono lo stesso

risultato: l'aumento del deflusso superficiale. Un esito che sembrerebbe scontato, poiché il cambiamento di uso del suolo (ad esempio da agricolo a impermeabilizzato) comporta una variazione di Curve Number e, di conseguenza, un incremento atteso delle portate. Tuttavia, l'entità di tale incremento non è affatto ovvia e non può essere data per scontata senza una verifica modellistica. Proprio per questo, l'impiego di modelli diversi ma coerenti nei risultati rappresenta un punto di forza: si tratta di analisi semplificate, ma molto efficienti, che permettono di confrontare lo stesso processo attraverso approcci complementari. Questa coerenza tra modelli, pur nella loro semplicità, rafforza la solidità delle evidenze emerse e suggerisce che strumenti di questo tipo possano essere utilizzati non solo in ambito di ricerca, ma anche come supporto operativo alla pianificazione. La possibilità di confrontare gli effetti delle diverse trasformazioni urbanistiche introduce una logica prestazionale nella pianificazione: le scelte non vengono più valutate solo in base al rispetto dei vincoli, ma anche per il loro impatto sul funzionamento idrologico del territorio. Si tratta di un cambiamento concettuale importante, che supera l'impostazione tradizionale degli strumenti urbanistici, ancora fortemente prescrittiva. L'obiettivo della presente tesi non era quello di riprodurre in maniera dettagliata l'evento alluvionale in sé, quanto piuttosto valutare il cambiamento del comportamento idrologico dei bacini. Questo tipo di analisi non avrebbero senso alla scala locale, in particolare nei contesti urbani, dove gli eventi di pioggia brevi e intensi hanno una forte variabilità spaziale. Analizzando il bacino che li include, invece, il problema risulta più evidente: quando una porzione significativa del bacino viene impermeabilizzata, la portata di progetto tende ad aumentare e i servizi ecosistemici alterati. Alla scala locale, comunale, si possono utilizzare metodi e modelli differenti, come il modello EPA SWMM (Storm Water Management Model), sviluppato dall'Environmental Protection Agency (*Storm Water Management Model (SWMM) | US EPA, 2024*). Si tratta di un modello dinamico di simulazione del deflusso superficiale e del funzionamento dei sistemi di drenaggio urbano, in grado di valutare sia la quantità che la qualità delle acque urbane, ampiamente utilizzato per valutare l'efficacia di interventi di mitigazione e di soluzioni basate sulla Low Impact Development (LID). Anche questo modello consente di valutare le variazioni del deflusso superficiale al variare delle condizioni di copertura del suolo e della presenza o meno di dispositivi LID (quali pavimentazioni permeabili, trincee drenanti, tetti verdi, ecc.). Inserendo dati ufficiali relativi alla rete fognaria comunale, insieme ai parametri idraulici di dettaglio, uso del suolo, concentrazione degli inquinanti, si possono valutare possibili interventi di mitigazione sulle aree critiche. Questo modello, ancora poco adottato a scala comunale, risulta essere molto efficace a scala di bacino; la regione

Emilia-Romagna ad esempio, nell'aprile 2025 ha iniziato una collaborazione con l'Università degli Studi di Bologna, che cita quanto segue *“A seguito dell'evento estremo verificatosi a maggio 2023, che ha comportato profonde modificazioni del territorio interessato e ha evidenziato la vulnerabilità dello stesso si rende necessario procedere urgentemente ad un aggiornamento del quadro conoscitivo relativo al rischio idraulico riguardante la città di Bologna connesso al torrente Ravone, sia nel tratto a monte della tombinatura sia nel tratto tombinato e a valle di esso, al fine della definizione di corrette procedure di protezione civile e misure di prevenzione, che possano essere basate sul nuovo quadro di rischio”*. Nel progetto verranno realizzati scenari implementati nel modello SWMM. In questo quadro, emerge con chiarezza la necessità di un'integrazione tra scale e strumenti: modelli come InVEST possono essere utilizzati per individuare criticità a scala vasta e orientare le scelte strategiche, mentre modelli come SWMM consentono di approfondire le soluzioni a scala locale e urbana. Tuttavia, nella pratica pianificatoria, questa integrazione è ancora limitata e spesso assente, con il rischio di una frammentazione tra analisi strategica e progettazione operativa. L'approccio sviluppato nella presente tesi suggerisce invece la possibilità di costruire un percorso continuo, in cui l'analisi di bacino supporta le scelte urbanistiche e queste, a loro volta, vengono verificate a scala di dettaglio.

La regione Emilia-Romagna con la L.R. 24/2017 stabilisce che il nuovo consumo di suolo debba essere limitato al 3% della superficie già urbanizzata e sia consentito solo per interventi in grado di sostenere lo sviluppo e l'attrattività del territorio. Un caso paradigmatico è quello della Città metropolitana di Bologna, che riporta testualmente sul proprio sito web (Città Metropolitana di Bologna, 2024) *“Come risulta dalla successiva tabella, per il momento, il consumo di suolo ai sensi della L.R. 24/17 è pari a zero per tutti gli anni studiati (2018-2022), in quanto la legge stessa prevede all'art. 4 e successivi interventi urbanistici e infrastrutturali la cui impermeabilizzazione non costituisce consumo di suolo.”* Questo elemento evidenzia una criticità significativa del quadro normativo: la distinzione tra consumo di suolo e impermeabilizzazione può generare una sottostima degli effetti reali delle trasformazioni territoriali. I risultati della presente analisi mostrano infatti che anche interventi formalmente esclusi dal computo del consumo di suolo possono produrre effetti rilevanti sul deflusso superficiale e sulla capacità di ritenzione del territorio. Ciò suggerisce che gli attuali indicatori normativi, pur utili per il monitoraggio quantitativo, non siano sufficienti a descrivere le implicazioni funzionali delle trasformazioni e che sia necessario affiancarli con indicatori di tipo idrologico ed ecosistemico. Per quanto riguarda il rischio idraulico, invece, in

Emilia-Romagna a partire dai primi anni Duemila è stato introdotto il principio di invarianza idraulica nei piani di gestione del rischio idraulico. Questo principio stabilisce che “Le nuove urbanizzazioni non debbano aumentare le portate di piena rispetto alle condizioni precedenti, obbligando i soggetti attuatori a realizzare opere di laminazione o di detenzione delle acque meteoriche. Tale obbligo si applica a qualsiasi intervento che comporti impermeabilizzazione del suolo, indipendentemente dalla sua estensione, e consente di contenere gli effetti del consumo di suolo senza trasferire i costi sulla collettività, incentivando al tempo stesso la riduzione delle superfici impermeabili.” (Botticelli et al., 2018; Maggio, 2023). Il lavoro di tesi qui presentato mostra che l’invarianza idraulica può essere valutata e supportata quantitativamente già in fase di pianificazione, attraverso indicatori semplici in grado di evidenziare dove le trasformazioni urbanistiche producono i maggiori effetti idrologici a scala di bacino. Tuttavia, i risultati suggeriscono anche una lettura critica del principio di invarianza idraulica. Se da un lato esso rappresenta uno strumento fondamentale per contenere gli effetti locali delle nuove urbanizzazioni, dall’altro rischia di affrontare il problema in modo parziale, intervenendo sugli effetti piuttosto che sulle cause strutturali del rischio. Le opere di laminazione e compensazione, infatti, consentono di mitigare l’impatto delle singole trasformazioni, ma non necessariamente riducono la vulnerabilità complessiva del sistema territoriale, soprattutto in presenza di processi diffusi di impermeabilizzazione. In questo senso, l’invarianza idraulica appare come una condizione necessaria ma non sufficiente per garantire la sostenibilità delle trasformazioni.

A scala provinciale-intercomunale, l’analisi dei bacini evidenzia come la criticità idrologica non sia direttamente proporzionale alla loro estensione. Bacini di piccole e medie dimensioni risultano spesso più “colpiti” dalle trasformazioni dell’uso del suolo; ciò non implica l’assenza di effetti rilevanti nei grandi bacini, che continuano a generare volumi assoluti elevati e potenziali impatti a valle. Il confronto PRE–POST conferma una riduzione complessiva della capacità di ritenzione e un aumento del deflusso, attribuibili non solo all’incremento delle superfici impermeabilizzate, ma anche alla loro distribuzione spaziale rispetto alla rete idrografica. Le analisi sedimentarie mostrano che le dinamiche di erosione e trasporto solido non seguono necessariamente l’andamento del deflusso. Il disallineamento osservato tra indicatori idrologici e sedimentari evidenzia che i processi di deflusso ed erosione rispondono a controlli differenti; di conseguenza, un’analisi integrata risulta essenziale per una corretta interpretazione delle dinamiche di bacino. Confrontando i risultati ottenuti per i modelli utilizzati in InVEST negli scenari

PRE e POST, si sono evidenziate delle “aree critiche”, ovvero le porzioni di territorio che mostrano, in modo congiunto, un aumento del deflusso superficiale, una riduzione della capacità di ritenzione e una maggiore propensione ai processi di erosione e trasferimento dei sedimenti. Non si tratta quindi di aree definite sulla base di un singolo indicatore, e sono rappresentate per lo scenario PRE (Figura 6.2) e POST (Figura 6.3).

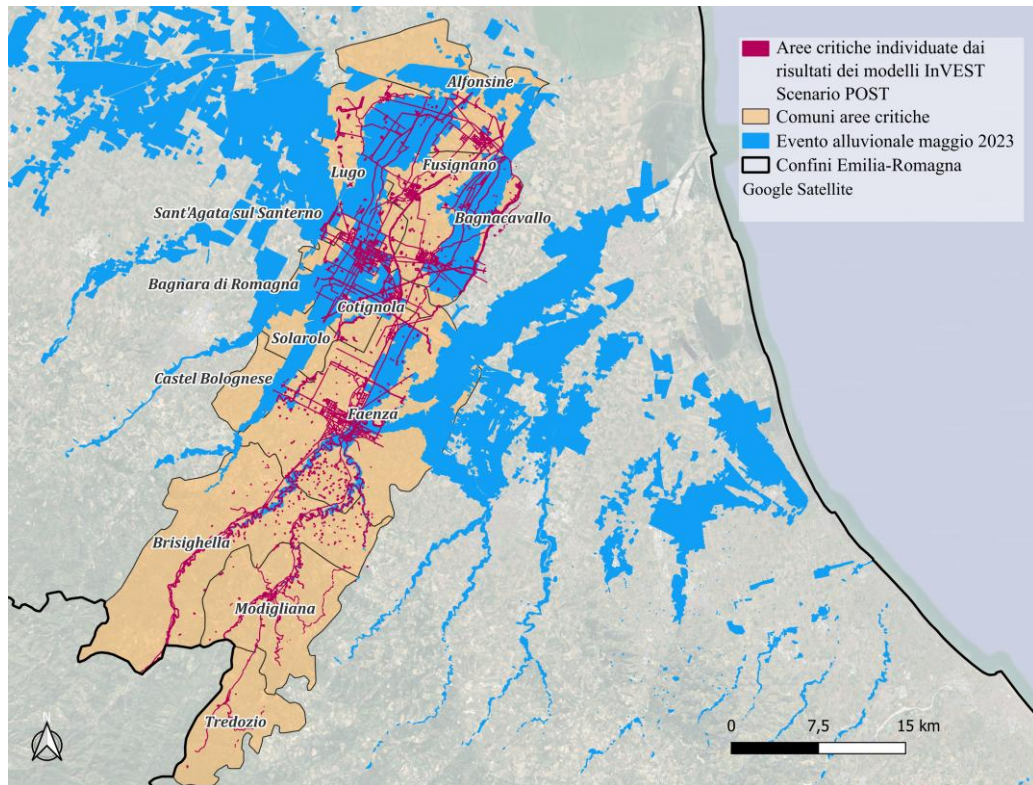


Figura 6.2: Aree critiche individuate dai risultati dei modelli InVEST - Scenario PRE

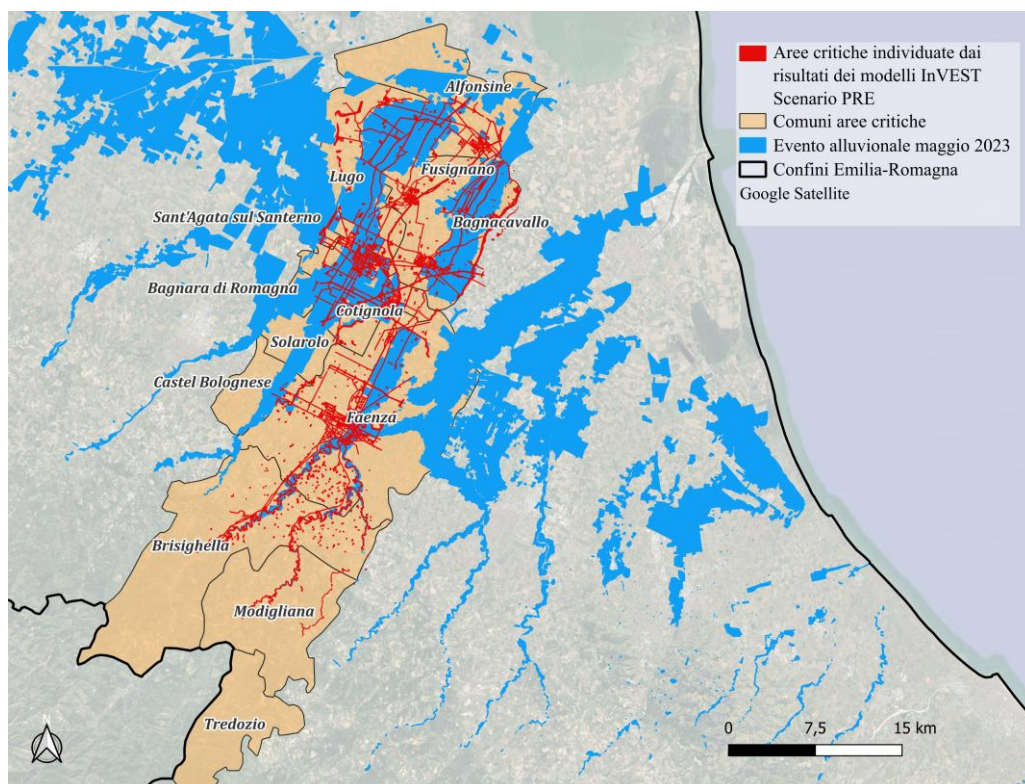


Figura 6.3: Aree critiche individuate dai risultati dei modelli InVEST - Scenario POST

A scala di bacino invece, il confronto PRE–POST evidenzia un aumento generalizzato del deflusso superficiale e una riduzione della capacità di ritenzione del bacino del Lamone, con effetti eterogenei legati sia all'intensità delle trasformazioni sia alla posizione dei comuni all'interno del bacino. Le mappe realizzate mostrano nello scenario POST un sistema idrologico più omogeneo e meno capace di assorbire le precipitazioni, con un incremento del contributo diretto al ruscellamento, che è particolarmente evidente nei settori di valle. Le analisi sul bacino Lamone basate su HEC-HMS forniscono una verifica di dettaglio delle evidenze emerse dalle analisi a scala più ampia. Il confronto tra gli idrogrammi negli scenari PRE e POST evidenzia che l'aumento del Curve Number non produce una variazione significativa nella tempistica del picco di piena, ma determina una maggiore concentrazione del deflusso nel tempo. Tutto questo si traduce in portate massime più elevate e in una riduzione della capacità del bacino di attenuare gli effetti degli eventi di pioggia. Questo ha conseguenze importanti per la gestione del rischio, perché le infrastrutture di drenaggio urbano e territoriale, come canali, fossi e reti di smaltimento delle acque meteoriche, sono spesso progettate sulla base di condizioni precedenti all'urbanizzazione e possono quindi risultare insufficienti anche in presenza di trasformazioni limitate dell'uso del suolo.

Il confronto tra le aree effettivamente allagate e le perimetrazioni di pericolosità idraulica del PAI e del PGRA (Figura 3.2) mostra una buona capacità predittiva degli strumenti pianificatori tradizionali, in particolare per quanto riguarda le classi di pericolosità media ed elevata. Tuttavia, la ripetizione degli impatti e la presenza di allagamenti anche al di fuori delle aree formalmente classificate come a rischio elevato evidenziano un limite strutturale di questi strumenti: essi tendono a rappresentare il rischio come una condizione statica, mentre i processi territoriali che lo generano sono dinamici e in continua evoluzione. In questo senso, le perimetrazioni risultano efficaci nel descrivere dove il rischio si manifesta storicamente, ma meno capaci di intercettare le nuove criticità emergenti legate alle trasformazioni diffuse del territorio, in particolare quelle connesse al ruscellamento superficiale e alla perdita di capacità di ritenzione diffusa. Questa evidenza suggerisce che gli strumenti di pianificazione del rischio, pur efficaci nel rappresentare le condizioni consolidate, risultano meno adeguati nel governare le dinamiche evolutive del territorio. La pianificazione risulta in parte disallineata rispetto ai processi che essa stessa contribuisce a generare, con il rischio di intervenire solo dopo che il danno si è manifestato. Per questo, introdurre strumenti capaci di leggere il territorio in modo funzionale e dinamico rappresenterebbe un'evoluzione importante: permetterebbe di affiancare alla tradizionale logica perimetrativa una logica basata sui processi.

I risultati di questo lavoro mostrano come la riduzione della vulnerabilità richieda un'azione preventiva a scala territoriale e di bacino. Al contrario, l'Autorità di Bacino del fiume Po (Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po, 2009), ha realizzato un report "Come ridurre la vulnerabilità degli edifici presenti in aree a rischio di alluvione" in cui suggerisce approcci basati prevalentemente su misure puntuali sull'edificato esistente; le misure proposte risultano teoricamente corrette, ma spesso poco compatibili con la complessità dei tessuti urbani esistenti. Intervenendo prevalentemente sull'edificato, l'approccio agisce sugli effetti del rischio piuttosto che sulle sue cause, che i risultati di questo lavoro riconducono invece alle scelte di pianificazione territoriale e di uso del suolo. Nel complesso, il lavoro evidenzia come la riduzione del rischio non possa essere affidata esclusivamente a interventi puntuali o a misure di adattamento sull'esistente, ma richieda un ripensamento delle logiche di pianificazione territoriale. Più che introdurre nuovi vincoli, emerge la necessità di dotare i decisori di strumenti in grado di rendere esplicite le conseguenze delle scelte, anticipando gli effetti delle trasformazioni prima che queste si traducano in condizioni di criticità. In questa prospettiva, l'approccio sviluppato nella tesi non si propone come alternativa agli strumenti normativi esistenti,

ma come integrazione capace di colmare il divario tra analisi del rischio e progettazione del territorio, contribuendo a una pianificazione più consapevole, preventiva e orientata al funzionamento dei sistemi territoriali.

CONCLUSIONI

Le scale di analisi adottate nella tesi hanno permesso di restituire un quadro complessivo coerente con i diversi livelli della pianificazione territoriale, evidenziando come le trasformazioni urbane siano spesso affrontate in modo frammentato. Nel loro insieme, i risultati della tesi mostrano come il comportamento idrologico dei bacini non possa essere interpretato esclusivamente come risposta a eventi meteorici estremi, ma debba essere letto come l'esito di un processo cumulativo, fortemente influenzato dalle trasformazioni dell'uso del suolo e dalle scelte di pianificazione. L'integrazione tra modelli di servizi ecosistemici e modelli idrologici ha consentito di costruire una lettura multi-scalare del territorio, evidenziando in modo quantitativo come l'impermeabilizzazione e la distribuzione dell'urbanizzato incidano sulla capacità di ritenzione e sul deflusso superficiale. Nella pratica, i comuni tendono a operare in modo autoreferenziale, senza considerare adeguatamente le relazioni con i territori circostanti. Questo aspetto emerge con particolare chiarezza nelle analisi a scala intercomunale, soprattutto nello scenario di piano, dove all'interno dello stesso bacino coesistono scelte di trasformazione riconducibili a enti amministrativi diversi. Sebbene la pianificazione di bacino nasca con l'obiettivo di coordinare tali dinamiche, le principali criticità si collocano a monte, nella scarsa integrazione tra i livelli locale, intercomunale, regionale e nazionale. L'analisi del quadro normativo italiano conferma una forte frammentazione, con approcci e definizioni differenti tra le regioni, tutte formalmente orientate al raggiungimento dell'obiettivo del *NO NET LAND TAKE* al 2050, ma prive di una cornice nazionale unitaria in grado di guidare in modo coerente le politiche territoriali. Il confronto con altri Paesi europei mette in evidenza una maggiore aderenza agli indirizzi comunitari, mentre in Italia permane una discontinuità che rischia di compromettere l'efficacia delle strategie di contenimento del consumo di suolo. A ciò si aggiunge un uso spesso improprio di concetti chiave come la rigenerazione urbana, frequentemente richiamata in modo formale ma non sempre tradotta in interventi realmente coerenti con i suoi principi. Nel complesso, questi elementi confermano la necessità di un approccio più integrato e condiviso alla pianificazione, capace di superare la frammentazione attuale e di rendere effettivi gli obiettivi di sostenibilità dichiarati. In questo contesto, emerge chiaramente una discrepanza tra la coerenza formale degli strumenti normativi e la loro efficacia sostanziale nel governare le trasformazioni territoriali. Le analisi condotte mostrano infatti che interventi urbanistici formalmente compatibili con il quadro pianificatorio possono comunque determinare un peggioramento delle condizioni idrologiche,

evidenziando come rispettare i vincoli non basta: la sostenibilità idrologica richiede valutazioni funzionali, non solo normative. In questo senso, i modelli utilizzati non rappresentano un esercizio puramente descrittivo, ma uno strumento di supporto alle decisioni. Essi permettono di quantificare il contributo delle trasformazioni previste al deflusso superficiale e di valutare alternative più sostenibili, come la riduzione, la delocalizzazione o la compensazione delle previsioni urbanistiche. L'approccio proposto consente quindi di integrare in modo più efficace pianificazione urbanistica e gestione del rischio idraulico, fornendo una base conoscitiva utile per evitare un ulteriore aggravamento delle criticità esistenti. In questo senso, il contributo principale della tesi non risiede nella previsione puntuale dei fenomeni, ma nella capacità di rendere espliciti gli effetti delle trasformazioni territoriali, offrendo ai decisori uno strumento per anticipare le conseguenze delle scelte. L'approccio proposto consente di spostare l'attenzione da una logica reattiva, basata sulla gestione del danno, a una logica preventiva, orientata alla riduzione delle cause strutturali del rischio.

La ricerca qui presentata può essere ampliata e sviluppata; l'integrazione di questo approccio permetterebbe di inquadrare un comune all'interno del bacino idrografico di appartenenza, evidenziando il peso relativo delle trasformazioni previste o attuate. Attraverso scenari diversi di uso del suolo è possibile valutare come le scelte urbanistiche incidano sul deflusso superficiale e sulle portate a valle di un bacino. Si potrebbe pensare a definire un modello per la stima del coefficiente di deflusso nelle aree urbane, anche in funzione dell'utilizzo di soluzioni basate sulla natura (NBS). Queste valutazioni potrebbero diventare delle vere e proprie linee guida. L'obiettivo non sarebbe soltanto elaborare linee guida generiche, ma fornire raccomandazioni concrete per supportare i sistemi insediativi coinvolti, contribuendo a limitare l'impatto del deflusso superficiale e migliorare la resilienza delle aree urbane. Le amministrazioni locali, attraverso queste informazioni, potrebbero adottare decisioni più consapevoli, tenendo conto delle proprie esigenze ma anche dell'impatto cumulativo sul bacino idrografico. In prospettiva, tali strumenti potrebbero essere integrati nei processi di pianificazione ordinaria, ad esempio all'interno delle Norme Tecniche di Attuazione (NTA), contribuendo a colmare il divario tra analisi del rischio e progettazione del territorio. Questo richiederebbe non tanto l'introduzione di nuovi vincoli, quanto un'evoluzione nell'utilizzo degli strumenti esistenti, orientata a una maggiore attenzione al funzionamento idrologico ed ecosistemico del territorio. In aree già soggette a impermeabilizzazione elevata, si potrebbero adottare misure di mitigazione per ridurre l'effetto negativo sulle aree circostanti. Nel complesso, la ricerca mostra che la riduzione del rischio idrogeologico

non può essere affrontata solo attraverso interventi puntuali o misure di mitigazione locale. È necessario ripensare le logiche con cui si pianifica il territorio. Più che introdurre nuovi strumenti, emerge l'esigenza di utilizzare in modo diverso quelli già disponibili, rendendo esplicite le conseguenze delle trasformazioni e integrando la dimensione idrologica nei processi decisionali. In questa prospettiva, il lavoro di tesi contribuisce a colmare il divario tra analisi scientifica e pratica pianificatoria, offrendo una base conoscitiva utile per orientare le scelte verso assetti territoriali più resilienti e sostenibili.

BIBLIOGRAFIA

- Abdelkebir, B., Mokhtari, E., & Engel, B. (2024). Assessment of land use and land cover changes on hydrological responses in the Wadi Soummam watershed, Algeria using the HEC–HMS model. *Water Practice and Technology*, 19(9), 3555–3577. <https://doi.org/10.2166/WPT.2024.224>
- Almeida, A. K., de Almeida, I. K., Guarienti, J. A., & Gabas, S. G. (2021). The time of concentration application in studies around the world: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 2021 29:6, 29(6), 8126–8172. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-16790-2>
- Altrock, U. (2018). Stadterneuerung. *Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung*, 2441–2450.
- Amini, A., Mohammad Ali, T., Halim Ghazali, A. B., Aziz, A. A., Mohd Akib, S., Amini, A., Ali, T. M., B Ghazali, A. H., Aziz, A. A., & Mohd Akib, S. (2011). Impacts of Land-Use Change on Streamflows in the Damansara Watershed, Malaysia. *Arabian Journal for Science and Engineering* 2011 36:5, 36(5), 713–720. <https://doi.org/10.1007/S13369-011-0075-3>
- Angel, C. M. M., Donvito, G., & Fernando, M. A. (2023). Patrimonio e rigenerazione urbana a Madrid (Spagna). *La tabacalera e Madrid Rio. ANANKE*, 83–86.
- ARPAE Emilia-Romagna. (2024). *dext3r*. <https://simc.arpae.it/dext3r/>
- Arpae Emilia-Romagna. (2023a). *Il 2023 in Emilia-Romagna, un anno di estremi meteo-climatici*. <https://www.arpae.it/it/notizie/anno-2023-estremi-climatici>
- Arpae Emilia-Romagna. (2023b). *L'alluvione in Emilia-Romagna del maggio 2023*. https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/educazione_alla_sostenibilita/progetti-in-corso/leggere-i-dati-e-farne-buon-uso/clima/alluvione-in-emilia-romagna-maggio-2023
- Arpae Emilia-Romagna. (2022, ottobre 20). *Bacini idrografici principali come da Dir. 2000/60/CE - agg.PdG 2021*. <https://inspire-geoportal.ec.europa.eu/srv/api/records/arpa:2022-10-20T154227?language=all>

- Arpae Emilia-Romagna. (2023). *L'alluvione in Emilia-Romagna. Ecoscienza 5/2023*.
<https://www.arpae.it/it/notizie/12019alluvione-in-emilia-romagna-online-ecoscienza-5-2023>
- ARPAE Emilia-Romagna - Struttura Idro-Meteo-Clima. (2024). *Report post evento 17-19 settembre 2024 - Allerta Emilia Romagna*.
- Atharinafi, Z., & Wijaya, N. (2021). Land Use Change and Its Impacts on Surface Runoff in Rural Areas of the Upper Citarum Watershed (Case Study: Cirasea Sub-watershed). *Journal of Regional and City Planning*, 32, 36–55.
<https://doi.org/10.5614/jpwk.2021.32.1.3>
- Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po. (2021). *Piano stralcio per l'assetto idrogeologico (PAI)*. <https://pai.adbpo.it/>
- Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po. (2009). *EDIFICI IN AREE A RISCHIO DI ALLUVIONE COME RIDURNE LA VULNERABILITÀ*.
<https://pianoalluvioni.adbpo.it/ridurre-la-vulnerabilita-degli-edifici-presenti-aree-rischio-alluvione/>
- Autorità di Bacino distrettuale del fiume Po. (2023, ottobre). *Mappe della pericolosità e del rischio di alluvione 2021 (PGRA)*. <https://pianoalluvioni.adbpo.it/mappe-della-pericolosita-e-del-rischio-di-alluvione/>
- AUTORITÀ DI BACINO DISTRETTUALE DELL'APPENNINO SETTENTRIONALE. (2021). *Disciplina di Piano (PGRA 2021 2027)*.
https://www.appenninosettentrionale.it/itc/?page_id=1512
- Borselli, L., Cassi, P., & Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *CATENA*, 75(3), 268–277.
<https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2008.07.006>
- Bose, S., & Mazumdar, A. (2023). Urban flood risk assessment and mitigation with InVEST-UFRM model: a case study on Kolkata city, West Bengal state (India). *Arabian Journal of Geosciences*, 16(5). <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11412-2>
- Botticelli, M., Guercio, R., Magini, R., & Napoli, R. (2018). A physically-based approach for evaluating the hydraulic invariance in urban transformations. *International*

Journal of Safety and Security Engineering, 8(4), 536–546.
<https://doi.org/10.2495/SAFE-V8-N4-536-546>

Bundesrepublik Deutschland. (2009). *Wasserhaushaltsgesetz (WHG) - Law on the Management of Water Resources*. https://www.gesetze-im-internet.de/whg_2009/BJNR258510009.html

Cacal, J., Austria, V., & Taboada, E. (2023). Extreme Event-based Rainfall-runoff Simulation Utilizing GIS Techniques in Irawan Watershed, Palawan, Philippines. *Civil Engineering Journal*, 9, 220–232. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-01-017>

Carrà, M., Caselli, B., Rossetti, S., & Zazzi, M. (2023). Widespread Urban Regeneration of Existing Residential Areas in European Medium-Sized Cities. *Sustainability*, 15, 13162.

Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., & Marchi, L. (2013). Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, 188, 31–41. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2012.05.007>

Chapter 3 Time of Concentration and Travel Time. (1986).

Charmes, E. (2007). Le malthusianisme foncier. *Études Foncières*, 125, 12–16.

Chow, V. Te. (1965). Handbook of Applied Hydrology. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, 10(1), 82–83. <https://doi.org/10.1080/02626666509493376>

Città Metropolitana di Bologna. (2024). *Consumo di suolo ai sensi della L.R. 24/17*.

Copernicus Climate Data Store. (2024). *ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present*. <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land-monthly-means?tab=overview>.

Copernicus Land Monitoring Service. (2018). *CORINE Land Cover*. <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover>

Dataset nazionale degli aggregati strutturali italiani | Dipartimento della Protezione Civile. (2024). <https://rischi.protezionecivile.gov.it/it/approfondimento/dataset-nazionale-degli-aggregati-strutturali-italiani/>

- Decoville, A., & Schneider, M. (2016). Can the 2050 zero land take objective of the EU be reliably monitored? A comparative study. *Journal of Land Use Science*, *11*, 331–349.
- Desmet, P. J. J., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, *51*(5), 427–433. <https://doi.org/10.1080/00224561.1996.12457102>;WGROUP:STRING:PUBLICATION
- Dietz, M. E. (2007). Low Impact Development Practices: A Review of Current Research and Recommendations for Future Directions. *Water, Air, and Soil Pollution*, *186*(1), 351–363. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9484-z>
- Dietz, M. E., & Clausen, J. C. (2008). Stormwater runoff and export changes with development in a traditional and low impact subdivision. *Journal of Environmental Management*, *87*(4), 560–566. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2007.03.026>
- Diogo, V., Perpiñá Castillo, C., Baranzelli, C., Silva, B., Rosina, K., Kavalov, B., Lavalle, C., & Jacobs-Crisioni, C. (2017). *The LUISA Territorial Reference Scenario 2017: A Technical Description*.
- Domingo, D., Palka, G., & Hersperger, A. M. (2021). Effect of zoning plans on urban land-use change: A multi-scenario simulation for supporting sustainable urban growth. *Sustainable Cities and Society*, *69*, 102833. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.102833>
- Echavarri, J. P., Daudén, P. J. L., Garcia, E. H., & Moreno, M. B. (1990). The spatial dynamics of land use surrounding the Spanish property bubble (1990-2012). *Investigaciones Regionales-Journal of Regional Research*, (45), 93–117.
- ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present*. (2024). <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land-monthly-means?tab=overview>
- Fan, G., Lin, R., Wei, Z., Xiao, Y., Shangguan, H., & Song, Y. (2022). Effects of low impact development on the stormwater runoff and pollution control. *Science of The Total Environment*, *805*, 150404. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.150404>

-
- Fassi, P., Berro, D., & Antolini, P. (2023). *Gli eventi alluvionali del maggio 2023 in Emilia-Romagna. 3/2023.*
- Felli, A., & Zullo, F. (2024). Legislative Foundations: Exploring Land Take Laws and Urban Regeneration Policies in Italy and Europe. *Land*, 13(5).
<https://doi.org/10.3390/land13050713>
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542.
<https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Gao, Y., Chen, J., Luo, H., & Wang, H. (2020). Prediction of hydrological responses to land use change. *Science of The Total Environment*, 708, 134998.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.134998>
- Gharib, M., Motamedvaziri, B., Ghermezcheshmeh, B., & Ahmadi, H. (2018). Evaluation of ModClark model for simulating rainfall-runoff in Tangrah watershed, Iran. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(2), 1053–1068.
https://doi.org/10.15666/aeer/1602_10531068
- Gibelli, M. C. (2006). L'étalement urbain en Italie entre Villettopoli et délégitimation de l'urbanisme. In *La ville insoutenable* (pagg. 105–118).
- Gibelli, M. C. (2012). Governare l'esodo urbano e il consumo di suolo. Perché? Come? *Visioni e politiche del territorio Per una nuova alleanza tra urbano e rurale*, 92–108.
- Gilewski, P., & Węglarz, A. (2018). Impact of land-cover change related to urbanization on surface runoff estimation. *MATEC Web of Conferences*, 196, 3014.
<https://doi.org/10.1051/matecconf/201819603014>
- Giudice, B., Novarina, G., & Voghera, A. (2017). Reti verdi e blu. Una strategia per la resilienza urbana. In *Un futuro affidabile per la città. Apertura al cambiamento e rischio accettabile nel governo del territorio* (pagg. 104–109). Planum Publisher.

- Gobierno de España. (2010). *Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación*. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2010-11184>
- Gómez-Antonio, M., Hortas-Rico, M., & Li, L. (2016). The Causes of Urban Sprawl in Spanish Urban Areas: A Spatial Approach. *Spatial Economic Analysis*, 11, 219–247.
- Hagenauer, J., & Helbich, M. (2018). Local modelling of land consumption in Germany with RegioClust. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 65, 46–56.
- Hamel, P., Chaplin-Kramer, R., Sim, S., & Mueller, C. (2015). A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA. *Science of the Total Environment*, 524–525, 166–177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.027>
- Hamel, P., Falinski, K., Sharp, R., Auerbach, D. A., Sánchez-Canales, M., & Denedy-Frank, P. J. (2017). Sediment delivery modeling in practice: Comparing the effects of watershed characteristics and data resolution across hydroclimatic regions. *Science of The Total Environment*, 580, 1381–1388. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.12.103>
- HEC-DSSVue. (2024). <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-dssvue/>
- HEC-HMS Tutorials and Guides. (2024). <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsguides>
- Il Giornale dell'Architettura. (2020). *Rigenerazione urbana in Italia: facciamo il punto*. <https://ilgiornaledellarchitettura.com/2020/04/22/rigenerazione-urbana-in-italia-facciamo-il-punto/>
- Importing Gridded SCS Curve Number in HEC-HMS. (2025). <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsguides/gis-tools-and-terrain-data/gis-tutorials-and-guides/importing-gridded-scs-curve-number-in-hec-hms>

-
- InVEST® User Guide — InVEST® documentation.* (2024).
<https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/en/index.html#>
- ISPRA. (2015). *ISPRA: Idrologia, Idromorfologia, Risorse Idriche, Inondazioni e Siccità.* https://www.isprambiente.gov.it/pre_meteo/idro/FD_and_Dlgs.html
- ISPRA. (2020). *Mosaicatura nazionale 2020 pericolosità alluvioni - IDROGEO.*
<https://idrogeo.isprambiente.it/app/page/open-data>
- ISPRA. (2022a). *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio.*
- ISPRA, S. G. d'Italia. (2022b). *GeoSciences IR.* <https://geosciences-ir.it/>
- Jaafar, H. A. F. (2019). *GCN250, global curve number datasets for hydrologic modeling and design.*
https://figshare.com/articles/dataset/GCN250_global_curve_number_datasets_for_hydrologic_modeling_and_design/7756202.
- Jaafar, H. H., Ahmad, F. A., & El Beyrouthy, N. (2019). GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design. *Scientific Data*, 6(1), 145.
<https://doi.org/10.1038/s41597-019-0155-x>
- Kabeja, C., Li, R., Guo, J., Rwatangabo, D. E. R., Manyifika, M., Gao, Z., Wang, Y., Zhang, Y., Kabeja, C., Li, R., Guo, J., Rwatangabo, D. E. R., Manyifika, M., Gao, Z., Wang, Y., & Zhang, Y. (2020). The Impact of Reforestation Induced Land Cover Change (1990–2017) on Flood Peak Discharge Using HEC-HMS Hydrological Model and Satellite Observations: A Study in Two Mountain Basins, China. *Water* 2020, Vol. 12, 12(5). <https://doi.org/10.3390/W12051347>
- Kachhawa, N. S., & Agnihotri, P. G. (2023). A methodology for temporal disaggregation of daily rain gauge data using satellite precipitation product for improved accuracy in hydrologic simulation. *Water Practice and Technology*, 18(12), 3221–3234.
<https://doi.org/10.2166/wpt.2023.199>
- Konstantinos X. Soulis. (2021). *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Method Current Applications, Remaining Challenges, and Future Perspectives.* MDPI AG.

- Kull, D. W., & Feldman, A. D. (1998). Evolution of Clark's Unit Graph Method to Spatially Distributed Runoff. *Journal of Hydrologic Engineering*, 3(1), 9–19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1998\)3:1\(9\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1998)3:1(9))
- La Svolta. (2023, marzo 23). *La Francia vuole costruire città sulle città*. <https://www.lasvolta.it/2023/03/17/la-francia-vuole-costruire-citta-sulle-citta/>
- López-Vicente, M., Poesen, J., Navas, A., & Gaspar, L. (2013). Predicting runoff and sediment connectivity and soil erosion by water for different land use scenarios in the Spanish Pre-Pyrenees. *CATENA*, 102, 62–73. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2011.01.001>
- Maggio, A. (2023). *Applicazione del concetto di invarianza idraulica e idrologica in Italia*. <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/188364>
- Mascarenhas, A., Haase, D., Ramos, T. B., & Santos, R. (2019a). Pathways of demographic and urban development and their effects on land take and ecosystem services. *Land Use Policy*, 82, 181–194.
- Mascarenhas, A., Haase, D., Ramos, T. B., & Santos, R. (2019b). Pathways of demographic and urban development and their effects on land take and ecosystem services: The case of Lisbon Metropolitan Area, Portugal. *Land Use Policy*, 82, 181–194. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2018.11.056>
- Meyer, M. A., Lehmann, I., Seibert, O., & Früh-Müller, A. (2021). Spatial Indicators to Monitor Land Consumption for local Governance in Southern Germany. *Environmental Management*, 68(5), 755–771. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01460-3>
- Michailidi, E. M., Antoniadis, S., Koukouvinos, A., Bacchi, B., & Efstratiadis, A. (2018). Timing the time of concentration: shedding light on a paradox. *Hydrological Sciences Journal*, 63(5), 721–740. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1450985;WGROU:STRING:PUBLICAT ION>
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza energetica (MASE). (2025). *Autorità di bacino distrettuali*. <https://www.mase.gov.it/portale/autorit%C3%A0-di-bacino-distrettuali>

-
- Mishra, S. K., Singh, V. P., Sansalone, J. J., & Aravamuthan, V. (2003). A Modified SCS-CN Method: Characterization and Testing. *Water Resources Management*, 17(1), 37–68. <https://doi.org/10.1023/A:1023099005944>
- Mishra, S. K., Singh, V. P., & Singh, P. K. (2018). *Revisiting the Soil Conservation Service Curve Number Method* (pagg. 667–693). https://doi.org/10.1007/978-981-10-5801-1_46
- Montaldi, C. (2023). Consumo di suolo: Un complesso quadro di politiche, definizioni e soglie. *Territorio*, 103, 147–156.
- Moraes, I., Corrêa, E., Conceição, F., & Rossetti, L. (2013). *Geotechnology applied to land use and sealing in urban areas*. 99–102. <https://doi.org/10.1109/JURSE#.2013.6550675>
- Motevalli, S., Hosseinzadeh, M. M., Esmaili, R., Derafshi, K., Gharehchahi, S., & Prof, A. (2012). Assessing the Effects of Land use Change on Hydrologic Balance of Kan Watershed using SCS and HEC-HMS Hydrological Models-Tehran, IRAN. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 6(8), 510–519.
- Munafò, M. (2023). *Consumo di Suolo, Dinamiche Territoriali e Servizi Ecosistemici*.
- Narayan Shrestha, M. (2003). *Spatially Distributed Hydrological Modelling considering Land-use changes using Remote Sensing and GIS*.
- Natural Capital Project, S. U. U. of M. C. A. of S. T. N. C. W. W. F. S. R. C. and the R. S. A. of Sciences. (2024). *InVEST®*. <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>.
- Naumann, S., Frelih-Larsen, A., & Prokop, G. (2019). *Land Take and Soil Sealing—Drivers, Trends and Policy Instruments*. Springer.
- Nicolau, R., & Condessa, B. (2022). Monitoring Net Land Take: Is Mainland Portugal on Track to Meet the 2050 Target? *Land*, 11, 1005.
- Normattiva. (1989). *Legge 18 maggio 1989, n. 183*. <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:legge:1989-05-18;183>

- Normattiva. (2010). *Decreto Legislativo 23 febbraio 2010, n. 49*.
<https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2010-02-23;49>
- Normattiva. (2014). *Decreto Legislativo 14 marzo 2014, n. 49*.
<https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2014-03-14;49>
- Novarina, G. (2015). Quando il paesaggio si dissolve nell'ecologia. *Sentieri urbani*, 22–27.
- OECD. (2017). *Land-Use Planning System in the OECD: Country Fact Sheets*. OECD Publishing.
- Pal, B., Samanta, S., & Pal, D. K. (2012). MORPHOMETRIC AND HYDROLOGICAL ANALYSIS AND MAPPING FOR WATUT WATERSHED USING REMOTE SENSING AND GIS TECHNIQUES. In *International Journal of Advances in Engineering & Technology* (Vol. 357).
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., & Montanarella, L. (2015). Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*, 48, 38–50.
<https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2015.05.021>
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., van der Zanden, E. H., Poesen, J., & Alewell, C. (2015). Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Environmental Science & Policy*, 51, 23–34. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2015.03.012>
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Lim, K. J., Yang, J. E., Ni, J., Miao, C., Chattopadhyay, N., Sadeghi, S. H., Hazbavi, Z., Zabihi, M., Larionov, G. A., Krasnov, S. F., Gorobets, A. V., Levi, Y., Erpul, G., Birkel, C., ... Ballabio, C. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/S41598-017-04282-8>
- Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., & Alewell, C. (2014). Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. *Science of the*

-
- Total Environment*, 479–480(1), 189–200.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.010>
- Pappalardo, V., La Rosa, D., & Campisano, A. (2017). Land use changes and flood risk in Mediterranean environments. *Environmental Science & Policy*, 75, 1–10.
- Parisay, Z., Sheikh, V., Ownegh, M., & Bahremand, A. (2014). Flood Hazard Zonation by Combining Mod-Clark and HEC-RAS Models in Bustan Dam Basin, Golestan Province. *Water and Soil*, 28(4), 729–741.
<https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.28016>
- Parlamento Europeo. (2007, ottobre 23). *Direttiva Alluvioni - 2007/60*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=celex:32007L0060>
- Pellegrini, L. (2021). *Urbanistica: Le Leggi Regionali a Confronto per il Buon Governo del Paese*. Il Sole 24 Ore.
- Petroselli, A., & Ioannilli, M. (2019). Strumenti innovativi a supporto delle politiche di rigenerazione urbana. *Proceedings of the XXI SIU National Conference*, 519–526.
- Pistocchi, A., Calzolari, C., Malucelli, F., & Ungaro, F. (2015). Soil sealing and flood risks in the plains of Emilia-Romagna, Italy. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 398–409. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.06.021>
- Poelmans, L., & Van Rompaey, A. (2011). The relative impact of land-use change and climate change on river runoff in small catchments: A scenario-based modelling approach. *Hydrological Processes*, 25(18), 2844–2858.
<https://doi.org/10.1002/hyp.8046>
- Ponce, J. (2004). Land Use Law, Liberalization, and Social Cohesion Through Affordable Housing in Europe: The Spanish Case. *Urban Lawyer*, 36, 317–340.
- Ponce, V. M., & Hawkins, R. H. (1996). Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11–19.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11))
- Postiguillo, J. (2020). The Urban Planning and its Evolution in Spain. *Global Journal of Engineering Science*, 5, 1–2.

- Prokop, G., Heide Jobstmann, H., & Schönbauer, A. (2011). *Report on Best Practices for Limiting Soil Sealing and Mitigating Its Effects*.
- Quagliolo, C., Comino, E., & Pezzoli, A. (2021). Experimental Flash Floods Assessment Through Urban Flood Risk Mitigation (UFRM) Model: The Case Study of Ligurian Coastal Cities. *Frontiers in Water*, 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.663378>
- Raju, R. S., Raju, G., & M., R. (2018). Estimation of Rainfall Runoff using SCS-CN Method with RS and GIS Techniques for Mandavi Basin in YSR Kadapa District of Andhra Pradesh, India. *Hydrospatial Analysis*, 2. <https://doi.org/10.21523/gcj3.18020101>
- Raju R., S., Raju G., S., & M., R. (2018). Estimation of Rainfall Runoff using SCS-CN Method with RS and GIS Techniques for Mandavi Basin in YSR Kadapa District of Andhra Pradesh, India. *Hydrospatial Analysis*, 2(1), 1–15. <https://doi.org/10.21523/gcj3.18020101>
- Regione Emilia-Romagna. (2023a). *Aree allagate — Geoportale*. <https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/catalogo/dati-cartografici/informazioni-geoscientifiche/zone-a-rischio-naturale/aree-allagate>
- Regione Emilia-Romagna. (2024b). *SINTESI PRG - Zone Urbanistiche (Zonurb) - Dataset - minERva*. <https://datacatalog.regione.emilia-romagna.it/catalogCTA/dataset/sintesi-prg-zone-urbanistiche-zonurb-1496994479913-6587>
- Regione Emilia-Romagna. (2025a, giugno 26). *Autorità Bacini Romagnoli*. <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/suolo-bacino/sezioni/piani-di-bacino/autorita-bacini-romagnoli/piano-di-bacino>
- Regione Emilia-Romagna. (2025b, giugno 26). *Piani di bacino Autorità bacino Reno*. <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/suolo-bacino/sezioni/piani-di-bacino/autorita-bacino-reno>
- Regione Emilia-Romagna. (2025c, giugno 27). *Piani di Bacino*. <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/suolo-bacino/sezioni/piani-di-bacino>
<https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/suolo-bacino/sezioni/piani-di-bacino>

-
- Renard, K., Foster, G., Weesies, G., McCool, D., & Yoder, D. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Handbook No. 703*, 404. https://books.google.com/books/about/Predicting_Soil_Erosion_by_Water.html?hl=it&id=m9IIscBRmn8C
- République Française. (2011). *Code de l'environnement*. https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006074220/LEGI_SCTA000022479454/2024-06-14
- République Française. (2014). *Loi n° 2014-58 du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles (MAPTAM)*. <https://www.loire-atlantique.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Environnement/Eaux-et-milieux-aquatiques/Politiques-de-l-eau/GEMAPI/Qu-est-ce-que-la-competence-GEMAPI>
- Riechel, M., Matzinger, A., Pallasch, M., Joswig, K., Pawlowsky-Reusing, E., Hinkelmann, R., & Rouault, P. (2020). Sustainable urban drainage systems in established city developments: Modelling the potential for CSO reduction and river impact mitigation. *Journal of Environmental Management*, 274, 111207. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.111207>
- Romagna, E.-, & Staffilani, F. (2019). *CARTA DELL'EROSIONE IDRICA ATTUALE DELLA REGIONE*. <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/suoli/suoli-pianificazione/protezio->
- Romano, B., Fiorini, L., & Marucci, A. (2019). Italy without Urban 'Sprinkling'. A Uchronia for a Country that Needs a Retrofit of Its Urban and Landscape Planning. *Sustainability*, 11, 3469.
- Romano, B., Fiorini, L., Zullo, F., & Marucci, A. (2017). Una valutazione delle dinamiche di consumo di suolo in Italia: Gli esiti della ricerca DICEAA. In *Caring for Our Soil: Aver Cura della Natura dei Territori* (pagg. 19–28). WWF Italia Onlus.
- Romano, B., Zullo, F., Ciabò, S., Fiorini, L., & Marucci, A. (2015). Geografie e modelli di 50 anni di consumo di suolo in Italia. *Scienze Regionali*, 6, 17–28.

- Ross, C. W. , L. P. J. Y. A. S. S. K. W. J. and N. P. H. (2018). *Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling*.
- Rosso, F., Mannucci, S., Morganti, M., Mariani, S., Cecere, C., & Ferrero, M. (2019). The effect of Sustainable Urban Drainage Systems on outdoor comfort and runoff. *Journal of Physics: Conference Series*, 1343(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012023>
- Sabol, G. V. (1988). Clark Unit Hydrograph and R-Parameter Estimation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(1), 103–111. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:1\(103\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:1(103))
- Salvati, L., Morelli, V. G., Rontos, K., & Sabbi, A. (2017). Latent exurban development: City expansion along the rural-to-urban gradient in growing and declining regions of southern Europe. *Land Use Policy*, 67, 389–401. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.010>
- Sannolo, A. , B. C. , & D. R. D. (2020). *Zéro artificialisation nette target, toward circular cities and territories*.
- Schorcht, M., Krüger, T., & Meinel, G. (2016). Measuring Land Take. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5, 134.
- SNPA (Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente). (2025). *CONSUMO DI SUOLO, DINAMICHE TERRITORIALI E SERVIZI ECOSISTEMICI. EDIZIONE 2025*. <https://www.snpambiente.it/pubblicazioni/consumo-di-suolo-dinamiche-territoriali-e-servizi-ecosistemici-edizione-2025/>
- Soomro, A. G., Babar, M. M., Memon, A., Zaidi, A. Z., Ashraf, A., & Lund, J. (2019). Sensitivity of Direct Runoff to Curve Number Using the SCS-CN Method. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 5(12), 2738–2746. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091445>
- Sougnez, N., van Wesemael, B., & Vanacker, V. (2011). Low erosion rates measured for steep, sparsely vegetated catchments in southeast Spain. *CATENA*, 84(1–2), 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2010.08.010>
- Soulis, K. X., & Valiantzas, J. D. (2012). SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds – the two-CN system approach.

-
- Hydrology and Earth System Sciences*, 16(3), 1001–1015.
<https://doi.org/10.5194/hess-16-1001-2012>
- Storm Water Management Model (SWMM) | US EPA*. (2024).
<https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- Tarquini S., I. I. M. F. A. B. G. D. (2023). TINITALY, a digital elevation model of Italy with a 10 meters cell size (Version 1.1). In *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)*. <https://doi.org/https://doi.org/10.13127/tinality/1.1>.
- Thakuriah, G. (2023). Geospatial and Analytical Hierarchical Process approach for potential sites of water harvesting in lower Kuls basin, India. *GeoScape*, 17(1), 58–73. <https://doi.org/10.2478/geosc-2023-0005>
- Tojo, J. F., & Naredo, J. M. (2010). *White Paper on Sustainability in Spanish Urban Planning*. Ministry of Housing.
- United States Department of Agriculture. (2004). *Chapter 7 Hydrologic Soil Groups*.
- Urban Stormwater Retention — InVEST® documentation*. (2024).
<https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/en/stormwater.html>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2024). *HEC-HMS*.
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- U.S. Department of Agriculture, E. R. S. (2024). *Land Use, Land Value & Tenure - Major Land Uses | Economic Research Service*. <https://www.ers.usda.gov/topics/farm-economy/land-use-land-value-tenure/major-land-uses>
- U.S. Department of the Interior. (2005). *National Water-Quality Assessment Program Protocols for Mapping and Characterizing Land Use/ Land Cover in Riparian Zones*.
- USACE Hydrologic Engineering Center. (2021). *CN Tables*.
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/cn-tables>.
- Uso del suolo — Geoportale*. (2024). <https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/catalogo/dati-cartografici/pianificazione-e-catasto/uso-del-suolo>

- Valente, M., Del Prete, C., Facci, G., Martino, A., Grilli, G. R., Bravi, F., Reno, C., & Ragazzoni, L. (2025). The 2023 floods in the Emilia-Romagna Region, Italy: A retrospective qualitative investigation into response strategies and criticalities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *116*, 105089. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2024.105089>
- Vallet, A., Dupuy, S., Verlynde, M., & Gaetano, R. (2024). Generating high-resolution land use and land cover maps for the greater Mariño watershed in 2019 with machine learning. *Scientific Data*, *11*(1), 915. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03750-x>
- van Leeuwen, C. C., Cammeraat, E. L., de Vente, J., & Boix-Fayos, C. (2019). The evolution of soil conservation policies targeting land abandonment and soil erosion in Spain. *Land Use Policy*, *83*, 174–186.
- Vecchietti, S. (2019). *INVARIANZA IDRAULICA: APPROCCIO EDILIZIO-PRIVATO VS. APPROCCIO URBANISTICO-PUBBLICO*.
- Wang, L., & Liu, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, *20*(2), 193–213. <https://doi.org/10.1080/13658810500433453;CTYPE:STRING:JOURNAL>
- Yang, X., Young, J., Shi, H., Zhu, Q., Pulsford, I., Chapman, G., Moore, L., Gormley, A. G., Thackway, R., & Shepherd, T. (2024). Estimating sediment delivery ratio using the RUSLE-IC-SDR approach at a complex landscape: A case study at the Lower Snowy River area, Australia. *Journal of Hydrology*, *645*, 132237. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2024.132237>
- Zabel, R., & Kwon, Y. (2021). Evolution of urban development and regeneration funding programs in German cities. *Cities*, *111*, 103008.
- Zahmatkesh, Z., Burian, S. J., Karamouz, M., Tavakol-Davani, H., & Goharian, E. (2015). Low-Impact Development Practices to Mitigate Climate Change Effects on Urban Stormwater Runoff: Case Study of New York City. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *141*(1), 4014043. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000770](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000770)

Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., De Keersmaecker, W., Brockmann, C., Kirches, G., Wevers, J., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Lesiv, M., Herold, M., Tsendbazar, N.-E., Xu, P., Ramoino, F., & Arino, O. (2022). *ESA WorldCover 10 m 2021 v200*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7254221>

Zhou, Q. (2014). A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts. *Water*, 6(4), 976–992. <https://doi.org/10.3390/w6040976>

APPENDICE A – LEGGI REGIONALI SU CONSUMO DI SUOLO E RIGENERAZIONE URBANA

REGIONE	NORMATIVA	CONSUMO DI SUOLO	RIGENERAZIONE URBANA
ABRUZZO	<p>Legge Regionale 20 dicembre 2023, n. 58</p> <p><i>Nuova Legge Urbanistica del Territorio</i></p>	<p><u>Art.8:</u> il consumo di suolo è dato dal saldo tra le aree per le quali la pianificazione urbanistica prevede la trasformazione insediativa al di fuori del perimetro del territorio urbanizzato, di cui all'articolo 39, e quelle per le quali la medesima pianificazione stabilisca una destinazione che richieda, all'interno del medesimo perimetro, interventi di desigillazione, attraverso la rimozione dell'impermeabilizzazione del suolo. Non concorrono alla costituzione del consumo di suolo ai sensi del comma 2 le aree che sono utilizzate per la realizzazione di interventi all'interno del perimetro del territorio urbanizzato e le aree poste al di fuori del territorio urbanizzato necessarie per realizzare i seguenti interventi: a) opere pubbliche e opere qualificate di interesse pubblico;</p> <p>b) interventi di ampliamento e ristrutturazione di fabbricati adibiti all'esercizio di impresa per lo sviluppo di attività già insediate ai sensi dell'articolo 8 del decreto del Presidente della Repubblica 7 settembre 2010 n. 160</p> <p>c) fabbricati nel territorio rurale funzionali all'esercizio dell'attività agricola nei limiti di quanto previsto dal Titolo IV; d) interventi di edilizia residenziale sociale, comprensivi della quota di edilizia libera indispensabile per assicurare la sostenibilità economico finanziaria dell'intervento; e) parchi urbani ed altre dotazioni ecologico ambientali</p>	<p><u>Art.9:</u> La rigenerazione e la riqualificazione urbana si realizzano mediante i seguenti interventi che possono riguardare aree ed edifici sia pubblici che privati:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Interventi di riuso edilizio; -Interventi di ristrutturazione urbanistica; -Interventi di addensamento o sostituzione urbana, consistenti nei processi di riqualificazione, come la modifica del disegno dei lotti, degli spazi aperti e della rete stradale, la delocalizzazione degli immobili collocati in aree soggette a rischio ambientale e industriale, la demolizione senza ricostruzione di edifici collocati in areali caratterizzati da un'eccessiva concentrazione insediativa.

REGIONE	NORMATIVA	CONSUMO DI SUOLO	RIGENERAZIONE URBANA
BASILICATA	<p>Legge Regionale 27 gennaio 2015, n. 4</p> <p><i>Collegato alla legge di stabilità regionale 2015 (Piano Casa)</i></p>	<p>NESSUNA DEFINIZIONE DI CONSUMO DI SUOLO</p>	<p>Art.4 bis: 1. La Regione Basilicata, per le finalità di cui all'art. 1, in deroga agli strumenti urbanistici comunali vigenti e all' art. 44 della L.R. n. 23/1999, promuove ed incentiva la riqualificazione di aree urbane degradate, mediante la formazione di programmi di riqualificazione urbana coerenti con le strategie comunali ed il coinvolgimento di soggetti pubblici e privati interessati.</p> <p>2. I programmi di riqualificazione urbana di cui al presente articolo sono strumenti volti a promuovere il recupero di parti significative di città o aree degradate mediante interventi organici in grado di affrontare in modo integrato: a) la riqualificazione dell'ambiente costruito, attraverso il risanamento del patrimonio edilizio ed il cambio d'uso degli immobili purché compatibile o complementare con le destinazioni d'uso prevalenti dell'area; b) la riqualificazione degli spazi pubblici, garantendo la tutela, valorizzazione e fruizione del patrimonio storicoculturale, paesaggistico, ambientale; c) il recupero e riqualificazione degli edifici di grandi dimensioni o complessi edilizi dismessi; d) la riorganizzazione dell'assetto urbanistico attraverso il recupero o la realizzazione di urbanizzazioni, spazi verdi e servizi e la previsione delle relative modalità di gestione.</p>

REGIONE	NORMATIVA	CONSUMO DI SUOLO	RIGENERAZIONE URBANA
<p style="text-align: center;">CALABRIA</p>	<p style="text-align: center;">Legge Regionale 7 luglio 2022, n. 25</p> <p style="text-align: center;"><i>Norme per la rigenerazione urbana e territoriale, la riqualificazione e il riuso.</i></p>	<p>Art.2. Consumo di suolo: variazione da una copertura non artificiale o suolo non consumato a una copertura artificiale del suolo o suolo consumato; trasformazione mediante la realizzazione, dentro e fuori terra, di costruzioni, infrastrutture e servizi, o provocata da azioni quali l'escavazione, l'asportazione, il compattamento, l'impermeabilizzazione; modifica o perdita della superficie agricola, naturale, seminaturale o libera, a seguito di contaminazione, inquinamento o depauperamento; resta ferma la distinzione fra consumo di suolo permanente e consumo di suolo reversibile.</p>	<p>Art.2: Rigenerazione urbana e territoriale: la rigenerazione urbana è un complesso sistematico di trasformazioni urbanistiche ed edilizie che concorrono a contenere il consumo di suolo e secondo criteri che utilizzino metodologie e tecniche relative alla sostenibilità ambientale, anche mediante azioni di rinaturalizzazione dei suoli consumati in modo reversibile, con il recupero dei servizi ecosistemici persi tramite la deimpermeabilizzazione, la bonifica, l'innalzamento del potenziale ecologico-ambientale e della biodiversità urbana; l'insieme degli interventi che interessa complessi di più edifici che conducano almeno alla ristrutturazione urbanistica ai sensi articolo 3, comma 1, lettera f), del decreto del Presidente della Repubblica 6 giugno 2001, n. 380 ovvero delle aree di crisi oggetto di rigenerazione urbana, si configura quale intervento di rigenerazione urbana e territoriale, finalizzato alla definizione di un nuovo disegno di parte della città e inteso come volto a progettare l'uso ottimale degli edifici e degli spazi liberi, pubblici e privati, mediante un insieme di interventi diretti a rivitalizzare e qualificare il territorio dal punto di vista urbanistico, edilizio, socio-economico, identitario, prevedendo una significativa trasformazione che può comportare, in via esemplificativa: la modificazione del disegno dei lotti, degli isolati, degli spazi aperti e della rete stradale; la delocalizzazione degli immobili collocati in aree soggette a rischio ambientale e industriale; la demolizione senza ricostruzione di edifici collocati in areali caratterizzati da un'eccessiva concentrazione insediativa, con l'eventuale trasferimento delle quantità edificatorie; l'inserimento di nuove funzioni e la realizzazione o adeguamento delle dotazioni territoriali, delle infrastrutture e dei servizi pubblici nonché l'attuazione di interventi di edilizia residenziale sociale.</p>

REGIONE	NORMATIVA	CONSUMO DI SUOLO	RIGENERAZIONE URBANA
CAMPANIA	<p>Legge Regionale 29 aprile 2024, n.5</p> <p><i>Modifiche alla Legge Regionale 22 dicembre 2004, n. 16 recante Norme sul Governo del territorio</i></p>	<p>Art. 2 ter: Il consumo di suolo è definito dall'incremento del territorio interessato da interventi di edificazione, impermeabilizzazione, copertura artificiale, scavo o rimozione tali da comprometterne le funzioni ecosistemiche e le potenzialità produttive agricole.</p>	<p>Art. 4 (Interventi edilizi di rigenerazione urbana) : Al fine di promuovere e agevolare la riqualificazione di aree urbane degradate con presenza di funzioni eterogenee e tessuti edilizi disorganici o incompiuti nonché di edifici dismessi o in via di dismissione ovvero da rilocalizzare, sono consentiti interventi di: a) riqualificazione e recupero di edifici, anche con demolizione e ricostruzione o da rilocalizzare; b) recupero, riutilizzo e razionalizzazione dei complessi immobiliari dismessi o da rilocalizzare, anche con demolizione e ricostruzione; c) adeguamento degli immobili esistenti alla normativa di sicurezza; d) miglioramento sismico, ambientale, architettonico ed efficientamento energetico del patrimonio edilizio esistente, anche con demolizione e ricostruzione. I processi di rigenerazione urbana attuano la concertazione degli interessi pubblici e privati, promuovono il convenzionamento di servizi privati di pubblica utilità e incentivano la partecipazione della cittadinanza.</p>

REGIONE	NORMATIVA	CONSUMO DI SUOLO	RIGENERAZIONE URBANA
<p style="text-align: center;">EMILIA ROMAGNA</p>	<p style="text-align: center;">Legge Regionale 21 dicembre 2017, n.24</p> <p style="text-align: center;"><i>Disciplina regionale sulla tutela e l'uso del territorio</i></p>	<p>Art.5: Il consumo di suolo è dato dal saldo tra le aree per le quali la pianificazione urbanistica attuativa prevede la trasformazione insediativa al di fuori del perimetro del territorio urbanizzato, di cui all'articolo 32, commi 2 e 3, e quelle per le quali la medesima pianificazione stabilisca una destinazione che richieda, all'interno del medesimo perimetro, interventi di desigillazione, attraverso la rimozione dell'impermeabilizzazione del suolo.</p> <p>Art.6: Il nuovo consumo di suolo dovrà essere contenuto entro il 3% del territorio urbanizzato (e non più pari all'11%, come previsto precedentemente dagli strumenti urbanistici) e sarà consentito solo per i progetti capaci di sostenere lo sviluppo e l'attrattività del territorio. Sono esclusi dal limite: le opere pubbliche di rilievo sovracomunale, le opere qualificate dalla normativa vigente di interesse pubblico; gli interventi di ampliamento e ristrutturazione di fabbricati adibiti all'esercizio di impresa; i nuovi insediamenti produttivi di interesse strategico regionale; i parchi urbani ed altre dotazioni ecologico ambientali; i fabbricati nel territorio rurale funzionali all'esercizio delle imprese agricole; gli interventi per il parziale recupero della superficie di edifici non più funzionali all'attività agricola.</p>	<p>Art.7: Ai fini della presente legge, costituiscono interventi di riuso e rigenerazione urbana le seguenti tipologie di trasformazioni edilizie e urbanistiche dei tessuti urbani esistenti:</p> <p>a) gli interventi di "qualificazione edilizia", diretti a realizzare la demolizione e ricostruzione di uno o più fabbricati che presentino una scarsa qualità edilizia, non soddisfacendo i requisiti minimi di efficienza energetica, sicurezza sismica, abbattimento delle barriere architettoniche, igienico-sanitari e di sicurezza degli impianti, previsti dalla normativa vigente, nonché gli interventi conservativi che, senza prevedere la demolizione dell'edificio originario, consentono comunque di realizzare i miglioramenti dell'efficienza energetica, della sicurezza sismica e degli altri requisiti tecnici richiesti dalla normativa vigente ai fini dell'agibilità;</p> <p>b) gli interventi di "ristrutturazione urbanistica", comprensivi degli interventi di costruzione;</p> <p>c) gli interventi di "addensamento o sostituzione urbana", che, con particolare riferimento ad aree strategiche della città ovvero ad aree degradate, marginali, dismesse o di scarsa utilizzazione edificatoria, prevedono una loro significativa trasformazione che può comportare, in via esemplificativa; l'inserimento di nuove funzioni e la realizzazione o adeguamento delle dotazioni territoriali, delle infrastrutture e dei servizi pubblici nonché l'attuazione di interventi di edilizia residenziale sociale.</p>
<p style="text-align: center;">FRIULI VENEZIA GIULIA</p>	<p style="text-align: center;">Legge Regionale 21 luglio 2017, n. 29</p> <p style="text-align: center;"><i>Misure per lo sviluppo del sistema territoriale regionale</i></p>	<p style="text-align: center;"><u>NESSUNA DEFINIZIONE DI CONSUMO DI SUOLO</u></p>	<p><<Art. 39 bis <i>(Misure per la valorizzazione del patrimonio edilizio esistente)</i></p> <p>1. Al fine della riqualificazione del patrimonio edilizio esistente e del contenimento del consumo di nuovo suolo, il presente articolo individua misure finalizzate al miglioramento della qualità energetica o igienico-funzionale degli edifici o delle unità immobiliari oggetto di intervento, secondo le leggi di settore, da attuarsi in deroga alle distanze, alle superfici o ai volumi previsti dagli strumenti urbanistici, purché coerenti con le esigenze di allineamento e ottimale inserimento nel contesto territoriale di riferimento.</p>

REGIONE	NORMATIVA	CONSUMO DI SUOLO	RIGENERAZIONE URBANA
LAZIO	<p>Legge Regionale 30 luglio 2025, n.12</p> <p><i>Semplificazioni e misure incentivanti il governo del territorio</i></p>	<p><u>NESSUNA DEFINIZIONE DI CONSUMO DI SUOLO</u></p> <p>Art. 4 bis (Incremento di aree per servizi pubblici o di uso pubblico) I comuni, per ridurre il consumo di nuovo suolo, incrementare la dotazione di alloggi sociali e assicurare una migliore utilizzazione del suolo trasformabile, con la procedura di cui all'articolo 4 possono incrementare la dotazione di aree per servizi pubblici o di uso pubblico, anche attraverso l'utilizzo di zone agricole, limitatamente al soddisfacimento della sola quota di aree per spazi pubblici attrezzati a parco e per il gioco e lo sport di cui all'articolo 3, secondo comma, lettera c), del d.m. 1444/1968.</p>	<p>L'intervento legislativo ha l'obiettivo di semplificare le procedure amministrative (introducendo modifiche alle leggi regionali n. 36/1987, 15/2008 e 21/2009) e incentivare la rigenerazione urbana (apportando modifiche alla legge regionale n. 7/2017), favorendo il recupero e la valorizzazione del patrimonio edilizio esistente, comprese superfici e volumi già realizzati, come sottotetti e seminterrati.</p>
LIGURIA	<p>Legge Regionale 29 novembre 2018 n.23</p> <p><i>“Disposizioni per la rigenerazione urbana e il recupero del territorio agricolo”</i></p>	<p><u>NESSUNA DEFINIZIONE DI CONSUMO DI SUOLO</u></p> <p>Art.1 : La presente legge costituisce un elemento di attuazione del percorso previsto dalla Commissione Europea “Tabella di marcia verso un’Europa efficiente nell’impiego delle risorse” (COM/2011/0571), per giungere entro il 2050 all’obiettivo di edificazione su nuove aree pari a zero.</p>	<p>Art. 7: Negli ambiti urbani individuati per promuovere processi di rigenerazione urbana e rinnovo del patrimonio edilizio devono essere osservati i seguenti criteri applicativi della vigente pianificazione territoriale regionale al fine di assicurare la qualità degli interventi ivi previsti: a) gli interventi devono prevedere un’organica riqualificazione mediante soluzioni architettoniche che innovino l’immagine urbana e la qualità degli spazi pubblici; b) nei contesti storici gli interventi di rigenerazione non devono alterare i caratteri tipologici e architettonici che li connotano, privilegiando l’utilizzo di materiali tipici della produzione locale.</p>

REGIONE	NORMATIVA	CONSUMO DI SUOLO	RIGENERAZIONE URBANA
<p style="text-align: center;">LOMBARDIA</p>	<p style="text-align: center;">Legge Regionale 26 novembre 2019, n. 18</p> <p style="text-align: center;"><i>Misure di semplificazione e incentivazione per la rigenerazione urbana e territoriale, nonché per il recupero del patrimonio edilizio esistente.</i></p>	<p>Art.2: c) consumo di suolo: la trasformazione, per la prima volta, di una superficie agricola da parte di uno strumento di governo del territorio, non connessa con l'attività agro-silvo-pastorale, esclusa la realizzazione di parchi urbani territoriali e inclusa la realizzazione di infrastrutture sovra comunali; il consumo di suolo è calcolato come rapporto percentuale tra le superfici dei nuovi ambiti di trasformazione che determinano riduzione delle superfici agricole del vigente strumento urbanistico e la superficie urbanizzata e urbanizzabile.</p>	<p>Art.2: e) rigenerazione urbana: l'insieme coordinato di interventi urbanistico-edilizi e di iniziative sociali che possono includere la sostituzione, il riuso, la riqualificazione dell'ambiente costruito e la riorganizzazione dell'assetto urbano attraverso il recupero delle aree degradate, sottoutilizzate o anche dismesse, nonché attraverso la realizzazione e gestione di attrezzature, infrastrutture, spazi verdi e servizi e il recupero o il potenziamento di quelli esistenti, in un'ottica di sostenibilità e di resilienza ambientale e sociale, di innovazione tecnologica e di incremento della biodiversità dell'ambiente urbano; e bis) rigenerazione territoriale: l'insieme coordinato di azioni, generalmente con ricadute sovralocali, finalizzate alla risoluzione di situazioni di degrado urbanistico, infrastrutturale, ambientale, paesaggistico o sociale che mira in particolare a salvaguardare e ripristinare il suolo e le sue funzioni ecosistemiche e a migliorare la qualità paesaggistica ed ecologica del territorio, nonché dei manufatti agrari rurali tradizionali, per prevenire conseguenze negative per la salute umana, gli ecosistemi e le risorse naturali.</p> <p>Art.3: incentiva gli interventi di rigenerazione urbana di elevata qualità ambientale, prevedendo, tra l'altro, la valorizzazione e lo sviluppo di infrastrutture verdi multifunzionali, con particolare riferimento alla rete verde e alla rete ecologica, in connessione con il sistema urbano e ambientale esistente.</p>

REGIONE	NORMATIVA	CONSUMO DI SUOLO	RIGENERAZIONE URBANA
MARCHE	<p>Legge Regionale 30 novembre 2023, n. 19</p> <p><i>Norme della pianificazione per il governo del territorio</i></p>	<p>Art.6 2. a) "consumo di suolo", la variazione da una copertura non artificiale (suolo non consumato) a una copertura artificiale del suolo (suolo consumato), con la distinzione fra consumo di suolo permanente (dovuto a una copertura artificiale permanente) e consumo di suolo reversibile (dovuto a una copertura artificiale reversibile).</p>	<p>Art.6 7. In attuazione e nel rispetto delle previsioni di cui ai commi 5 e 6, gli strumenti di pianificazione comunale devono prevedere il consumo di suolo esclusivamente in assenza di alternative, nei casi in cui non sussistano le condizioni per attuare interventi di rigenerazione urbana e territoriale o di riorganizzazione delle infrastrutture esistenti, ferme restando le misure compensative di cui al comma 3.</p> <p>Art.25 1. Gli strumenti di pianificazione di cui a questa legge sono finalizzati prioritariamente alla rigenerazione urbana e territoriale, quale modalità integrata di governo del territorio per il contrasto al consumo di suolo, la riqualificazione dei sistemi insediativi e infrastrutturali esistenti e per l'eliminazione di situazioni di degrado. La rigenerazione urbana e territoriale si realizza attraverso strategie, azioni, regole e progettualità finalizzate al perseguimento di obiettivi di prevenzione e mitigazione del rischio sismico e idro-geomorfologico, di qualità paesaggistica, ecologica, urbanistica, edilizia e architettonica, di promozione dello sviluppo sostenibile, di equità sociale e del diritto all'abitazione, anche attraverso la realizzazione di interventi di edilizia residenziale sociale e pubblica. 2. Gli interventi di rigenerazione urbana e territoriale sono individuati e attuati in conformità ai regimi di tutela previsti dal d.lgs. 42/2004 e nel rispetto del PPR.</p>
MOLISE	Non risultano leggi inerenti	-	-

REGIONE	NORMATIVA	CONSUMO DI SUOLO	RIGENERAZIONE URBANA
PIEMONTE	<p>Legge Regionale 31 maggio 2022, n. 7</p> <p><i>Norme di semplificazione in materia urbanistica ed edilizia</i></p>	<p><u>NESSUNA DEFINIZIONE DI CONSUMO DI SUOLO</u></p>	<p>Art. 14: Al fine di promuovere e agevolare la riqualificazione di aree urbane degradate e lo sviluppo di ambiti strategici, anche per aumentarne l'attrattiva sociale ed economica e garantire una rete di servizi commerciali al cittadino, di servizi e attrezzature innovative al territorio, assicurando la massima integrazione tra rete distributiva e ambiente urbano, i comuni individuano ambiti di territorio su cui promuovere programmi di rigenerazione urbana, sociale, architettonica, paesaggistica e di deimpermeabilizzazione dei suoli, tramite azioni partecipative di consultazione preventiva delle comunità interessate dalla realizzazione degli interventi e di concerto con gli operatori privati. Con tali programmi i comuni individuano spazi, purchè siano compresi nello strumento urbanistico generale con una destinazione d'uso diversa da quella agricola, ed edifici, anche inutilizzati, legittimamente costruiti, ma ritenuti incongrui, per dimensioni o tipologie, con il contesto edilizio circostante, da riqualificare in funzione di una maggiore efficienza energetica, strutturale, ambientale o a fini sociali, per i quali gli strumenti urbanistici possono prevedere interventi di demolizione, totale o parziale, e di ricostruzione secondo un progetto complessivo e organico finalizzato al nuovo assetto urbanistico generale dell'ambito d'intervento. Gli ambiti di territorio di cui al presente comma possono essere proposti anche da soggetti privati mediante la presentazione di progetti da inserire nei programmi di rigenerazione urbana. I comuni definiscono i tempi entro cui concludere la consultazione preventiva e pubblicare gli esiti del dibattito.</p>

REGIONE	NORMATIVA	CONSUMO DI SUOLO	RIGENERAZIONE URBANA
<p align="center">PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO</p>	<p align="center">Legge Provinciale 10 luglio 2018, n.9</p> <p align="center"><i>Territorio e Paesaggio</i></p>	<p>Art.1: <i>Per consumo di suolo si intendono gli interventi di impermeabilizzazione, urbanizzazione ed edificazione.</i> Il consumo di suolo all'esterno dell'area insediabile non connesso all'attività agricola può essere ammesso esclusivamente se è necessario e se non sussistono alternative economicamente ed ecologicamente ragionevoli, mediante interventi di riuso, recupero, adeguamento o densificazione degli insediamenti esistenti, anche ricorrendo all'espropriazione di immobili non utilizzati in conformità agli obiettivi della pianificazione comunale. I relativi atti devono essere motivati con specifico riferimento alla sussistenza delle predette condizioni.</p>	<p>Art.59: Gli interventi di riqualificazione urbanistica possono essere volti ad incentivare la razionalizzazione e valorizzazione del patrimonio edilizio esistente, degli spazi pubblici e delle aree verdi e a promuovere ed agevolare la rigenerazione delle aree già urbanizzate con le seguenti finalità: favorire il riuso delle aree già urbanizzate e renderne attrattiva la trasformazione; favorire la densificazione delle aree urbane; mantenere e incrementare l'attrattività dei quartieri, favorendo la pluralità delle relative funzioni; riqualificare le connessioni con il contesto urbano.</p>
<p align="center">PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO</p>	<p align="center">Legge Provinciale 4 agosto 2015, n.15</p> <p align="center"><i>Legge provinciale per il Governo del Territorio</i></p>	<p>Art.18: prevede che gli strumenti di pianificazione territoriale valorizzino il principio della limitazione del consumo del suolo, cioè <i>il fenomeno di progressiva artificializzazione dei suoli, generato dalle dinamiche di urbanizzazione del territorio, monitorabili attraverso specifici indici.</i> Gli obiettivi di risparmio di consumo del suolo sono perseguiti dalla nuova legge attraverso limiti forti alla previsione di nuove aree di insediamento e produttive nei piani regolatori comunali (PRG), da limitare ai soli casi di mancanza di alternative alla riqualificazione e comunque, per quanto riguarda il residenziale, alla necessità di soddisfare motivate esigenze abitative primarie. In tal caso l'eventuale piano regolatore generale che introduce nuove aree insediative va necessariamente supportato dalla valutazione strategica del piano, al fine di verificare sotto il profilo ambientale, territoriale e socioeconomico le nuove previsioni.</p>	<p>Art.78: Allo scopo di attivare processi di rigenerazione urbana, di riqualificazione di aree urbane degradate, di recupero e valorizzazione di immobili e spazi urbani dismessi o in via di dismissione e per favorire, nel contempo, lo sviluppo di iniziative economiche, sociali, culturali o di recupero ambientale, il comune può consentire l'utilizzazione temporanea di edifici e aree per usi diversi da quelli previsti dal vigente strumento urbanistico. Tenuto conto delle specificità territoriali o in ragione di esigenze contingenti locali, l'uso temporaneo persegue in particolare il riutilizzo di immobili dismessi per sviluppare progetti di interazione tra innovazione, formazione e produzione culturale, con esclusione di ogni uso abitativo, ricettivo o commerciale.</p> <p>Art.108: Per conseguire obiettivi di riqualificazione e valorizzazione dei contesti abitati, di riduzione del consumo di suolo agricolo, di rigenerazione del tessuto insediativo consolidato e del patrimonio edilizio sotto il profilo funzionale, architettonico, strutturale ed energetico, questa sezione prevede misure di riqualificazione urbana ed edilizia.</p> <p>Fondo per la riqualificazione degli insediamenti storici e del paesaggio e interventi per la conservazione e sistemazione paesaggistica.</p>

REGIONE	NORMATIVA	CONSUMO DI SUOLO	RIGENERAZIONE URBANA
PUGLIA	<p>Legge Regionale 30 aprile 2019, n.18</p> <p><i>Norme in materia di perequazione, compensazione urbanistica e contributo straordinario per la riduzione del consumo di suolo e disposizioni diverse.</i></p>	<p><u>NESSUNA DEFINIZIONE DI CONSUMO DI SUOLO</u></p>	<p>Art.4: 2. Le misure premiali hanno lo scopo di incentivare: a) l'eliminazione di detrattori ambientali; b) la realizzazione di interventi di riqualificazione ambientale; c) la realizzazione di interventi di rigenerazione urbana ai sensi della legge regionale 1° agosto 2008, n. 21 (Norme per la rigenerazione urbana).</p>
SARDEGNA	<p>Legge Regionale 19 dicembre 2023, n.17</p> <p><i>Modifiche alla legge regionale n. 1 del 2023 (Legge di stabilità 2023), variazioni di bilancio, riconoscimento di debiti fuori bilancio e passività pregresse e disposizioni varie</i></p>	<p><u>NESSUNA DEFINIZIONE DI CONSUMO DI SUOLO</u></p>	<p>Art.1 7. La Regione promuove gli interventi di rigenerazione urbana, quale alternativa strategica al nuovo consumo di suolo, attraverso la riqualificazione di aree degradate, la riorganizzazione delle aree dismesse, la riorganizzazione del patrimonio edilizio esistente, il recupero e riqualificazione degli edifici di grandi dimensioni e la riqualificazione delle connessioni con il contesto urbano.</p>

REGIONE	NORMATIVA	CONSUMO DI SUOLO	RIGENERAZIONE URBANA
SICILIA	<p>Legge Regionale 13 agosto 2020, n. 19</p> <p><i>Norme per il governo del territorio</i></p>	<p>Art.34: Il consumo di suolo è dato dal saldo tra le aree per le quali la pianificazione urbanistica attuativa prevede la trasformazione insediativa al di fuori del perimetro del territorio urbanizzato. Il consumo di suolo è consentito, entro il limite massimo del dieci per cento della superficie del territorio urbanizzato, esclusivamente per opere pubbliche e opere qualificate di interesse pubblico dalla normativa vigente, nei soli casi in cui non esistano ragionevoli alternative consistenti nel riuso di aree già urbanizzate e nella rigenerazione delle stesse.</p>	<p>Art.33: La Regione promuove iniziative finalizzate al consumo di suolo tendente a zero anche attraverso la rigenerazione di aree edificate se esse hanno perduto la loro originaria utilizzazione, mediante la riqualificazione dell'ambiente degradato e mediante l'individuazione di nuove funzioni aventi rilevanza strategica, anche in un'ottica di area vasta.</p> <p>Gli interventi di rigenerazione urbana perseguono prioritariamente i seguenti obiettivi:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) potenziare e qualificare la presenza delle aree a verde all'interno dei tessuti urbani; b) sviluppare una mobilità sostenibile, incentrata su un sistema integrato di spostamenti pedonali, ciclabili e sull'accesso alle reti e nodi del trasporto pubblico e della mobilità condivisa; c) conseguire una significativa riduzione dei consumi idrici ed energetici tradizionali, favorendo l'uso di energie rinnovabili e l'autoconsumo; d) realizzare bonifiche di suoli inquinati e la riduzione delle aree impermeabili; e) promuovere un efficiente sistema di raccolta differenziata e smaltimento dei rifiuti, prevedendo appositi spazi da destinare a isole ecologiche o, ove possibile, favorendo l'autogestione del riciclo dei rifiuti; f) dotare le aree di strumenti e modalità per gestire il deflusso delle acque meteoriche, nel rispetto del principio di invarianza idraulica.
TOSCANA	<p>Legge Regionale 10 novembre 2014, n. 65</p> <p><i>Norme per il governo del territorio</i></p>	<p><u>NESSUNA DEFINIZIONE DI CONSUMO DI SUOLO</u></p>	<p>Art.125: La Regione promuove gli interventi di rigenerazione urbana quale alternativa strategica al nuovo consumo di suolo. Concorrono alla rigenerazione urbana gli interventi volti a riqualificare il contesto urbano attraverso un insieme sistematico di opere consistenti in:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) riorganizzazione del patrimonio edilizio esistente; b) riqualificazione delle aree degradate; c) riorganizzazione funzionale delle aree dismesse; d) recupero e riqualificazione degli edifici di grandi dimensioni o complessi edilizi dismessi; e) riqualificazione delle connessioni con il contesto urbano.

REGIONE	NORMATIVA	CONSUMO DI SUOLO	RIGENERAZIONE URBANA
<p style="text-align: center;">UMBRIA</p>	<p style="text-align: center;">Legge Regionale 21 gennaio 2015 n.1</p> <p style="text-align: center;"><i>Testo unico Governo del territorio e materie correlate</i></p>	<p><u>NESSUNA DEFINIZIONE DI CONSUMO DI SUOLO</u></p>	<p>Art.74 1. Gli interventi di ristrutturazione urbanistica ed edilizia finalizzati alla riqualificazione complessiva degli immobili e la rigenerazione urbana di insediamenti prevalentemente residenziali, nonché quelli produttivi e per servizi dismessi, volti a favorire il miglioramento della qualità ambientale e architettonica dello spazio insediato esistente e in modo di evitare il consumo di nuovo suolo, anche con ampliamento della SUC degli edifici esistenti, sono consentiti in deroga agli strumenti di programmazione settoriale in materia di distanze tra attività produttive o per servizi o di limitazioni delle stesse in qualunque modo determinato, nonché agli adempimenti di cui agli articoli 24 e 25 della l.r. 10/2014, fermo restando il rispetto delle norme in materia di igiene, di sanità, di sicurezza e di tutela del patrimonio storico, culturale ed ambientale, compreso l'ambiente urbano e delle condizioni per l'accessibilità.</p>
<p style="text-align: center;">VALLE D'AOSTA</p>	<p style="text-align: center;">Legge Regionale 6 aprile 1998, n. 11</p> <p style="text-align: center;"><i>Normativa urbanistica e di pianificazione territoriale della Valle d'Aosta</i></p>	<p><u>NESSUNA DEFINIZIONE DI CONSUMO DI SUOLO</u></p> <p>Art.1 1. Il PRG, tenuto conto del PTP e ricercando il coordinamento con i PRG dei Comuni confinanti, assicura lo sviluppo sostenibile del territorio attraverso: a) la tutela del paesaggio e dei beni culturali, archeologici, ambientali e naturali e la salvaguardia delle aree adatte agli usi agricoli e agro-silvo-pastorali; a tal fine individua prioritariamente le relative aree da sottoporre a particolare disciplina d'uso e trasformazione; b) il contenimento del consumo del suolo per mezzo della conservazione e della riqualificazione degli insediamenti abitativi esistenti.</p>	<p><u>NESSUNA DEFINIZIONE DI RIGENERAZIONE URBANA</u></p>

REGIONE	NORMATIVA	CONSUMO DI SUOLO	RIGENERAZIONE URBANA
VENETO	<p>Legge regionale 6 giugno 2017, n.14</p> <p><i>Disposizioni per il contenimento del consumo di suolo e modifiche della legge regionale 23 aprile 2004, n. 11</i></p>	<p>Art.2</p> <p>c) consumo di suolo: l'incremento della superficie naturale e seminaturale interessata da interventi di impermeabilizzazione del suolo, o da interventi di copertura artificiale, scavo o rimozione, che ne compromettano le funzioni ecosistemiche e le potenzialità produttive; il calcolo del consumo di suolo si ricava dal bilancio tra le predette superfici e quelle ripristinate a superficie naturale e seminaturale.</p>	<p>Art.7</p> <p>“rigenerazione urbana sostenibile”: i progetti degli interventi per l’attuazione dei programmi di rigenerazione prevedono lo sviluppo di tipologie edilizie urbane a basso impatto energetico e ambientale, la pluralità di funzioni e la qualità architettonica degli edifici e degli spazi pubblici.</p>

APPENDICE B - ACRONIMI

Agenzia Prevenzione Ambiente Energia (ARPAE)
Antecedent Runoff Conditions (ARC)
Condizioni antecedenti medie (ARC II)
Condizioni antecedenti secche (ARC I)
Condizioni antecedenti umide o sature (ARC III)
Corine Land Cover (CLC)
Dotation Globale de Fonctionnement (DGF)
Global Curve Number datasets for hydrologic modeling and design (GCN250)
Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m)
Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)
Hydrologic Soil Groups (HSG)
Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST)
Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA)
Low Impact Development (LID)
Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE)
Modello digitale di elevazione (DEM)
Nature Restoration Law (NRL)
Nature Restoration Regulation (NRR)
Norme Tecniche di Attuazione (NTA)
Obiettivo di Sviluppo Sostenibile (SDG)
Piani di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA)
Piani per l'Assetto Idrogeologico (PAI)
Piano Di Gestione Rischio Alluvioni (PGRA)
Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR)
Schéma de la Cohérence Territoriale (SCOT)
Sediment Delivery Ratio (SDR)
Sistema Informativo Ambientale e Territoriale (SIAT)
Soil Conservation Service SCS-Curve Number (SCS-CN)
System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA)
Taxe Professionnelle Unique (TPU)
Unione Europea (UE)
Unità minima cartografabile (MMU)
United States Department of Agriculture (USDA)
Universal Soil Loss Equation (USLE)
Urban Flood Risk Mitigation (UFRM)
Urban Stormwater Retention (USR)
Wasserhaushaltsgesetz (WHG)
Zero Net Artificialization (ZAN)