

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI
BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Indici morfometrici per la
mappatura della pericolosità idraulica
da allagamento fluviale a scala
regionale: limiti e potenziale

Relatore:
Chiar.mo Prof.
Attilio Castellarin
Correlatore:
Dott. Simone Persiano

Presentata da:
Andrea Magnini

Sessione III
Anno Accademico 2018-2019

Indice

Introduzione	9
1 Rischio alluvionale	13
1.1 Definizione del rischio idraulico	13
1.2 Gestione del rischio alluvionale: normativa di riferimento . . .	16
1.2.1 Mappe PGRA	18
2 Metodi tradizionali per la mappatura della pericolosità alluvionale	21
2.1 Modelli numerici idraulici	22
2.1.1 Modelli 1D	23
2.1.2 Modelli 2D	24
2.1.3 Modelli 3D	27
2.2 Esempio di applicazione a scala di corso d'acqua: Fiume Po .	27
2.3 Esempio di applicazione a scala continentale: Europa	28
3 Metodi speditivi per la mappatura della pericolosità idraulica	31
3.1 Metodi empirici	32
3.2 Remote sensing	32
3.3 Metodi <i>DEM-based</i> basati su indici geomorfici	33
3.4 I modelli digitali di quota del terreno (DEM)	34
3.4.1 DEM SRTM	36
3.4.2 EU DEM	36
3.4.3 MERIT DEM	37
3.5 Analisi idrologica in ambiente GIS	37
3.5.1 Algoritmo D8	38
3.6 Indici geomorfici proposti in letteratura	42
3.7 Metriche prestazionali utilizzate	45

4	Obiettivi e struttura dell'indagine	49
4.1	Disamina di diversi indici morfometrici	50
4.2	Applicazioni del GFI	52
5	Casi di studio	55
5.1	Italia Settentrionale	55
5.2	Applicazioni del GFI	60
5.2.1	Fiume Arga (Spagna)	60
5.2.2	Fiume Reno (Germania)	62
5.2.3	Fiume Po	66
6	Risultati e discussioni	71
6.1	Italia Settentrionale	71
6.1.1	Risultati	71
6.1.2	Discussione	97
6.2	Applicazioni del GFI	102
6.2.1	Fiume Arga (Spagna)	102
6.2.2	Fiume Reno (Germania)	108
6.2.3	Fiume Po	115
7	Conclusioni	123
	Appendice	127
	Ringraziamenti	131
	Bibliografia	137

Elenco delle figure

1.1	Mosaicatura ISPRA: percentuali di territorio regionale associate alle diverse aree a pericolosità idraulica P3, P2, P1 (fonte: ISPRA, 2018)	20
2.1	Schema concettuale di applicazione di un modello idraulico	22
2.2	Diversi schemi di discretizzazione spaziale: strutturata (A), non strutturata (B), flessibile (C)	26
2.3	Schema del procedimento per la realizzazione delle mappe di pericolosità idraulica del JRC	29
3.1	Direzione di massima pendenza secondo l'algoritmo D8	39
3.2	Direzione di drenaggio secondo l'algoritmo D8	40
3.3	Area contribuente secondo l'algoritmo D8	40
3.4	CSA e reticolo idrografico secondo l'algoritmo D8	41
3.5	Bacino afferente ad una certa sezione di chiusura secondo l'algoritmo D8	42
3.6	Esempio di distribuzione statistica dei diversi esiti possibili di un test binario (tratto da test medici)	47
3.7	La curva ROC	48
4.1	Curve ROC degli indici semplici (A) e composti (B) calibrati sulla mappa 2D a scala di bacino (fonte: Manfreda et al., 2015)	52
4.2	Curve ROC degli indici semplici (A) e composti (B) calibrati sulla mappa 2D a scala locale (fonte: Manfreda et al., 2015)	52
5.1	Porzione dell'Italia Settentrionale scelta per la disamina degli indici geomorfici	56
5.2	Rappresentazione dell'Italia Settentrionale tramite MERIT DEM	58
5.3	Mappature della pericolosità idraulica eseguite dei PGRA e del JRC	59
5.4	Bacino del fiume Arga con sezione di chiusura nella città di Pamplona	60

5.5	DEM utilizzati per la descrizione del caso studio di Pamplona (MERIT (A) e EU DEM (B))	61
5.6	Mappa di pericolosità del JRC con tempo di ritorno di 100 anni	62
5.7	Bacino del fiume Reno con sezione di chiusura a nord della città di Colonia	63
5.8	DEMs utilizzati per la descrizione del caso studio di Colonia (MERIT (A) ed EU (B))	64
5.9	Mappe di pericolosità del JRC con tempo di ritorno di 100 anni, opportunamente riscalate a risoluzione di 90 m (A) e 25 m (B)	65
5.10	Bacino del fiume Po con sezione di chiusura alla sua foce . . .	66
5.11	DEM utilizzati per la descrizione del caso studio del Po (MERIT (A) ed SRTM (B))	67
5.12	Mappa di pericolosità prodotta per il corso medio-inferiore del Po, con tempo di ritorno della portata di 100 anni e simulazione della formazione di sei brecce arginali in sinistra idraulica, tra Cremona e Guastalla	68
6.1	Indice HAND calcolato per il Nord Italia	72
6.2	Indice D calcolato per il Nord Italia	73
6.3	Indice TI calcolato per il Nord Italia	74
6.4	Indice LGFI calcolato per il Nord Italia	75
6.5	Indice GFI calcolato per il Nord Italia	76
6.6	Mappa di pericolosità prodotta calibrando H con JRC 100y . .	77
6.7	Mappa di pericolosità prodotta calibrando D con JRC 100y . .	78
6.8	Mappa di pericolosità prodotta calibrando TI con JRC 100y .	79
6.9	Mappa di pericolosità prodotta calibrando LGFI con JRC 100y	80
6.10	Mappa di pericolosità prodotta calibrando GFI con JRC 100y	81
6.11	Mappa di pericolosità prodotta calibrando H con JRC 500y . .	82
6.12	Mappa di pericolosità prodotta calibrando D con JRC 500y . .	83
6.13	Mappa di pericolosità prodotta calibrando TI con JRC 100y .	84
6.14	Mappa di pericolosità prodotta calibrando LGFI con JRC 100y	85
6.15	Mappa di pericolosità prodotta calibrando GFI con JRC 100y	86
6.16	Mappa di pericolosità prodotta calibrando H con PGRA P2 .	87
6.17	Mappa di pericolosità prodotta calibrando D con PGRA P2 .	88
6.18	Mappa di pericolosità prodotta calibrando TI con PGRA P2 .	89
6.19	Mappa di pericolosità prodotta calibrando LGFI con PGRA P2	90
6.20	Mappa di pericolosità prodotta calibrando GFI con PGRA P2	91
6.21	Mappa di pericolosità prodotta calibrando H con PGRA P1 .	92
6.22	Mappa di pericolosità prodotta calibrando D con PGRA P1 .	93
6.23	Mappa di pericolosità prodotta calibrando TI con PGRA P1 .	94

6.24	Mappa di pericolosità prodotta calibrando LGFI con PGRA P1	95
6.25	Mappa di pericolosità prodotta calibrando GFI con PGRA P1	96
6.26	Risultati della calibrazione dei diversi indici sull'Italia Settentrionale	98
6.27	Confronto tra le mappe prodotte da LGFI (sopra) e GFI (sotto) calibrate con JRC 500	99
6.28	Confronto tra le mappe prodotte da GFI calibrando con PGRA P1 (sopra) e JRC 500 (sotto)	101
6.29	GFI calcolato sul bacino del fiume Arga da MERIT (A) e da EU (B)	103
6.30	Mappa di pericolosità del bacino del fiume Arga calcolata da MERIT DEM	104
6.31	Mappa di pericolosità del bacino del fiume Arga calcolata da EU DEM	105
6.32	Metriche prestazionali per la calibrazione sul bacino dell'Arga	105
6.33	Confronto in dettaglio tra le mappe da MERIT ed EU DEM prodotte tramite SaferRIVER	106
6.34	Confronto tra le mappe da MERIT prodotte tramite SaferRIVER e Python	107
6.35	GFI calcolato da MERIT DEM per il bacino del Reno	109
6.36	GFI calcolato da EU DEM per il bacino del Reno	110
6.37	Mappa di pericolosità prodotta dalla calibrazione del GFI da MERIT DEM con JRC 100 per il bacino del Reno	111
6.38	Mappa di pericolosità prodotta dalla calibrazione del GFI da EU DEM con JRC 100 per il bacino del Reno	112
6.39	Confronto tra mappe prodotte da MERIT (A) ed EU a 25 m (B)	113
6.40	Confronto tra mappe prodotte da MERIT (A) ed EU a 90 m (B)	114
6.41	Metriche prestazionali delle calibrazioni del GFI da MERIT ed EU a 90 m con JRC 100	115
6.42	GFI calcolato sul bacino del Po a partire da MERIT DEM	116
6.43	GFI calcolato sul bacino del Po a partire da SRTM DEM	117
6.44	Pericolosità idraulica stimata da GFI a partire da MERIT DEM, con calibrazione locale	118
6.45	Pericolosità idraulica stimata da GFI a partire da SRTM DEM, con calibrazione locale	119
6.46	Metriche prestazionali per la calibrazione del GFI sul corso medio-inferiore del Po	120
6.47	Confronto tra le mappe prodotte da MERIT (A) ed SRTM (B), dettaglio sull'area di calibrazione	121

Introduzione

Sin dagli albori della civiltà il legame tra l'uomo ed i corsi d'acqua è sempre stato estremamente forte. I fiumi sono da sempre una fonte primaria di risorsa idrica e alimentare, oltre a rappresentare naturali vie di comunicazione e di scambio commerciale, vie che rivestono una fondamentale importanza ed una rilevanza strategica anche al giorno d'oggi in taluni contesti geografici e socio-economici. Basta pensare alle più antiche civiltà della storia per comprendere quanto a fondo la vita dell'uomo e quella dei corsi d'acqua si sia intrecciata. Ne sono un esempio le antiche popolazioni mesopotamiche, sorte tra le sponde del Tigri e dell'Eufrate, gli Egizi, che trassero tutta la loro ricchezza dal fiume Nilo, o i Romani, la cui capitale sorse nelle vicinanze del Tevere. Un ulteriore esempio è costituito dalla città di Bologna, la cui economia fiorì nel Medioevo grazie allo sfruttamento dei corsi d'acqua del Reno e del Savena attraverso ingenti opere di derivazione.

I corsi d'acqua però costituiscono anche una grande minaccia per gli insediamenti umani. Portata e tirante sono variabili dalla grande incertezza, le cui fluttuazioni causano periodicamente straripamenti dall'alveo principale ed ingenti danni al territorio circostante.

Proprio per proteggersi dagli eventi di piena, sono state adottate diverse tecniche, tra cui la costruzione di imponenti opere di ingegneria civile per la deviazione e l'accumulo del flusso d'acqua, o il suo contenimento all'interno di argini artificiali.

Malgrado i numerosi interventi effettuati per la gestione del rischio idraulico, ad oggi eventi di piena fluviale causano ancora gravi danni anche nei Paesi più sviluppati. Si è stimato infatti che tra il 2006 ed il 2015 le alluvioni sono state la terza causa più importante di perdite economiche (dopo terremoti e forti venti) nel mondo, e la prima in Europa (v. Carisi et al., 2017).

In Italia nell'ultimo secolo si contano decine di episodi a grande impatto, dalle alluvioni più lontane nel tempo, come quelle nell'Aspromonte (1951), nel Polesine (1951), a Firenze (1966) e nella provincia di Sondrio (1987), a

quelle più recenti, come a Massa Carrara (2000), Messina (2009), Genova (2011 e 2014), Piacenza (2015) e Parma (2014).

I cambiamenti climatici e la risultante intensificazione degli eventi idrologici estremi sono spesso indicati come principali responsabili di questa situazione, ma numerosi studi (v. ad es. Bouwer et al., 2010; Di Baldassarre et al., 2013; Domeneghetti et al., 2015) evidenziano anche l'impatto dell'antropizzazione sul rischio idraulico, come risultato combinato dei cambiamenti nell'uso e nella copertura del suolo.

L'impermeabilizzazione del terreno costituisce infatti la principale causa di degrado del suolo in Europa e notevole accrescimento del rischio alluvionale (v. ISPRA, Rapporto sul consumo di suolo, 2019).

Per i suddetti motivi la gestione dei corsi d'acqua e del rischio idraulico costituisce oggi un ambito di ricerca molto attivo ed attuale, in cui il primo passo consiste nella realizzazione di mappe di pericolosità che delimitino le zone associate ad un determinato livello di pericolosità di allagamento.

Proprio per la valutazione e mitigazione del rischio idraulico, in correlazione con gli importanti cambiamenti climatici osservati, nel 2010 l'EIT (*European Institute of Thecnology*), ha ideato e fondato il progetto Climate-KIC SaferPLACES (*Improved assessment of pluvial, fluvial and coastal flood hazards and risks in European cities as a mean to build safer and resilient communities*). Esso costituisce la più grande collaborazione europea tra enti pubblici e privati per l'identificazione delle aree a rischio allagamento, la valutazione dei rischi e la prevenzione e mitigazione dei danni. A tale scopo vengono promosse tecniche di modellazione innovative, speditive ed efficienti ed interventi il più possibile resilienti ed economici.

Infatti, i classici metodi di mappatura della pericolosità alluvionale, basati su modellistica numerica idraulica, compensano le ottime performance offerte con il grande carico di informazioni preliminari e tempi computazionali richiesti. Questi pesanti oneri hanno spinto numerosi ricercatori ad ideare degli indicatori speditivi, basati sulle caratteristiche morfologiche del territorio e calcolabili a partire dalla sola conoscenza dei modelli digitali delle quote del terreno (DEM, *Digital Elevation Model*). Tali metodi, detti appunto *DEM-based*, sono stati analizzati da diversi autori, che ne hanno apprezzato la capacità predittiva in numerosi casi in Italia ed in contesto internazionale (v. Manfreda et al., 2015; Samela et al., 2017). Il vantaggio è la loro grande facilità di calcolo, che comporta tempi rapidi e costi contenuti, forti punti a favore in tempi di cambiamenti climatici ed in contesti di Paesi in via di sviluppo, favorendo l'elaborazione di un database di carte di pericolosità ad estensione globale.

Il presente elaborato di Tesi si concentra proprio sui metodi *DEM-based* di mappatura del rischio idraulico da allagamento fluviale, ritenuti per i mo-

tivi sopra elencati di estrema utilità ed attivamente indagati dal progetto di ricerca SaferPLACES, che ha sviluppato ad hoc un algoritmo di mappatura della pericolosità idraulica detto SaferRIVER. Tale algoritmo, insieme ad una sua versione più semplice e ad altri strumenti descritti in Appendice, è stato utilizzato per il lavoro di ricerca condotto per la presente Tesi.

Il presente lavoro di Tesi si articola come segue. Dopo un necessario sguardo al quadro normativo che regola la definizione e la gestione del rischio idraulico (Capitolo 1), si passa alla descrizione delle metodologie di mappatura, facendo una breve panoramica dapprima su quelle tradizionali (Capitolo 2) e concentrandosi poi su quelle più speditive e recenti, cuore della presente ricerca (Capitolo 3). Successivamente, si entra più nel dettaglio riguardo al lavoro di studio eseguito, presentandone lo schema nel Capitolo 4, per poi descrivere compiutamente i casi analizzati (Capitolo 5), e presentare e discutere i risultati ottenuti (Capitolo 6).

Brevemente, si anticipa che il presente lavoro si è articolato in due parti principali: la prima parte è volta ad una disamina tra diversi indici geomorfici proposti in letteratura, confrontati sia qualitativamente che quantitativamente su un ampio territorio nell'Italia Settentrionale. La seconda parte si concentra su un indice particolarmente promettente, studiandone l'adattabilità in diversi contesti, attraverso l'applicazione a tre ulteriori casi studio, ovvero il bacino del fiume Arga, in Spagna, del fiume Reno, in Germania, e del fiume Po, in Italia.

Capitolo 1

Rischio alluvionale

Il presente capitolo è dedicato alla definizione e descrizione del rischio alluvionale.

Verranno nel seguito fornite alcune definizioni, necessarie alla corretta lettura dell'elaborato, per passare poi alle normative che regolano l'ambito. Infine, si descriveranno le mappe di pericolosità messe a disposizione da ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) in attuazione delle leggi.

1.1 Definizione del rischio idraulico

Il rischio associato ad un certo fenomeno dipende, secondo una precisa equazione, dai concetti di vulnerabilità, esposizione e pericolosità. Si riportano nel seguito le definizioni di tali elementi.

Pericolosità (P) : probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo si verifichi in un dato tempo ed in una data area.

Esposizione (E) : elementi esposti a rischio in una data area, intesi come popolazione, proprietà, attività economiche, ed espressi come numero o come valore.

Vulnerabilità (V) : grado di perdita prodotto su un certo elemento esposto a rischio, risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una certa intensità.

Rischio (R) : atteso numero di perdite umane, feriti, danni alla proprietà etc. in conseguenza di un particolare fenomeno naturale

$$R = P \times V \times E$$

Per quanto riguarda il caso specifico del rischio idraulico, la pericolosità è legata alle caratteristiche del fenomeno fisico (ovvero della piena), ed è descritta dal tempo di ritorno o dalla probabilità di superamento dell'evento; la vulnerabilità si riferisce invece all'utilizzo del suolo nelle aree esposte al rischio: ciò rende da subito evidente che le attività antropiche, che possono influenzare significativamente i fenomeni idrologici, sono tanto importanti quanto l'avvento di intensi eventi meteorici per la definizione del rischio.

Si osserva dunque che i due concetti di pericolosità e rischio non sono sovrapponibili: il primo si riferisce alla probabilità di accadimento di un certo evento, mentre il secondo tiene in considerazione i danni provocati da tale evento, legati all'utilizzo del territorio nell'area considerata.

Concetto fondamentale in idrologia per lo studio della probabilità di un determinato fenomeno (e quindi della pericolosità) è il tempo di ritorno (T): esso si definisce come il tempo medio che intercorre tra due eventi distinti di entità pari o superiore ad una certa soglia (x_T). Esso costituisce un concetto statistico legato alla probabilità di superamento secondo la seguente equazione:

$$T = \frac{1}{P_{x \geq x_T}}$$

Con la dicitura $P_{x \geq x_T}$ si indica la probabilità di superamento di un evento x con tempo di ritorno T , ovvero la probabilità che si verifichi un evento di entità maggiore o uguale a x_T .

Si distinguono per la normativa italiana diverse classi di pericolosità:

- P4** : pericolosità molto elevata, in corrispondenza delle aree allagate per piena con $T = 50$ anni;
- P3** : pericolosità elevata, in corrispondenza delle aree allagate per piena con $T = 200$ anni, con altezza d'acqua pari a 0,9 m per qualunque velocità della corrente, con altezza d'acqua $> 0,9$ m per velocità di $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- P2** : pericolosità media, in corrispondenza delle aree allagate per piena con $T = 200$ anni, altezza d'acqua $< 0,9$ m, se la velocità della corrente è minore di $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- P1** : pericolosità moderata, in corrispondenza delle aree allagate per piena con $T = 500$ anni.

La vulnerabilità invece è sostituita nella normativa dal concetto di danno, il quale tiene anche in considerazione il numero di elementi a rischio:

- D4** : danno potenziale altissimo: su tali aree fenomeni di esondazione possono provocare ingenti danni ai beni e perdita di vite umane;
- D3** : danno potenziale alto: su tali aree fenomeni di esondazione possono provocare danni per la funzionalità del sistema economico e problemi all'incolumità delle persone;
- D2** : danno potenziale medio: su tali aree è limitata la presenza di persone e sono limitati gli effetti che possono derivare al tessuto socioeconomico;
- D1** : danno potenziale basso: comprende le aree libere da insediamenti, che consentono il libero deflusso delle piene.

Come si può notare, la definizione delle categorie di danno dipende fortemente dall'utilizzo del suolo nelle aree d'interesse.

Dalla combinazione dei due precedenti concetti si ottengono le diverse classi di rischio:

- R4** : rischio molto elevato, per il quale sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture e ai beni ambientali e culturali e la distruzione delle funzionalità delle attività socio-economiche.
- R3** : rischio elevato, per il quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici, con conseguente inagibilità degli stessi, alle infrastrutture e ai beni ambientali e culturali, con l'interruzione delle funzionalità socio-economiche;
- R2** : rischio medio, per il quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e ai beni ambientali e culturali che non pregiudicano l'incolumità delle persone, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività socio-economiche;
- R1** : rischio moderato, per il quale sono possibili danni sociali ed economici ai beni ambientali e culturali marginali;

La tabella che descrive la relazione tra rischio, pericolosità e danno è la seguente:

Pericolosità	Danno			
	D1	D2	D3	D4
P1	R1	R1	R2	R2
P2	R1	R2	R2	R3
P3	R2	R2	R3	R4
P4	R3	R3	R4	R4

1.2 Gestione del rischio alluvionale: normativa di riferimento

Il quadro normativo relativo al rischio idraulico è stato delineato a livello europeo dalla direttiva emanata il 22 Ottobre 2007, detta Direttiva Alluvioni. Essa mira a creare un quadro di riferimento omogeneo a livello europeo per la gestione delle alluvioni e tutelare la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche.

Nello specifico, la Direttiva prevede che tutti gli Stati europei si dotino di Piani di Gestione per il rischio alluvione, nei quali devono essere contenuti tutti gli aspetti della gestione del rischio, tra cui le misure di prevenzione, protezione e preparazione all'evento.

In particolare, la Direttiva ha individuato tre fasi, successive e concatenate tra loro, che tra il 2011 e il 2015 hanno portato alla realizzazione dei Piani di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA):

1. Valutazione preliminare del rischio alluvioni (entro il 22 dicembre 2011);
2. Elaborazione delle mappe di pericolosità e di rischio alluvione (entro il 22 dicembre 2013);
3. Predisposizione dei piani di gestione del rischio alluvione (entro il 22 dicembre 2015).

Nell'ordinamento italiano, la Direttiva Alluvioni è stata recepita con il Decreto Legislativo n.49 del 23 febbraio 2010, che assegna alle Autorità di bacino distrettuali e alle Regioni, in coordinamento tra loro e con il Dipartimento della Protezione Civile, il compito di predisporre i Piani di Gestione. Il provvedimento ha confermato la scansione delle attività in tre fasi, specificandone contenuti, soggetti competenti e modalità di realizzazione. Tali procedimenti hanno portato alla nascita dei Piani di Gestione del Rischio di Alluvione (PGRA) e delle relative mappature di pericolosità.

Valutazione preliminare del rischio alluvioni

La prima fase prevista dalla Direttiva Alluvioni ha richiesto a tutte le Autorità di bacino di valutare i rischi potenziali, nell'ambito del proprio distretto idrografico.

La valutazione doveva comprendere la produzione di cartografie tematiche, una descrizione delle alluvioni passate e una valutazione delle potenziali conseguenze negative di futuri eventi alluvionali.

Le Autorità di bacino italiane, avvalendosi delle misure transitorie previste dalla stessa normativa europea, non hanno svolto le attività relative a questa fase perché i contenuti richiesti erano già ricompresi nei Piani di Assetto Idrogeologico (PAI). Il nostro Paese ha comunque deciso di predisporre un catalogo di eventi alluvionali, secondo i parametri stabiliti dalla Commissione europea per tutti gli Stati membri. Nell'ambito di questa attività, il Dipartimento ha predisposto e ha messo a disposizione delle Regioni e delle Autorità di bacino una piattaforma informatica in cui inserire tutti i loro dati sugli eventi alluvionali verificatisi nei rispettivi territori di competenza.

Elaborazione di mappe della pericolosità e del rischio alluvioni

In base alla Direttiva Alluvioni, le Autorità di bacino hanno dovuto predisporre le mappe di pericolosità e di rischio alluvionale per il proprio bacino di pertinenza.

Per quanto riguarda dette mappe, il decreto di recepimento richiedeva di perimetrare le aree geografiche interessate da alluvioni caratterizzate dai seguenti tempi di ritorno: fino a 500 anni (rare di estrema intensità); tra 100 e 200 anni (poco frequenti); tra 20 e 50 anni (frequentissimi). Per ogni tipologia di alluvione, è stato inoltre chiesto di precisare estensione, altezza e caratteristiche dell'evento in termini di velocità e portata.

Nelle mappe di rischio dovevano invece essere indicate le possibili conseguenze negative di un'alluvione, specificando per ogni area persone e beni esposti al rischio. Per la redazione delle mappe di pericolosità e rischio, le Autorità di bacino hanno integrato, aggiornato e omogeneizzato le informazioni già contenute nei PAI.

Realizzazione dei Piani di gestione

L'obiettivo principale dei Piani di gestione, che devono essere redatti in tutti gli Stati membri, è ridurre le possibili conseguenze negative di un evento alluvionale attraverso l'attuazione di misure strutturali e non strutturali.

Come detto, la normativa italiana ha affidato il compito di redigere questi

piani alle Autorità di bacino e alle Regioni per il distretto idrografico di propria competenza; sempre alle Regioni, in coordinamento tra loro e con il Dipartimento, ha invece affidato la parte relativa al sistema di allertamento per il rischio idraulico ai fini di protezione civile.

Il termine per la stesura e la pubblicazione dei piani di gestione era stato fissato dalla Direttiva europea al 22 dicembre 2015.

Vista la rilevanza strategica dei Piani di gestione, la Direttiva Alluvioni ha richiesto a tutti gli Stati membri di promuovere la partecipazione dei cittadini nel processo di elaborazione, valutazione e aggiornamento di tutti i prodotti elaborati nell'ambito delle tre fasi. Anche il Decreto di recepimento in Italia della Direttiva Alluvioni ribadisce questa indicazione, nella convinzione che la comunità locale abbia un ruolo determinante nell'individuazione dei rischi e delle modalità con cui difendersi. Per questo, le Autorità di bacino e le Regioni hanno promosso momenti di consultazione pubblica su tutti i prodotti e le attività realizzati, sia attraverso iniziative online (siti web dedicati, forum, blog e strumenti di indagine, come sondaggi e questionari) sia attraverso l'organizzazione di incontri aperti a tutti coloro che vivono e operano sul territorio. Anche il Dipartimento della Protezione Civile ha partecipato ad alcune di queste iniziative.

1.2.1 Mappe PGRA

Come precedentemente spiegato, l'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) ha proceduto alla definizione dei PGRA passando per la produzione di una mappatura nazionale di pericolosità idraulica. L'ottenimento di tali informazioni è passato attraverso l'aggiornamento, l'omogeneizzazione e l'integrazione dei precedenti Piani di Assetto Idrogeologico, che ha portato nel 2017 alla realizzazione della nuova Mosaicatura nazionale, le cui aree sono state perimetrate dalle Autorità di Bacino Distrettuali.

Quest'attività è stata condotta nell'ambito della Convenzione stipulata tra MATTM (Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare) e ISPRA il 16 Ottobre 2016 per il monitoraggio, il controllo e la verifica sull'attuazione e sulla coerenza con la pianificazione delle misure di mitigazione del rischio idrogeologico sul territorio nazionale.

La mosaicatura di pericolosità è stata realizzata secondo i tre scenari previsti dal D. Lgs. 49/2010 (descritto precedentemente):

- Elevata, con probabilità con tempo di ritorno fra 20 e 50 anni (alluvioni frequenti)

- Media, con probabilità con tempo di ritorno fra 100 e 200 anni (alluvioni poco frequenti)
- Bassa, con probabilità (scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi).

Per realizzare la mappatura sono state effettuate le seguenti attività:

1. Richiesta alle Autorità di Bacino Distrettuali dei dati aggiornati sulle aree a pericolosità (Luglio 2017);
2. Analisi dei dati, interlocuzioni, chiarimenti tecnici e approfondimenti con i funzionari delle Autorità di Bacino Distrettuali
3. Riproiezione dei file in un unico sistema di riferimento (WGS84 UTM fuso 32)
4. Controllo della topologia
5. Trasformazione delle fasce di pericolosità, ove presenti, nei 3 scenari suddetti

I file ottenuti per i tre diversi livelli di pericolosità (P3, P2, P1) sono scaricabili in formato vettoriale (.shp) dal sito online della Rete del Sistema Informativo Nazionale Ambientale. Come illustrato nel rapporto sul dissesto idrogeologico pubblicato da ISPRA (2018), il territorio dell'ex Autorità di Bacino Regionale delle Marche risulta sprovvisto degli scenari a pericolosità P3 e P1, non disponibili alla data dell'elaborazione (dicembre 2017) della Mosaicatura. Analogamente, lo scenario P1 risulta non disponibile per il territorio dell'ex Autorità di Bacino Conca-Marecchia e dei Bacini Regionali Romagnoli, ad eccezione delle Aree costiere marine, e per il reticolo di irrigazione e bonifica del territorio del bacino del Po ricadente nella Regione Emilia-Romagna. A causa di tali lacune, per le regioni Emilia-Romagna e Marche le aree inondabili per lo scenario P1 risultano inferiori a quelle dello scenario P2 (v Figura 1.1). Viste la probabilità associate, ci si attende invece che l'estensione delle aree a pericolosità idraulica aumenti passando da P3 a P1.

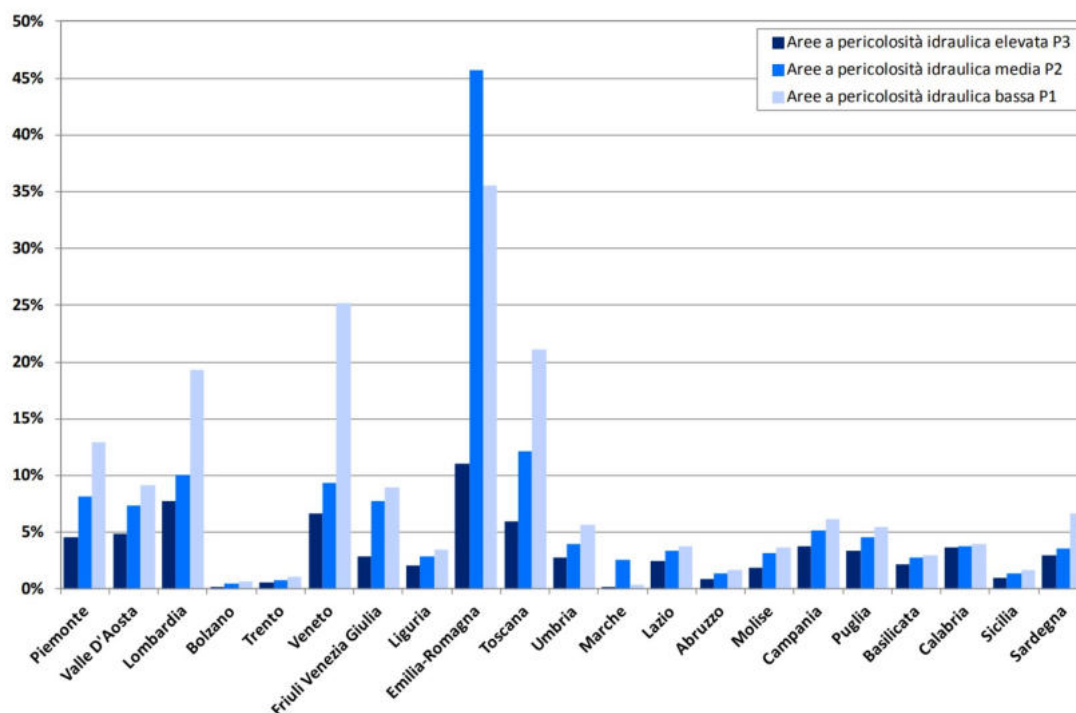


Figura 1.1: Mosaicatura ISPRA: percentuali di territorio regionale associate alle diverse aree a pericolosità idraulica P3, P2, P1 (fonte: ISPRA, 2018)

Lo stesso rapporto ISPRA (2018) evidenzia una certa disomogeneità della mappatura, essenzialmente legata al reticolo idrografico di riferimento. Infatti, mentre in alcune aree del territorio italiano la Mosaicatura è stata ottenuta modellando specialmente il reticolo principale, in altre è stato analizzato in dettaglio anche il reticolo secondario (collinare e montano in Valle d'Aosta, di pianura per i canali di bonifica in Emilia-Romagna).

Sempre dalla lettura del Rapporto, è interessante osservare come il territorio nazionale, essendo caratterizzato da stretti spazi tra le catene montuose e gli sbocchi a mare dei corsi d'acqua, è particolarmente soggetto ai fenomeni di allagamento di breve durata, detti *flash floods*.

In particolare, il rapporto evidenzia che in Italia circa il 4,1% del territorio è interessato da rischio di allagamento elevato, l'8,4% medio e il 10,9% elevato. In totale, circa 6 milioni di Italiani vivono zone di pericolo alluvionale. Si può però vedere in realtà come questi valori siano dissimili nelle varie Regioni: in particolare tra le regioni più a rischio c'è l'Emilia Romagna, con il 45% di superficie che rientra nella categoria P2, seguita da Veneto, Lombardia e Toscana.

Capitolo 2

Metodi tradizionali per la mappatura della pericolosità alluvionale

Riprendendo quanto già accennato nell'Introduzione, la mappatura della pericolosità idraulica costituisce il primo e fondamentale passo nella gestione del rischio idraulico. Numerosi sono i metodi ideati per l'identificazione delle aree interessate da una certa probabilità alluvionale, ognuno dei quali presenta vantaggi e svantaggi che ne determinano l'affidabilità caso per caso.

Oggi, la pericolosità idraulica viene generalmente valutata facendo ricorso a metodi numerici idraulici, in genere monodimensionali (1D) o bidimensionali (2D). Essi infatti hanno dimostrato ottime performance in diversi casi di applicazione e costituiscono l'approccio più affidabile per la stima della pericolosità idraulica. Tuttavia, l'incessante ricerca nel campo ha portato alla nascita di diverse tecniche da affiancare e/o sostituire a quelle tradizionali. Si distinguono quindi metodi detti empirici, metodi di telerilevamento (*remote sensing*) e metodi DEM-based.

Il presente capitolo è dedicato ad una descrizione panoramica dei metodi di mappatura tradizionali, cui seguirà l'esposizione di due casi di applicazione specifici, uno a scala locale ed uno su larga scala.

2.1 Modelli numerici idraulici

Allo stato dell'arte, i modelli idraulici sono quelli più utilizzati per la valutazione della pericolosità alluvionale. La loro principale caratteristica è che, a seconda degli altri approcci ideati, consistono nella risoluzione numerica di equazioni che descrivono, più o meno compiutamente a seconda delle approssimazioni, il campo di moto della corrente.

L'applicazione di un modello numerico idraulico tipicamente richiede diversi passaggi (v. Figura 2.1), i quali possono essere dispendiosi dal punto di vista sia computazionale che di tempo.

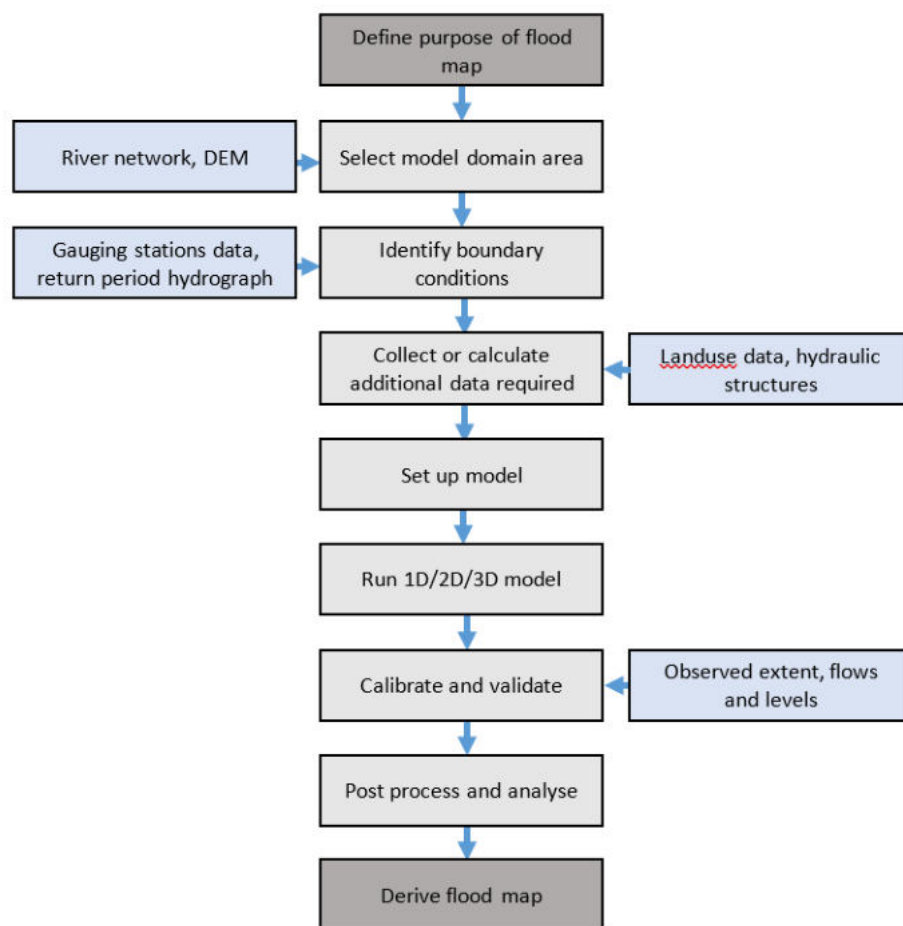


Figura 2.1: Schema concettuale di applicazione di un modello idraulico

Una volta stabilito lo scopo dell'analisi da effettuare, e di conseguenza la natura dei dati in input e dei risultati desiderati, si può procedere alla scelta

del tipo di modello (1D, 2D, 3D, software da utilizzare, schema numerico etc.). Segue la definizione del dominio, o volume di controllo: questa scelta è di vitale importanza per la corretta rappresentazione del fenomeno, perchè deve comprendere tutti i processi idrologici di interesse (deflusso superficiale e sotterraneo in primis). A questo punto si devono definire le condizioni al contorno, per poi finalmente impostare il modello e lanciarlo. E' sempre necessaria una fase di calibrazione, in cui si ottimizza il valore dei parametri richiesti in modo da ottenere dei risultati che siano il più possibile in linea con dati presi opportunamente a riferimento.

Delicate fasi di raccolta dati, analisi e processamento sono sempre richieste prima del lancio del modello. L'onerosità e il costo di tali operazioni dipende dal caso specifico, ma la loro corretta esecuzione è fondamentale per ottenere un output che sia veramente rappresentativo. L'accuratezza e la precisione dei risultati dipendono da tutti gli step in Figura 2.1, passando per la natura del modello.

2.1.1 Modelli 1D

Tramite dei modelli di tipo monodimensionale si possono trattare correnti di tipo sia stazionario che non stazionario, che vengono però approssimate come unidirezionali. Le caratteristiche della corrente vengono descritte ad ogni sezione trasversale della stessa, dove la velocità è ipotizzata essere uniforme: l'unica variazione si ha lungo la direzione di scorrimento dell'alveo, detta ascissa fluviale.

Le equazioni che vengono utilizzate sono quella di conservazione della massa e della quantità di moto, che costituiscono il sistema di De Saint Venant:

- Conservazione della massa (o equazione di continuità):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

- Conservazione della quantità di moto:

$$\frac{1}{A} \times \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \times \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + g \times \frac{\partial h}{\partial x} - g \times (S_0 - S_f) = 0$$

Dove Q è la portata, x lo spazio tra una sezione trasversale e la successiva, t il tempo, A l'area della sezione trasversale, g l'accelerazione di gravità, h il tirante idraulico, S_0 la pendenza dell'alveo e S_f la cadente piezometrica.

Le variabili elencate vengono calcolate ad ogni sezione trasversale, e quando il livello dell'acqua eccede la quota dell'argine in una sezione, il flusso fuoriesce nel terreno circostante; per questo motivo spesso si utilizzano delle sezioni trasversali che non contengano solo l'alveo fluviale, ma anche parte del territorio adiacente. Per determinare l'area allagata si interpolano i risultati tra le diverse sezioni.

La capacità predittiva di tali metodi dipende da vari fattori. In primis dallo schema numerico scelto per la risoluzione delle equazioni di De Saint Venant (differenze finite, volumi finiti, elementi finiti). In secondo luogo dalla tecnica di interpolazione utilizzata, che richiede informazioni topografiche precise e decisioni soggettive del modellista riguardo all'interazione tra alveo fluviale e terreno alluvionato.

Per quanto riguarda lo schema numerico, viene in genere preferito quello delle differenze finite. Alcuni modelli che utilizzano tale concept sono HEC-RAS 1D, SOBEK 1D Flow, ISIS 1D, MIKE 11, InfoWorks RS 1D. Essi si distinguono per l'interfaccia grafica, la licenza libera o commerciale ed altre caratteristiche tecniche.

In definitiva le approssimazioni di profilo di velocità uniforme all'interno di ciascuna sezione trasversale e di corrente parallela alla pendenza dell'alveo possono risultare accettabili o meno a seconda dei casi. Va inoltre considerato il fatto che l'interpolazione può rendere necessario l'utilizzo di un software GIS. Tutto ciò rende i modelli monodimensionali più agili di quelli 2D e 3D in termini di oneri computazionali, ma meno adatti a rappresentare situazioni complesse (per esempio l'interazione con strutture idrauliche) e vaste pianure alluvionali.

2.1.2 Modelli 2D

Nei metodi bidimensionali lo spazio viene rappresentato in maniera più completa, considerando le due direzioni orizzontali x ed y . Ciò è possibile grazie alla disponibilità di modelli digitali della quota del terreno (*Digital Elevation Model*, DEM). Le equazioni di De Saint Venant impiegate dai modelli bidimensionali continuano ad ipotizzare il profilo di velocità costante lungo la verticale della corrente, ma riescono a riprodurre più compiutamente il moto della corrente:

- Conservazione della massa:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h \times u)}{\partial x} + \frac{\partial(h \times v)}{\partial y} = 0$$

- Conservazione della quantità di moto:

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(h \times u^2 + \frac{1}{2} \times g \times h^2) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(h \times v^2 + \frac{1}{2} \times g \times h^2) + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = 0$$

Dove h è il tirante, u e v le componenti della velocità rispettivamente lungo x ed y , t il tempo e g l'accelerazione di gravità.

Anche in questo caso sono possibili diversi schemi di risoluzione numerica, tra i quali solitamente viene preferito quello alle differenze finite, ed assume grande importanza la discretizzazione spaziale. Le griglie che rappresentano il dominio del modello possono infatti avere diverse forme delle maglie (quadrato, rettangolari, triangolari ecc.), ed essere fisse o variabili a seconda del punto preciso all'interno del dominio: questa seconda opzione consente ai modelli 2D di adattarsi molto bene a situazioni di geometria complessa, come le aree urbane. Al contrario, griglie a maglie rettangolari, adottate dai modelli di tipo *DEM-based*, costringono il moto alle due direzioni orizzontali x ed y , introducendo semplificazioni importanti e pregiudicando a volte la bontà degli output ottenuti. Per la corretta rappresentazione di situazioni complesse con maglie di questo tipo una strategia è quindi quella di aumentare la risoluzione.

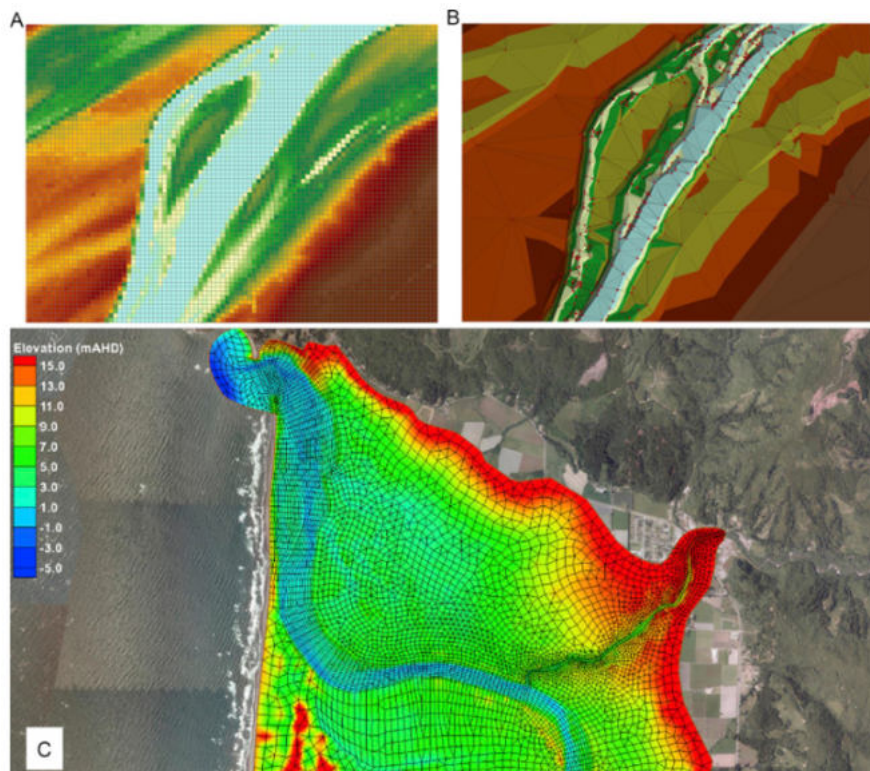


Figura 2.2: Diversi schemi di discretizzazione spaziale: strutturata (A), non strutturata (B), flessibile (C)

Alcuni software utilizzati per la modellazione 2D sono: TELEMAC 2D, MIKE 21, FLO 2D, HEC-RAS 2D, ISIS 2D. Quando la risoluzione necessaria per la corretta rappresentazione del territorio adiacente al fiume è particolarmente elevata, possono essere combinati modelli 1D per l'area corrispondente all'alveo con modelli 2D per la pianura alluvionata. Questo stratagemma consente di ridurre notevolmente i tempi computazionali richiesti, pur mantenendo una descrizione bidimensionale del moto della corrente.

Le tecniche 2D sono quindi molto utili e largamente diffuse grazie alle loro ottime capacità predittive, ma il pesante onere computazionale che le caratterizza ne rappresenta un forte svantaggio rispetto ai metodi 1D o combinati 1D-2D.

2.1.3 Modelli 3D

I modelli tridimensionali costituiscono il massimo grado di dettaglio nello studio del moto dell'acqua. Essi vengono utilizzati per casi molto complessi, come le aree costiere o flussi in interazione con delle strutture.

Simulazioni di tsunami o rotture di dighe sono esempi di situazioni in cui è necessario conoscere intensivamente lo stato di moto dell'acqua, includendo la variazione verticale delle sue caratteristiche. In questo modo si può arrivare a determinare la stratificazione con la profondità di temperatura, salinità, trasporto solido ecc.

Le equazioni di De Saint Venant dei modelli 3D sono le seguenti:

- Conservazione della quantità di moto:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u + \frac{1}{\rho} = g + \mu \times \nabla \cdot \nabla u$$

- Conservazione della massa:

$$\nabla \cdot u = 0$$

Dove ρ è la densità, μ la viscosità cinematica ed u la velocità. Come per il caso bidimensionale, anche in questo la discretizzazione spaziale può essere di tipo strutturato, non strutturato o flessibile. Alcuni software che utilizzano una modellazione 3D sono TELEMAC 3D, DELFT-3D e FLOW 3D.

Per concludere, per questo tipo di schematizzazioni la complessità dei dati in input da raccogliere e processare e il tempo di computazione richiesto spesso non sono giustificati dall'accuratezza dei risultati ottenuti. Per questo motivo raramente i modelli 3D sono utilizzati per valutazione della pericolosità alluvionale.

2.2 Esempio di applicazione a scala di corso d'acqua: Fiume Po

Un caso tipico di applicazione dei modelli fluidodinamici è quello delle mappe realizzate internamente al dipartimento DICAM dell'Università di Bologna per analisi relative al fiume Po.

Nello specifico, l'area di studio si colloca in una zona compresa tra Cremona e Guastalla, sul corso medio-inferiore del fiume, nel cuore della Pianura

Padana. Il modello utilizzato è LISFLOOD-FP, con il quale è stato simulato uno scenario corrispondente a 200 anni di tempo di ritorno, nel quale si ha la formazione di 6 brecce negli argini fluviali in sinistra idraulica del Po.

Quest'ultima condizione al contorno è derivata dall'applicazione di un precedente modello: HEC-RAS.

In particolare, si è ipotizzato nello studio che da ognuna delle brecce formatesi fuoriesca la stessa portata.

Per applicare queste condizioni è stato necessario rappresentare con molta precisione la superficie terrestre, ed utilizzare quindi un DEM ad elevata risoluzione. Ciò è stato fatto integrando i dati di LiDAR (risoluzione 2 m) disponibili per l'asta fluviale del Po, con quelli di un dataset fornito dalla Regione Lombardia (risoluzione 5 m), per i terreni circostanti. Il *gap* tra i due è stato colmato tramite un ulteriore DEM a risoluzione 20 m. La discretizzazione spaziale delle mappe risultanti risulta di maglie di lato 50 m.

Essendo realizzate tramite un modello fluidodinamico, oltre all'informazione dell'estensione e localizzazione delle aree allagate, queste mappe contengono anche i dati del tirante atteso nei diversi punti del dominio.

2.3 Esempio di applicazione a scala continentale: Europa

Si vuole qui descrivere un caso di modellazione della pericolosità idraulica sull'intero continente europeo. Più precisamente, ci si riferisce alla mappatura realizzata dal JRC (*Joint Research Center*), l'ente di ricerca scientifica della Comunità Europea, il cui scopo è supportare le politiche dell'Unione e provvedere alle conoscenze necessarie al supporto decisionale.

Nei paragrafi precedenti si è accennato alla grande mole di dati e risorse necessari per impostare e lanciare un modello idraulico. Per questo motivo fino a pochi anni fa mappe di pericolosità idraulica erano disponibili solo per aree molto limitate della superficie terrestre, troppo costose per essere prodotte ed aggiornate periodicamente.

Oggi però non solo la potenza di calcolo dei computer ha raggiunto livelli di molto superiori, ma anche la precisione e la risoluzione dei dati raccolti da satelliti sono diventate estremamente elevate.

Questo ha permesso la realizzazione di diversi modelli climatici ed idrologici di larga scala, tra cui alcuni che descrivono l'intera superficie terrestre (es: Yamazaki et al (2013), Hibarayashi et al. (2013), Sampson et al. (2015), Alfieri et al. (2014)). Per fare ciò, è stato necessario ideare un nuovo metodo esecutivo, data la grande superficie analizzata.

Le diverse fasi della produzione di tali mappe sono le seguenti:

1. Impostazione, lancio e calibrazione di un modello afflussi-deflussi che copre l'estensione dell'intera Europa alla risoluzione di 5×5 km.
2. Simulazione di una serie temporale di portate di 21 anni ed estrapolazione dei picchi con determinati tempi di ritorno.
3. Aumento della risoluzione spaziale fino a 100 m ed elaborazione degli idrogrammi alluvionali di progetto.
4. Lancio di modelli idraulici di alluvione 2D a piccola scala lungo il reticolo idrografico principale ed unione dei risultati in un'unica mappa di allagamento.

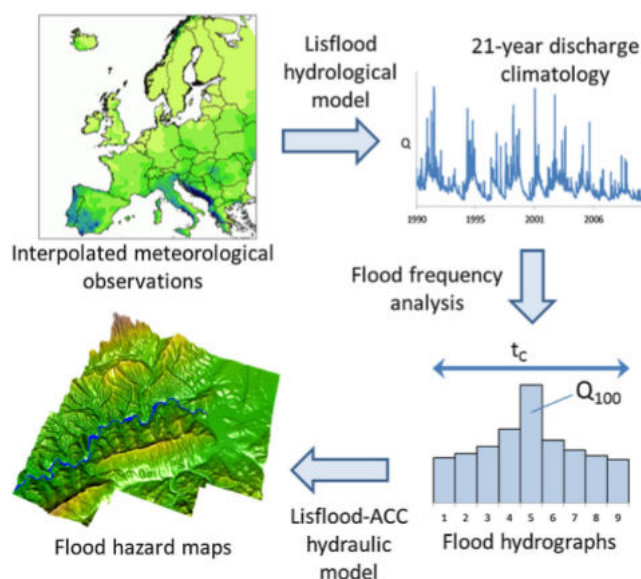


Figura 2.3: Schema del procedimento per la realizzazione delle mappe di pericolosità idraulica del JRC

Il modello idrologico scelto nella prima fase è LISFLOOD, utilizzato da EFAS (*European Flood Awareness System*). A metà tra concettuale e fisicamente basato, tale modello ha dimostrato ottime performance su aree molto estese; esso richiede come input dati topografici (quota del terreno, direzione di scorrimento, pendenza, ecc.), dati riguardanti il suolo (tipologia, profondità), dati sulla geometria fluviale (scabrezza, profondità, larghezza, pendenza

laterale e longitudinale) e sull'utilizzo del suolo (copertura vegetale, presenza di centri urbani ecc.).

Una volta messo a punto, il modello è stato calibrato con riferimento ai dati di portata provenienti dal GRDC (*Global Runoff Data Centre*), comprendenti le misurazioni di 481 stazioni in tutta Europa. Si sottolinea che la distribuzione di tali stazioni non è uniforme nell'Unione, e lascia scoperto circa il 37% del territorio, in cui sono stati adottati parametri standard.

Si è quindi utilizzato LISDFLOOD per simulare una serie temporale di portate di 21 anni. La forzante climatica utilizzata (dati di precipitazione, temperatura, evapotraspirazione ecc.) è stata ricavata dai dati del *Monitoring Agricultural Resources*, del WMO (*World Meteorological Observation*) e del Servizio Meteorologico della Germania. Dalla serie ottenuta sono stati estratti i massimi annuali, interpolati poi con una distribuzione di Gumbel per ottenere portate con tempi di ritorno di 10, 20, 50, 100, 200 e 500 anni. Riscaldando i dati idrografici alla risoluzione di 100 m, essi sono stati poi utilizzati come condizione al contorno per la simulazione degli eventi alluvionali di assegnata pericolosità.

Il modello impiegato per quest'ultima parte è LISFLOOD-ACC. La scelta effettuata è stata quella di scegliere punti con buona approssimazione equidistanti tra di loro lungo il reticolo idrografico, a 5 km l'uno dall'altro, partendo dalla sezione di chiusura e muovendosi verso monte. L'area minima dei bacini idrografici considerati è stata fissata a 500 km²: sotto tale soglia infatti non si poteva disporre di una corretta rappresentazione delle condizioni climatiche. Ciò comporta che le mappe del JRC non rappresentano la pericolosità idraulica nei bacini più piccoli, e trascurano i fenomeni di *flash flood* e di alluvione costiera.

Il risultato del procedimento descritto è costituito dalle mappature della pericolosità idraulica alla risoluzione di 100 m in formato raster, gratuitamente disponibili presso il sito ufficiale del JRC. Tali mappe contengono anche l'informazione del tirante atteso nell'area allagata. La validazione, eseguita in aree selezionate in Germania e Regno Unito, ha dimostrato un buon grado di accordo con le mappe regionali e nazionali malgrado i problemi di risoluzione dei dataset utilizzati.

Capitolo 3

Metodi speditivi per la mappatura della pericolosità idraulica

Nel precedente capitolo è stato presentato il ventaglio delle tecniche più tradizionali e consolidate di mappatura della pericolosità idraulica. Si è in particolar modo evidenziato che l'affidabilità indiscussa di tali pratiche è necessariamente associata a notevoli sforzi, in termini di tempo e costi, per l'ottenimento delle informazioni di input, l'impostazione ed il lancio dei modelli.

In questo contesto, negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi altri metodi di indagine, che possono essere affiancati a quelli sopra menzionati per ottenere risultati in maniera più semplice, rapida ed economica, permettendo la mappatura in zone dove le risorse non consentono il reperimento di dati precisi, o in momenti di emergenza, sia climatica che di altro tipo.

Si possono annoverare in questo campo i metodi empirici, le tecniche di telerilevamento (o *remote sensing*) e quelle *DEM-based*.

Seguirà una breve descrizione dei primi due elementi indicati, per poi passare ad una più estensiva del terzo metodo, oggetto centrale dell'indagine del presente elaborato di Tesi.

3.1 Metodi empirici

Con il termine "empiriche", si indicano tutte quelle tecniche di mappatura delle zone a rischio alluvionale che sfruttano a posteriori la conoscenza delle aree allagate in passato.

Varie sono le possibili indagini di questo tipo, tra cui è doveroso elencare sopralluoghi, misurazioni del suolo, definizione stratigrafica del terreno, dendrocronologia, testimonianze dirette e osservazioni da fonti remote (es. satellitari).

Numerosi sono per esempio gli studi che analizzano la correlazione tra piene storiche e possibili tracce nella chimica e nella stratigrafia dei terreni circostanti (Zhang et al. 2018; Zhao et al. 2017), come la presenza di sedimenti trasportati dalla corrente.

Occorre precisare che tali studi forniscono una conoscenza molto grossolana ed approssimativa delle aree alluvionabili, e sono per questo utilizzati solo come supporto ad altre indagini, eseguite in modi più affidabili.

3.2 Remote sensing

Le tecnologie di acquisizione dati da fonti remote, più che una tecnica di modellazione, rappresentano in realtà utilissimi strumenti per il supporto di tutte le altre metodologie.

Tramite tali strumenti infatti vengono raccolti innumerevoli quantità di dati, tra cui vanno annoverati i modelli delle quote del terreno (DEM), che sono sicuramente i più impiegati in questo contesto. L'utilità delle osservazioni remote però non si limita qui, poichè esse portano anche alla realizzazione di mappe di estensione e profondità di inondazioni reali.

Si vuole nel seguito fornire una veloce panoramica riguardo ai metodi di acquisizione dei dati.

Sensori ottici : tale tecnologia consente l'acquisizione di radiazioni elettromagnetiche sia nel campo del visibile che del non visibile. Ciò consente la raccolta di immagini a grande risoluzione, ma presenta il problema di non riuscire ad oltrepassare una densa copertura di nubi.

Microonde passive : diversamente dai sensori ottici, le microonde possono passare attraverso la copertura atmosferica, e vengono rilevate dai radiometri giorno e notte, con alta risoluzione temporale. Lo svantaggio in questo caso è rappresentato invece dalla risoluzione spaziale, che risulta piuttosto grossolana.

Sensori ad apertura sintetica (SAR) : queste metodologie consentono l'acquisizione di immagini *cloud-free* a buona risoluzione; esse sfruttano tecniche di rilevazione attiva, ovvero emettono radiazioni elettromagnetiche nel campo delle microonde, misurandone poi la riflessione.

Indipendentemente dal metodo utilizzato, le immagini raccolte devono poi essere elaborate per ottenere i prodotti finali (anche per questa operazione, diverse sono le tecniche possibili).

Il vero valore aggiunto del telerilevamento è costituito dalla disponibilità gratuita della maggior parte dei dataset ottenuti, che ha reso possibile una diffusione ed una precisione dell'informazione senza precedenti. Proprio grazie a tale approfondimento e condivisione della conoscenza della Terra si è notevolmente facilitato, ed in alcuni casi ideato, l'utilizzo di tutti i diversi metodi di modellazione della pericolosità idraulica elencati.

3.3 Metodi *DEM-based* basati su indici geomorfici

Con il termine *DEM-based* si intende una serie di metodologie diverse che utilizzano come file di input i modelli delle quote del terreno, descritti da file DEM. Il concetto alla base di tali approcci è molto semplice, e consiste nell'idea elementare che la pericolosità di alluvione dipenda fortemente dalla topografia dell'area di interesse, per cui punti più depressi, più vicini o più rapidamente collegati all'alveo fluviale necessariamente sono più soggetti di altri a questo fenomeno.

Nella pratica, si procede nel dominio scelto al calcolo punto per punto (ovvero cella per cella) di indici che dipendono dalle sole caratteristiche morfologiche del territorio, che vengono per questo definiti geomorfici. Essi però non rappresentano fisicamente la dinamica della corrente, ignorando ogni tentativo di descrivere le dinamiche di moto dell'acqua.

Il grande vantaggio che ne deriva è che tali indici sono molto semplici da calcolare, ma non contengono intrinsecamente nessuna informazione riguardo alla pericolosità alluvionale: per poter ottenere delle mappe di allagamento è necessaria una procedura di calibrazione.

Una volta scelto un certo indice geomorfico e calcolato il suo valore in ogni punto dell'area di interesse, si deve ricercare un valore di soglia (o *threshold*), il cui superamento (o non superamento, a seconda del particolare indice scelto) determini l'allagamento del punto considerato per l'assegnato livello di pericolosità. Tale valore di soglia viene identificato tramite un pro-

cedimento iterativo in cui diversi valori di tentativo vengono testati e valutati tramite il calcolo di un indice di prestazione. Tale operazione termina quando l'indice di prestazione raggiunge il suo valore ottimale in riferimento a mappe pre-esistenti, assunte come *Gold Standard Truth*. Esse sono in genere prodotte tramite modelli idraulici 1D o 2D, di cui si è parlato nel Capitolo 2, e contengono le informazioni necessarie riguardo al tempo di ritorno degli eventi di cui si vuole stimare la pericolosità.

La successiva applicazione di tale valore di soglia consente di stabilire quali celle vengono allagate e quali no, ottenendo mappe binarie di pericolosità alluvionale. Tali mappe non forniscono di per sé nessuna informazione riguardo al tirante atteso.

Quindi, mentre i modelli idraulici descritti nel capitolo 3 necessitano sia di informazioni topografiche che di distribuzioni probabilistiche delle portate fluviali, per i metodi DEM-based servono due tipi di file di input:

- File DEM per la descrizione delle quote del terreno
- Mappe binarie di pericolosità ritenute di affidabilità certa, per la calibrazione.

Un aspetto di cui è fondamentale sottolineare l'importanza per i metodi DEM-based è la risoluzione con cui si lavora. Entrambi gli oggetti in input al processo di calcolo infatti hanno una loro propria discretizzazione dello spazio, ma per poter procedere al calcolo degli indici geomorfici è necessario avere due file perfettamente sovrapponibili. In pratica quindi si utilizza la risoluzione del DEM e si riscalano le mappe rispetto ad essa.

A questo paragrafo seguirà una descrizione dei file DEM e delle modalità con cui a partire da essi si effettua l'analisi idrologica in ambiente GIS (*Geographical Information System*): sulla base di tali operazioni si definiscono gli indici geomorfici. Verranno esposti alcuni degli indicatori più importanti, tra cui sono stati scelti quelli utilizzati per l'indagine effettuata. Infine verranno chiariti i criteri impiegati in fase di calibrazione.

3.4 I modelli digitali di quota del terreno (DEM)

Riassumendo quanto già detto, i modelli digitali delle quote del terreno (DEM) sono dei file che descrivono la quota del terreno punto per punto. Essi si presentano in genere come file di tipo raster o ascii. Tali tipi di file sono divisi in pixel, o celle, che costituiscono i punti in cui viene discretizzata la superficie terrestre. Ad ogni cella corrisponde un valore, che identifica

la quota media nell'area rappresentata dalla cella. Tale grandezza si riferisce alla superficie del terreno, in seguito a varie elaborazioni per filtrare la presenza di altri elementi (ad esempio vegetazione o edifici).

Come è facilmente intuibile, la discretizzazione della superficie terrestre operata dal DEM, detta risoluzione, rappresenta una forte approssimazione, che può pregiudicare la bontà delle operazioni eseguite a partire da esso.

Ciò che rende estremamente interessante ed agevole l'utilizzo dei DEM, è la loro larga disponibilità e reperibilità. Essi vengono prodotti in genere tramite telerilevamento per via satellitare o aerea: l'acquisizione dei dati avviene secondo le tecniche descritte sopra. Ne risultano differenti prodotti DEM, che si distinguono per estensione, precisione, risoluzione e accuratezza. Nei paesi più sviluppati sono presenti DEM ottenuti con misurazioni di tipo aereo, mentre in estese aree in via di sviluppo sono disponibili solo dataset raccolti da osservazioni remote via satellite, molto meno precise.

Infatti, malgrado i grandi passi in avanti nell'acquisizione e processamento dei dati da via satellitare, rimangono grandi imprecisioni nei DEM, che possono portare a errori non trascurabili nelle applicazioni pratiche di tali dataset. Complicazioni di tale genere sono classificate in:

- Short wavelegth speckle noise: si presenta come un errore casuale, dovuto alla diversa riflettività del terreno in zone pianeggianti. Ha una lunghezza d'onda di pochi pixel.
- Medium wavelength stripe noise: costituisce un'ondulazione regolare nell'altezza, con lunghezza d'onda tra i 500 m e i 100 km. Può avere diverse cause a seconda dello specifico DEM.
- Long wavelength biases: si presenta come un errore uniforme su ampie zone. E' causato dall'impossibilità di misurare la quota assoluta, sia tramite interferometro radar, sia tramite visione stereoscopica (stereo viewing). Per ovviare a questo problema sono necessari dei punti a quota nota al suolo, la cui disponibilità non è uniforme su tutta la Terra.
- Tree height bias: bias sistematici e positivi, causati dalla presenza della vegetazione: ciò può condurre ad un errore di circa 10 metri, non trascurabile per le applicazioni geoscientifiche.

Si procede dunque alla descrizione più nel dettaglio dei DEM utilizzati per il presente lavoro di Tesi, precisando che tutti sono reperibili gratuitamente presso il relativo sito internet ufficiale.

3.4.1 DEM SRTM

Lo Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) è un'impresa internazionale di cui fanno parte la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) ed altre compagnie aerospaziali europee, che negli anni 2000 è riuscita a produrre un DEM ad estensione quasi globale (da 56° S a 60° N) ad alta risoluzione.

Tale modello è stato il dataset ad alta risoluzione più completo fino alla distribuzione dell'ASTER GDEM nel 2009.

La risoluzione del dataset SRTM è di 1 arcosecondo, che corrisponde a circa 30 m, ma in un primo momento esso fu reso accessibile al pubblico solo alla definizione di 3 arcosecondi (ovvero circa 90 m), fino all'annuncio nel 2014 del rilascio dell'accesso al DEM completo.

Una prima versione del SRTM, detta V1, è stata corretta tramite editing per rimuovere picchi e buchi derivanti da errori della misurazione e rappresentare più fedelmente i corpi idrici. Malgrado ciò, alcuni punti rimanevano vuoti, senza dati, per cui una terza versione è stata rilasciata, detta SRTM plus o SRTM V3. In quest'ultimo dataset i punti vuoti (*voids*) sono stati riempiti con dati provenienti da ASTER GDEM2 e GMTED2010.

Il primo è un sensore posto sul satellite americano Terra, che misura la quota del terreno tramite visione stereoscopica, usando la parallasse ottica. Il secondo invece è un altro dataset, prodotto dall'ente US Geological Survey, utilizzato per i punti vuoti rimanenti.

3.4.2 EU DEM

EU DEM è un modello di quota digitale del terreno sviluppato a partire da una media pesata di SRTM ed ASTER GDEM principalmente, ma anche di altri dataset.

Esso risponde alla richiesta di rappresentare compiutamente l'intera area europea, colmando la mancanza di dati per le aree a nord di 60° N.

EU DEM riesce a rappresentare con un'accuratezza di 7 metri tutta la superficie europea, con risoluzione di 1 arcosecondo (circa 30 m). La validazione è stata effettuata tramite il confronto con dei punti di controllo al suolo (*Ground Control Points*), ottenuti dalla combinazione dei dataset ICESat e GLAS. Il primo dei due proviene da una missione satellitare lanciata dalla NASA allo scopo (tra gli altri) proprio di misurare il livello degli strati di ghiaccio, mentre il secondo è uno strumento installato ICESat per la rilevazione di dati.

3.4.3 MERIT DEM

Il MERIT (*Multi-error-removed Improved DEM*), è il risultato di un lavoro di combinazione e correzione di diversi altri modelli di elevazione digitale, come indicato di seguito (v. Yamazaki et al., (2013)).

Malgrado siano state messe a punto delle tecniche di correzione degli errori, in molte zone esse non sono state applicate, poichè richiedono una certa mole di lavoro manuale. Inoltre, laddove sono state applicate, spesso si è tenuto conto di un solo genere dei quattro diversi tipi di errori elencati. Una precisa modellazione dell'entità degli errori non è possibile considerandone un tipo solo, perchè possono avere segno opposto ed annullarsi a vicenda. La metodologia con cui questo DEM è stato realizzato segue quattro passi di rimozione degli errori in un preciso ordine. Vengono utilizzati il DEM SRTM3 per la parte da 56° S a 60° N, e AW3D da 60° a 90° N. I due dataset sono stati integrati con VFP-DEM, prodotto appositamente per descrivere aree inosservate dal SRTM, tramite cartografia e misurazioni preesistenti. Per intervenire sul tree height error, sono state usate mappe di densità ed altezza della vegetazione.

Il risultato di questo processo è il MERIT DEM, dataset della risoluzione di 3 arcosecondi (che corrispondono a circa 90 m all'Equatore), in cui l'estensione delle aree con precisione verticale di misurazione di circa 2 metri sono aumentate dal 39% al 58%.

In particolare, questo DEM permette di rappresentare con buona fedeltà le pianure alluvionali, le valli profonde e le foreste pluviali.

3.5 Analisi idrologica in ambiente GIS

Un GIS (*Geographic Information System*) è un sistema informativo computerizzato capace di visualizzare, gestire, analizzare e manipolare informazioni di vario tipo derivanti da dati di tipo geografico. In pratica esso sfrutta una serie di archivi digitali, e crea un ambiente numerico georeferenziato in cui rappresentare ed elaborare i dati in essi contenuti.

Ci sono due forme in cui si presentano i dati georeferenziati in GIS, detti anche tematismi:

- Tematismi vettoriali: sono oggetti geometrici (punti, polilinee, poligoni) rappresentati con coppie di coordinate ed aventi caratteristiche dette attributi, contenute in apposite tabelle.

- Tematismi raster: griglie in cui viene discretizzata l'informazione spaziale, le cui celle sono rappresentate geograficamente da coppie di coordinate.

I DEM rappresentano il più comune tipo di file raster, e proprio a partire da essi è possibile in ambiente GIS eseguire una serie di operazioni per estrarre bacini idrografici e reticoli drenanti. Si descriveranno brevemente i modi di procedere per ottenere queste informazioni idrologiche, poichè esse sono indispensabili per l'elaborazione e la comprensione degli indici geomorfici.

Un bacino idrografico superficiale è la porzione di superficie topografica drenata da un punto ben preciso, detto sezione di chiusura di tale bacino; per poter delimitare il bacino idrografico sotteso ad una certa sezione è necessario tracciare le linee di spartiacque: questo processo, prima effettuato manualmente, è ora automatico e veloce grazie allo sviluppo di diversi algoritmi, di cui il primo (utilizzato anche in questo studio) è stato il D8.

3.5.1 Algoritmo D8

Ipotizzando la realtà discretizzata in celle a maglia quadrata, l'algoritmo D8 si basa sulla semplificazione per cui le possibili direzioni di deflusso superficiale di una qualunque cella siano otto, in quanto ogni cella interna al dominio di interesse è circondata da altre otto celle. Il D8 segue una serie di passi consecutivi:

1. Identificazione della direzione di massima pendenza
2. Codifica della direzione di drenaggio
3. Valutazione dell'area contribuyente di ogni singola cella
4. Definizione di un'area contribuyente di soglia CSA
5. Delimitazione del bacino idrografico superficiale

Prima di procedere alla descrizione più dettagliata delle fasi elencate, si vuole sottolineare come l'algoritmo D8 costituisca una forte approssimazione della realtà, perchè le direzioni di scorrimento del deflusso superficiale sono infinite; dei limiti di tale simulazione dei processi idrologici reali si deve pertanto essere consapevoli nell'analisi *DEM-based* della pericolosità idraulica. Dell'algoritmo D-infinito, che permette infinite direzioni di drenaggio e ripartizione del deflusso tra due pixel, non si parlerà estensivamente per brevità.

Direzione di massima pendenza

Considerando un generico punto della superficie reale, la massima pendenza può giacere su infinite direzioni, mentre l'algoritmo D8 considera solo le 8 rappresentate dalle celle adiacenti a quella considerata. Prendendo in considerazione una cella alla volta, viene calcolato il rapporto tra la differenza di quota con le celle adiacenti e la distanza tra i loro centri; il valore massimo costituisce la massima pendenza. Tale operazione viene eseguita per tutti i pixel del dominio.

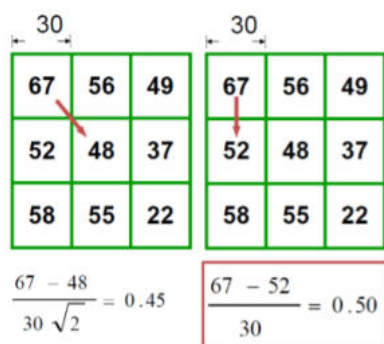


Figura 3.1: Direzione di massima pendenza secondo l'algoritmo D8

Direzione di drenaggio

Una volta stabilita la direzione in cui la pendenza è massima, a ciascuna cella deve essere associato un valore che identifica tale direzione, lungo la quale avverrà il drenaggio delle acque superficiali. Esistono due diverse convenzioni allo scopo, una introdotta in ESRI (*Environmental System Research Institute*) ed una in GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*): in entrambe le 8 direzioni sono rappresentate da 8 numeri.

Il file che si ottiene, cioè la *drainage direction*, appare come una rappresentazione nitida dei versanti.

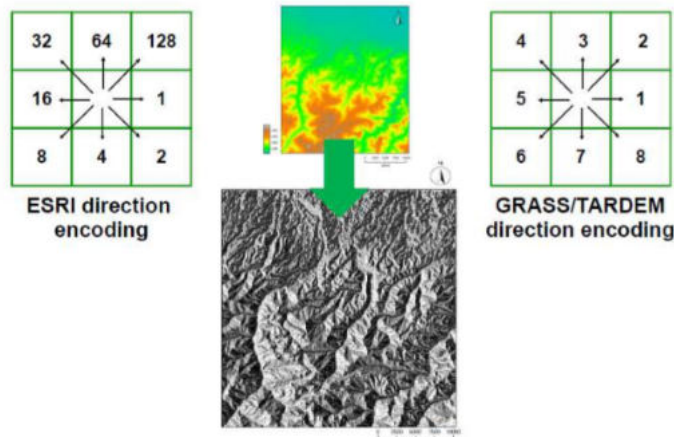


Figura 3.2: Direzione di drenaggio secondo l’algoritmo D8

Area contribuyente

Il passo successivo consta nell’identificazione del numero di celle idrologicamente a monte rispetto a ciascuna cella appartenente al DEM in esame. Ne risulta un file detto *flow accumulation* che contiene in ogni punto il numero di pixel drenati (dove il minimo valore è 1, corrispondente ad una cella che drena solo sè stessa).

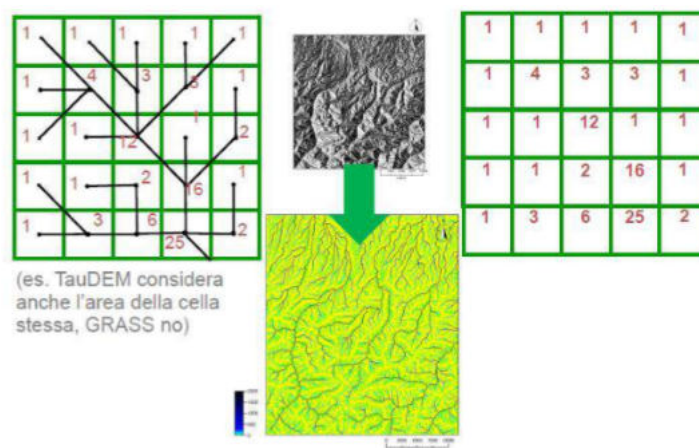


Figura 3.3: Area contribuyente secondo l’algoritmo D8

CSA ed estrazione del reticolo idrografico

Una volta ottenuta l'area contribuente per ogni pixel, resta da distinguere quali di questi appartengano al versante e quali al reticolo idrografico. Per farlo è sufficiente decidere un valore di soglia all'area contribuente, definito CSA (*Critical Source Area*), al di sopra del quale le celle verranno considerate parte della rete fluviale. Il risultato di tale operazione è un file raster rappresentante il reticolo idrografico.

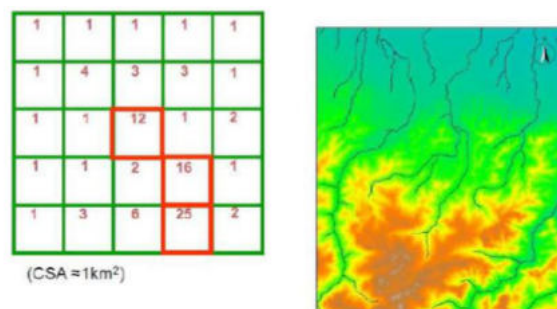


Figura 3.4: CSA e reticolo idrografico secondo l'algoritmo D8

Delimitazione del bacino

A partire dal reticolo idrografico così ottenuto, è possibile delimitare i contorni di un bacino idrografico di interesse, selezionandone opportunamente la corrispondente sezione di chiusura (in termini di pixel ricadente sul reticolo idrografico). E' sufficiente infatti selezionare all'interno del dominio i pixel che drenano il proprio deflusso superficiale verso la sezione di chiusura.

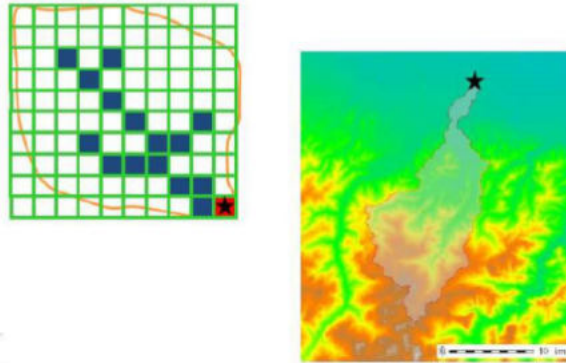


Figura 3.5: Bacino afferente ad una certa sezione di chiusura secondo l'algoritmo D8

3.6 Indici geomorfici proposti in letteratura

Diversi sono gli indici geomorfici proposti in letteratura, tra cui si opera la distinzione in semplici e compositi.

Quelli semplici rappresentano delle singole e precise caratteristiche morfologiche del territorio. Sono affidabili nel rappresentare la pericolosità in alvei montani, ma cadono spesso in errore con le geometrie più complesse dei territori pianeggianti, dove sfortunatamente è maggiore anche il rischio. Segue un elenco di alcuni degli indici morfologici semplici più comuni:

Area contribuyente a monte $A_s[m^2]$, coincidente con la *flow accumulation*, calcolata in termini di metri quadri (invece che di pixel afferenti).

Curvatura della superficie, definita come il Laplaciano della quota $\nabla^2 H[-]$ nel punto di interesse.

Pendenza locale $S[-]$, stimata come la pendenza massima tra tutte le possibili direzioni di flusso che collegano la cella in esame a quelle adiacenti.

Distanza dal reticolo più vicino $D[m]$, definita come la lunghezza del percorso che connette idrologicamente il punto in esame con l'elemento più vicino del reticolo idrografico.

Differenza di quota dal reticolo più vicino $H[m]$, detta anche "HAND" (*Height Above Nearest Drainage*), calcolata come differenza di quota tra il punto in esame e il punto finale del percorso precedentemente menzionato.

Gli indici morfometrici compositi invece combinano alcuni degli indici visti sopra ed altre variabili; molti di questi non hanno un significato ben preciso, ma sono semplicemente il confronto tra due quantità. Alcuni di essi sono:

Indice topografico modificato TI_m , introdotto da Kirkby (1975). Ha dimostrato di essere un buon indicatore per la delimitazione delle aree inondabili (Manfreda et al., 2011). Tale indicatore assume la forma:

$$TI_m = \ln \frac{a_d^n}{(\tan \beta)}$$

dove a_d è l'area drenata per unità di lunghezza di contorno del bacino, $\tan(\beta)$ è il gradiente locale ed n è un esponente < 1 .

Downslope index DW_i , proposto da Hjerdt et al. (2004). Costituisce una modalità alternativa per stimare il gradiente idraulico. Il metodo, ma calcola quanto lontano ($L_d[m]$) una particella d'acqua deve viaggiare lungo il suo percorso di deflusso affinché perda una certa quantità di energia potenziale ($d[m]$). Questo indice è definito come:

$$\tan(\alpha_d) = \frac{d}{L_d}$$

dove d è un parametro che si fissa in base al caso specifico, ma in genere viene assunto pari a 5 m.

Rapporto tra H e D :

$$H/D$$

Geomorphic Flood Index o GFI, definito come il logaritmo naturale del rapporto tra il tirante idrico h_r e la differenza di quota H tra il generico punto considerato all'interno del bacino e il punto più vicino del corso d'acqua:

$$GFI = \ln \frac{h_r}{H}$$

Per ogni punto del bacino, h_r rappresenta il valore del tirante idrico in corrispondenza della sezione del corso d'acqua più prossima al punto

di interesse, considerata come la sorgente più probabile di rischio. La stima di h_r è derivata come funzione dell'area contribuyente a monte, A_r , utilizzando una relazione idraulica di scala:

$$h(A_r) \approx A_r^n$$

ove b ed n sono parametri che possono essere stimati sulla base di dati idraulici ottenuti da stazioni idrometriche situate all'interno del bacino in esame. In alternativa, per il valore dell'esponente n si può fare riferimento alla letteratura disponibile (v. ad es. Samela et al., 2018). La presenza del coefficiente b , invece, può essere trascurata, assumendo che nella stima dei parametri esso (e in particolare il suo logaritmo naturale, $\ln(b)$) venga inglobato nel valore di soglia di cui eseguire la calibrazione.

Indice simile al GFI, al quale la letteratura scientifica non assegna un nome specifico; in questa sede, al fine di distinguerlo dal GFI, si ritiene opportuno denominarlo **Local GFI** (o LGFI):

$$LGFI = \ln \frac{h_l}{H}$$

ove h_l rappresenta il tirante locale in un generico punto del bacino e non nella corrispondente sezione del corso d'acqua più prossima al punto di interesse; h_l è stimato mediante una relazione del tutto analoga a quella riportata per il GFI, $h_l \approx bA_l^n$, ove in questo caso l'area contribuyente A_l è funzione di h_l , e b ed n rappresentano due parametri calibrati sul bacino di interesse.

$(h_r - H)/\tan(\alpha_d)$: questo indice ha lo scopo di descrivere, in ogni punto del bacino indagato, la differenza tra l'altezza $h(A_r)$ e il valore H , divisa per un surrogato del gradiente idraulico rappresentato dal downslope index (v. ad es. Manfreda et al., 2015; Samela et al., 2017).

$(h_r - H)/D$: questo indice ha lo scopo di descrivere, in ogni punto del bacino indagato, la differenza tra l'altezza $h(A_r)$ e il valore H , divisa per la distanza D (v. ad es. Manfreda et al., 2015; Samela et al., 2017).

Diversi studi scientifici hanno comparato in diversi contesti geografici gli indici geomorfologici sopra elencati e fornito interessanti valutazioni sulla loro idoneità a identificare le aree a rischio alluvionale e discusso se le loro prestazioni siano in qualche modo collegate alle caratteristiche topografiche del bacino. In tal senso, un recente studio di Samela et al. (2017) condotto

per il bacino idrografico dell'Ohio (Stati Uniti) mostra come, sia nelle aree montane (pendenza media del 34%) che in quelle di pianura (pendenza media del 2%), l'indice GFI sia in grado di individuare tra il 75% e il 90% delle aree allagabili, sebbene, limitatamente alle aree di pianura, la distanza idraulica rispetto al corso d'acqua più vicino, D , conduca a risultati leggermente migliori del GFI. Un ulteriore vantaggio del GFI è associato alla ridotta estensione dell'area richiesta per la calibrazione del valore di soglia: Samela et al. (2017) mostrano come per il GFI sia sufficiente disporre di un'area già mappata, con caratteristiche geomorfologiche simili, di estensione pari al 2% dell'intera area di interesse. Studi più recenti (v. Tavares da Costa et al., 2018) mostrano ottimi risultati nell'utilizzo del GFI su larga scala, dove si ha variabilità delle condizioni climatiche, idrologiche e topografiche del territorio.

L'attendibilità delle procedure speditive basate sui suddetti indici morfometrici risulta dipendere fortemente dalla risoluzione dei modelli digitali delle quote del terreno (DEM) di partenza: siccome le quote del terreno sono il dato di input principale, ci si attende che la loro maggiore o minore accuratezza conduca a risultati più o meno attendibili. In tal senso, l'applicazione del GFI risulta molto versatile: sebbene la procedura benefici di DEM di elevato dettaglio, è stato dimostrato come i DEM normalmente disponibili online (con risoluzione orizzontale compresa tra i 30 e i 90 m) siano idonei per utilizzi su larga scala e in zone con scarsità di dati di dettaglio (v. Samela et al., 2018). In generale è necessario utilizzare una risoluzione del DEM che sia compatibile con la scala dei processi che si vanno ad investigare.

3.7 Metriche prestazionali utilizzate

Come detto precedentemente, i valori di soglia ottimali di ciascun indice calcolato sono stati definiti in base ad una procedura di calibrazione; si è reso quindi necessario scegliere una funzione obiettivo che descrivesse adeguatamente le prestazioni della simulazione.

La metrica prestazionale scelta è l'indice di Youden (v. W. J. Youden, 1950). Prima di fornire la definizione di tale parametro, si procederà in questo paragrafo alla descrizione dell'analisi statistica dei classificatori binari.

Si definisce classificatore binario un qualunque test il cui scopo è distinguere tra due diversi risultati attraverso il superamento di una soglia. Esempi di particolare interesse in questo ambito sono appunto gli indici geomorfologici, che distinguono le aree a rischio allagamento dalle aree non esposte, a seconda che il valore limite calibrato venga superato o meno. Un altro ambito in cui tali tipi di test sono molto frequenti è la medicina, dove si vuole

proficuamente dividere una popolazione in soggetti malati e sani.
In questo tipo di problemi, gli esiti possibili sono quattro:

1. Vero positivo (TP): il test riconosce come positivo un caso che effettivamente lo è.
2. Falso positivo (FP): il test riconosce come positivo un caso che in realtà è negativo.
3. Vero negativo (TN): il test riconosce come negativo un caso che effettivamente lo è.
4. Falso negativo (FN): il test riconosce come negativo un caso che in realtà è positivo.

Si possono allora definire i seguenti operatori che descrivono la bontà del test:

- True positive rate (sensibilità):

$$TPR = TP/P = TP/(TP + FN)$$

- True negative rate (specificità):

$$TNR = TN/N = TN/(TN + FP)$$

- False positive rate (1 - specificità):

$$FPR = FP/P = FP/(FP + TN) = 1 - TNR$$

- False negative rate (1 - sensibilità):

$$FNR = FN/N = FN/(TP + FN) = 1 - TPR$$

- Accuratezza:

$$ACC = (TP + TN)/(P + N)$$

Dove per TP, FP, TN, N, P si intendono rispettivamente il numero totale di casi veri positivi, falsi positivi, veri negativi, negativi (sia veri che falsi), positivi (sia veri che falsi).

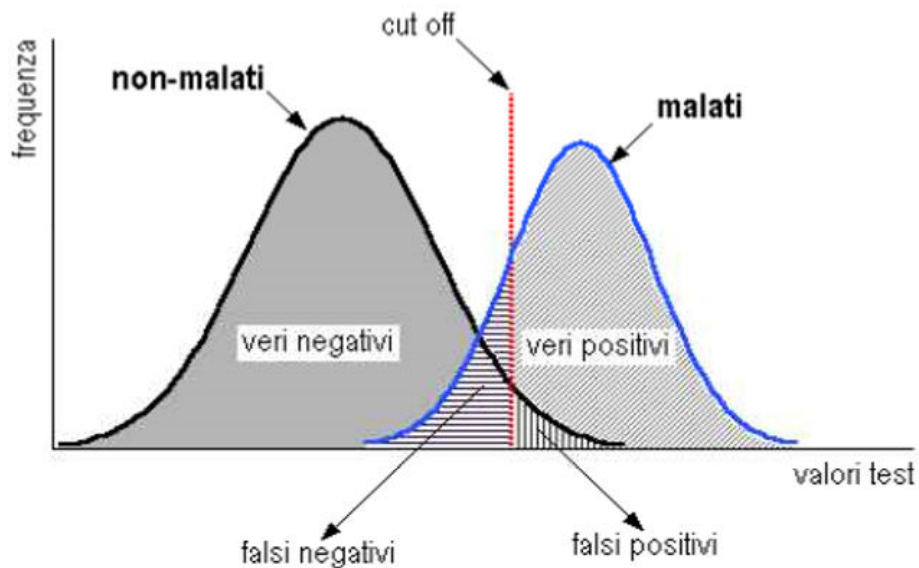


Figura 3.6: Esempio di distribuzione statistica dei diversi esiti possibili di un test binario (tratto da test medici)

Il metodo più utilizzato per studiare l'andamento degli operatori descritti è la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic* o *Relative Operating Characteristic*), tipicamente rappresentata in un grafico che riporta il valore di FPR in ascissa e TPR in ordinata. Essa è delimitata da due linee, che segnano i casi limite:

- La bisettrice del quadrante a 45° che rappresenta il caso limite di un test senza nessun valore predittivo.
- La spezzata formata dal segmento verticale che congiunge l'origine al punto $(0,1)$ e quello orizzontale che congiunge $(0,1)$ a $(1,1)$.

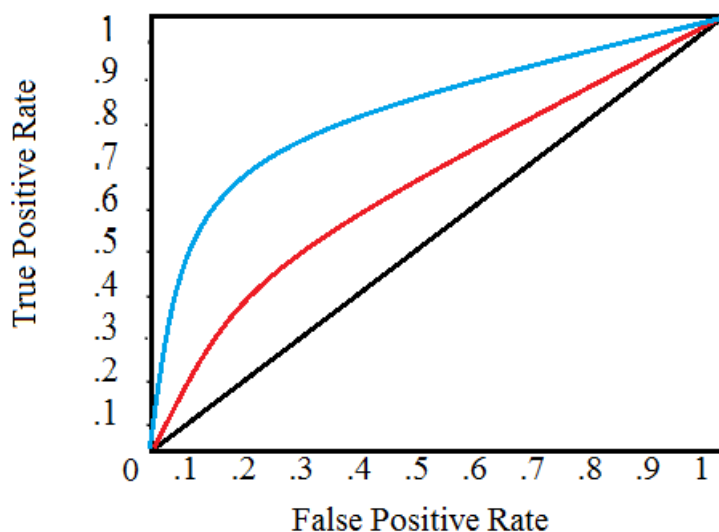


Figura 3.7: La curva ROC

Ogni classificatore binario può quindi essere rappresentato con una curva sul piano FPR-TPR, in cui ogni punto rappresenta i valori in ascissa ed ordinata con un certo valore di soglia scelto. Per confrontare l'efficacia di diversi classificatori si utilizza in genere il parametro AUC (*Area Under Curve*): il criterio di classificazione che si avvicina di più alla curva limite spezzata, e che possiede la maggior area sottesa è quello più affidabile.

L'analisi statistica proposta nel 1950 da J. W. Youden, invece serve allo scopo di individuare il migliore valore soglia di una certa ROC. L'indice di Youden si può rappresentare graficamente come la distanza verticale tra un punto specifico sulla curva ROC e la linea bisettrice del primo quadrante del grafico; esso è definito come segue:

$$J = TPR + TNR - 1 = TPR - FPR$$

Il valore che J può assumere varia tra 0, che indica un test la cui capacità predittiva è nulla, ed 1, che indica totale affidabilità.

Come si è detto, tale parametro è stato scelto nel presente elaborato di tesi per la calibrazione degli indici geomorfici. Il presente elaborato di Tesi, nella presentazione e discussione dei risultati, prende in esame anche eventuali vantaggi e svantaggi nell'utilizzo della statistica di Youden.

Capitolo 4

Obiettivi e struttura dell'indagine

Il presente capitolo è dedicato alla descrizione delle indagini effettuate nell'ambito del presente lavoro di Tesi.

Come anticipato nei capitoli precedenti, il rischio idraulico da inondazione, malgrado i notevoli progressi in ambito tecnico-scientifico, è in costante aumento a livello globale. Ciò è dovuto al coesistere di diversi fattori: i cambiamenti climatici sono spesso indicati come i principali responsabili dell'amplificazione degli eventi di piena, ma numerosi studi evidenziano anche l'impatto dell'antropizzazione occorsa negli ultimi decenni, i cui notevoli cambiamenti di uso e copertura del suolo hanno determinato un incremento del rischio idraulico in numerose aree urbane.

Si è inoltre sottolineata la mole di risorse necessarie per effettuare delle modellazioni fluidodinamiche della pericolosità alluvionale, che si scontra con la crescente necessità di realizzare database completi, dettagliati e a larga scala, che facilitino la cooperazione internazionale nella gestione del rischio idraulico da inondazione.

Una delle strategie ideate per risolvere tali problemi è quindi l'utilizzo di metodi speditivi di mappatura, da combinare opportunamente con quelli tradizionali. Nella panoramica delle diverse tecniche alternative sviluppate spiccano i metodi *DEM-based*.

L'obiettivo del presente lavoro di Tesi è quello di testare l'affidabilità degli indici geomorfici in diversi casi studio. Come già si è detto, tali indici non rappresentano la dinamica del fenomeno alluvionale, bensì solo la naturale predisposizione del suolo ad essere allagato in base a sue caratteristiche topografiche intrinseche. Proprio per la mancanza di una modellazione fisica del fenomeno, la prestazione degli indici geomorfici è fortemente dipendente dal caso specifico, ed in particolar modo da tre fattori:

- Il particolare indice considerato
- La verosimiglianza con cui il DEM rappresenta la superficie terrestre
- La procedura di calibrazione del valore di soglia

In questo contesto, le indagini condotte nel presente elaborato sono organizzate in due diverse parti. La prima parte consiste nell'analisi comparata dei risultati di diversi indici geomorfici per una stessa area d'interesse; nella seconda parte si vuole studiare l'influenza del DEM utilizzato e della scala di applicazione sulle performance del GFI.

I principali strumenti utilizzati nell'esecuzione di tale lavoro sono due: l'algoritmo SafeRIVER, sviluppato in collaborazione tra Gecosistema s.r.l. e l'Università di Bologna, ed un codice Python, aggiornato nell'ambito del presente lavoro di Tesi a partire da una versione precedentemente sviluppata in seno all'Università di Bologna. Ne consegue l'uso di due diversi procedimenti per la calibrazione (la cui descrizione si può trovare in Appendice) che ha portato a risultati differenti tra i vari casi affrontati. Di ciò si discuterà al Capitolo 7.

Si rimanda ai prossimi paragrafi per una spiegazione più dettagliata delle due fasi dello studio effettuato.

4.1 Disamina di diversi indici morfometrici

E' stato già presentato l'ampio ventaglio di indici ideati per lo studio della pericolosità alluvionale ed è stato annunciato che il loro comportamento può risultare decisamente diverso a seconda dei casi.

A parità di risoluzione del DEM utilizzato e di affidabilità della mappa di pericolosità idraulica scelta per la calibrazione, precedenti studi disponibili in letteratura hanno osservato in primo luogo una forte influenza dell'orografia (v. Manfreda et. al, 2015; Samela et al., 2017). Avviene infatti che nelle aree montane gli indici semplici riescono a descrivere la pericolosità alluvionale con una certa accuratezza, mentre in pianura, dove le singole caratteristiche topografiche non sono sufficienti, occorre in genere ripiegare su quelli compositi.

Nell'indagine effettuata nella prima parte del presente elaborato si è presa in considerazione una vasta area dell'Italia Settentrionale, che comprende Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Emilia-Romagna e parte di Veneto e Liguria, per la quale si sono calcolati due indici semplici, D ed H, e tre compositi, GFI, LGFI e TI. Si vuole specificare che uno studio di ampia scala su tale area non è mai stato eseguito in passato in questo ambito. Gli

indici scelti sono stati calibrati sull'intera area di studio utilizzando quattro diverse mappe di pericolosità: le mappature del JRC corrispondenti a 100 e 500 anni di tempo di ritorno e quelle del PGRA di categoria P2 e P1.

Le prestazioni di ciascun indice nei quattro casi sono state valutate tramite l'indice di Youden e gli elementi dell'analisi ROC mostrati e discussi nella parte finale del capitolo precedente.

Lo studio operato in questa prima parte è molto simile ad altri lavori già eseguiti da diversi autori sul valore predittivo dei diversi indici geomorfici, e la scelta degli indicatori qui utilizzati deriva da tali studi (v Manfreda et al., 2015; Samela et al., 2017).

E' utile menzionare in particolare lo studio condotto da Manfreda et al. (2015) per il bacino idrografico del fiume Bradano in Basilicata. Tale bacino presenta una forte variabilità nelle caratteristiche topografiche tra il corso superiore ed inferiore dell'alveo. Ciò ha dato la possibilità di ricercare un metodo di mappatura adeguato ad un contesto morfologico variegato e complesso. Due sono state le mappe utilizzate per la calibrazione: una a scala di bacino, ottenuta con un modello idraulico 1D, ed un'altra a scala molto più piccola, limitata all'area pianeggiante dello sbocco a mare del corso d'acqua, ottenuta con una modellazione 2D. Eseguendo un'analisi statistica basata sulla curva ROC e calcolando l'indicatore AUC, Manfreda et al. (2015) hanno mostrato che il GFI era l'indice con le migliori performance combinate dei due casi, mentre per H e D si sono riscontrate buone performance solo nel caso dell'intero bacino. Si vedano le figure con i risultati ottenuti.

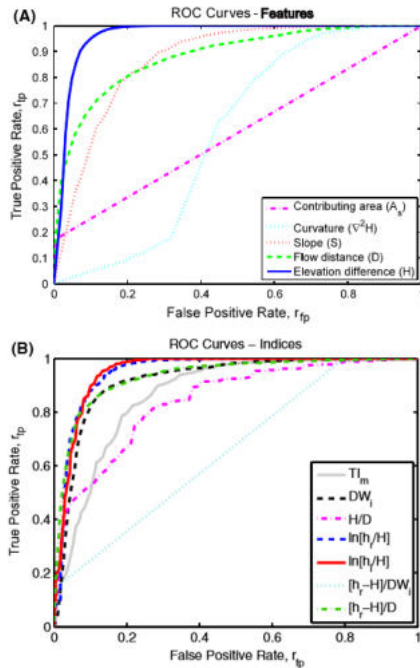


Figura 4.1: Curve ROC degli indici semplici (A) e compositi (B) calibrati sulla mappa 2D a scala di bacino (fonte: Manfreda et al., 2015)

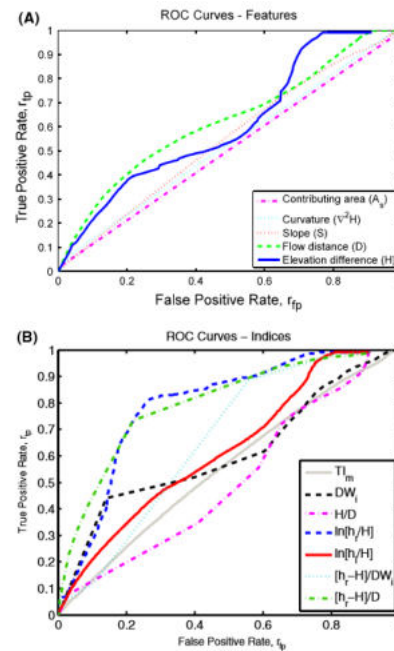


Figura 4.2: Curve ROC degli indici semplici (A) e compositi (B) calibrati sulla mappa 2D a scala locale (fonte: Manfreda et al., 2015)

Sulla base di questo ed altri studi (Samela, Manfreda, (2017); Dottori et al., (2018)) si sono scelti per l'indagine effettuata gli indicatori sopra elencati.

Si vuole sottolineare che un confronto delle prestazioni ottenibili a partire dai suddetti indici speditivi non è mai stata condotta a larga scala sul territorio italiano e risulta di grande interesse nell'ambito della mappatura della pericolosità idraulica da allagamento da fiume a scala nazionale.

Nei prossimi capitoli si descriveranno in dettaglio i file input ed i risultati di tale disamina tra indici geomorfici.

4.2 Applicazioni del GFI

La seconda parte del presente lavoro di Tesi si concentra su un solo indice, il GFI.

Come detto nel precedente capitolo, tale indicatore si è dimostrato molto prestante nella descrizione della pericolosità idraulica in diversi casi analizzati da altri autori, ed ha dimostrato buone performance anche nella prima fase della presente ricerca, come verrà mostrato al Capitolo 6.

E' stato quindi deciso di verificare l'attendibilità delle mappe prodotte dal GFI al variare di:

1. Contesti geografici
2. Risoluzione e tipologia del DEM
3. Scala di applicazione

Il contesto geografico, che comprende l'orografia e le condizioni climatiche ed idrologiche, è un elemento molto importante di cui valutare l'influenza. E' già stato esposto infatti che in genere la maggior parte degli indici geomorfici riescono a descrivere efficacemente la pericolosità alluvionale in contesti montani rispetto alle aree pianeggianti.

La scelta del DEM in input costituisce un fattore decisivo per la bontà dei risultati. In primo luogo infatti, a seconda del contesto geografico i diversi DEM oggi disponibili e accessibili gratuitamente (v. Capitolo 3) hanno diverse risoluzioni e gradi di accuratezza.

Tale scelta è fortemente legata ad un ulteriore aspetto: la scala di applicazione. Infatti, a seconda dell'estensione dell'area che si vuole mappare, si definisce in genere anche il grado di dettaglio che si vuole ottenere.

In generale, un DEM a risoluzione più elevata descrive il territorio con migliore approssimazione e dovrebbe fornire risultati più affidabili. In pratica però a seconda dell'estensione dell'area da mappare può risultare sconveniente aumentare la risoluzione, ottenendo un miglioramento della mappatura esiguo rispetto all'aumento dei tempi di calcolo e della memoria richiesta.

In particolare, poichè la dinamica del fenomeno è totalmente trascurata dalle procedure *DEM-based* basate sugli indici geomorfici, è possibile che aumentare il grado di dettaglio delle analisi condotte (fino ad includere per esempio l'interazione dei deflussi con opere idrauliche o a rappresentare particolari condizioni al contorno) non corrisponda necessariamente a una stima adeguata della pericolosità alluvionale, indipendentemente dalla risoluzione scelta.

Al fine di indagare al meglio gli aspetti sopra menzionati, per questa seconda fase del presente studio si sono analizzati tre bacini:

- Bacino idrografico del Reno (Germania)
- Bacino idrografico dell'Arga (Spagna)

- Bacino idrografico del Po (Italia)

Per ciascuno dei casi è stato calcolato il GFI a partire da DEM opportunamente scelti; in seguito si è ricavata la pericolosità idraulica tramite calibrazione secondo mappe di diversa origine. Analogamente a quanto effettuato nella prima parte dello studio, per la valutazione dei risultati prodotti si sono utilizzati l'indice di Youden e gli altri parametri dell'analisi ROC.

Si rimanda ai prossimi capitoli per la descrizione più dettagliata delle aree di studio, dei file input e delle mappature ricavate.

Capitolo 5

Casi di studio

In questo capitolo si fornisce una descrizione dettagliata dei diversi bacini idrografici presi in esame nel presente lavoro, indicando per ciascuno i file DEM e le mappe di pericolosità utilizzati per il calcolo e la calibrazione degli indici geomorfici.

5.1 Italia Settentrionale

La prima parte del presente lavoro di Tesi ha preso in considerazione un'area molto vasta, corrispondente alla maggior parte dell'Italia settentrionale: tale area comprende le regioni Emilia Romagna, Piemonte, Valle d'Aosta, Lombardia, Veneto, Trentino-Alto Adige e parte della Toscana.

La scelta di questa zona per la disamina di alcuni degli indici geomorfici più interessanti è stata guidata anche dalla collaborazione tra UnipolSai Assicurazioni S.p.A. e il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM) dell'Università di Bologna, finalizzato alla ricerca e messa a punto di tecniche semplificate ed efficaci di mappatura della pericolosità idraulica in territorio italiano.



Figura 5.1: Porzione dell'Italia Settentrionale scelta per la disamina degli indici geomorfici

L'area presa in esame è densamente antropizzata, ospita alcune delle città più grandi in Italia e contribuisce in modo significativo al Prodotto Interno Lordo (PIL) Nazionale sia per il settore agricolo che manifatturiero. Complessivamente, la superficie analizzata è di circa $100'000 \text{ km}^2$.

Essa comprende i bacini di diversi importanti corsi d'acqua:

- Po: con una lunghezza di 652 km ed una portata media alla foce di circa $1540 \text{ m}^3/\text{s}$, costituisce il più grande fiume d'Italia. Esso nasce in Piemonte e sfocia nel mare Adriatico, formando un vasto delta con sei rami. Il suo percorso, situato in un territorio per lo più pianeggiante, che prende da esso il nome di Pianura Padana, interessa le regioni Lombardia, Emilia-Romagna e Veneto, tra le quali per lunghi tratti il confine amministrativo.
- Adige: scorre nelle regioni del Trentino-Alto Adige (dove nasce) e del Veneto per un percorso di 410 km di estensione, che lo rende il secondo

fiume italiano per lunghezza ed il terzo per ampiezza del bacino, mentre con una portata di circa $235 \text{ m}^3/\text{s}$ alla foce si classifica al quarto posto per volume d'acqua.

- Reno: nasce in Toscana ma scorre principalmente in Emilia-Romagna, di cui costituisce il secondo più importante corso d'acqua, con un percorso di 212 km^2 ed una portata media alla foce di ($95 \text{ m}^3/\text{s}$). Il suo alveo originariamente portava il Reno a confluire nel Po, ma una serie di opere idrauliche eseguite nel corso dei secoli lo hanno deviato verso est, fino a farlo sfociare nell'Adriatico.

Si aggiungono i bacini di numerosi altri fiumi di grandi dimensioni, affluenti del Po, tutti contenuti nel suo bacino alluvionale. Tra di essi si ricordano i principali: Dora Baltea, Adda, Ticino, Oglio, Sesia e Tanaro.

La geografia dell'Italia settentrionale è molto varia e comprende due rilievi tra loro molto diversi ed una vasta area pianeggiante.

A nord sono presenti le Alpi, la più importante catena montuosa sul territorio nazionale, con cime che raggiungono e superano i 4000 m s.l.m., che occupa circa $52'000 \text{ km}^2$. L'arco alpino ha concavità verso sud, racchiudendo il più grande territorio pianeggiante italiano: la Pianura Padana. Essa si estende per circa $47'000 \text{ km}^2$, costituendo una delle maggiori pianure alluvionali europee.

La Pianura Padana, principalmente compresa nel bacino idrografico del fiume Po, è suddivisa in due zone distinte: l'alta e la bassa pianura, a seconda dell'altitudine. La prima si trova ai piedi delle Alpi e Prealpi e sul pedemonte degli Appennini, dove i terreni sabbiosi e ghiaiosi permeabili favoriscono l'infiltrazione delle acque superficiali. La bassa pianura ha origine dove i terreni più fini, argillosi ed impermeabili portano alla formazione di falde freatiche, paludi ed acquitrini.

Tale formazione alluvionale confina a sud con il secondo principale sistema montuoso italiano: gli Appennini. Più giovane e di formazione geologica diversa dalle Alpi, questa catena montuosa raggiunge cime molto meno elevate, superando di poco i 2000 m nell'Italia settentrionale. Le forme dei rilievi, generalmente non molto aspre, si diramano in dolci vallate ad est verso la pianura del Po.

Complessivamente, nel territorio descritto la quota varia in un range molto ampio, da circa 4800 m s.l.m. ad alcune aree depresse (quote inferiori al livello del mare), con un'altitudine media di circa 900 m. Per descrivere l'area selezionata si è scelto di utilizzare il DEM MERIT: il motivo di questa scelta è nella natura stessa di questo dataset, realizzato tramite l'elaborazione di diversi altri modelli e reso adatto a rappresentare adeguatamente l'idrografia. La risoluzione di tale DEM è di circa 90 m, non sufficienti a catturare

certe situazioni a geometria complessa, come le arginature fluviali, per cui ci si aspetta diverse incongruenze rispetto alle mappe di calibrazione, ma si rimanda al capitolo successivo per l'esposizione e discussione dei risultati.

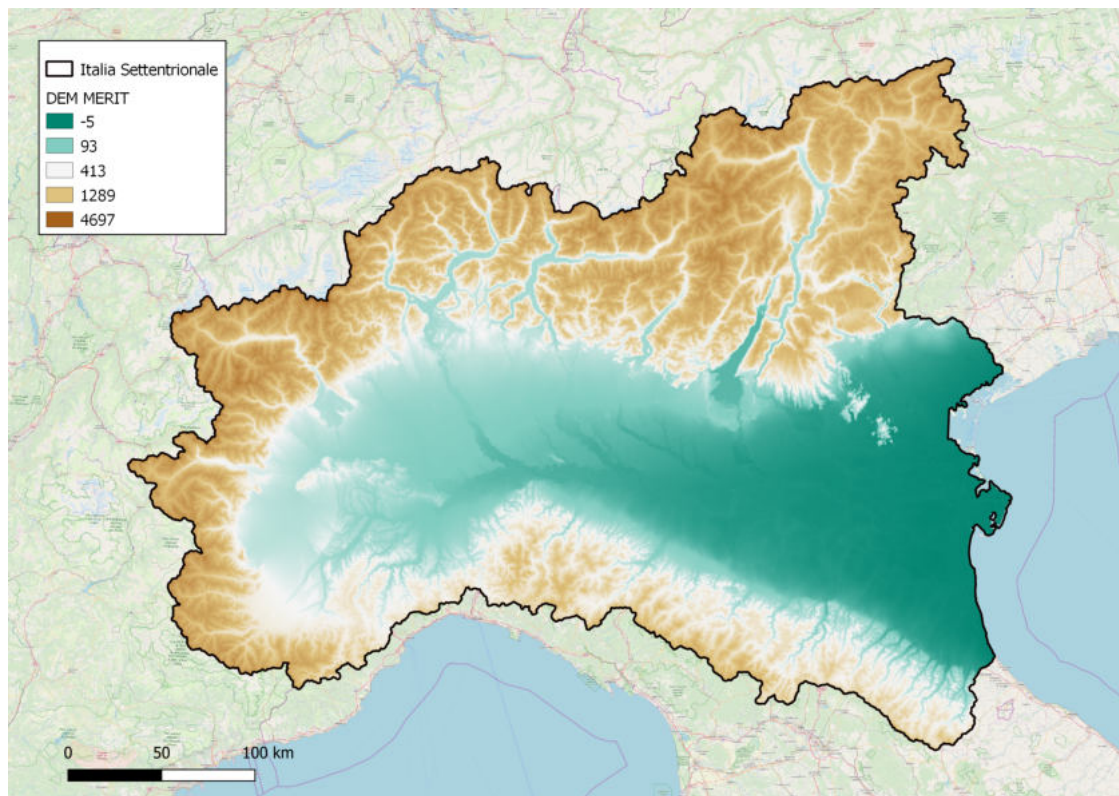


Figura 5.2: Rappresentazione dell'Italia Settentrionale tramite MERIT DEM

Per quanto riguarda le mappe di pericolosità necessarie per la fase di calibrazione, sono stati considerati gli scenari ad alta e media probabilità di accadimento. In particolare, esse sono:

- Mappa del JRC con tempo di ritorno di 100 anni
- Mappa del JRC con tempo di ritorno di 500 anni
- Mappa del PGRA con tempo di ritorno tra i 100 e i 200 anni (P2)
- Mappa del PGRA con tempo di ritorno di circa 500 anni (P1)

Tali mappature sono state già descritte in precedenza, ma si vuole qui sottolineare come le simulazioni effettuate dal JRC abbiano considerato solo

il reticolo idrografico principale, trascurando i bacini con area inferiore a 500 km². Al contrario i dati del PGRA hanno tenuto conto anche di alcuni corsi d'acqua di minori dimensioni (dipendendo dalla specifica Autorità di Bacino).

A dimostrazione di quanto detto, si può notare come la ramificazione delle zone di pericolosità idraulica sia più estesa negli studi eseguiti per i PGRA. Appare inoltre evidente in tali mappature una certa disomogeneità nella copertura, dovuta alla diversa provenienza degli studi eseguiti dalle Autorità di Bacino, che hanno pianificato autonomamente modelli utilizzati ed assunzioni semplificative.

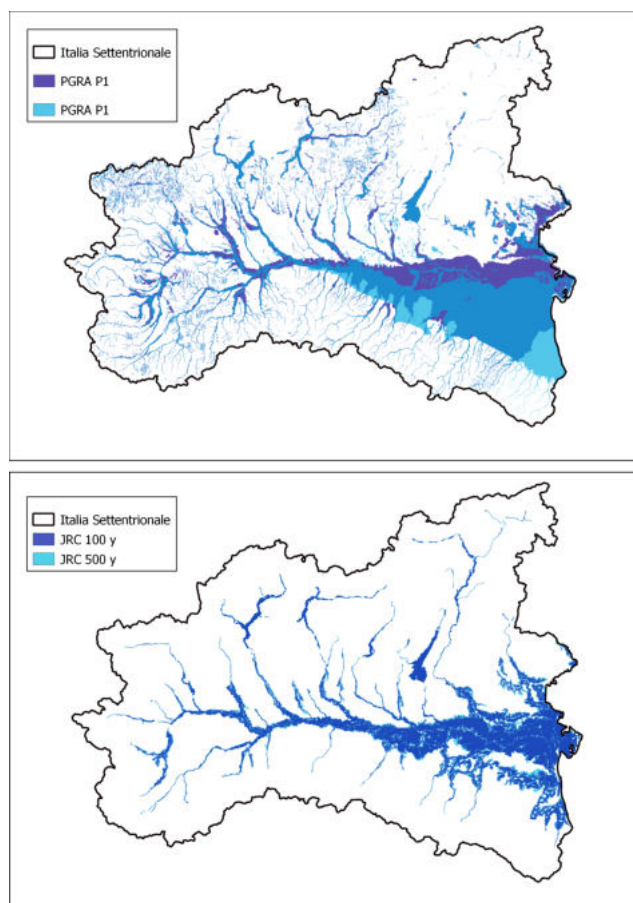


Figura 5.3: Mappature della pericolosità idraulica eseguite dei PGRA e del JRC

5.2 Applicazioni del GFI

5.2.1 Fiume Arga (Spagna)

Il territorio del caso studio di Pamplona è il più piccolo tra quelli considerati: corrisponde a circa 908 km², e comprende soltanto la porzione di bacino imbrifero fino alla confluenza del fiume Arga nel Rio Arakil.

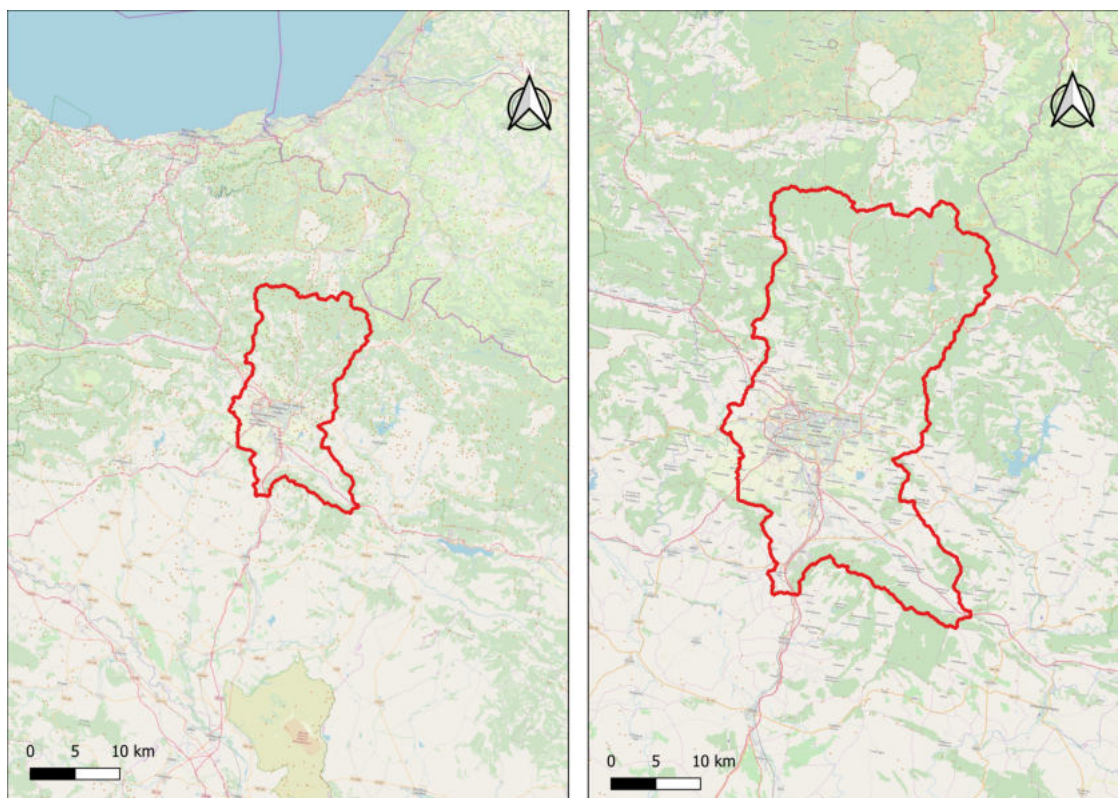


Figura 5.4: Bacino del fiume Arga con sezione di chiusura nella città di Pamplona

Il contesto geografico è quello della regione Navarra, situata in Spagna settentrionale ed occupata in buona parte dal versante meridionale dei Pirenei. L'altitudine varia da un minimo di circa 378 m s.l.m. a 1434 m s.l.m., con una quota media di 905 m s.l.m.

Il bacino considerato vede a sud-ovest la sua sezione di chiusura, nella parte più ampia della pianura alluvionale del fiume Arga, dove si trova anche la città di Pamplona. Risalendo il corso d'acqua, la valle si restringe via via,

lasciando al passo ai rilievi pirenaici, la cui altezza aumenta progressivamente verso nord e nord-est.

La parte considerata del bacino dell'Arga comprende alcune delle città principali della regione Navarra, ma consiste prevalentemente in un territorio a bassa densità abitativa, a carattere essenzialmente montano e a clima continentale.

Per il presente caso studio sono stati utilizzati MERIT DEM, alla risoluzione di 90 m, ed EU DEM, alla risoluzione di 25 m.

Mentre il primo dei due DEM nominati è stato prodotto dall'elaborazione di altri dataset, il secondo è nato allo scopo di descrivere adeguatamente tutta l'Europa: ci si aspetta quindi che entrambi i file consentano una rappresentazione accettabile della pericolosità alluvionale e si studierà l'effetto della risoluzione sull'accuratezza dei risultati.

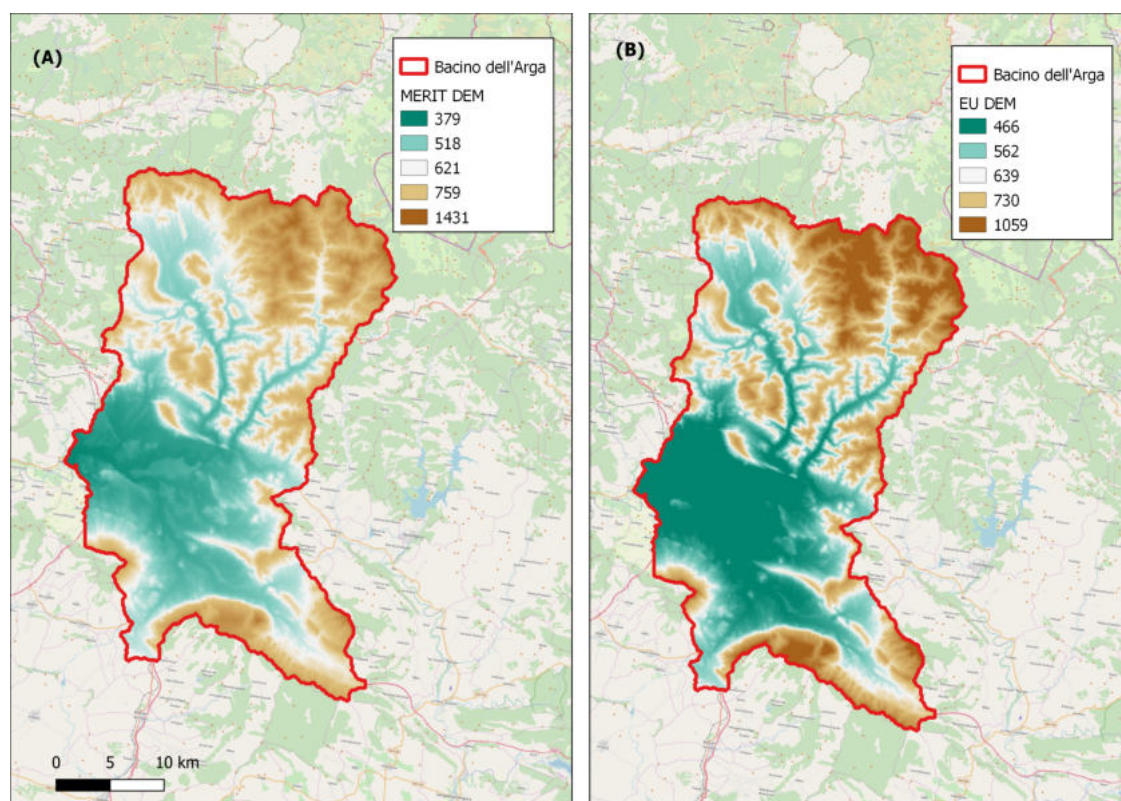


Figura 5.5: DEM utilizzati per la descrizione del caso studio di Pamplona (MERIT (A) e EU DEM (B))

La calibrazione del GFI calcolato a partire dai due modelli di quota è

stata effettuata sulla base delle mappe di pericolosità del JRC con tempo di ritorno di 100 anni.

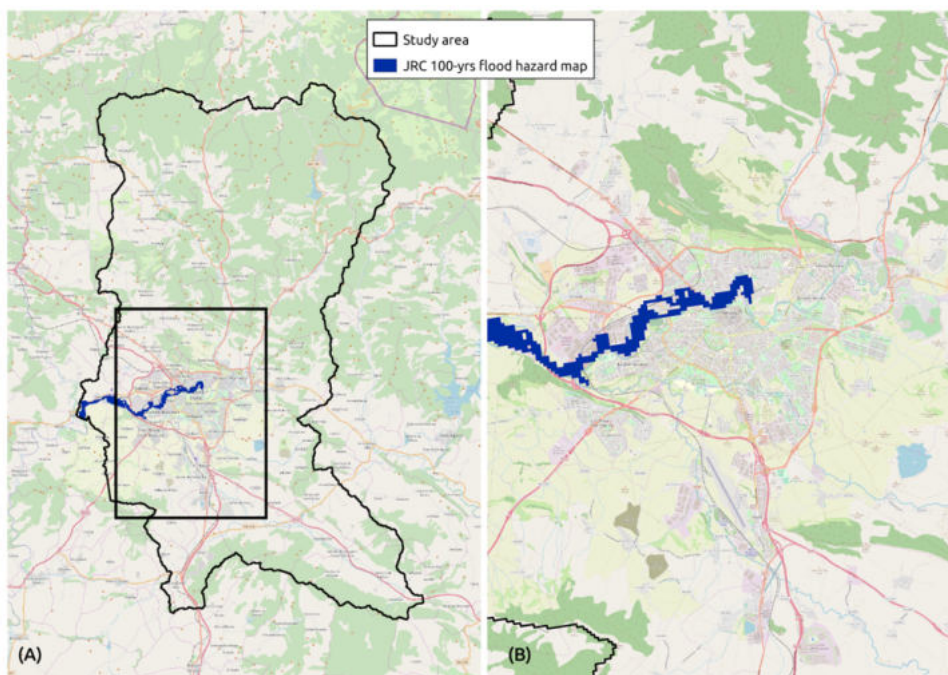


Figura 5.6: Mappa di pericolosità del JRC con tempo di ritorno di 100 anni

Si può notare sin da subito come la modellazione della pericolosità idraulica effettuata dal JRC sia incompleta. E' infatti poco verosimile che le zone dove l'allagamento si può verificare si interrompano così bruscamente risalendo la valle del fiume Arga verso monte. E' prevedibile quindi che la superficie totale a rischio sia maggiore nelle mappe prodotte tramite GFI, e si rimanda al Capitolo 6 per l'analisi dei risultati.

5.2.2 Fiume Reno (Germania)

Per tale caso studio si è scelto il bacino del fiume Reno in Germania, considerando la sezione di chiusura nella città di Colonia. Si è escluso in questo modo il tratto finale del corso del Reno, dove il corso d'acqua entra nei Paesi Bassi, per dividersi in tre rami e sfociare nel Mare del Nord.

Complessivamente l'area considerata ammonta a circa 260'000 km², e costituisce il più esteso dei territori considerati nella presente Tesi.

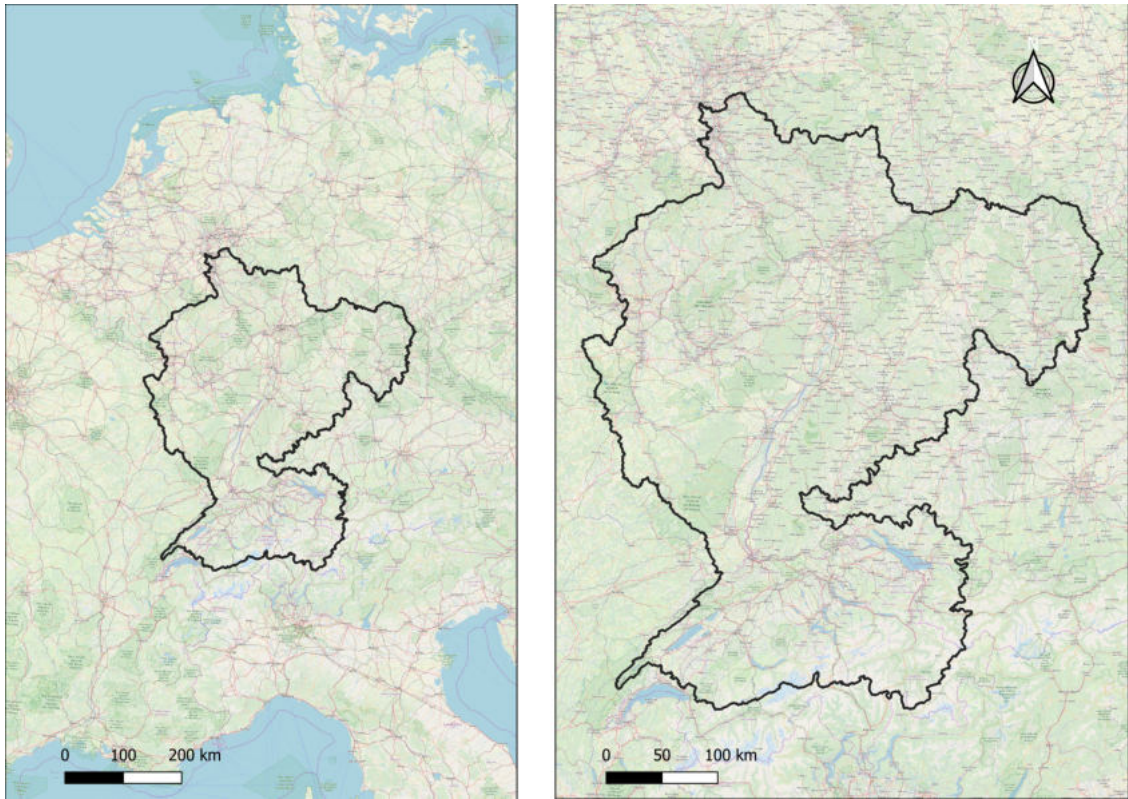


Figura 5.7: Bacino del fiume Reno con sezione di chiusura a nord della città di Colonia

Il Reno si estende per un percorso di circa 1200 km e costituisce uno dei fiumi più lunghi d'Europa. La sua sorgente è formata da diversi affluenti che nascono per lo più sulle Alpi svizzere; il corso d'acqua principale attraversa la Svizzera, delineandone il confine con il Liechtenstein, per poi definire per un lungo tratto il confine con franco-tedesco, gettarsi in Germania ed infine attraversare i Paesi Bassi.

Il suo intero bacino interessa quindi Svizzera, Liechtenstein, Germania, Francia, Belgio, Lussemburgo e Paesi Bassi. Tutti questi paesi sono parzialmente compresi nell'area considerata, tranne l'Olanda.

Come nel primo caso studio affrontato, anche qui la geografia è molto varia. A sud si trovano le Alpi Centrali (o Alpi Svizzere), dove si hanno numerose cime che superano i 4000 m, poi proseguendo lungo il corso del fiume si incontra la grande valle del Reno che forma la più ampia area pianeggiante dell'intero bacino: essa raggiunge circa la sua massima estensione trasversale lungo il confine franco-tedesco, mantenuta poi fino all'altezza di

Coblenza (Germania), dove si ha la confluenza con il Meno ed un brusco restringimento.

Di nuovo la pianura alluvionale del fiume si allarga a sud di Colonia, dove si trova la regione fortemente industrializzata della Ruhr.

Il territorio che circonda la valle è costituito da rilievi di diverse origini, forme ed estensioni, che procedendo da sud verso nord si fanno sempre meno elevati. La quota varia nell'intera area da circa 4000 m s.l.m. a 30 m s.l.m. sul livello del mare, con una media di 517 m s.l.m.

Lo studio eseguito per il bacino del Reno è molto simile a quello dell'Ar-
ga; anche in questo caso i DEM utilizzati per la descrizione topografica del territorio sono MERIT ed EU DEM, per gli stessi motivi sopra menzionati.

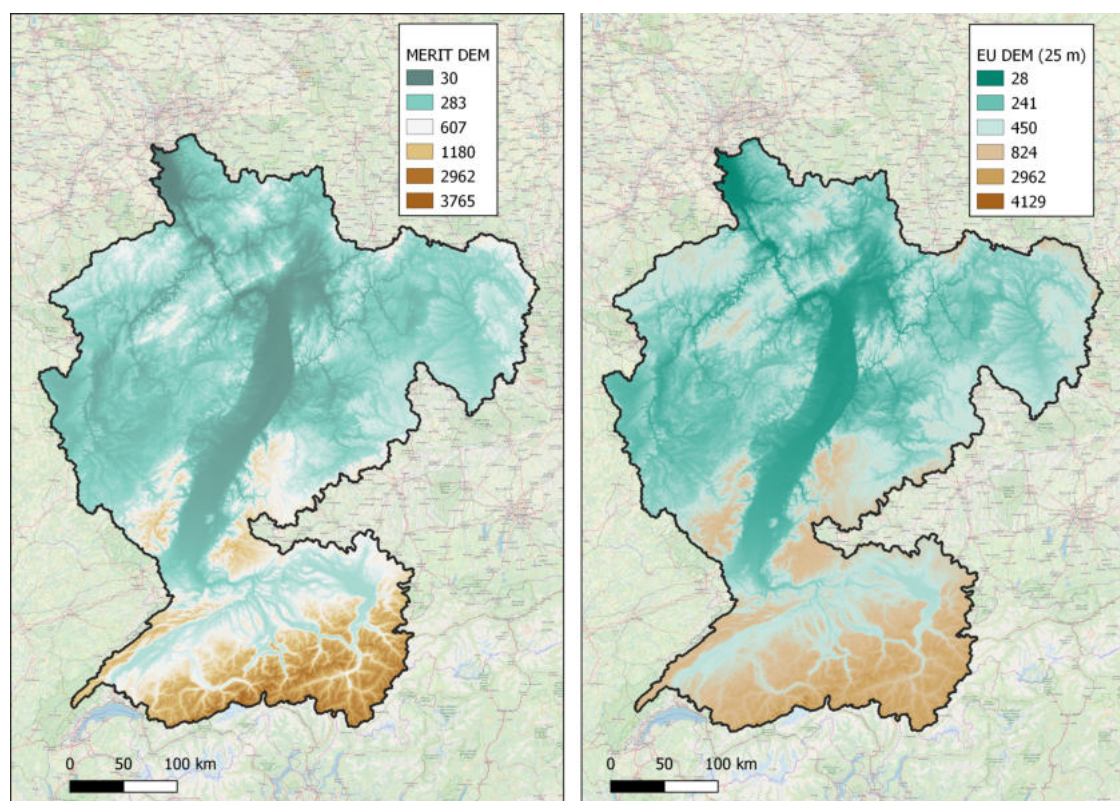


Figura 5.8: DEMs utilizzati per la descrizione del caso studio di Colonia (MERIT (A) ed EU (B))

Come per il caso studio spagnolo, per la fase di calibrazione è stata scelta la mappa di pericolosità con periodo di ritorno di 100 anni realizzata dal JRC.

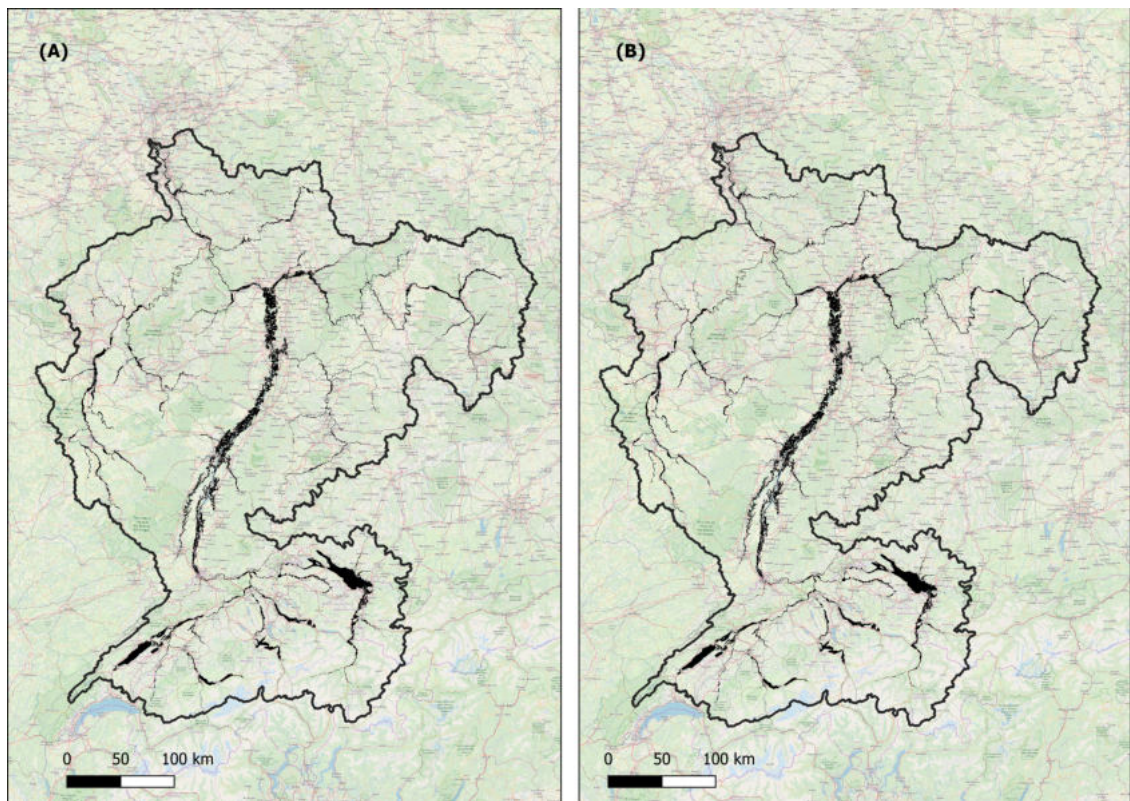


Figura 5.9: Mappe di pericolosità del JRC con tempo di ritorno di 100 anni, opportunamente riscalate a risoluzione di 90 m (A) e 25 m (B)

Le considerazioni sulla mappatura del JRC fatte per il caso di Pamplona valgono anche in questo caso; si può infatti notare come le zone a maggiore probabilità siano collocate in prossimità dei corsi d'acqua di maggiori dimensioni.

Al tempo stesso nel bacino del Reno si trovano fiumi di dimensioni maggiori rispetto alla situazione precedente, per cui anche le aree a rischio risultano più estese. Ciò porta a pensare che le simulazioni del JRC siano più aderenti alla realtà nel caso tedesco che in quello spagnolo, e di conseguenza ci si può aspettare che anche i risultati della calibrazione del GFI abbiano performance migliori.

5.2.3 Fiume Po

L'ultimo caso studio analizzato si riferisce al bacino idrografico del fiume Po. Come detto già nella descrizione del caso studio dell'Italia Settentrionale, il Po è il principale corso d'acqua italiano sia per lunghezza che per area di bacino e portata.

Complessivamente, la superficie compresa in quest'ultimo caso ammonta a circa 71'000 km².

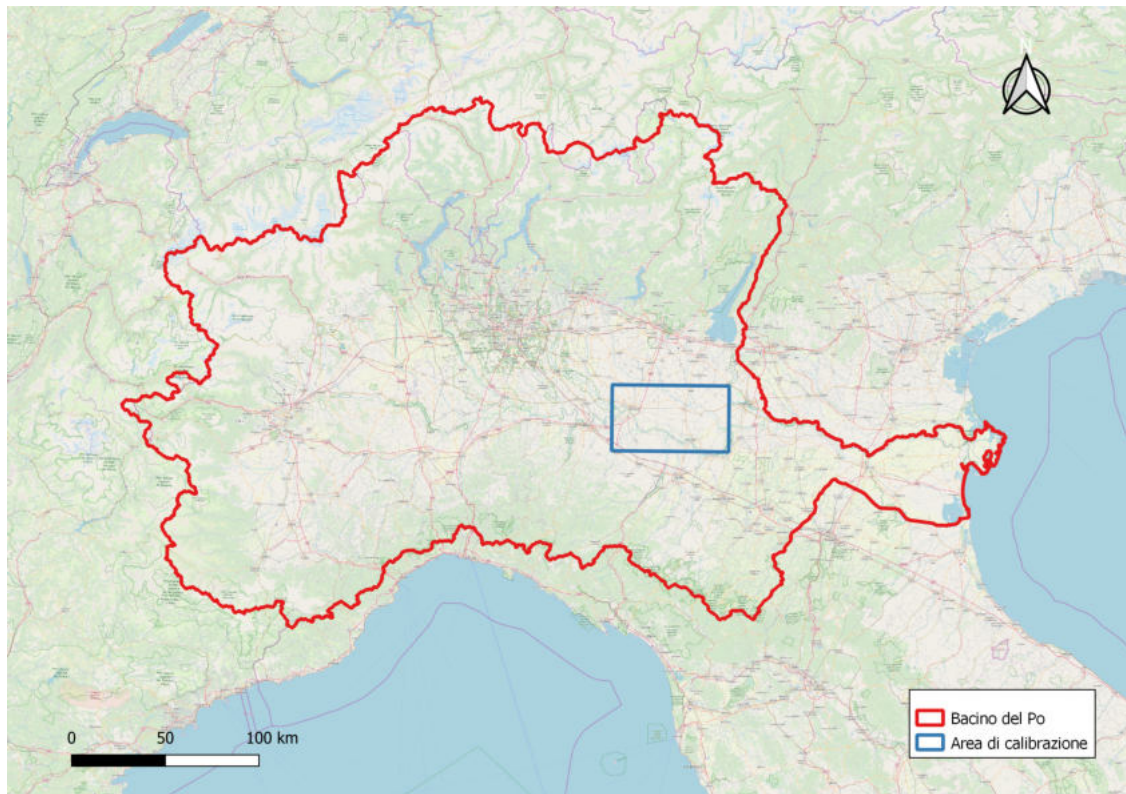


Figura 5.10: Bacino del fiume Po con sezione di chiusura alla sua foce

Riprendendo brevemente quanto già detto per il primo caso studio, di cui il bacino del Po costituisce la gran parte, la geografia fisica di quest'area è molto varia, componendosi della catena alpina a nord, di quella appenninica ad ovest e della Pianura Padana nel centro, racchiusa tra i due sistemi montuosi ed estesa da ovest ad est.

Range di quote, caratteristiche climatiche ed antropologiche sono gli stessi evidenziati per l'Italia Settentrionale, ma lo studio effettuato in questo caso è molto diverso: due diversi DEM sono stati presi in considerazione, un

solo indice (il GFI) è stato calcolato, e la calibrazione è stata eseguita con riferimento ad una limitata porzione dell'intero bacino di riferimento.

I due DEM scelti sono MERIT DEM ed SRTM DEM. Si è già discusso del primo dataset, il quale si è dimostrato capace una rappresentazione adeguata della topografia nella zona italiana. Per quanto riguarda il DEM SRTM, la sua scelta è dovuta ad alcuni studi eseguiti da diversi autori, che ne indicano l'affidabilità per in territorio italiano (vedi per esempio Tavares da Costa et al., 2019).

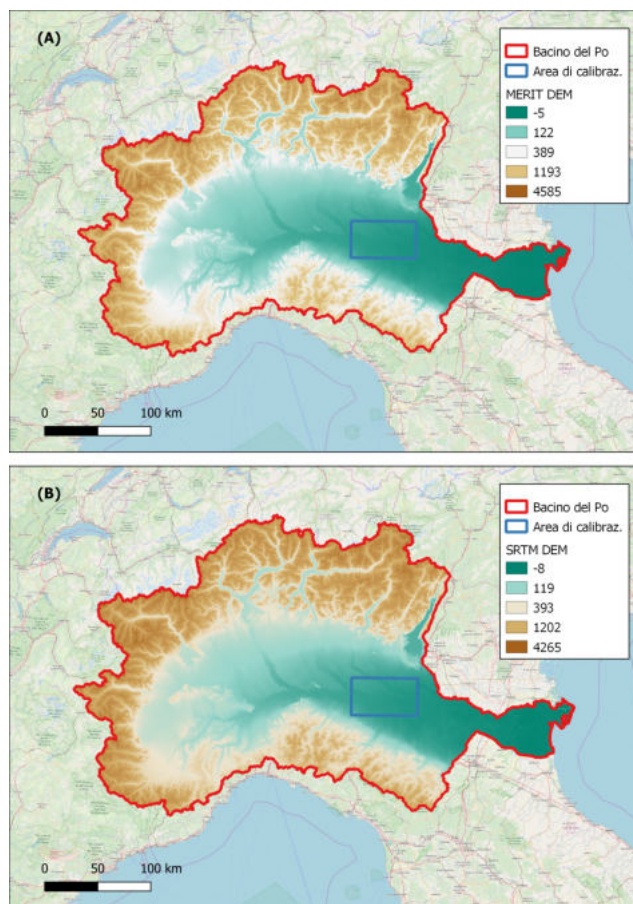


Figura 5.11: DEM utilizzati per la descrizione del caso studio del Po (MERIT (A) ed SRTM (B))

Si sottolinea che in questo caso la risoluzione dei due modelli è la stessa, di circa 90 m. Nell'ambito di questa applicazione, non si vuole infatti indagare l'effetto della risoluzione spaziale, bensì quello del procedimento di

calibrazione e della bontà di DEM in oggetto nel rappresentare correttamente l'area di studio dal punto di vista idrologico.

Venendo alla procedura di calibrazione, essa è stata effettuata sulla base di una piccola area sul corso medio-inferiore del fiume Po, nelle vicinanze di Cremona, la cui superficie ammonta a circa 2300 km².

In tale zona è stata simulata la rottura degli argini in condizioni di una piena con tempo di ritorno 100 anni, realizzando la mappa di pericolosità descritta al Paragrafo 2.2 del secondo Capitolo del presente elaborato.

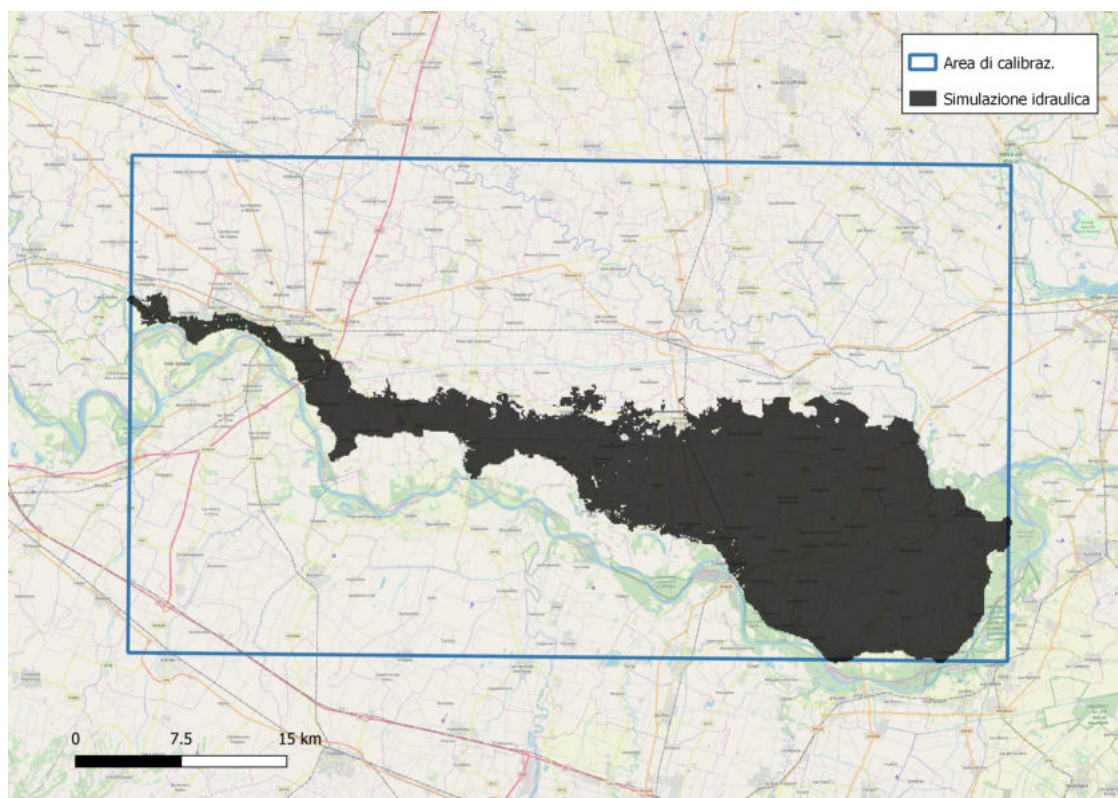


Figura 5.12: Mappa di pericolosità prodotta per il corso medio-inferiore del Po, con tempo di ritorno della portata di 100 anni e simulazione della formazione di sei brecce arginali in sinistra idraulica, tra Cremona e Guastalla

L'utilizzo di una mappa di calibrazione di questo tipo consente lo studio dell'affidabilità del GFI nel caso di simulazioni a piccola scala e di particolari condizioni al contorno imposte alla modellazione.

L'utilità delle informazioni da indici geomorfici è infatti stata più volte comprovata su grandi bacini e su territori poco conosciuti, dove le mappe

prodotte in modo speditivo possono affiancare le simulazioni idrauliche ed evidenziare le zone da analizzare con maggiore dettaglio. Resta tuttavia da valutare quali altri casi possano essere compiutamente descritti da tali indici.

Si rimanda al seguente capitolo per l'analisi dei risultati ottenuti.

Capitolo 6

Risultati e discussioni

In questo capitolo si presentano i risultati ottenuti dall'analisi effettuata, ovvero le carte con i valori degli indici geomorfici calcolati nelle zone di interesse e le mappe di pericolosità ottenute dalla calibrazione.

Per analogia con il Capitolo 5, si manterrà la suddivisione delle due parti della tesi e dei diversi casi studio.

6.1 Italia Settentrionale

6.1.1 Risultati

Si divide la presentazione delle mappe prodotte in questa prima parte in cinque sottosezioni: la prima per il valore degli indici scelti nell'area analizzata, le altre quattro per le mappe di pericolosità prodotte da ciascun indice dalla calibrazione con le quattro diverse mappature utilizzate.

E' opportuno ricordare che tale sezione dello studio si è servita essenzialmente dell'algoritmo scritto in linguaggio Python sviluppato in seno all'Università di Bologna e opportunamente aggiornato nell'ambito del presente lavoro di Tesi. (si veda in Appendice la descrizione più approfondita): le modalità di calibrazione utilizzate hanno influito fortemente sui risultati ottenuti, per motivi che verranno in seguito esposti.

Per brevità si indicheranno i cinque indici con H, D, TI, LGFI, GFI e le mappe di calibrazione con JRC 100, JRC 500, PGRA P2, PGRA P1.

Indici geomorfici in Italia Settentrionale

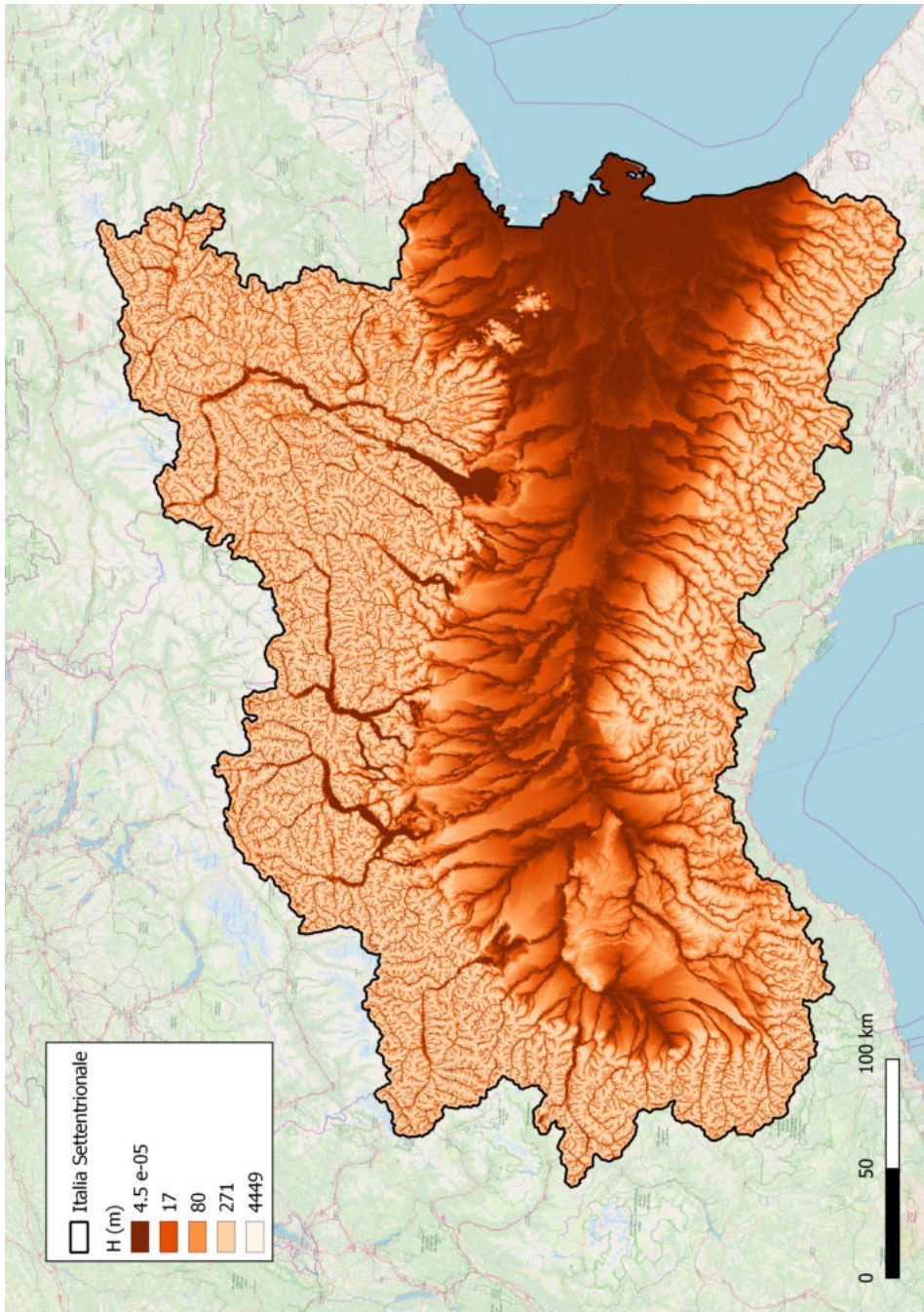


Figura 6.1: Indice HAND calcolato per il Nord Italia

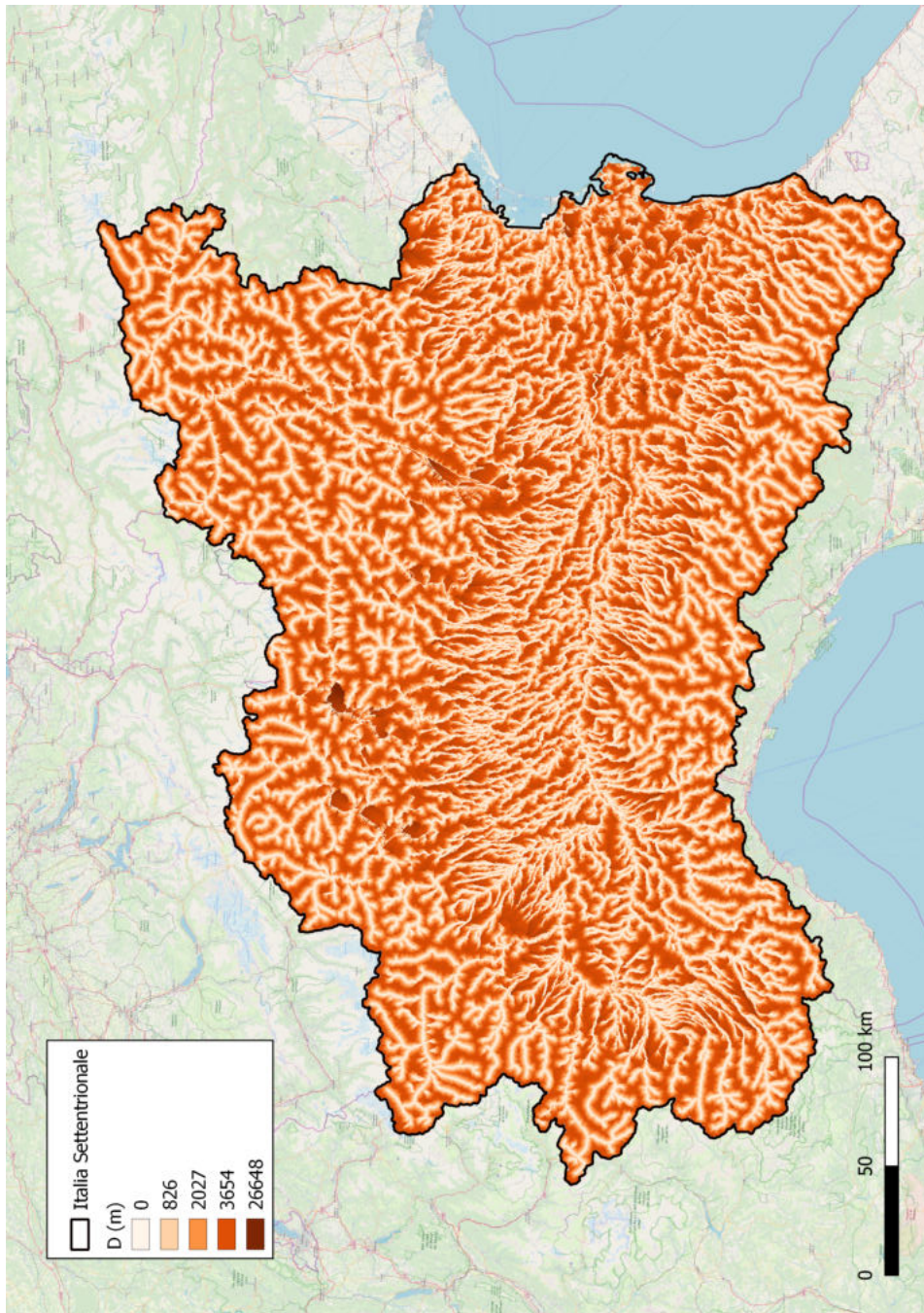


Figura 6.2: Indice D calcolato per il Nord Italia

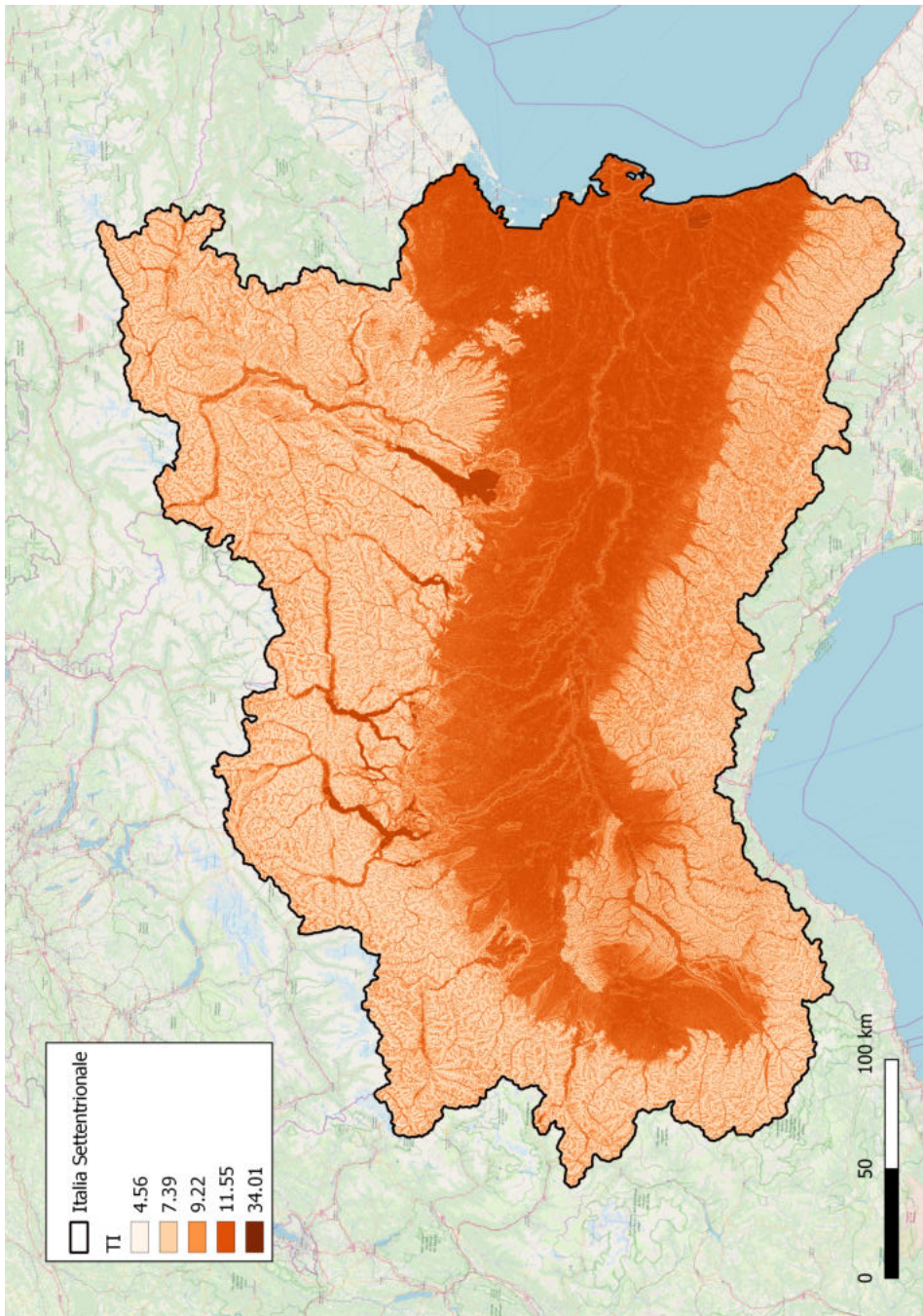


Figura 6.3: Indice TI calcolato per il Nord Italia

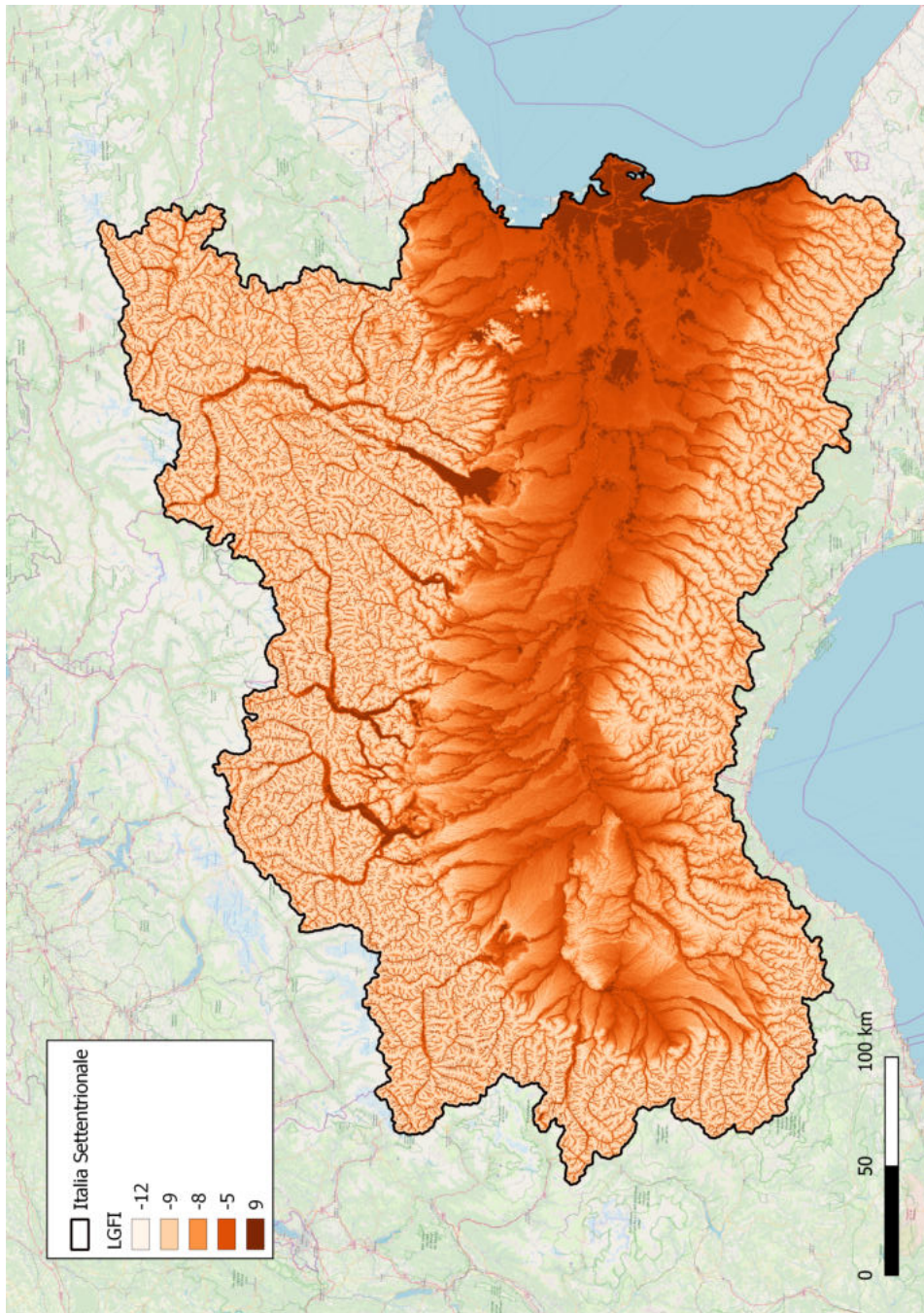


Figura 6.4: Indice LGFI calcolato per il Nord Italia

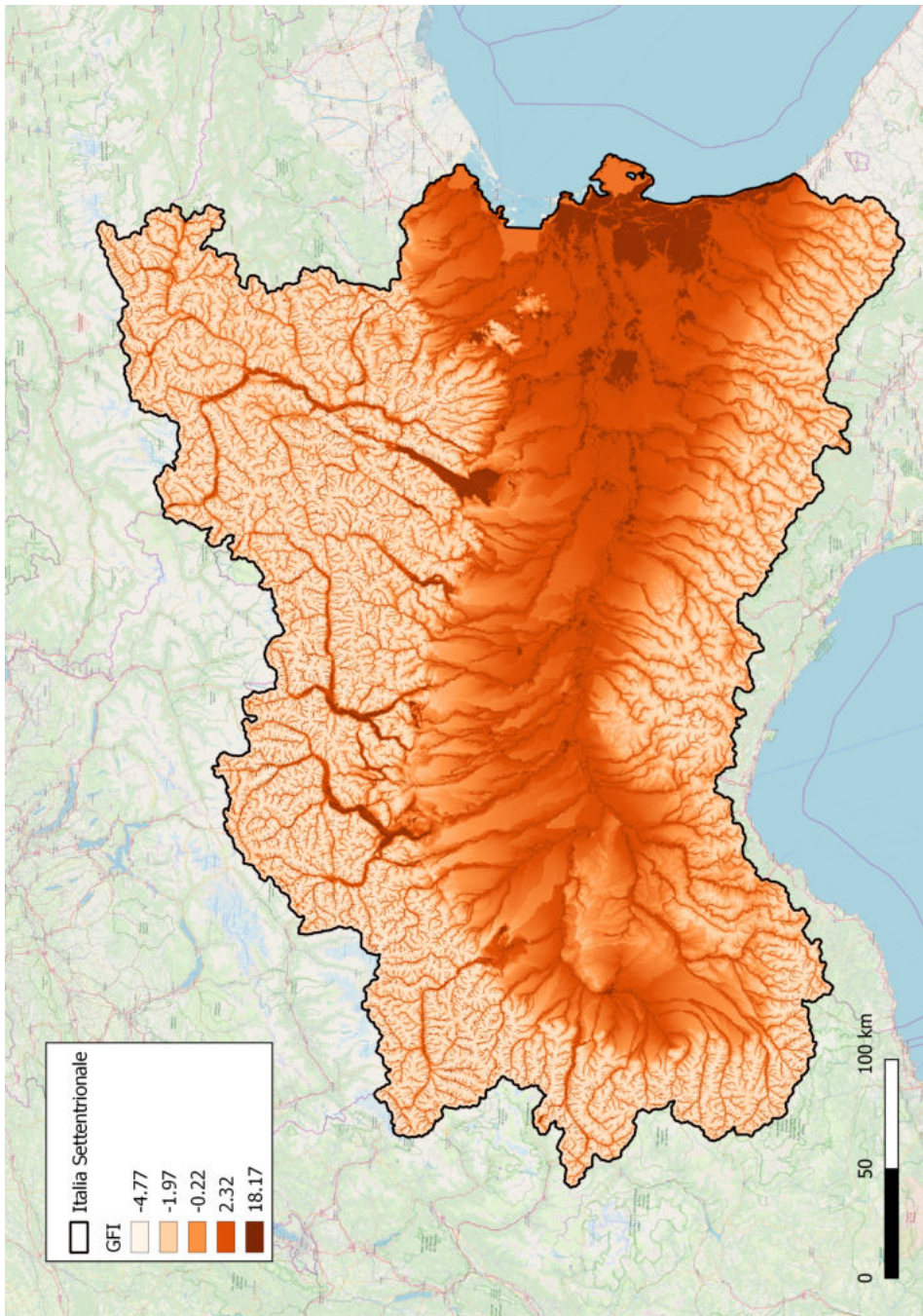


Figura 6.5: Indice GFI calcolato per il Nord Italia

Risultati prodotti dalla calibrazione con la mappatura JRC 100

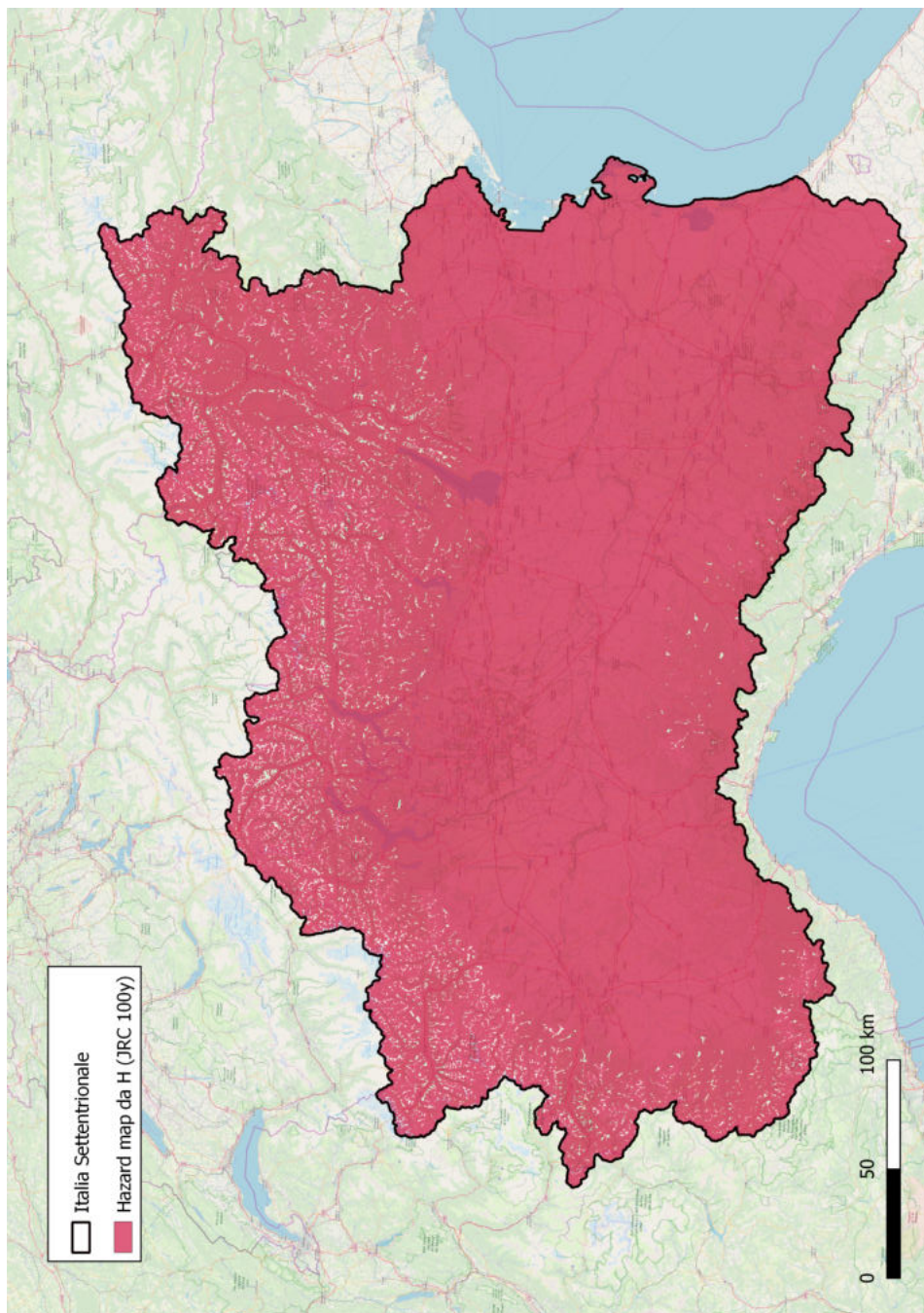


Figura 6.6: Mappa di pericolosità prodotta calibrando H con JRC 100y

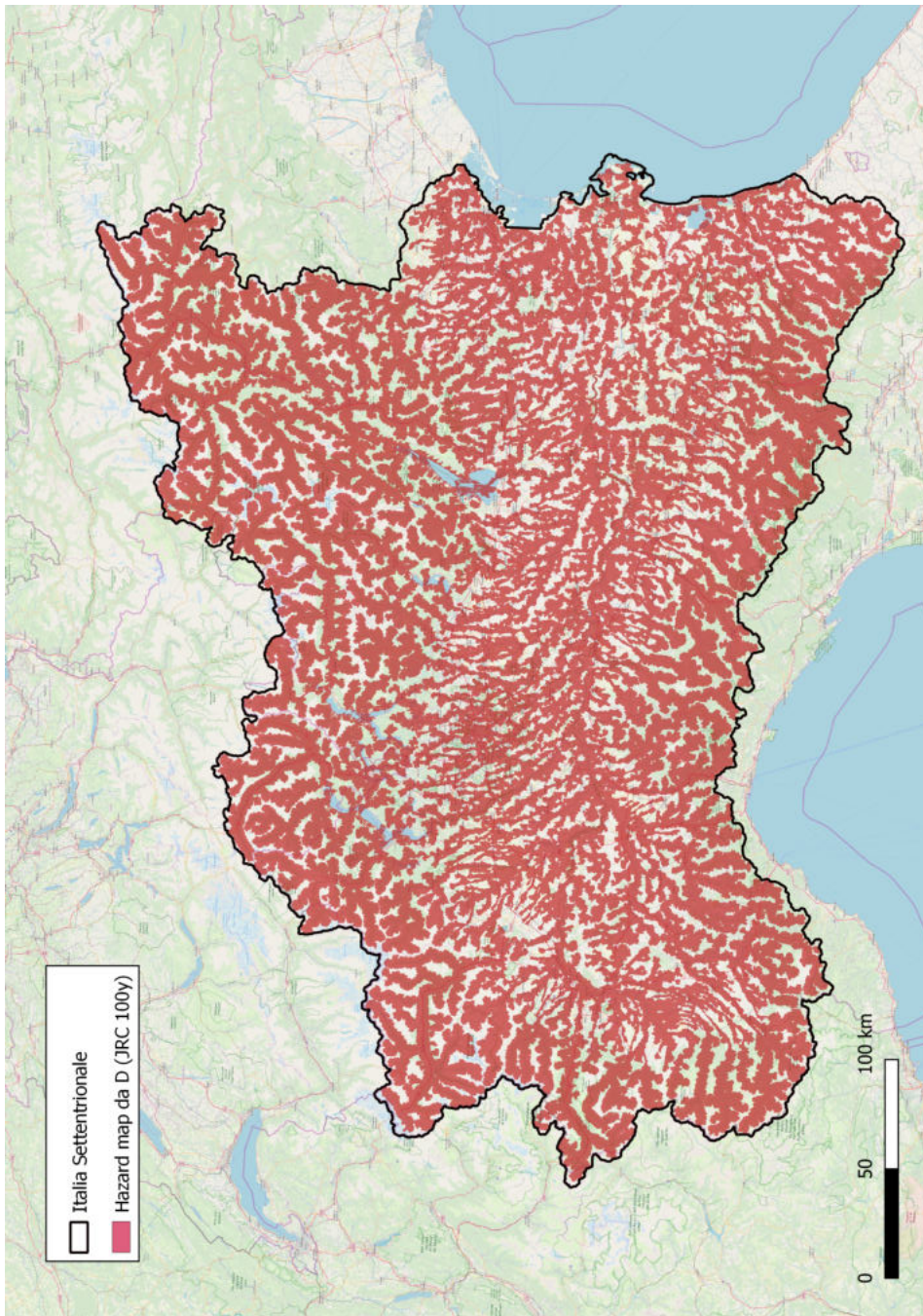


Figura 6.7: Mappa di pericolosità prodotta calibrando D con JRC 100y

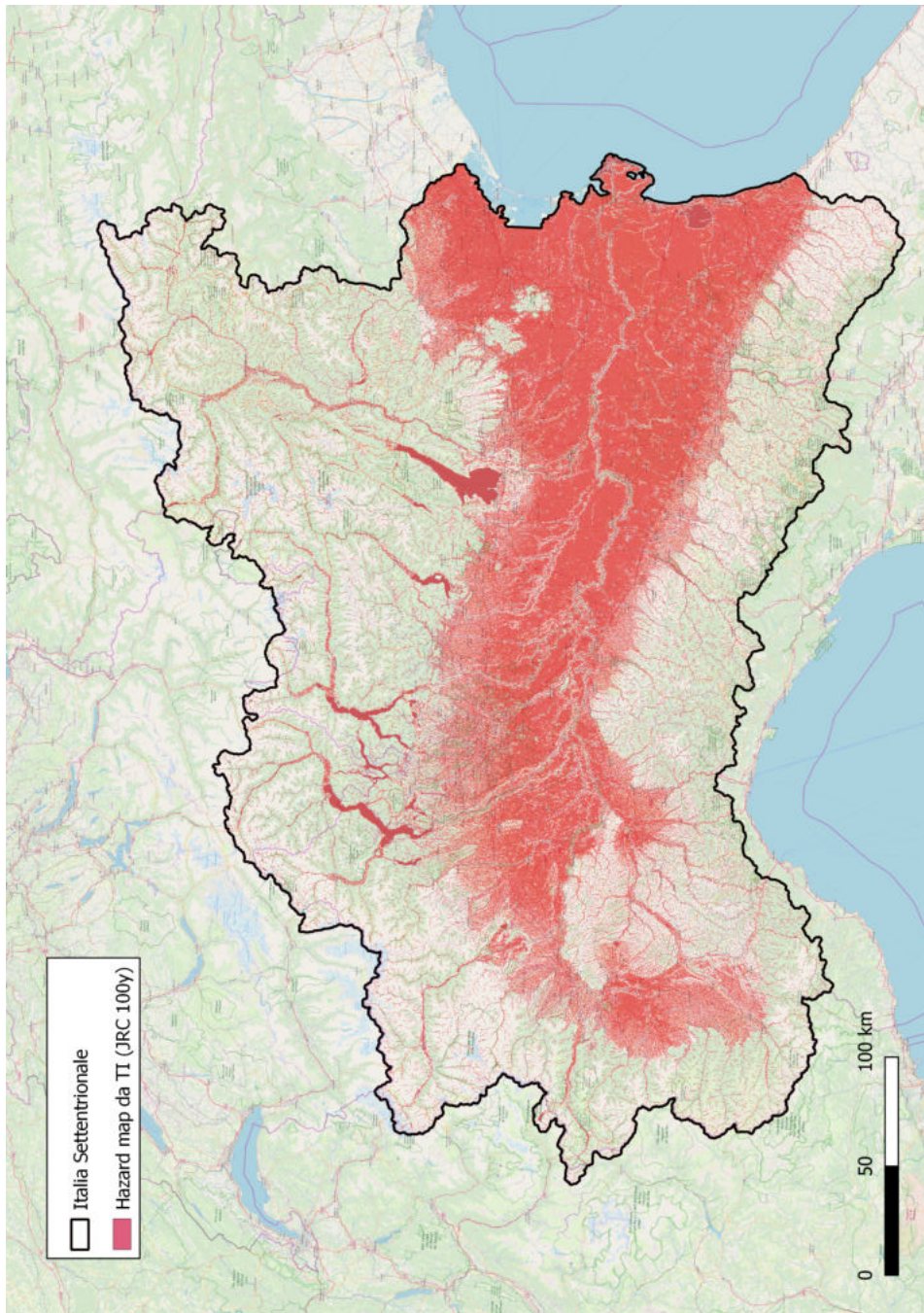


Figura 6.8: Mappa di pericolosità prodotta calibrando TI con JRC 100y

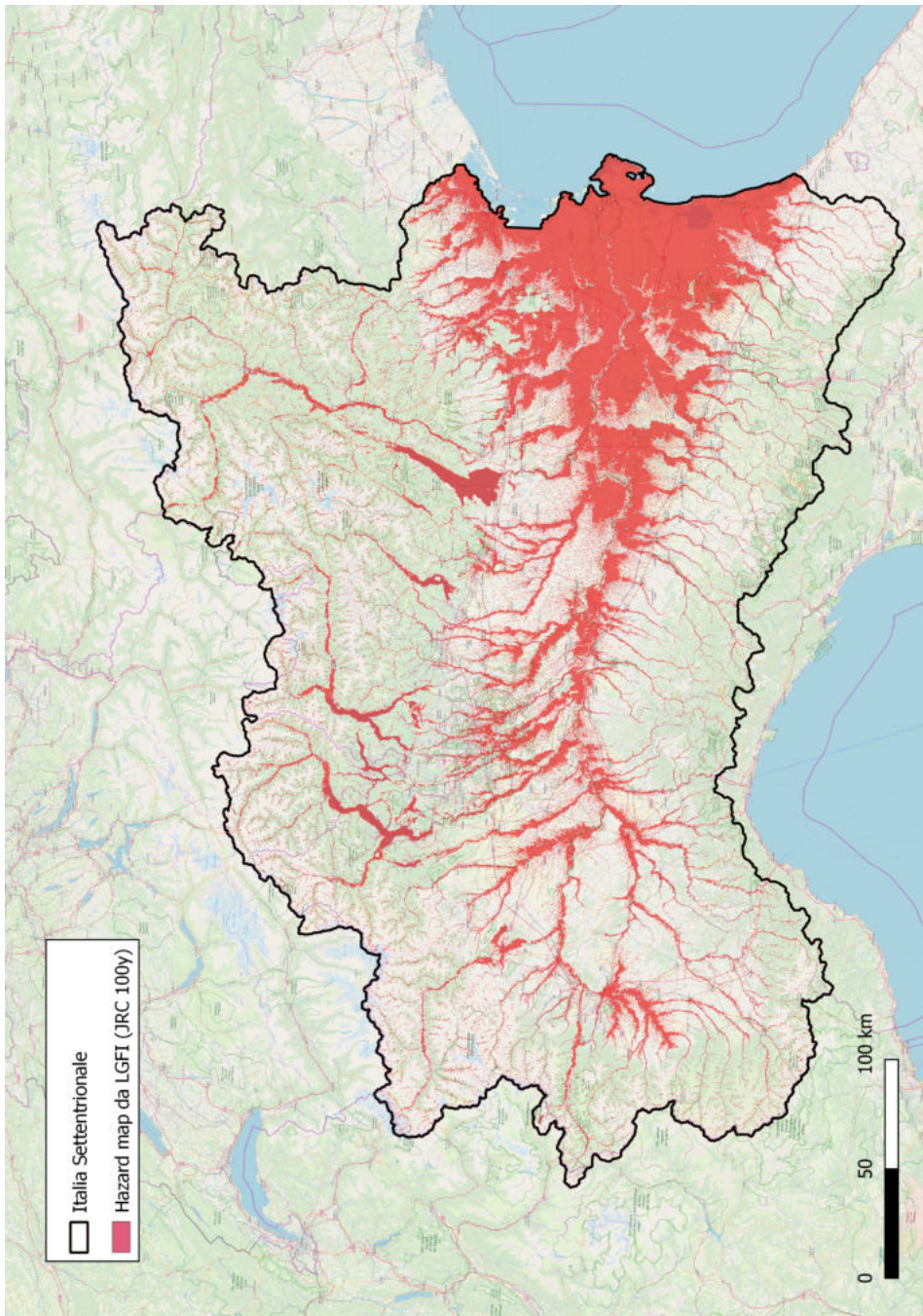


Figura 6.9: Mappa di pericolosità prodotta calibrando LGFI con JRC 100y

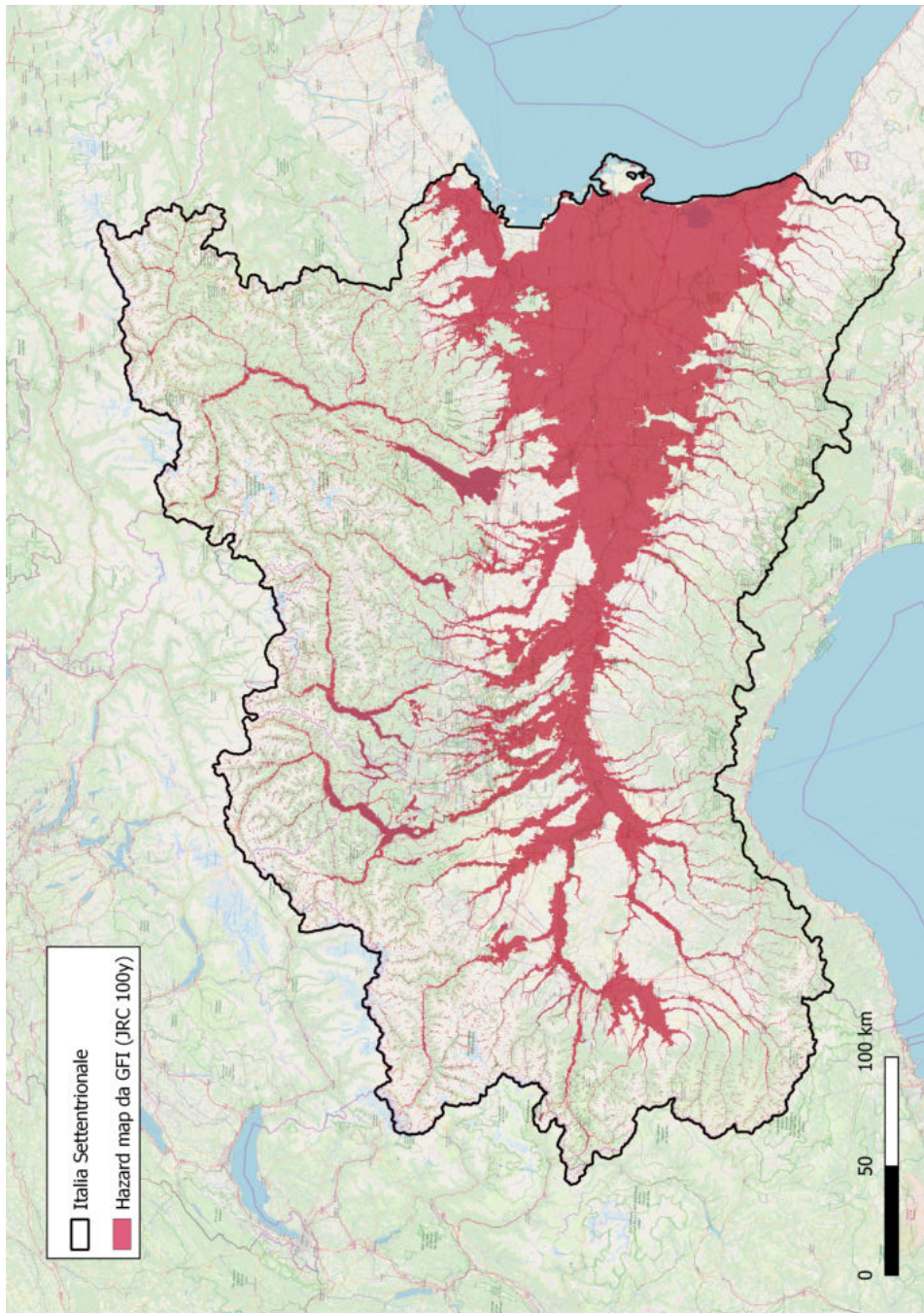


Figura 6.10: Mappa di pericolosità prodotta calibrando GFI con JRC 100y

Risultati prodotti dalla calibrazione con la mappatura JRC 500

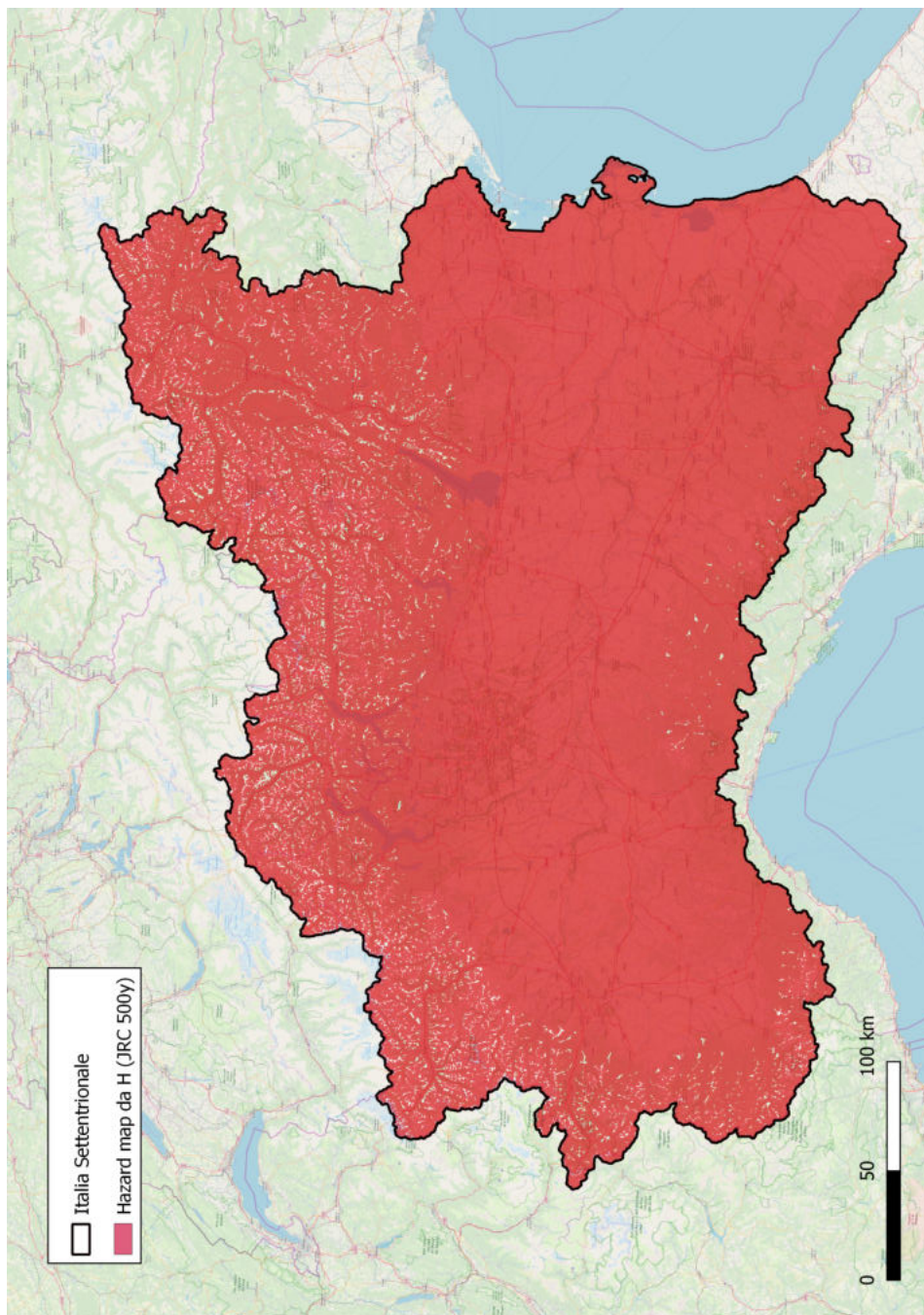


Figura 6.11: Mappa di pericolosità prodotta calibrando H con JRC 500y

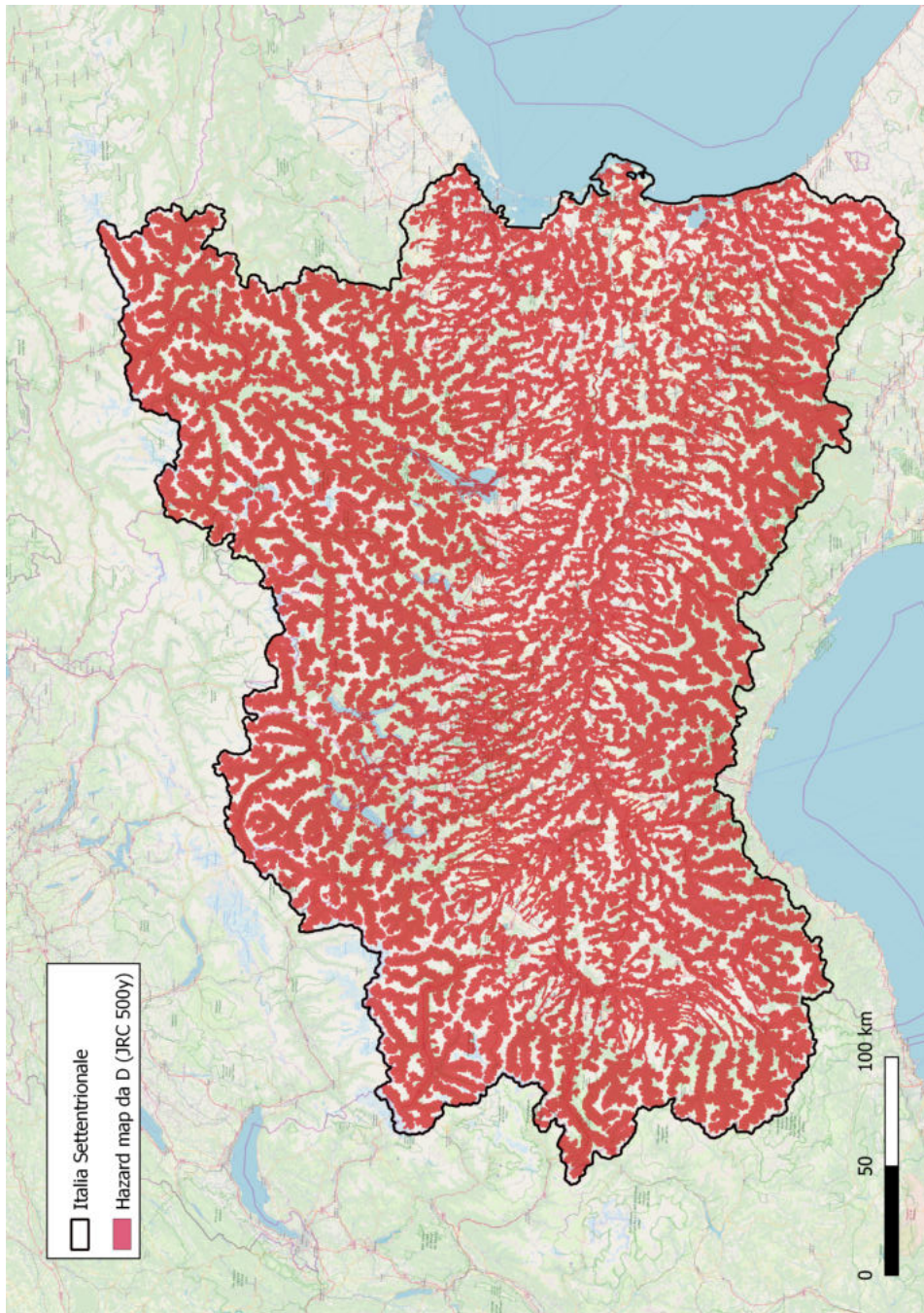


Figura 6.12: Mappa di pericolosità prodotta calibrando D con JRC 500y

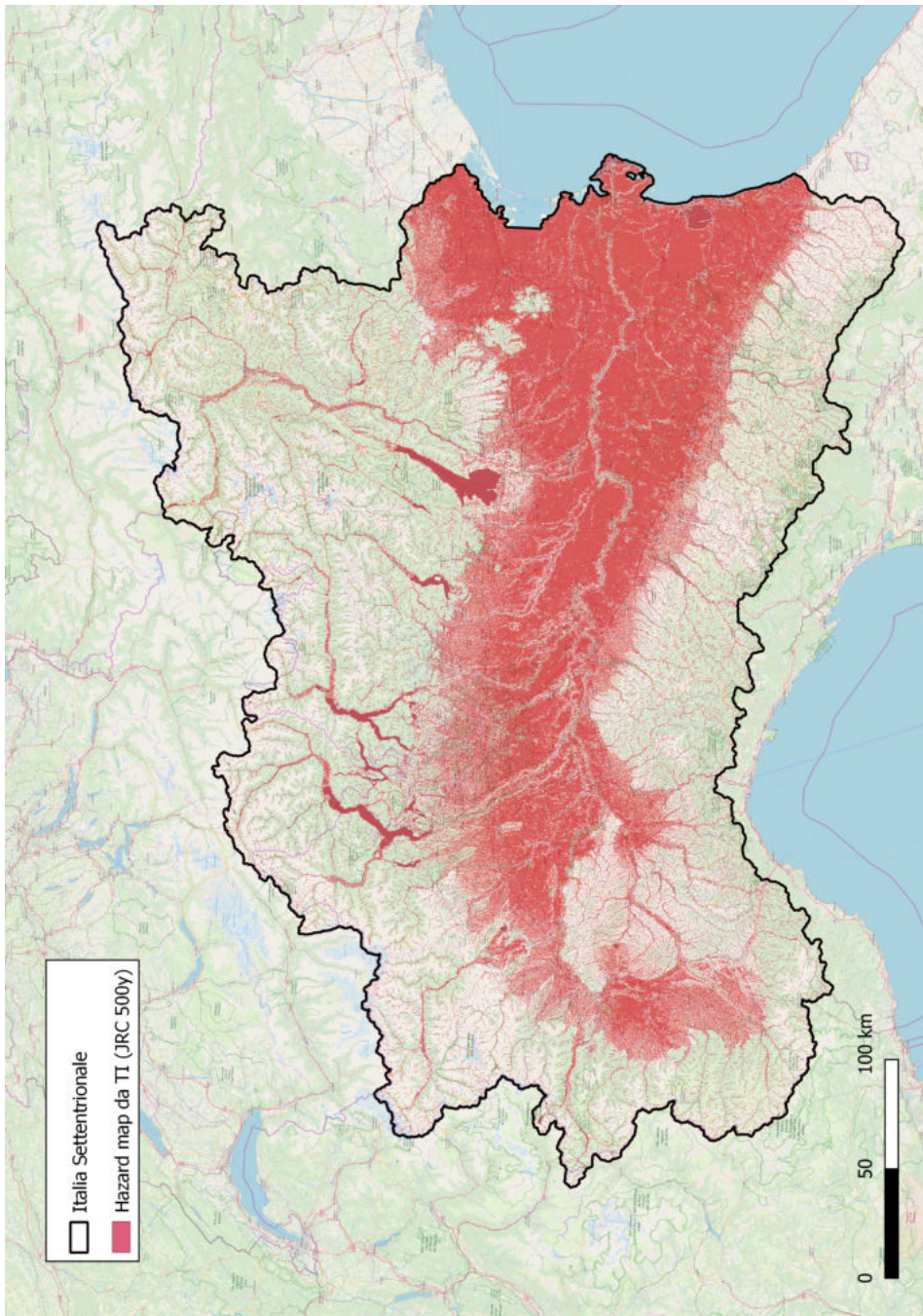


Figura 6.13: Mappa di pericolosità prodotta calibrando TI con JRC 100y

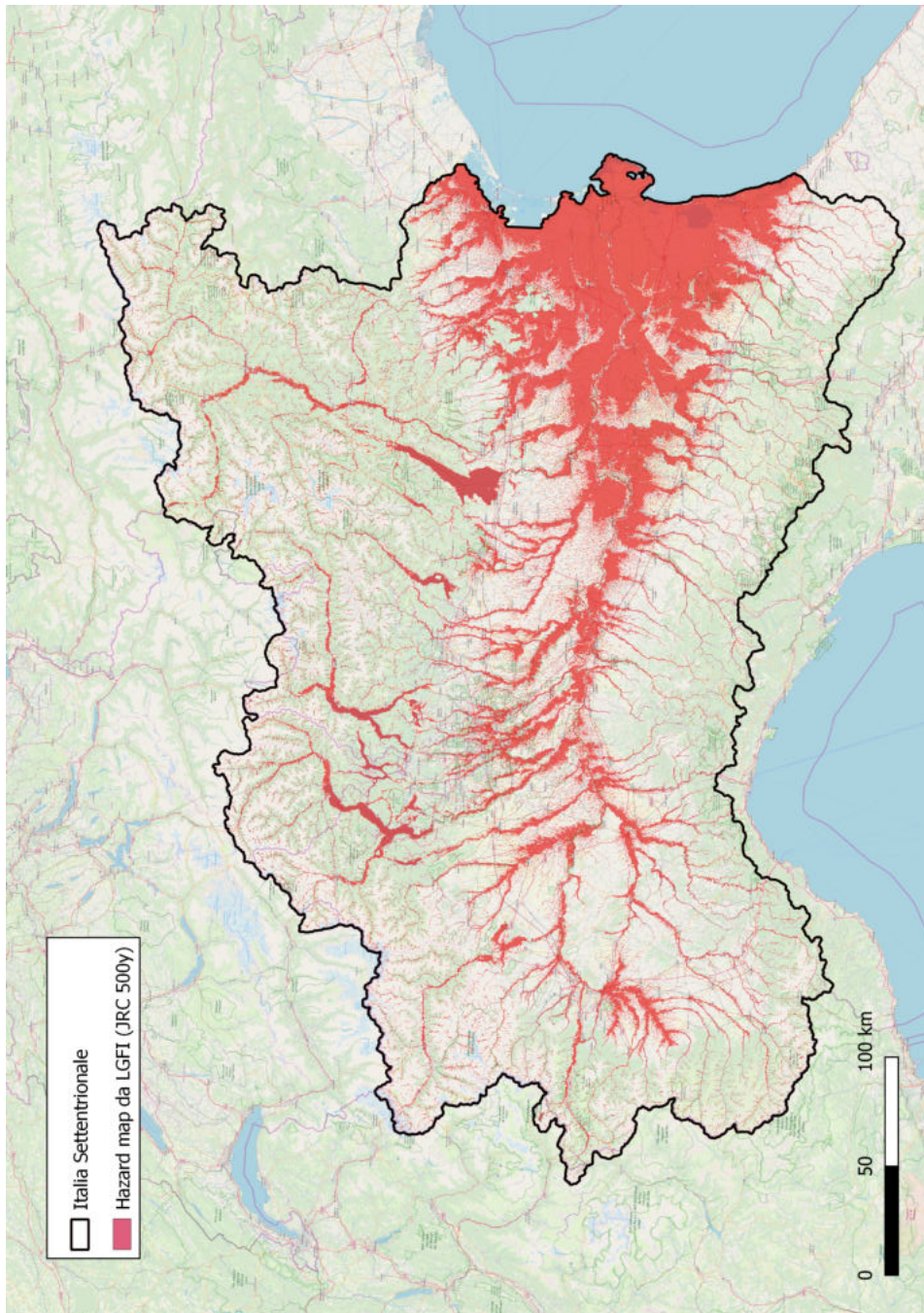


Figura 6.14: Mappa di pericolosità prodotta calibrando LGFI con JRC 100y

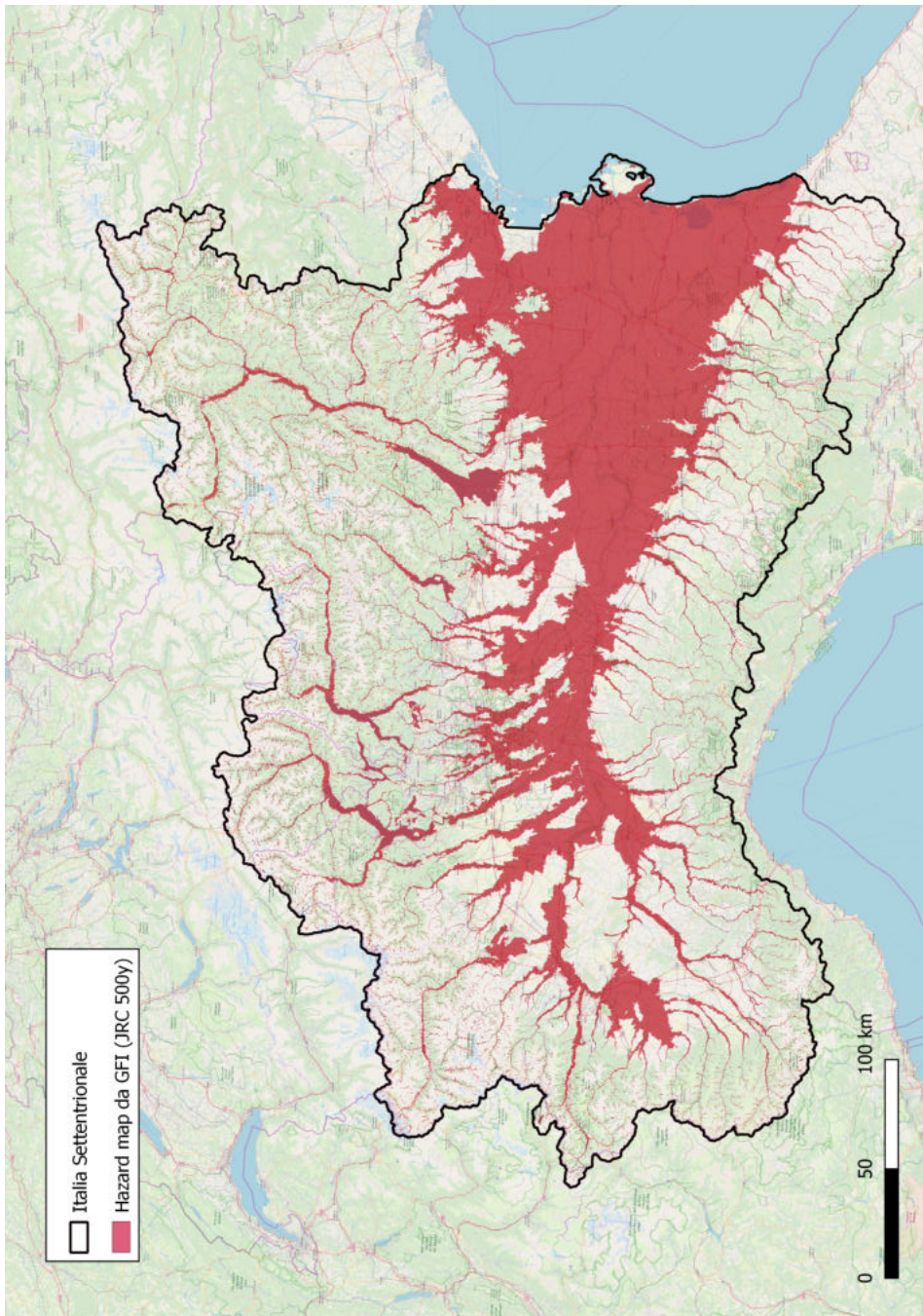


Figura 6.15: Mappa di pericolosità prodotta calibrando GFI con JRC 100y

Risultati prodotti dalla calibrazione con la mappatura PGRA P2

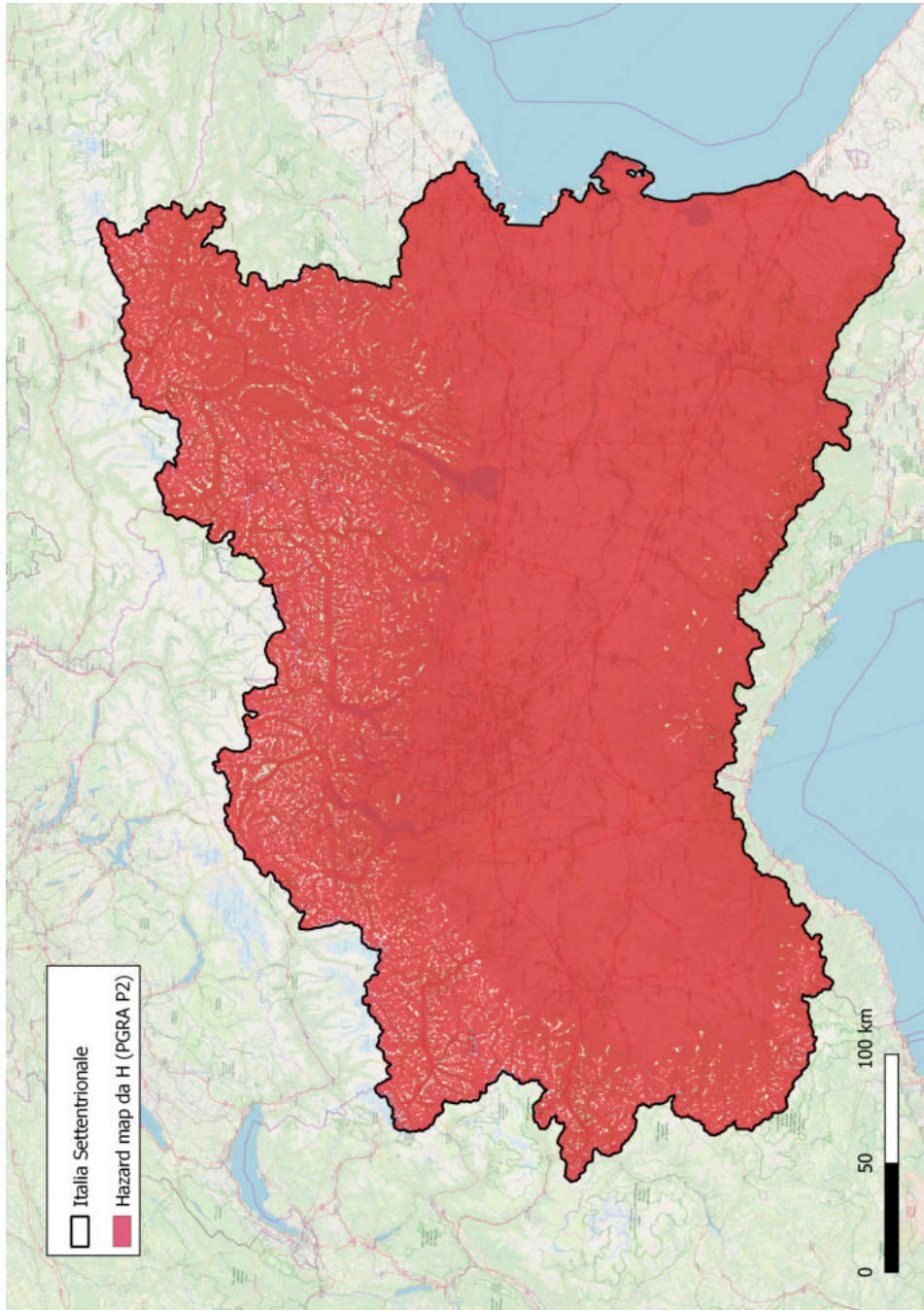


Figura 6.16: Mappa di pericolosità prodotta calibrando H con PGRA P2

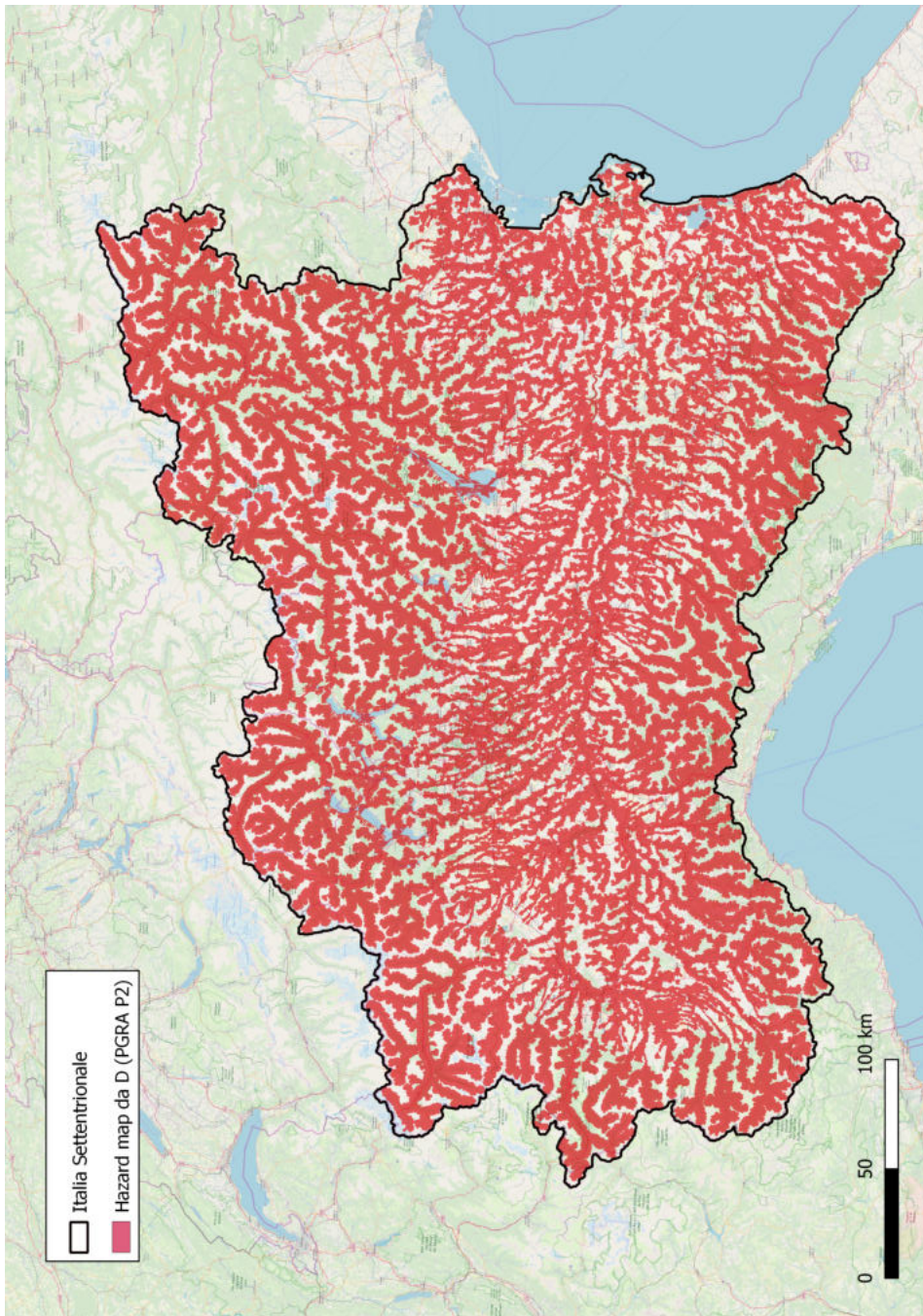


Figura 6.17: Mappa di pericolosità prodotta calibrando D con PGRA P2

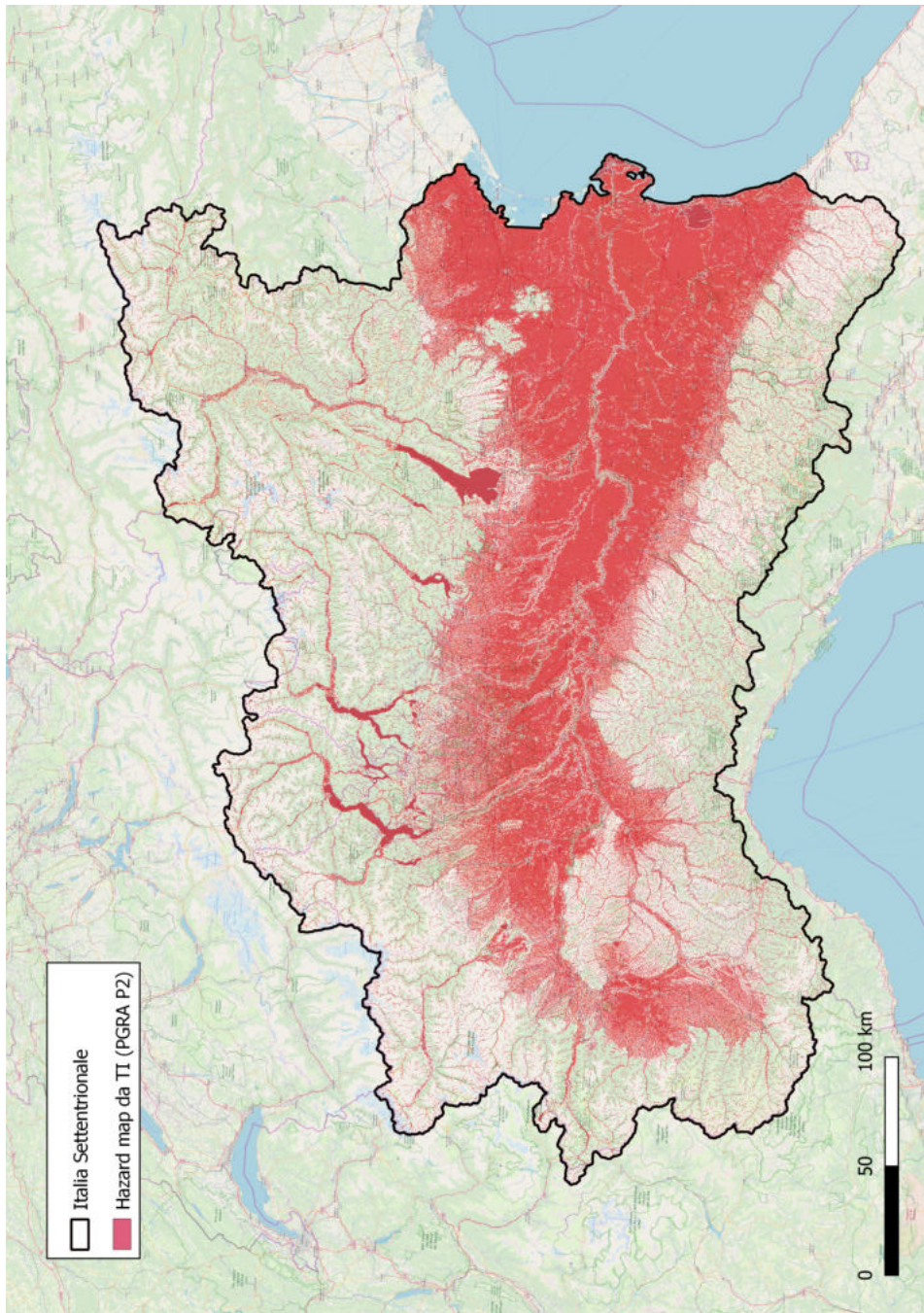


Figura 6.18: Mappa di pericolosità prodotta calibrando TI con PGRA P2

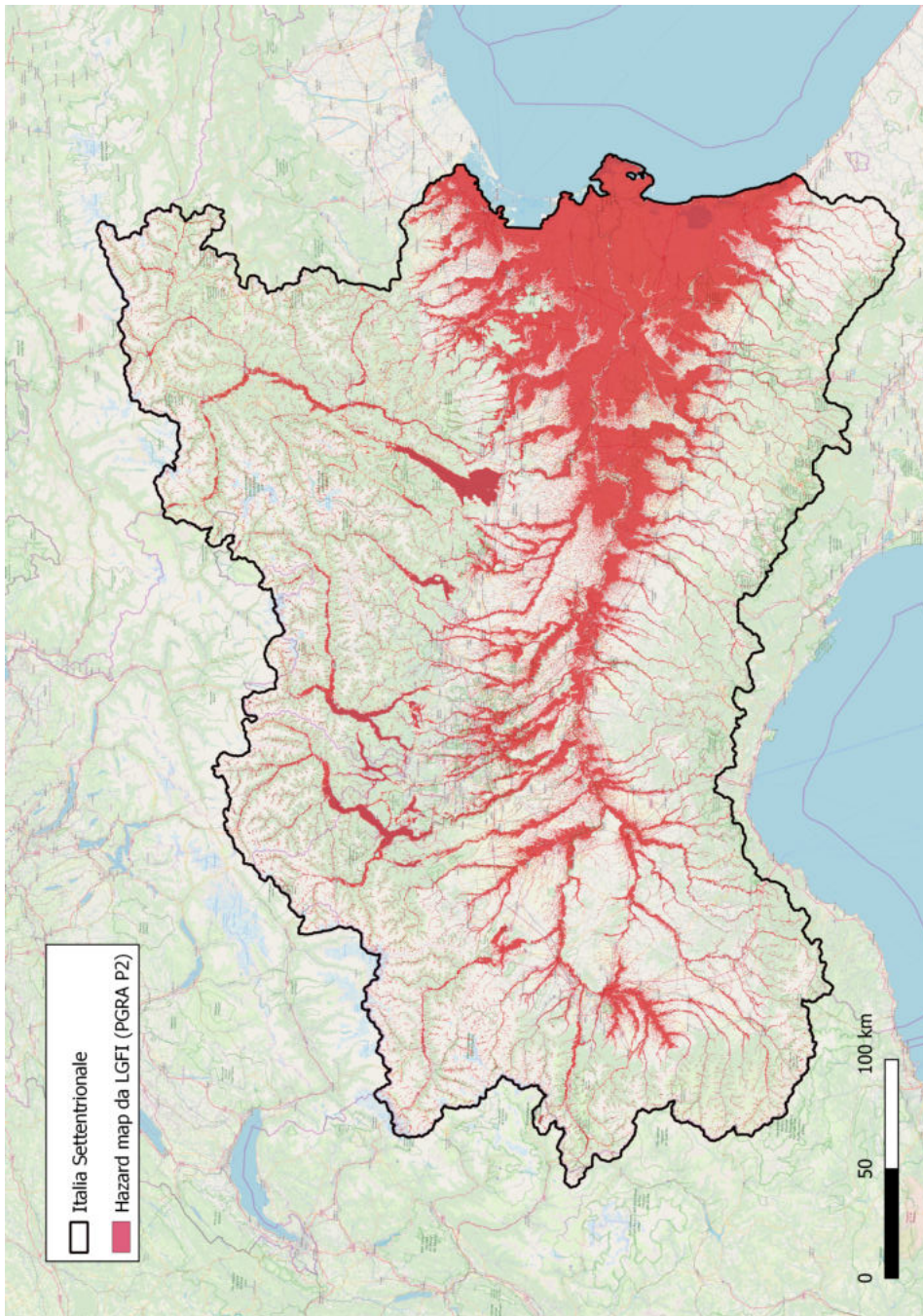


Figura 6.19: Mappa di pericolosità prodotta calibrando LGFI con PGRA P2

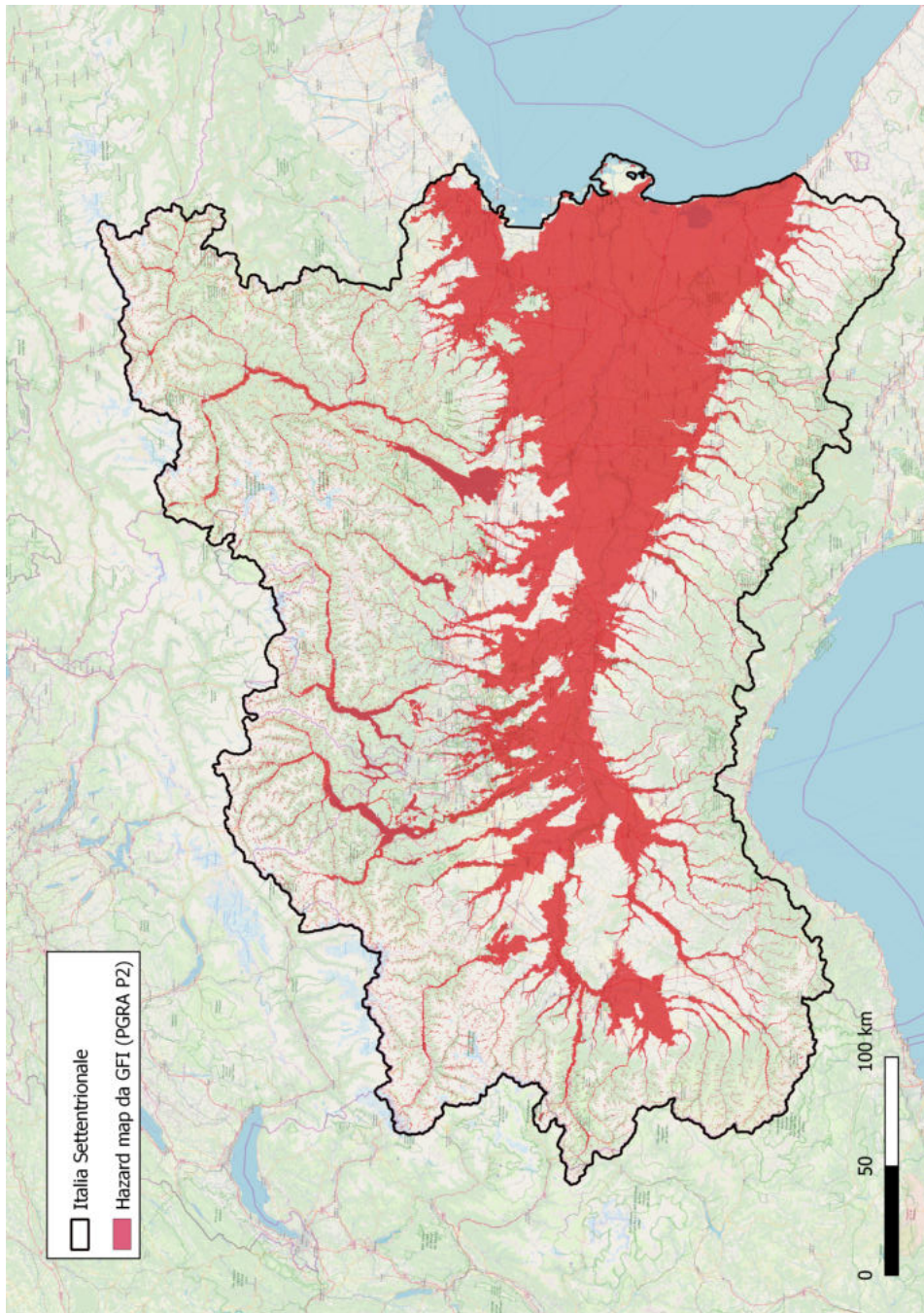


Figura 6.20: Mappa di pericolosità prodotta calibrando GFI con PGRA P2

Risultati prodotti dalla calibrazione con la mappatura PGRA P1

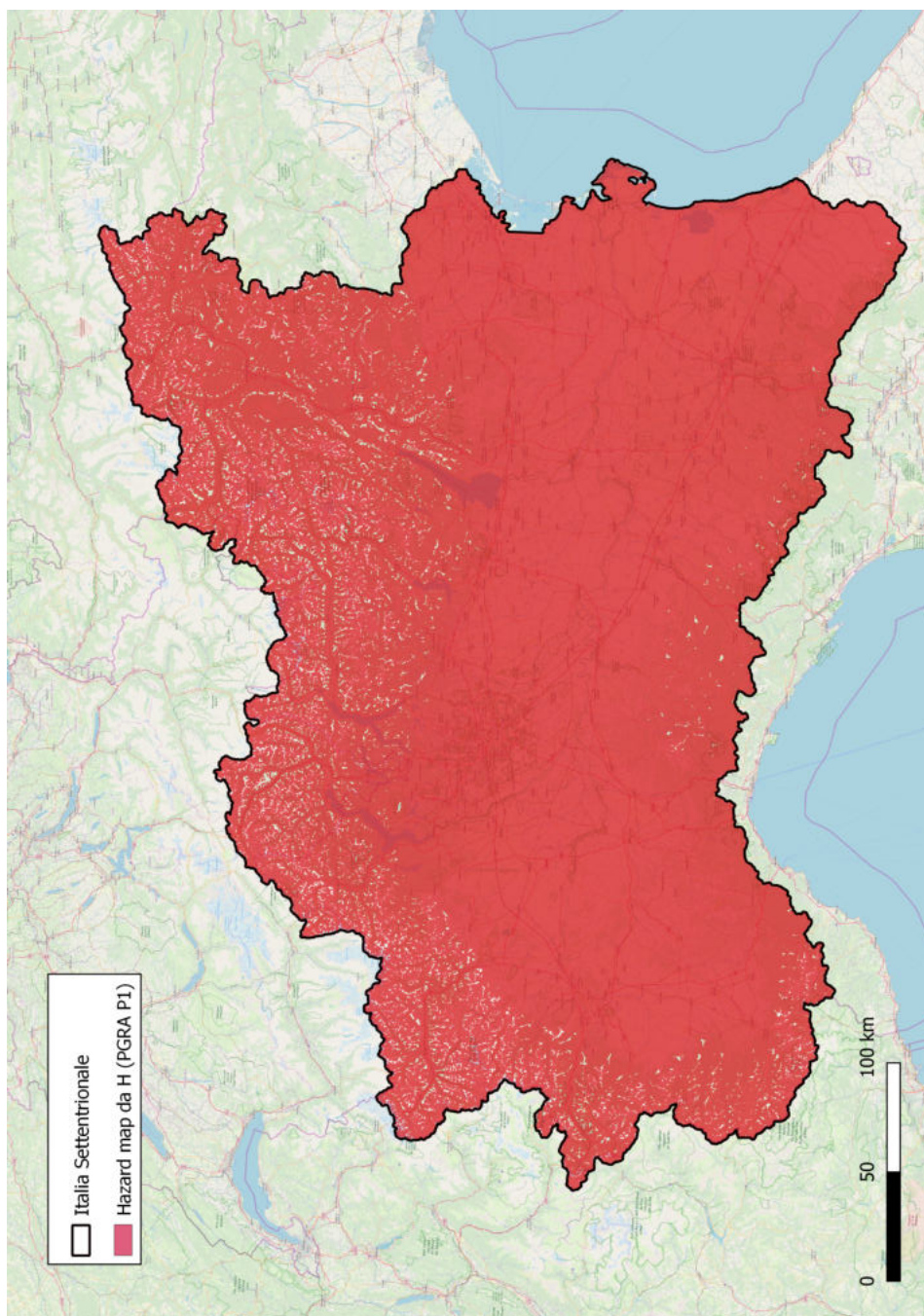


Figura 6.21: Mappa di pericolosità prodotta calibrando H con PGRA P1

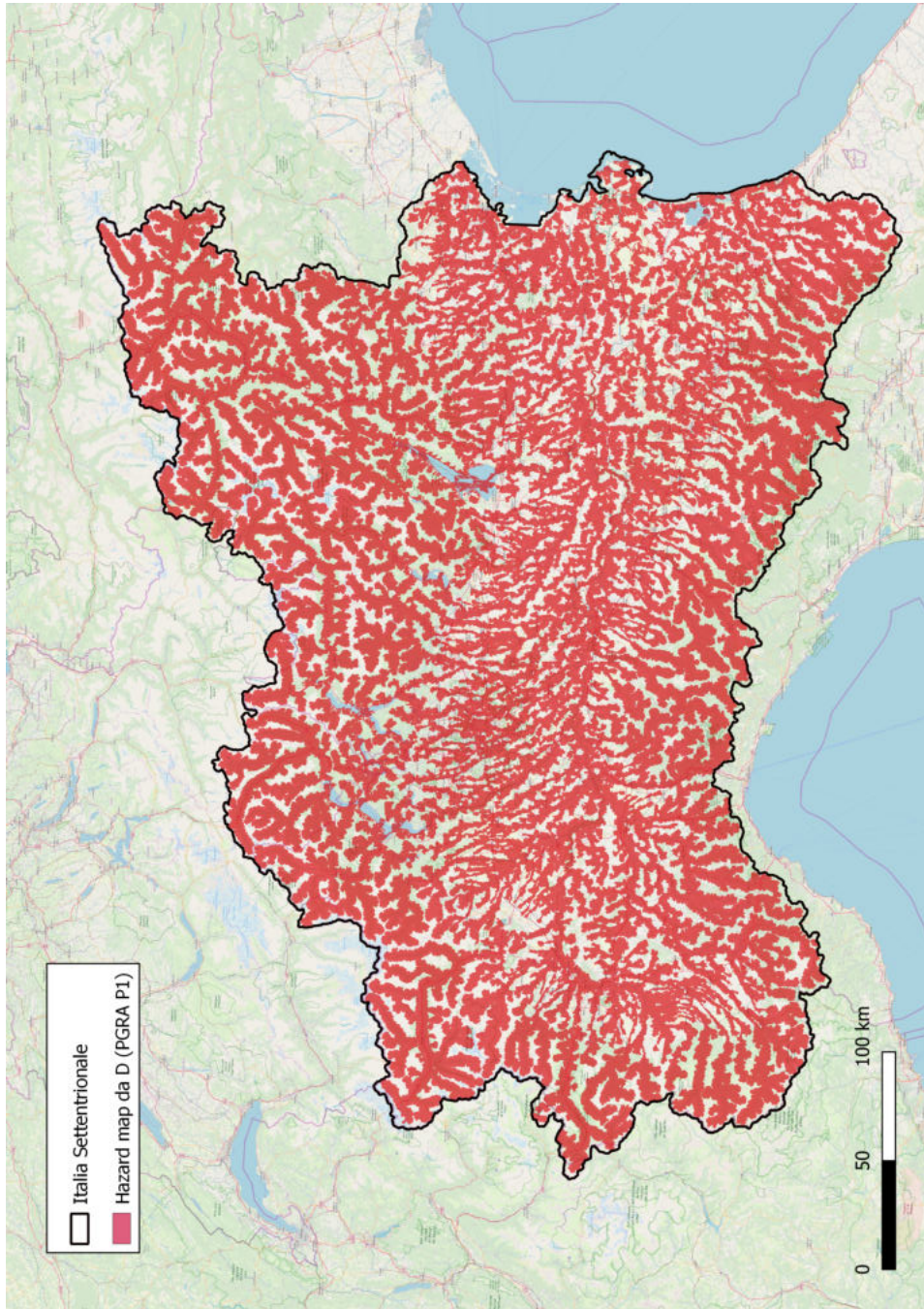


Figura 6.22: Mappa di pericolosità prodotta calibrando D con PGRA P1

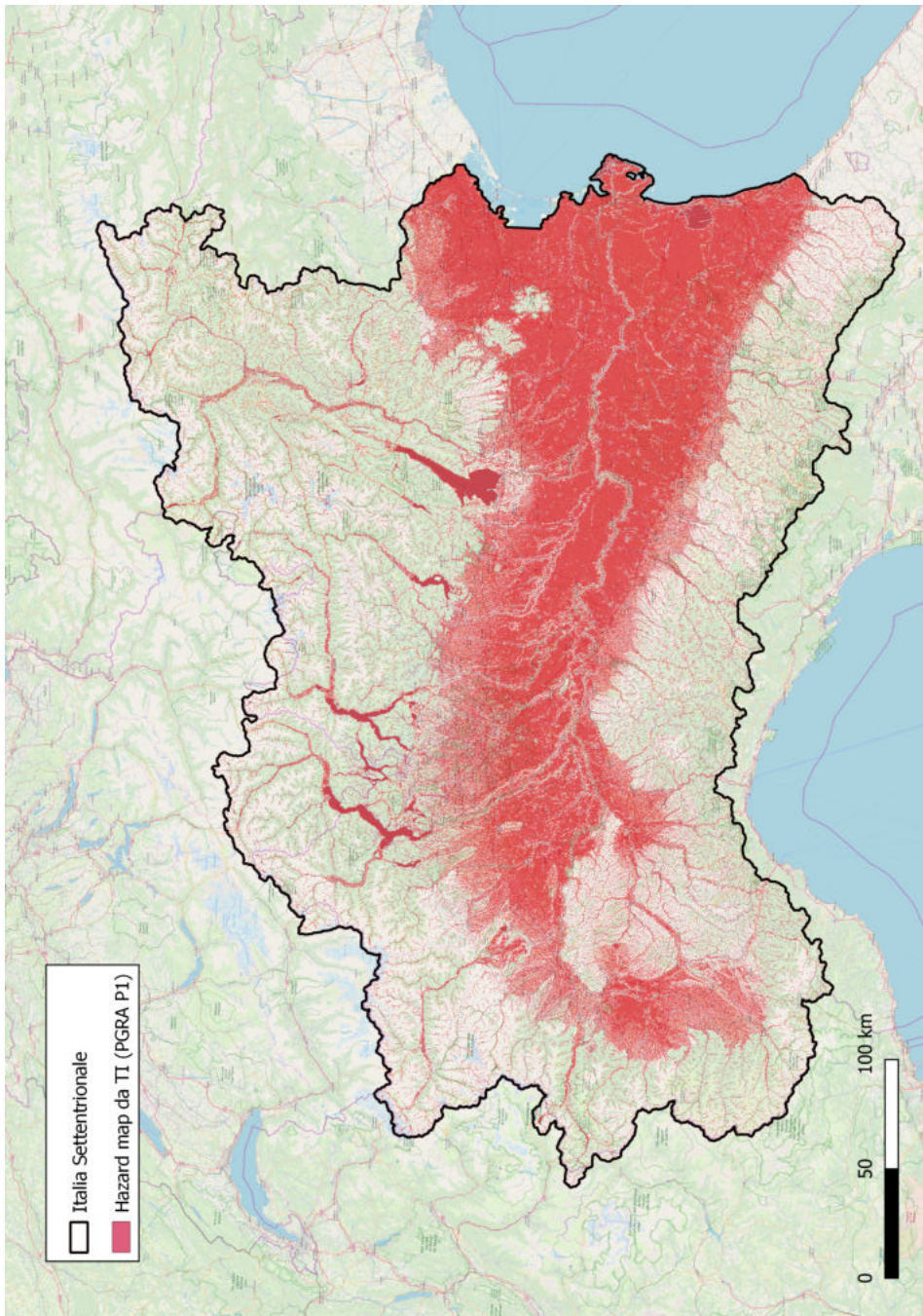


Figura 6.23: Mappa di pericolosità prodotta calibrando TI con PGRA P1

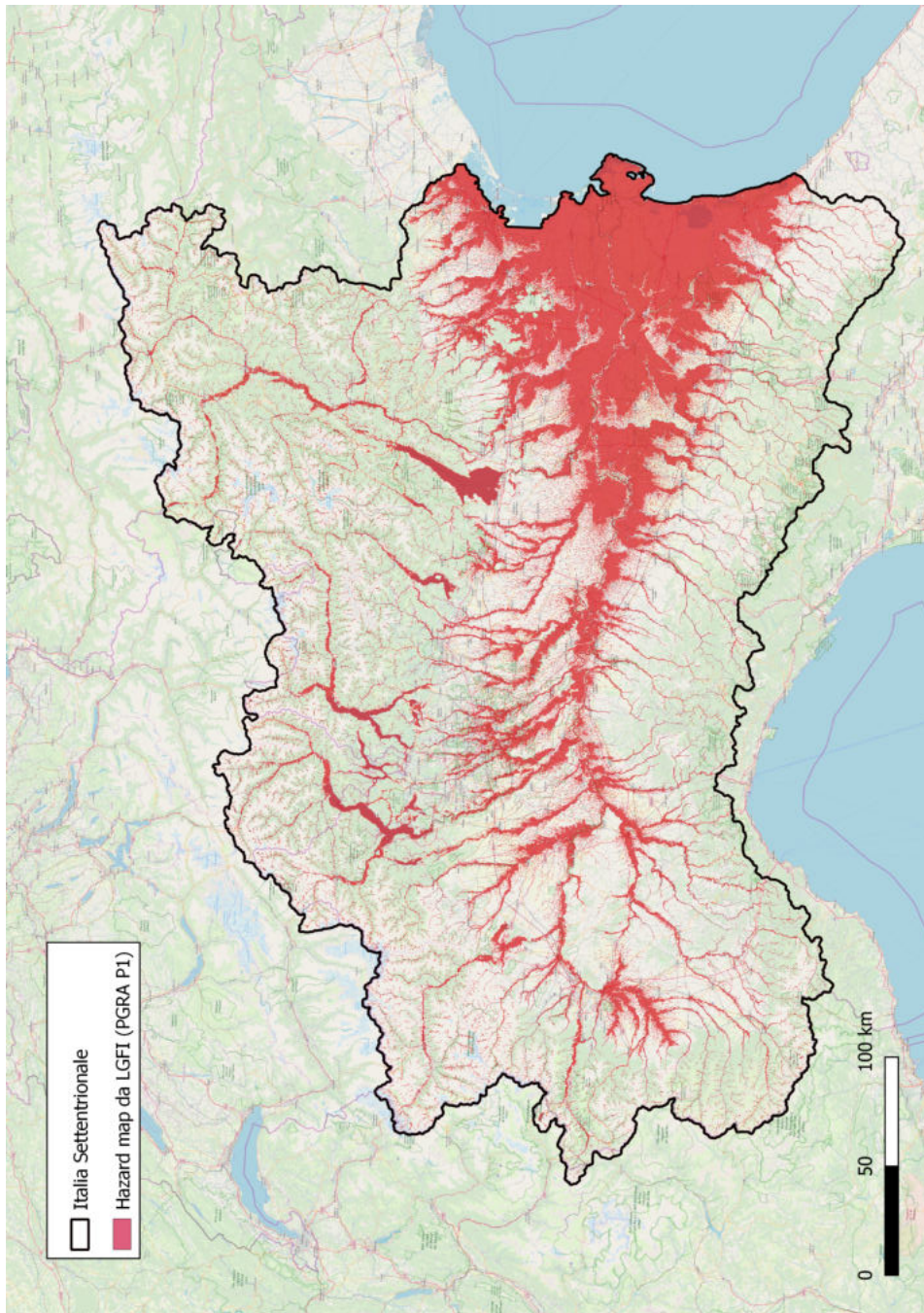


Figura 6.24: Mappa di pericolosità prodotta calibrando LGFI con PGRA P1

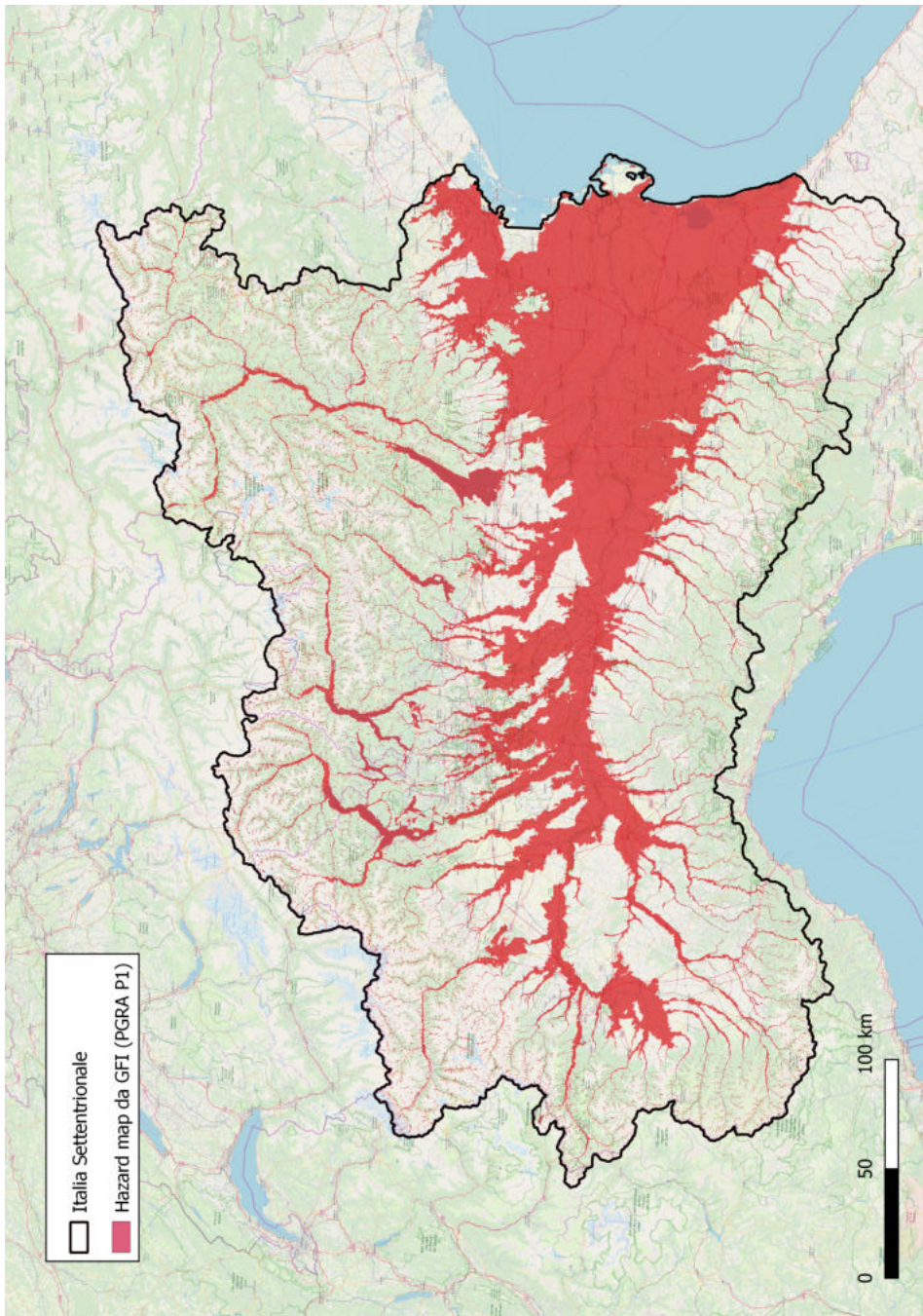


Figura 6.25: Mappa di pericolosità prodotta calibrando GFI con PGRA P1

6.1.2 Discussione

L'analisi dei risultati deve logicamente partire dai valori degli indici prima di arrivare alle mappe di pericolosità.

La prima osservazione da fare è che tutti gli indici, ad eccezione di D, descrivono la variazione topografica del suolo, ed in particolare assumono valori sensibili (ovvero elevati quando si parla di TI, LGFI, GFI e bassi per D ed H) in prossimità dei corsi d'acqua ed in pianura.

In particolare modo, si osserva che i valori di H e TI (v. Figure 6.1 e 6.3) riescono a rappresentare una situazione abbastanza verosimile della pericolosità, ma andando a guardare nel dettaglio il range di variazione, si vede che in pianura (ovvero la zona soggetta a maggiore rischio potenziale) punti a diversa distanza e quota, che ci si aspetta a diversa pericolosità, hanno valori molto simili.

Relativamente a LGFI e GFI, si osserva che le loro mappature (v. Figure 6.4 e 6.5), seppur caratterizzate da valori degli indici differenti, hanno un andamento spaziale analogo. Più elevato in corrispondenza delle zone di pianura ecc. Si nota che il primo restituisce dei valori più frammentari, producendo una mappa in cui si distinguono diversi punti e ramificazioni, mentre il GFI crea dei pattern più omogenei in cui l'indice ha lo stesso valore, presentandosi più a spot.

Per quanto concerne D, la Figura 6.2 mostra come questo sia, tra gli indici considerati, quello che si adatta peggio alla descrizione della pericolosità.

Venendo finalmente alle mappe di calibrazione, da un punto di vista qualitativo sono doverose diverse osservazioni:

1. Una grande differenza di prestazioni tra le calibrazioni eseguite sulle mappe JRC e quelle PGRA
2. Differenze contenute, per ciascun tipo di mappatura di calibrazione, tra i due scenari di pericolosità (T=100 rispetto a T=500, P2 rispetto a P1)
3. La netta tendenza generale alla sovrastima delle aree allagabili
4. Le prestazioni migliori si hanno con GFI ed LGFI
5. Gli indici H e D forniscono mappature della pericolosità del tutto inattendibili

Come enunciato nei diversi capitoli precedenti, la bontà dei risultati dei diversi indici è stata analizzata con la statistica ROC, ottimizzando l'indice di Youden (TSS). Si riportano i risultati dell'analisi quantitativa:

ITALIA SETTENTRIONALE - JRC 100							
Indice	th	TSS	FPR	TPR	FNR	TNR	AUC
TI	0.206	60%	31%	92%	8%	69%	0.85
GFI	0.323	76%	15%	91%	9%	85%	0.93
SGFI	0.286	76%	19%	95%	5%	81%	0.92
H	2.000	0%	0%	0%	100%	100%	0.069
D	0.225	1%	4%	6%	94%	96%	0.41
ITALIA SETTENTRIONALE - JRC 500							
Indice	th	TSS	FPR	TPR	FNR	TNR	AUC
TI	0.196	58%	33%	91%	9%	67%	0.84
GFI	0.313	76%	14%	90%	10%	86%	0.93
SGFI	0.278	75%	19%	94%	6%	81%	0.92
H	2.000	0%	0%	0%	100%	100%	0.07
D	0.225	1%	4%	5%	95%	96%	0.4
ITALIA SETTENTRIONALE - PGRA P1							
Indice	th	TSS	FPR	TPR	FNR	TNR	AUC
TI	0.192	43%	33%	76%	24%	67%	0.745
GFI	0.256	51%	27%	78%	22%	73%	0.8
SGFI	0.258	50%	23%	73%	27%	77%	0.78
H	2.000	0%	0%	0%	100%	100%	0.21
D	0.170	2%	10%	12%	88%	90%	0.478
ITALIA SETTENTRIONALE - PGRA P2							
Indice	th	TSS	FPR	TPR	FNR	TNR	AUC
TI	0.192	41%	35%	76%	24%	65%	0.73
GFI	0.256	48%	30%	77%	23%	70%	0.78
SGFI	0.249	45%	28%	74%	26%	72%	0.76
H	2.000	0%	0%	0%	100%	100%	0.23
D	0.166	3%	11%	13%	87%	89%	0.49

Figura 6.26: Risultati della calibrazione dei diversi indici sull'Italia Settentrionale

Dalla visione delle metriche prestazionali emerge subito come GFI ed LGFI abbiano prestazioni nettamente superiori ai loro concorrenti in tutti e quattro i casi analizzati. Sebbene le loro performance siano molto simili, dei due indici il GFI è quello che presenta il TSS più elevato. Confrontando le due mappe però sembra che tale indicatore porti ad una sovrastima delle aree maggiore di LGFI, che appare qualitativamente più aderente alle mappe di calibrazione (v. Figura 6.27).

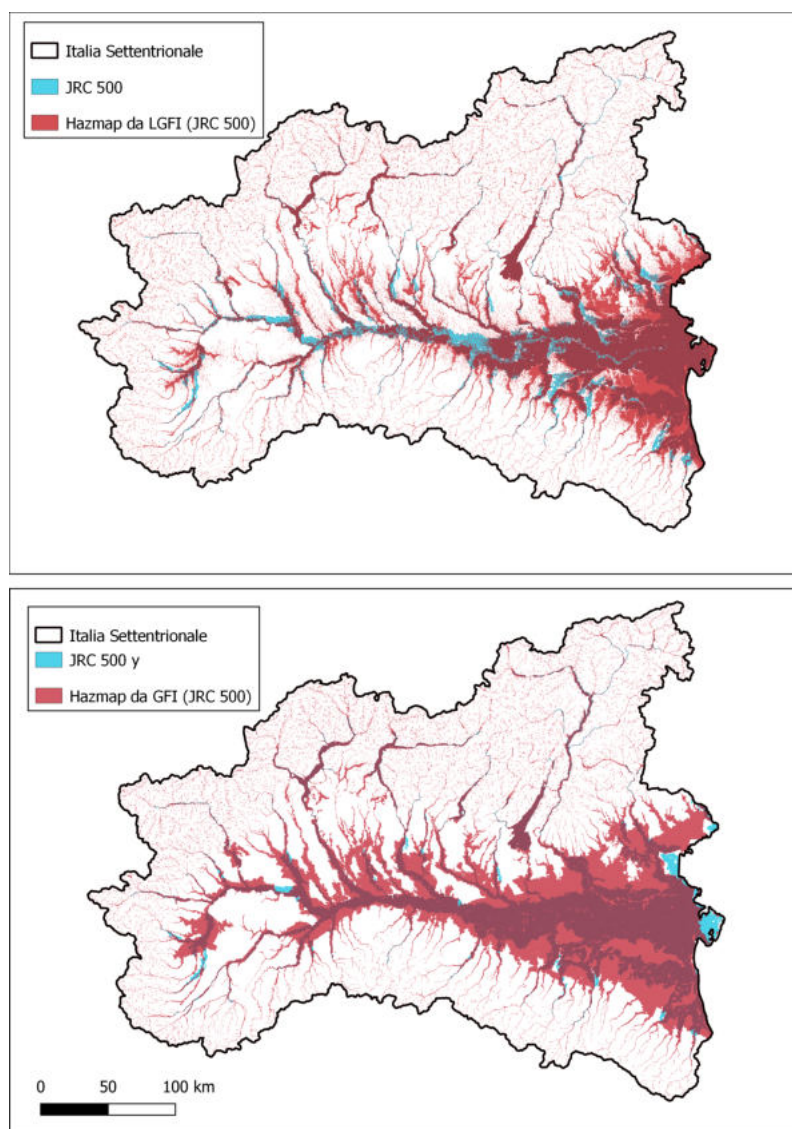


Figura 6.27: Confronto tra le mappe prodotte da LGFI (sopra) e GFI (sotto) calibrate con JRC 500

Tale fatto può essere spiegato considerando che la calibrazione effettuata impiegando l'indice di Youden come funzione obiettivo tende a privilegiare quei valori di soglia che portano al numero più alto possibile di TP (veri positivi), con il rischio di provocare sovrastime dell'area allagabile.

Per quanto riguarda gli altri indici (D, H, TI), le mappe prodotte sono molto meno rappresentative. D risulta totalmente inaffidabile nel rappresen-

tare compiutamente la pericolosità idraulica, coerentemente con quanto ci si aspettava dai suoi valori non calibrati. H e TI sono affetti in misura diversa dallo stesso problema: l'inaccettabile sovrastima delle aree allagate, dovuta all'inadeguatezza della descrizione delle zone di pianura.

Le osservazioni fatte finora sono valide in tutti i casi di calibrazione. Un ulteriore elemento di interesse è rappresentato dalla differenza tra le performance degli indici morfometrici tra le mappe PGRA e quelle JRC. La ragione di tali differenze è certamente legata al diverso tipo di modellazione eseguita per ottenere le suddette mappature (v. anche Capitoli 1 e 2).

Mentre nelle mappe JRC le aree a pericolosità sono localizzate in corrispondenza dei principali corsi d'acqua, prevalentemente in pianura, la mappatura PGRA è stata ottenuta a partire da dataset eterogenei. In particolare, le mappature PGRA riportano estese zone potenzialmente soggette ad esondazione (per l'assegnata pericolosità) lungo tutto il corso medio-inferiore del fiume Po; questo fatto porta alla riduzione del valore di soglia in fase di calibrazione, determinando un notevole aumento delle zone allagabili simulate mediante procedura *DEM-based*.

Da una parte quindi le metriche prestazionali indicano che le mappe PGRA vengono meno avvicinate dai risultati ottenuti, rispetto a quelle JRC. Dall'altra però, l'analisi qualitativa lascia pensare che al contrario i risultati si avvicinano di più alle mappe PGRA. Si prende a titolo di esempio il GFI e le mappature di pericolosità da esso ottenute nei casi JRC 500 e PGRA P1, approssimativamente corrispondenti in termini di tempi di ritorno, e si nota come il TSS (migliore per JRC 500) dipinga una situazione opposta a quella osservata (v. Figura 6.28). Si nota infatti che la mappatura PGRA P1 è meglio riprodotta rispetto alla JRC 500, in quanto le aree alluvionate in eccesso risultano inferiori (al contrario di quanto espresso dai TSS). Si pensa che ciò sia dovuto alla presenza nel caso PGRA di un maggior numero di valori FN, che evidentemente falsano il risultato, in quanto diminuiscono TPR (FNR per GFI con PGRA P1 è però al 22%, mentre per JRC 500 è il 10%). Si può confermare quindi che tale analisi statistica privilegia i risultati col minor numero possibile di FN ed il maggiore di TP, dando minor peso a TN ed FP.

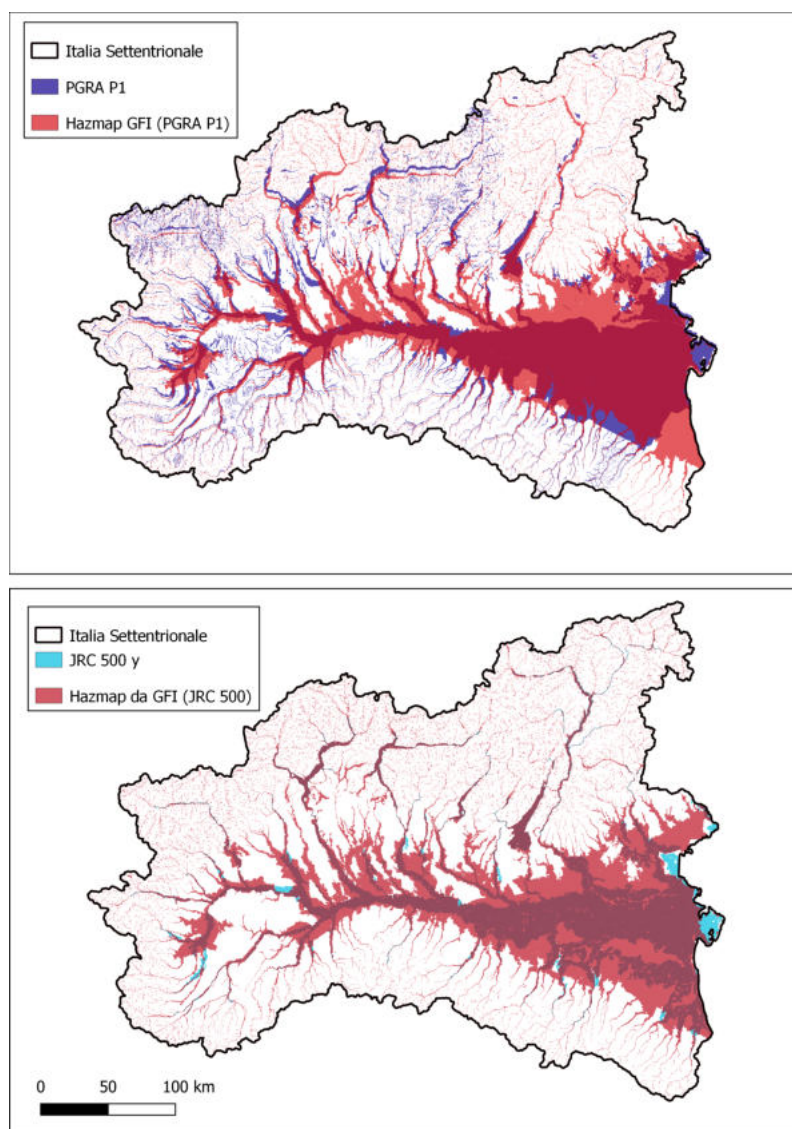


Figura 6.28: Confronto tra le mappe prodotte da GFI calibrando con PGRA P1 (sopra) e JRC 500 (sotto)

La disamina dei diversi indici geomorfici ha dunque confermato che il GFI risulta particolarmente efficace nello studio di aree molto estese e di geografia variegata.

Tali osservazioni giustificano la seconda parte del presente lavoro di Tesi, che si concentra sull'analisi del GFI.

6.2 Applicazioni del GFI

Come precedentemente illustrato, questa seconda parte della Tesi è dedicata all'applicazione del GFI, l'indice geomorfico rivelatosi più rappresentativo della pericolosità idraulica. Si presenteranno in seguito i tre casi studio analizzati, partendo dai due europei ed arrivando infine al bacino del fiume Po.

6.2.1 Fiume Arga (Spagna)

Prima di procedere alla presentazione dei risultati, si precisa che per il fiume Arga tutte le operazioni sono state eseguite tramite l'algoritmo SaferRIVER. Dettagliato nell'Appendice, tale algoritmo è molto simile a quello utilizzato nella prima parte della Tesi, ma è stato ottimizzato al fine di eseguire più efficientemente i diversi calcoli. In particolare si distingue per un metodo diverso per calcolare la direzione di massima pendenza, da cui derivano lievi differenze anche nel GFI, e la calibrazione, che non viene eseguita su tutta l'area del bacino. Vengono infatti opportunamente selezionate le aree allagabili secondo la mappa di calibrazione, ed aggiunto un buffer di 200 m attorno ad esse: la regione risultante è quella dove verranno calcolati TPR, TNR e TSS. Eseguire infatti la calibrazione includendo anche zone di montagna, dove è ampiamente improbabile che i territori vengano allagati (per esempio sul crinale di una montagna), è inutile alla definizione del corretto valore di soglia, ma risulta comunque influenzare il TSS, in quanto modifica il numero di casi TN. Per questo motivo l'algoritmo SaferRIVER esclude le aree montane più lontane dalle aree allagabili delle mappe di calibrazione.

Risultati

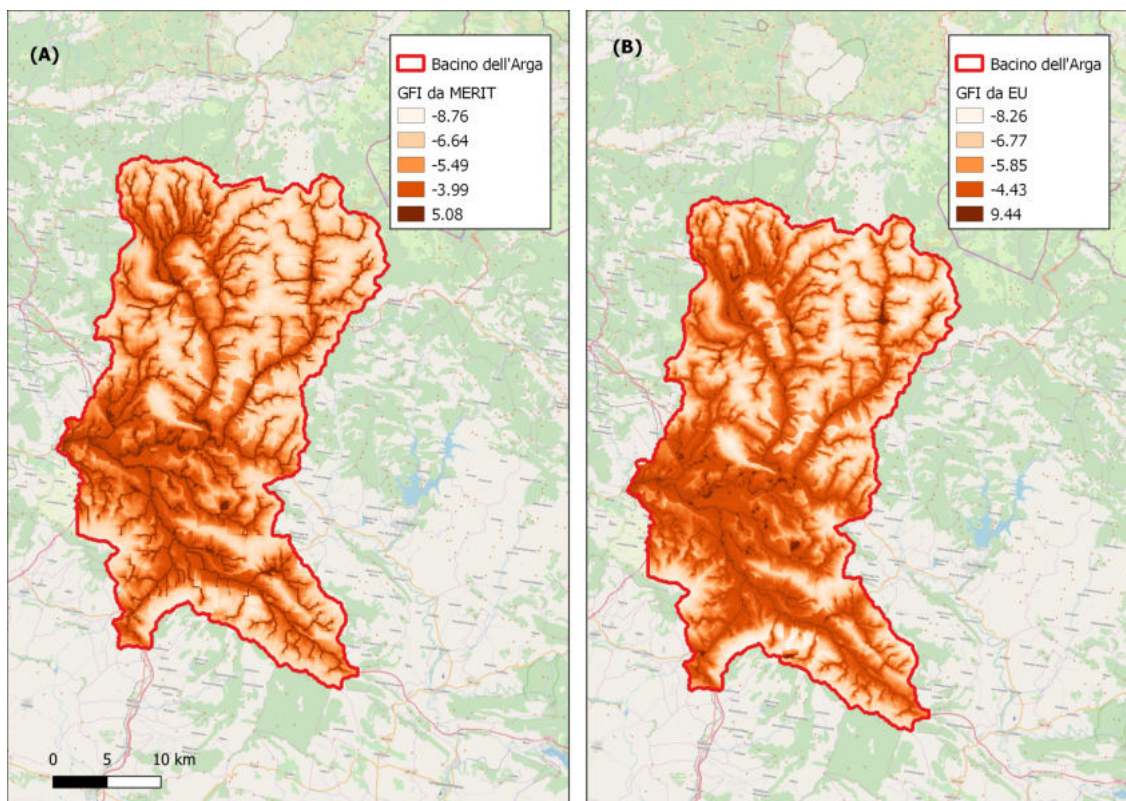


Figura 6.29: GFI calcolato sul bacino del fiume Arga da MERIT (A) e da EU (B)

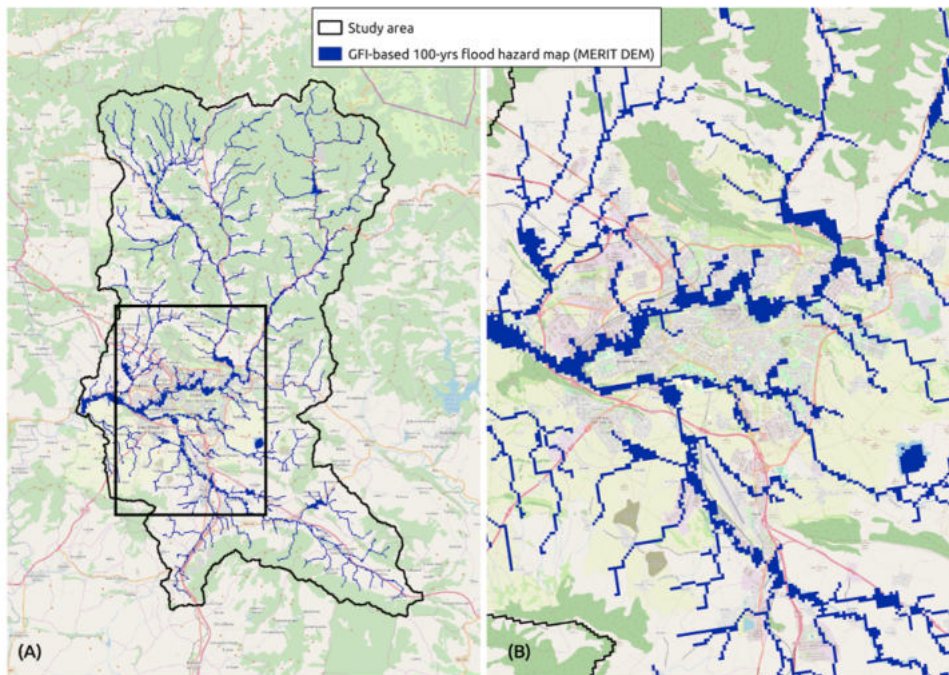


Figura 6.30: Mappa di pericolosità del bacino del fiume Arga calcolata da MERIT DEM

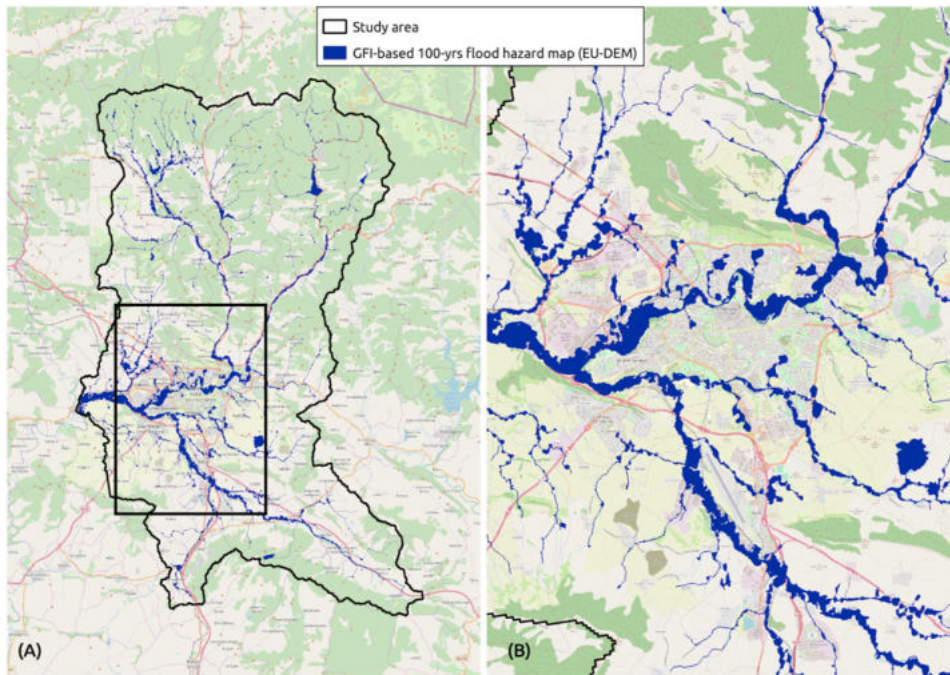


Figura 6.31: Mappa di pericolosità del bacino del fiume Arga calcolata da EU DEM

Discussione

I GFI prodotti da MERIT ed EU DEM sono molto simili; malgrado ciò, risalta che la maggiore risoluzione di EU porta anche ad un più ampio range di variazione dell'indice.

Per capire meglio quale sia la differenza tra le prestazioni dei due metodi, è stata eseguita la calibrazione anche tramite l'algoritmo in Python, parallelamente a quella con SaferRIVER. Si riportano in seguito le metriche prestazionali calcolate nei due casi per entrambi i DEM:

BACINO DELL' ARGHA						
Indice	th	TSS	FPR	TPR	FNR	TNR
GFI EU 25 python	0.334	84%	11%	95%	5%	89%
GFI EU 25 SaferRIVER	0.415	77%	3%	80%	20%	97%
GFI MERIT python	0.466	85%	11%	96%	4%	89%
GFI MERIT SaferRIVER	0.58	75%	4%	80%	20%	96%

Figura 6.32: Metriche prestazionali per la calibrazione sul bacino dell'Arga

Si possono fare diverse osservazioni:

- Malgrado la risoluzione dell'EU DEM (25 m) sia decisamente più raffinata del MERIT (90 m), le metriche prestazionali tra i due differiscono di poco.
- Le mappature della pericolosità ottenute a partire da EU DEM risultano essere più accurate di quelle da MERIT DEM se eseguite con l'algoritmo SaferRIVER, mentre risulta il contrario se la calibrazione è eseguita mediante l'algoritmo in linguaggio Python.
- SaferRIVER restituisce valori più bassi di TSS rispetto all'altro algoritmo.

Le seguenti figure mostrano il confronto tra le mappe di pericolosità prodotte da MERIT ed EU tramite SaferRIVER (Figura 6.33) e tra quelle derivanti da MERIT con i due diversi algoritmi (Figura 6.34).

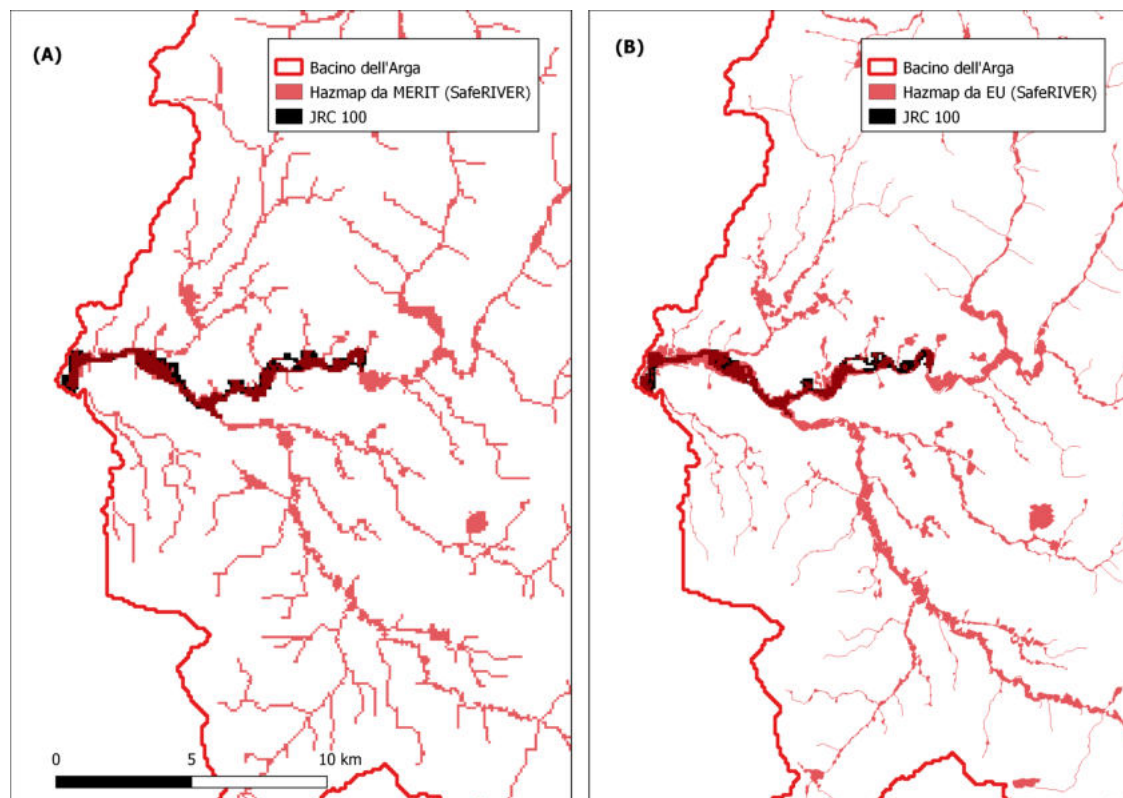


Figura 6.33: Confronto in dettaglio tra le mappe da MERIT ed EU DEM prodotte tramite SaferRIVER

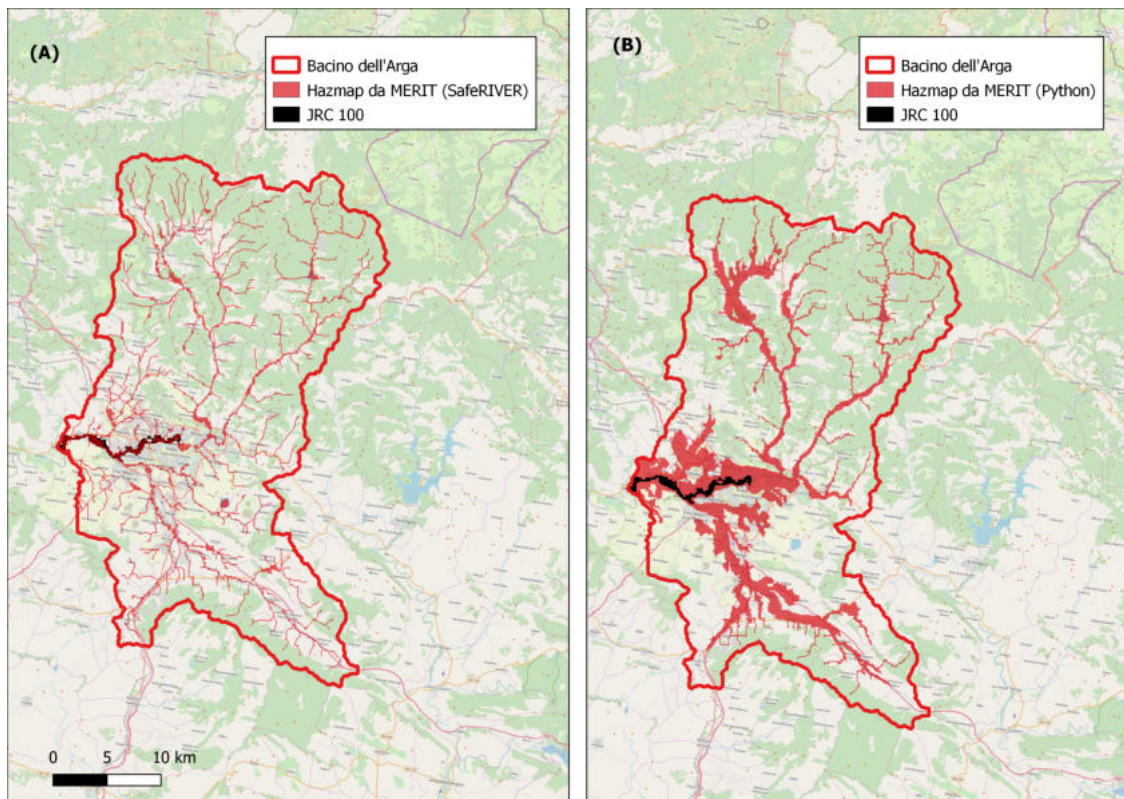


Figura 6.34: Confronto tra le mappe da MERIT prodotte tramite SaferRIVER e Python

La visione delle immagini conferma che l'aumento della risoluzione migliora la rappresentazione della pericolosità, specialmente nelle zone con morfologia complessa, come la città di Pamplona in Figura 6.33. Al tempo stesso, rimane però la perplessità su tale tema: non sempre l'aumento della risoluzione, e quindi della memoria e del tempo computazionale richiesti, corrisponde ad un adeguato miglioramento dei risultati. Ciò anche in virtù del fatto che, indipendentemente dalla risoluzione di DEM di partenza, gli indici geomorfici non tengono in considerazione la dinamica del fenomeno alluvionale e possono dunque presentare limiti in corrispondenza di zone a morfologia particolare o caratterizzate dalla presenza di strutture che alterano il flusso dell'acqua.

La Figura 6.34 conferma invece quanto osservato nella prima parte dello studio: una calibrazione eseguita su tutta l'area del bacino porta inevitabilmente a sovrastime della pericolosità. Per rendersi conto di tali problematiche è però necessario osservare qualitativamente i risultati, poiché le metriche

prestazionali considerate nell'ambito del presente lavoro di Tesi non sono in grado di catturare queste differenze. Si veda infatti che, malgrado l'evidente sovrastima delle aree allagate (Figura 6.34), TSS ammonta, per esempio, ad 85% per le mappe da MERIT DEM prodotte con Python ed a 75% per quelle prodotte con SaferRIVER.

6.2.2 Fiume Reno (Germania)

Come per il caso studio di Pamplona, si è utilizzato per il bacino del Reno l'algoritmo SaferRIVER.

Le operazioni eseguite sono analoghe al caso precedente, con l'unica differenza che qui EU DEM è stato ricampionato a 90 m di risoluzione, per vedere come si traduce questa "perdita" di informazioni. Tale operazione è stata obbligata dai limiti di calcolo imposti dall'utilizzo di SaferRIVER, ma costituisce in realtà un'importante elemento da considerare nello studio degli indici geomorfici: poichè tali metodi trovano la loro applicazione naturale su aree molto vaste, come il bacino del Reno, file di risoluzione troppo elevata possono comportare un eccessivo carico computazionale, perdendo la speditività per cui li si preferisce rispetto alle tecniche tradizionali.

Pertanto, mentre GFI e mappe di pericolosità sono state prodotte sia per EU DEM a 25 m che a 90 m, le metriche prestazionali sono state elaborate solo per i due DEM a 90 m di risoluzione.

Risultati

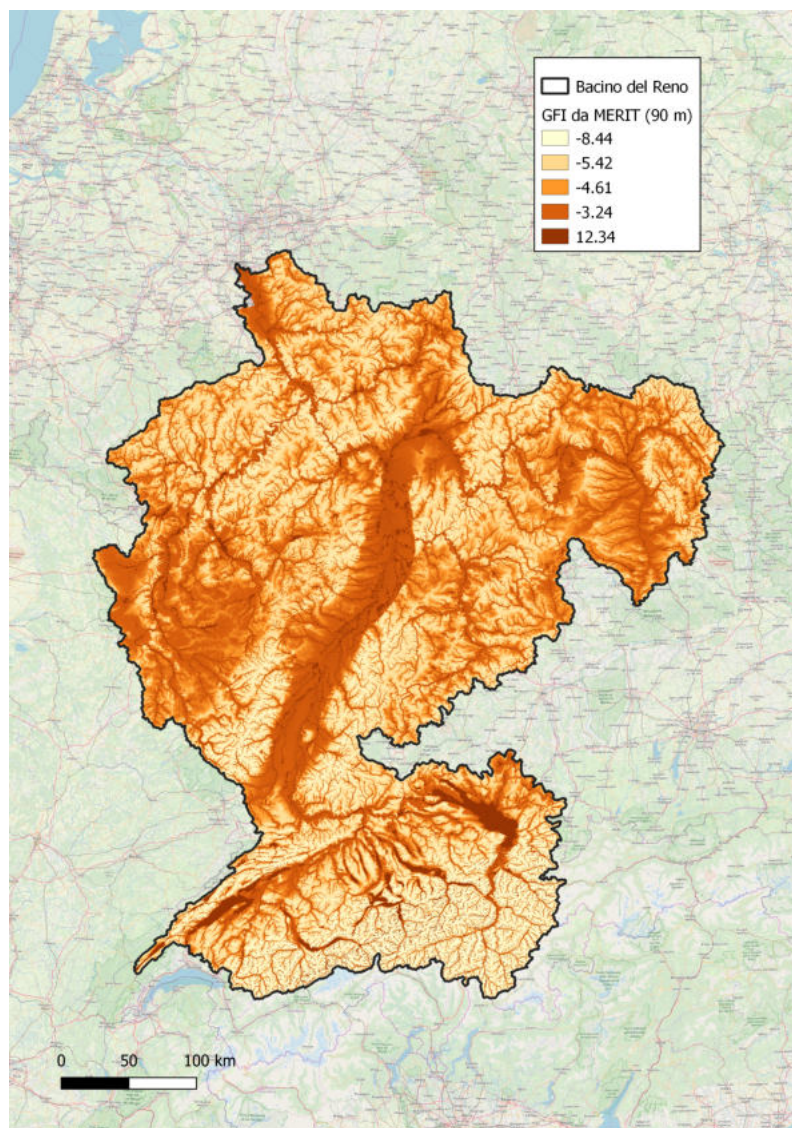


Figura 6.35: GFI calcolato da MERIT DEM per il bacino del Reno

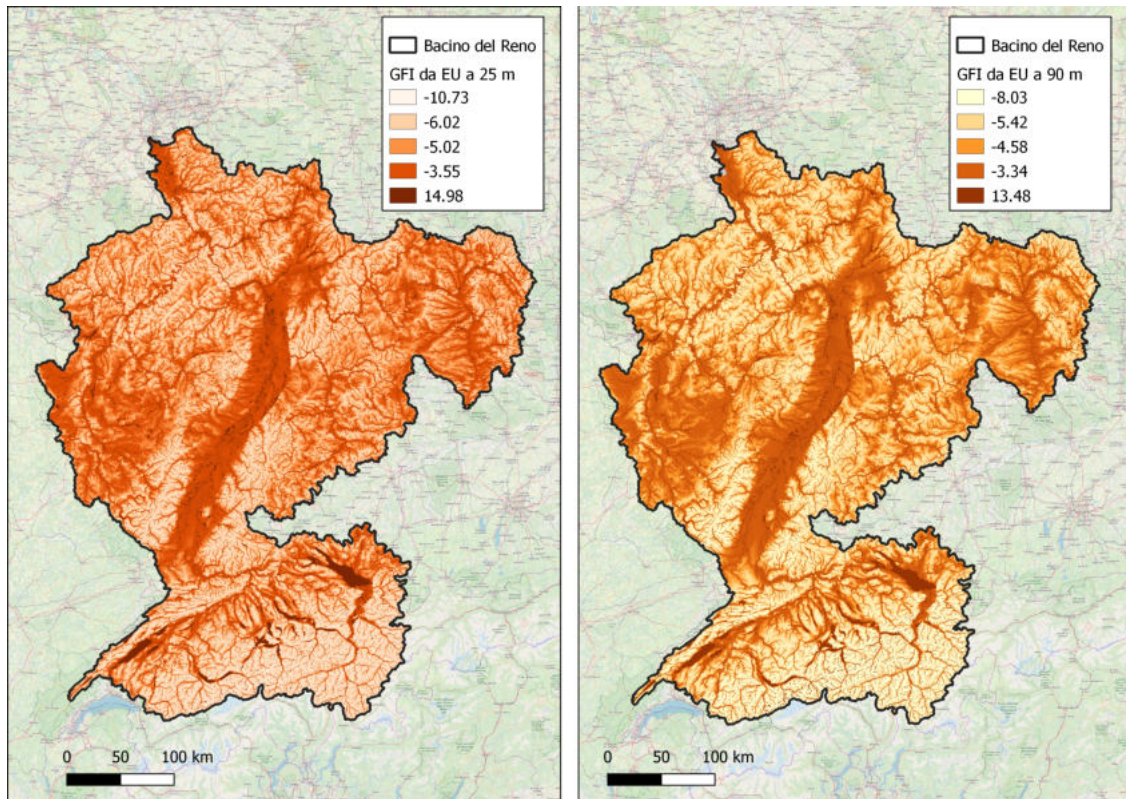


Figura 6.36: GFI calcolato da EU DEM per il bacino del Reno

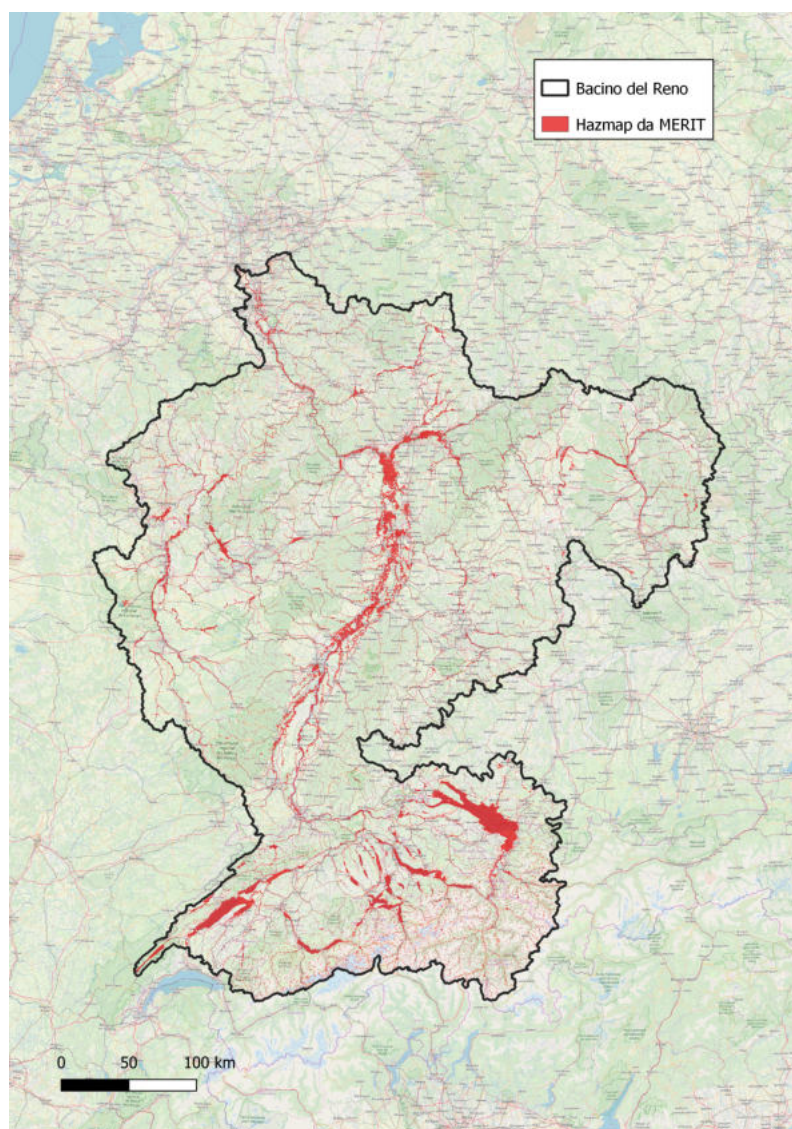


Figura 6.37: Mappa di pericolosità prodotta dalla calibrazione del GFI da MERIT DEM con JRC 100 per il bacino del Reno

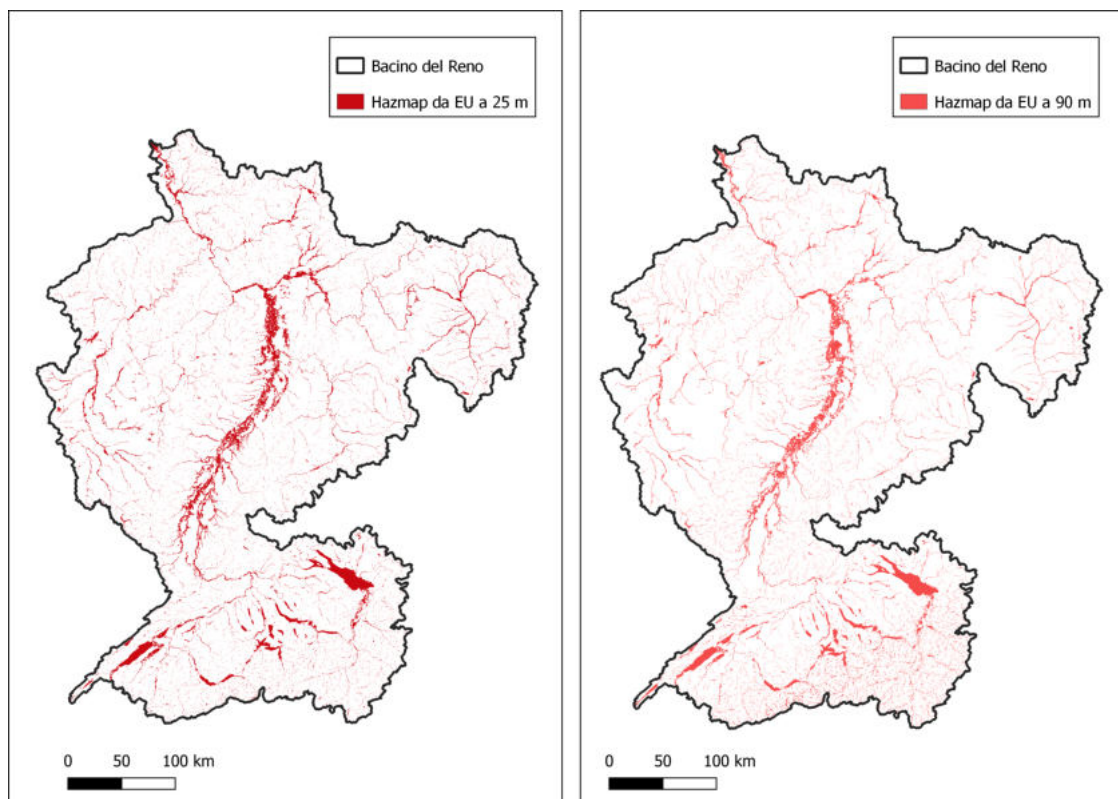


Figura 6.38: Mappa di pericolosità prodotta dalla calibrazione del GFI da EU DEM con JRC 100 per il bacino del Reno

Discussione

Analogamente a quanto osservato per l'applicazione al caso di studio di Pamplona, anche in questo caso si osservano decise somiglianze tra i GFI e tra le mappe di pericolosità calcolati da MERIT ed EU DEM, che portano alla stessa distribuzione di macro-aree a pericolo alluvionale (con i naturali scostamenti, dovuti alla diversa natura dei due DEM). Confrontando invece i GFI e le mappe prodotti da EU a diversa risoluzione si possono notare varie differenze, a prova dell'influenza che la finezza della rappresentazione spaziale ha sugli indici geomorfici.

Al fine di indagare più nel dettaglio lo scostamento tra EU a 25 m di risoluzione, EU a 90 m e MERIT, si mostrano le mappe di pericolosità ingrandite nella zona precedente alla sezione di chiusura, ovvero quella parte della valle del Reno dove hanno sede le città di Dusseldorf, Colonia e Bonn, tutte attraversate dal fiume.

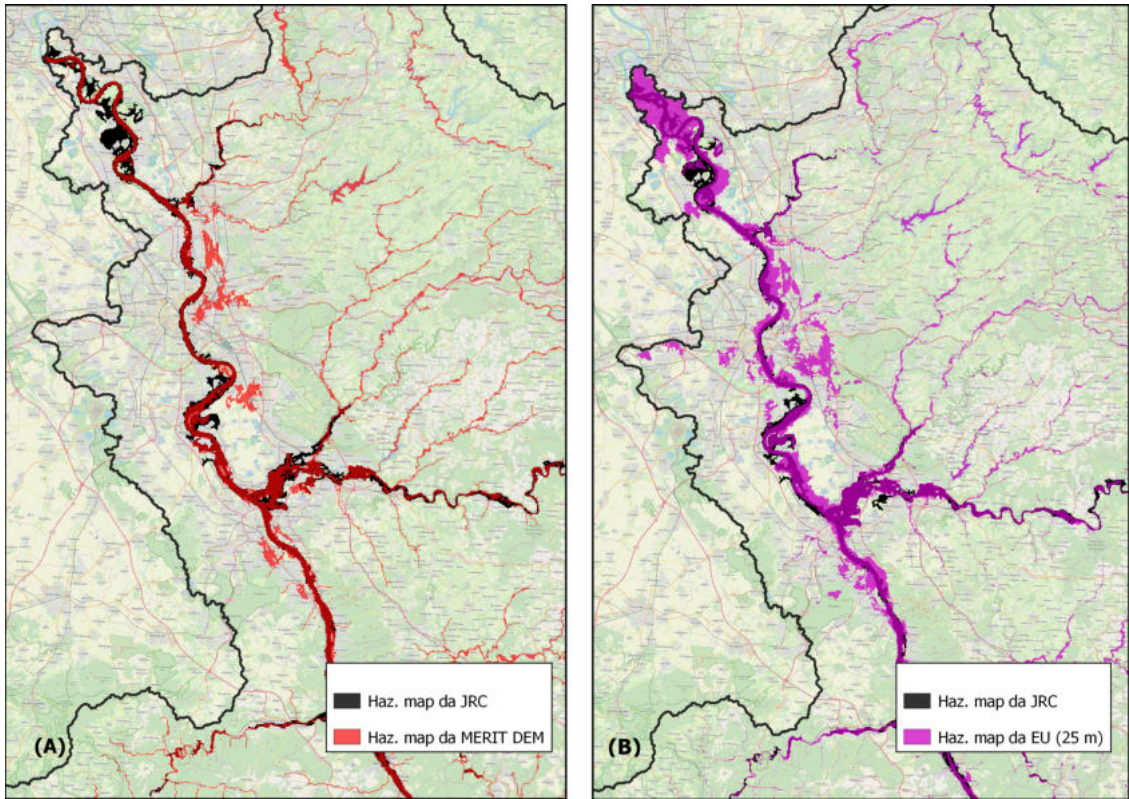


Figura 6.39: Confronto tra mappe prodotte da MERIT (A) ed EU a 25 m (B)

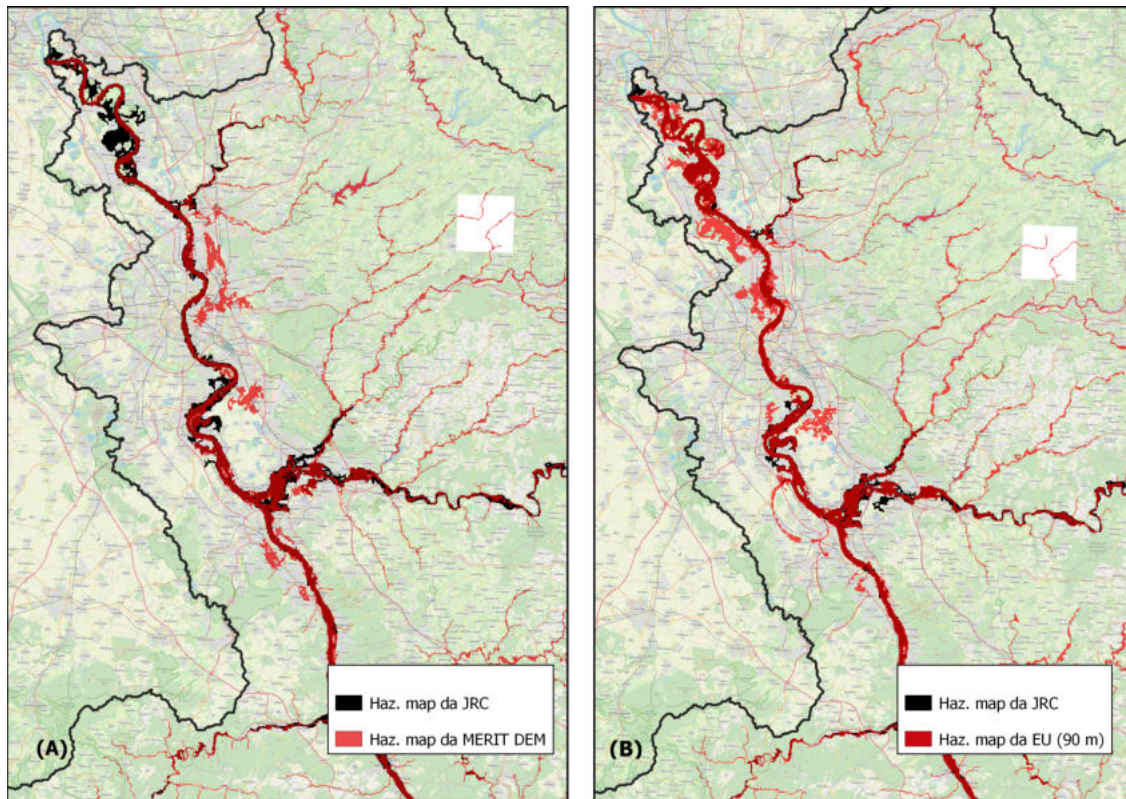


Figura 6.40: Confronto tra mappe prodotte da MERIT (A) ed EU a 90 m (B)

E' molto interessante notare che nel caso studio di Colonia, EU DEM porta sovrastime più ingenti di MERIT DEM, sia alla sua risoluzione naturale, di 25 m (v. Figura 6.39), sia riscalato a 90 m (v. Figura 6.40).

In particolare è interessante osservare che EU DEM presenta delle performance qualitativamente migliori una volta diminuita la sua risoluzione, in quanto diminuisce la sovrabbondanza della superficie a rischio. Se si confronta infatti Figura 6.39 (B) (EU DEM a 25 m) con 6.40 (B), si nota come, contrariamente a quanto ci si aspetterebbe, le mappe di pericolosità prodotte da EU DEM a 90 m si adattino meglio alle mappe di calibrazione rispetto a quelle a maggiore risoluzione.

Bisogna considerare a questo riguardo che l'area scelta per visualizzare nel dettaglio le mappe costituisce una zona fortemente urbanizzata, in cui le condizioni fluidodinamiche sono complesse. A ciò si attribuisce il motivo degli scostamenti nella mappatura, più che alla risoluzione del DEM.

Occorre infine specificare che bacini molto grandi e topograficamente disomogenei, come quello del Reno, hanno una certa predisposizione ad essere soggetti a rappresentazioni locali della pericolosità idraulica da indici geomorfici di scarsa qualità. Ciò è dovuto al diverso adattamento che tali indici hanno ai vari contesti geografici del dominio, che richiederebbe diversi processi di calibrazione. Per questo motivo, malgrado le mappe di pericolosità prodotte per il bacino idrografico del Reno abbiano buona corrispondenza macroscopica con la mappatura del JRC, ci sono numerosi scostamenti a livello locale, come quelli evidenziati nelle Figure 6.39 e 6.40.

Si riportano di seguito le metriche prestazionali calcolate, che evidenziano maggiore verosimiglianza delle mappe prodotte da EU a 90 m.

BACINO DEL RENO						
Indice	th	TSS	FPR	TPR	FNR	TNR
GFI EU 90m SafeRIVER	0.445	72%	2%	74%	26%	98%
GFI MERIT SafeRIVER	0.491	69%	3%	72%	28%	97%

Figura 6.41: Metriche prestazionali delle calibrazioni del GFI da MERIT ed EU a 90 m con JRC 100

6.2.3 Fiume Po

Per l'ultimo caso di studio si è voluto intervenire sulla calibrazione, cambiando rispetto ai casi precedenti la tipologia di mappa usata (stavolta proveniente da un'applicazione a livello locale) e l'ampiezza dell'area. In questo modo si voleva osservare come cambiano le mappe di pericolosità ricercando il valore di soglia del GFI che soddisfa condizioni particolari a livello locale.

Per effettuare tali operazioni si è fatto ricorso al solo algoritmo sviluppato in Python. Si è pertanto applicato il metodo di calibrazione sfruttato per l'Italia Settentrionale.

Dopo aver proceduto al calcolo del GFI su tutto il bacino del Po, è stata selezionata un'area sul suo corso medio-inferiore, e su di essa si è eseguita la calibrazione.

Risultati

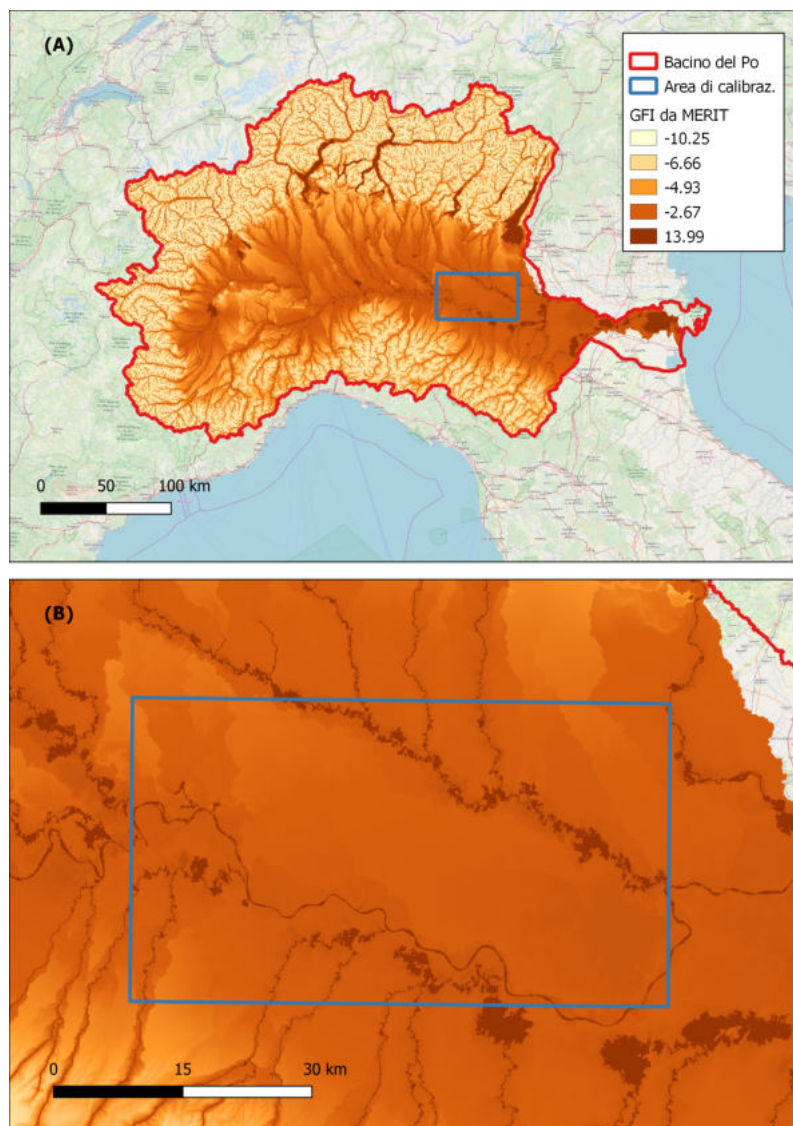


Figura 6.42: GFI calcolato sul bacino del Po a partire da MERIT DEM

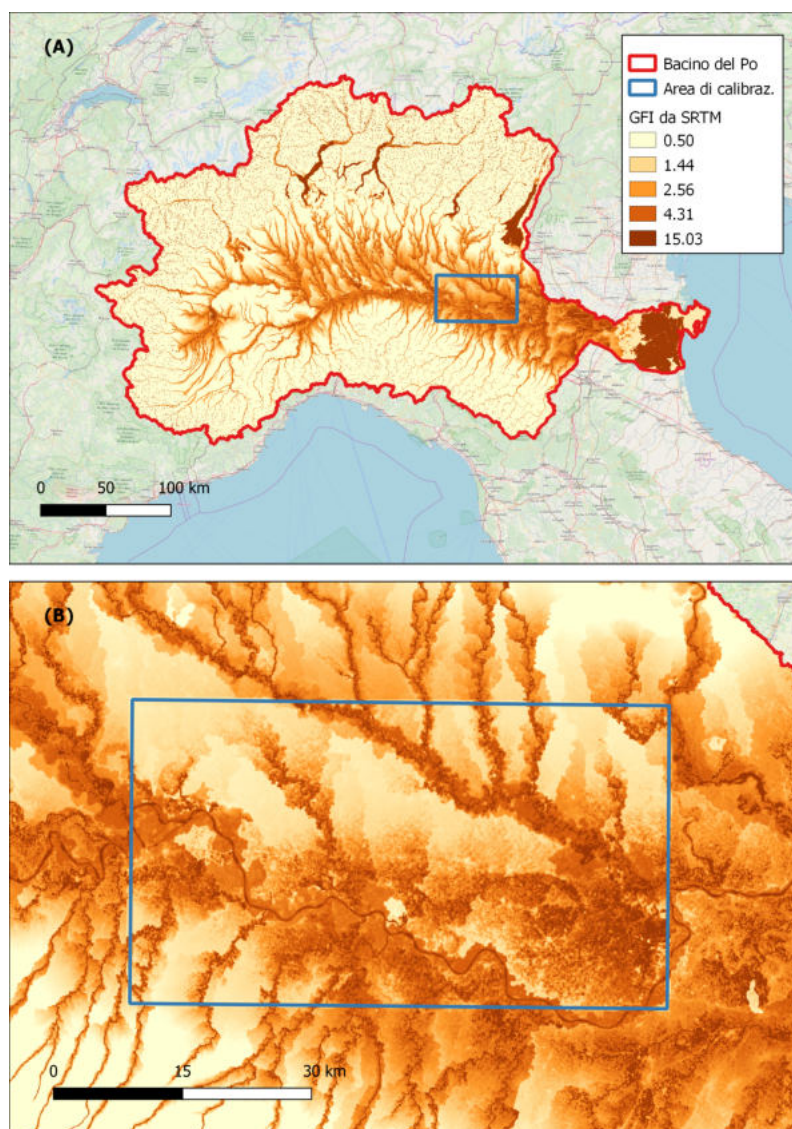


Figura 6.43: GFI calcolato sul bacino del Po a partire da SRTM DEM

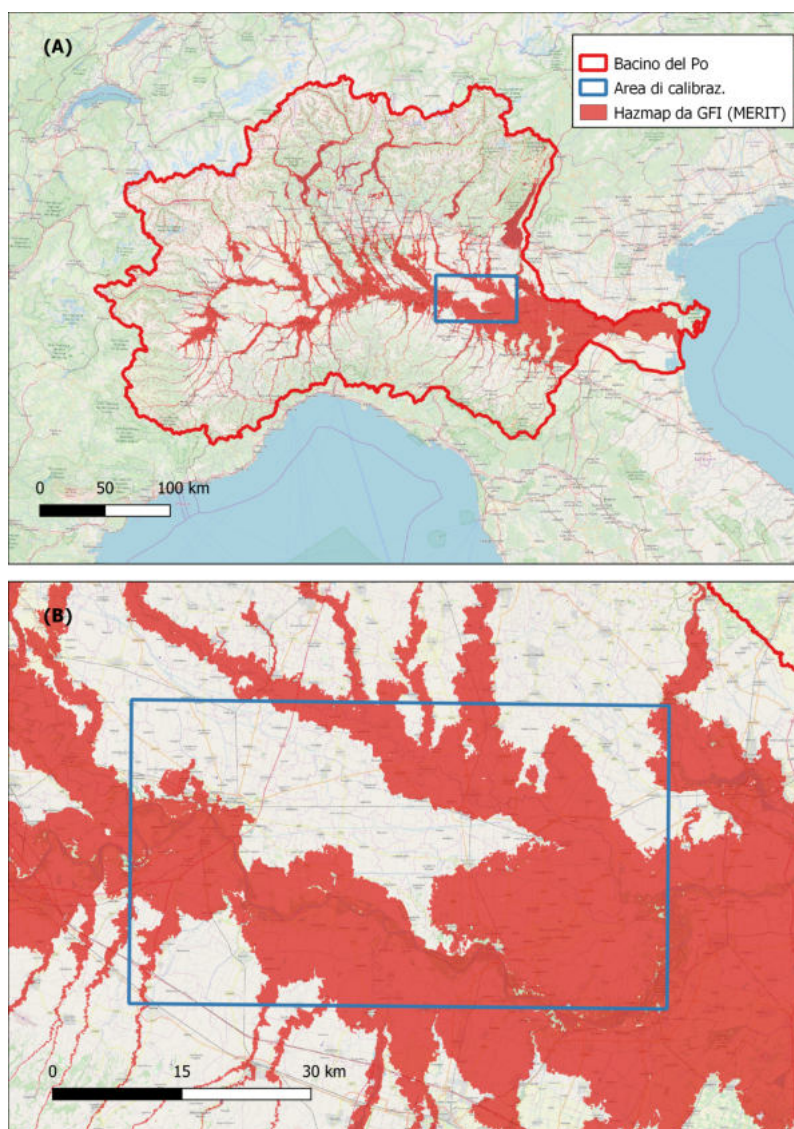


Figura 6.44: Pericolosità idraulica stimata da GFI a partire da MERIT DEM, con calibrazione locale

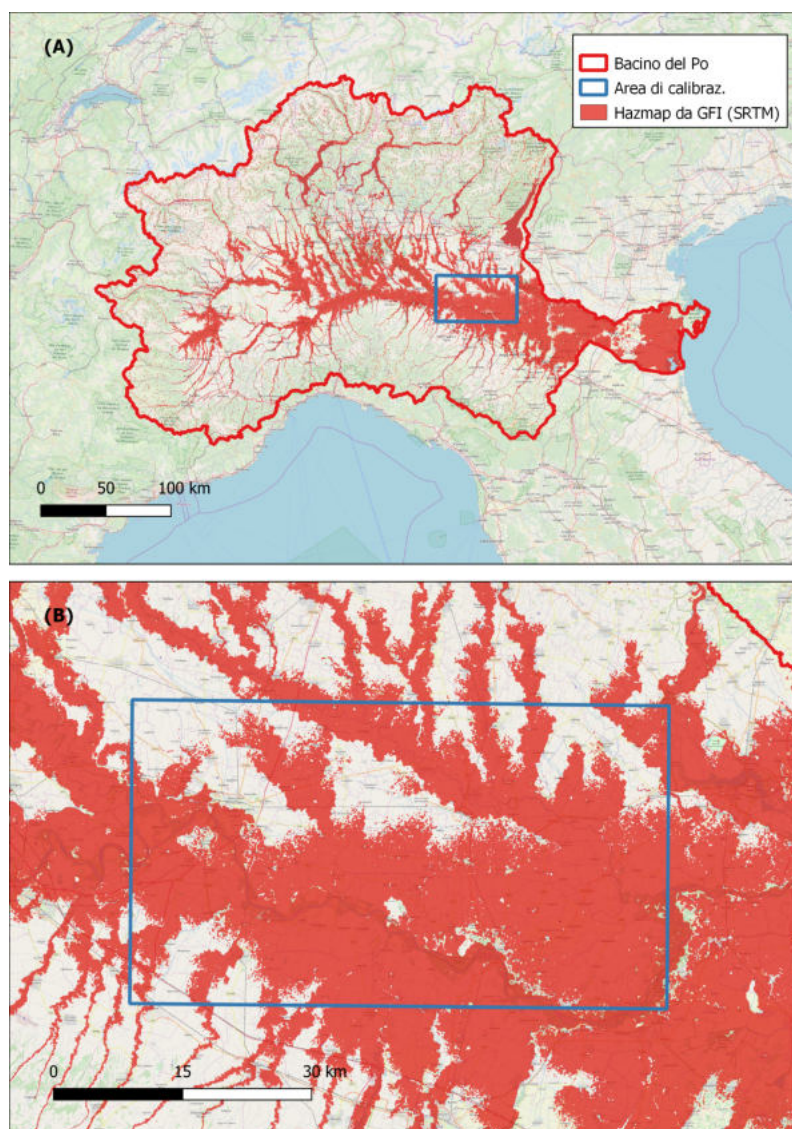


Figura 6.45: Pericolosità idraulica stimata da GFI a partire da SRTM DEM, con calibrazione locale

Discussione

Osservando le mappature del GFI risaltano alcune grandi zone prive di dati vicino al confine nord-orientale del bacino nel caso del MERIT. Tali problematiche non si erano riscontrate nello studio dell'Italia Settentrionale, e sono dovute ad errori nelle fasi di pre-processamento dei dati DEM; infatti,

il MERIT copre queste aree, che non sono quindi vuote, ma le operazioni di *pit-filling* (riempimento delle depressioni) e *flat-resolving* (risoluzione delle aree piatte) previste dall'algoritmo evidentemente possono comportare incongruenze importanti, specialmente in prossimità dei confini del dominio.

Confrontando GFI da MERIT (v. Figura 6.42) e da SRTM (Figura 6.43) invece si trova che il secondo fornisce una rappresentazione molto più convincente in pianura, dove si possono distinguere meglio i tratti fluviali e la presenza di depressioni nel territorio. Ciò suggerisce che il DEM SRTM garantisce una migliore rappresentatività della morfologia dell'area di studio.

Venendo all'analisi delle mappe, si riportano le metriche prestazionali calcolate, seguite da delle immagini di dettaglio.

BACINO DEL PO						
Indice	th	TSS	FPR	TPR	FNR	TNR
GFI MERIT	0.346	35%	62%	96%	4%	38%
GFI SRTM	0.336	36%	52%	87%	13%	48%

Figura 6.46: Metriche prestazionali per la calibrazione del GFI sul corso medio-inferiore del Po

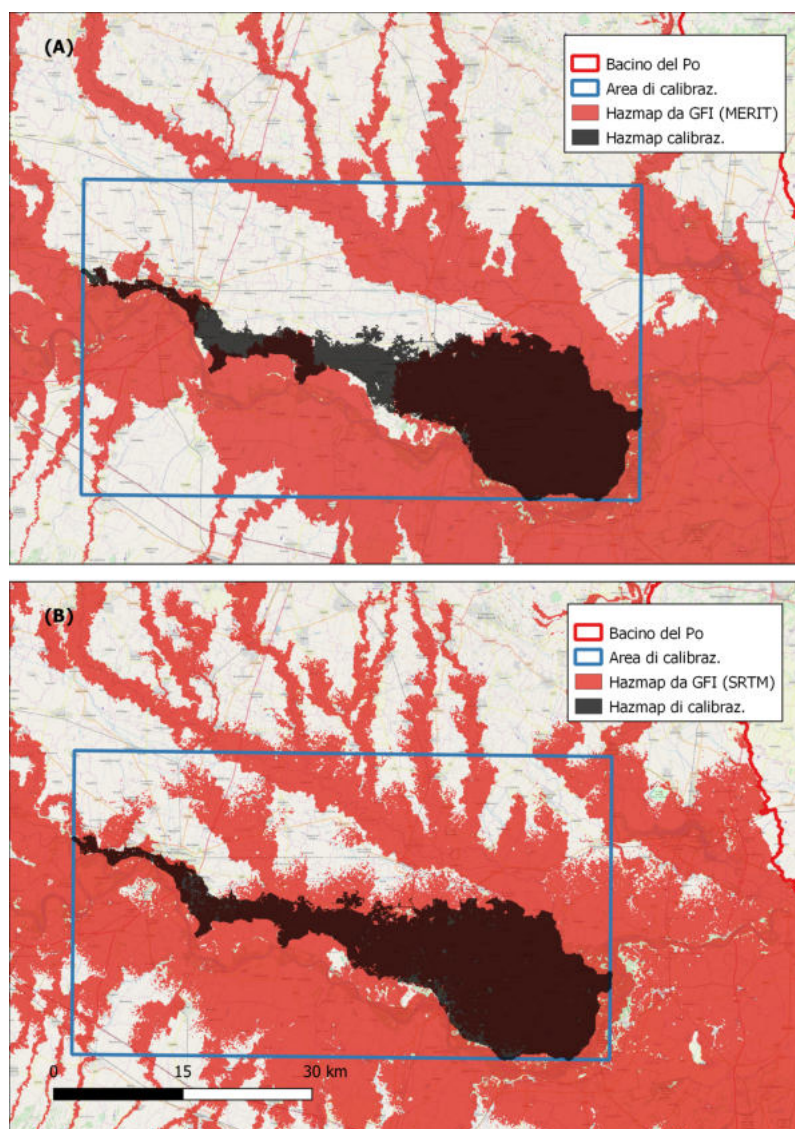


Figura 6.47: Confronto tra le mappe prodotte da MERIT (A) ed SRTM (B), dettaglio sull'area di calibrazione

Sia dall'analisi quantitativa che qualitativa si evince che la calibrazione dei GFI ha portato risultati insoddisfacenti in entrambi i casi.

Oltre ad un valore molto basso di TSS, l'indice da ottimizzare (pari a 35% per MERIT e 36% per SRTM), si nota un valore molto alto di FPR (pari a 62% per MERIT e 52% per SRTM), ad indicare la considerevole sovrastima, anche per un metodo di ottimizzazione come questo, intrinsecamente

propenso a causarla (come illustrato nel Capitolo 3).

Le precedenti considerazioni in merito al GFI evidenziano il limite di tale indice geomorfico per quanto concerne la rappresentazione di particolari condizioni al contorno e a grande dettaglio.

Si ritiene infatti che l'inattendibilità dei risultati in tale caso sia da attribuire non tanto alla grandezza della zona da calibrare o alla posizione geografica in cui è localizzata nel bacino, bensì all'incapacità delle sole caratteristiche topografiche di simulare comportamenti fluidodinamici particolari. Ciò nonostante, si rende necessaria ulteriore ricerca in tale contesto, per comprendere con esattezza effettivi limiti e potenziale dei metodi DEM-based nella rappresentazione di complesse condizioni al contorno, anche sfruttando DEM ad elevata risoluzione, come LiDAR.

Capitolo 7

Conclusioni

Il rischio idraulico da allagamento fluviale è un ambito di ricerca estremamente attuale, in quanto gli eventi alluvionali costituiscono causa di grandi perdite economiche e gravi danni agli insediamenti e vite umane, sia in paesi sviluppati che in via di sviluppo.

I fenomeni di continuo consumo di suolo e di cambiamento climatico, malgrado gli importanti passi in avanti della scienza e della tecnica, stanno portando ad un incremento del rischio idraulico.

Si rendono perciò sempre più necessari metodi di mappatura efficaci ed efficienti, che presentino i minori oneri possibili dal punto di vista computazionale, economico e temporale.

Nel presente elaborato di Tesi si sono studiati dei metodi innovativi di mappatura della pericolosità idraulica da allagamento fluviale; tali metodi, detti *DEM-based*, hanno già dimostrato il loro potere predittivo in numerose indagini di altri autori (v. per esempio Manfreda et al., 2015; Samela et al., 2017; Tavares da Costa et al., 2019). Essi utilizzano come dati in input dei modelli di quota digitale del terreno (altrimenti detti DEM, ovvero file in cui la superficie terrestre, discretizzata in pixel, viene descritta in termini di quota media) e delle mappe di pericolosità pre-esistenti, ritenute di affidabilità certa.

I metodi *DEM-based* si concretizzano nel calcolo di indici geomorfici, ovvero descrittori della topografia del territorio, che vanno poi calibrati in riferimento alle mappe di pericolosità pre-esistenti, ricercando un valore di soglia ottimale: il suo superamento/non superamento consente di ottenere una mappa binaria di pericolosità in output. Due sono quindi le macro-fasi in cui si può dividere il processo: il calcolo di un indice geomorfico e la sua calibrazione.

Tali metodi sono molto rapidi, sfruttano la presenza di dati facilmente e gratuitamente accessibili (i DEM), e si applicano efficacemente ad ampie aree geografiche. Ciò li rende strumenti estremamente utili ed interessanti per la mappatura della pericolosità idraulica, da affiancare, ed in condizioni di necessità, sostituire, ai modelli idraulici tradizionali.

Nel presente elaborato di Tesi si è suddiviso lo studio in due parti principali. La prima di esse è stata dedicata alla disamina di alcuni tra i diversi indici geomorfici proposti in letteratura:

1. D, la distanza dal punto della rete idrografica idrologicamente connesso più vicino
2. H (HAND), la differenza di quota con il punto della rete idrografica più vicino
3. Indice topografico modificato (TI_m), descrittore composito della pendenza del territorio
4. Geomorphic flood Index (GFI), dipendente dal rapporto tra H ed un tirante in alveo calcolato da una relazione di scala
5. Local GFI (LGFI), molto simile al GFI, ma con una diversa relazione di scala per il calcolo del tirante

Tali indicatori sono stati calcolati, calibrati e confrontati in riferimento ad una vasta area comprendente gran parte dell'Italia Settentrionale (ad eccezione di parte della Liguria e del Veneto, del Trentino-Alto Adige e del Friuli-Venezia Giulia).

La seconda parte della Tesi si è concentrata sull'analisi del solo indice GFI, applicato a tre diversi casi studio. Esso è stato dapprima calcolato a partire da diversi DEM, con diversa risoluzione orizzontale, in due contesti geografici europei (bacini idrografici del fiume Arga a Pamplona e del fiume Reno a Colonia). Infine, si è studiato il caso del bacino del Po, sul quale erano state simulate condizioni di rottura degli argini.

Si sottolinea che per le aree di studio europee (Spagna e Germania), per il calcolo e la calibrazione del GFI si è utilizzato un algoritmo diverso che per gli altri casi. Tale strumento consente di calibrare le mappe finali di pericolosità su una zona ristretta rispetto all'intero bacino, localizzata lungo i corsi d'acqua principali, in corrispondenza delle aree a maggiore pericolosità.

I risultati della prima parte dello studio eseguito hanno evidenziato che le prestazioni predittive del GFI (seguito di poco da LGFI) sono migliori di quelle degli altri indici. Esso si adatta agevolmente a descrivere la pericolosità idraulica in ampie aree geografiche dalla morfologia anche molto

variegata. Tali osservazioni hanno confermato quanto precedentemente trovato da altri autori (v. per esempio Manfreda et al., 2015; Samela et al., 2017), e giustificato la seconda parte dell'indagine.

L'osservazione del GFI nei casi di Pamplona e Colonia ha messo in luce che l'aumento della risoluzione del DEM di partenza comporta anche un miglioramento delle prestazioni predittive. Ciò significa che a scala di bacino un DEM con maggiore risoluzione tende a produrre mappe di pericolosità più veritiere, anche se possono rimanere incongruenze anche gravi a scala locale.

Inoltre, il confronto fra i risultati delle aree europee con quelli dell'Italia Settentrionale ha messo in luce l'effetto positivo della calibrazione su area ad hoc. Escludere dalla valutazione del valore di soglia le zone montane consente quindi di ottenere mappe di pericolosità con minori sovrastime della pericolosità.

L'ultimo caso studiato, quello del bacino idrografico del Po, diversamente dagli altri ha prodotto delle mappe di pericolosità molto poco rappresentative rispetto a quelle usate in fase di calibrazione. Le condizioni che si volevano riprodurre erano quelle della rottura degli argini fluviali in una zona molto ristretta, situata tra Cremona e Guastalla, sul corso medio-inferiore del fiume. Esse costituiscono delle condizioni al contorno particolari per il moto della corrente, e non sono state adeguatamente rappresentate dalla calibrazione del GFI.

In conclusione, gli indici geomorfici si sono confermati ottimi strumenti per la mappatura della pericolosità idraulica da allagamento fluviale. Tra essi spicca il potenziale del GFI, che si adatta molto bene ad ampie e complesse aree geografiche, trovando la propria naturale applicazione a scala di bacino. Si manifesta però la necessità di ulteriore ricerca, da una parte sul metodo di calibrazione più opportuno per ottenere delle mappature rappresentative, dall'altra sulla possibilità di migliorare le prestazioni in complessi ambiti di dettaglio.

Appendice

Tale appendice è stata pensata per descrivere per sommi capi gli algoritmi utilizzati durante tale lavoro di studio. Essi sono sostanzialmente due: SaferRIVER e un algoritmo scritto in linguaggio Python, da cui SaferRIVER massimamente deriva. Altre operazioni sono state eseguite con QGis e TauDEM.

Si precisa che tutti i software adottati, ad eccezione di SaferRIVER, che è di proprietà privata, sono a licenza libera, gratuitamente scaricabili al relativo sito ufficiale.

Algoritmo in Python

Tale codice deriva da leggere modifiche apportate all'algoritmo scritto da Ricardo Tavares da Costa in linguaggio Python (versione 3.6).

Esso ha lo scopo di eseguire l'analisi idrologica necessaria al calcolo del GFI ed a produrre mappe binarie di pericolosità tramite la sua calibrazione con file forniti. I file in input, in formato raster, sono il DEM dell'area d'interesse, il file con la direzione di massima pendenza e una mappa di calibrazione. Essi devono essere perfettamente sovrapponibili, ed avere quindi lo stesso sistema di riferimento, numero e coordinate del pixel.

Senza scendere troppo nel dettaglio, le operazioni eseguite dal codice sono le seguenti, nello stesso ordine di esecuzione:

1. Pre-processing: riempimento dei vuoti del DEM (funzione `grid.fill_depressions`)
2. Pre-processing: risoluzione delle zone piatte (funzione `grid.resolve_flats`)
3. Calcolo della direzione di drenaggio (funzione `grid.flowdir`)
4. Calcolo dell'area contribuente (funzione `grid.accumulation`)
5. Calcolo del reticolo idrografico (area di soglia di 10^5 m²)

6. Calcolo di H
7. Calcolo di h
8. Calcolo del GFI
9. Normalizzazione del GFI
10. Calibrazione del GFI normalizzato tramite ottimizzazione di TSS (funzioni `metrics.roc_curve` e `argmax`)
11. Applicazione del limite trovato al GFI normalizzato e realizzazione di una mappa binaria di pericolosità.

Tale algoritmo è stato utilizzato per i casi studio dell'Italia Settentrionale, Pamplona e bacino del Po.

La piccole parti modificate riguardano:

- L'elaborazione di H, che è stato posto 0.00001 laddove era ≤ 0 , di modo da evitare zone bucate nel GFI
- Il calcolo delle metriche prestazionali, dove è stato aggiunto il necessario per dare in output TPR, TNR, FPR ed FNR

Si sottolinea che la calibrazione effettuata in tale codice si riferisce a tutta l'area descritta dalla mappa utilizzata. Ciò porta alla produzione di risultati falsati, con sistematica sovrastima della superficie in pericolo, che però presentano metriche prestazionali elevate, dalle quali non è possibile capire le problematiche presenti.

SaferRIVER

L'algoritmo SaferRIVER è stato prodotto dalla collaborazione tra GECCO s.r.l. e l'Università di Bologna, sfruttando in massima parte il codice precedentemente descritto, di Ricardo Tavares da Costa, con opportune modifiche per aumentarne la velocità ed efficienza.

Esso è lanciato da Google Colab, un sistema di calcolo e condivisione che sfrutta un compilatore Jupiter di Python online, senza richiedere memoria locale. Sfortunatamente, se ciò consente tempi computazionali estremamente ridotti, comporta anche l'impossibilità di visualizzare l'intero codice se non se ne è proprietari.

Venendo alle modifiche apportate rispetto al codice precedentemente descritto, la prima è quella di includere nell'algoritmo il calcolo della direzione

di massima pendenza: si è verificato che il file ottenuto è leggermente diverso da quello utilizzato da calcolatore locale, prodotto da TauDEM. Ciò porta anche ad un diverso raster GFI. In particolare però, SafeRIVER è stato reso in grado di formare una *marginal map* su cui effettuare la calibrazione, costituita dall'area dell'*hazard map* fornita con un buffer di 200 metri intorno.

Tale operazione risulta estremamente proficua per la riduzione delle aree sovrastimate, poichè diminuisce l'entità di TN, riducendo TSS:

$$J = TSS = TPR + TNR - 1 = \frac{TP}{TP + FN} + \frac{TN}{TN + FP} - 1$$

Si vedano le discussioni ed i risultati per vedere più nel dettaglio gli effetti di questa scelta.

Infine, SafeRIVER contiene anche una parte di codice per calcolare, a partire dalle mappe di pericolosità prodotte, il tirante atteso nelle aree allagate.

QGis e TauDEM

Questa ultima sezione dell'appendice non è intesa per fornire una descrizione completa ed approfondita dei software TauDEM e QGis, bensì solamente all'enunciazione delle operazioni con essi svolte.

QGis costituisce il più noto sistema informativo geografico a licenza libera. Esso è stato utilizzato per visualizzare e produrre tutte le mappe presentate nel presente lavoro. Inoltre GRASS, uno dei suoi più comuni plugins ha svolto un ruolo molto importante, ovvero il calcolo dell'Indice Topografico TI, tramite l'algoritmo *r.watershed*.

L'algoritmo *r.stream_extract* è stato invece sfruttato per il calcolo del file *stream channel*, raster con il reticolo fluviale corrispondente ad una determinata area di soglia CSA.

Venendo a TauDEM, esso può essere installato come plugin di QGis o lanciato dal prompt dei comandi di Windows. Esso è un software contenente una serie di funzioni di analisi idrologica. In particolare, esso è stato usato (tramite *command line*) per calcolare D e il file raster con la direzione di massima pendenza, rispettivamente con le funzioni:

- `D8HDistToStrm -p demp.tif -src demsrc.tif -dist demdist.tif [-thresh 50]`
`pfile: D8 flow direction, input file`
`srcfile: stream channel, input file`
`distfile: distance to stream channel (D), output file`
`thresh: valore di soglia`

- `D8FlowDir -fel demfel.tif -p demp.tif -sd8 demsd8.tif`
demfile: Pit filled DEM, input file
pointfile: D8 flow directions, output
slopefile: D8 slopes, output

Ringraziamenti

Fin da piccolo ho sognato di cambiare il mondo. Fantasticavo su idee strampalate di mondi paralleli, tecnologie mirabolanti, società alternative. Non avevo chiaro in testa come ci sarei riuscito, ma ho sempre creduto fermamente che avrei fatto qualcosa di grande, qualcosa di buono per gli altri. Da allora molte cose sono cambiate. La vita procede inesorabile, portando con sé gioie e dolori, successi e delusioni, idee, sogni, frustrazioni, baci e lacrime. Quello che rimane è consapevolezza di sé, conoscenza di una parte di noi che prima era inesplorata, ma anche coscienza di un altro lato che continua ad essere indefinito, coperto da un perenne strato di evanescente nebbia bianca.

Ad oggi non credo più che diventerò l'eroe dei miei sogni, non mi sento più così forte, capace e speciale. Ma questo non mi dispiace, perché i miei obiettivi sono mutati: mi sono convinto nel tempo che il successo più grande non è ergersi sopra gli altri, bensì conquistarsi la loro fiducia, la loro stima, il loro affetto.

Se c'è un modo in cui ciascuno di noi può cambiare il mondo, è aggiungere ogni giorno un po' di felicità e bontà nella vita delle persone che lo circondano. Sono convinto fermamente che prima o poi ad un sorriso, le persone ti risponderanno con un sorriso, perciò l'unica cosa che un singolo individuo può fare è cercare di migliorare il piccolo mondo che lo circonda. Questo richiede costanza, positività, pazienza e coraggio.

Oggi, grazie alle persone che mi sono intorno, posso finalmente dire che ne vale la pena.

Non è retorica, non è sentimentalismo. Oggi tutti coloro che mi hanno sostenuto in questi anni si laureano con me.

Oggi più che mai, io mi sento fortunato. Non è stato sempre facile, sono caduto varie volte lungo la strada. Mi sono ferito, e non è stato facile rialzarsi. Allo stesso modo, non è stato facile sostenere chi di fianco a me ha incespicato a sua volta, ma è stato motivo di grande gioia farlo. Proprio per questo motivo sono ancora più contento di come sono oggi.

Un ringraziamento particolare va ai miei amici di sempre. Mi riferisco ov-

viamente al gruppo del Caimano, a Cristian, Lollo e Vieri. Tutti voi siete stati motivo per me di continuo conforto e confronto. La mia stima per voi è infinita, e l'intimità e la conoscenza reciproca che ci lega vi rende tutti quanti come fratelli.

Con voi voglio nominare anche il tanto amato Cacao, con Marianna, Carolina, Maria, Belartina, Chiara.

Ci siamo ascoltati a lungo l'un l'altro, a turno, per curare i dolori che affliggevano le nostre anime. Abbiamo condiviso momenti indimenticabili che ci hanno forgiato fin da giovani. Abbiamo riso e pianto insieme, abbiamo cementato un rapporto che costituisce, forse, la più grande soddisfazione della mia vita.

Non posso non annoverare qui Manuel e Davide, che con me hanno abitato nella Casa Nuova di via Gorizia 29 per tanti anni. Quel semplice appartamento sgangherato nei dintorni dell'Ospedale Maggiore, tra supermercati e bidoni sbudellati dai ceti meno abbienti, sarebbe stato nient'altro che un letto. E' stato invece una casa, delle spalle su cui piangere, risate, affetto. Non sarebbe stata la stessa vita a Bologna senza di voi. Siete la mia seconda famiglia.

Arrivo finalmente a Bologna. Questa città mi ha dato tanto, troppo per ricordare ed elencare tutto. Questa città è fatta di luoghi bellissimi, che ti conquistano l'anima, ti entrano dentro per cambiarti e rimanere con te per tutta la vita. Ma soprattutto, questa città è fatta di persone. La vita di Bologna non si svolge vicino a te, ma intorno ed insieme a te; non si concentra dentro i locali, bensì nelle strade, nei portici: nella pancia della città stessa, dove ciascuno può fare il suo.

In questi luoghi pazzi, alle volte frenetici, alle volte riflessivi, ho conosciuto Cippo, Picciotto, Dalbi, Merius, Fra, Marco, Giamma, Vale, Vero. Questo elenco non sarà mai completo, poiché il bello di Bologna è che ti sorprende sempre con persone spuntate da chissà dove, all'improvviso, che per periodi più o meno lunghi rimangono con te per poi sparire come se niente fosse. Il bello è che alcune volte, inspiegabilmente, queste persone sono capaci di lasciarti degli spunti di riflessione che ti forgianno indelebilmente. Con voi ragazzi di bolo ne abbiamo passate tante. L'amicizia si è cementata tanto in poco tempo, ed ha reso la mia esperienza a Bologna meravigliosa. Non solo per il divertimento, che non è mancato (anzi, alle volte forse ci abbiamo dato giù pesante), ma anche per i continui argomenti di riflessione che mi hanno fatto cambiare ed hanno fortemente contribuito a rendermi la persona che sono.

Aggiungo una nota per i miei amici dell'erasmus, che purtroppo non saranno presenti oggi. La grigia ma goliardica cittadina di Leuven non aveva niente a che vedere con Bologna, non poteva darmi la stessa soddisfazione camminare

per quelle strette, anonime stradine. Eppure, ho conosciuto là delle persone che hanno cambiato la mia vita, per cui provo profonda stima ed ammirazione. Mi riferisco ad Asia, Matteo, Jorge, Andreu, Elie, Ivy, Gianni, Francesco, Sara, Inès e tanti altri, che insieme a me fanno parte di Flipping in Colours, un gruppo eterogeneo e fantastico.

Mi sono sentito a casa in un luogo che casa non era, e non poteva essere, e questo grazie a voi. Mi avete insegnato a cogliere la varietà delle persone e della vita senza giudicare il diverso, a godere di ciò che di buono ho a disposizione, senza invidiare gli altri. Anche il Belgio me lo ha confermato: le persone sono la vera ricchezza, su loro bisogna investire, non sulle cose, che ci circondano mute, immobili, fredde, fino a soffocarci.

Infine, voglio ringraziare la mia famiglia. Babbo e mamma, vi voglio bene. Vi ammiro tutti infinitamente e non ci sono parole per descrivere la gratitudine che provo per i sacrifici che avete fatto per me. Non potrei chiedere genitori migliori di voi, che mi avete insegnato ad amare il prossimo, a sorridere, ad impegnarmi per quello in cui credo e a guardare avanti senza paura.

Lulli, sei una ragazza fortissima. Siamo molto diversi, e questo è la nostra forza, anche se ci ha portato spesso a discutere. La stima e l'amore che provo per te sono profondi ed indelebili, ti auguro fortuna per tutta la tua vita (anche se non penso tu ne abbia bisogno).

Non posso non dedicare qualche riga alle mie nonne, che mi hanno sempre sostenuto, con l'affetto e la fiducia che solo delle persone anziane possono trasmettere ai giovani. Nonna Gabriella, grazie per avermi sempre coccolato come e più di un figlio. Nonna Domenica, grazie per la tua generosità e la tua semplicità. Godere delle piccole cose è alcune volte la chiave della felicità.

La lista di coloro che hanno giocato un loro ruolo in questo mio percorso potrebbe continuare all'infinito, ma mi accontento qui di nominare le persone già citate.

Voglio concludere con un'esortazione alla solidarietà, alla correttezza e all'impegno. L'uomo è felice solo quando ha qualcuno con cui condividere la sua vita. Costruire delle relazioni umane solide e sincere non è facile: ci vogliono costanza, pazienza, impegno, amore. Per farlo si devono sconfiggere la superficialità e l'egoismo che sono in noi. E' necessario fermarsi a riflettere a lungo su noi stessi e sugli altri, cercare di comprendersi e di comprendere, rinunciare ad alcune futilità, arrischiarsi ad aprire la propria anima e fare del bene, affinché il prossimo possa fare prima o poi lo stesso. Tutto ciò è molto complicato, e spesso porta amare delusioni, ma ne vale assolutamente la pena.

Passando a discorsi più pratici, voglio ringraziare il mio correlatore, Simone, per il suo continuo aiuto e conforto ed il mio relatore, il prof. Castellarin, per il suo irraggiungibile ottimismo. Senza di loro questa Tesi non sarebbe

potuta esistere. Voglio anche ringraziare tutti gli enti che producono software a licenza libera e gratuita, per merito dei quali tanti ricercatori lavorano tutti i giorni per migliorare le nostre vite e comprendere più a fondo lo strano mondo in cui viviamo. Tra di essi ricordo gli sviluppatori di QGIS, TauDEM e Python, oltre che i produttori di tutti i DEM e le mappe di pericolosità utilizzati per lo studio eseguito.

Bibliografia

- [1] Manfreda, S. et al. (2014) 'Flood-Prone Areas Assessment Using Linear Binary Classifiers based on Morphological Indices', in *Vulnerability, Uncertainty, and Risk*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, pp. 2002–2011. doi: 10.1061/9780784413609.201.
- [2] Manfreda, S. et al. (2015) 'Flood-prone areas assessment using linear binary classifiers based on flood maps obtained from 1D and 2D hydraulic models', *Natural Hazards*, 79(2), pp. 735–754. doi: 10.1007/s11069-015-1869-5.
- [3] Nardi, F., Vivoni, E. R. and Grimaldi, S. (2006) 'Investigating a flood-plain scaling relation using a hydrogeomorphic delineation method', *Water Resources Research*, 42(9). doi: 10.1029/2005WR004155.
- [4] Samela, C., Troy, T. J. and Manfreda, S. (2017) 'Geomorphic classifiers for flood-prone areas delineation for data-scarce environments', *Advances in Water Resources*, 102, pp. 13–28. doi: 10.1016/j.advwatres.2017.01.007.
- [5] Manfreda S., Samela C. et al. (2015) 'Flood-prone areas assessment using linear binary classifiers based on flood maps obtained from 1D and 2D hydraulic models'; DOI 10.1007/s11069-015-1869-5
- [6] Rennò D. C. et al. (2008) 'HAND, a new terrain-descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforests environments in Amazonia
- [7] Tavares Da Costa, R., Samela C. et al. (2019) 'A web application for hydrogeomorphic flood hazard mapping', DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.04.010
- [8] F. Dottori, M.L.V. Martina, R. Figueiredo (2016) 'A methodology for flood susceptibility and vulnerability analysis in complex flood scenarios', *Journal of flood risk management*; DOI: 10.1111/jfr3.12234

- [9] Ricardo Tavares da Costa, Paolo Mazzoli, Stefano Bagli (2019) 'Limitations posed by free DEMs in Watershed studies: the case of river Tanaro in Italy'; DOI: 10.3389/feart.2019.00141
- [10] Dai Yamazaki, Daiki Ikeshima, Jeison Sosa, Paul D. Bates, George H. Allen, Tamlin M. Pavelsky (2019) 'MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset', Water Resources Research; DOI: 10.1029/2019WR024873
- [11] F. Dottori, P. Salamon, A. Bianchi, L. Alfieri, Feyera Aga Hirpa, L. Feyen (2016), 'Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping', Advances in Water Resources, DOI: 10.1016/j.advwatres.2016.05.002
- [12] R. Tavares da Costa, S. Manfreda, V. Luzzi, C. Samela, P. Mazzoli, A. Castellarin, S. Bagli (2018), 'A web application for hydrogeomorphic flood hazard mapping', Environmental Modelling & Software
- [13] F. Carisi, A. Domeneghetti, M.G. Gaeta, A. Castellarin (2017), 'Is anthropogenic land subsidence a possible driver of riverine flood-hazard dynamics? A case study in Ravenna, Italy', Hydrological Sciences Journal, DOI: 10.1080/02626667.2017.1390315
- [14] M. Munafò, et al. (ISPRA) (2019), 'Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici, edizione 2019'
- [15] A. Trigila, C. Iadanza, M. Bussettini, B. Lastoria (ISPRA) (2018), 'Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio, edizione 2018'
- [16] Domeneghetti A., Carisi F., Castellarin A., Brath A. (2015), 'Evolution of flood risk overlage areas: quantitative assessment for the Po river', Journal of Hydrology