



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in
Pianificazione Territoriale, Urbanistica e Paesaggistico-Ambientale

A.a. 2023/2024

Sessione di Laurea febbraio 2024

Impatto del cambiamento climatico sul rischio idrogeologico

Rassegna della letteratura e analisi del caso studio della Val Bisagno (GE)

Relatori:

Prof.ssa Camilla Elena Pedè
Prof. Andrea Ajmar

Candidato:

Andrea Nino

INDICE

INDICE DELLE TABELLE	4
INDICE DELLE FIGURE	4
INDICE DEI GRAFICI	7
INDICE DEGLI ALLEGATI	8

<u>ABSTRACT</u>	<u>10</u>
------------------------	------------------

<u>INTRODUZIONE</u>	<u>12</u>
----------------------------	------------------

<u>1. INTRODUZIONE AL RISCHIO IDROGEOLOGICO</u>	<u>14</u>
--	------------------

1.1 L'EVOLUZIONE DEL CONCETTO DI RISCHIO	14
---	-----------

1.1.1 PERICOLOSITÀ	26
--------------------	----

1.1.2 DANNO	28
-------------	----

1.2 IL RISCHIO IDROGEOLOGICO	37
-------------------------------------	-----------

1.3 IL CONTESTO ITALIANO	42
---------------------------------	-----------

1.3.1 QUANTIFICAZIONE DEL FENOMENO SUL TERRITORIO ITALIANO	45
--	----

1.3.2 FRANE	50
-------------	----

1.3.3 ALLUVIONI	60
-----------------	----

1.3.4 CONTESTO GIURIDICO E STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE VIGENTI	64
--	----

1.4 EFFETTI SUL TERRITORIO	83
-----------------------------------	-----------

1.5 PREVENZIONE, PREVISIONE E MITIGAZIONE	91
--	-----------

<u>2. CAMBIAMENTI CLIMATICI E RISCHIO IDROGEOLOGICO</u>	<u>99</u>
--	------------------

2.1 INTRODUZIONE AI CAMBIAMENTI CLIMATICI	99
--	-----------

2.2 LE ALTERAZIONI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SUL SISTEMA IDROGEOLOGICO	105
---	------------

2.2.1 EVENTI ATMOSFERICI ESTREMI	111
----------------------------------	-----

2.2.2 EFFETTI SUL SISTEMA SOCIO-ECONOMICO	115
---	-----

<u>3. ADATTAMENTO E MITIGAZIONE DEGLI EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SUL RISCHIO IDROGEOLOGICO</u>	122
3.1 STRUMENTI E POLITICHE PER L'ADATTAMENTO E LA MITIGAZIONE DEGLI EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SUL RISCHIO IDROGEOLOGICO	125
3.1.1 EUROPA – STRATEGIA DI ADATTAMENTO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI	130
3.1.2 ITALIA - PIANO NAZIONALE DI ADATTAMENTO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI	135
3.1.3 POTENZIALITÀ E CRITICITÀ	140
3.2 PIANI E PROGETTI URBANI	143
<u>4. TECNICHE GIS PER L'ANALISI DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO</u>	145
4.1. VALUTAZIONE DEL RISCHIO TRAMITE APPROCCIO AHP E GIS-BASED	145
<u>5. CASO STUDIO DI GENOVA: UNA PROPOSTA PER LA VAL BISAGNO</u>	152
5.1 INQUADRAMENTO DEL CONTESTO LIGURE	152
5.2 STRATEGIA REGIONALE DI ADATTAMENTO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI	154
5.3 ANALISI DEL CONTESTO DELLA VAL BISAGNO	159
5.4 ANALISI DEL RISCHIO ALLUVIONALE DELLA VAL BISAGNO	166
5.5 VALIDAZIONE DEI RISULTATI	174
5.6 ALLEGATI	182
<u>6. CONCLUSIONI</u>	191
6.1 CONSIDERAZIONI FINALI SUL RISCHIO IDROGEOLOGICO	191
6.2 CONSIDERAZIONI FINALI SUL RAPPORTO TRA RISCHIO IDROGEOLOGICO E CAMBIAMENTI CLIMATICI	191
6.3 CONSIDERAZIONI SUL CASO STUDIO	200
6.4 CONSIDERAZIONI SUGLI IMPATTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLA PIANIFICAZIONE	204

7. BIBLIOGRAFIA	206
7.1 LIBRI, RIVISTE ARTICOLI E SCIENTIFICI	206
7.2 SITOGRAFIA	217

Indice delle tabelle

Tabella 1: Tavola bidimensionale del rischio volontarietà-collettività (Bignami, 2010).	17
Tabella 2: Indici di mortalità media per frana, inondazione, frana e inondazione (Bianchi & Salvati, 2022).	46
Tabella 3: Quantificazione dei fenomeni franosi su scala regionale (ISPRA)	54
Tabella 4: Numero di morti, feriti e dispersi per frane e alluvioni per ciascuna regione italiana (1964-2013) (Cinquanta anni di frane e inondazioni in Italia (1964-2013) (cnr.it)).	87
Tabella 5: Rendicontazione degli eventi alluvionali e gravitativi avvenuti in Italia nel periodo 2009-2023 (elaborazione propria).	90
Tabella 6: Tabella riassuntiva di progetti e piani applicati in Europa per la mitigazione e l'adattamento al rischio idrogeologico e ai cambiamenti climatici (Elaborazione propria).	144
Tabella 7: Relazione quantitative-semantiche della scala di Saaty (Torre et al., 2005).	149
Tabella 8: Matrice di confronto normalizzata con i pesi relativi ai fattori di condizionamento della pericolosità (Roopnarine et al., 2022).	150
Tabella 9: Matrice di confronto normalizzata con i pesi relativi ai fattori di vulnerabilità (Roopnarine et al., 2022).	150
Tabella 10: Scenario di riferimento climatico, macroregione 1 (PNACC, 2018).	155
Tabella 11: Popolazione residente all'interno del Bacino Bisagno suddivisa per comuni (elaborazione propria).	161
Tabella 12: Dati generali del bacino val Bisagno in parte ricavi dal Piano di Bacino (elaborazione propria).	165
Tabella 13: Metadati degli indicatori (elaborazione propria).	169
Tabella 14: Stima degli errori grafici per gli indicatori (elaborazione propria).	169
Tabella 15: Esempio delle due tipologie di ranking crescente e decrescente (elaborazione propria).	170

Tabella 16: Pesatura normalizzata degli indicatori di pericolosità, sulla base dello studio di Roopnarine et al. (2022) (elaborazione propria).	172
Tabella 17: Pesatura normalizzata degli indicatori di vulnerabilità, sulla base dello studio di Roopnarine et al. (2022) (elaborazione propria).	173
Tabella 18: Riclassificazione dei prodotti cartografici di pericolosità, vulnerabilità e rischio (elaborazione propria).	173
Tabella 19: Matrice di confusione nel confronto tra il modello di stima della pericolosità idraulica e l'evento alluvionale del 9-10 ottobre 2014 (elaborazione propria).	178
Tabella 20: Accuratezza, Producer e User Accuracy, Probabilità di mancato allarme (elaborazione propria).	178
Tabella 21: Livelli di pericolosità stimati dal modello all'interno delle aree inondate durante l'evento del 9-10 ottobre 2014 (elaborazione propria).	181
Tabella 22: Coefficienti di accuratezza (elaborazione propria).	201

Indice delle figure

Figura 1: Matrice del rischio (Bignami, 2010).	23
Figura 2: Approssimazione della curva di Farmer con retta su un dato dominio ridotto (Bignami, 2010).	24
Figura 3: Curva di Farmer su piano cartesiano in scala logaritmica (Bignami, 2010).	24
Figura 4: Curve di Farmer come strumento di supporto decisionale (Bignami, 2010).	25
Figura 5: Schema del sistema di carico e di risposta (Mazzorana, 2011).	28
Figura 6: Modello dell'acclività e orografico dell'Italia utilizzato per l'individuazione delle aree montane e collinari (Trigila & Iadanza, 2007).	51
Figura 7: Indice di franosità del territorio italiano (Trigila et al., 2021).	52
Figura 8: Distribuzione delle aree soggette a pericolosità da frana sul territorio italiano (Trigila et al., 2021).	56
Figura 9: Quantificazione delle aree soggette a pericolosità P3 e P4 su base regionale (Trigila et al., 2021).	57

Figura 10: Ripartizione del territorio italiano in Distretti idrografici ante/post L. 221/2015 (ISPRA).	77
Figura 11: Percorso metodologico relativo alla determinazione del rischio (Gisotti, 2010).	91
Figura 12: Effetti dell'urbanizzazione su assorbimento ed evapotraspirazione (prof. ing. Goffredo La Loggia, Mitigazione del rischio idraulico nei territori urbanizzati, Venezia, 20 maggio 2010).	92
Figura 13: (Woods-Ballard et al., 2007).	95
Figura 14: Scenari di riferimento RPC (coastadapt.com.au).	101
Figura 15: Variazioni delle concentrazioni di gas climalteranti (1850-2019) (IPCC, 2023).	103
Figura 16: Indici di pioggia (IPCC, 2012).	107
Figura 17: Macroregioni climatiche italiane (PNACC, 2018).	110
Figura 18: Prezzi di mercato e capacità installate delle energie rinnovabili e dei veicoli elettrici (IPCC, 2023).	128
Figura 19: Struttura gerarchica per l'analisi del rischio (Cherubini et al., 2006).	148
Figura 20: Scenari di rischio alluvionale per l'Isola di Trinidad secondo la pesatura degli indicatori tramite metodologia AHP (Roopnarine et al., 2022).	151
Figura 21: Media ventennale (periodo 2000-2023) delle precipitazioni cumulate (mm/anno) su base annua (elaborazione propria).	152
Figura 22: Variazione futura % rispetto alla simulazione storica della cumulata delle precipitazioni nella stagione invernale isolinee dell'altitudine a 500m, 1000m e 1500m (SRACC, 20203).	155
Figura 23: Variazione futura in percentuale rispetto alla simulazione storica della cumulata delle precipitazioni nella stagione estiva, isolinee dell'altitudine a 500m, 1000m e 1500m (SRACC, 2023).	156
Figura 24: Variazione futura stagionale in percentuale rispetto alla simulazione storica del 95° percentile del dataset di precipitazione giornaliera, isolinee dell'altitudine a 500m, 1000m e 1500m (SRACC, 2023).	156

Figura 25: Differenza tra la simulazione futura e storica della media stagionale della temperatura a due metri dal suolo, isolinee dell'altitudine a 500m, 1000m e 1500m (SRACC, 2023).	157
Figura 26: Strategie di adattamento per Dissesto idrogeologico Protezione Civile (SRACC, 2023).	158
Figura 27: Ripartizione amministrativa del territorio del Bacino Bisagno. I toponimi riportano i nomi dei Comuni ricadenti nel bacino e i Municipi di Genova (elaborazione propria).	159
Figura 28: Popolazione residente per sezione di censimento 2021 (elaborazione propria).	162
Figura 29: Usi del suolo prevalenti (elaborazione propria).	163
Figura 30: Reticolo idrografico del Bacino Bisagno, con categorizzazione delle aste fluviali secondo una scala gerarchica a sette valori (elaborazione propria).	163
Figura 31: Struttura gerarchica del metodo AHP (elaborazione propria).	166
Figura 32: La matrice di confusione (Andrea Minini.it).	175
Figura 33: Estensione delle aree alluvionate dell'evento dell'ottobre 2014 confrontata con lo scenario di pericolosità della direttiva alluvioni con TR 500 anni e l'indice di pericolosità binario (elaborazione propria).	177
Figura 34: Valutazione del livello di pericolosità idraulica stimato dal modello per le aree inondate durante l'evento alluvionale del 9 e 10 ottobre 2014 (elaborazione propria).	180

Indice dei grafici

Grafico 1: Curva di rischio (Canale et al., 1998).	22
Grafico 2: Distribuzione percentuale delle aree soggette a pericolosità su base regionale (Trigila et al., 2021).	57
Grafico 3: Classificazione delle frane in base alla tipologia di movimento censite dall'inventario IFFI sul territorio italiano (Trigila et al., 2021).	59
Grafico 4: Percentuale di territorio regionale interessato da pericolosità di allagamento (Trigila et al., 2021).	63

Grafico 5: Vittime per alluvioni nel periodo 1964-2013 (Cinquanta anni di frane e inondazioni in Italia (1964 - 2013) (cnr.it)).	85
Grafico 6: Vittime per alluvioni nel quindicennio 2007-2021 (2007-2021: quindici anni di frane e inondazioni in Italia (cnr.it)).	85
Grafico 7: Numero di morti e dispersi per frana (1964-2013)(Cinquanta anni di frane e inondazioni in Italia (1964 - 2013) (cnr.it)).	86
Grafico 8: Vittime per frane nel quindicennio 2007-2021 (2007-2021: quindici anni di frane e inondazioni in Italia (cnr.it)).	87
Grafico 9: Numero di morti, feriti e dispersi per frane e alluvioni (1964-2013) (Cinquanta anni di frane e inondazioni in Italia (1964-2013) (cnr.it)).	88
Grafico 10: Ripartizione emissioni di CO2 per settore economico (IPCC, 2023).	102

Indice degli allegati

Allegato 1: Curve number (elaborazione propria).	182
Allegato 2: Accumulo dei deflussi (elaborazione propria).	182
Allegato 3: Precipitazione cumulata, media annua 2000-2023 (elaborazione propria).	183
Allegato 4: Altitudine (elaborazione propria).	183
Allegato 5: Pendenza (elaborazione propria).	184
Allegato 6: Distanza dai fiumi (elaborazione propria).	184
Allegato 7: Densità dei fiumi (elaborazione propria).	185
Allegato 8: TWI (elaborazione propria).	185
Allegato 9: Usi del suolo (elaborazione propria).	186
Allegato 10: Densità degli edifici (elaborazione propria).	186
Allegato 11: Densità della popolazione residente (elaborazione propria).	187
Allegato 12: Densità delle infrastrutture viarie (elaborazione propria).	187
Allegato 13: Indice di pericolosità idraulica (elaborazione propria).	188
Allegato 14: Riclassificazione in cinque classi dell'indice di pericolosità idraulica (elaborazione propria).	188
Allegato 15: Indice di vulnerabilità (elaborazione propria).	189

Allegato 16: Riclassificazione in cinque classi dell'indice di vulnerabilità (elaborazione propria).	189
Allegato 17: Indice di rischio (elaborazione propria).	190
Allegato 18: Riclassificazione in cinque classi dell'indice di rischio (elaborazione propria).	190

Abstract

L'obiettivo di questa tesi è di approfondire il legame che sussiste tra cambiamenti climatici e rischio idrogeologico, indagare quali sono i fattori climatici che maggiormente incidono sull'aumento del rischio da frana e inondazione, al fine di sviluppare una proposta analitica per un territorio grazie all'utilizzo degli strumenti GIS per il rilievo del territorio e la sua modellazione.

All'interno del documento si approfondisce il concetto di rischio attraverso l'esplicitazione delle sue tre componenti: pericolosità (H), vulnerabilità (V), esposizione (W). L'attenzione della tesi, nel primo capitolo, si concentra sul contesto italiano, con un inquadramento dell'evoluzione del contesto normativo di riferimento, una quantificazione del fenomeno a diverse scale e l'individuazione degli strumenti tecnici per la mitigazione e l'adattamento al rischio.

Il secondo capitolo ha l'obiettivo di portare alla luce le evidenze scientifiche sui cambiamenti climatici, in particolare su come questi incidano sull'intensificarsi del dissesto idrogeologico e degli eventi meteorologici estremi; andando anche a fornire una panoramica sugli effetti dei cambiamenti climatici sui differenti settori del sistema socio-economico.

Nel terzo capitolo si approfondisce il tema dell'adattamento e di come questo venga affrontato alle diverse scale di governance (globale, comunitaria, nazionale) tramite accordi internazionali e strategie di adattamento. Nel testo ci saranno diversi salti di scala al fine di avere un'ampia lettura del fenomeno, passando dal contesto nazionale alle specificità territoriali. In merito a ciò sono stati presi in considerazione alcuni casi pratici di amministrazioni e territori che hanno fornito una risposta efficace contro il rischio idrogeologico.

Il quarto capitolo ha l'obiettivo di individuare all'interno della letteratura scientifica una serie di strumenti e approcci applicabili in ambiente GIS per la produzione di scenari di rischio idrogeologico.

All'interno del quinto capitolo la componente operativa di questo lavoro si concentra sul contesto della val Bisagno, contesto vallivo che si estende principalmente all'interno dei Municipi III e IV della Città di Genova. Il modello sviluppato permette di racchiudere in un unico macro indicatore il rischio alluvionale derivante dall'interazione verticale tra i fattori di pericolosità e quelli di vulnerabilità. Il principio con cui è stato costruito il modello di analisi permetterà di considerare anche future alterazioni degli scenari meteoroclimatici. Infatti, mediante la variazione della pesatura degli indicatori si potranno produrre scenari diversificati a seconda del peso attribuito a ciascun indicatore. L'obiettivo è quello di riuscire a creare un modello dinamico di lettura del territorio, che sia in grado di contenere al suo interno variabili di pericolosità e vulnerabilità che si modificheranno nel tempo come gli usi del suolo, le precipitazioni, la densità di popolazione etc.

Nel sesto capitolo si evidenziano le principali evidenze emerse all'interno della tesi e si discute dei risultati e delle possibili implicazioni future del modello di rischio alluvionale realizzato per la Val Bisagno.

Introduzione

Come anticipato nell'abstract, questa tesi si inserisce all'interno del filone di studi che si occupa di approfondire quali ripercussioni si avranno su società e ambiente a causa degli effetti negativi prodotti dai cambiamenti climatici. Nello specifico l'attenzione di questa tesi è rivolta all'esplicazione delle dinamiche dei cambiamenti climatici che vanno ad accrescere la frequenza e l'intensità di eventi meteo-climatici estremi, esacerbando il rischio idrogeologico sul territorio. Dunque, la questione che si pone è la seguente: è possibile individuare un nesso causale tra gli effetti negativi prodotti dai cambiamenti climatici e l'intensificazione del rischio di idrogeologico? Se la risposta è sì, quali strumenti può mettere in campo la pianificazione territoriale per mitigare il rischio e favore la capacità di adattamento?

L'attenzione della tesi si concentra prevalentemente sul territorio italiano per quanto riguarda la quantificazione del rischio idrogeologico, l'inquadramento del contesto pianificatorio e legislativo di riferimento, l'individuazione degli enti preposti alla difesa della popolazione da calamità naturali e gli strumenti che il sistema di governance territoriale può mettere in campo per prevedere, prevenire e mitigare il rischio. Prendere in considerazione il contesto italiano è una scelta consapevole, volta a dimostrare l'elevata pericolosità e vulnerabilità della penisola rispetto ad eventi alluvionali e gravitativi. Mentre, per mettere in luce le evidenze sui cambiamenti climatici e di come questi vadano a incrementare i rischi di natura idrogeologica per i territori e le comunità, è necessario ridurre la lentezza d'ingrandimento, passando dal contesto nazionale a quello comunitario e globale. I cambiamenti climatici per loro natura hanno una dimensione duale; infatti, se da un lato è necessario studiarne gli effetti macro-climatici ad una scala globale, dall'altro le ripercussioni negative da essi generate hanno ricadute specifiche alla scala locale, specie nei contesti più fragili. È infatti tramite la governance interazionale che si esplicitano i principali strumenti di indirizzo per la mitigazione delle emissioni di gas climalteranti e la costruzione di strategie di adattamento; indirizzi che poi dovranno essere esplicitati dai paesi membri, attraverso piani e strategie di

adattamento. Inoltre, è importante sottolineare come, sovente, le aree geografiche che meno hanno contribuito ad accrescere i livelli di emissioni di gas serra e che sono già caratterizzate da livelli elevati di vulnerabilità, come i paesi meno sviluppati e i piccoli stati insulari (SIDS¹), sono quelle a subire gli effetti più avversi dei cambiamenti climatici.

L'obiettivo che ci si pone è dunque il seguente: a partire dall'identificazione di un problema, come quello del rischio idrogeologico in Italia, attraverso le evidenze scientifiche sui cambiamenti climatici e sulle loro implicazioni, mettere in evidenza se e come i cambiamenti climatici stanno determinando un'alterazione degli equilibri dei cicli idrici con incremento nella frequenza e nell'intensità di eventi alluvionali estremi², i quali costituiscono la principale causa di innesco di frane e inondazioni. A partire da tali evidenze, si vuole prendere in considerazione un caso studio, in questo caso si è scelta la Val Bisagno (GE) in quanto zona già altamente esposta al pericolo di esondazione del suo collettore principale, e costruire un modello di stima del rischio idrologico che, tramite la combinazione dei sistemi informativi territoriali (GIS) e delle analisi multicriteriali (AHP), sia in grado di essere flessibile rispetto agli scenari futuri, grazie alla possibilità di variare la pesatura degli indicatori in funzione delle alterazioni climatiche previste e delle specificità territoriali. La capacità del modello di essere dinamico è fondamentale in un contesto climatico fortemente variabile, l'aggiornamento degli indicatori mappati sul territorio è un'operazione fondamentale per cogliere la dinamicità degli scenari climatici e delle trasformazioni sul territorio.

¹ Small Island Developing States.

² Si tratta di un concetto relativo alle caratteristiche meteo-climatiche di un territorio, per tale ragione in letteratura è frequente l'individuazione di una soglia (tipicamente il 95° percentile) oltre cui un evento alluvionale viene definito *estremo*.

1. INTRODUZIONE AL RISCHIO IDROGEOLOGICO

1.1 L'evoluzione del concetto di rischio

Il concetto di rischio fa riferimento alle possibili conseguenze generate dal verificarsi di differenti tipologie di eventi naturali, non naturali e di un ampio spettro di azioni umane (Bignami, 2010). L'incertezza deriva da eventi sfavorevoli che possono verificarsi con probabilità variabile e dall'entità del danno che può variare in relazione a circostanze esterne, come le condizioni meteorologiche, che non possono essere previste in modo certo ed univoco (Gisotti, 2012). Inoltre, la probabilità che un evento si verifichi è un elemento che caratterizza qualsiasi attività umana strutturata su processi logici, mentre, l'incertezza deriva dall'aleatorietà dell'agire umano e dalla conseguente incapacità di determinare a priori che l'evento possa dare dei risultati attesi o comunque prevedibili (Canale et al., 2014). Analiticamente, il concetto di rischio può essere definito come la combinazione dei danni o delle conseguenze negative e delle probabilità ad esse associate. Nelle attività umane non vi è il fine di riscontrare uno scenario con rischio nullo³, quanto piuttosto, tramite studi analitici, vi è l'obiettivo di ricercare quelle situazioni caratterizzate da livelli di rischio minore (Canale et al., 2014).

Nell'ambito della valutazione del rischio da parte della protezione civile e del sistema di pianificazione territoriale, è necessario circoscrivere la definizione generale all'interno di un ambito più ristretto, selezionando le tipologie di rischio che tengano in considerazione quattro differenti dimensioni (Bignami, 2010):

- il grado di coinvolgimento della volontà umana (*volontarietà*);
- il livello di impatto sulla comunità umana (*collettività*);
- il grado di compromissione del territorio e dell'ambiente (*territorialità*);
- la rapidità con cui si presenta un evento (*dinamica temporale*).

³ Il rischio nullo presuppone l'assenza di pericoli o l'assenza di elementi esposti.

I quattro aspetti sopra elencati sono utili ad inquadrare con maggiore specificità il concetto di rischio rispetto alla definizione tassonomica di rischio naturale/antropico data da Canale et al. (1998).

La natura della *volontarietà* del rischio ha a che fare con la capacità di controllo che si ha rispetto ad un determinato accadimento. Ad esempio, se si è passeggeri di un mezzo di trasporto si pretenderà un'elevata sicurezza durante il transito, differentemente, quando si è alla guida, l'aver il controllo sugli spostamenti del mezzo e la fiducia nelle proprie abilità di guida fa diminuire la propria percezione del rischio (Canale et al., 1998).

I rischi di cui si occupa la protezione civile e il sistema di pianificazione territoriale sono generalmente subiti in maniera *improvvisa* dalle comunità e trovano sovente *impreparate* le strutture di gestione ordinaria della popolazione poiché, nella costruzione degli insediamenti umani, si è sovente tenuto in secondo piano l'esposizione ad eventi calamitosi di rara frequenza, dunque con un elevato tempo di ritorno (Bignami, 2010). Tali tipologie di rischio sono definibili come *involontari* poiché, chi ne subisce gli effetti non sceglie volontariamente di esserne esposto. Il contrario, invece, accade per i rischi *volontari* o *speculativi* i quali sono assunti con decisioni dirette ed i soggetti coinvolti hanno una volontarietà esplicita di propensione al rischio volta a ricevere un certo beneficio secondo una logica *gain or loss* (Bignami, 2010; Canale et al., 1998).

I rischi di cui si occupa il sistema di governance territoriale sono, invece, riconducibili ad una logica di tipo *loss or non loss* in cui, piuttosto che ad una massimizzazione del guadagno, si auspica ad una minimizzazione delle perdite. Ad esempio, nella fattispecie in cui una porzione di un insediamento urbano si trovi all'interno di un'area a rischio molto elevato, spetterà alle autorità competenti l'individuazione di una strategia di salvaguardia della popolazione: tramite la rilocalizzazione degli insediamenti a rischio; tramite la loro messa in sicurezza attraverso sistemi di difesa; tramite l'attivazione di un efficiente sistema di monitoraggio e allerta. Coloro i quali prendono tali decisioni sono gli interpreti del

grado di consapevolezza delle comunità esposte ai rischi, è loro compito è quello di affrontare la mitigazione del rischio tramite un approccio territorializzato, consapevole di quali dinamiche locali possono costituire un'opportunità e, viceversa, di quelle che possono accrescere il rischio. L'attività svolta dal sistema di governo del territorio e dalla protezione civile, in materia di prevenzione delle calamità, segue il principio di *safety*, secondo il quale le informazioni relative al rischio devono avere massima diffusione tra gli organi tecnici, le istituzioni e le comunità coinvolte. La difesa civile segue invece il principio di *security* secondo cui le scelte compiute devono essere protette da riservatezza.

La dimensione della *collettività* secondo Bignami (2010) e Canale et al. (1998) è utile per distinguere le differenti tipologie di rischio sulla base del numero di persone coinvolte contemporaneamente in uno spazio delimitato. Tale classificazione, di tipo binario *individuale/collettivo*, si distacca da quella proposta da Ayyub et al. (2002), i quali utilizzano i concetti di *ordinario/catastrofico*, terminologia che richiama maggiormente il contesto socio-economico in cui si verifica l'evento negativo, piuttosto che il numero di soggetti coinvolti. La collettività può, dunque, essere espressa come un *indice di concentrazione* dei soggetti colpiti contemporaneamente da un determinato evento, rispetto al numero degli eventi e al complesso dei soggetti coinvolti (Bignami, 2010). Ad esempio, l'indice di concentrazione sarà più elevato per un evento alluvionale estremo in cui perdono la vita un elevato numero di persone piuttosto che per un incidente stradale. In risposta all'emergenza il compito della protezione civile è occuparsi di *crisi civili* (tabella 1), ossia di eventi caratterizzati da un significativo indice di concentrazione, capaci di colpire in maniera significativa il normale andamento della vita di un elevato numero di soggetti.

Tavola del rischio volontarietà-collettività		
<i>1ª Dim.</i> \ <i>2ª Dim.</i>	Rischio individuale (uno o pochi individui)	Rischio collettivo (l'insieme dei componenti di una comunità)
Rischio volontario (subito per volontà umana diretta)	Investimenti finanziari, gioco d'azzardo	Eventi bellici, attentati terroristici
Rischio involontario (subito senza volontà umana diretta)	Incidenti della vita quotidiana (domestici, sul lavoro, automobilistici)	Crisi civili (sociale, sanitaria, economica, ambientale)

Tabella 1: Tavola bidimensionale del rischio volontarietà-collettività (Bignami, 2010).

L'ulteriore dimensione della *territorialità* è l'aspetto che maggiormente inquadra la definizione di rischio all'interno della disciplina della pianificazione territoriale. La territorialità ha una sua concezione che per natura è plurale; in essa vi è il riconoscimento del profondo legame che mette in relazione società e geografia e della vastità di risorse che tale relazione genera (Tanca, 2017; Turco, 2015). Dunque, il compito della pianificazione territoriale è quello di attuare strategie resilienti capaci di contrastare o compensare parzialmente gli impatti negativi sul sistema socio-economico generati da eventi di varia natura⁴, favorendo un approccio adattivo. La protezione civile si occupa delle *crisi ambientali*⁵ i cui effetti, sulla base della *dimensione del danneggiamento ambientale*, possono essere definiti come *settoriali* o *territoriali/spaziali* (Bignami, 2010). Gli effetti di tipo settoriale non alterano nell'interezza l'ordinaria capacità di reazione di una comunità ma, ne coinvolgono solo alcuni aspetti, come lo sversamento di liquami o inquinanti chimici con conseguente contaminazione degli acquiferi. Gli effetti di tipo territoriale invece derivano da impatti capaci di alterare in modo significativo gli assetti di un territorio, provocando l'inagibilità di certe zone in seguito a significativi danneggiamenti come nel caso di un evento alluvionale di estrema intensità, capace di mettere in crisi l'intero assetto ambientale, socio-economico, strutturale e infrastrutturale di un

⁴ e.g. ambientale, economica, finanziaria.

⁵ Eventi che, a prescindere dalla propria matrice fondativa, la quale può essere di carattere antropico o naturale, coinvolgono parzialmente o totalmente il territorio e l'ambiente in questione.

territorio. La differenza sostanziale che intercorre tra gli effetti settoriali e quelli territoriali è che i secondi, a differenza dei primi, richiedono una mobilitazione straordinaria, poiché gran parte dei soggetti e dei beni ricadenti nel territorio coinvolto sono contemporaneamente esposti al rischio e ai danni da esso derivanti.

La *dimensione temporale* che caratterizza lo studio del rischio segue due andamenti diacronici: uno breve/molto breve e uno di lungo periodo. Il primo caratterizza le fasi di emergenza e superamento dell'emergenza di cui si occupa la protezione civile; il secondo caratterizza maggiormente la fase di ricostruzione post-emergenziale in capo alla pianificazione territoriale. Dunque, la protezione civile si attiva per eventi rapidi, in cui il tempo di preparazione di una risposta da parte delle comunità coinvolte, senza che queste si siano preventivamente dotate di una strategia di risposta, è più lento rispetto alla dinamica evolutiva con cui si manifesta l'evento calamitoso. Mentre, i processi di cui si occupa la pianificazione seguono un andamento molto più lento, poiché la pianificazione ha il compito, tramite gli strumenti urbanistici e la programmazione economica, di ripristinare gli assetti socio-economici e territoriali compromessi e di costruire strategie di lungo corso.

Secondo quanto testé illustrato, la dimensione temporale può essere distinta tra gli effetti nel *tempo reale* e nel *tempo differito* (Bignami, 2010). Tale distinzione viene ripresa da Milli & Prestininzi (2015) per illustrare le due dimensioni della prevenzione del rischio, le cui definizioni sono illustrate all'interno del paragrafo 1.4.

Per esplicitare in modo esaustivo il concetto si riporta la formula con cui si definisce quantitativamente il concetto di rischio (Canale et al., 1998):

$$R = f * M$$

- *f* indica la *frequenza* di un certo evento e dunque la probabilità che esso di verifichi;
- *M* indica la *magnitudo* (o danno) dell'evento stesso e dunque quali conseguenze verranno prodotte;

- R indica il *rischio* e prende il nome di indice di rischio. Tale formula permette, dunque, di mettere in relazione i possibili danni provocati da un evento e la probabilità con cui esso si potrebbe verificare.

Un'ulteriore definizione di rischio, che maggiormente si presta all'analisi del rischio idrogeologico, è data dalle seguenti componenti (Bignami 2010; Gisotti, 2012; Monacelli & Spiniello, 2018; Prestininzi, 2005-13; Torre et al., 2005):

- H (*hazard*) indica la *pericolosità* ossia la probabilità che l'evento calamitoso si verifichi in un dato intervallo di tempo, in un certo luogo, con una data intensità (I). Il suo valore oscilla tra 1 (evento certo) e 0 (nessun evento) (Bignami 2010);
- W (*worthiness*) indica il *valore degli elementi esposti* (E) presenti all'interno dell'area esposta quali persone e beni antropici e naturali (Monacelli & Spiniello, 2018). Il valore è quantificabile in termini relativi (valore monetario dei beni, servizi, proprietà, attività economiche) o assoluti (valore monetario del numero di persone, delle opere) (Prestininzi, 2005-13);
- V (*vulnerability*) indica la *vulnerabilità*, ed è definibile come il grado di perdita di uno o più elementi (E), quali oggetti, attività o persone, esposti al rischio di un fenomeno calamitoso di intensità nota (I) (Gisotti, 2012). Ciò a cui si fa riferimento è dunque puramente dipendente dalle caratteristiche intrinseche degli oggetti, delle attività o delle persone esposte. Il suo valore oscilla tra 1 (perdita totale) e 0 (nessuna perdita) (Bignami 2010).

Dunque, il concetto di magnitudo o danno (D) dell'evento può anche essere espresso come il prodotto tra la vulnerabilità (V) e il valore esposto (W).

Il livello di rischio (R) può essere distinto in due sottocategorie (Bignami, 2010; Prestininzi, 2005-13):

- *rischio specifico* con cui si intende un danno atteso o probabile per una singola categoria di elementi a rischio (E) al verificarsi di un evento (P) di intensità nota;

- *rischio totale* con cui si intende un danno atteso o probabile per l'insieme degli elementi esposti al rischio presenti nell'area. Si considerano dunque le perdite umane, i feriti, i dispersi, i danni alle cose e alle attività conseguenti al verificarsi un evento (P).

Dunque, il rischio (R) associato ad un elemento a rischio (E) e ad un evento di intensità (I) è dato dal risultato della seguente convoluzione (Bignami, 2010; Gisotti, 2012):

$$R(E, I) = H(I) * W(E) * V(I, E)$$

In questo caso la convoluzione⁶ è data dall'integrale del prodotto di distribuzioni di probabilità, date le seguente ipotesi:

- l'individuazione di un certo fenomeno di intensità (I) con elementi esposti (E) implica la definizione di un tempo di ritorno e dell'area coinvolta; al variare del tempo di ritorno varierebbero anche V e W e la relativa probabilità ne sarebbe condizionata;
- le distribuzioni di probabilità di V e W sono disgiunte, l'una non è condizionata dall'altra.

Per queste ragioni H , W e V sono variabili casuali indipendenti e la convoluzione risulta la combinazione delle funzioni V e W con il valore H . Il calcolo analitico può essere ottenuto integrando il prodotto delle rispettive distribuzioni di probabilità espresse in maniera esplicita. Date le ipotesi H è costante e W e V variano nel tempo e nello spazio.

Sovente, la convoluzione è semplificata nel più agevole calcolo del prodotto delle tre componenti H , W e V , poiché è complesso avere una conoscenza esatta delle distribuzioni di probabilità, dell'eventuale convoluzione di distribuzioni congiunte e dell'integrale per distribuzioni disgiunte. Tale semplificazione è ammissibile solo previa definizione di uno *scenario di riferimento*, che permetta di stabilire i valori

⁶ In matematica si dice convoluzione l'integrale del prodotto di una prima funzione $f(x)$ per una seconda funzione $g(t)$ rovesciata e traslata di un certo valore.

delle variabili H , W e V fissando i valori di I e E . La definizione di uno scenario di riferimento è fondamentale per stabilire le condizioni di contesto di un determinato evento, individuandone l'intensità, scegliendo il periodo temporale e il territorio in cui si svolge, ed i relativi elementi esposti al rischio. Tale operazione è fondamentale per l'avvio dei calcoli, sulla cui base verranno prese significative decisioni per la gestione degli eventi calamitosi (Bignami, 2010). Per i rischi di natura alluvionale, nella stesura degli scenari di riferimento, si parte dalla scelta del *tempo di ritorno* dell'evento, poiché grazie alla sua relazione biunivoca con l'intensità dell'evento è possibile fissare la pericolosità (H). Anche gli altri due fattori, vulnerabilità (V) e valore esposto (W), non sono costanti nel tempo e non sempre sono uguali. Esistono varie metodologie per la stima di H , W e V ; in ambito economico la scelta dello scenario di riferimento è sovente basata su valori medi (valori attesi), semplificando il processo e riportando la stima alla logica dei grandi numeri; nell'ambito della prevenzione dei disastri ambientali è necessario invece, rispondere ad un altro tipo di logica, necessariamente più complessa, poiché ci si occupa di eventi rari e dalle conseguenze eccezionali.

Riassumendo, il rischio altro non è che il prodotto tra il danno atteso e la probabilità che l'evento si possa verificare (Gisotti, 2012). Gli elementi esposti al rischio secondo il D.P.C.M. del 29 settembre 1998, in adempimento della L. n. 180/1998 indica quali sono gli elementi esposti al rischio:

- incolumità umana;
- insediamenti urbani e le aree di previsione urbanistica;
- insediamenti produttivi, gli impianti tecnologici di rilievo particolarmente quelli a rischio *ex-lege*;
- infrastrutture a rete e di comunicazione di rilevanza strategica, anche a livello locale;
- patrimonio ambientale e i beni culturali di interesse rilevante;
- servizi pubblici e privati.

Per esprimere graficamente le probabilità di accadimento di un evento calamitoso e delle relative perdite attese, al fine di ottenere una valutazione del rischio, si utilizzano le curve di rischio (Canale et al., 1998) o curve di Farmer (Bignami, 2010), in cui le ascisse indicano le perdite potenziali mentre, le ordinate la probabilità che l'evento si verifichi. L'insieme delle attività umane genera un insieme infinito di curve di rischio⁷ (Canale et al., 1998).

Il grafico 1 mette in evidenza due curve di rischio distinte, in questo caso il fattore di rischio $R_A > R_B$. Se si vuole ridurre il rischio R_A fino al valore R_B è possibile agire secondo tre metodi differenti:

- il primo prevede di ridurre la probabilità dell'evento (C);
- il secondo di diminuire la magnitudo (O);
- il terzo di ridurre entrambe le componenti.

In una fattispecie con fattore di rischio $R_A = f_A M_A$ vi è la possibilità di ridurre tale valore a $R_B = f_C M_C$ in alternativa si può ricorrere a $R_B = f_O M_O$ dunque, si agisce sempre riducendo la magnitudo, la probabilità o quando possibile entrambe le componenti (Canale et al., 1998).

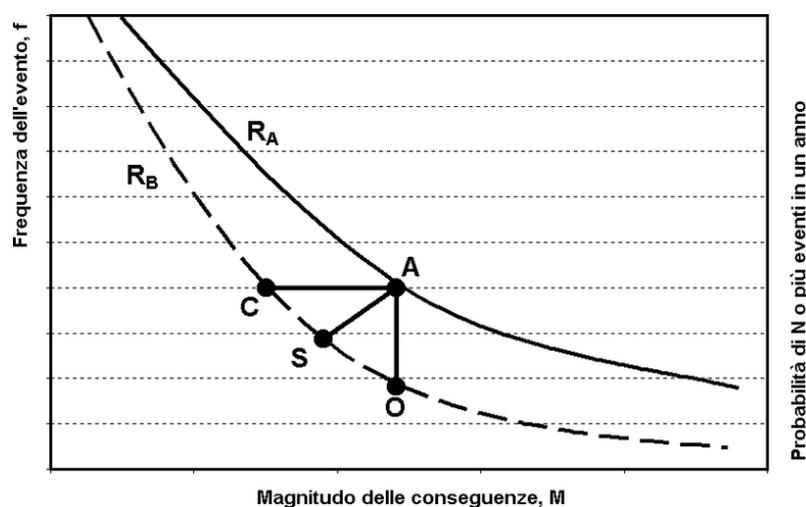


Grafico 1: Curva di rischio (Canale et al., 1998).

⁷ Ciascuna curva di rischio rappresenta una condizione di isorischio in cui sono riscontrabili diversi valori di rischiosità.

Per effettuare una caratterizzazione dei differenti livelli di rischio che insistono su di un territorio, il piano della curva di Farmer pericolosità-gravità può essere modellato secondo diversi criteri, tra cui quello della *discretizzazione a griglia*, la quale permette di dare un livello di priorità a certi scenari di rischio sulla base della loro posizione sulla griglia (Figura 1).

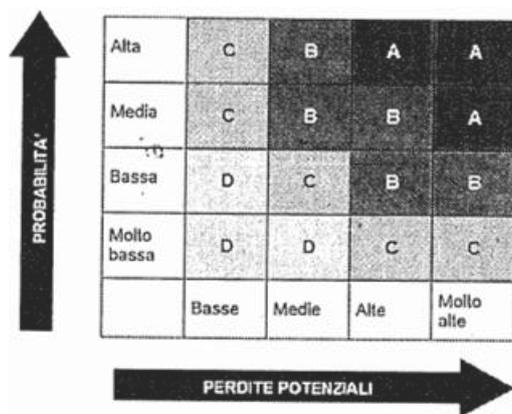


Figura 1: Matrice del rischio (Bignami, 2010).

La matrice di rischio permette di individuare quattro differenti scenari di rischio:

- la classe A rappresenta il livello di rischio più elevato pur cui è necessaria la tempestiva definizione di una strategia per mitigare il rischio e gestirlo quando si presenta;
- la classe B è un livello più basso di rischio che comunque richiede una rapida preparazione di strategie di intervento;
- la classe C rappresenta quei rischi che essendo meno preoccupanti richiedono un ulteriore livello di approfondimento per la decidere quali interventi o strategie portare avanti;
- la classe D raggruppa quei rischi che non implicano perdite significative e che richiedono azioni limitate.

Ulteriori applicazioni del piano della curva di Farmer prevedono la trasformazione della curva in una retta secondo due metodologie, la prima restringendo il dominio (Figura 2), la seconda applicando una scala logaritmica sugli assi cartesiani (Figura 3).

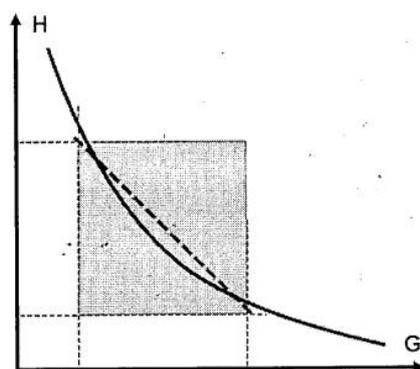


Figura 2: Approssimazione della curva di Farmer con retta su un dato dominio ridotto (Bignami, 2010).

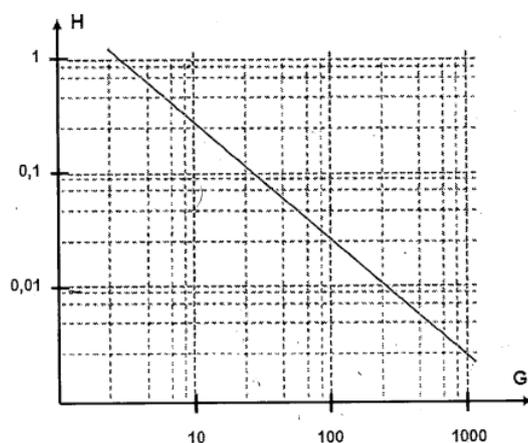


Figura 3: Curva di Farmer su piano cartesiano in scala logaritmica (Bignami, 2010).

La curva di Farmer viene sostituita dalla retta per ridurre le approssimazioni di calcolo e supportare le decisioni nella valutazione del rischio, ad esempio la figura 4 mostra come si possano definire delle soglie di rischio per supportare il sistema decisionale (Bignami, 2010). La retta superiore rappresenta la soglia limite, sopra di essa sono rappresentati i rischi non accettabili, la retta inferiore rappresenta invece la soglia obiettivo, sotto la quale sono rappresentati i rischi considerati accettabili, nella fascia generata tra le due rette è ammissibile la realizzazione di progetti solo previa mitigazione dei rischi con azioni economicamente congrue (Bignami, 2010). Rette con coefficiente angolare maggiore di -1 (inclinazione $<45^\circ$) rappresentano uno scenario in cui si dà maggior peso alla frequenza dell'evento piuttosto che alla magnitudo delle conseguenze, viceversa rette con coefficiente angolare negativo

minore di -1 (inclinazione >45°) daranno meno rilevanza alla frequenza dell'evento, tenendo in maggiore considerazione le conseguenze prodotte dall'evento.

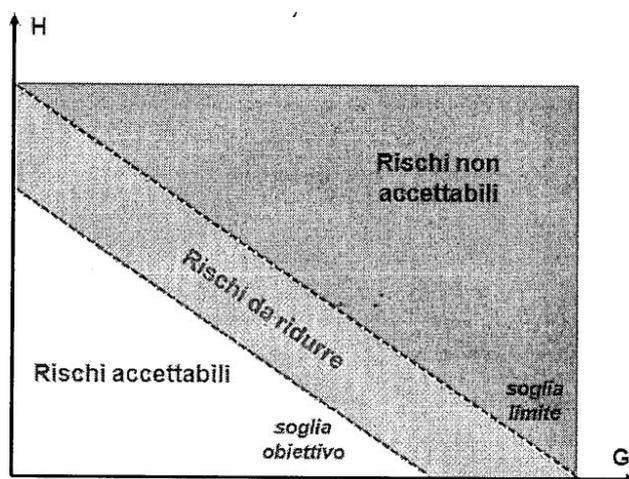


Figura 4: Curve di Farmer come strumento di supporto decisionale (Bignami, 2010).

La rappresentazione delle curve di Farmer con coefficiente angolare minore di -1 incontra maggiormente la sensibilità dei sostenitori del principio di precauzione (Bignami, 2010). A supporto di ciò, secondo Canale et al. (1998), è più semplice stimare le conseguenze di un evento piuttosto che le probabilità che esso si verifichi. Da ciò ne deriva che la stima della pericolosità, della vulnerabilità e del valore degli elementi esposti debba essere ponderata con pesi di affidabilità non costanti ma variabili a seconda della fattispecie (Canale et al., 1998).

Di seguito vengono illustrate con maggiore dettaglio, in due sottoparagrafi distinti, le due componenti che determinano il rischio riprendendo l'equazione (Bignami, 2010; Monacelli & Spiniello, 2018; Prestininzi, 2005-13):

$$R(E, I) = H(I) * D(I, E)$$

Nel campo della valutazione del rischio idrogeologico è necessario, in primo luogo, comprendere la frequenza con cui possono manifestarsi eventi calamitosi e la loro estensione geografica, successivamente, è imprescindibile calare tali scenari di pericolosità sui territori, con la necessità di comprendere quali sono gli elementi esposti (vite umane, strutture e infrastrutture) e quale grado di vulnerabilità

intrinseca possiedono rispetto ad un determinato evento di intensità I . Infatti, oltre che a tenere in considerazione la probabilità che l'evento si verifichi, con relative conseguenze, è fondamentale tenere in considerazione anche il contesto in cui si svolge un determinato evento. La valutazione delle tre componenti è imprescindibile per la quantificazione del rischio, di seguito si specificano in due differenti paragrafi il concetto di pericolosità (H) e di danno ($V*W$), tendendo di calare entrambe le componenti nell'ambito delle scienze idrogeologiche e territoriali.

1.1.1 Pericolosità

Il concetto di pericolosità (H), come illustrato precedentemente, è la probabilità che un fenomeno di intensità nota si verifichi in un certo luogo in un determinato periodo temporale (Gisotti, 2012). Nelle scienze idrogeologiche l'analisi del pericolo idraulico si configura come un elemento cardine, imprescindibile e propedeutico per l'analisi del rischio.

La valutazione delle probabilità di accadimento di un determinato evento, è basata su valutazioni statistiche, dunque, sul fatto che eventi appartenenti alla stessa tipologia, che hanno già interessato determinate aree, si possano ripresentare in futuro con la medesima estensione e localizzazione geografica, con modalità e frequenze affini (Gisotti, 2012). Nelle scienze idrauliche si fa affidamento al concetto di tempo di ritorno per la stima della portata delle piene, tramite cui si indica il tempo medio in cui un certo valore di intensità assegnata viene uguagliato o superato almeno una volta (Dispense Prof. Ferrari; Gisotti, 2012).

Il concetto di magnitudo è variabile e piuttosto complesso da inquadrare in quanto in esso concorrono molteplici fattori con pesi differenti e, doverli ricondurre ad un sistema di riferimento di individuazione dei danni, che sia accettabile per tutti, è un lavoro piuttosto impegnativo e per nulla banale (Canale et al., 1998).

Inoltre, è importante introdurre alcuni concetti base come quello di evento casuale, con in quale si intende che a parità di condizioni iniziali e in seguito a diverse prove, il risultato non è univoco. Con prova si intende la singola realizzazione

dell'esperimento, ogni risultato della prova prende il nome di evento. Si parla di evento certo quando non vi è alcuna incertezza, di evento impossibile se non può mai verificarsi e di evento casuale o aleatorio se a seguito di diverse prove si ottengono risultati differenti. L'insieme di tutti i possibili eventi viene denominato come spazio campione. Dunque, anche nel confronto tra eventi alluvionali con tempi di ritorno simili tra loro, è possibile che si verifichino scenari di allagamento differenti, motivo per cui è sempre meglio prendere in considerazione lo scenario peggiore per la delimitazione delle aree allagabili e degli scenari di pericolosità.

I fattori di incertezza possono essere ricondotti prevalentemente a tre categorie (Mazzorana, 2011):

- incertezze riguardanti *le forzanti del sistema* (tipologia di processo, idrogrammi, sedimentogrammi, etc.);
- incertezze concernenti la *rappresentazione del pericolo* nelle aree interessate da urbanizzazioni (fattori di errore nella restituzione topografica, incertezze nella propagazione bidimensionale del fenomeno);
- incertezze riguardanti *l'efficienza e l'efficacia* delle opere di difesa (influenzano la stima delle due componenti precedenti).

Al fine di confinare i fattori di incertezza, è necessario strutturare metodicamente l'analisi della pericolosità andando a definire (Mazzorana, 2011):

- *sistemi di risposta*: con cui si intendono quelle aree come pianure alluvionali, conoidi di deiezione in cui il rischio è elevato a causa della presenza di elementi esposti al pericolo e quindi suscettibili di danno;
- *sistemi di carico*: con cui si individua l'intera rete idrografica nella complessità dei suoi tratti confinati, semi confinati o non confinati.

Un volta individuato ciascun sistema di risposta, si assegna ad esso il rispettivo sistema di carico, procedendo così all'analisi della pericolosità su due differenti livelli. L'elaborazione degli scenari di pericolo, sia per il sistema di carico, che per quello di risposta, è soggetta ad una procedura di valutazione di tipo incrementale e

strutturata secondo una serie di passaggi. Tali passaggi, per quanto concerne il sistema di carico, partono dalla segmentazione dei corsi d'acqua e si concludono con la stima del tasso di trasporto di sedimento all'interno della sezione considerata; mentre, per il sistema di risposta partono dall'identificazione di tutte le aree inondabili e si concludono con la determinazione delle probabilità spaziali di inondazione per ciascuno scenario preso in considerazione (Mazzorana, 2011).

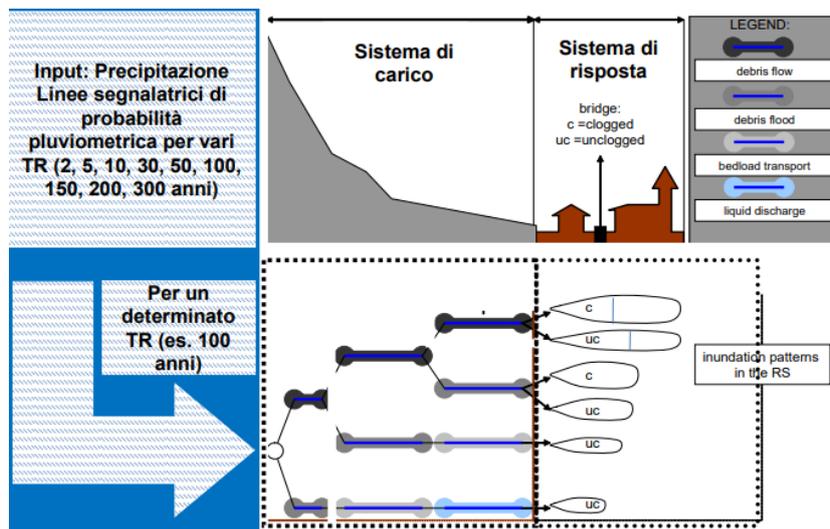


Figura 5: Schema del sistema di carico e di risposta (Mazzorana, 2011).

La figura 5 mostra, per lo scenario di riferimento con tempo di ritorno assegnato di 100 anni, le differenti conseguenze generate dall'attivazione di diverse combinazioni di eventi di dissesto su di un ponte localizzato in ambito urbano. Come visibile nella parte inferiore della figura 5, dei sei scenari individuati quattro prevedono l'intasamento dell'infrastruttura mentre due il deflusso libero. Lo stesso schema logico basato su sistema di carico/risposta può essere applicato alla valutazione degli scenari di allagamento di un'area urbana, caratterizzando i differenti scenari secondo differenti parametri come la quantità di trasporto solido, la durata della precipitazione, l'intasamento della rete di drenaggio etc.

1.1.2 Danno

La valutazione del danno prodotto da un evento alluvionale o gravitativo presenta problemi pratici di natura quantitativa, diversamente dalla pericolosità che mostra,

invece, problemi qualitativi. Stimare il danno atteso significa determinare la probabilità di perdita di un patrimonio di un certo valore (Torre et al., 2005). I danni conseguenti ad un evento calamitoso possono essere classificati in base al loro collocamento cronologico (Torre et al., 2005):

- danni *materiali* riguardano il territorio direttamente coinvolto dall'evento calamitoso con danni fisici a persone e cose;
- danni *sistemico-organizzativi* si mostrano nella fase di soccorso e emergenza e, sono causati dalle inefficienze nel sistema di soccorso;
- danni *di processo* si verificano nella fase di ricostruzione post-emergenziale e sono generalmente quelli più diffusi ed eterogenei. I loro effetti possono propagarsi all'interno del sistema socio-economico e politico-amministrativo.

Il concetto di danno *atteso* o *potenziale* è dato dal prodotto di due fattori quali, la vulnerabilità (V) e il valore degli elementi esposti (W) (Bignami, 2010; Gisotti, 2012):

$$D(I,E) = * W(E) * V(I,E)$$

Poiché le componenti V e W non restano uguali nel tempo, anche il danno (D) può variare poiché questo dipende dagli elementi esposti (E) e dal livello di intensità (I) dell'evento. In un sistema territoriale la dinamicità della vulnerabilità dipende dalla dinamica coevolutiva delle trasformazioni, da cui possono nascere interazioni sinergiche o conflittuali, a cui concorrono i seguenti aspetti (Torre et al. 2005):

- vulnerabilità *diretta* con il passaggio dalla messa in crisi dell'elemento esposto alla crisi del sistema territoriale;
- vulnerabilità *indotta* con la crisi del sistema territoriale generata dal collasso del singolo elemento;
- vulnerabilità *temporanea* con la perdita di efficienza durante il periodo di crisi;

- vulnerabilità *dinamica* con la perdita di efficienza nella fase di riassetamento territoriale;
- vulnerabilità *differita* danni ed esternalità socio-economiche nel periodo post-crisi.

Il concetto di vulnerabilità si compone di due principali dimensioni, quella dipendente dal rischio e quella non dipendente dal rischio. La vulnerabilità dipendente dal rischio può a sua volta essere scomposta in tre sotto categorie⁸:

- *strutturale* riferita alle condizioni strutturali di edifici e infrastrutture;
- *basata sull'esposizione* definisce l'esposizione rispetto ad un pericolo specifico;
- *basata sulla pericolosità* definisce il tipo di danno sulla base della tipologia di pericolo.

Ad esempio, nella valutazione del danno potenziale arrecato ad un certo edificio, andrà tenuto in considerazione che il suo livello di manutenzione può variare nel tempo e, dunque che a parità di scenario di riferimento, associato ad un tempo di ritorno stabilito, le possibili conseguenze potranno variare nel corso del tempo (Bignami, 2010). Oltre alla componente strutturale di un edificio andrà valutato anche il suo livello di frequentazione nelle differenti fasce orarie. Ad esempio, nella valutazione del danno derivante da un evento di intensità (I) per una scuola, i danni sarebbero di gran lunga maggiori se l'evento alluvionale si presentasse durante l'orario di apertura, in cui la scuola è frequentata da alunni e insegnanti, i quali rappresentano certamente il bene esposto di maggior valore. Inoltre, come suggeriscono le componenti di V basate su pericolosità e esposizione, differenti tipologie di pericolo possono generare livelli più o meno alti di vulnerabilità e, conseguentemente, danni variabili sulle comunità umane o sugli immobili, a seconda della capacità intrinseche di risposta rispetto ad un certo tipo di evento calamitoso. In un contesto urbano di valutazione del danno andrà tenuto conto della complessità

⁸ DRMKC Risk Data Hub (europa.eu).

del territorio, in cui vivono comunità più o meno fragili e dunque con differenti capacità di mettersi in sicurezza in risposta ad un evento calamitoso.

Quando il danno potenziale riguarda la perdita della vita umana, perdite monetarie e danni ambientali, ogni conseguenza deve essere espressa in termini di una specifica scala di valori. Le cose si complicano notevolmente quando effetti diversi o non facilmente quantificabili compaiono nella stessa analisi. Non esistono risposte semplici a questi problemi, ma si può procedere assegnando valori temporanei ad alcuni effetti o scomponendo il sistema da analizzare in più sottosistemi (Canale et al., 1998).

Data la variabilità del danno è necessario individuare per V e W dei valori rappresentativi che tengano in considerazione l'ampio spettro di variabili connesse ad un evento di dissesto. Come illustrato precedentemente, ricorrere a valori medi è generalmente considerato un approccio piuttosto semplicistico, non confacente agli scopi di protezione della popolazione e degli insediamenti. In tale ambito le valutazioni sono sovente realizzate tramite scelte maggiormente complesse, ad esempio, considerando il valore più frequente, combinando media, deviazione standard e ulteriori indicatori statistici, al fine di produrre schemi decisionali per la distribuzione delle risorse. Per differenziare i diversi livelli di vulnerabilità che caratterizzano le differenti attività umane il DRMKC propone la scomposizione in quattro dimensioni (sociale, ambientale, economica politica), a ciascuna delle quali viene affidato un valore, la media pesata dei quattro valori mostra la vulnerabilità complessiva.

L'obiettivo del sistema di governo del territorio è quello di minimizzare i danni in riferimento allo scenario maggiormente catastrofico e di preparare per i differenti scenari gli interventi necessari bypassando così la c.d. *propensione al rischio del decisore*. Questo perché la propensione delle comunità umane è di convivere con rischi bassi o *residuali*, dunque, più rari ma anche più intensi, per i quali è necessario l'indispensabile intervento delle istituzioni (Bignami, 2010). Istituzioni che da un lato devono costruire, sul lungo periodo, un adeguato e resiliente sistema di

prevenzione e protezione; dall'altro devono farsi trovare preparate ad attivare con efficienza un sistema di gestione dell'emergenza per affrontare le calamità.

A differenza del concetto di valore degli elementi esposti (*W*) il cui significato è piuttosto immediato poiché esprimibile in valori monetari, il concetto di vulnerabilità (*V*) è maggiormente complesso da esplicitare. Nel campo della protezione civile si utilizza la definizione di "propensione a subire danni nel caso di un determinato evento" (Bignami, 2010), la quale è utile a far emergere due concetti utili ad affinare la comprensione del concetto di rischio. Riprendendo il campo delle scienze ecologiche, a fronte di un danno (*D*) generato su di un certo sistema, per non alterare l'omeostasi di quel sistema, gli organismi attuano delle strategie di adattamento che prendono il nome di *resistenza* e *resilienza* (Benedetti Cecchi et al., 2008).

Il concetto di *resistenza* fa riferimento alla capacità di un sistema di non subire alterazioni significative a seguito di un evento, fino ad un certo livello di intensità. Rappresenta, dunque, la capacità di opporsi al danneggiamento potenzialmente generato da un evento calamitoso. La resistenza può avere varie accezioni di natura ambientale, strutturale, sociale ed economica.

La *resilienza* è definita come la capacità di un sistema di assorbire le perturbazioni e di riorganizzarsi mentre subisce un cambiamento, in modo da mantenere essenzialmente la stessa funzione, struttura, identità e feedback (Berkes 2007; Walker et al. 2004). Nei recenti studi di settore emerge la necessità di valutare la resilienza di un sistema-urbano territoriale in un'ottica di miglioramento della qualità sociale e ambientale, comprendendo la complessità delle relazioni tra società e territorio (Berkes 2007; Colucci, 2012). Infatti, la definizione di resilienza che è maggiormente affine alle scienze territoriali è ripresa dal filone degli studi socio-ecologici, ed è esprimibile come la capacità di un sistema territoriale di affrontare dinamicamente le proprie alterazioni inserendole all'interno del sistema stesso, tramite principi di adattamento, piuttosto che di contrasto (Berkes et al., 2008). La resilienza, da un punto di vista territoriale, punta ad offrire strategie di risposta a

significativi cambiamenti strutturali; può dunque essere intesa come la capacità di una città o di un territorio di sopportare le alterazioni subite, per poi riorganizzare le proprie relazioni, strutture e processi in funzione dei cambiamenti subiti (Alberti et al., 2003). Un sistema territoriale, in quanto complesso, subisce continue perturbazioni del proprio stato di equilibrio, tra loro diversificate per estensione spaziale e temporale; la capacità di un territorio di essere resiliente sta nella sua capacità di assorbire tali perturbazioni e integrarle all'interno del sistema territorio (Dansero et al., 2014).

Secondo Dauphiné & Provitolo (2013), resistenza e resilienza sono concetti che hanno un andamento inverso rispetto alla vulnerabilità poiché a livelli elevati di vulnerabilità corrisponderanno basse capacità di resistenza e resilienza e viceversa. In questo periodo storico appare dunque essenziale costruire strategie resilienti e resistenti in risposta alle alterazioni sistemiche e strutturali generate dai cambiamenti climatici.

Trattare la resilienza nell'ambito della valutazione della vulnerabilità di sistema territoriale o urbano è fondamentale poiché: favorisce una valutazione complessa del rischio in base alle dinamiche che intercorrono tra comunità e territorio, evitando una valutazione frammentata; pone l'attenzione sulla capacità di un territorio di affrontare un certo pericolo, assorbendone le alterazione o adattandosi ad esse, riorganizzando le proprie funzioni in seguito all'impatto; ha una prospettiva di lungo corso e sostiene una visione strategica lungimirante necessaria per esplorare le opzioni politiche, gli scenari futuri e le incertezze che ne conseguono (Berkes, 2007). La resilienza offre, dunque, un'ampia prospettiva per poter affrontare efficacemente cambiamenti rapidi ed improvvisi e rischi non noti (Tompkins & Adger, 2004).

Nell'ambito delle scienze territoriali è possibile optare per un utilizzo sincronico delle due strategie, in funzione degli obiettivi di protezione che si vogliono portare avanti, delle disponibilità economiche, del tempo a disposizione e delle tipologie di rischio. Ad esempio, per la salvaguardia degli elementi strutturali di un certo

territorio si punterà maggiormente verso una strategia di accrescimento della resistenza mentre si adotteranno soluzioni resilienti per la gestione del rischio residuo (Bignami, 2010). Dunque, se le strategie di resistenza hanno come principale obiettivo quello della salvaguardia degli elementi fisici del territorio; quelle di resilienza hanno il compito di supportare l'adattamento e la ripresa del sistema socio-economico in seguito ad una situazione di crisi.

Per costruire la resilienza socio-ecologica, è possibile identificare quattro fattori cronologici e spaziali (Adger et al., 2005; Berkes, 2007; Folke et al., 2003):

- *imparare a convivere con il cambiamento e l'incertezza* richiede la costruzione di una memoria degli eventi passati, l'allontanamento dal concetto di stabilità, la strutturazione di un codice di condotta per eventi inattesi. Un sistema resiliente deve conservare, anche tramite strategie di resistenza, gli elementi necessari per l'organizzazione e l'adattamento in seguito ad un'emergenza. Tali elementi risiedono nella memoria sociale ed ecologica⁹ e rappresentano gli elementi strutturanti di un territorio;
- *coltivare, nelle sue diverse forme, la diversità* fornisce l'opportunità di coltivare nuove opportunità per l'adattamento. La diversificazione mira ad una riduzione distributiva dei rischi incrementando le opzioni per far fronte a differenti pericoli. La diversità può essere valutata su diverse dimensioni. La gamma di opportunità economiche disponibili è un aspetto della diversità che mette in stretta relazione il rapporto uomo-territorio, così come la diversità ecosistemica. Coltivare la diversità politica permette di aprire il dialogo, di informare e coinvolgere un ampio spettro di attori, ciascuno portatore del suo punto di vista;
- *utilizzare un approccio multi-disciplinare* per l'acquisizione di conoscenza, necessario per comprendere fenomeni complessi come la gestione del rischio

⁹ La memoria sociale fa riferimento ai comportamenti delle comunità (e.g. alle regole comportamentali che le comunità devono seguire in caso di evento calamitoso. La memoria ecologica invece è maggiormente legata alla capacità degli elementi naturali di resistere in seguito ad una crisi ambientale (e.g. come i semi delle piante o miceli dei funghi sono in grado di sopravvivere ad un incendio).

e i cambiamenti climatici. Infatti, coinvolgere diversi tipi di conoscenza e concentrarsi sulla loro complementarità, aiuta ad aumentare la capacità di apprendimento;

- *mettere in campo opportunità per la costruzione di sistemi auto-organizzati*, in quanto la resilienza di un sistema è strettamente legata alla sua capacità di rinnovarsi e riorganizzarsi. In ottica di riduzione della vulnerabilità, gli aspetti dell'auto-organizzazione che contribuiscono ad accrescere la resilienza sono la capacità di costruire e rafforzare: la gestione delle comunità e delle istituzioni, un sistema multi scalare per la gestione dell'emergenza, una memoria istituzionale, forti istituzioni che si occupino di ricerca e gestione adattiva dei rischi.

La combinazione dei quattro aspetti sopra citati è lo strumento per costruire un sistema di governance capace di creare uno stretto nesso tra monitoraggio e risposta al rischio, con il fine di far convergere, secondo il principio di sussidiarietà, il sistema decisionale di risposta ad una perturbazione alla giusta scala di gestione territoriale (Adger et al., 2005).

A seguito di quanto sopra descritto, è possibile avere una panoramica maggiormente specifica della vulnerabilità, la quale può anche essere considerata come: la propensione a subire un certo grado di perdita a causa di un pericolo (Etkin et al., 2004) o il grado di probabilità che un sistema subisca danni a causa di un pericolo (Turner et al., 2003). Vulnerabilità e resilienza sono profondamente legate tra loro poiché il concetto di vulnerabilità risiede all'interno della resilienza del sistema su cui un pericolo fa pressione (Turner et al., 2003).

A partire da tali definizioni, per una più precisa quantificazione del danno, il concetto di vulnerabilità potrebbe essere scomposto in due sotto-categorie (Bignami, 2010):

- la *vulnerabilità indotta* considera gli effetti generati dal mancato funzionamento dell'elemento esposto al danno, come la chiusura di un tratto stradale, di un ponte o l'interruzione delle infrastrutture di telecomunicazione;

- la *vulnerabilità differita* tiene in considerazione le perdite generate dalle conseguenze prodotte dagli eventi sull'elemento danneggiato, come la chiusura di certe attività produttive con conseguente crescita della disoccupazione o la riduzione del flusso turistico.

Tale scomposizione è utile per valutare da un lato la capacità di un territorio di proseguire nelle sue attività in seguito ad un evento calamitoso, dall'altro a stabilire le tempistiche necessarie per il recupero o la ricostruzione di ciò che è stato compromesso o distrutto. Inoltre, i territori caratterizzati da ridotti valori di vulnerabilità, sia indotta che differita, sono anche quelli con i livelli di resilienza maggiormente elevati.

1.2 Il rischio idrogeologico

Con dissesto idrogeologico si intende qualsiasi disordine o situazione di squilibrio che l'acqua produce nel suolo e/o nel sottosuolo (Gisotti, 2012). Il concetto di dissesto idrogeologico comprende al suo interno differenti tipologie di fenomeni come frane, esondazioni, valanghe, erosione costiera, i quali sono il risultato delle attività endogene ed esogene che contraddistinguono il sistema terra (Milli & Prestininzi, 2015; Gisotti, 2012). Il rischio idrogeologico, rispetto al concetto generale di rischio, si caratterizza per la componente della *pericolosità* (H) determinata dalla frequenza e dall'intensità degli eventi di dissesto idrogeologico. All'interno di questa tesi verrà realizzato un approfondimento incentrato su frane e alluvioni, con uno specifico focus territoriale sul contesto italiano.

Le cause del dissesto idrogeologico possono essere ricondotte a tre macro-categorie (Gisotti, 2012):

- Fattori meteoroclimatici
- Fattori morfo-geologici
- Fattori antropici

Come anticipato, le componenti che si vanno ad analizzare nella valutazione del rischio sono la pericolosità (H), la vulnerabilità (V) e il valore economico degli elementi esposti (W), le ultime due riassumibili nel concetto di danno (D). Dunque, per ridurre il rischio complessivo, è necessario agire sulla riduzione dei fattori che lo compongono.

Per ridurre la pericolosità (H) di un evento, dunque la probabilità che esso si verifichi, è necessario innanzitutto effettuare un'attenta attività di prevenzione sia nel tempo reale che in quello differito. Per fare ciò, è necessario disporre degli strumenti per poter prevedere il tipo di evento, la sua localizzazione geografica, la sua frequenza e la sua intensità al fine di effettuare una stima dei danni e conseguentemente prevedere gli adeguati strumenti di mitigazione. Inoltre, per la riduzione della pericolosità (H) è necessario agire sulla probabilità che un evento di

intensità (I) coinvolga un'area in cui sono presenti determinati elementi (E). Poiché l'intensità dipende da fattori naturali, su cui l'azione umana non può intervenire, come i mm/h di pioggia che cadono al suolo, per ridurre la pericolosità, sarà necessario limitare il diffondersi dell'evento calamitoso in aree in cui sono presenti elementi (E) esposti al rischio. Per compiere tale operazione, nel caso di frane e alluvioni è necessaria una gestione territoriale attiva che garantisca i servizi ecosistemici di protezione e, dove necessario, la realizzazione di opere di difesa dei versanti o di laminazione delle portate, che limitino le possibilità che l'evento gravitativo/alluvionale si verifichi, o che vada ad interessare insediamenti umani. Tuttavia, sovente si riesce ad attuare solo una riduzione e non un azzeramento del pericolo.

Per quanto riguarda la riduzione della vulnerabilità (V) si può agire, sia sulla *vulnerabilità strutturale* degli insediamenti esposti, aumentando la capacità degli edifici e delle infrastrutture di resistere e non subire danni rispetto al verificarsi di un evento di intensità (I), che sulla *vulnerabilità sociale*, prevedendo gli adeguati strumenti di protezione civile ed un efficiente sistema di monitoraggio, previsione, comunicazione e allertamento di emergenza che permetta di garantire un buon livello di sicurezza alla popolazione. Come si è visto nel precedente paragrafo i concetti di resistenza e resilienza sono fondamentali per la costruzione di strategie volte a ridurre la vulnerabilità.

La riduzione degli elementi esposti (E), a cui è assegnato un valore (W), è tra le operazioni di riduzione del rischio che maggiormente si confà ai compiti della pianificazione urbana e territoriale. Nello specifico, è compito della pianificazione degli usi del suolo impedire che si realizzino insediamenti in aree potenzialmente soggette a fattori di pericolosità. Infatti, se non ci sono elementi esposti alla pericolosità il danno è nullo e conseguentemente anche il rischio. Per esemplificare il concetto se si verificasse un'alluvione o una frana in un'area completamente disabitata e non antropizzata non si genererebbe alcun fattore di rischio, poiché non sarebbe riportato alcun danno; salvo che gli effetti di tale evento si possano poi espandere in tempi più o meno brevi a zone antropizzate circostanti.

Al contrario, lo sviluppo insediativo, in particolare in Italia, non ha tenuto conto di ciò ed è andata ad urbanizzare aree soggette a pericolosità, generando possibili danni e quindi scenari di rischio (Monacelli & Spiniello, 2018).

Gli studi di settore e i media hanno portato, negli ultimi anni, alla luce numerosi eventi naturali che hanno causato morti, feriti, dispersi, sfollati e ingenti danni ai territori. Rispetto a ciò, spesso la risposta pubblica si è rilevata inefficace anche perché, molto frequentemente, si arriva a confrontarsi con il post-evento dunque, fornendo una risposta emergenziale piuttosto che preventiva (Milli, Prestininzi, 2015). A proposito di ciò, in Italia occorrerebbe effettuare un riequilibrio delle risorse impiegate per il contrasto al rischio idrogeologico, andando ad incrementare la quota delle risorse dedicate all'attività di prevenzione, al fine di proteggere la popolazione, gli insediamenti ma anche il tessuto socio-economico del paese. Nei paesi del nord del mondo inizia ad avere un certo peso finanziario nelle politiche nazionali e comunitarie l'attività di prevenzione e mitigazione, poiché il dissesto idrogeologico può intaccare e compromettere gli orizzonti di sviluppo (Milli, Prestininzi, 2015).

Il porre l'attenzione sul rischio idrogeologico e sulla sua stima quantitativa non è un'attività emersa da poco nel panorama scientifico ma, già a partire dagli anni Settanta, *Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator (UNDRO)*¹⁰ si occupa di studiare analiticamente la quantificazione del rischio. In Italia, nei medesimi anni, il Ministero dei Lavori Pubblici ha iniziato a commissionare studi su frane e alluvioni. Il CNR dalla fine degli anni Ottanta ha posto grande attenzione sul tema dando vita al GNDICI¹¹, al Progetto finalizzato difesa suolo e al progetto AVI¹², coinvolgendo un ampio spettro di università e centri di ricerca afferenti a differenti campi scientifici, disponendo così anche un ampio ventaglio di competenze (Gisotti, 2012).

¹⁰ È uno degli uffici dell'UNESCO.

¹¹ Gruppo nazionale difesa catastrofi idrogeologiche.

¹² Aree Vulnerate italiane il quale contiene il censimento dei territorio italiani interessati da frane e inondazioni nel periodo compreso tra il 1918 e il 1990. Nell'ambito del progetto AVI sono state accumulate oltre 22.000 informazioni relative ad eventi gravitativi e 7.500 relative ad alluvioni. Le località colpite da eventi di dissesto registrate nell'ambito del progetto AVI sono oltre 30.500.

In tale contesto di vivacità scientifica in cui si riprendono e approfondiscono anche i contenuti della Commissione de Marchi, nasce la Legge italiana 183/1989 sulla difesa del suolo. Ulteriore studio in materia è quello pubblicato nel 1992 dal Servizio geologico d'Italia relativo ai dati del secondo dopoguerra (1945-1990). Per quanto riguarda i dati antecedenti al XX secolo ENEA ha costituito il progetto GIANO al cui interno sono archiviati più di 350 frane e 750 alluvioni avvenute nel XVIII e XIX secolo in Italia. Ad oggi l'inventario IFFI messo a disposizione da ISPRA, i PGRA e i Piani d'assetto idrogeologico (PAI) costituiscono la banca dati di riferimento per frane e alluvioni.

Ciò che emerge dagli studi portati avanti in Italia è che, se si vuole fare prevenzione, è necessario prima di tutto sviluppare un modello analitico per poter stimare e quantificare il rischio idrogeologico. Nello sviluppo di tali studi si mettono al centro delle valutazioni gli esseri umani e le relative opere e attività.

La formula $R(E, I) = H(I) * W(E) * V(I, E)$, già illustrata all'interno del primo paragrafo, mette in luce una quantificazione monetaria del rischio, vale a dire che è possibile stimare, per un dato evento (P), i danni economici apportati in termini di vite umane e di danni alle cose. La valutazione monetaria permette, dunque, di adoperare un confronto tra le perdite derivanti da un evento calamitoso e i costi che si sarebbero dovuti sostenere per effettuare una prevenzione efficace del fenomeno evitando la produzione di danni. Secondo numerosi studi, le attività di prevenzione dei rischi rappresentano un'opportunità di mancata perdita piuttosto che un costo, ne deriva che la prevenzione può essere definita come un vero e proprio investimento (Arrow & Lind, 1970), poiché sovente i costi dei danni sono maggiori rispetto alle opere che si sarebbero potute adottare per evitare che quei danni si verificassero (Albala-Bertrand, 1993; Cohen & Werker, 2008).

La scomposizione del rischio, distinguendo la probabilità che l'evento si verifichi e i possibili danni relativi, è stato il passaggio fondamentale per poter portare avanti l'attività di prevenzione. È necessario essere riluttanti verso il pensiero chi crede di poter ridurre il danno esclusivamente agendo sulla sorgente del pericolo

trascurando la mitigazione del rischio e l'adattamento attraverso un'attenta attività di prevenzione e una pianificazione territoriale resiliente e consapevole dei rischi che insistono sul territorio.

1.3 Il contesto italiano

Il territorio italiano, da un punto di vista geologico, si caratterizza per un'elevata complessità strutturale ed un'età geologica una relativamente giovane. In tale contesto geologico vi è la concomitanza di forze endogene ed esogene, le prime sono responsabili dei sollevamenti orogenici, le seconde della demolizione delle strutture poste a quote più elevate. Nella penisola italiana, le forze endogene sono quelle di maggior rilievo, e specialmente lungo la catena appenninica in sinergia con gli eventi atmosferici e climatici produce eventi alluvionali, erosivi e gravitativi (Milli & Prestininzi, 2015).

Difesa del suolo ed assetto territoriale sono temi di grande rilevanza per il contesto italiano. Infatti, l'Italia è un Paese in cui il tema del dissesto ha storicamente assunto una grande rilevanza a causa dei molteplici eventi calamitosi che hanno coinvolto il paese. Fenomeni come frane, alluvioni, valanghe ed erosione costiera sono piuttosto frequenti sul territorio italiano e i loro impatti causano sovente significative ricadute sulla popolazione, sulle infrastrutture fisiche e telematiche, sul tessuto produttivo e sull'agricoltura (Trigila, & Iadanza, 2018).

In particolare, nell'arco degli ultimi 70 anni la crescente antropizzazione del territorio ha comportato un'ampia urbanizzazione in aree a rischio di esondazione o frana (Monacelli & Spiniello, 2018). Si è passati dal 2,7% di superfici antropiche negli anni 50 al 7,11% del 2020 (Trigila et al., 2021).

La crescita delle aree urbanizzate a partire dalla fine del secondo dopoguerra, in assenza di un sistema di pianificazione efficace e cogente; dunque, capace di governare il processo di ricostruzione del paese, ha portato alla crescita di insediamenti in aree soggette a pericolosità da frane e alluvioni nonché ad una vasta urbanizzazione delle aree costiere (Trigila et al., 2021; Gallozzi et al., 2020).

Contemporaneamente, l'attività umana attraverso l'abbandono dei territori, l'impermeabilizzazione dei suoli, l'abusivismo edilizio, i disboscamenti e gli incendi

è tra le principali cause dell'intensificarsi del rischio meteo-idrogeologico ed idraulico (Monacelli & Spiniello, 2018).

In merito alla mancata manutenzione dei territori, si evidenzia come l'abbandono delle aree collinari e montane, abbia comportato anche un abbandono e una mancata manutenzione di quei manufatti antropici che in passato contribuivano alla mitigazione delle frane. In particolare, l'abbandono delle attività agricole a quote montane e collinari ha comportato l'incuria dei terrazzamenti che hanno caratterizzato la storia agricola dell'Italia da nord a sud. Infatti, è possibile ritrovare testimonianze di muretti a secco diffuse su tutto il territorio nazionale come, ad esempio, in Valtellina e Val Chiavenna (SO), in Liguria, nella Penisola Sorrentina, nel Cilento, nel Gargano e nella Sicilia orientale. La negligenza nel mantenimento di tali manufatti determina una maggior facilità di innesco dei fenomeni gravitativi (Trigila et al., 2021).

A ciò si aggiungono i cambiamenti climatici, i quali determinano un'alterazione delle temperature e delle precipitazioni, con conseguente crescita di frequenza degli eventi pluviometrici intensi, delle frane superficiali, delle colate detritiche e delle piene improvvise (Gariano & Guzzetti, 2016).

Oltre ai fattori fisici di intensificazione del rischio, in Italia, spesso si assiste ad una mancata pianificazione e programmazione degli interventi di manutenzione ordinaria, dando preferenza e precedenza a interventi di natura emergenziale, ciò di fatto comporta gravi lacune dal punto di vista della prevenzione del rischio. A ciò si aggiunge una mancata pianificazione territoriale ed una governance verticale efficiente ed efficace, capace di attuare una costante manutenzione ordinaria del territorio e delle aste fluviali, senza dover ricorrere come invece è prassi ad interventi emergenziali (Gariano & Guzzetti, 2016; Trigila et al., 2021).

L'Italia è un territorio in cui anche precipitazioni non particolarmente straordinarie possono mettere in crisi i territori con rilevanti ripercussioni sui centri abitati, sulle infrastrutture, sul sistema ambientale e naturale. Tale dinamica è piuttosto eterogena sul territorio nazionale. Infatti, se da un lato vi sono bacini idrografici di

grandi dimensioni come quelli dei principali corsi d'acqua, quali il Po, l'Adige, il Tevere e l'Arno, i quali sono dotati di elevate portate e tempi medio-lunghi di esondazione, contemporaneamente vi è un'ampia gamma di bacini di ridotte dimensioni in cui precipitazioni brevi e intense possono causare rapide esondazioni dei corsi d'acqua (Gallozzi et al., 2020).

Tale contesto di rapida e sregolata antropizzazione del territorio, che ha interessato l'Italia del secondo dopoguerra ha comportato un crescita notevole degli elementi esposti al rischio idrogeologico. Tale problematica è rimasta però largamente ignorata dall'azione politica durante gran parte della seconda metà del '900, e come sovente accade in Italia, le problematiche e le relative soluzioni vengono portate all'attenzione solo in seguito ad eventi catastrofici.

Ne è esempio ciò che accadde nel 1998 quando tra il 5 e il 6 maggio 1998 le città di Sarno, Quindici e i comuni limitrofi, a seguito di intense piogge (240/300 mm) perdurate per più giorni, vennero interessati da più di 140 eventi franosi, in cui persero la vita 160 persone¹³. A quella data nell'area di Sarno non vi era la presenza di pluviometri in telemisura che permettessero il monitoraggio della quantità di pioggia precipitata. La risposta dello Stato a tale disastro è stata il Decreto-Legge 180/1998 c.d. Decreto Sarno convertito dalla legge 267 del 3 agosto del medesimo anno tramite cui si attuava una fondamentale catalizzazione dei processi di perimetrazione delle aree soggette a rischio idrogeologico e al potenziamento della rete di monitoraggio e sorveglianza. In seguito al Decreto Sarno è stato avviato il processo di adozione dei Piani stralcio di bacino per l'Assetto Idrogeologico (PAI), redatti dalle Autorità di Bacino Distrettuali, e di imposizione di vincoli per la regolazione dell'uso del territorio (Gallozzi et al., 2020). Le Autorità di Bacino sono previste già dalla L. 183/1989, tuttavia la loro operatività diventerà effettiva solo in seguito all'emanazione del Decreto Sarno (Milli & Prestininzi, 2015).

¹³ L'alluvione di Sarno e Quindici | Dipartimento della Protezione Civile.

1.3.1 Quantificazione del fenomeno sul territorio italiano

L'Italia come illustrato precedentemente è un Paese altamente urbanizzato costituito da 7.901 comuni¹⁴, 59.459 nuclei urbani, 6.847 km di autostrade, 360.000 km di strade, 16.000 km di ferrovie e una densità media di 200 ab./km² (Gallozzi et al., 2020).

Nel 2022 il CNR ha fornito i dati in merito alla popolazione colpita dal dissesto idrogeologico nei 50 anni precedenti (1970-2020) da cui emergono 320.156 evacuati e senz'altro, 1.935 feriti, 60 dispersi e 1.670 morti (Bianchi & Salvati, 2022).

Per la valutazione alla scala regionale delle differenti implicazioni sulla popolazione degli eventi alluvionali e franosi, viene utilizzato un indice di mortalità media da frana e/o inondazione. Tale indice di mortalità è riferito al rischio scaturito da un pericolo di natura idrogeologica e riferito ad un singolo soggetto. Tale indice viene dunque calcolato come il rapporto tra la somma dei morti e dei dispersi su un anno, ogni 100.000 persone (Bianchi & Salvati, 2022).

Nella tabella 2 sono riportati gli indici di mortalità media per ciascuna regione calcolati nel periodo 1971-2020, in cui si evidenzia come Trentino-Alto Adige e Valle d'Aosta siano tra le regioni con l'indice di mortalità per frana, sia per l'elevata concentrazione di frane rilevanti sul proprio territorio, che per la ridotta taglia demografica delle due regioni.

Regione	Frana	Inondazione	Frana e inondazione
Trentino-Alto Adige	0,733	0,024	0,757
Valle d'Aosta	0,437	0,102	0,54
Campania	0,086	0,007	0,093
Basilicata	0,036	0,04	0,076
Piemonte	0,035	0,049	0,084
Toscana	0,03	0,029	0,059

¹⁴ Aggiornato al 1° gennaio 2023.

Sicilia	0,027	0,042	0,069
Lombardia	0,026	0,007	0,033
Emilia-Romagna	0,025	0,009	0,034
Umbria	0,022	0,017	0,039
Friuli-Venezia Giulia	0,02	0,013	0,033
Liguria	0,02	0,06	0,079
Calabria	0,02	0,046	0,066
Abruzzo	0,014	0,006	0,02
Veneto	0,012	0,003	0,016
Sardegna	0,01	0,056	0,066
Marche	0,008	0,018	0,026
Lazio	0,005	0,007	0,012
Puglia	0,001	0,015	0,017
Molise	0	0,006	0,006

Tabella 2: Indici di mortalità media per frana, inondazione, frana e inondazione (Bianchi & Salvati, 2022).

In Italia l'istituto che si occupa di svolgere la raccolta, l'elaborazione e la diffusione dei dati sulla difesa del suolo e sul dissesto idrogeologico è l'Istituto Superiore Protezione e Ricerca Ambientale (ISPRA)¹⁵. Tale ente è dotato di personalità giuridica e diritto pubblico, autonomia tecnica, scientifica, organizzativa, finanziaria, gestionale, amministrativa, patrimoniale e contabile ed è sottoposto alla vigilanza del Ministro dell'ambiente e della sicurezza energetica (MASE)¹⁶. Inoltre, in collaborazione con gli enti territoriali quali Regioni e Province autonome si occupa della realizzazione dell'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI)¹⁷, della standardizzazione delle informazioni relative al processo di attuazione della Direttiva Alluvioni¹⁸, e della gestione del Repertorio Nazionale degli Interventi per la Difesa del Suolo (ReNDiS)¹⁹ (Trigila, & Iadanza, 2018).

¹⁵ (ex artt. 55 e 60 del D.Lgs. 152/2006, *Norme in materia ambientale*).

¹⁶ L'Istituto — Italiano (isprambiente.gov.it).

¹⁷ (ex art. 6 comma g, della L. 132/2016).

¹⁸ (Direttiva 2007/60/CE).

¹⁹ Nel 200 il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio conferiva all'ex APAT (ora ISPRA) l'attività di monitoraggio degli interventi urgenti in materia di riduzione del rischio idrogeologico ex

L'istituto si occupa di pubblicare il *Rapporto sul dissesto idrogeologico in Italia* fornendo un quadro relativo all'intero territorio nazionale, sia sulla pericolosità da frane, alluvioni ed erosione costiera, che sugli indicatori di rischio per il sistema socio-economico comprendente popolazione, edifici, imprese, beni culturali (Trigila et al., 2021).

Nell'ultima edizione pubblicata nel 2021 si evidenzia che sul 18,4% (55.609 km²) del territorio nazionale ricade una pericolosità da frane elevata o molto elevata e/o una pericolosità idraulica media²⁰.

Nel confronto con i dati del precedente rapporto, pubblicato nel 2018, emerge una crescita delle superfici esposte a pericolosità da frana elevata o molto elevata del +3,8% e di pericolosità idraulica media del +18,9%. Tali incrementi sono in parte imputati alla maggiore capacità conoscitiva sugli eventi di dissesto grazie anche al contributo delle Autorità di Bacino Distrettuali (ABD) le quali, tramite studi a scale di maggior dettaglio, hanno portato avanti un'importante attività di mappatura di nuovi fenomeni gravitativi e nuove alluvioni.

Per quanto riguarda l'attività di monitoraggio dell'erosione costiera, nel periodo 2007-2019 è stato registrato sul territorio nazionale una dato dicotomico, infatti si registra il 19,7% dei litorali in stato di avanzamento e il 17,9% in stato di arretramento. Nel confronto con il precedente intervallo 2000-2007, anche a fronte di una crescita delle opere fisse di difesa dall'erosione, si evidenzia una lieve crescita dei tratti costieri in avanzamento e una riduzione del -1% di quelli in arretramento.

D.L. 180/98 c.d. "Decreto Sarno" convertito tramite la L. 267/98. Il risultato che ne è derivato è stato l'avviamento da parte dell'ISPRA del progetto ReNDiS con lo scopo di realizzare un archivio informatizzato di tutti gli interventi per la prevenzione e la salvaguardia dal dissesto idrogeologico. Il Repertorio è un sistema informativo integrato da un'interfaccia web che consente di condividere e pubblicare su Internet i dati acquisiti. Tramite l'interfaccia, è possibile visualizzare gli interventi che ricadono in un determinato ambito territoriale e interrogare il database per ottenere i corrispondenti report statistici relativi a una serie di caratteristiche, tipologie e quantità degli interventi. Il principale scopo di tale strumento è quello di fornire un contributo a supporto del ruolo dello Stato nella mitigazione del dissesto idrogeologico, da un lato favorendo un maggiore coordinamento dell'azione pubblica nella programmazione degli interventi, dall'altro fornendo ai cittadini strumenti di partecipazione e trasparenza nella fase attuativa (Gallozzi et al., 2020).

²⁰ Con un tempo di ritorno compreso tra i 100 e i 200 anni.

Al 2021 sono 7.423 (93,3%) i comuni esposti al rischio di dissesto idrogeologico e/o erosione costiera (Trigila et al., 2021); nel periodo 1970-2020 sono statati colpiti da eventi di dissesto idrogeologico 2.139 comuni di cui 1.517 per frane e 968 per inondazioni (Bianchi & Salvati, 2022).

I dati che seguono, salvo dove specificato diversamente, sono riferiti agli scenari con più elevata probabilità di accadimento; dunque, pericolosità elevata (P3) e molto elevata (P4) per il rischio frane e pericolosità elevata (HPH) e media (MPH) per il rischio alluvioni.

Complessivamente in Italia sono esposte al rischio idrogeologico, di pericolosità medio-alta, circa 8,1 milioni di persone (13,7% della popolazione italiana), di cui 1,3 milioni a rischio frane²¹ e 6,8 milioni a rischio alluvioni.

Su 3.448.000 famiglie esposte a rischio idrogeologico di pericolosità medio-alta, 0,548 milioni sono esposte a rischio frane e 2,9 milioni a rischio alluvioni (Trigila et al., 2021).

Su 14,5 milioni di edifici presenti sul territorio nazionale il 3,9% (565.000) giace su suoli a pericolosità elevata e molto elevata da frana e il 10,7% (1.549.759) su suoli con pericolosità media di inondazione (Trigila et al., 2021).

Riguardo al settore produttivo, le attività su suoli a pericolosità elevata e medio elevata da frana sono più di 84.000 (1,8% delle unità locali) con oltre 220.000 addetti soggetti a scenari di rischio. Per quanto concerne gli scenari a media pericolosità di inondazione sono esposte oltre 640.000 unità locali di imprese pari al 13,4% del totale nazionale (Trigila et al., 2021).

In merito ai beni culturali, di cui il territorio italiano è ricco, su oltre 213.000 beni più di 38.000 ricadono in aree soggette a pericolosità, anche bassa, di cui oltre 12.500 in aree con pericolosità elevata e molto elevata da frane; quelli a rischio

²¹ Distribuzione per fasce d'età: 13% giovani con età < 15 anni, 64% adulti tra 15 e 64 anni e 23% anziani con età > 64 anni).

alluvioni sono oltre 50.000 di cui 34.000 soggetti a pericolosità media (Trigila et al., 2021).

Riguardo a questi dati è importante ricordare che gli scenari con pericolosità minore indicano una minor probabilità che l'evento si verifichi; ciò comporta che, se dovesse verificarsi l'evento, questo avrebbe un'intensità di gran lunga superiore ad eventi più frequenti. Ad esempio, per le alluvioni, un tempo di ritorno di 200 anni indica un evento caratterizzato da una ridotta possibilità di verificarsi (0,5% in un anno) e da un'elevatissima portata, ciò comporterebbe il coinvolgimento degli elementi esposti al rischio, che nel caso dei beni culturali ne comporterebbero la probabile e irreversibile distruzione.

Sulla base delle *Carte di criticità* elaborate dal Dipartimento di Protezione Civile, tra le aree del Paese con i picchi più alti di criticità, spiccano la Liguria e il nord della Toscana seguite dalle Alpi, il Friuli-Venezia Giulia, la Campania e la Calabria. (Trigila et al., 2021; Gisotti, 2012). In Liguria su 235 Comuni, 196 sono stati colpiti da frane o alluvioni, in Piemonte 646 su un totale di 1.209 Comuni, in Umbria 90 su 92 (Gisotti, 2012).

In tale contesto, i dati forniti dal Rapporto sul dissesto idrogeologico in Italia realizzato da ISPRA e le cartografie di rappresentazione degli scenari di rischio e pericolosità, forniscono un importante strumento conoscitivo alle amministrazioni e agli enti competenti, per la formulazione di politiche per la mitigazione del rischio, l'individuazione degli interventi prioritari, la ripartizione dei fondi e la programmazione degli interventi da per la difesa del suolo.

Gli indicatori relativi alla popolazione esposta al rischio idrogeologico e quelli relativi alle dinamiche di avanzamento e arretramento delle coste sono utilizzati come benchmark per la programmazione delle politiche italiane ed europee in materia di dissesto. Tali indicatori sono stati utilizzati, nel 2014, come riferimento per la programmazione dei fondi strutturali 2014-2020 nell'ambito del partenariato tra Italia e Commissione Europea; nel 2015 nell'ambito del Piano stralcio aree metropolitane e urbane contro alluvioni e dissesto idrogeologico, nel 2016 per la

ripartizione dei fondi regionali²² per il contrasto al dissesto idrogeologico. Inoltre, tali indicatori sono stati utilizzati nella proposta di Piano per la Transizione Ecologica approvata in data 8 marzo 2022 dal Comitato Interministeriale per la Transizione Ecologica, dopo averne inviato la bozza alle Camere e alla Conferenza unificata.

1.3.2 Frane

I principali fattori di innesco delle frane sono sia le precipitazioni a carattere breve e intenso che quelle persistenti, nonché l'attività sismica (Gisotti, 2020). In particolare, nel territorio italiano i fenomeni sismici hanno una grande rilevanza poiché piuttosto frequenti e dotati di un'elevata capacità distruttiva (Lucantoni et al., 2001).

Oltre all'elevata pericolosità sismica che caratterizza il territorio italiano, anche le sue caratteristiche morfologiche, litologiche e geologiche e il fatto che il 75% dei suoli è posto in quote collinari-montane, determinano un'ampia diffusione dei fenomeni gravitativi su tutto il territorio nazionale (Trigila et al., 2021). Per l'individuazione delle aree collinari-montane (figura 6) è stato utilizzato un DEM con risoluzione 20m, tramite cui sono state estratte le superfici utilizzando due criteri, uno relativo all'acclività ed uno relativo alla quota. Per l'acclività è stata utilizzata una soglia pari a 3°, per la quota una soglia di 300 m.s.l.m. (Trigila & Iadanza, 2007).

²² (DPCM 5 dicembre 2016).

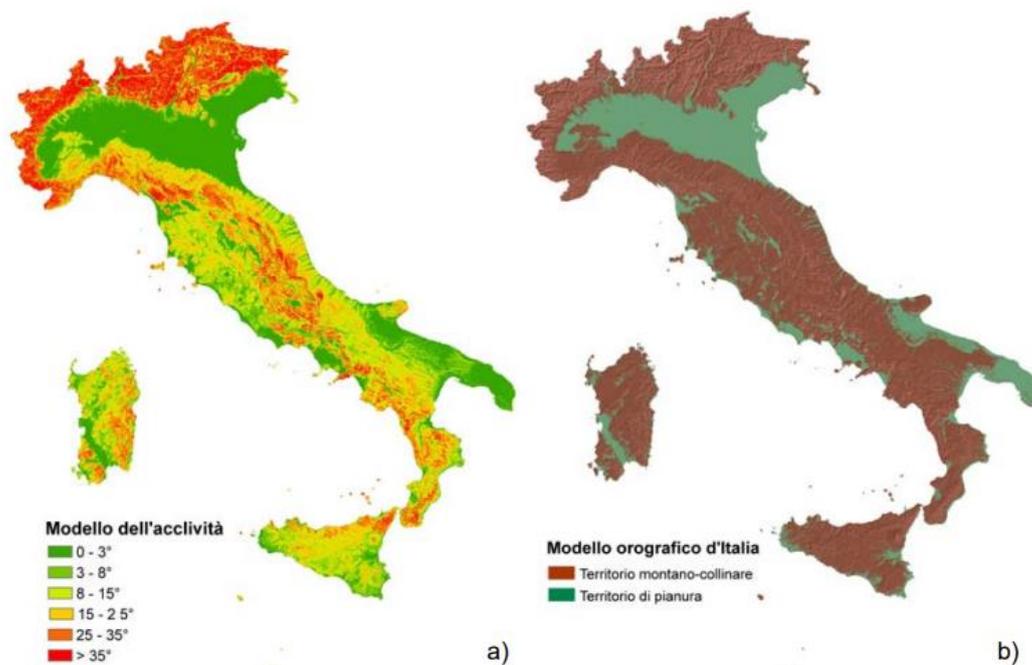


Figura 6: Modello dell'acclività e orografico dell'Italia utilizzato per l'individuazione delle aree montane e collinari (Trigila & Iadanza, 2007).

L'ampia diffusione sulla superficie terrestre del territorio italiano di tipologie litologiche argillose dotate di scarsa resistenza meccanica fa sì che in presenza di eventi piovosi vi siano elevate probabilità di innesco di fenomeni di instabilità lungo i pendii collinari o montani (Milli & Prestininzi, 2015). Ulteriore caratteristica litologica che accresce l'instabilità dei versanti è l'elevata rigidità di alcune conformazioni rocciose, che comporta la diffusa formazione di faglie e fratture (Trigila et al., 2021).

In Italia l'ISPRA si occupa della redazione dell'inventario IFFI²³ il quale costituisce la più completa e dettagliata banca dati sulle frane grazie alla scala grafica di 1:10.000 utilizzata per le rappresentazioni e all'elevato numero di parametri presi in considerazione.

²³ IFFI - Inventario dei fenomeni franosi in Italia — Italiano (isprambiente.gov.it).

L'Italia è il Paese con più frane in Europa, sul territorio italiano si concentrano i 2/3 delle frane europee (Dei Cas et al., 2021; Gallozzi et al., 2020). Il database ha nel suo inventario più di 625.000 fenomeni franosi registrati, i quali interessano il 7,9% del territorio nazionale (24.000 km²). L'IFFI non è aggiornato uniformemente sul territorio nazionale poiché l'aggiornamento viene realizzato sulla base del territorio regionale o della provincia autonoma. La Provincia Autonoma di Bolzano presenta l'inventario più aggiornato (2021), seguono l'Umbria (2018), Emilia-Romagna, Liguria, Piemonte, Sicilia e Valle d'Aosta e Friuli-Venezia Giulia (2016), Toscana (2015), Lombardia e Basilicata (2014), il resto delle regioni non citate è ferma al 2007 (Trigila et al., 2021).

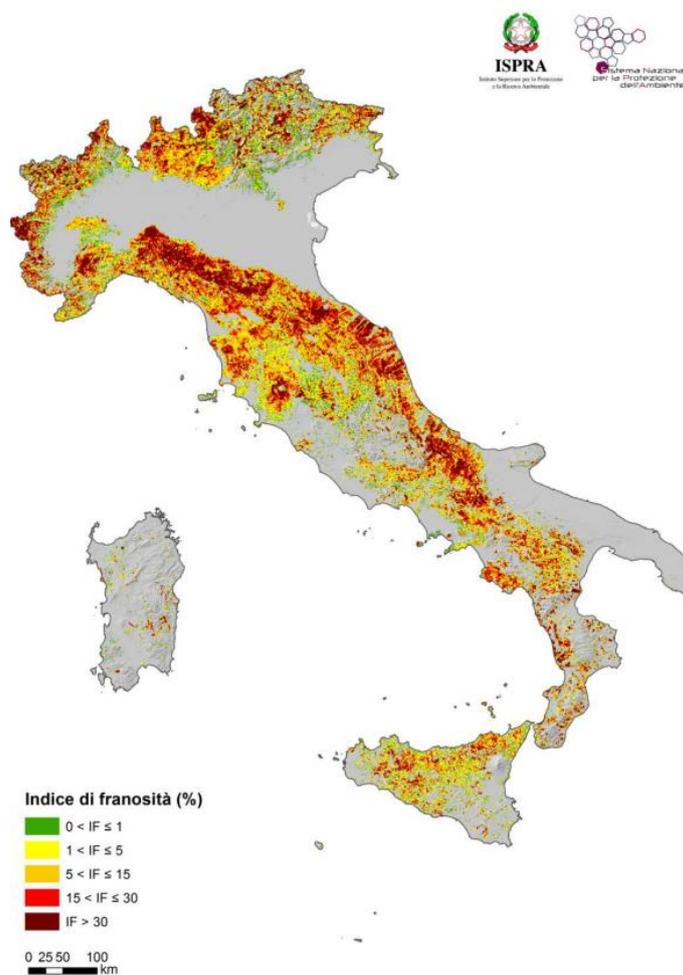


Figura 7: Indice di franosità del territorio italiano (Trigila et al., 2021).

Per la quantificazione del fenomeno sul territorio nazionale, viene utilizzato un indicatore denominato indice di franosità (figura 7), il quale indica il rapporto tra la superficie franata e l'area totale per ciascuna Regione o Provincia Autonoma, calcolato utilizzando come maglia geografica un quadrato di lato 1km (Trigila et al., 2021).

I parametri di maggior rilievo, contenuti nella tabella 3, sono l'area totale interessata da fenomeni franosi e l'indice di franosità su area montano-collinare, in quanto quest'ultimo indica l'incidenza delle aree franate sulle porzioni di territorio maggiormente soggette a fenomeni gravitativi. I dati relativi ad alcune regioni del sud come Calabria, Sicilia e Basilicata sono sottostimati poiché è stata data precedenza al rilievo e all'analisi dei luoghi in cui sorgono insediamenti umani e in cui transitano importanti infrastrutture di comunicazione. (Trigila & Iadanza, 2007).

Regione / Provincia autonoma	Area Regione/ Provinci a Autonom a	Numero di frane	Numer o di eventi franosi princip ali 2020	Densi tà delle frane	Area interess ata da frane	Indice di Franosi tà	Indice di Franosi tà su territor io montan o- collinar e
	<i>km²</i>	<i>n.</i>	<i>n.</i>	<i>n./10 0 km²</i>	<i>km²</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
Piemonte	25.387	36.781	12	145	2.410	9,5	12,8
Valle d'Aosta	3.261	5.812	3	178	607	18,6	18,6
Lombardia	23.863	142.007	25	595	3.880	16,3	34,2
Bolzano- Bozen	7.398	10.978	1	148	806	10,9	11,1
Trento	6.207	9.397	11	151	888	14,3	14,6
Veneto	18.345	9.445	16	51	232	1,3	3,2
Friuli- Venezia Giulia	7.932	5.822	2	73	526	6,6	11,7
Liguria	5.416	13.475	8	249	536	9,9	10,1
Emilia- Romagna	22.445	79.893	1	356	2.738	12,2	24,4
Toscana	22.987	115.625	7	503	2.541	11,1	13,1

Umbria	8.464	34.573	3	408	654	7,7	8,7
Marche	9.401	39.833	5	424	1.723	18,3	19,9
Lazio	17.232	10.548	6	61	400	2,3	2,9
Abruzzo	10.831	8.493	4	78	1.242	11,5	11,9
Molise	4.460	23.940	1	537	623	14,0	14,8
Campania	13.671	23.439	7	171	977	7,1	8,8
Puglia	19.541	843	0	4	84	0,4	1,0
Basilicata	10.073	17.673	0	175	774	7,7	8,2
Calabria	15.222	10.100	3	66	885	5,8	6,4
Sicilia	25.833	24.401	3	94	1.238	4,8	5,5
Sardegna	24.099	1.523	4	6	186	0,8	0,9
ITALIA	302.068	624.601	122	207	23.950	7,9	10,6

Tabella 3: Quantificazione dei fenomeni franosi su scala regionale (ISPRA²⁴)

In seguito all'individuazione delle aree interessate da frane l'ISPRA si occupa di effettuare una classificazione in base al grado di pericolosità, conseguentemente individua gli interventi attuabili all'interno delle aree stesse. Le classi di pericolosità da frane sono cinque e sono contenute all'interno del PAI:

- Pericolosità molto elevata (P4)

Le aree P4 interessano circa 9.500 km² pari al 3,1% del territorio italiano, al cui interno sono consentiti: gli interventi di demolizione senza ricostruzione, gli interventi strettamente necessari atti a migliorare²⁵ le condizioni strutturali degli edifici al fine di preservare la pubblica incolumità, gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria, gli interventi di infrastrutturazione dichiarati essenziali se non delocalizzabili, gli interventi di bonifica dei siti contaminati, gli interventi di consolidamento e restauro dei beni culturali e le pratiche agricole e forestali.

- Pericolosità elevata (P3)

Le aree P3 interessano circa 16.800 km² pari al 5,6% del territorio italiano e oltre agli interventi permessi per P4 sono generalmente consentiti interventi di ampliamento volumetrico con il fine di migliorare le condizioni igienico-sanitarie,

²⁴ Report | Annuario dei Dati Ambientali (isprambiente.it).

²⁵ Non sono possibili aumenti volumetrici né cambi di destinazioni d'uso.

realizzare impianti di trattamento delle acque reflue e l'ampliamento di quelli esistenti, il tutto solo previo studio di compatibilità.

- Pericolosità media (P2)

Le aree P2 interessano circa 14.500 km² pari al 4,8% del territorio italiano, gli interventi ammissibili sono disciplinati dagli strumenti urbanistici. Generalmente gli interventi ammissibili sono soggetti a studio di compatibilità al fine di garantire la sicurezza, la stabilità e la non alterazione dei processi geo-morfologici

- Pericolosità moderata (P1)

Le aree P1 interessano circa 12.500 km² pari al 4,2% del territorio italiano, gli interventi ammissibili sono quelli consentiti dalla pianificazione urbanistica e territoriale.

- Aree di attenzione (AA)

Le AA interessano circa 7.000 km² pari al 2,3% del territorio italiano, sono aree alle quali non è stato assegnato un livello di pericolosità specifico ma su cui potrebbero verificarsi possibili scenari di dissesto. Eventuali interventi da realizzarsi nelle suddette aree sono da sottoporre ad un adeguato studio geomorfologico del sito.

La sommatoria dei cinque livelli di pericolosità genera un'estensione areale di 60.481 km² pari al 20% dell'intero territorio nazionale, la cui distribuzione geografica è mostrata all'interno della figura 8.

Nel confronto tra gli scenari regionali di pericolosità individuati dal PAI emerge un quadro eterogeneo con difformità dovute alle diverse metodologie di valutazione della pericolosità da frana. Infatti, nella valutazione dei livelli di pericolosità (figura 8) si osserva la compresenza di due metodologie, la prima classifica solo i poligoni di frana, la seconda l'intero territorio di regionale. Alla prima metodologia appartengono ad esempio i bacini idrografici dell'alto Adriatico e la Provincia Autonoma di Bolzano, alla seconda la Regione Valle d'Aosta, la Provincia Autonoma di Trento e il Bacino dell'Arno. Al contrario, come mostrato nella figura 7, l'inventario

IFFI presenta un grado di omogeneizzazione territoriale molto più elevato su tutto il territorio nazionale.

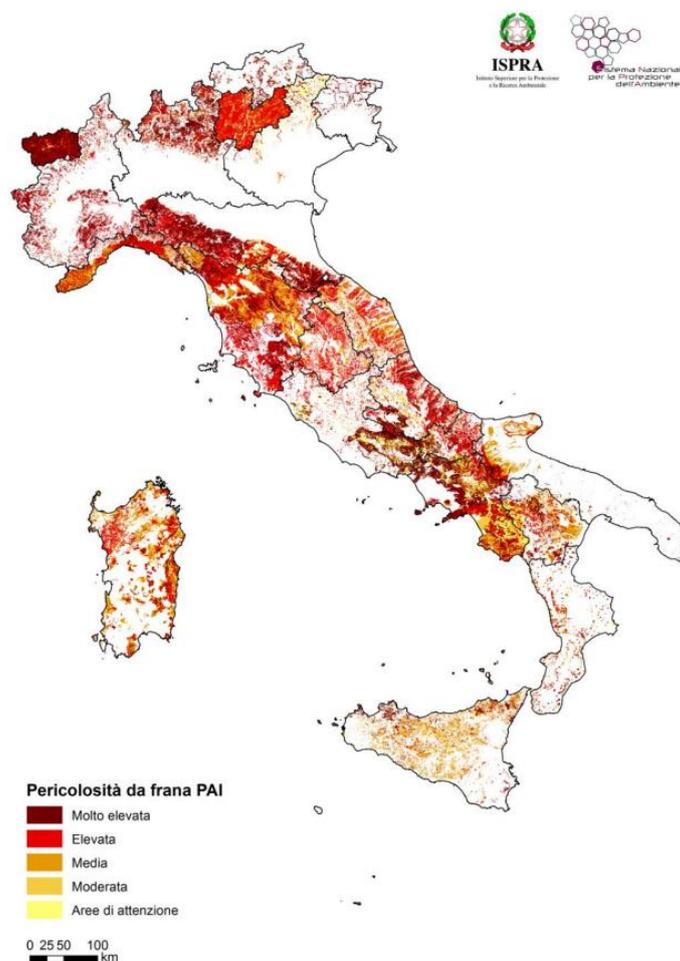


Figura 8: Distribuzione delle aree soggette a pericolosità da frana sul territorio italiano (Trigila et al., 2021).

Il grafico 2 facilita una comprensione dei livelli di pericolosità a livello regionale, in cui su tutte emerge la Valle d'Aosta con oltre l'80% di territorio comunale ricadente in aree a pericolosità elevata o molto elevata. Pur avendo l'incidenza più elevata la Valle d'Aosta con i suoi 2.671 km² la regione è la terza regione italiana per superfici interessate da pericolosità P3 o P4 da frana, dopo Toscana (3.707,9 km²) e Emilia-Romagna (3.270,3 km²).

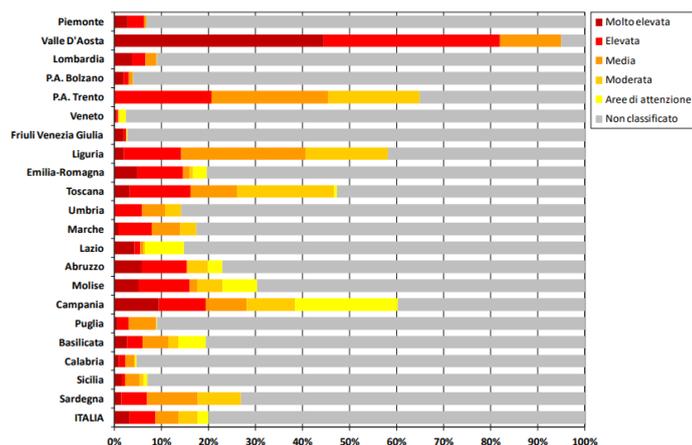


Grafico 2: Distribuzione percentuale delle aree soggette a pericolosità su base regionale (Trigila et al., 2021).

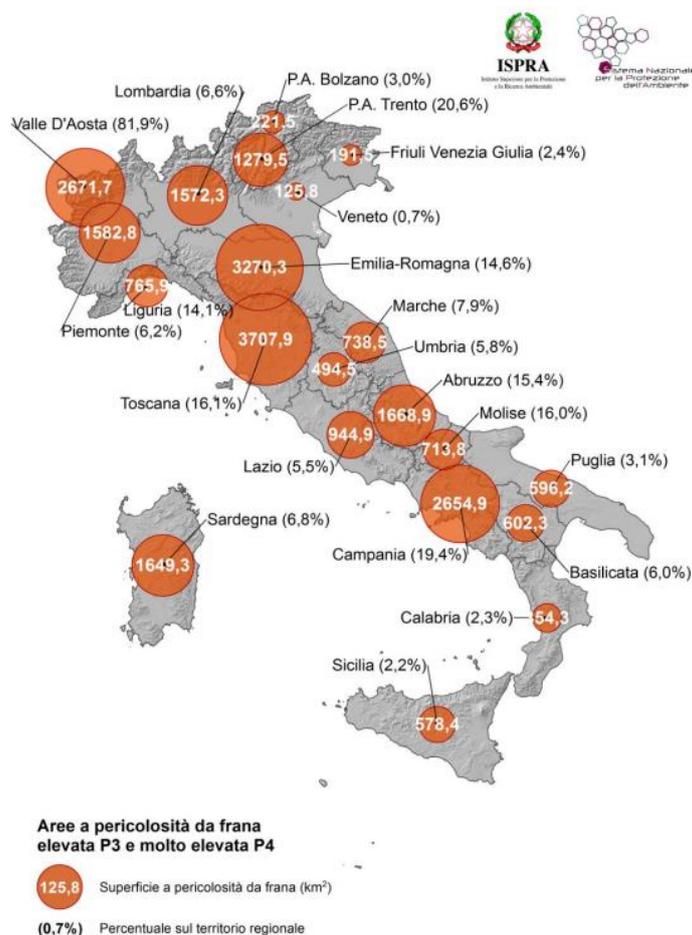


Figura 9: Quantificazione delle aree soggette a pericolosità P3 e P4 su base regionale (Trigila et al., 2021).

Il rilievo delle frane avviene per il 44,2% tramite fotointerpretazione di immagini satellitari o fotogrammetriche, per 30,1% tramite ricerca di dati storici o testimonianze d'archivio, per il 7,8% con il rilevamento di campagna, mentre nel 17% vi è la combinazione di più metodi di rilievo (Trigila et al., 2021). L'utilizzo di più metodologie leviga gli errori relativi a ciascuna metodologia di rilievo.

Gli eventi franosi possono avere velocità di avanzamento e intensità piuttosto differenti tra loro, si stima che in Italia il 28% dei fenomeni gravitativi sia costituito da eventi con elevate velocità come crolli, *mud e debris flow*, i quali possono raggiungere le velocità di alcuni metri al secondo, causando danni ingenti. Nell'archivio IFFI si registrano numero eventi a cinematismo rapido, tra i più recenti si richiamano i casi presso l'Alta Val d'Isarco (2012), San Vito Cadore (BL) (2015), Madonna del Monte (SV) (2019) e Chiesa in Valmenco (SO) (2020). Le tipologie franose come le colate lente, le deformazioni profonde di versante e le frane complesse possono causare ingenti danni agli insediamenti e alle infrastrutture come successo nel 2005 a San Fratello (ME), a Montaguto (AV) (2010) e a Capriglio di Tizzano Val Parma (PR) nella primavera del 2013. Nel grafico 3 è illustrata la ripartizione per tipologia di frana fornita da IFFI (Trigila et al., 2021).

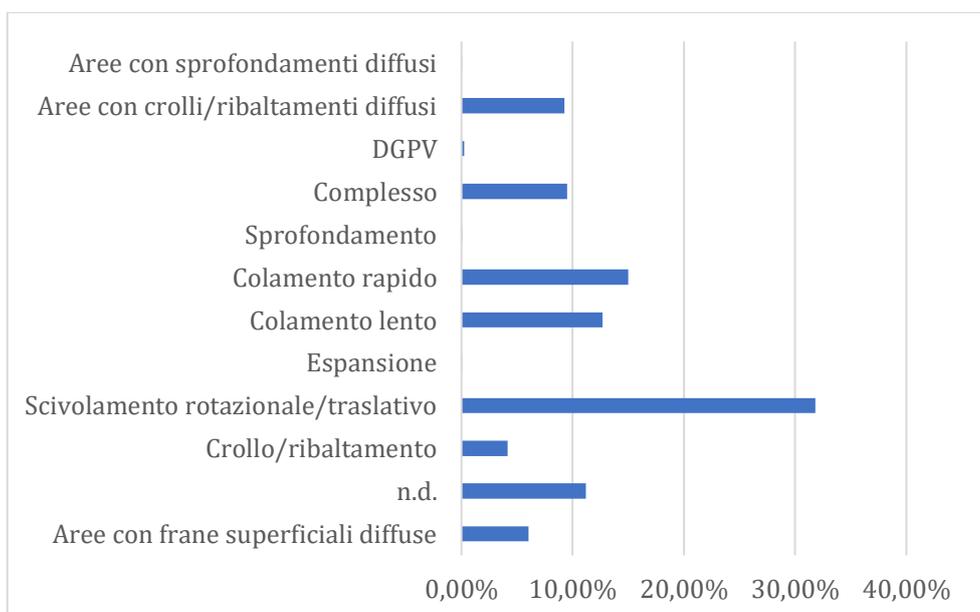


Grafico 3: Classificazione delle frane in base alla tipologia di movimento censite dall'inventario IFFI sul territorio italiano (Trigila et al., 2021).

Per mettere in luce gli eventi franosi di maggior rilievo si ricorre al lessico di eventi franosi principali (Trigila et al., 2021). Con tale termine si indicano quegli eventi che vanno a causare impatti rilevanti sulla popolazione e sulle cose, dunque quegli avvenimenti che portano alla perdita di vite umane, evacuazioni, danni agli edifici e alle infrastrutture e ai beni culturali. Tale evento può riguardare una o più frane, causate dal medesimo fattore d'innescò, che avvengono all'interno di uno specifico periodo²⁶.

Grazie alla costante attività di raccolta dati e alla mappatura degli eventi gravitativi l'ISPRA dal 2010 ogni anno rende disponibile al pubblico e alle amministrazioni l'Annuario dei Dati Ambientali al cui interno sono raccolti i principali impatti generati dagli eventi franosi principali. Dal 2016 si sono registrati ogni anno più di 100 eventi franosi principali, l'anno in cui se ne sono verificati il maggior numero è il 2019 con 220 eventi, mentre il 2020 con 122 eventi è quello in cui ne sono stati registrati di meno.

Nel decennio 2010-2020 tra le provincie più colpite²⁷ troviamo Bolzano, Genova, Salerno, Messina, Belluno, Trento, Aosta e Teramo. Nel medesimo periodo le perdite umane hanno riguardato prevalentemente persone alla guida investite da crolli o colate improvvise di fango/detriti

Per quanto riguarda la valutazione dei processi di deformazione del suolo, la progettazione di opere di stabilizzazione, la valutazione della loro efficacia nel tempo, la pianificazione del territorio e delle situazioni emergenziali sono fondamentali per il monitoraggio dei fenomeni gravitativi (Dei Cas et al., 2021). La standardizzazione del monitoraggio a livello nazionale avviene tramite le Linee

²⁶ Generalmente il periodo temporale di riferimento è quello delle 24 ore successive all'innescò del primo movimento franoso.

²⁷ Le provincie elencate sono quelle in cui sono stati riscontrati più di 40 eventi franosi principali nel decennio 2010-2020.

guida SNPA²⁸ per il monitoraggio delle frane, all'interno delle quali ARPA fornisce il proprio contributo in un'ottica di potenziamento dei sistemi di monitoraggio, che attualmente sono censiti su base regionale. Il Piemonte, con 385 sistemi di monitoraggio in situ, è la regione con il maggior numero di sistemi di monitoraggio. Su 616 sistemi di monitoraggio presenti sul territorio italiani solo il 65% è attivo. Gran parte dei sistemi di monitoraggio (93%) hanno lo scopo esclusivo di raccogliere dati, mentre il 7% ha lo scopo di fornire allerte. I principali strumenti di monitoraggio utilizzati sono distrometri²⁹, inclinometri³⁰ e piezometri³¹; strumentazioni topografiche quali stazioni totali e GNSS; strumentazioni per effettuare misurazioni idrometriche come pluviometri³², termometri e nivometri³³ (Trigila et al., 2021).

1.3.3 Alluvioni

Le alluvioni sono eventi naturali derivanti da precipitazioni di intensità variabile che colpiscono ciclicamente le pianure alluvionali. Tra i fattori che scaturiscono i differenti scenari d'innescio si trovano, da un lato caratteristiche geometriche, dunque, la morfologia dell'asta fluviale e del relativo bacino, dall'altro le caratteristiche idrologiche riferite alle piogge che interessano il bacino, tra cui l'intensità, la durata, la frequenza e la tipologia di precipitazione (Gallozzi et al., 2020).

²⁸ Sistema Nazionale per la Protezione Ambientale.

²⁹ Strumento per misurare con elevata precisione la variazione di distanza tra due punti fissi. Il distometro si compone complessivamente di un corpo metallico sul quale sono montati una bindella centimetrata di acciaio inox con fori di riscontro ogni 25 mm e un calibro digitale.

³⁰ Strumento per misurare gli spostamenti a componente orizzontale del terreno, misurabili a differenti profondità dei punti all'interno di un tubo inclinometrico ancorato al terreno rispetto ad una verticale.

³¹ Si tratta di un pozzo di osservazione avente lo scopo di misurare il carico idraulico di una falda ad una certa profondità. L'uso di piezometri consente di ricostruire la superficie piezometrica della falda, ossia la superficie lungo la quale la pressione dell'acqua è pari a quella atmosferica. Tramite l'utilizzo di più piezometri all'interno dell'area di interesse è possibile ricostruire la superficie piezometrica.

³² Strumento per misurare la quantità di pioggia caduta espressa in mm. La caduta di 1mm di pioggia equivale a 1L/m².

³³ Strumento utilizzato per la misurazione della quantità di neve caduta.

Per lo studio delle caratteristiche geometriche e morfologiche dei bacini e delle relative aste fluviali si ricorre all'utilizzo di alcuni parametri utili a spiegare il comportamento dei corsi d'acqua durante eventi alluvionali.

Gli indicatori utilizzati per lo studio dei parametri morfologici sono (Dispense Prof. Ferrari):

- area e perimetro del bacino;
- altitudine massima minima e media;
- curva ipsografica che indica la distribuzione orografica in percentili;
- rapporto di circolarità che esprime quanto è circolare la forma del bacino;
- coefficiente di compattezza che esprime la regolarità del perimetro;
- fattore di forma che indica la sinuosità dell'asta principale;
- rapporto di allungamento che indica quanto è allungato il perimetro del bacino;
- lunghezza e pendenza dell'asta principale.

La combinazione dello studio delle caratteristiche morfologiche e di quelle idrologiche permette di stimare le capacità degli alvei in termini di portata m^3/s . Quando le portate superano le soglie di capacità massima i corsi d'acqua possono presentare scenari piuttosto differenti tra loro. Infatti, se si è in presenza di un corso d'acqua poco antropizzato, dunque con zone naturali di laminazione o espansione delle piene, è possibile contenere gli effetti della piena all'interno del letto alluvionale del fiume; contrariamente, in assenza di tali aree naturali, si potrebbe verificare il traboccamento del corso d'acqua oltre i suoi argini coinvolgendo ampie porzioni di territorio con danni più o meno ingenti a seconda della fattispecie. Per il contenimento delle piene si utilizzano le arginature, le quali hanno il compito di aumentare la capacità massiva d'invaso di un corso d'acqua e dunque di ridurre il

livello di rischio ma, in caso di rottura³⁴ o sormonto dell'argine stesso, possono generarsi danni rilevanti sul territorio circostante (Gallozzi et al., 2020).

Come introdotto precedentemente anche precipitazioni di tipo convettivo e dunque caratterizzate da durate brevi, forti intensità e concertazioni geografiche, possono essere fattori d'innesco per aste fluviali contenute all'interno di bacini di piccole dimensioni, i quali in poche ore possono essere messi in crisi dalle elevate quantità di piogge cadute all'interno dei confini idrografici. Per quanto riguarda i corsi d'acqua caratterizzati da un andamento torrentizio, caratterizzati da portate fortemente variabili, il fattore di rischio è determinato dalla quantità di trasporto solido generato a monte, il quale può causare fenomeni erosivi delle sponde e dell'alveo del torrente e compromettere le infrastrutture che si trovano lungo il suo corso come ponti e opere di difesa (Gallozzi et al., 2020).

Come spiegato nel paragrafo 1.4 di questo capitolo, l'azione dell'uomo ed il conseguente processo di antropizzazione e impermeabilizzazione del territorio ha comportato una minor capacità di evapotraspirazione e infiltrazione delle acque piovane, con conseguente crescita della massa e della velocità dell'acqua che fluisce all'interno degli alvei.

Sulla base dell'art. 6³⁵ della Direttiva Alluvioni, l'ISPRA ha definito le aree allagabili italiane classificandole secondo tre livelli di pericolosità:

- *elevata* probabilità di alluvioni (HPH);
- *media* probabilità di alluvioni (MPH);
- *bassa* probabilità di alluvioni (LPH).

³⁴ Le principali cause di rotture degli argini sono: fenomeni erosivi che intaccano il piede dell'argine e lo fanno franare verso il fiume; sfiancamento in seguito ad una piena prolungata per cui l'argine perde di consistenza e frana lato campagna; sifonamento quando l'acqua permea al di sotto dell'argine o al suo interno e fuoriesce dal lato campagna.

³⁵ Recepito in Italia tramite D.Lgs. 49/2010.

Sulla base del D.Lgs. 49/2010 ad ogni livello di pericolosità è associato un tempo di ritorno medio, compreso tra i 20-50 per HPH, tra i 100 e 200 per MPH e oltre 200 per LPH.

In Italia le aree allagabili HPH hanno un estensione di circa 16.000 km² (5,4% del territorio nazionale), le aree allagabili MPH circa 30.0000 km² (10% del territorio nazionale), le aree allagabili LPH circa 42.0000 km² (14% del territorio nazionale) (Trigila et al., 2021).

Il grafico 4 mette in evidenza il quadro regionale sulla quantità di territorio interessato da pericolosità secondo i tre livelli di probabilità. La regione con i valori più elevati è evidentemente l'Emilia-Romagna in cui il 45,6% del territorio regionale è esposto allo scenario MPH, segue la Calabria con il 17,2%. Il territorio emiliano deve questi elevati valori alla sua struttura morfologica a prevalenza pianeggiante al cui interno scorre oltre al suo collettore principale, il Po, una densa rete di collettori di bonifica, corsi d'acqua minori spesso caratterizzati da un elevato grado di confinamento; Inoltre, per scenari MPH e LPH il reticolo di bonifica risulta insufficiente con conseguente allagamento di ampi tratti di territorio.

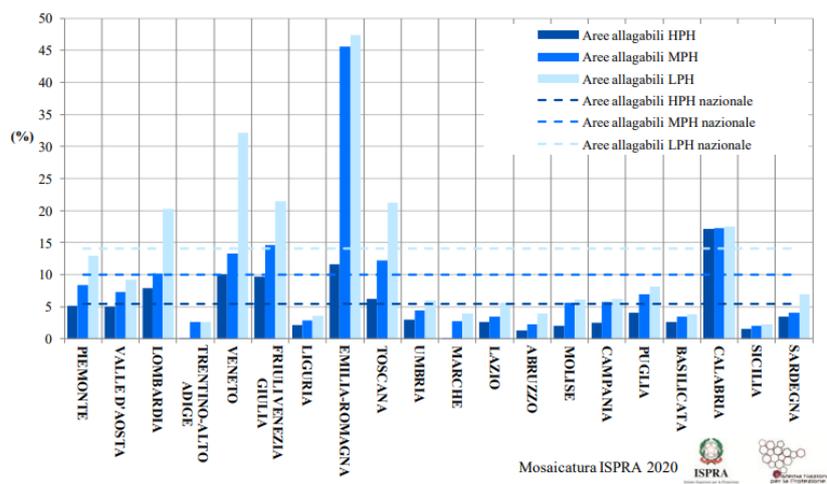


Grafico 4: Percentuale di territorio regionale interessato da pericolosità di allagamento (Trigila et al., 2021).

1.3.4 Contesto giuridico e strumenti di pianificazione vigenti

All'interno di questo paragrafo verrà illustrata la ricostruzione del quadro normativo italiano in tema di dissesto idrogeologico, prendendo in esame le direttive europee, le leggi nazionali e gli strumenti pianificatori per la gestione e prevenzione del rischio.

Il contrasto al rischio idrogeologico può trovare sviluppo solo se inquadrato come economicamente conveniente, poiché da ciò dipende la possibilità di concretizzare gli interventi suggeriti da una strutturata attività scientifica nel campo delle scienze naturalistiche e ingegneristiche e della pianificazione territoriale. Tutto ciò, a sua volta, necessita di rispondere ad un sistema legislativo di riferimento al cui interno può operare e su cui si basano le attività delle autorità pubbliche responsabili; questo è l'approccio che ha, in modo lento e discontinuo, acquisito l'Italia post-unitaria (Gisotti, 2012). In tale senso è utile ricostruire il quadro in cui si è evoluta la legislazione italiana, specialmente nel secondo dopoguerra, in materia di prevenzione del dissesto idrogeologico e protezione civile.

Al fine di sviluppar una esaustiva esegesi del tema è importante partire da cosa si intende, all'interno del quadro normativo nazionale, con il termine rischio idrogeologico. Il concetto è definito all'interno del D.L. 180/1998 e comprende sia il rischio idraulico che quello geomorfologico, il primo comprende i fenomeni alluvionali, il secondo quelli gravitativi; tra i principali fattori d'innescio dei due fenomeni rientrano le precipitazioni caratterizzate da elevate intensità.

All' art. 1 commi 1 e 2 del D.L. 180/1998 viene esplicitato il modello di valutazione del rischio idrogeologico, strutturato in maniera da consentire un'assunzione qualitativa del livello di rischio, il quale è ottenuto sovrapponendo gli scenari di pericolosità agli usi del suolo. Tramite tale metodologia è possibile associare ad aree ad uguale pericolosità differenti scenari di rischio basati sulla presenza o meno di elementi soggetti a vulnerabilità. Per esemplificare il concetto, a parità di pericolosità, un'area densamente abitata avrà un fattore di rischio più elevato rispetto ad un area non abitata.

Da questo modello di valutazione derivano quattro classi di rischio:

- R1: rischio moderato;
- R2: rischio medio;
- R3: rischio elevato;
- R4: rischio molto elevato.

I livelli di rischio vengono dunque identificati sovrapponendo gli scenari di pericolosità con gli usi del suolo. Il livello R4 è raggiunto in tutte quelle aree soggette a pericolosità P4 in cui sono presenti i seguenti usi del suolo (dispense Prof. Ferrari):

- aree urbane bassa/alta densità;
- edifici pubblici;
- insediamenti produttivi industriali;
- strade statali;
- autostrade;
- ferrovie.

L'Italia è arrivata tardi nella promulgazione di una legge che imponesse di integrare, all'interno degli strumenti urbanistici e territoriali, norme che tenessero in considerazione il verificarsi di eventi naturali funesti come frane e alluvioni (Trigila et al., 2021). Inoltre, in Italia, la produzione di atti legislativi per contrastare il rischio idrogeologico si è storicamente attivata seguendo una logica emergenziale e dunque promulgando leggi in risposta ad eventi calamitosi che hanno scosso la Nazione (Gisotti, 2012; Bignami, 2010). Questa tendenza non appartiene solo del contesto italiano ma, è riscontrabile anche a livello europeo e mondiale; infatti, sovente, il clamore mediatico generato da eventi dall'elevato potere distruttivo, può essere capace di concentrare il dibattito pubblico sul tema facendo emergere buone idee e i finanziamenti necessari per realizzarle (Bignami, 2010).

A livello costituzionale, secondo l'aggiornamento del titolo V del 2001, è sancito che la protezione civile e il governo del territorio sono una funzione pubblica esercitata dalle istituzioni della Repubblica e la produzione legislativa in merito, secondo l'art.

117 è *materia concorrente* stato regione. Lo stato, dunque, ha il compito di promulgare leggi che delineino i principi fondamentali mentre, alle regioni è demandato il compito della legislazione di dettaglio (Di Lascio, 2004).

Gli attuali strumenti normativi che compongono il quadro di riferimento generale per la Protezione Civile sono i seguenti tre (Bignami, 2010; Di Lascio, 2004):

- la Legge n. 225/92 *“Istituzione del Servizio Nazionale della Protezione Civile”* rappresenta il riferimento legislativo fondamentale in materia di protezione civile, la quale disciplina gli elementi preposti ad agire al fine di proteggere persone e beni dal verificarsi di eventi catastrofici. Con evento catastrofico si intende un fenomeno naturale o antropico capace di provocare danni alla popolazione, alle sue attività e a tutto ciò che insiste sul territorio;
- il Decreto Legislativo n. 112/1998 *“Conferimento di funzioni e compiti amministrativi dello Stato alle regioni ed agli enti locali, in attuazione del Capo I della legge n.59/1997”*.
- la Legge n. 343/2001 *“Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 7 settembre n. 343/2001, recante disposizioni urgenti per assicurare il coordinamento operativo delle strutture preposte alle attività di protezione civile”*

La Protezione Civile è un organo complesso della Repubblica italiana ed è disciplinato da un sistema coordinato di competenze in cui concorrono lo Stato, le Regioni, le Province e Città Metropolitane, Comuni, gli istituti di ricerca, gli enti professionali e di volontariato ed ulteriori enti pubblici e privati. In questo sistema articolato al Presidente del Consiglio dei ministri è affidato il compito di *impulso e coordinamento* (Bignami, 2010).

In Italia, l’approccio legislativo di tipo emergenziale si manifesta già nei primi anni successivi alla Seconda guerra mondiale, fase della ricostruzione del paese, in cui si manifestarono numerosi eventi calamitosi, come le alluvioni in Piemonte³⁶ nel 1948,

³⁶ Oltre 50 vittime e numerosi dispersi.

in Campania³⁷, a Cosenza³⁸ e a Reggio Calabria nel 1949, a Como³⁹ e nel Polesine⁴⁰ nel 1951. L'evento del 1951 nel Polesine ebbe un tale potere distruttivo da suscitare una forte reazione emotiva nel paese, con un'importante mobilitazione in nome della solidarietà da parte della cittadinanza. In risposta a un tale disastro, capace di stravolgere la coscienza di un'intera nazione, nel 1952 il parlamento promulgò la L. n. 184/1952 *“regolazione dei corsi d'acqua”* la quale si proponeva la *“lotta contro l'erosione del suolo e la difesa del territorio dalle inondazioni”* e l'ambizioso obiettivo di realizzare entro sei mesi un *“piano orientativo per tutto il complesso delle opere di difesa nei corsi d'acqua naturali all'interno del territorio della repubblica”* (Bignami, 2012; Gisotti, 2012).

Nonostante la risposta governativa nei due anni successivi si presentarono ulteriori alluvioni che coinvolsero pesantemente di Reggio Calabria nel 1953 con 100 vittime e Salerno nel 1954 con 318 vittime. La risposta (mai approvata) fu il disegno di legge presentato dal Ministro dell'Interno Tambroni recante *“Disposizioni per la protezione civile in caso di eventi bellici e calamità naturali”* al cui interno si evidenziava la necessità di un miglior sistema di coordinamento da parte dello Stato, il quale deve avere un sistema di coordinamento organico e unitario, che non demandi i compiti emergenziali esclusivamente alle forze dell'ordine. Lo stato, dunque, deve assumere un ruolo di coordinamento portando avanti un'attività di prevenzione e informazione sui pericoli (Bignami, 2010).

La produzione legislativa degli anni '60 ebbe esiti migliori e più duraturi rispetto al decennio precedente. Con la Legge n. 469/1961 *“Ordinamento dei servizi antincendio e del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco”* si attribuì al Ministero dell'Interno i servizi di prevenzione e estinzione incendi, la tutela tecnica dell'incolumità umana,

³⁷ 17 morti e circa 300 dispersi.

³⁸ 77 vittime tra le due città.

³⁹ Due alluvioni nello stesso anno con 34 vittime totali.

⁴⁰ In seguito alla rottura degli argini del Po, 38 comuni furono coinvolti nell'alluvione, ci furono 130 morti, 160.000 persone evacuate, oltre 5.000 abitazioni inagibili, 21.000 ettari di raccolto perduti.

l'addestramento e l'impiego delle unità di protezione civile, inoltre, si statalizzò definitivamente il corpo dei Vigili del Fuoco.

Gli anni '60 furono comunque estremamente funesti per il territorio italiano e la sua popolazione, basti ricordare il crollo della diga del Vajont nel 1963 con oltre 2.000 vittime, le alluvioni di Firenze, Bolzano, Trento, Grosseto, Udine, Belluno, Padova e Brescia e la Frana di Agrigento, tutti eventi verificatisi nel 1966⁴¹, il terremoto del Belice e le frane di Genova nel 1968.

A seguito del funesto 1966, viene promulgata frettolosamente una delle molte leggi *post-disastro*, la n. 632/1967 "*Autorizzazione di spesa per l'esecuzione di opere di sistemazione e difesa del suolo*" a carattere prevalente di straordinarietà, grazie alla quale verrà costituita un'apposita commissione per esaminare le problematiche di carattere tecnico, economico e legislativo al fine di intensificare gli interventi per la sistemazione idraulica e la difesa del suolo, sulla base di una completa e aggiornata programmazione. La "*Commissione interministeriale per lo studio e la sistemazione idraulica e della difesa del suolo*" diventerà nota come *Commissione de Marchi*, grazie al suo presidente Prof. Giulio De Marchi (Bignami, 2010). La relazione conclusiva della Commissione (1970), sollevò l'evidenza che tra il 1953 e il 1968 la spesa pubblica per la difesa del suolo fu talmente esigua da non permettere nemmeno di far fronte alla manutenzione ordinaria delle opere, facendo emergere il controverso rapporto tra principi e sostanza all'interno delle politiche italiane per la riduzione del rischio idrogeologico (Gisotti, 2012). La commissione stimò per il trentennio successivo (1970-2000) una spesa di circa 300 miliardi di lire per portare avanti azioni di contrasto al rischio calamità. La commissione inoltre, poneva la necessità di uniformare gli indirizzi e le attuazioni su tutto il territorio nazionale, procedendo esclusivamente in riferimento ai bacini idrografici come sotto unità territoriale, dunque esulando dai confini amministrativi (Gisotti, 2012). Si pose dunque la necessità di individuare un'autorità di riferimento (venne proposto il c.d.

⁴¹ Il bilancio complessivo delle alluvioni elencate fu, esclusa la Toscana, di 88 morti e quarantamila sfollati.

“Magistrato delle acque”) il cui compito fu quello di redigere *Piani di bacino*, poiché i bacini oltre ad essere luoghi fisici, sono anche luoghi economici ascrivibili come unità territoriali di pianificazione.

L'anno successivo venne approvata un'altra norma fondamentale per la gestione territoriale la c.d. “*Legge Ponte*” L. 765/1967, la quale modificava i contenuti della Legge Urbanistica italiana n. 1150/1942, con il fine di porre un freno all'urbanizzazione incontrollata che aveva caratterizzato l'Italia della ricostruzione post-bellica, rendendo così obbligatoria la previsione dei piani regolatori per tutti⁴² i comuni italiani.

In seguito all'alluvione⁴³ che colpì Genova nell'ottobre del 1970, venne promulgata la Legge n. 996/1970 “*Norme sul soccorso e l'assistenza alle popolazioni colpite da calamità*” tramite cui si spostò definitivamente i compiti in materia di protezione civile dal Ministero dei LL.PP. a quello dell'Interno. Secondo Pepe (1993) tale norma, nonostante fosse ancora basata sul concetto di soccorso e sulla convinzione che gli eventi calamitosi fossero di carattere straordinario, istituì il primo riferimento normativo per l'organizzazione di un servizio nazionale di protezione civile, anche tramite la “smilitarizzazione” del corpo dei Vigili del Fuoco. Nella norma viene definito il concetto di catastrofe e calamità naturale come “*l'insorgenza di situazioni che comportino grave danno e pericolo di danno all'incolumità delle persone e ai beni, e che per loro natura e estensione debbano essere fronteggiate con interventi tecnici straordinari*”. Grazie alla nuova norma si riconosce che per ottenere una maggiore efficacia delle operazioni per il contrasto delle calamità naturali è necessario un sistema sussidiario⁴⁴ per lo studio, la prevenzione e la divulgazione in materia di disastri (Bignami, 2010). Nonostante le novità concettuali e sostanziali relative all'organizzazione dello Stato in materia di gestione disastri introdotte dalla L. n.

⁴² Dunque, non più solamente per una serie di comuni ineriti in apposite liste.

⁴³ 35 vittime e 2.000 sfollati.

⁴⁴ In quel momento si parla di sussidiarietà tra il livello statale, quello regionale e quello provinciale, i comuni, nonostante le molteplici proposte di legge di quegli anni ancora non rientravano negli enti preposti alla protezione civile.

966/1970 i miglioramenti furono lenti⁴⁵ e limitati per tutto il decorrere degli anni '70. Inoltre, il principale difetto di tale legge era che l'attuazione di molti suoi contenuti era demandata alla produzione di un regolamento attuativo, il quale fu approvato solo undici anni dopo, in attesa del quale rimanevano in vigore le norme del 1927-28 (Bignami, 2010).

Negli anni successivi, grazie all'emanazione del D.P.R. n. 616 del 1977, secondo cui all'art. 7 *“Le regioni in tutte le materie delegate dallo Stato possono emanare norme legislative di organizzazione o di spesa, nonché norme di attuazione ai sensi dell'ultimo comma dell'art. 117 della Costituzione”* continua a crescere la considerazione istituzionale della Protezione Civile, la quale non è più una mera sistematizzazione di interventi ma una vera e propria funzione politica di governo (Bignami, 2010). Inoltre, il D.P.R. n. 616/1977 trasferisce alle regioni le funzioni concernenti la sistemazione idrogeologica e la conservazione del suolo, la manutenzione forestale e le funzioni in materia di determinazione di vincoli idrogeologici (Gisotti, 2012)

Nonostante i provvedimenti degli anni '70, le alluvioni della Calabria e della Sicilia (1973), del Piemonte e della Liguria (1977) e il disastro ambientale di Seveso (1976), dimostrarono che l'impegno rivolto alla protezione della popolazione dai disastri, fu tradotto meramente in enunciati e disposizioni legislative, senza una sostanziale applicazione territoriale dei principi contenuti nelle leggi.

Nel 1981, in seguito al terremoto dell'Irpinia (1980) venne approvato con D.P.R. n. 66/1981 il *“Regolamento di esecuzione della L. 966/1970, recante norma sul soccorso e l'assistenza alle popolazioni colpite da calamità – Protezione Civile”*. Tramite questo provvedimento si giunse finalmente a compimento di quanto avviato dalla L. n. 966/1970, tramite la completa definizione amministrativa e gestionale della Protezione Civile italiana. La Protezione Civile diviene, dunque, *Compito primario dello Stato* a cui è affidata anche l'attività di prevenzione dei disastri e dello studio dei fattori determinanti, l'attività principale rimane comunque quella di soccorso.

⁴⁵ Nella legge veniva infatti previsto il coinvolgimento delle neonate Regioni (L. n. 281/1970), le quali, però, erano ancora in costruzione, motivo per cui le disposizioni della legge in merito erano piuttosto contenute.

Un importante riconoscimento della legge è relativo al ruolo dei sindaci, i quali vengono finalmente riconosciuti come Ufficiali di Governo sul proprio territorio.

Sempre sulla forte spinta emotiva evocata da un tragico evento, in questo caso l'incidente di Vermicino (1981) in cui perse la vita il piccolo "Albertino", il governo Spadolini approvò la L. n. 938/1982 *"Interventi urgenti in favore delle popolazioni colpite da calamità naturali o eventi eccezionali"* e istituì per la prima volta il Ministro⁴⁶ per il coordinamento della Protezione Civile (senatore Giuseppe Zamberletti). Nello stesso anno venne istituito il Fondo per la Protezione Civile (L. n. 547/1982) e il Dipartimento di Protezione Civile presso la Presidenza del Consiglio dei ministri presso cui con D.P.C.M 1283/1982 vennero istituite la Commissione Grandi Rischi e un Centro operativo aereo unificato. Nel 1983 venne istituito il Gruppo Nazionale di Vulcanologia e nel 1984 il Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, il Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti e il Comitato Operativo per le emergenze. L'istituzione dei gruppi di sopra citati deriva dalla necessità di inserire nuove figure professionali in grado di svolgere, oltre all'attività di soccorso, anche una fondamentale attività di studio preventivo.

Durante gli anni '80 sono numerosi gli episodi di calamità naturali che si abbattano sul paese tra cui la frana⁴⁷ di Ancona (1982), il crollo della diga⁴⁸ in Val Stava (1985), l'alluvione⁴⁹ in Valtellina (1987).

Nel 1986 nasce il Ministero dell'Ambiente, al quale verrà affidato oltre all'attività di riduzione permanente del rischio, l'attuazione delle disposizioni contenute nella L. n. 979/1982 *"Disposizioni per la difesa del mare"*.

⁴⁶ Ministro senza portafoglio all'interno del ministero dell'interno.

⁴⁷ Frana dall'estensione di oltre 300 ha, capace di danneggiare due ospedali, la facoltà di medicina e provocare l'evacuazione di oltre 3.000 persone.

⁴⁸ 268 vittime.

⁴⁹ Grazie alla preventiva evacuazione di 27.000 persone il bilancio delle vittime fu "contenuto" a 53 persone.

Nel 1988, dodici anni dopo il disastro ambientale di Seveso, viene recepita dall'Italia la prima direttiva europea in materia di incidenti rilevanti che prenderà il nome di direttiva Seveso.

La legge fondamentale in tema di riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo arriva tramite la Legge n. 183/1989 "*Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo*", la quale recepisce gli indirizzi della Commissione De Marchi (Gisotti, 2012). La legge interviene in un quadro legislativo già molto articolato, ma anche confuso, con una non sempre chiara ripartizione delle competenze tra Stato, Regioni e Province e, soprattutto, poco efficace sul piano sostanziale. La legge amplia notevolmente il concetto di difesa del suolo ivi comprendendovi anche il risanamento delle acque, l'uso razionale delle risorse idriche per lo sviluppo socio-economico e soprattutto la tutela degli elementi ambientali associati (Gisotti, 2012). La legge ha inoltre l'intento di innovare culturalmente il concetto di difesa del suolo, il quale non deve essere più visto come una disciplina a sé stante, quanto piuttosto in una più ampia accezione di elemento strutturante per la tutela ambientale.

Inoltre, la L. n. 183/1989 individua i bacini idrografici come unità territoriale di riferimento ed istituisce le Autorità di Bacino⁵⁰ a cui spetta la redazione dei *Piani di bacino idrografico*. L'ottica è quella dell'efficientamento del coordinamento e della cooperazione degli enti territoriali per promuovere la difesa del suolo, la gestione delle piene, il corretto utilizzo della risorsa idrica⁵¹. I piani di bacino sono dotati di potere sovra-ordinato rispetto alla pianificazione locale e hanno il compito di contrastare e controllare l'urbanizzazione incontrollata, regolare o abusiva che sia, nonché l'eventuale sovrasfruttamento delle risorse idriche. I bacini idrografici individuati dalla L. n. 183/1989 hanno dimensioni ampiamente variabili. Essendo

⁵⁰ Ad oggi Autorità di Bacino Distrettuale. Organismo misto, costituito tra Stato e Regioni, operante, sui bacini idrografici, considerati come sistemi unitari e ambiti ottimali per le azioni di difesa del suolo e del sottosuolo, il risanamento delle acque, la fruizione e la gestione del patrimonio idrico e la tutela degli aspetti ambientali ad essi connessi, indipendentemente dalle suddivisioni amministrative.

⁵¹ Integrata dal D.L. 180/1998 al fine di velocizzare l'attuazione della legge 183/1989, e rimediare alle lacune evidenziate dopo le alluvioni di Sarno (SA) e Soverato (CZ).

l'Italia caratterizzata da un gran numero di corsi d'acqua di piccole dimensioni, anche i relativi bacini hanno un'estensione di pochi chilometri quadrati, l'eccezione più significativa è quella rappresentata dal bacino del fiume Po, il quale si estende per circa 70.000 km² (Monacelli & Spiniello, 2018).

Nel 1989 il territorio italiano è stato suddiviso in 47 unità di gestione disposte su quattro livelli territoriali:

- nazionale (Po, Adige, Alto Adriatico, Serchio, Arno, Tevere, Liri-Volturno Garigliano);
- interregionale;
- regionale;
- provinciale (Trento e Bolzano).

Sulle 47 unità di gestione avevano competenza 54 autorità competenti suddivise tra Regioni, Province Autonome, Autorità di Bacino Nazionali, Interregionali e Regionali, il Ministero dell'Ambiente del Territorio e del Mare e il Dipartimento della Protezione Civile Nazionale⁵².

Tre anni dopo la Legge n. 183/1989, a seguito dell'eruzione dell'Etna (1991) viene approvata nel gennaio del 1992 la L. n. 225 "*Istituzione del servizio nazionale di protezione civile*" tramite cui veniva esplicitato che la protezione civile è un *dovere* e un *servizio pubblico* svolto da differenti enti e dai cittadini, la cui attività principale è quella di affrontare gli eventi calamitosi. Tramite la L. n. 225 si iniziano ad affiancare ai *Piani di emergenza* i *Programmi di previsione e prevenzione*; tale scelta sarà fondamentale per il passaggio dalla cultura dell'emergenza a quella della riduzione dei rischi. Inoltre, in questo periodo, grazie alla spinta fornita dalla L. n. 266/1991 "*Legge quadro sul volontariato*" la partecipazione delle associazioni di volontariato ai compiti di protezione civile, inizia a trasformarsi da mera mano d'opera gratuita a competenza specifica dotata di una propria specializzazione e autonomia.

⁵² ISPRA: Idrologia, Idromorfologia, Risorse Idriche, Inondazioni e Siccità (isprambiente.gov.it).

La Legge n. 493/1993 si innesta come provvedimento atto a migliorare l'efficacia dei piani di bacino, prevedendo la possibilità di realizzare piani per sottobacini e settori funzionali, permettendo così di accelerare il processo di attuazione e di prevedere norme di salvaguardia da attuare ante-approvazione del piano. Tali piani prendono il nome di *Piani stralcio di assetto idrogeologico* (PAI), la cui attuazione sarà ulteriormente specificata dal Decreto Sarno (Gisotti, 2012).

Nonostante la produzione normativa e la crescente consapevolezza dell'importanza dell'attività di prevenzione e previsione, la prima metà degli anni '90 è ricordata per alcuni eventi tragici come le alluvioni in Liguria (1992-93), in Piemonte⁵³ (1994). Mentre, per quanto riguarda l'alluvione della Versilia (1996) e il terremoto in Umbria e Marche (1997) la protezione civile diede dimostrazione dei progressi portati avanti nel servizio di soccorso (Cazzuola, 1998).

Nel 1997, al fine di colmare le carenze evidenziate dall'applicazione della L. 225/1992, soprattutto in merito alla mancanza di un modello procedurale e d'azione definito, su iniziativa di Franco Barbieri⁵⁴ si arrivò alla stesura della c.d. direttiva "*Metodo Augustus*", contenente gli indirizzi per la pianificazione di emergenza di protezione civile, per tutti i livelli territoriali. Nel 1998 viene pubblicato il "*Manuale per la gestione tecnica dei Centri operativi misti*" (COM), approvato dalla Commissione Nazionale per la previsione e prevenzione dai grandi rischi nonché le "*Linee guida per la redazione del piano comunale di protezione civile contro il rischio idrogeologico*".

In questo quadro non ben chiarito di competenze diffuse a livello orizzontale e verticale, giunge in chiarimento la L. n. 112/1998 tramite cui vengono indicate e precisate le funzioni dello Stato, delle Regioni e degli Enti Locali in materia di protezione civile. Tramite tale provvedimento, inoltre, vengono esautorate le prefetture dal compito di predisporre piani emergenziali, affidando tale compito alle

⁵³ L'alluvione colpì prevalentemente i territori di Alba, Asti e Alessandria provocando 70 vittime, 86 feriti, circa 13.000 evacuati e il crollo di 10 ponti.

⁵⁴ A capo della Direzione Generale della Protezione Civile e dei Servizi Antincendio del Ministero dell'Interno.

province. Tramite la L. n. 265/1999 si sancisce definitivamente il potere esclusivo del Sindaco di informare con tempestività la popolazione residente sul proprio territorio di competenza in caso di situazioni di pericolo.

Nel 1998 l'alluvione di Sarno, Quindici e dei territori limitrofi, in cui persero la vita 168 persone, fu l'ulteriore spinta emotiva per la produzione di un ulteriore atto legislativo in materia di protezione civile, con il dovere di accrescere notevolmente le capacità di monitoraggio, prevenzione e allertamento contro il rischio idrogeologico. Venne dunque approvata la Legge n. 267/1998, contenente disposizioni per accelerare la produzione dei piani di bacino e la di difesa del suolo, tra cui emergono i piani stralcio di bacino con perimetrazione delle aree a rischio, lo stanziamento di 920 miliardi lire per la realizzazione di 735 interventi di riduzione del rischio e l'obbligo di piani di emergenza per i comuni più esposti al rischio idrogeologico. Tramite la L. n. 267/1998 si afferma una nuova logica di prevenzione, non più di tipo strettamente emergenziale ma, con una visione sul medio-lungo periodo, basata sulla pianificazione territoriale, la sistemazione strutturale, infrastrutturale e l'innovazione tecnologica. La legge rappresentò un'importante strumento finanziario capace di indirizzare risorse verso il miglioramento del sistema di monitoraggio e la costruzione della rete centri funzionali di protezione civile, attiva dal 2004.

La Legge n. 365/2000 conversione con modificazioni, del Decreto-Legge 12 ottobre 2000, n. 279, *“recante interventi urgenti per le aree a rischio idrogeologico molto elevato ed in materia di protezione civile, nonché a favore delle zone della regione Calabria danneggiate dalle calamità idrogeologiche di settembre ed ottobre 2000”* fu fondamentale per catalizzare il processo di applicazione dei principi contenuti nella L. n. 267/1998 estendendo le norme di salvaguardia imposte dai piani sovraordinati e accelerando il processo di approvazione dei PAI che, fino a quel momento, tardavano nell'essere approvati (Gisotti, 2012). Tramite tale provvedimento, fu possibile finanziare la rete di monitoraggio meteo-pluviometrica su gran parte del territorio nazionale, e l'introduzione del principio di *compatibilità della ricostruzione* per edifici e infrastrutture danneggiati da dissesti. Nel 2000,

l'istituzione del *Fondo regionale di protezione civile* fornisce un importante strumento finanziario a regioni e enti locali per il potenziamento delle strutture e delle procedure di protezione civile.

La modifica del titolo V del 2001 sancisce definitivamente il rango costituzionale della protezione civile, e del governo del territorio cui all'art. 117 risultano materie concorrenti stato-regione. Nello stesso anno tramite L. n. 401 viene abolita l'Agenzia di Protezione Civile ed il ruolo di guida giunge in capo al Dipartimento della protezione civile; tramite questo provvedimento il Capo del Dipartimento di protezione civile risponde direttamente al Presidente del Consiglio.

Il D.lgs. n.152/2006 "*Norme in materia ambientale*" all'interno della parte Terza, Sezione uno "*Norme in materia di difesa del suolo e lotta alla desertificazione*" è il passaggio fondamentale per riunire tutta la normativa in materia di difesa del suolo all'interno di un unico codice, abrogando gran parte delle precedenti norme in vigore (Gisotti, 2012).

In seguito al recepimento della Direttiva Quadro Acque n. 2000/60/CE conferita nel Codice dell'Ambiente D.L. n. 152/2006 le autorità di bacino sono state aggregate in otto distretti idrografici responsabili della pianificazione e gestione della risorsa idrica e dell'assetto idrogeologico:

- Alpi Orientali;
- Padano;
- Appennino Settentrionale;
- Serchio;
- Appennino Centrale;
- Appennino Meridionale;
- Sardegna;
- Sicilia.

Il Codice dell'Ambiente prevedeva la soppressione delle Autorità di Bacino, le quali dovevano essere sostituite dalle *Autorità di Bacino distrettuali*, provvedimento che

la L. n. 13/2009 sospese, a causa delle numerose difficoltà emerse nella ripartizione delle competenze stato-regioni.

D.Lgs. 219/2010 in attuazione della Direttiva 2007/60/CE ha stabilito all'art. 4 che alle Autorità di Bacino Nazionali di cui alla Legge n.183/1989 e le Regioni, ciascuna per la parte di territorio di propria competenza, provvedano all'adempimento degli obblighi previsti dal D.Lgs. n. 49/2010 affidando alle Autorità di Bacino di rilievo nazionale la funzione di coordinamento nell'ambito del Distretto Idrografico di appartenenza. Inoltre, Il decreto in coordinamento con il Codice dell'ambiente si è occupato di disciplinare, a livello distrettuale la pianificazione di gestione del rischio alluvioni.

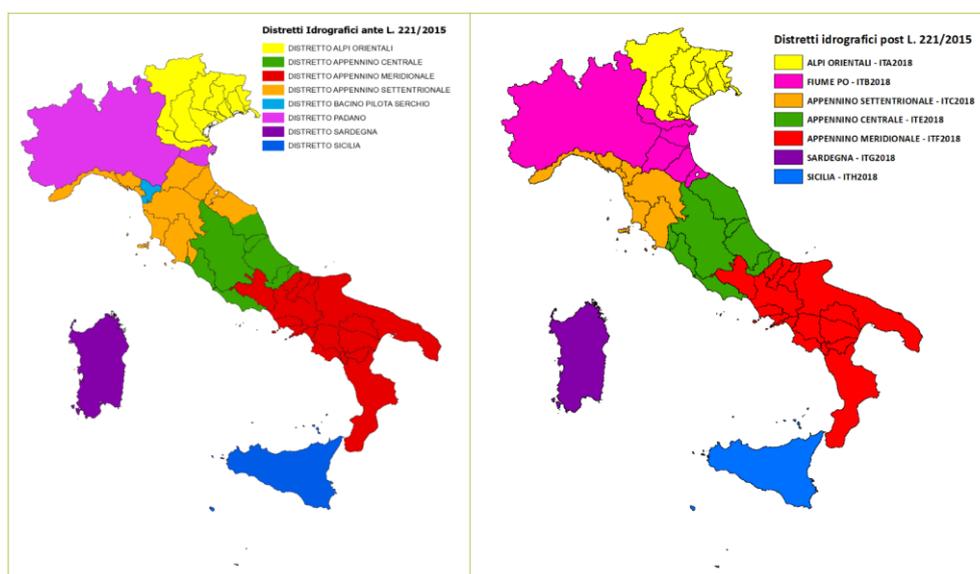


Figura 10: Ripartizione del territorio italiano in Distretti idrografici ante/post L. 221/2015 (ISPRA⁵⁵).

Tramite la Legge⁵⁶ n. 221/2015 si è andato a modificare gli art. 63 “Autorità di bacino distrettuali” e art. 64 “Distretti idrografici” del D.Lgs. n. 152/2006. Tali modificazioni comportano un’ulteriore variazione dei Distretti Idrografici, da un lato annettendo il distretto del Serchio all’interno del Distretto Idrografico dell’Appennino

⁵⁵ISPRA: Idrologia, Idromorfologia, Risorse Idriche, Inondazioni e Siccità (isprambiente.gov.it).

⁵⁶ “Disposizioni in materia ambientale per promuovere misure di green economy e per il contenimento dell’uso eccessivo di risorse naturali”.

Settentrionale, dall'altro rimodulando i confini dei distretti esistenti come mostrato nella figura 10.

Il quadro normativo è piuttosto complesso poiché il Codice dell'Ambiente ha di fatto abrogato la L. n. 183/1989 e dunque soppresso le Autorità di bacino; tuttavia, esse continuano ad operare in regime di proroga ex L. n. 13/2009 per quanto concerne le attività relative ai Piani di Bacino, nelle more della costruzione delle Autorità di Distretto (Monacelli & Spiniello, 2018).

Ad oggi, come stabilito dal D.Lgs. n. 152/2006, come modificato dalla L. n. 221/2015 e tramite D.M. del 25 ottobre 2016 si disciplina l'attribuzione e il trasferimento alle Autorità di Bacino Distrettuali del personale e delle risorse strumentali e finanziarie delle Autorità di Bacino di cui alla Legge n. 183 del 18 maggio 1989. In questo scenario di riassetto funzionale delle competenze il Ministero dell'Ambiente ha avuto il compito di comunicare alla Commissione Europea entro tre mesi le modifiche apportate in termini di unità di gestione e relative autorità competenti⁵⁷.

Il Piano di Bacino, che può anche essere redatto per sottobacini, è individuato come lo strumento conoscitivo, tecnico e normativo per la programmazione e pianificazione degli interventi relativi alla difesa dalle inondazioni e dalle frane, il risanamento e la gestione razionale delle acque, la tutela dell'ambiente e del paesaggio.

La realizzazione di piani settoriali è la risposta all'emergere dei numerosi obiettivi da raggiungere in termini di difesa del suolo e della loro relativa complessità, il risultato di questo processo saranno i Piani Stralcio d'Assetto Idrogeologico (PAI). Nel contesto dell'elaborazione dei PAI, l'acquisizione dei dati e la loro rappresentazione cartografica diventano elementi fondamentali per conoscere le aree soggette a rischio idrogeologico, e conseguentemente prevedere opere strutturali per la mitigazione del rischio.

⁵⁷ ISPRA: Idrologia, Idromorfologia, Risorse Idriche, Inondazioni e Siccità (isprambiente.gov.it).

La conversione del c.d. Decreto Sarno con L. n. 267/1998, tramite finanziamenti statali portò al completamento su tutto il territorio italiano delle mappe di rischio idraulico e geologico, redatte dalle Autorità di Bacino (Monacelli & Spiniello, 2018).

Tramite il D.P.C.M. del 29 settembre 1998 verranno fornite le indicazioni tecniche per un'omogeneizzazione su tutto il territorio nazionale dei criteri utilizzati per la redazione delle mappe di rischio (PAI). In queste operazioni sarà poi fondamentale l'istituzione da parte della Protezione Civile di strutture regionali e locali per il monitoraggio delle precipitazioni e per la pianificazione delle misure emergenziali. Gli indirizzi operativi per la gestione dell'allertamento ai fini di protezione civile sono definiti nella Direttiva del P.C.M. 27 febbraio 2004.

Per quanto riguarda lo scenario comunitario, l'Europa tra il 1998 e il 2004 è investita da numerosi eventi funesti, tra cui spiccano le disastrose esondazioni di Danubio ed Elba nel 2002. I numeri di questi sei anni sono impressionanti con oltre 700 morti, un milione di sfollati e danni complessivi per circa 25 miliardi di euro. In virtù di questi anni catastrofici e della crescente consapevolezza della necessità di una politica comunitaria in materia di gestione del rischio idrogeologico, la Commissione Europea nel 2002 ha istituito il *Fondo di solidarietà dell'Unione Europea* e nel 2004 ha emanato la Comunicazione n. 472 "*Gestione rischi di inondazione – Prevenzione, protezione e mitigazione delle inondazioni*". Ulteriore provvedimento che arriverà a poco meno di tre anni di distanza, in seguito alle numerose alluvioni⁵⁸ che hanno investito l'Europa tra il 2002 e il 2007, è la Direttiva Europea n. 2007/60/CE⁵⁹, la quale si occupa di costruire un quadro per la valutazione e la riduzione dei pericoli e dei relativi impatti sulla salute umana, sull'ambiente, sul patrimonio culturale e sulle attività economiche, nell'ottica di uniformare tra gli stati comunitari i livelli di prevenzione del rischio. La Direttiva Europea n. 2007/60/CE prevede da parte dei paesi membri, per la valutazione del rischio idrogeologico, la realizzazione dei Piani

⁵⁸ Alluvioni in Austria, Slovacchia, Polonia, Ungheria, Romania e Croazia nel 2002; alluvioni dell'ottobre del 2007 in Germania e Repubblica Ceca.

⁵⁹ La direttiva rientra nel contesto delle c.d. direttive figlie della Direttiva Quadro delle Acque 2000/60/CE. La direttiva 2007/60/CE è stata recepita in Italia tramite D.lgs. 49/2010.

di Gestione del Rischio Alluvioni, da strutturarsi secondo tre momenti progressivi (Monacelli & Spiniello, 2018).

- Valutazione preliminare del rischio (scadenza 2011)

Prima fase conoscitiva, l'obiettivo è quello di stabilire i livelli di rischio per ciascuna unità di gestione idrografica individuando le aree in cui è necessario elaborare le mappe di pericolosità e di rischio inondazioni.

- Mappatura del rischio (scadenza 2013)

Seconda fase di mappatura degli scenari individuati nella fase di valutazione preliminare. In primo luogo, la Direttiva individua tre scenari di pericolosità: inondazioni con scarsa probabilità di accadimento e dunque ad intensità estrema, inondazioni con media probabilità associate ad un tempo di ritorno medio di 100 anni, inondazioni con elevata probabilità. Conseguentemente, vengono definiti gli scenari di rischio associando i tre scenari di pericolosità agli impatti generati sugli elementi⁶⁰ ricadenti all'interno delle aree di pericolo.

- Piano di gestione rischio alluvioni (PGRA) (scadenza 2015)

Terza e ultima fase, in cui l'autorità competente deve prevedere, per ciascun distretto o sotto unità di gestione idrografica, un piano di gestione predisposto sulla base degli elementi emersi nelle prime due fasi conoscitive. L'obiettivo dei piani di gestione è quello di designare un sistema per la gestione del rischio alluvionale capace di fornire un'efficace prevenzione, protezione e preparazione dei territori, anche attraverso una opportuna attività previsiva e di allertamento (Monacelli & Spiniello, 2018).

Il PGRA sulla base del D.lgs. n. 49/2010 è alla stregua dei PAI con cui agisce in sinergia, è stralcio del Piano di Bacino, ed ha valore di piano sovraordinato rispetto

⁶⁰ Numero di abitanti coinvolti, tipologie di attività economiche coinvolte, eventuali stabilimenti inquinanti (allegato I Direttiva 96/61/CE), aree protette (allegato IV Direttiva 2000/60/CE), zone di accumulo di detriti.

alla pianificazione territoriale e paesaggistica⁶¹. Dati questi elementi i piani urbanistici e territoriali dovranno recepire al loro interno i vincoli apposti dal PGR e conseguentemente provvedere all'aggiornamento degli strumenti di governo del territorio.

È previsto dall'ordinamento europeo che l'attività di elaborazione dei PGR segua dei cicli di pianificazione e che il loro aggiornamento avvenga ogni sei anni, il primo ciclo si è concluso nel 2021. Ne è esempio l'Autorità di bacino distrettuale dell'Appennino Settentrionale, la quale attraverso la Conferenza Istituzionale Permanente, ha adottato il primo aggiornamento del PGR con delibera n. 26 del 20 dicembre 2021, dando così il via al secondo ciclo con scadenza nel 2027⁶².

La ricostruzione del quadro normativo è utile a comprendere la progressiva crescita di competenze del Dipartimento di Protezione Civile, il quale nella sua storia e nella sua evoluzione, è stato in grado di acquisire una sempre più strutturata organizzazione verticale tra gli enti territoriali e orizzontale con la collaborazione del mondo delle professioni, della ricerca e del volontariato, dimostrando una progressiva crescita nelle competenze operative e gestionali. La nascita della pianificazione di bacino, in Italia, ha rappresentato una vera e propria svolta all'interno del sistema di governance territoriale, andando a creare nuovi confini di governo territoriale, superando i limiti amministrativi e istituendo dei confini idrografici e socio-economici.

Come si è visto, protezione civile e governo del territorio sono due discipline istituzionali di dignità costituzionale, che seppur caratterizzate da modalità e tempistiche operative condividono l'obiettivo comune di garantire e favorire la sicurezza della popolazione residente sul territorio e la prosperità del sistema socio-economico e ambientale, mitigando, quando possibile, i fattori di pericolosità e costruendo strategie di adattamento.

⁶¹ Piano di gestione del rischio di alluvioni - secondo ciclo — Ambiente (regione.emilia-romagna.it).

⁶² PIANO GESTIONE RISCHIO ALLUVIONI – AUTORITÀ DI BACINO DISTRETTUALE DELL'APPENNINO SETTENTRIONALE.

In seguito all'illustrazione dei principali strumenti legislativi nazionali e comunitari appare sempre più importante il ruolo di cabina di regia svolto dall'Unione Europea in termini di omogeneizzazione dei criteri di valutazione del rischio idrogeologico. Infatti, è fondamentale, in una politica comunitaria, che tutti i paesi abbiano gli adeguati strumenti per fronteggiare il rischio idrogeologico e che non vi siano fanalini di coda. A tal proposito, a ciascuno degli stati membri è stato richiesto di avviare il proprio processo di costruzione di un sistema efficace, anche dal punto di vista economico, per la mitigazione del rischio idrogeologico. In questo quadro istituzionale è fondamentale una sussidiarietà verticale per la ripartizione delle responsabilità sul territorio ed una orizzontale per garantire la partecipazione degli stakeholder. Per incentivare la partecipazione pubblica, rendere disponibili i dati sui siti web⁶³ degli enti preposti al dissesto idrogeologico è rilevante per garantire trasparenza e, al contempo, fornire strumenti per informare e sensibilizzare la popolazione.

⁶³ Come il progetto IFFI portato avanti da ISPRA.

1.4 Effetti sul territorio

All'interno di questo paragrafo vengono illustrati alcuni eventi alluvionali e gravitativi avvenuti sul territorio italiano a testimonianza della capacità distruttiva del dissesto idrogeologico e dell'importanza dell'attività di prevenzione nel tempo reale⁶⁴ e nel tempo differito (Milli & Prestininzi, 2015). Questa scomposizione del termine prevenzione è utile a illustrare due modi diversi in cui è possibile mitigare il rischio idrogeologico.

Con il concetto di *prevenzione nel tempo reale* si fa riferimento alla mitigazione e gestione del rischio imminente, occupandosi dunque della popolazione residente in loco e dei manufatti che si trovano in aree soggette a pericolosità da frana e/o alluvione. In questo caso l'attività di prevenzione verterà verso la costruzione di un efficiente ed efficace sistema di allertamento e successiva evacuazione, al fine di preservare l'integrità della vita dei residenti. Anche la gestione emergenziale e post-emergenziale riguarda questo tipo di prevenzione e di ciò se ne occupa la Protezione Civile attraverso i suoi vari livelli territoriali che vanno dal livello nazionale a quello comunale. L'obiettivo principale riguarda comunque la salvaguardia della vita umana piuttosto che l'integrità delle cose e dei manufatti (Milli & Prestininzi, 2015).

Con il concetto di *prevenzione nel tempo differito* si fa riferimento all'insieme di attività di programmazione che non rispondono ad un'emergenza immediata ma hanno un orizzonte temporale di medio lungo termine. All'interno della prevenzione differita rientra il ruolo legislativo e di indirizzo strategico e strutturale svolto dallo Stato; quello delle regioni di legiferare sulla base degli indirizzi statali secondo le proprie specificità territoriali; quello di controllo degli usi del suolo svolto dai comuni attraverso gli strumenti urbanistici regolativi (Milli & Prestininzi, 2015).

Passando all'analisi delle conseguenze sui territori, si è scelto di fare un focus sugli eventi più recenti utilizzando come riferimento il database offerto dal servizio *List*

⁶⁴ Tali termini vengono specificati nell'ambito della Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 27 febbraio 2004, contenente gli indirizzi operativi per la gestione organizzativa e funzionale del sistema di allertamento nazionale e regionale per il rischio idrogeologico ed idraulico ai fini di protezione civile.

*of EMS Rapid Mapping Activations*⁶⁵ di Copernicus al cui interno sono registrati e mappati i principali eventi calamitosi che si sono verificati dal 2013 ad oggi. In particolare, si è scelto di prendere in analisi il territorio italiano esclusivamente in riferimento ad eventi alluvionali e franosi.

A supporto delle informazioni fornite da Copernicus è utile consultare alcuni elaborati dello studio⁶⁶ condotto dal CNR sulle vittime per alluvioni e frane verificatesi tra il 2007 e il 2021. Inoltre, per effettuare un'analisi su di una serie storica si è scelto di consultare un'ulteriore studio⁶⁷ del CNR, condotto sugli impatti di cinquanta anni di frane e inondazioni in Italia (1964–2013).

L'integrazione degli studi del CNR con le rilevazioni di Copernicus permette di avere una panoramica sul dissesto idrogeologico in Italia negli ultimi 60 anni. Infatti, per quello che è il focus di questo lavoro è interessante comprendere se sussiste una significativa variazione temporale negli impatti generati dal dissesto idrogeologico; in questo caso si è scelto di valutare la variazione delle vittime annuali.

I grafici 5 e 6 mostrano il numero di vittime conteggiate dal CRN per il periodo 1964-2021. L'andamento delle vittime è piuttosto discontinuo all'interno della serie temporale ma è possibile notare una riduzione progressiva dei valori massimi annuali. I valori più elevati coincidono con anni in cui si sono verificati grandi eventi alluvionali come il 1965 con l'alluvione del Friuli⁶⁸, nel 1966 con l'alluvione di Firenze⁶⁹, nel 1968 con l'alluvione del Piemonte, nel 1994 con l'alluvione del Piemonte⁷⁰ (Fiumi Tanaro, Bormida e Belbo) e nel 2009 con l'alluvione di Messina.

⁶⁵ List of EMS Rapid Mapping Activations | COPERNICUS EMERGENCY MANAGEMENT SERVICE.

⁶⁶ 2007-2021: quindici anni di frane e inondazioni in Italia (cnr.it).

⁶⁷ Cinquanta anni di frane e inondazioni in Italia (1964 - 2013) (cnr.it).

⁶⁸ Alluvione del Friuli 1965 - CeRVEnE.

⁶⁹ Le alluvioni del Novembre 1966 (cnr.it).

⁷⁰ Evento alluvionale in Piemonte (cnr.it).



Inondazioni

numero di morti e dispersi
dal 1964 al 2013 (50 anni)

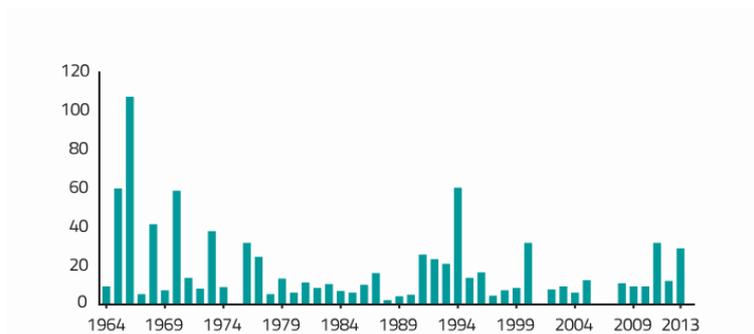


Grafico 5: Vittime per alluvioni nel periodo 1964-2013 (Cinquanta anni di frane e inondazioni in Italia (1964 - 2013) (cnr.it)).

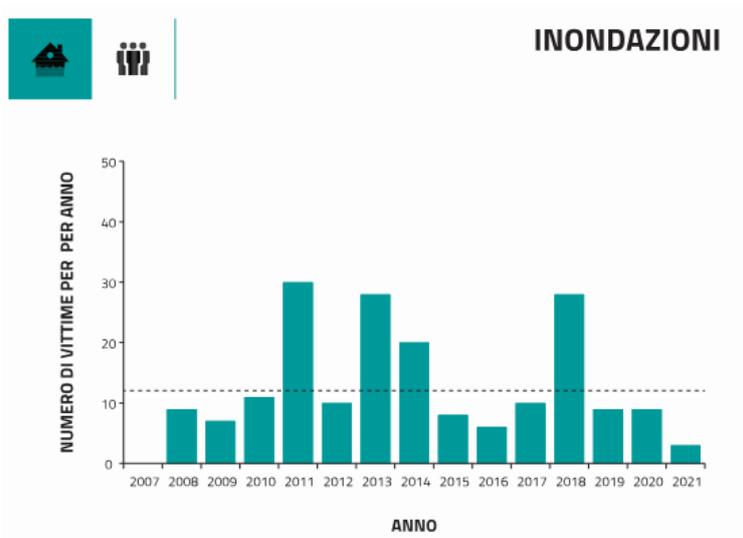


Grafico 6: Vittime per alluvioni nel quindicennio 2007-2021 (2007-2021: quindici anni di frane e inondazioni in Italia (cnr.it)).

Considerando i fenomeni franosi tra il 1964 e il 2021, tramite i grafici 7 e 8 si osserva che ogni anno vi è stata almeno una vittima. Gli anni più funesti sono stati: il 1966 con dissesti diffusi in Trentino, Veneto, Friuli-Venezia Giulia, Toscana, Emilia-Romagna e Umbria, il 1968 con la frana di via Digione⁷¹ a Genova e le numerose frane

⁷¹ Il disastro di via Digione a Genova (cnr.it).

in Piemonte⁷², il 1985 con la frana di Stava (SO) in Valtellina⁷³, il 1987 con la frana di Tartano (SO) in Valtellina, il 1998 con le frane di Sarno e Quindici (SA) e il 2009 con le frane di Giampileri, Scaletta Zanclea e Itala in provincia di Messina. L'andamento delle vittime è quindi piuttosto discontinuo, con un'elevata alternanza di periodi caratterizzati da un numero ridotto di vittime l'anno (mai nullo) e anni con un elevatissimo numero di morti coincidenti con gli eventi franosi di maggior rilievo.



Frane

numero di morti e dispersi
dal 1964 al 2013 (50 anni)

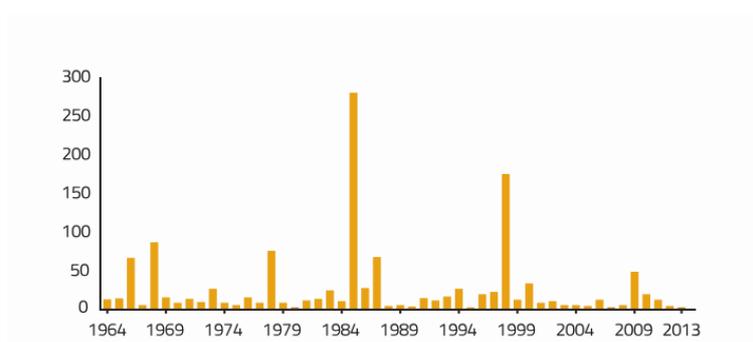
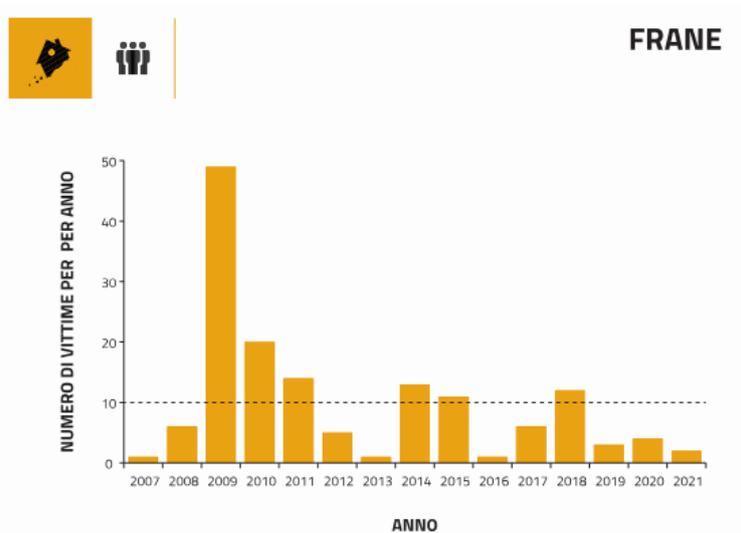


Grafico 7: Numero di morti e dispersi per frana (1964-2013)(Cinquanta anni di frane e inondazioni in Italia (1964 - 2013) (cnr.it)).



⁷² Evento alluvionale in Piemonte (cnr.it).

⁷³ Il disastro di Stava (cnr.it).

Grafico 8: Vittime per frane nel quindicennio 2007-2021 (2007-2021: quindici anni di frane e inondazioni in Italia (cnr.it)).

 **Frane e inondazioni**
numero di vittime per regione dal 1964 al 2013 (50 anni)

regione	morti	dispersi	feriti
Abruzzo	13	-	3
Basilicata	27	-	54
Calabria	67	1	222
Campania	315	2	434
Emilia-Romagna	63	-	81
Friuli-Venezia Giulia	39	3	29
Lazio	51	-	103
Liguria	120	9	62
Lombardia	147	3	141
Marche	16	1	16
Molise	1	-	4
Piemonte	251	17	176
Puglia	39	3	78
Sardegna	54	3	49
Sicilia	165	28	342
Toscana	135	15	459
Trentino-Alto Adige	379	2	239
Umbria	26	-	31
Valle d'Aosta	30	-	27
Veneto	69	-	28
Totale	2007	87	2578

Tabella 4: Numero di morti, feriti e dispersi per frane e alluvioni per ciascuna regione italiana (1964-2013) (Cinquanta anni di frane e inondazioni in Italia (1964-2013) (cnr.it)).

La tabella 4 mostra il conteggio di vittime, dispersi e feriti per il periodo 1964-2013, mettendo in evidenza i contesti regionali più critici. La distribuzione delle vittime indica che, per il periodo di riferimento, le frane siano il fenomeno più critico per la comunità umana. Infatti, le frane hanno provocato quasi il doppio delle vittime rispetto alle alluvioni, su un totale 2.007 morti, 1.297 si sono verificate a causa di frane, mentre 710 a causa di inondazioni. Nel periodo successivo, tra il 2014 e il 2021 ci sono state un totale di 139 vittime.

Il grafico 9 mostra il conteggio complessivo delle vittime per frane e alluvioni nel periodo di riferimento. Ciò che emerge è che non ci sia una tendenza unidirezionale di crescita o decrescita inter-annuale delle vittime, anche se il picco più elevato è stato raggiunto nel 1985 ma, ciò che risalta, è una sorta di ciclicità degli eventi

estremi, i quali si presentano con intervalli irregolari e la cui forza distruttiva è capace di provocare un gran numero di vittime. La tendenza storica delle conseguenze del rischio idrogeologico è dunque molto variabile e fortemente dipendente dal verificarsi di singoli eventi di dissesto capaci di generare danni ingenti e numerose vittime. Non vi è dunque riscontro di una netta tendenza nell'intensificazione delle conseguenze di frane e inondazioni in Italia, sul piano delle vittime umane ma, risulta piuttosto intuitivo associare agli anni più funesti uno o più eventi estremi, i quali si ripresentano con un'elevata aleatorietà e sono il principale fattore che determina il verificarsi di un elevato numero di vittime annuali.

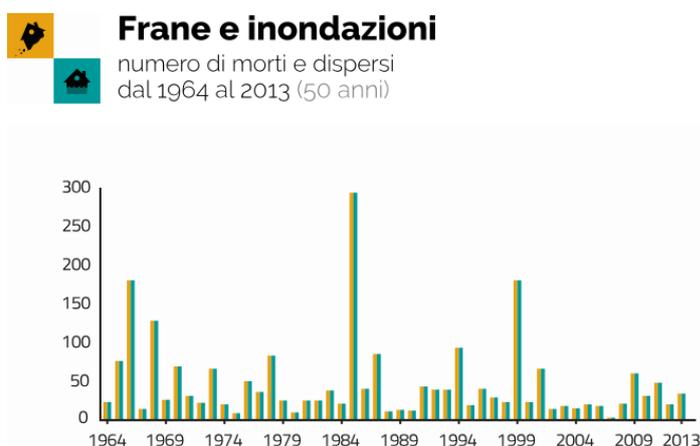


Grafico 9: Numero di morti, feriti e dispersi per frane e alluvioni (1964-2013) ([Cinquanta anni di frane e inondazioni in Italia \(1964-2013\) \(cnr.it\)](#)).

Quella che segue è una rassegna dei principali eventi⁷⁴ che si sono verificati in Italia tra il 2009 e il 2023, sulla base delle informazioni ricavate dal servizio List of EMS Rapid Mapping Activations, dalla piattaforma Polaris del CNR, dai bollettini regionali e dagli articoli di cronaca (tabella 5). Si evidenzia come gran parte degli eventi si concentrino all'interno dei mesi autunnali; infatti, tra i mesi di settembre e dicembre si sono verificati 27⁷⁵ eventi di dissesto idrogeologico pari al 73% del campione censito. Vi è riscontro solo di un evento avvenuto durante il periodo estivo, quello di

⁷⁴ 37 eventi.

⁷⁵ Settembre (4), ottobre (8), novembre (12), dicembre (3).

Cosentino Civita. Tra i territori più frequentemente colpiti, all'interno dell'arco temporale considerato, risaltano l'Emilia-Romagna con sette eventi censiti (19%), la Liguria con sei (16%) e la Sicilia con quattro (11%).

Luogo	Anno	Data	Tipologia di evento	Morti	Feriti	Sfollati	Dispersi
Messina	2009	01-ott	Alluvionale	31	122	2.019	6
Cinque Terre e Lunigiana	2011	24-25-ott	Alluvionale	18		oltre 1.000	
Genova	2011	4-5-nov	Alluvionale	6			
Foligno	2013	02-mag	Gravitativo			10 famiglie	
Emilia-Romagna	2013	marzo e maggio	Alluvionale e Gravitativo				
Province di Taranto e Matera	2013	07-ott	Alluvionale	4			2
Marche e Umbria	2013	10-nov	Alluvionale e Gravitativo				
Sardegna	2013	18-nov	Alluvionale	18			
Italia centro-meridionale	2013	01-dic	Alluvionale			oltre 100	
Liguria e Emilia-Romagna	2014	16-17-gen	Alluvionale e Gravitativo			oltre 10.000	
Marche	2014	2-4-mag	Alluvionale	2		oltre 100	
Puglia	2014	4-10-set	Alluvionale e Gravitativo				
Liguria	2014	9-11-ott	Alluvionale e Gravitativo	1			
Italia settentrionale	2014	10-15-nov	Alluvionale e Gravitativo	8	2	oltre 3.000	1
Emilia-Romagna	2015	13-14-set	Alluvionale e Gravitativo	2		oltre 100	1
Campania	2015	14-15-ott	Alluvionale e Gravitativo	2		oltre 100	
Piemonte e Liguria	2016	21-25-nov	Alluvionale e Gravitativo	1		oltre 8.000	1

Toscana	2017	09-set	Alluvionale	8			
Emilia-Romagna	2017	10-12-dic	Alluvionale			oltre 1.100	
Cosentino Civita	2018	20-ago	Alluvionale	10	11		
Sardegna meridionale	2018	10-11-ott	Alluvionale				
Sicilia	2018	01-nov	Alluvionale	13		230	
Friuli-Venezia Giulia e Veneto	2018	27-30-nov	Alluvionale			numerosi	
Emilia-Romagna	2019	11-mag	Alluvionale				
Friuli-Venezia Giulia e Veneto	2019	12-nov	Alluvionale				
Piemonte e Liguria	2020	2-3-ott	Alluvionale	2			
Calabria	2020	20-nov	Alluvionale				
Sardegna	2020	27-29-nov	Alluvionale e Gravitativo	3		68	
Emilia-Romagna e Lazio	2020	5-9-dic	Alluvionale			numerosi	
Lazio	2021	24-25-gen	Alluvionale				
Sicilia	2021	22-23-ott	Alluvionale e Gravitativo				
Marche e Umbria	2022	15-set	Alluvionale e Gravitativo	12			
Ischia	2022	25-26-nov	Gravitativo	7		oltre 230	5
Sicilia	2023	9-10-feb	Alluvionale e Gravitativo			numerosi	
Emilia-Romagna	2023	2-3-mag	Alluvionale	15		oltre 15.000	
Toscana	2023	02-nov	Alluvionale	8		oltre 1.000	

Tabella 5: Rendicontazione degli eventi alluvionali e gravitativi avvenuti in Italia nel periodo 2009-2023 (elaborazione propria).

1.5 Prevenzione, previsione e mitigazione

La mitigazione del rischio, in particolare quello di natura idrogeologica, si compone prevalentemente delle attività di *prevenzione* e di *previsione*.

L'art. 3 della L. 225/1992 esplicita il concetto di *previsione*, il quale è inteso come l'insieme delle attività volte a determinare le cause dei fenomeni calamitosi, le tipologie di rischio e la loro contestualizzazione spaziale e cronologica (Gisotti, 2012). Tali attività permettono di realizzare le *mappe di rischio* del territorio oggetto di studio, tramite la combinazione delle mappe di pericolosità e quelle del danno atteso rispetto agli elementi esposti. In tal senso, la previsione degli eventi calamitosi si configura basandosi sulle informazioni emerse dalla ricerca scientifica, dalle tecnologie in possesso per il monitoraggio delle condizioni di innesco e dalle banche dati contenenti dati storici utili alla ricostruzione statistica dei fenomeni. Inoltre, L'art. 3 della L. 225/1992 esplicita anche il concetto di *prevenzione* che consiste nell'insieme di attività volte possibilmente ad evitare, o a ridurre al minimo, la probabilità che si verifichino eventi calamitosi, basandosi anche sulle informazioni emerse nel corso dello studio previsionale (Gisotti, 2012).

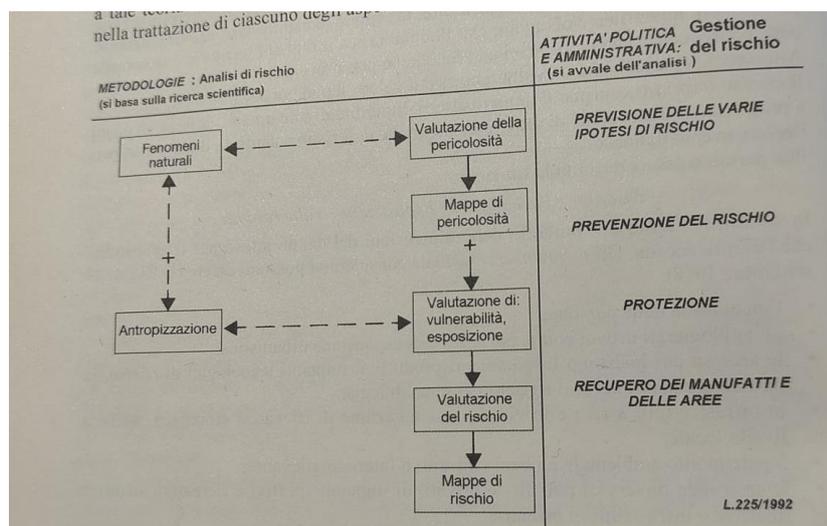


Figura 11: Percorso metodologico relativo alla determinazione del rischio (Gisotti, 2010).

I processi di previsione e prevenzione sono in sinergia tra loro poiché una volta studiato il fattore di rischio (previsione) si passa all'individuazione degli interventi

necessari per evitare che tale fattore si presenti (prevenzione). Dunque, una volta che si è studiato il rischio e le sue caratteristiche, è necessario passare alla fase successiva di gestione del rischio, come riassunto nella figura 11.

Come già sottolineato, l'urbanizzazione sregolata del territorio è uno dei principali fattori che determina il rischio idrogeologico, ciò accade in particolare quando si vanno ad antropizzare aree caratterizzate da pericolosità alluvionale o gravitativa. La combinazione di aree di pericolosità ed elementi esposti genera scenari di rischio.

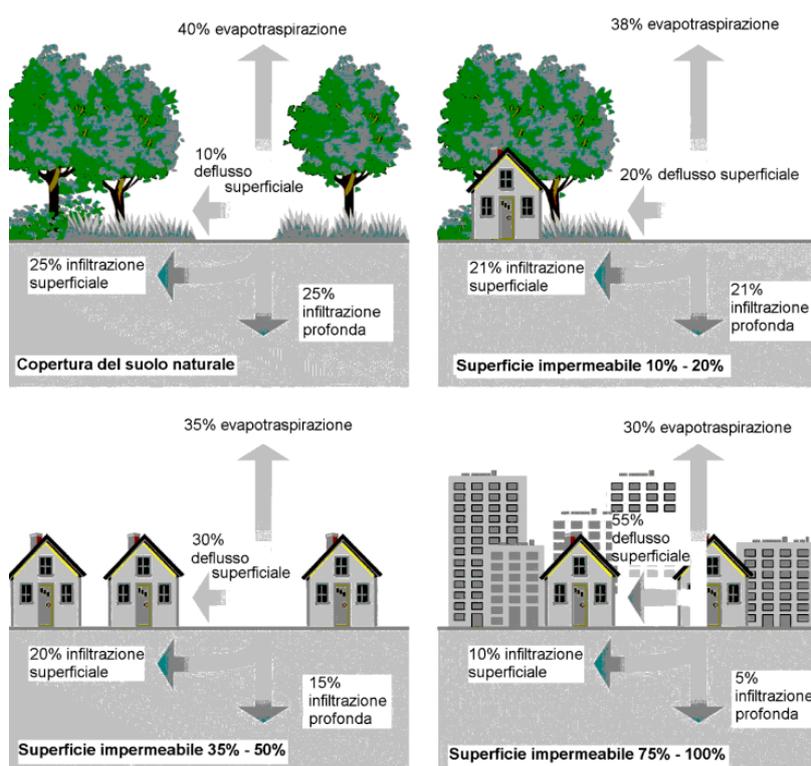


Figura 12: Effetti dell'urbanizzazione su assorbimento ed evapotraspirazione (prof. ing. Goffredo La Loggia, Mitigazione del rischio idraulico nei territori urbanizzati, Venezia, 20 maggio 2010).

L'urbanizzazione dei territori produce una sostituzione delle superfici permeabili con quelle impermeabili, altera l'idrologia dei bacini accrescendo i deflussi superficiali e diminuendo la capacità di infiltrazione e di evapotraspirazione (figura 12). L'urbanizzazione e in generale l'impermeabilizzazione dei suoli comporta: crescita della portata al colmo e del volume di deflusso; decrescita del tempo di

corrivazione; falde acquifere meno cariche; maggiore frequenza e intensità delle piene fluviali.

Inoltre, a causa dell'antropizzazione delle aree golenali, dello scarico di rifiuti solidi urbani e del dilavamento delle superfici urbane, i corsi d'acqua che attraversano aree urbanizzate subiscono un deterioramento della qualità delle acque. Ma non solo, le superfici permeabili limitano il naturale processo di depurazione dagli inquinanti, limitando l'infiltrazione e l'evapotraspirazione del terreno.

Date queste premesse appare necessario portare alla luce alcune procedure e strumenti per la riduzione del rischio idrogeologico in ambiente urbano. Infatti, è necessario portare avanti un'attività di *previsione* del rischio idrogeologico, mettendo in campo strumenti per comprendere, con maggior dettaglio, le manifestazioni e le cause degli eventi calamitosi; con il fine di avviare parallelamente un'attenta attività di *prevenzione e mitigazione* volta a ridurre i possibili danni sulla popolazione e sugli insediamenti (Gisotti, 2012). ISPRA⁷⁶ mette in evidenza la compresenza di nove strategie attuabili per la mitigazione del rischio idrogeologico, le quali comprendono:

- attività conoscitiva (inventario IFFI, Direttiva alluvioni);
- valutazione del rischio;
- corretta pianificazione territoriale (PAI);
- interventi strutturali di riduzione del rischio;
- comunicazione e diffusione informazioni;
- manutenzione del territorio e buone pratiche agro-silvo-pastorali;
- delocalizzazioni degli insediamenti a rischio;
- monitoraggio e sistemi di allerta;
- piani di emergenza di Protezione Civile.

Le misure strategiche individuate da ISPRA e gli interventi di prevenzione, possono essere distinte in due macro categorie: interventi di tipo *strutturale* o *non*

⁷⁶ Misure per la mitigazione del rischio idrogeologico — Italiano (isprambiente.gov.it).

strutturale. Le misure di tipo strutturale comportano la costruzione di strutture per il controllo dei deflussi e dei movimenti del terreno; quelle di tipo non strutturale comprendo un insieme di attività, procedure e regolamenti atti a regolare e ridurre i fattori di rischio. Generalmente, è possibile ricondurre gli interventi di tipo strutturale all'obiettivo di ridurre la pericolosità (*H*) mentre, gli interventi di tipo non strutturale allo scopo di ridurre l'esposizione (*E*) e quindi il danno (*D*). Inoltre, gli interventi di tipo non strutturale sovente richiedono minori risorse economiche rispetto a quelli di tipo strutturale. Per quanto riguarda gli interventi di tipo strutturale APAT si occupa della produzione di due importanti documenti al cui interno sono contenute le linee guida per la realizzazione di opere di difesa dal rischio idrogeologico: l'atlante delle opere di sistemazione dei versanti (APAT, 2001) e l'atlante delle opere di sistemazione fluviale (APAT, 2003).

In ambito urbano, per aumentare la capacità di intercettazione dei sistemi di drenaggio e ritenzione, al fine di conciliare la necessità di ridurre i deflussi superficiali con lo sviluppo sostenibile e un miglioramento della qualità ambientale, si fa sempre più affidamento ai sistemi di drenaggio urbano sostenibile (SuDS) (Charlesworth, 2003). La figura 13 fornisce una rappresentazione concettuale dei principi dei SuDS secondo cui, tutti e tre gli obiettivi dovrebbero avere lo stesso peso, al netto dei vincoli di contesto. La filosofia di questo approccio è quella di tentare di ripristinare la capacità di drenaggio di un sito prima del suo sviluppo urbano o quella di mantenere tale caratteristica per quei siti su cui sussistono previsioni urbanistiche. Tramite i SuDS, se distribuiti in modo efficace e efficiente, è possibile contribuire ad incrementare la capillarizzazione della rete di drenaggio, riducendo la necessità di realizzare grandi infrastrutture, realizzando interventi diffusi sul territorio (Woods-Ballard et al., 2007).

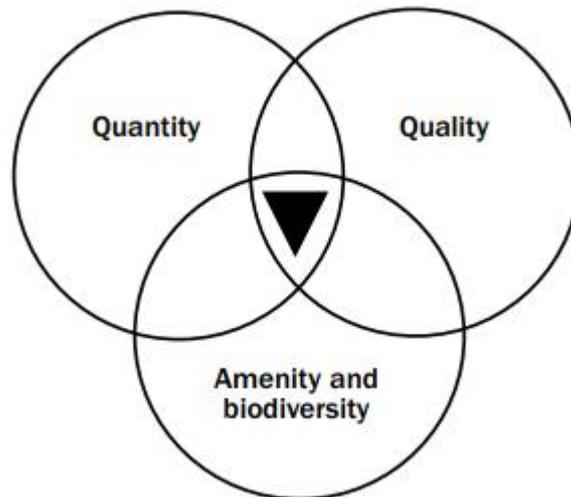


Figura 13: (Woods-Ballard et al., 2007).

Inoltre, a differenza dei sistemi di drenaggio classici, i SuDS hanno il vantaggio di migliorare la qualità della biodiversità dei corsi d'acqua, fornire protezione contro il rischio alluvioni, aumentare la capacità di protezione dei corsi d'acqua dagli agenti inquinanti (Charlesworth, 2003).

Gli interventi non strutturali comprendono (Bignami, 2012; Gisotti, 2012):

- normative che stabiliscono prescrizioni tecniche che impongano la realizzazione di strutture e infrastrutture capaci di resistere ad un determinato evento calamitoso, o quantomeno a contenere i danni;
- regolamentazione degli usi del suolo tramite strumenti urbanistici quali piani regolatori e ulteriori strumenti di programmazione socio-economica compatibili con le mappature del rischio, l'adozione dei *piani di bacino distrettuali* e delle *norme di salvaguardia* ex art. 17 L. n. 183/1989. La regolamentazione urbanistica comprende anche l'apposizione di vincoli temporanei o permanenti che limitino l'utilizzo di certe porzioni territoriali, nonché l'eventuale applicazione di processi per la delocalizzazione di insediamenti e infrastrutture;

- studi tecnico-scientifici per rendere più sicure apparecchiature e impianti o per la realizzazione delle più adatte opere per ridurre il rischio;
- politica delle tariffe e politica della tassazione, nonché assicurazioni contro il rischio catastrofe;
- campagne divulgative che educino, formino e informino le amministrazioni, gli operatori e conseguentemente le popolazioni esposte, sui fattori di rischio e sulle procedure da seguire nel caso si presentasse un evento calamitoso;
- piani d'emergenza;
- strumenti di governace territoriale come i *Contratti di fiume*;
- osservazione e manutenzione dei sistemi di drenaggio;
- la previsione di efficaci ed efficienti sistemi di allerta o preannuncio.

Il quadro delle misure non strutturali può essere molto ampio poiché ad esso appartengono tutte quelle misure di legislazione, gestione, regolazione e pianificazione che concernono la mitigazione del rischio. In merito a ciò lo strumento pianificatorio più utilizzato in Italia è quello delle fasce fluviali, le quali sono redatte da ciascuna autorità distrettuale e sono contenute nel Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (PSFF). Tale strumento, istituito dal C.d.M. del 24 luglio 1998, nel 2001 è confluito all'interno del PAI. Quello di maggior rilievo sul territorio italiano è il PAI del distretto idrografico del fiume Po, al cui interno sono contenute misure atte a portare avanti obiettivi di difesa dal rischio idraulico, miglioramento degli ambienti golenali e conservazione del sistema di valori associati ai corsi d'acqua.

Il PAI del Po individua tre fasce fluviali basate sui differenti regimi di piena del corso d'acqua a cui sono assoggettate una serie di interventi vietati o consentiti⁷⁷.

- Fascia A

È la fascia di deflusso della piena, in cui defluisce almeno l'80% della portata associata al tempo di ritorno di 200 anni, con velocità della corrente maggiore di 0,4 m/s. In questa fascia è vietata l'alterazione dello stato dei luoghi, la costruzione di

⁷⁷ PSFF – PAI (adbpo.it).

discariche e la coltivazione erbacea/arborea non permanente entro 10m dalla sponda; invece, è consentito ricostruire gli equilibri naturali e occupare temporaneamente i suoli se non si modifica la capacità di portata.

- Fascia B

È la fascia di esondazione esterna alla fascia A, al suo interno sono contenute le forme fluviali non fossili e le aree ecologicamente legate all'ambito fluviale, la sua estensione arriva fino al punto in cui le quote naturali del terreno sono superiori ai livelli idrici corrispondenti alla piena di riferimento ossia alle opere idrauliche di controllo delle inondazioni dimensionate per la piena di riferimento. In questa fascia è vietato realizzare interventi che riducano la capacità d'invaso, aprire discariche, depositare sostanze pericolose a cielo aperto, realizzare strutture che possano compromettere la stabilità degli argini; invece, è consentito ricostruire gli equilibri naturali e realizzare interventi di sistemazione idraulica

- Fascia C

È la fascia di inondazione catastrofica, esterna alla fascia B è dimensionata sulla base di un'inondazione superiore alla piena di riferimento, considerando una portata con tempo di ritorno di 500 anni.

In sintesi, per poter portare avanti un processo di progressiva riduzione del rischio idrogeologico è necessario, in primo luogo, un sistema di pianificazione degli usi del suolo che sia consapevole dei rischi che insistono su di un territorio e che sia capace di impedire la costruzione di insediamenti in quelle aree; un efficiente ed efficace sistema di monitoraggio meteo-idrogeologico tramite cui è possibile avere un quadro aggiornato dello "stato di salute" dei territori ed un pronto sistema di allertamento capace di mettere preventivamente in salvo le comunità che vivono in aree soggette a rischio. Nel contesto del territorio e del paesaggio italiano, è necessario mettere in atto tutte le misure volte a mitigare il rischio idrogeologico. Allo stesso tempo, è necessario adottare misure di adattamento soprattutto a fronte dei cambiamenti climatici e della crescente urbanizzazione del territorio. Il

personale delle amministrazioni pubbliche deve essere preparato a prendere decisioni sempre più difficili, richiedendo un'alta professionalità amministrativa e tecnica pronta a qualsiasi evenienza (Gisotti, 2012).

2. CAMBIAMENTI CLIMATICI E RISCHIO IDROGEOLOGICO

2.1 Introduzione ai cambiamenti climatici

A livello globale l'organizzazione che si occupa di studiare i cambiamenti climatici è l'Intergovernmental Panel on Climate Change⁷⁸ (IPCC), la quale si occupa di fornire ai 195 governi che ne fanno parte, informazioni scientifiche utili allo sviluppo di politiche per l'adattamento e la mitigazione degli effetti dei cambiamenti climatici.

Le valutazioni fornite da IPCC non sono vincolanti per i paesi membri ma, grazie alla loro natura basata su aspetti rigorosi, scientifici e il loro carattere intergovernativo, costituiscono un'importante opportunità per lo sviluppo di politiche nazionali. Inoltre, i report di IPCC sono alla base dei negoziati della Conferenza delle Nazioni Unite sul clima: *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC).

L'organizzazione fornisce periodicamente relazioni (*Assesment Report - AR*) al cui interno sono contenute tutte le evidenze scientifiche emerse fino a quel momento in merito alle cause predisponenti, gli impatti attuali e futuri dei cambiamenti climatici, fornendo indicazioni per portare avanti azioni di mitigazione e adattamento.

L'IPCC si struttura in tre gruppi di lavoro distinti e una task force, ciascuno composto da centinaia di scienziati esperti. Il primo gruppo si occupa di approfondire le basi scientifiche dei cambiamenti climatici, il secondo di valutare gli impatti dei cambiamenti climatici le misure di adattamento e vulnerabilità, il terzo si occupa della mitigazione dei cambiamenti climatici. La task force si concentra sulle emissioni di gas climalteranti con l'obiettivo di sviluppare una metodologia per il calcolo delle emissioni/assorbimenti di gas serra a livello nazionale.

Di seguito si riportano le principali evidenze emerse dall'ultimo rapporto AR6 pubblicato nel 2023 (IPCC, 2023).

⁷⁸ Creato nel 1988 dal World Meteorological Organization (WMO) e United Nation Environment Programme (UNEP).

Il rapporto AR6 mette subito in evidenza il ruolo giocato dagli esseri umani e dalle loro attività di emissione di gas a effetto serra (GHG), nell'accrescimento dei cambiamenti climatici. I principali GHG responsabili dell'accrescimento delle temperature sono l'anidride carbonica (CO₂) e il metano (CH₄) a cui si aggiungono l'ossido di diazoto (N₂O), l'ozono troposferico (O₃) e i gas alogenati (IPCC, 2023).

La relazione tra le emissioni di gas serra e gli effetti determinati dai cambiamenti climatici è esplicitata attraverso l'individuazione di scenari di riferimento. Nello specifico, dal rapporto AR5⁷⁹ (IPCC, 2014) sono stati delineati i Percorsi Rappresentativi di Concentrazione (RPC), per indicare l'andamento delle concentrazioni di gas climalteranti rispetto ad un determinato obiettivo climatico. L'andamento futuro degli scenari è sostanzialmente influenzato dall'attività umana, dalle decisioni politiche internazionali e dallo sviluppo tecnologico. Gli scenari stimano quanto forzante radiativo in termini di W/m² verrà raggiunto rispetto ai livelli del 1850 per la fine del XXI secolo.

Di seguito si riportano i principali scenari di riferimento:

- *nessuna protezione climatica* (RPC 8.5): nessun provvedimento viene preso per il contrasto ai cambiamenti climatici. Le emissioni di GHG crescono in modo continuativo, si stima un forzante radiativo di 8,5 W/ m² per la fine del XXI secolo;
- *limitata protezione climatica* (RPC 4.5): le emissioni di GHG vengono arginate, ma la loro concentrazione cresce ulteriormente nei prossimi 50 anni. L'obiettivo di contenere le temperature entro i +2 °C non è raggiunto, si stima un forzante radiativo di 4,5 W/ m² per la fine del XXI secolo;
- *protezione climatica* (RPC 2.6): Vengono presi provvedimenti a livello globale per la riduzione delle emissioni con arresto nella loro crescita entro 20 anni.

⁷⁹ Le precedenti relazioni di IPCC utilizzavano i c.d. SRES (Special Report on Emissions Scenarios) i quali proiettavano le emissioni e gli impatti climatici sulla base delle circostanze socioeconomiche. Contrariamente i RCP individuano le proiezioni delle emissioni e il conseguente forzante radiativo.

È l'unico scenario che permetterebbe di raggiungere gli obiettivi dell'Accordo di Parigi, si stima un forzante radiativo di 2,6 W/ m² per la fine del XXI secolo.

La figura 14 riassume sul lato sinistro le condizioni del sistema socioeconomico necessarie al raggiungimento di un determinato scenario, mentre sul lato destro sono mostrate le implicazioni ambientali derivanti dal raggiungimento degli scenari elencati. Secondo le attuali proiezioni delle emissioni di GHG, se non vengono presi ulteriori provvedimenti rilevanti a livello globale lo scenario più probabile per la fine del XXI secolo è RCP 8.5.

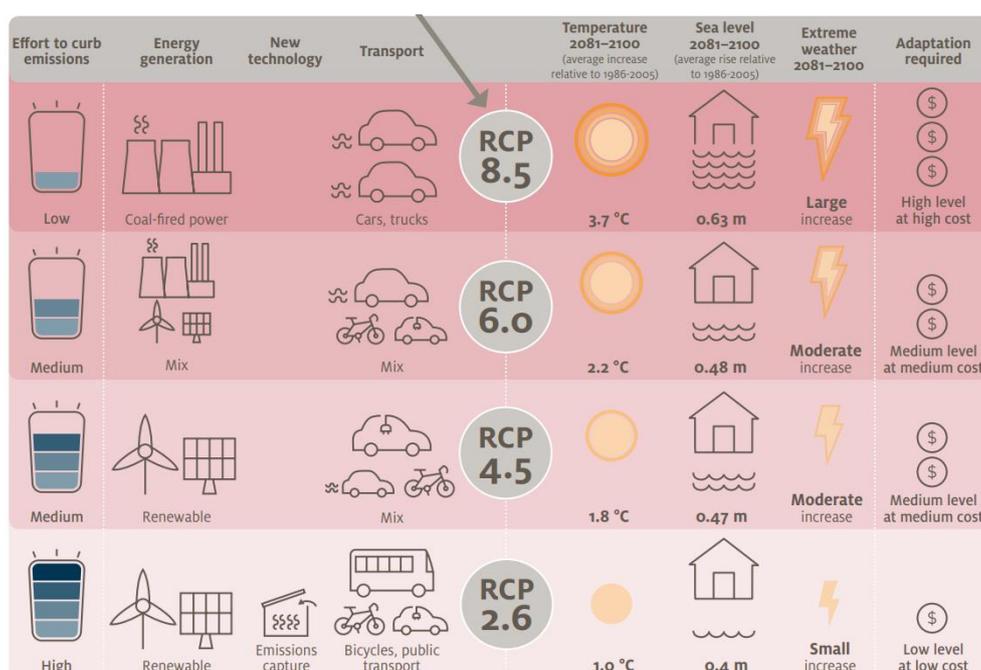


Figura 14: Scenari di riferimento RPC (coastadapt.com.au).

Nel periodo 2010-2019 si registra un incremento delle emissioni di gas climalteranti a causa di un uso insostenibile delle fonti di produzione energetica fossili, dei cambiamenti d'uso del suolo, e dei modelli di consumo frutto dello scenario globalizzato che caratterizza la contemporaneità, le emissioni relative a questo periodo sono le più elevate rispetto a qualsiasi decennio precedente ma l'incremento (+1,3%/anno) è stato inferiore rispetto al periodo 2000-2009 (+2,1%/anno). Il processo di crescita delle emissioni di gas serra in atmosfera è accelerato negli ultimi

anni, si stima che al 2019 le emissioni di GHG causate dall'attività antropica abbiano superato del +12% quelle del 2010 e del +54% quelle del 1990.

Il grafico 10 mette in evidenza la ripartizione tra i principali settori economici delle emissioni di CO₂ in atmosfera riferite al 2019; si stima che circa metà delle emissioni generate dal settore agro-alimentare sia dovuta a fenomeni di deforestazione, i quali riducono la capacità di assorbimento della CO₂ prodotta annualmente.

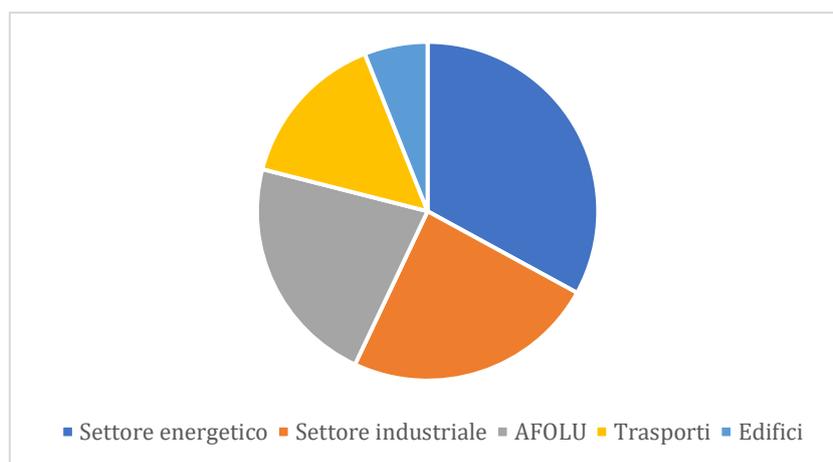


Grafico 10: Ripartizione emissioni di CO₂ per settore economico (IPCC, 2023).

I cambiamenti climatici stanno già determinando l'intensificazione dei fenomeni meteorologici, con effetti diseguali e altamente variabili a seconda del contesto territoriale e socio-economico di riferimento. Sovente, le conseguenze più negative per la salute umana, la sicurezza idrica, alimentare e l'economia si hanno nei contesti territoriali che meno hanno contribuito all'emissione di gas climalteranti.

Nel periodo 2011-2020 è stato registrato un incremento delle temperature di +1,1 °C⁸⁰ rispetto al periodo 1850-1900. Gli incrementi di temperatura hanno riguardato maggiormente le terre ferme (+1,59 [da 1,34 a 1,83] °C) rispetto agli oceani (+0,88 [0,68-1,01]). Complessivamente nei primi 20 anni del XXI secolo si stima che la temperatura media sia stata di 0,99 °C superiore rispetto al periodo 1850-1900. Tra il 1970-2020 la temperatura della superficie terrestre è cresciuta più velocemente

⁸⁰ (+1,09 [0,95-1,20]°C).

di quanto non abbia fatto (all'interno dello stesso arco temporale di 50 anni) negli ultimi 2000 anni. Complessivamente si stima che tra il periodo 1850-1900 e il 2010-2019 l'azione dell'uomo abbia contribuito a aumentare le temperature di +1,07 °C (0,8-1,3 °C).

La crescita delle concentrazioni di GHG in atmosfera, a partire dal 1750 sino ad oggi, sono sicuramente attribuibili all'attività umana, le attuali concentrazioni di metano e di ossido di diazoto sono le più alte degli ultimi 800.000 anni, quelle di anidride carbonica le più elevate degli ultimi 2 milioni di anni. A partire dal 1750 si registra un aumento delle concentrazioni in atmosfera di CO₂ (+47%), CH₄ (+156%) e N₂O (+23%) (IPCC, 2023).

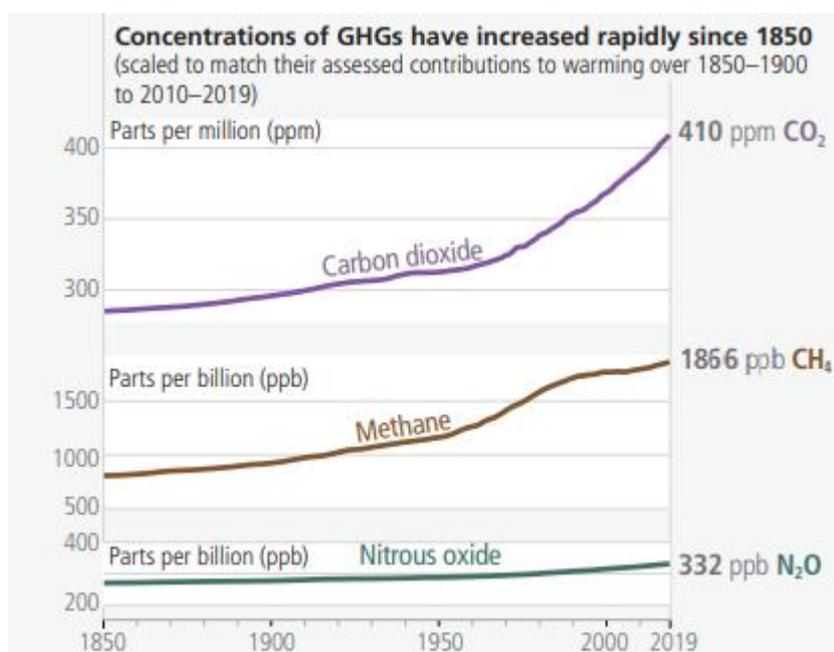


Figura 15: Variazioni delle concentrazioni di gas climalteranti (1850-2019) (IPCC, 2023).

I cambiamenti climatici sono frutto dell'incapacità dell'uomo di compensare i propri impatti sull'ambiente causati da uno sviluppo non sostenibile. Ad esempio, per il settore energetico, se da un lato lo sviluppo economico e tecnologico ha comportato un efficientamento dei modelli di produzione, riducendo le emissioni di CO₂ necessarie per produrre un kW, dall'altro lato la crescita della domanda energetica globale ha comportato un aumento complessivo delle emissioni.

Sulla base dei dati illustrati e delle relative considerazioni appare in modo chiaro e inequivocabile come l'attività umana, in modo più intensivo negli ultimi 50 anni, abbia contribuito al surriscaldamento atmosferico. In letteratura si parla di *antropocene* per definire la nuova era geologica in cui l'essere umano e le relative attività costituiscono un vero e proprio fattore geofisico di alterazione degli equilibri naturali (Lai, 2020).

IPCC (2023) da un lato attribuisce alle emissioni di GHG le principali responsabilità del riscaldamento troposferico, dall'altro attribuisce alla rarefazione dell'ozono la principale causa del raffreddamento stratosferico avvenuto tra il 1979-1995. A partire dagli anni '70 si registra una crescita delle temperatura degli strati superficiali degli oceani (0-700 m), attribuita principalmente all'attività umana. Il riscaldamento degli oceani è il principale fattore che contribuisce al riscaldamento del sistema clima, si stima che la sua influenza valga il 91% mentre, il riscaldamento delle terre emerse contribuisce per il 5%, lo scioglimento dei ghiacciai per il 3% e il riscaldamento atmosferico per l'1%.

Il livello dei mari è aumentato di circa 0,2 m tra il 1901 e il 2018, ma il grado di crescita è variato notevolmente all'interno di questo intervallo. Infatti, tra il 1901 e il 1971 il livello dei mari è cresciuto in media di 1,3 mm/anno, nel successivo intervallo 1971-2006 di 1,9 mm/anno e nell'ultimo intervallo 2006-2018 di 3,7 mm/anno, dunque con un ritmo di quasi tre volte superiore al primo intervallo (IPCC, 2023).

All'attività umana è inoltre attribuito il ritiro globale dei ghiacciai a partire dagli anni '90, la riduzione delle riserve di ghiaccio marine tra il 1979-1988 e il 2010-2019, la riduzione della copertura nevosa primaverile dell'emisfero settentrionale, lo scioglimento superficiale della calotta artica e l'acidificazione degli oceani (IPCC, 2023). Recenti lavori hanno fornito maggiori prove di un'influenza antropogenica su scale spaziali sempre più piccole e per medie stagionali (Stott et al., 2010).

2.2 Le alterazioni dei cambiamenti climatici sul sistema idrogeologico

Gli effetti dei cambiamenti climatici comportano una variazione dei cicli idrici ordinari, conseguentemente influenzano le modalità con cui si presentano gli eventi alluvionali e incrementano i rischi che ne derivano (PNACC, 2018; IPCC, 2012; IPCC, 2023). La variazione delle caratteristiche delle precipitazioni, dell'accumulo di neve, dell'umidità del suolo, del livello del mare, della vegetazione e degli usi del suolo possono comportare un'alterazione delle caratteristiche del deflusso e dunque delle inondazioni (IPCC, 2012). Nonostante il rapporto AR4 (IPCC, 2007) abbia concluso che a livello globale non vi è evidenza di un incremento nell'intensità o nella frequenza delle inondazioni, Trenberth et al. (2007) hanno individuato una crescente variabilità delle alluvioni in Europa centrale e Kundzewicz et al. (2007) hanno affermato che i cambiamenti climatici hanno già provocato un'alterazione dei regimi di inondazione. Il rapporto AR4 (IPCC, 2007) ha inoltre evidenziato una variazione dei deflussi primaverili dovuta ad un'anticipazione cronologica dello scioglimento nivale e glaciale.

A partire dagli anni '50 si evidenzia il raddoppio della frequenza delle ondate di calore marine, l'aumento diffuso, a livello globale, della frequenza degli eventi meteorologici estremi e la crescita dell'evapotraspirazione, determinando, in alcune regioni, l'inaridimento delle terre agricole e la perdita di biodiversità (IPCC, 2023).

Tali effetti hanno determinato una significativa alterazione della biosfera e dei suoi ecosistemi; si stima che, tra le specie prese in analisi, circa la metà sia migrata verso i poli o a quote superiori per contrastare gli aumenti di temperatura (IPCC, 2023). Alle ondate di calore estreme sono attribuite le perdite di centinaia di specie locali; infatti, non tutti gli ecosistemi hanno la capacità di essere resilienti agli stravolgimenti climatici, ad esempio quelli montani possono essere fortemente intaccati dall'alterazione del sistema idrologico derivante dal ritiro dei ghiacciai. Inoltre, l'acidificazione degli oceani, il loro innalzamento, l'alterazione dei regimi pluviali determinano un deterioramento degli ecosistemi. A questi fenomeni si aggiunge la desertificazione che determina un impoverimento dei suoli, in

particolare nelle aree costiere di bassa quota e nei delta fluviali; infatti, nell'ultimo secolo si è assistito alla perdita di oltre il 50% delle aree umide costiere (IPCC, 2023). Ad esempio, si prevede che la disponibilità di acqua di fusione per l'irrigazione diminuirà in alcuni bacini dipendenti dalla fusione delle nevi fino al 20% per lo scenario +2°C (IPCC, 2023).

Il superamento di un livello di riscaldamento provoca una serie di effetti negativi, talvolta irreversibili, sui sistemi naturali. L'innalzamento delle temperature di +1,5 °C comporterebbe l'alterazione di numerosi ecosistemi a bassa resilienza, come le aree polari, per cui è previsto il discioglimento progressivo della calotta ghiacciata, le aree montane con la riduzione dell'accumulo nivale e lo scioglimento dei ghiacciai permanenti e per le aree costiere con la crescita progressiva del livello del mare (IPCC, 2023).

Inoltre, i cambiamenti climatici possono determinare un'intensificazione dell'intensità e della frequenza degli eventi di dissesto idrogeologico come frane inondazioni (IPCC, 2012). L'alterazione dei cicli idrici ordinari, provocata dai cambiamenti climatici è responsabile della crescita di intensità e frequenza degli eventi di dissesto e conseguentemente anche degli impatti sulla popolazione, gli insediamenti e le infrastrutture (Castellari et al., 2014). La crescita delle temperature atmosferiche e marine è responsabile dell'incremento dello scioglimento nivale e glaciale e dell'incremento nella frequenza e nell'intensità degli eventi alluvionali estremi (Boberg et al., 2009; Castellari et al., 2014).

La figura 16 è utile a comprendere le proiezioni future, annuali e stagionali⁸¹, di tre indici di pioggia, al fine di stimare le alterazioni future dei cicli idrologici per il periodo 2081-2100 rispetto al 1980-1999 (IPCC, 2012).

I tre indici sono:

- intensità dei giorni di pioggia;

⁸¹ ANN: (annuale); DJF: (dicembre, gennaio, febbraio); JJA (giugno, luglio, agosto).

- percentuale di giorni di pioggia superiori al 95° percentile dei giorni di pioggia a partire dal periodo 1961-1990;
- frazioni di giorni con precipitazioni maggiori di 10 mm.

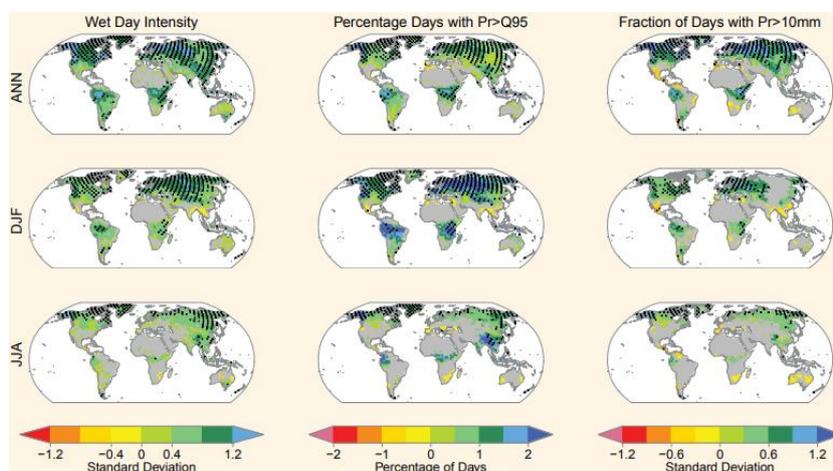


Figura 16: Indici di pioggia (IPCC, 2012).

Per quanto riguarda l'Europa Centrale e Mediterranea si osservano due differenti scenari stagionali; infatti, se durante il periodo estivo si assiste ad una riduzione della percentuale dei giorni di pioggia sopra il 95° percentile e della deviazione standard delle frazioni di giorni con piogge superiori ai 10 mm; durante quello invernale si osserva un incremento dei medesimi indici. Per entrambe le stagioni è comunque presente un incremento della deviazione standard per l'intensità dei giorni di pioggia. Dunque, ciò che emerge da tali proiezioni è che nell'Europa Centrale e Mediterranea in futuro ci saranno estati più aride, inverni più piovosi, con intensificazione dei giorni di pioggia per entrambe le stagioni. In sintesi, in futuro si assisterà a prolungati periodi di siccità intervallati da sempre più frequenti eventi alluvionali di intensità estrema. Alla scala globale gli scenari individuati sono geograficamente differenziati ma, per tutti e tre gli indici sono prevalenti le aree in cui si prevede l'intensificazione dei fenomeni piovosi, piuttosto che quelle in cui si prevede una diminuzione di intensità, soprattutto per quanto riguarda lo scenario riferito al periodo invernale.

Nel contesto italiano la combinazione tra gli effetti prodotti dai cambiamenti climatici sui cicli idrici e l'antropizzazione del territorio, determinano una crescita del rischio idrogeologico (Castellari et al., 2014; Milli & Prestininzi 2015; PNACC, 2018). L'antropizzazione della rete idrografica e l'urbanizzazione delle aree periferiali, con conseguente riduzione delle aree permeabili, hanno contribuito insieme ai CC ad accrescere i fattori di rischio per la popolazione. Inoltre, i CC possono contribuire ad accrescere l'intensità e la frequenza degli incendi boschivi, provocando così ulteriore inaridimento e erosione del suolo, partecipando così alla crescita dei fenomeni di dissesto (Castellari et al., 2014)(Giuseppe, 2020). A ciò si aggiunge, secondo Brunetti et al. (2004), il fatto che il clima italiano sta diventando più caldo e più secco; diminuiscono i giorni di pioggia, ma cresce la loro intensità, favorendo il presentarsi di lunghi periodi di siccità intervallati da precipitazioni atmosferiche rilevanti. Queste alterazioni sono dovute principalmente ad un aumento di frequenza di anticicloni subtropicali nel bacino del Mediterraneo occidentale (Brunetti et al., 2004)

In Italia, negli ultimi 60 anni, si è assistito ad una crescita di frequenza e intensità degli eventi di dissesto, soprattutto quelli a carattere estremo e distruttivo, con una crescita significativa dei danni prodotti, questi ultimi sono cresciuti negli anni ed hanno superato i due miliardi di euro l'anno (Castellari et al., 2014). All'interno dell'allegato III "impatti e vulnerabilità settoriali" del PNACC (2018) sono presenti le tendenze rilevate a livello nazionale per alcuni indicatori climatici riferite agli attuali scenari RPC e SRES⁸² di cui di seguito si riportano le principali evidenze.

- precipitazioni medie: Si prevede la riduzione delle precipitazioni atmosferiche annue, con un massimo stimato di 17,5 mm, con abbondanti disomogeneità sul territorio nazionale. In particolare, si stima un -30% delle precipitazioni annue nel Sud e nelle Isole e il -40% delle precipitazioni estive in Italia (RPC 8.5);

⁸² Special Report on Emission Scenarios.

- precipitazioni estreme: Riduzione dei giorni consecutivi di pioggia in tutta Italia, ad eccezione del nord e crescita dei periodi di siccità. Aumento nell'intensità di pioggia nel periodo invernale e diminuzione in quello estivo (RPC 8.5). La crescita di frequenza dei *flash-floods*, dovuti al verificarsi di eventi pluviali a carattere breve e intenso incrementa in maniera significativa il *run-off*,⁸³ provocando l'inquinamento del corpo idrico ricevente;
- copertura nevosa: riduzione della copertura nevosa a causa dell'innalzamento di quota dello zero termico e anticipazione dei deflussi primaverili;
- portata dei fiumi: riduzione fino 40% della portata fluviale, ad eccezione del centro e nord durante il periodo invernale e della zona alpina in primavera. Ad eccezione dell'arco alpino, riduzione delle portate annue in tutta Italia;
- umidità del suolo: Riduzione storica dell'umidità del suolo nel periodo 1951-2012 con maggiore intensità nel centro-nord, con valori che vanno dai -5 ai -8 l/m³. Previsione di un' ulteriore sostanziale diminuzione già nel periodo 2021-2050. Siccità e sovrasfruttamento delle risorse idriche rischiano, nelle aree costiera poste a bassa quota, di causare la crescita della salinità dei fiumi, degli acquiferi e delle riserve idriche naturali e antropiche;
- fabbisogno irriguo: Progressiva crescita del fabbisogno irriguo, con incremento dell'oltre il 20% per lo scenario RPC 8.5, mentre si prevedono modesti aumenti per RPC 2.6 e RPC 4.5.

Il PNACC (2018) offre una visione sulle variazioni attese del dissesto idrogeologico per il territorio italiano per l'arco temporale 2021-2050, facendo riferimento agli scenari RPC 4.5 e RPC 8.5. Le variazioni del rischio idrogeologico dovuto ai cambiamenti climatici sono dovute principalmente a due fattori: l'incremento delle temperature e la modificazione dei regimi pluviali. A tal proposito, se per la variazione delle temperature vari studi a livello internazionale hanno concordato sulle implicazioni dei CC, per quanto riguarda il regime delle precipitazioni sono

⁸³ Durante le esondazioni i deflussi provocano il dilavamento dei suoli urbani e agricoli trasportando così sostanze inquinanti all'interno dei corpi idrici riceventi.

presenti maggiori fattori di incertezza, poiché tali alterazioni sono piuttosto eterogenee a livello globale. In particolare, lo studio delle alterazioni pluviali sul territorio italiano è in parte limitato dalla ridotta densità di stazioni climatiche dotate di serie storiche. Brunetti et al. (2004) hanno evidenziato una riduzione statisticamente significativa delle precipitazioni nel sud del Paese mentre, non ci sono evidenze per il nord; contemporaneamente, però, hanno evidenziato un maggior rischio di incremento degli eventi piovosi estremi nel settentrione italiano, piuttosto che nel mezzogiorno.

In assenza di serie storiche rilevanti è possibile portare avanti una ricostruzione modellistica, meditante modelli climatici per l'analisi delle future implicazioni dei CC sul sistema idrogeologico, ma i risultati ottenuti sono soggetti a livelli di incertezza la cui quantificazione è difficoltosa. All'interno del PNACC (2018) si assiste ad una scomposizione del territorio italiano in sei macroregioni caratterizzate da cinque cluster di anomalie al fine di descrivere per, il periodo 2021-2050 (rispetto al 1981-2010), le possibili implicazioni dei CC sul dissesto idrogeologico, in riferimento agli scenari RPC 4.5 e RPC 8.5.

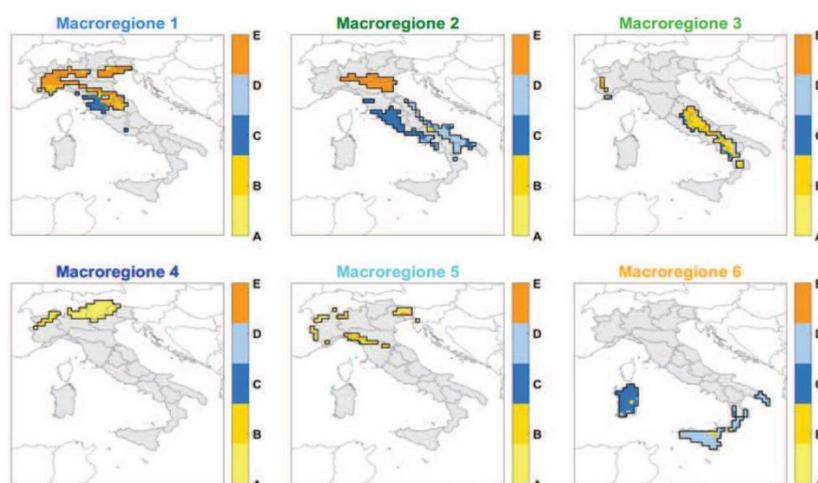


Figura 17: Macroregioni climatiche italiane (PNACC, 2018).

2.2.1 Eventi atmosferici estremi

I cambiamenti climatici, di cui l'attività umana è responsabile, stanno producendo numerosi fenomeni atmosferici e climatici estremi, con diffusione in tutto il globo, il cui verificarsi è determinato da una molteplicità di fattori, che possono avere ricadute regionali o globali. Nel rapporto AR5 è stato messo in evidenza che i cambiamenti climatici, già a partire dagli anni '50, stanno determinando, da un lato la crescita nella frequenza e nell'intensità delle ondate di calore, dall'altro la diminuzione della frequenza e degli impatti delle ondate di freddo (IPCC, 2023).

Tali eventi sono difficili da studiare poiché la limitata gamma di casi avvenuti, su cui si possono fare delle valutazioni, rende limitata la disponibilità di dati e conseguentemente anche quella di analisi (IPCC, 2012). Ulteriore problematica, relativa alla limitata disponibilità di dati, è quella della scala temporale, poiché gli eventi climatici estremi hanno una risoluzione temporale ristretta, mentre i dati climatici globalmente più diffusi presentano risoluzioni temporali di medio lungo periodo⁸⁴ (mensile o annuale).

Nonostante molti paesi si siano dotati di strumenti per analisi più dettagliate, sussistono comunque evidenti lacune all'interno dei dataset utilizzati per le analisi climatiche, specialmente per alcune aree geografiche dell'emisfero australe (IPCC, 2012). Tali eventi possono manifestare la loro intensificazione in modo graduale, che può anche essere confusa con una falsa tendenza, o presentare un cambiamento repentino, entrambe le fattispecie diventano oggetto di attenzione dal momento in cui vi è l'evidenza sperimentale del superamento di una determinata soglia decisa a priori (IPCC, 2012).

⁸⁴ I dati relativi a scansioni temporali mensili, stagionali e annuali sono disponibili per la maggior parte del globo a partire dalla fine del XIX e inizio XX secolo, consentendo di analizzare su lunghi periodi di siccità eventuali variazioni di periodi più umidi con una risoluzione temporale mensile. Dati con risoluzioni temporali più dettagliate sono disponibili solo a partire dalla metà del XX secolo, e dagli anni '70 per la maggior parte dei paesi. Ad oggi, nonostante vi siano risoluzioni temporali più dettagliate molti paesi non sono disposti a condividere i propri dati ad alta risoluzione, e comunque tra quelli che li mettono a disposizione vi sono problematiche legate alla qualità delle misurazioni e all'omogeneità.

Per quanto riguarda gli eventi alluvionali estremi, anche in questo caso, sussistono numerose problematiche relative alla valutazione. Infatti, i dataset globali sono piuttosto scarni e geograficamente eterogenei nella disponibilità di dati relativi all'umidità del suolo, il che comporta una minor capacità di stimare correttamente il livello di umidità o siccità del suolo, dunque, la capacità di generare modelli realistici per il monitoraggio dei cambiamenti dei cicli idrologici. Stesso discorso può essere fatto per la stima dei deflussi, di cui non si dispongono dati a livello globale, il che rende piuttosto incerte le stime delle alluvioni e dei bilanci idrici globali e regionali. La situazione è analoga per i dati relativi allo stoccaggio nivale, assenti in numerosi paesi (IPCC, 2012).

Gli studi di settore sono comunque in evoluzione grazie ai progressi portati avanti negli ultimi 25 anni per l'omogeneizzazione dei dati climatici e l'aumento della loro copertura globale. Inoltre, ad oggi, il rilievo della temperatura e delle precipitazioni di carattere estremo si può effettuare con risoluzioni temporali dettagliate; ad esempio, i dati messi a disposizione dal *Global Historical Climatology Network*, si sono dimostrati piuttosto solidi nella costruzione di modelli a livello globale e sub-globale, restano comunque difficoltà nella stima di alcune tipologie di eventi estremi, specialmente nelle regioni con minor copertura di dati.

Come anticipato, i fattori che possono influenzare l'intensificarsi dei fenomeni estremi possono essere vari; ad esempio, variazioni nette della temperatura dovute al cambiamento della radiazione solare, maggiori concentrazioni di umidità nell'aria e gradienti di temperature elevati tra mare e terra possono determinare il verificarsi di fenomeni monsonici (IPCC, 2012). A ciò si aggiunge l'azione degli esseri umani, i quali tramite le emissioni di gas climalteranti, hanno contribuito alla crescita delle temperature globali, e conseguentemente dei livelli di umidità specifica⁸⁵, per la quale si stima un +7% per ogni aumento della temperatura di +1 °C. La crescita

⁸⁵ L'umidità specifica è una grandezza fisica che misura l'umidità presente in una determinata massa d'aria. Indica il rapporto tra la massa di vapore acqueo e quella di aria secca.

dell'umidità specifica, ma non di quella relativa⁸⁶, può comportare l'incremento delle precipitazioni atmosferiche estreme. Nonostante queste correlazioni, resta comunque difficile attribuire con certezza il verificarsi di un certo evento climatico estremo ad una causa specifica, poiché essi sono generalmente generati da un concatenarsi di cause, e potrebbero comunque verificarsi anche in un contesto di clima immutato (IPCC, 2012). Tuttavia, certi modelli climatici permettono di verificare se la variazione di certi fattori sta determinando un'alterazione nella frequenza con cui si presentano determinati eventi estremi. Lo stesso ragionamento può essere utilizzato per stimare quanto l'attività umana accresca la probabilità che si verifichi un evento pluviale estremo. Dunque, secondo gli studi in materia, non è possibile ricostruire un rapporto causa-effetto univoco ma; piuttosto, è possibile portare avanti una scomposizione del problema, analizzando diacronicamente i fattori ed i meccanismi scatenanti gli eventi climatici estremi, ricostruendo così la catena fisica e processuale che porta al verificarsi dell'evento stesso.

Date queste premesse, il focus di questo paragrafo sarà incentrato sulle precipitazioni di carattere estremo, la cui definizione può variare a livello globale, data l'elevata eterogeneità che caratterizza le regioni terrestri. Per queste ragioni IPCC (2012) individua due parametri per la determinazione delle soglie oltre le quali un evento alluvionale può essere definito come estremo. Il primo parametro è di tipo relativo e la soglia viene stabilita sul 95° percentile, il secondo è assoluto ed è riferito ad un certo quantitativo di pioggia (mm) caduti all'interno di un certo periodo di tempo, tipicamente tale soglia⁸⁷ viene espressa come mm/giorno.

Come anticipato, anche per la stima degli eventi alluvionali estremi le metodologie di rilevazione sono piuttosto eterogenee e l'omogeneizzazione dei dati è sovente difficoltosa.

⁸⁶ L'umidità relativa indica il rapporto tra la quantità di vapore acqueo contenuto nell'aria (umidità assoluta) e la quantità massima che l'aria sarebbe in grado di contenere a quella temperatura (umidità assoluta di saturazione).

⁸⁷ Le soglie assolute, per definizione, sono variabili; ad esempio, negli USA è di 50,8 mm/giorno, mentre in Cina di 100 mm/giorno.

Il rapporto AR4 (IPCC, 2007) afferma che nella seconda metà del XX secolo vi è stato un incremento di fenomeni alluvionali estremi in molteplici aree geografiche, comprese quelle in cui si è assistito ad una riduzione complessiva delle precipitazioni e, che per il XXI secolo è prevista l'intensificazione nella frequenza e nell'intensità degli eventi alluvionali rilevanti. Nel rapporto AR4 si sottolinea comunque la presenza di variazioni inter-annuali e inter-decennali, con stime di tendenza spazialmente incoerenti per quanto riguarda le precipitazioni estreme; mentre, le evidenze in merito alla crescita delle temperature sono statisticamente più significative e più coerenti a livello spaziale (Alexander et al., 2006). Stime riguardanti il XXI secolo mostrano comunque una relazione tra crescita delle emissioni climalteranti e crescita dei tassi di precipitazione. A livello globale sono statisticamente più significative le tendenze delle precipitazioni verso estremi più alti piuttosto che più bassi ma, nonostante ciò, sono state registrate variazioni significative solo per l'indice di intensità giornaliera e non per ulteriori indici come l'Heavy Rainfall Days⁸⁸ (Alexander et al., 2006).

In sintesi, il fenomeno si presenta in modo eterogeneo a livello globale; infatti, in generale, si assiste ad una crescita delle precipitazioni intense ma, con tendenze altamente stagionali e specificità geografiche, poiché in molte aree non si evidenziano variazioni statisticamente significative (IPCC, 2012).

Per quanto riguarda il contesto europeo le precipitazioni estreme invernali sono cresciute per frequenza e intensità nell'Europa centro-occidentale e nella Russia europea. Studi nazionali evidenziano per Regno Unito e Germania un incremento delle precipitazioni durante il XX secolo, mentre nell'Italia settentrionale, in Polonia e in alcune aree costiere del Mediterraneo si osservano tendenze in diminuzione (IPCC, 2012). Proiezioni future mostrano un incremento delle precipitazioni

⁸⁸ "Heavy Rainfall Days" si riferisce a giornate in cui cade una quantità significativa di pioggia entro un periodo specifico, di solito 24 ore. La soglia specifica per definire la pioggia "forte" può variare a seconda del contesto e della località, ma di solito implica una quantità di precipitazioni superiore alla media per una singola giornata. Questi eventi possono aumentare il rischio di inondazioni, frane e altri pericoli legati alle condizioni meteorologiche. La definizione di "giorni di forti piogge" può variare da una regione all'altra ed è spesso stabilita in base alle condizioni climatiche locali e ai modelli storici del tempo.

estreme nell'Europa settentrionale, particolarmente concentrate all'interno dei mesi invernali. Boberg et al. (2009) evidenzia in tutte le sotto regioni europee una diminuzione dei giorni di pioggia leggera e un netto incremento degli eventi più intensi.

I risultati suffragano ulteriormente la tesi secondo cui non è possibile stabilire univocamente a livello globale se vi sia un aumento assoluto dei fenomeni pluviali estremi, in quanto vi è uno scenario globalmente eterogeneo con specificità stagionali e territoriali, spesso contrastanti. Gli studi fanno, comunque, emergere una significativa probabilità che ci sia stato, in molte regioni, un incremento statistico degli eventi alluvionali estremi, piuttosto che una loro diminuzione significativa (IPCC, 2023). Inoltre, i risultati ottenuti dagli studi in materia, sono dipendenti dagli scenari di crescita delle emissioni di gas serra (RCP). Infatti, gli incrementi nella frequenza e nell'intensità delle precipitazioni estreme sono direttamente legati alle proiezioni delle emissioni di GHG, e dunque all'azione umana, per cui a maggiori emissioni future sono legate implicazioni più significative per i fenomeni alluvionali di carattere estremo (IPCC, 2012).

Ciò che è certo è che è necessario portare avanti, con particolare attenzione, azioni e strategie di mitigazione e adattamento, specialmente laddove, sulla base delle evidenze scientifiche, è statisticamente riscontrato un incremento nella frequenza e nell'intensità delle precipitazioni estreme.

2.2.2 Effetti sul sistema socio-economico

Gli effetti prodotti dai cambiamenti climatici sull'ambiente determinano anche significativi impatti sulla società, di cui ne ostacolano lo sviluppo sostenibile. Tali impatti sono dovuti al fatto che l'uomo raccoglie la maggior parte delle sue risorse alimentari, idriche energetiche (etc.) dal territorio che lo circonda e l'alterazione di dei suoi equilibri può comportare degli scompensi sul settore socio-economico. Gli impatti dei cambiamenti climatici sono globali, nel senso che riguardano tutti i territori e tutti i sistemi, naturali o antropici che siano. Spesso, la degradazione dei servizi ecosistemici, di cui i cambiamenti climatici possono essere causa, comporta

l'impovertimento degli habitat e della loro resilienza, intesa anche come capacità di assorbire gli impatti di eventi climatici estremi (IPCC, 2023).

Se si prende in considerazione il settore agro-alimentare⁸⁹, negli ultimi 50 anni, si assiste ad una crescita globale delle produzioni agricole dovuta all'evoluzione tecnologica e alla crescita delle piantagioni intensive (IPCC, 2023); contemporaneamente, però, il rateo di crescita di produttività è calato a causa dei cambiamenti climatici, le cui implicazioni sono differenti alle diverse latitudini. Infatti, se in alcuni paesi posti a latitudini elevate si è assistito ad un incremento della produttività; nella maggior parte dei paesi posti a latitudini medio-basse si è assistito ad un calo della redditività delle terre (IPCC, 2023).

Il settore zootecnico rappresenta circa l'8% dell'acqua usata dagli esseri umani e l'incremento delle temperature dovute ai CC, la salinizzazione degli acquiferi dovuta all'innalzamento dei livelli del mare e la presenza di inquinanti nel suolo possono compromettere significativamente la disponibilità delle risorse idriche (Rojas-Downing et al., 2017). È dunque necessario affrontare tale problematica, rendendo più efficiente il sistema di gestione delle acque per la produzione zootecnica o producendo in aree in cui non ci sono problematiche relative alla risorsa idrica. Inoltre, l'incremento delle temperature può causare livelli di stress termico per le specie animali con conseguente crescita della domanda di acqua e possibili alterazioni dei cicli riproduttivi (Rojas-Downing et al., 2017). Le problematiche relative alla produzione di bestiame saranno più evidenti a latitudini elevate a causa della crescita del gradiente termico mentre gli effetti saranno meno drastici a latitudini più basse in cui si riscontrano maggiori capacità di adattamento da parte del bestiame (Rojas-Downing et al., 2017). In sintesi, i CC rischiano di far crescere la spesa per il settore zootecnico, diminuendo la produzione di bestiame e dei relativi derivati e incrementando il consumo idrico ed energetico per la produzione di una unità di prodotto.

⁸⁹ Responsabile dell'utilizzo del 70% delle risorse idriche globali (Rojas-Downing et al., 2017).

Il surriscaldamento degli oceani, la loro acidificazione e deossigenazione rappresentano il trio letale per la salute degli oceani derivante dall'alterazione dei cicli del carbonio e sono le principali cause di degradazione degli ambienti marini (Bijima et al., 2013). La combinazione dei tre fattori sopra elencati è stata storicamente responsabile di fenomeni di estinzione di massa di specie animali e vegetali; inoltre, la pesca sregolata e di contrabbando, l'eutrofizzazione⁹⁰ e l'inquinamento delle acque salate generano grandi impatti negativi sul settore ittico, riducendo notevolmente il potenziale di cattura, la varietà delle specie e la possibilità di fare acquacoltura di pesci e molluschi (IPCC, 2023). Inoltre, il presentarsi di eventi atmosferici estremi può comportare la distruzione di alcuni ecosistemi particolarmente sensibili, come le barriere coralline (Bijima et al., 2013).

Inoltre, i cambiamenti climatici, a causa dell'alterazione dei cicli idrici, comportano una minor sicurezza idrica per le comunità. Ad esserne più colpite sono le società che vivono in zone aride, al cui interno le disponibilità idriche si stanno man mano riducendo; entro il 2025 il 64% della popolazione globale potrebbe essere esposto a condizioni di stress idrico (Rojas-Downing et al., 2017). Si stima che circa metà della popolazione globale, a causa di fattori climatici viva in condizioni di crisi idrica almeno per una parte dell'anno (IPCC, 2023). L'insicurezza idro-alimentare colpisce con maggiore intensità certi luoghi⁹¹ in cui vivono comunità⁹² più vulnerabili. In generale, gli effetti negativi dei cambiamenti climatici sono sproporzionati nella distribuzione spaziale, poiché colpiscono maggiormente i paesi che meno hanno contribuito all'emissione di gas climalteranti. Infatti, i paesi meno sviluppati, spesso ex coloniali, che hanno un valore di emissioni pro capite inferiore alla media globale⁹³ sono colpiti maggiormente dai rischi climatici. Spesso, i maggiori fattori di rischio sono concentrati in aree geografiche in cui vi sono elevati tassi di povertà, conflitti, elevati livelli di sussistenza e economie di sostentamento fortemente

⁹⁰ Sovrabbondanza di nitrati e fosfati in un ambiente acquatico.

⁹¹ I luoghi più vulnerabili agli eventi climatici estremi sono Africa, Asia, America centrale e del sud, piccole isole, Artico.

⁹² Le comunità più vulnerabili sono quelle costituite da piccoli produttori agro-alimentari, famiglie a basso reddito, popolazioni indigene, persone sotto la soglia di povertà etc.

⁹³ 6,9 tonnellate pro capite di CO₂.

influenzate dal clima come per l'agricoltura, la silvicoltura, la pesca e l'allevamento. I dati confermano tale scenario, infatti tra il 2010-2020 vi è stato un rapporto di mortalità per eventi climatici estremi di 15:1 tra i paesi con i più alti di vulnerabilità e quelli con i tassi più bassi (IPCC, 2023). Per la gestione futura della sicurezza idrica Allan et al. (2013) propongono una gestione adattiva⁹⁴ della risorsa idrica, basata sui principi di gestione integrata delle risorse e di apprendimento sociale; tuttavia, evidenziano che il passaggio da una gestione convenzionale della risorsa ad una adattiva è limitato da numerose difficoltà, le quali tendono a crescere man mano che si amplia la scala geografica di riferimento. In tal senso, nel contesto europeo, la direttiva 2000/60/CE istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di gestione delle risorse idriche, promuovendo un approccio integrato e declinato sulle esigenze nazionali al fine di raggiungere un buono stato di salute idrologico ed idraulico (Allan et al., 2013).

In un contesto urbano sono altresì evidenti le alterazioni prodotte dai cambiamenti climatici, i cui effetti negativi si ripercuotono sulla salute umana, sui servizi, sul turismo, sulla mobilità, sulle infrastrutture, sulla sicurezza energetica e alimentare e dunque sul sistema socio-economico e insediativo. Infatti, se le cause dei CC sono spesso da ricondurre a fenomeni globali, gli effetti prodotti sono evidenti alla scala locale, motivo per cui già il Rapporto Brundtland (1987) e la Conferenza delle Nazioni Unite di Rio (1992) avevano evidenziato l'importanza di agire alla scala locale per supportare lo sviluppo sostenibile globale (Bulkeley & Betsill, 2005). Nelle città si assiste ad un'intensificazione degli eventi climatici estremi, da un lato con le ondate di calore, che colpiscono specialmente le città con elevati livelli di inquinamento dell'aria; dall'altro con le precipitazioni di medio-alta intensità, le quali sono sempre più frequenti, e delle quali è sovente complicato controllarne il

⁹⁴ La gestione adattiva della risorsa idrica presuppone un'integrazione tra conoscenza e gestione al fine di gestire le complessità e le incertezze relative al problema decisionale. Tale approccio abbraccia una quanto più ampia visione multidisciplinare e multiculturale coinvolgendo all'interno dei processi persone e organizzazioni con punti di vista epistemologici e ontologici potenzialmente diversi.

deflusso, a causa di sistemi idraulici spesso obsoleti rispetto alle elevate portate d'acqua generate durante eventi alluvionali estremi (Ward et al., 2016; IPCC, 2023).

Dunque, l'insieme degli effetti dei cambiamenti climatici comportano conseguenze negative per la salute fisica e mentale umana e aumentano il rischio di crisi umanitarie per le comunità più fragili. Si evidenzia come eventi termici estremi e crescita delle malattie di origine idro-alimentare abbiano comportato un maggiore tasso di mortalità e di morbosità⁹⁵ (IPCC, 2023).

Come sottolineato precedentemente, l'azione umana gioca un ruolo rilevante nel contesto dei cambiamenti climatici, ad essa è possibile imputare anche la crescita nella frequenza degli eventi estremi composti già a partire dagli anni '50 (IPCC, 2023; IPCC, 2012). Con il termine eventi estremi composti si indica la combinazione, sincronica, di due o più eventi climatici estremi come ondate di calore, siccità, incendi, e inondazioni. La combinazione di più fattori di rischio può sopraffare le misure di mitigazione e adattamento messe in campo e accrescere la vulnerabilità delle comunità esposte, con conseguente crescita del rischio complessivo. L'ultimo rapporto AR6 (IPCC, 2023) mette in evidenza che, a partire dal 2014 anno di pubblicazione di AR5 (IPCC, 2014) sino ad oggi, i rischi climatici, a parità di aumento delle temperature, sono cresciuti per tutti gli elementi di preoccupazione evidenziati nel rapporto. Inoltre, si stima che gli impatti osservati nel breve periodo avranno ripercussioni ben maggiori su serie temporali più lunghe a causa del progressivo accrescimento delle temperature; dunque gli scenari di impatto per +1,5 °C saranno più intensi rispetto allo scenario attuale di +1,1 °C.

Nel rapporto AR6 si stima che per lo scenario di +1,5 °C vi sia tra il 3% e 14% delle specie animali a rischio molto alto di estinzione, la riduzione del 70-90% delle barriere coralline, scomparsa di rilevanti porzioni di ghiacciai e la crescita del livello dei mari tra i 2-3 m. Per lo scenario di incremento delle temperature di +2 °C si prevedono ripercussioni per milioni di persone con significative alterazioni della disponibilità e qualità degli alimenti e dell'acqua potabile, con forte crescita del tasso

⁹⁵ Rapporto tra la popolazione soggetta ad una malattia e il totale della popolazione.

di denutrizione e di morbosità alimentare e la crescita del livello dei mari tra i 2-6 m, anche in questo caso i più esposti ai rischi sono i piccoli stati insulari e i paesi meno sviluppati. Per lo scenario +3 °C si prevedono, in molti settori, rischi di livello molto elevato, con cambiamenti irreversibili e forti limiti nell'adattamento (IPCC, 2023).

I danni previsti da fenomeni di allagamento, rispetto allo scenario +1,5 °C, sono maggiori rispettivamente di 1,4-2 volte tanto per lo scenario +2 °C, e di 2,5-3,9 volte tanto per lo scenario +3 °C. Se si dovesse raggiungere lo scenario di +4 °C si assisterebbe all'estinzione del circa 50% delle specie marine, alla migrazione dei biomi sul 35% della superficie terrestre, al +10% di superficie terrestre interessata da eventi alluvionali estremi colpendo oltre 2,1 miliardi di persone, a circa 4 miliardi di persone esposte a povertà idrica, e ad una crescita del +30% della frequenza di incendi. Dunque, come visto, si stima che i danni prodotti dai cambiamenti climatici crescano all'aumentare del gradiente di temperatura ma, dipenderà anche dalla portata più o meno significativa delle azioni di mitigazione e adattamento messe in campo dai governi. La crescita delle temperature determinerà una crescita della frequenza degli eventi estremi e composti che, insieme al depauperamento della biodiversità e alla crescita di conflitti, determinerà una crescita dei rischi complessivi in gran parte delle regioni geografiche. A ciò si aggiungono i possibili effetti collaterali non considerati nell'attuazione di politiche di adattamento e di riduzione dei GHG, le quali possono rivelare l'altra faccia della medaglia e accrescere il rischio complessivo (IPCC, 2023).

L'inevitabile innalzamento del livello dei mari e degli oceani, catalizzato dalla crescita delle emissioni di GHG, comporterebbe, entro la fine del XXI secolo, che almeno il 50% delle località situate sul livello del mare subisca eventi estremi di innalzamento delle maree, con elevati rischi per insediamenti, infrastrutture e ecosistemi. Affrontare l'innalzamento dei livelli marini comporta una sfida rilevante a livello globale per proteggere o trasferire gli insediamenti che si trovano lungo le coste poste a bassa quota; per cui è necessario prevedere un ampio ventaglio di misure condivise e sostenibili da pianificare con largo anticipo.

Le compensazioni, attraverso le soluzioni basate sugli ecosistemi, forniscono soluzioni efficaci contro il rischio esondazioni ma sono limitate, nell'efficacia, ad un incremento delle temperature di massimo +1,5 °C e del livello del mare entro una crescita di 0,5-1 cm/anno, oltre tali soglie perdono fortemente di efficacia. Anche le opere di difesa antropica, come i *seawall*, oltre certe soglie di crescita del livello dei mari sono efficaci solo sul breve periodo e sul lungo periodo rischiano di accrescere il livello di rischio complessivo (IPCC, 2023).

3. ADATTAMENTO E MITIGAZIONE DEGLI EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SUL RISCHIO IDROGEOLOGICO

Per contrastare i cambiamenti climatici e le conseguenze negative che generano sull'ambiente e sulle attività umane è possibile agire secondo due approcci complementari tra loro: *adattamento* e *mitigazione*. I due approcci sono due facce della stessa medaglia poiché entrambe si occupano degli impatti dei cambiamenti climatici e, talvolta, l'applicazione di misure di mitigazione può contribuire al raggiungimento degli obiettivi di adattamento, così come può essere valido il contrario.

Affrontare il contrasto agli impatti negativi dei cambiamenti climatici, (e.g. i danni causati da eventi di tipo meteo-climatico), maggiormente tramite misure di mitigazione o, di adattamento, è una scelta politica e di governance territoriale. Questo perché, pur agendo in nome della stessa causa, i due approcci richiedono differenti principi di applicazione. La mitigazione si occupa di agire alla fonte del problema, riducendo le emissioni di gas serra mentre, l'adattamento si occupa di minimizzare l'impatto agendo sulla resilienza del territorio. Anche se entrambe le tipologie di azioni rispondono alla lotta ai cambiamenti climatici, alla gestione del rischio idrogeologico e concorrono al raggiungimento dello sviluppo sostenibile, il loro significato implica differenti accezioni. Nel contesto dei cambiamenti climatici il loro significato può essere ricondotto alle seguenti definizioni.

Con azioni di adattamento si intende l'adeguamento dei sistemi naturali e umani in risposta a stimoli climatici effettivi e attesi, per moderare il danno o sfruttare le opportunità vantaggiose (Rojas-Downing et al., 2017). Tale definizione implica due aspetti fondamentali, da un lato la capacità auto-adattiva della natura, dall'altro il ruolo necessario dell'azione umana nel sostenere l'adattamento naturale, che da solo non riesce a rispondere a pieno alle alterazioni climatiche generate dall'uomo. Nell'attuale contesto climatico l'adattamento è un obiettivo che deve essere perseguito anche tramite la gestione e la prevenzione degli eventi atmosferici

estremi e dei relativi rischi generati. Il concetto di adattamento non è da confondere con quello di mitigazione poiché le sue definizioni in letteratura e le sue applicazioni territoriali sono talvolta contrapposte, talvolta complementari (IPCC, 2012).

Con azioni di mitigazione si intende la riduzione degli impatti negativi, generati dai cambiamenti climatici, agendo alla fonte del problema, cioè, riducendo o prevenendo l'emissione di gas climalteranti (GHG). In questo caso, l'obiettivo è quello di ridurre il tasso di cambiamento climatico agendo sulle fonti che maggiormente contribuiscono al suo accrescimento (Rojas-Downing et al., 2017). Il concetto di mitigazione comprende al suo interno un ampio ventaglio di azioni che vanno dall'incremento delle energie rinnovabili alla riduzione della dipendenza da fonti fossili. Nella pratica le azioni di mitigazione puntano ad una riduzione del rischio complessivo agendo su una delle sue tre componenti: pericolosità, esposizione, vulnerabilità (Gisotti, 2012)(IPCC, 2012). Il concetto di mitigazione comprende, al suo interno, anche l'insieme di azioni messe in campo in seguito ad un evento di dissesto per limitare la propagazione di ulteriori danni, onde evitare il presentarsi di ulteriori fattori di rischio non ancora innescati (Gisotti, 2012; IPCC, 2012). Tra le azioni di adattamento rientrano, ad esempio, le opere di sistemazione fluviale come gli argini e le grandi infrastrutture di gestione del livello delle acque marine, come il MOSE a Venezia.

Entrambe le tipologie di azioni implicano una visione temporale diacronica, dunque, riferita sia all'esistente, che a ciò che è previsto. Negli ultimi 30 anni l'attenzione verso i cambiamenti climatici ed i rischi ambientali è cresciuta notevolmente all'interno della letteratura scientifica e delle politiche pubbliche, ciò è stato fondamentale per inquadrare le sfide di gestione del rischio e per portare avanti azioni di mitigazione e adattamento (IPCC, 2023)

In questo quadro l'Assemblea Generale delle Nazioni Unite *Decennio Internazionale per la Riduzione dei Disastri Naturali* (1990-2000), insieme alla strategia internazionale per la riduzione delle catastrofi e al *Quadro d'Azione per Hyogo* (2005) costituiscono una svolta a livello internazionale per la gestione del rischio catastrofi.

Tali occasioni fanno emergere la doppia natura dei cambiamenti climatici, da un lato sono un problema che riguarda lo sviluppo futuro, dall'altro sono già sintomo di uno sviluppo non sostenibile. Tuttavia, seppur vi sia la consapevolezza delle responsabilità e del ruolo che ha giocato e tutt'ora gioca la politica nell'accrescere certi fattori di rischio naturale, ad oggi rimangono insufficienti gli sforzi per ridurre il rischio di carattere sociale, economico e ambientale in molti paesi (IPCC, 2012). A livello internazionale per il contrasto ai cambiamenti climatici, è ormai avanzato il processo di spostamento dell'attenzione dalla risposta emergenziale post-evento, ad una programmazione per la gestione e del rischio catastrofi, ponendo dunque maggiore enfasi sulla riduzione quantitativa dei fattori di rischio, da attuare anche tramite accrescimento della resistenza e della resilienza delle comunità esposte (IPCC, 2023). La convinzione diffusa, nelle politiche di gestione dei cambiamenti climatici e delle catastrofi, che il rischio di catastrofi fosse principalmente legato alla preparazione e alla risposta a eventi catastrofici e non alla sua riduzione intrinseca, ha contribuito a consolidare l'opinione che tali approcci, pur essendo complementari, siano distinti. (IPCC, 2012).

In sintesi, un adattamento efficace ai cambiamenti climatici richiede una comprensione dei diversi modi in cui i processi sociali e i percorsi di sviluppo determinano il rischio di catastrofi. Il rischio di catastrofe è spesso legato a fattori di rischio ambientali, economici o sociali permanenti, cronici o persistenti. Per gestire le conseguenze del cambiamento climatico e ridurre il rischio di disastri, è importante utilizzare soluzioni basate sulla natura, sviluppare misure di adattamento e ridurre l'esposizione, il pericolo o la vulnerabilità delle persone (IPCC, 2012).

3.1 Strumenti e politiche per l'adattamento e la mitigazione degli effetti dei cambiamenti climatici sul rischio idrogeologico

A livello internazionale l'*UNFCCC*, il *Protocollo di Kyoto* (1997) e l'*Accordo di Parigi* (2015) sono i principali strumenti per incoraggiare gli stati membri a portare avanti politiche di carattere climatico che mirino all'adattamento e alla mitigazione degli impatti negativi. L'accordo di Kyoto è uno dei più importanti strumenti giuridici per il contrasto ai cambiamenti climatici, la riduzione e la contabilità delle emissioni di GHG e la regolazione dei mercati energetici internazionali. L'accordo di Parigi ha permesso di costruire uno scenario politico (quasi) globale per portare avanti a livello nazionale e sub-nazionale azioni e politiche di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici.

Oltre ai sopracitati accordi sono accordi di riferimento internazionale:

- *Quadro di riferimenti di Sendai* (2015-2030) per la gestione del rischio e la definizione di una strategia globale comune per il contrasto delle sempre più frequenti e intense catastrofi ambientali.
- *Agenda 2030 dell'ONU*, contenente i 17 Obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs).
- *Piano di azione Addis Abeba*, strumento per finanziare gli interventi dell'Agenda 2030.

Il raggiungimento sostanziale degli obiettivi formali contenuti all'interno di questi accordi contribuirebbe a combattere la povertà estrema, l'inquinamento atmosferico (etc.) e a promuovere l'inclusività e la prosperità delle società più povere, riducendo gli impatti negativi dei cambiamenti climatici sulla salute umana, sulle migrazioni, sui conflitti (IPCC, 2023).

L'attenzione da parte della comunità scientifica è fondamentale per accrescere la sensibilità e la consapevolezza delle masse, generare attivismo e focalizzare il problema anche dal punto di vista politico. Dalla pubblicazione del rapporto AR5 (IPCC, 2014), ad oggi, è cresciuta notevolmente la sensibilità del pubblico verso le

tematiche ambientali e in numerosi territori sono nati movimenti di giovani, popoli indigeni e attivisti talvolta capaci di indirizzare l'azione pubblica verso una maggiore considerazione della crisi climatica, ponendo l'attenzione alle misure di adattamento e mitigazione (*Vox populi, Vox Dei*). Anche i mezzi di comunicazione sia classici (tv, radio, stampa) che contemporanei (social network) hanno un ruolo determinante nella costruzione del dibattito sui cambiamenti climatici e spesso possono mostrare due lati della medaglia, da un lato possono informare e contribuire fortemente alla responsabilizzazione e presa di coscienza delle conseguenze dei cambiamenti climatici, dall'altro possono disinformare e ostacolare la comprensione del fenomeno, declassando il problema dall'agenda delle priorità, trasformando il dialogo in una polarizzazione di idee. L'accordo di Parigi al 2020 ha imposto ai 56 paesi che emettono il 53% delle emissioni globali di GHG, di promulgare leggi per la riduzione delle emissioni di gas serra.

L'azione politica accettata socialmente, efficiente ed efficace è fondamentale nell'attività di regolazione delle emissioni di GHG. La diffusione di azioni condivise, che permettano un'elevata innovazione tecnologica, e la creazione di nuove opportunità per il mercato anche tramite incentivi e sgravi fiscali è il motore per l'avvio di un pacchetto di politiche che permettano di affrontare con i giusti strumenti la crisi climatica. Tale pacchetto, data la complessità dei cambiamenti climatici, deve essere caratterizzato da una scomposizione multisetoriale del problema coinvolgendo i differenti stakeholders e le diverse scale territoriali.

Gli effetti delle politiche in campo energetico, per l'ampliamento del parco energetico rinnovabile e per la riduzione dei costi delle fonti a basse emissioni, insieme all'innovazione tecnologica dei processi e dei materiali, hanno prodotto, a partire dal 2010, una riduzione costante dei prezzi per impianti solari, eolici, batterie al litio etc. Nel periodo 2010-2019 si osserva un calo del costo delle fonti energetiche a ridotte emissioni pari al -85% per il solare e batterie al litio e -55% per l'eolico e una crescita nella loro distribuzione, anche se con forti disparità territoriali. La sfida da affrontare per poter permettere una transizione energetica di quanto più ampio respiro e diffusione globale è quella di rendere più efficiente,

dal punto di vista economico, la produzione di 1 kW da fonte a rinnovabile piuttosto che da una fossile (IPCC, 2023); finché non verrà invertita questa tendenza, la transizione ecologica sarà fortemente ostacolata da limiti economici.

Nel secondo decennio degli anni 2000 è possibile osservare una netta crescita dei flussi monetari per il finanziamento di azioni climatiche, si stima che tra il 2013 e il 2020 i flussi totali siano cresciuti fino al 60%; tuttavia, sovente non si assiste ad una auspicata cooperazione internazionale, con sistemi di finanziamento che rimangono all'interno dei confini nazionali. A partire dal 2014, i mercati finanziari relativi alla green economy sono cresciuti significativamente, così come l'attenzione da parte di investitori e banche verso le politiche di mitigazione dei rischi ambientali.

In questo contesto di attenzione globale, da parte del mondo della politica e della finanza, verso i cambiamenti climatici, anche le emissioni di GHG diventano oggetto di scambio finanziario o tassazione. Si stima che, al 2020, il 20% delle emissioni globali di GHG fosse sottoposto a regimi di imposta o a sistemi di scambio, come i crediti di carbonio⁹⁶, ma che a causa della scarsa rilevanza economica delle suddette imposte, non vi sia stata una riduzione significativa delle emissioni (IPCC, 2023).

A partire dal 2000 (figura 18), in molti paesi le politiche hanno prodotto effetti positivi, portando una migliore efficienza energetica, sviluppo tecnologico, tutela ambientale e riduzione delle emissioni di gas climalteranti; tuttavia, le politiche nazionali efficaci di riduzione delle emissioni di GHG compensano solo parzialmente la crescita globale delle emissioni.

⁹⁶ I crediti di carbonio sono una misura strategica per la promozione di progetti nazionali e internazionali di tutela ambientale e climatica con l'obiettivo di ridurre le emissioni complessive di gas climalteranti. Si tratta di certificati negoziabili tra imprese, un credito di carbonio equivale ad una tonnellata di GHG non emessa o compensata tramite progetti capaci di ridurre o riassorbire emissioni di GHG. I crediti sono certificati da società terze, scambiati e registrati su di un registro pubblico. I crediti di carbonio si differenziano in due macro categorie, la prima prevede progetti che riducano le emissioni di GHG, la seconda prevede il sequestro e rimozione dei GHG già presenti in atmosfera.

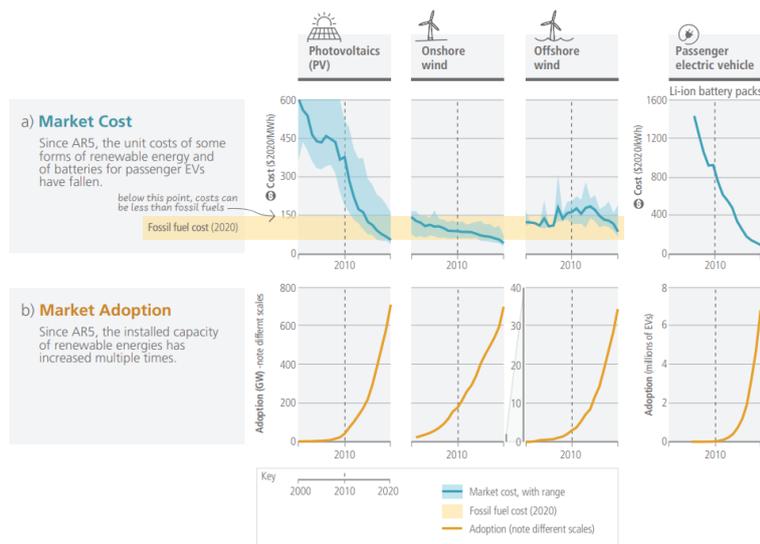


Figura 18: Prezzi di mercato e capacità installate delle energie rinnovabili e dei veicoli elettrici (IPCC, 2023).

Per quanto riguarda il futuro, sulla base degli attuali contributi determinanti a livello nazionale (NDC) stabiliti dall'accordo di Parigi, e delle emissioni previste al 2030, si stima che la temperatura superi la soglia dei +1,5 °C entro il 2030 e rischia di superare i +2,8 °C [2,1-3,4 °C] entro la fine XXI secolo se non vengono messi rapidamente in campo ulteriori sforzi significativi da parte degli Stati. Per contenere tale crescita sarebbe necessario raggiungere entro il 2025 il picco massimo delle emissioni, per poi ridurle del -43% entro il 2030, e del -84% entro il 2050.

In tutto il mondo si osservano misure di adattamento per rispondere ai rischi climatici ma, spesso si tratta di misure con orizzonte temporale breve, frammentate e settoriali che tendono a concentrarsi più sulla pianificazione che sull'attuazione, senza un sistema adeguato di monitoraggio e valutazione degli effetti prodotti (IPCC, 2023). Inoltre, in numerosi paesi e settori economici si continuano a portare avanti azioni di cattivo adattamento, che amplificano gli effetti negativi prodotti dai cambiamenti climatici, limitano i servizi ecosistemici, accrescono l'esposizione ai rischi e aggravano le disuguaglianze sociali. Tali misure, spesso, sono caratterizzate da una visione a breve termine e da una concentrazione dell'attenzione su rischi settoriali, isolati. Per non incorrere in tale fattispecie è necessario pianificare con

una visione a lungo termine, multisetoriale e soprattutto inclusiva. Il potenziale di adozione di tecnologie che riducano le emissioni di GHG è fortemente diseguale a livello globale; infatti, spesso i paesi meno sviluppati, a causa di capacità istituzionali limitate e risorse finanziarie esigue, hanno difficoltà ad accedere a tecnologie che a parità di beni prodotti producano meno gas climalteranti⁹⁷.

Ad oggi, le politiche climatiche hanno assunto all'interno del dibattito politico internazionale, nazionale e sub nazionale, grande rilevanza, il ventaglio di strategie e strumenti per conseguire azioni di mitigazione e adattamento è sempre più ampio e sempre più integrato all'interno dei processi di pianificazione territoriale e urbana (IPCC, 2023). Più della metà delle politiche messe in campo per mitigazione e adattamento riguardano la gestione dell'acqua sotto differenti aspetti. Dato il forte ruolo di presidio territoriale che svolge l'agricoltura, la maggior parte delle politiche di gestione della risorsa idrica afferisce al settore agricolo, al cui interno si auspica una migliore gestione del sistema idrico. Le principali azioni riguardano gestione e stoccaggio dell'acqua, conservazione dell'umidità del suolo e degli acquiferi profondi, razionalizzazione dell'irrigazione, conservazione del paesaggio (IPCC, 2023).

In ambiente urbano le principali misure di adattamento riguardano il rischio di inondazioni e di ondate di calore. Le misure di contrasto possono essere di tipo immediato producendo da subito effetti sul territorio (conservazione degli ecosistemi), o di tipo differito se gli effetti positivi sono riscontrabile nel medio lungo-termine (riforestazione, ripristino ecosistemi, bonifica suoli). In questo quadro di sinergia tra adattamento e mitigazione, la varietà di azioni da mettere in campo è molto ampia e passa per la gestione forestale, la messa in sicurezza degli insediamenti, la conservazione e l'accrescimento dei servizi ecologici, l'efficientamento del sistema alimentare, il tutto in un'ottica di crescita della resilienza e di sviluppo sostenibile. La combinazione di azioni non strutturali

⁹⁷ 5.4 affrontare i cambiamenti climatici attraverso l'adattamento e la mitigazione — Inglese (europa.eu).

(pianificazione, sistemi di allarme) e strutturali (arginature, vasche di laminazione) ha contribuito in molti eventi a salvare vite umane (Gisotti, 2012). Al fine di efficientare le azioni di mitigazione e adattamento è necessario prevedere azioni multisettoriali e trasversali. Ad esempio, è rilevante avviare un processo di pianificazione che sia sussidiario e che assegni ad ogni livello amministrativo di competenza territoriale un ruolo all'interno di una strategia nazionale di adattamento.

È importante ricordare che le azioni previste per il contrasto ai cambiamenti climatici sono riferite a determinati scenari climatici e la loro efficacia decresce all'aumentare delle temperature. Per il settore agricolo le tecniche innovative di adattamento diventerebbero meno efficaci oltre lo scenario +2 °C, per la selvicoltura oltre i +3 °C. Identico discorso vale per le azioni di mitigazione del rischio idrogeologico, le quali riducono la loro efficacia al crescere del gradiente di temperatura (IPCC, 2023).

3.1.1 Europa – Strategia di Adattamento ai Cambiamenti Climatici

Anche alla scala comunitaria l'attenzione verso i cambiamenti climatici è piuttosto significativa, nel decennio 2002-2011 sul suolo europeo è stato rilevato un gradiente di temperature di +1,3 °C rispetto ai livelli pre-industriali, dato superiore al gradiente globale medio (IPCC, 2023). Agli albori della politica climatica europea, tra la fine degli anni '80 e gli anni '90, l'attenzione si è concentrata soprattutto sulla riduzione delle emissioni di gas serra (mitigazione), ritenendo che l'adattamento fosse necessario solo nei paesi in via di sviluppo vulnerabili, rimanendo un concetto un po' tabù per le nazioni europee (Remling, 2018; Selin & VanDeveer, 2015). Il focus quasi esclusivo sulla mitigazione fu legato al timore che, portare avanti una politica di adattamento, potesse limitare la volontà politica di affrontare le emissioni di gas serra (Rayner & Jordan, 2016). Questo atteggiamento ha iniziato a cambiare solo negli anni duemila; i ricercatori lo attribuiscono in parte alla pubblicazione nel 2001 del terzo rapporto IPCC, che ha individuato l'adattamento come un imperativo per i Paesi industrializzati e in via di industrializzazione (Remling, 2018). Ulteriore

elemento che ha catalizzato l'attenzione dell'UE verso la necessità di comprendere azioni di adattamento nel contrasto ai cambiamenti climatici, sono le diffuse inondazioni verificatesi sul territorio europeo nel 2002 nonché l'ondata di calore del 2003 (Remling, 2018). Questo insieme di elementi aiuta a comprendere il perché l'UE si sia dotata esclusivamente di una strategia di adattamento e non anche di una di mitigazione. Infatti, già dagli anni '90 l'UE si è impegnata, con successo, nella mitigazione delle emissioni di gas climalteranti, con una riduzione del -31% delle emissioni di gas a effetto serra tra il 1990 e il 2022⁹⁸. L'UE, però, nello scenario globale ha una capacità di mitigazione piuttosto limitata; infatti, contribuisce solo al 6% delle emissioni globali di gas serra, rendendo così necessaria l'attuazione di una strategia di adattamento per rendere i territori maggiormente resilienti.

A partire dal 2007, l'attenzione dell'UE verso le azioni di adattamento si è tradotta in una serie di politiche non legislative quali il primo *Libro Verde* (2007) successivamente rielaborato e sintetizzato all'interno del *Libro Bianco* (2009) (Remling, 2018). La sintesi della crescente attenzione verso le politiche di adattamento si traduce nella pubblicazione della Strategia UE di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (2013) successivamente rinnovata e aggiornata nel 2021.

Inoltre, ad oggi l'UE si è dotata di quattro strategie sub-regionali per il Mar Baltico, l'area del Danubio, il Mar Adriatico-Ionio e l'area alpina; con l'obiettivo di fornire specifici finanziamenti per le suddette macroregioni.

L'attenzione dell'UE è rivolta soprattutto ai differenti impatti negativi che i cambiamenti climatici possono generare sul territorio europeo in cui si prevede una crescita nella frequenza degli eventi calamitosi estremi. Data l'elevata eterogeneità che caratterizza i territori comunitari, anche gli impatti possono essere piuttosto diversificati; ad esempio, i paesi meridionali europei potrebbero subire maggiormente gli effetti delle ondate di calore, i paesi del nord e nord-ovest l'intensificarsi dei fenomeni alluvionali mentre i paesi con affaccio sul mare l'erosione costiera. Dunque, il livello di rischio non è equamente distribuito ma vi

⁹⁸ Mitigazione dei cambiamenti climatici: ridurre le emissioni (europa.eu).

sono delle aree in cui i fenomeni possono acutizzarsi, come nel bacino del Mediterraneo e nelle aree costiere, nelle aree montuose, nelle pianure densamente insediate e nelle zone più isolate (IPCC, 2023). Inoltre, è da ricordare come circa due terzi della popolazione europea viva in aree urbane, zone che spesso si sono dimostrate inadatte nel mettere in campo azioni di mitigazione e adattamento e a gestire situazioni emergenziali. L'applicazione di una strategia a livello comunitario è ritenuto un passaggio fondamentale, onde evitare di mettere a repentaglio la coesione europea, poiché sovente i cambiamenti climatici tendono ad inasprire il divario sociale colpendo con maggior forza i territori e le fasce di popolazione più deboli.

L'adattamento è anche una questione economica, i costi a livello comunitario derivanti dai cambiamenti climatici possono essere più che ingenti, si stima che al 2050 la mancata applicazione di politiche di adattamento possa raggiungere un costo di 250 miliardi di euro. Stime passate evidenziano per il periodo 1980-2011 vi siano state perdite per oltre 90 miliardi dovute ad eventi alluvionali, le quali potrebbero crescere in futuro e raggiungere il costo di 20 miliardi/anno per il periodo 2020-2030 e di 46 miliardi/anno per il 2050-2060 (IPCC, 2023).

L'adattamento è una questione di salute pubblica, il costo sociale dei cambiamenti climatici può mostrare un conto molto caro, tra il 1980-2011 sono stati registrati 2.500 decessi e oltre 5,5 milioni di persone coinvolte. Le stime future mettono in luce uno scenario critico con 26.000 morti/anno nel periodo 2020-2030 e 89.000 morti/anno nel periodo 2050-2060 dovute all'innalzamento delle temperature.

Dovendo fare un bilancio, tra i costi dovuti al portare avanti le azioni di adattamento necessarie e i danni generati dalla mancata applicazione, emerge un rapporto di convenienza di circa 6:1, ossia per ogni euro (€) speso in azioni di adattamento se ne risparmiano sei, che sarebbero altrimenti stati spesi per compensare i danni. La stima per le spese di adattamento a livello comunitario è di circa 1,7 miliardi di Euro/anno per il decennio 2020-2030 ed è prevista una sua crescita a circa 3,4 miliardi di Euro/anno per il decennio 2050-2060 (IPCC, 2023).

Il modo in cui l'adattamento climatico viene inteso nell'Unione Europea è esplicitato attraverso i tre documenti politici chiave sopracitati: la Strategia sull'adattamento e i Libri Verdi e Bianchi che l'hanno preceduta, il cui obiettivo è quello di rendere l'Europa maggiormente resiliente ai cambiamenti climatici. Il discorso politico portato avanti dall'Europa serve efficacemente a depoliticizzare le scelte che le società fanno in risposta ai cambiamenti climatici, presentando l'adattamento come una questione non politica ma socio-economica (Remling, 2018). Il ruolo dell'Europa è quello di coordinatore, deve dettare le linee guida per lo sviluppo di piani, strategie e azioni a livello nazionale, regionale e locale. In tale contesto, e sulla base del quadro delineato dall'ONU, lo strumento chiave per una politica europea efficacemente decentralizzata sono le strategie di adattamento, redatte a livello nazionale, le quali hanno il compito, sulla base delle proprie specificità territoriali, di fare divulgazione, individuare i principali assi della strategia e indirizzare gli investimenti in quella direzione. La coerenza tra le differenti strategie nazionali è un aspetto di fondamentale rilevanza, al fine di raggiungere un livello comune di capacità di fare prevenzione e preparazione ad eventi estremi e, al contempo, avere gli strumenti adatti per affrontare temi transnazionali e transfrontalieri. La volontà è quella di dare rilevanza a strategie sostenibili e innovative, basate sull'ambiente e sulle infrastrutture verdi, capaci di comprendere misure soft e hard.

In seguito alla prima strategia europea, approvata nel 2013 (2013-2021), la quale è stata fondamentale per portare all'attenzione a livello comunitario il tema dei cambiamenti climatici, e all'approvazione del Green Deal (2019), si è giunti nel 2021 al suo secondo ciclo. L'obiettivo in questo secondo ciclo è quello di costruire un'Europa resiliente ai cambiamenti climatici entro il 2050, basandosi su quattro principi descritti di seguito.

Il primo principio riguarda la necessità di portare avanti le politiche di adattamento in modo più risoluto; dunque prendendo decisioni basate su evidenze scientifiche solide, ampliando il campo di conoscenza in materia di cambiamenti climatici, migliorare l'accessibilità e la qualità dei dati utilizzati e investire sulle piattaforme digitali per la divulgazione dei dati e di materiale scientifico come la piattaforma

Climate-ADAPT utile per avere un quadro sui cambiamenti climatici in Europa, valutare la vulnerabilità del territorio e accedere a dati climatici e progetti di adattamento.

Il secondo aspetto riguarda quello che è il principio di sussidiarietà, ossia lo sviluppare gli opportuni strumenti di adattamento per i differenti livelli territoriali di governo. Sotto questo aspetto il ruolo dell'UE è quello di fornire supporto tecnico e scientifico per la costruzione delle strategie e dei relativi strumenti applicativi, al fine di portare avanti il loro monitoraggio, valutarne i risultati e comunicarli a livello orizzontale e verticale. Tutti i livelli territoriali devono contribuire all'attuazione della strategia di adattamento ma, è soprattutto a livello locale che è necessario intervenire per territorializzare le azioni previste dalla strategia. A tal proposito la Commissione Europea, dal 2008, ha lanciato l'iniziativa del *Patto dei Sindaci per il Clima e l'Energia*, al fine di riunire sotto un'unica rete le città europee, con il fine di avviare un coordinato processo di adattamento ai cambiamenti climatici. Tale esperienza si è poi evoluta nel 2015 quando si è dato vita al *Patto Globale dei Sindaci per il Clima e l'Energia* a cui, ad oggi, aderiscono circa 12.000 città, provenienti da 60 paesi con un coinvolgimento di più di 300 milioni di persone⁹⁹.

Il terzo principio riguarda le tempistiche di applicazione delle strategie di adattamento, le quali necessitano di un'accelerazione, al fine di rendere l'adattamento climatico un processo più rapido e, conseguentemente, ridurre i rischi derivanti da un mancato o lento adattamento. Dunque, si evidenzia la necessità di portare avanti investimenti per opere e infrastrutture che limitino il rischio derivante da eventi calamitosi.

L'ultimo aspetto riguarda la necessità di guardare oltre i confini europei in materia di adattamento ai cambiamenti climatici, dunque, di promuovere un quanto più ampio calderone di prospettive politiche ed economiche da condividere a livello internazionale.

⁹⁹ Il Patto dei Sindaci per il Clima e l'Energia — GELSO - GEstione Locale per la SOstenibilità ambientale (isprambiente.it).

Come anticipato l'obiettivo della strategia europea è quello di far confluire le linee guida dettate dalla strategia europea all'interno degli strumenti nazionali; nel paragrafo seguente si riporta come l'Italia ha risposto a tale sfida.

3.1.2 Italia - Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici

Secondo lo studio condotto da Davide et al. (2013), in Italia vi è un'elevata percezione del livello di rischio derivante dai cambiamenti climatici, e al contempo vi è una bassa fiducia nella capacità di affrontare gli eventi calamitosi da essi derivanti. La principale preoccupazione degli esperti del settore riguarda l'intensificarsi degli eventi meteorologici estremi e le conseguenti alluvioni o inondazioni che potrebbero generarsi, per cui è necessario limitare il consumo di suolo e gestire le risorse idriche per rendere la rete più efficiente e ridurre il rischio idrogeologico.

La risposta dell'Italia alla necessità di occuparsi dei cambiamenti climatici e dei loro effetti è arrivata il 16 giugno 2015, quando è stata approvata con, Decreto Direttoriale n. 86 dall'allora Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (ora MASE) la *Strategia nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* (SNAC), la cui attuazione è demandata all'elaborazione del Piano nazionale di adattamento (PNACC). L'obiettivo è quello di creare uno strumento di indirizzo e supporto agli enti territoriali per la pianificazione e l'attuazione delle azioni di adattamento in Italia, sulla base delle criticità emerse, nonché l'integrazione delle azioni di mitigazione all'interno degli strumenti di pianificazione già esistenti. Attualmente il PNACC è sottoposto a VAS ma, è possibile consultare il rapporto preliminare ambientale, al cui interno già è delineata la struttura del piano e di cui è possibile cogliere i principali obiettivi. Sia la strategia che il piano raccolgono al loro interno gli obiettivi di adattamento stabiliti a livello nazionale, comunitario e internazionale.

Ciò che emerge dall'analisi del rapporto preliminare del PNACC è un approccio di valutazione per scenari; infatti, vengono analizzati, su otto¹⁰⁰ settori, i possibili impatti derivanti dalla mancata attuazione del piano, le aree che potrebbero essere significativamente interessate e le problematiche ambientali relative all'attuazione del piano. Gli otto punti che seguono sintetizzano i principali impatti riferiti allo scenario zero¹⁰¹.

Biodiversità: l'Italia ha un ricco patrimonio di biodiversità che copre circa la metà della flora, e un terzo della fauna europea, capace di generare importanti servizi ecosistemici¹⁰². In tale contesto i cambiamenti climatici potrebbero comportare una minaccia per la conservazione degli habitat, di estinzione per specie animali e vegetali autoctone e diffusione di specie alloctone.

Popolazione: la popolazione è una delle principali cause di pressioni ambientali. L'Italia è un Paese in cui la popolazione si concentra principalmente nelle pianure e nelle aree costiere (Castellari et al., 2014), vale a dire aree in soggette a pericolo idraulico. I cambiamenti climatici, a causa degli eventi meteorologici estremi rischiano di aumentare la popolazione esposta e il suo grado di vulnerabilità.

Salute umana: i cambiamenti climatici possono contribuire ad incrementare il rischio morbilità e mortalità per malattie infettive, cardio-circolatorio e quello di mortalità per traumi derivanti da eventi di dissesto idrogeologico.

Consumo di suolo: Il consumo di suolo che continua a crescere in Italia, può contribuire all'aggravarsi del dissesto idrogeologico e di desertificazione.

¹⁰⁰ Biodiversità, popolazione, salute umana, suolo, acqua, aria, beni materiali, patrimonio culturale.

¹⁰¹ Tramite lo scenario zero è possibile mettere in evidenza i principali impatti derivanti dalla mancata applicazione del piano di adattamento ai cambiamenti climatici.

¹⁰² Oltre alla funzione produttiva, le foreste svolgono anche importanti servizi eco-sistemici legati a: 1) protezione diretta degli insediamenti, infrastrutture e attività dell'uomo da pericoli naturali (caduta massi, valanghe, lave torrentizie e scivolamenti superficiali); 2) tutela idrogeologica; 3) regolazione del ciclo dell'acqua; 4) conservazione del paesaggio e della biodiversità; 5) riduzione delle emissioni di gas di serra in atmosfera (Castellari et al., 2014).

Acqua: l'Italia è un Paese sottoposto a stress idrico medio-alto derivante da un sovrasfruttamento della risorsa rinnovabile pari circa al 30% ¹⁰³. La maggior parte degli impatti generati dai cambiamenti climatici hanno ricadute sul ciclo idrologico con crescita dei rischi da essi derivanti.

Aria: l'Italia è tra i paesi europei con i più alti tassi di inquinamento atmosferico. I cambiamenti climatici possono ulteriormente aggravare lo scenario attuale con rilevanti rischi per la salute umana.

Beni materiali: i beni materiali sono al contempo i maggiori responsabili e le principali vittime dei cambiamenti climatici. Le infrastrutture sempre più necessarie e dense di utilizzatori rischiano di essere compromesse nella loro integrità, con relativi possibili disagi o nei casi peggiori disastri.

Patrimonio culturale: il ricco patrimonio culturale, di cui l'Italia è titolare, rischia di subire impatti negativi sul suo stato di conservazione.

A partire dallo scenario zero, e dalle criticità in esso emerse, il PNACC ha l'obiettivo di accrescere la resilienza territoriale italiana e di ridurre gli impatti negativi dei cambiamenti climatici. Le ricadute attese dal PNACC sono positive, nel senso che la sua attuazione permetterà di ridurre i rischi, accrescere la capacità di adattamento, trasformando ove possibile le minacce in opportunità. Il PNACC non esclude possibili ricadute negative derivanti da un'attuazione non sinergica delle azioni di adattamento e prende, dunque, in considerazione strumenti di monitoraggio per non propagare gli eventuali impatti negativi sul lungo periodo.

Il PNACC non prevede gli interventi da realizzarsi direttamente sul territorio, ma demanda tale compito alla scala locale, poiché, ad essa sono maggiormente legati gli impatti generati dai cambiamenti climatici e, conseguentemente, i benefici derivanti dalle azioni di adattamento. Non si tratta dunque di un dispositivo vincolante per le

¹⁰³ La soglia stabilita dall'obiettivo di un'Europa efficiente nell'impiego delle risorse è pari al 20% (EC 2011a, b).

amministrazioni, capace di decidere a priori quali azioni o politiche portare avanti per un certo territorio, ma piuttosto di uno strumento di alta pianificazione e programmazione, ideato per fornire supporto tecnico-decisionale per gli enti territoriali e creare un sistema unificato a livello nazionale. Dunque, sono le amministrazioni stesse a valutare quale tipologia di intervento è maggiormente efficace per il proprio contesto territoriale di riferimento. Secondo questo principio applicativo, le amministrazioni sono fortemente responsabilizzate nella scelta del catalogo di azioni da mettere in campo, in quanto dovranno, poi, anche approfondire e valutare le implicazioni ambientali delle proprie scelte.

Il PNACC, dunque, predilige un approccio di tipo *bottom-up* e *place-based* coinvolgendo anche le amministrazioni locali nella redazione del piano, tentando di cogliere le specificità territoriali; piuttosto che un approccio di tipo *top-down* in cui le azioni e le direttive si propagano a cascata, dal livello nazionale a quello comunale.

Il PNACC, attraverso le sue linee di azione, ha l'obiettivo di generare impatti non diretti sulle componenti ambientali ma, esclusivamente indiretti, tramite l'utilizzo di misure non infrastrutturali (*soft*) o infrastrutturali ecosistemiche (*green*).

Delle azioni devono essere valutati gli eventuali effetti di secondo ordine¹⁰⁴. Le fattispecie possono essere varie in questo caso poiché, le azioni messe in campo possono produrre effetti:

- positivi di secondo ordine e generare dinamiche *win-win*;
- negativi di secondo ordine come nel caso delle azioni di tipo *grey*¹⁰⁵;
- nessun effetto di secondo ordine.

¹⁰⁴ Con effetti di secondo ordine si intende quella gamma di effetti, positivi o negativi che siano, che sono conseguenza diretta dell'applicazione di azioni di adattamento, ma che non rientrano tra i principali fini/effetti attesi. Sono da considerarsi dunque dei *side-effect* dei quali non si è stati in grado di prevedere l'andamento.

¹⁰⁵ Il PNACC tiene comunque in considerazione la realizzazione di infrastrutture di tipo *grey* da parte delle amministrazioni territoriali, per le quali devono essere previsti gli adeguati strumenti di valutazione ambientale quali VIA e VAS.

Una valutazione preliminare degli effetti di secondo ordine permette di dar minor rilevanza alle azioni che generano impatti negativi.

L'obiettivo del PNACC è, in primis, costruire un quadro di riferimento allineato tra regioni ed enti locali, al fine di sviluppare armonicamente strategie, piani ed un sistema di monitoraggio condiviso a livello sub-nazionale.

All'interno del rapporto preliminare vengono evidenziati i possibili impatti derivanti dall'adozione del PNACC sulla pianificazione territoriale e settoriale, questo perché le azioni previste non hanno impatto diretto sull'ambiente ma, piuttosto, sulle scelte pianificatorie di regioni, province, città metropolitane e comuni. L'obiettivo è in questo caso quello di far confluire il tema dell'adattamento all'interno della pianificazione urbanistica, nella pianificazione di area vasta e nelle pianificazioni settoriali, attraverso quello che viene generalmente definito come *mainstreaming*. Gli impatti sui piani vengono definiti come *cumulativi* poiché con il tempo le attività di adattamento rientreranno tra le ordinarie attività amministrative; dunque, nel lungo periodo i cambiamenti climatici diventeranno parte integrante dell'attività amministrativa degli enti preposti. A tal proposito si individuano tre scenari possibili generati dal PNACC sulla pianificazione territoriale e di settore:

Il primo scenario prevede un impatto positivo sulla pianificazione, con armonizzazione del tema dell'adattamento e un efficiente *mainstreaming*. Inoltre, il piano potrebbe generare esternalità positive che si riverserebbero nell'ambiente e sul sistema socio-economico.

Il secondo scenario prevede anche in questo caso un impatto positivo sulla pianificazione dell'adattamento, ma con il presentarsi di alcune criticità legate alla fase implementativa e al sistema di governance.

Il terzo scenario prevede un impatto positivo limitatamente al settore della pianificazione, dunque, con la necessità di valutare contingentemente, in sede

progettuale, cautele specifiche al fine di garantire, per quanto possibile, l'assenza di esternalità negative o, quantomeno, il loro controllo e monitoraggio.

La messa in pratica sul territorio del PNACC richiederà una successiva e necessaria fase di monitoraggio tramite cui si procederà alla costruzione di un set di indicatori per la valutazione degli impatti sulla pianificazione, all'istituzione di un sistema di governance del monitoraggio, alla definizione di misure per la divulgazione dei dati e il coinvolgimento della popolazione. Gli indicatori previsti afferiscono a tre tipologie differenti:

- La prima è quella degli *indicatori di contesto*, che indicano come varia il contesto ambientale di applicazione; a tale alterazione contribuiscono la pianificazione, programmazione, fattori naturali, sociali etc.
- La seconda è quella degli *indicatori di contributo*, che indicano il ruolo del piano nella variazione sul medio-lungo periodo del contesto.
- La terza è quella degli *indicatori di processo*, che valuta lo stato di attuazione delle azioni previste.

Gli esiti dall'applicazione del PNACC saranno riportati all'interno di documenti periodici redatti da ISPRA, esaminati dal MASE e approvati dalla Conferenza Stato-Regioni. L'obiettivo è quello di garantire la trasparenza nello stato di avanzamento del piano.

3.1.3 Potenzialità e criticità

Ci troviamo in un momento storico in cui, grazie alla sempre più collettiva presa di coscienza sugli effetti dei cambiamenti climatici, dei provvedimenti delle organizzazioni internazionali e dei governi e dell'aumento dei finanziamenti per l'adattamento ai cambiamenti climatici, è più importante che mai garantire *l'efficacia, l'equità e l'efficienza* degli interventi di adattamento (Lamhauge et al., 2012). Al fine di garantire tali principi è necessario un monitoraggio dei processi innescati dalle politiche di adattamento ed una loro contestuale valutazione (Klostermann et al., 2018). Lo studio condotto da Lamhauge et al., (2012), su 106

documenti di politiche di adattamento, è la prima analisi empirica dei quadri di monitoraggio e valutazione. Visto che le politiche di adattamento hanno un lungo orizzonte temporale, per la loro valutazione è necessario effettuare una valutazione di ciascuna politica o azione chiarendo il contributo relativo di ciascuna di esse, rispetto al raggiungimento dell'obiettivo a lungo termine, utilizzando indicatori qualitativi e quantitativi. Sebbene tali indicatori descrivano se un obiettivo è stato raggiunto, non forniscono informazioni sulla misura in cui il cambiamento è avvenuto e ha portato a un miglioramento effettivo della capacità di adattamento (Lamhauge et al., 2012). Per ottenere tali informazioni sarà necessario prevedere un ulteriore set di indicatori complementari che permetta di individuare i benefici sostanziali apportati, ad esempio alla popolazione, all'ambiente etc. Ulteriore elemento da tenere in conto è quello dei possibili ostacoli che possono compromettere o rallentare il raggiungimento di un obiettivo. Tali barriere possono essere di diversa natura, come la necessità di effettuare un coordinamento di diversi soggetti geograficamente distanti e culturalmente diversi, così come possono esserci barriere di tipo economico o tecnico, motivo per cui necessitano anch'esse di essere monitorate e valutate.

Per riassumere, Klostermann et al. (2018) individua nella letteratura scientifica tre tipologie di indicatori di adattamento basati rispettivamente su processo (*process*), produzione (*output*) e risultato (*outcome-based*). Gli indicatori di *processo* forniscono il monitoraggio dei processi politici, istituzionali e di governance necessari per sviluppare misure adeguate; gli indicatori di *produzione* tengono conto dello stato di attuazione e indicano l'integrazione delle politiche di adattamento con altre politiche settoriali, mostrano se le rappresentanze politiche hanno mantenuto il loro impegno ma, non se la vulnerabilità climatica è stata ridotta; gli indicatori di *risultato* misurano l'efficacia delle politiche e misure messe in atto, comprendendo anche l'adattamento del sistema socio-economico, di governance, delle persone e delle istituzioni. Nel confronto tra la classificazione degli indicatori di adattamento proposta da Klostermann et al. (2018) e quella contenuta nel PNACC italiano emergono sia analogie che difformità. Partendo dalle analogie, sussiste una certa

somiglianza concettuale tra indicatori di *produzione*¹⁰⁶ e indicatori di *processo*¹⁰⁷, in quanto entrambi sono concettualizzati per valutare¹⁰⁸ l'attuazione di ciò che è stato previsto dal piano o dalla strategia. Ulteriore analogia presente è quella tra indicatori di *risultato*¹⁰⁹ e indicatori di *contributo*¹¹⁰ in quanto entrambi vanno a valutare l'efficacia effettiva delle azioni messe in campo rispetto all'obiettivo della misura. Le principali differenze riguardano invece indicatori di *processo*¹¹¹ e indicatori di *contesto*¹¹², in quanto pur fornendo entrambi un monitoraggio dell'evoluzione del contesto, nella classificazione proposta da Klostermann et al. (2018) l'accezione di *processo* riguarda il contesto politico mentre, nell'interpretazione del PNACC il *contesto* fa riferimento al contesto ambientale. In generale la classificazione degli indicatori proposta da Klostermann et al. (2018) appare maggiormente incentrata intorno alla sfera politica mentre, quella del PNACC fa maggiore riferimento all'evoluzione del contesto ambientale, in base alle decisioni politiche pianificatorie e programmatiche messe in campo.

¹⁰⁶ (Klostermann et al., 2018).

¹⁰⁷ PNACC.

¹⁰⁸ Quelli di produzione maggiormente da un punto di vista politico.

¹⁰⁹ (Klostermann et al., 2018).

¹¹⁰ PNACC.

¹¹¹ (Klostermann et al., 2018).

¹¹² PNACC.

3.2 Piani e progetti urbani

In ambito territoriale e urbano le politiche di mitigazione e adattamento si esplicitano prevalentemente attraverso politiche, piani e progetti. L'obiettivo di questo paragrafo, alla luce delle evidenze sugli effetti negativi dei cambiamenti climatici (IPPC, 2023), è di fornire una rassegna di piani e progetti significativi sviluppati a livello urbano e territoriale per l'adattamento e la mitigazione del cambiamento climatico e del rischio idrogeologico. Nello specifico si è scelto di prendere in considerazione una serie (15 casi studio) di piani e progetti attuati nel contesto europeo. All'interno della tabella 6 sono indicati, per ciascun caso studio i principi di adattamento e mitigazione messi in campo.

Nazione	Città	Area di piano o progetto	Obiettivo	Tetti verdi	Desealing	Sistemi di drenaggio e accumulo	Aree verdi inondabili	Sistemi di allertamento
Danimarca	Aalborg	Godsbanearealet	Rigenerazione ex-scalo ferroviario	x	x	x	x	
Francia	Lione	La Confluence	Rigenerazione porto industriale		x	x	x	
Francia	Boulogne-Billancourt	Parc du Trapeze, Ile Seguin, Pont de Sèvres	Rigenerazione ex-area Renault		x	x	x	
Francia	Parigi	Clichy-Batignolles e Parco Martin Luther King	Rigenerazione ex-scalo ferroviario		x	x	x	
Danimarca	Copenaghen	Østerbro	Piano di adattamento del quartiere		x	x	x	
Olanda	l'Aia	Canale Trekvllet	Rigenerazione sito	x	x	x	x	

			industria le di Binckhor st				
Spagna	Madrid	Parque de Gomeznar ro	Riproget tazione del parco	x	x	x	
Scozia	Glasgo w	White Cart Water	Mitigazi one del rischio alluvion ale		x	x	
Norvegi a	contea di Sogn og Fjordan e	contea di Sogn og Fjordane	Sistema di allarme multirisc hio				x
Slovacc hia	Bratisla va	Bratislava	Piano di adattam ento della città	x	x	x	
German ia	Ambur go	Amburgo	Green Roof Strategy	x	x		
German ia	Berlino	Berlino	Biotop Flächenf aktor	x	x		x
Italia	Isola Vicenti na	Isola Vicentina	Piano comunale di gestione delle acque	x	x		x
Paesi Baschi - Spagna	Bilbao	Zorrotzaur re	Rigenera zione della penisola di Zorrotza urre	x	x	x	
Svezia	Malmö	Augustenb org	Gestione delle acque meteoric he	x	x	x	x

Tabella 6: Tabella riassuntiva di progetti e piani applicati in Europa per la mitigazione e l'adattamento al rischio idrogeologico e ai cambiamenti climatici (Elaborazione propria).

4. TECNICHE GIS PER L'ANALISI DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO

Le analisi spaziali realizzabili tramite i GIS permettono di individuare sul territorio molteplici scenari di rischio differenti. La varietà degli scenari deriva dalla complessità del concetto di rischio al cui interno confluiscono molteplici fattori, anche altamente eterogenei tra loro, i quali devono essere correlati in modo efficace al fine di ottenere risposte significative in termini previsionali (Manzo, 2010).

Nella valutazione del rischio idrogeologico, i GIS consentono di elaborare e sintetizzare una grande mole di informazioni geografiche, tematizzando i risultati ottenuti e fornendo importanti linee guida alla comunità scientifica e al sistema di governance territoriale. Lo studio¹¹³ condotto da Rezvani et al. (2023), evidenzia come il ruolo dei GIS, nella valutazione del rischio disastri e dei cambiamenti climatici, sia ormai consolidato e capace di fornire un importante supporto per la programmazione socio-economica e strutturale di un territorio; si evidenziano comunque alcune lacune, che in futuro dovranno essere colmate, come la necessità di costruire un modello valutazione del rischio che possa essere scalabile e replicabile in contesti differenti.

4.1. Valutazione del rischio tramite approccio AHP e GIS-based

Lo sviluppo di un modello di valutazione e gestione del rischio è strutturato secondo una serie di fasi incrementalmente riassumibili in: acquisizione della conoscenza del territorio, previsione, prevenzione, gestione dell'emergenza e comunicazione alla cittadinanza. L'attenzione di questo paragrafo è incentrata sulle prime due fasi, in particolare si vuole dare rilevanza a quegli studi che trattano la valutazione del rischio idrogeologico tramite approcci innovativi, in particolare il filone delle analisi basate su approcci multicriteriali come l'*Analytic Hierarchy Process* e GIS-based.

La conoscenza del territorio rappresenta la prima fase di qualunque studio. Tale fase consiste, innanzitutto, nella definizione del problema di cui ci si vuole occupare e

¹¹³L'articolo è incentrato sulla *review* di 68 articoli scientifici, pubblicati tra il 2011 e il 2022 su Scopus che si occupano di resilienza urbana.

dell'obiettivo a cui si vuole arrivare. Il fatto che tutti gli elementi presi in considerazione abbiano una loro collocazione spaziale ed una propria forma geometrica implica una necessaria operazione di strutturazione dei dati e dei procedimenti, il che costituisce l'operazione fondamentale per proseguire con un corretto approccio scientifico. La capacità dei GIS di integrare sorgenti di dati, anche profondamente differenti per loro natura, permette di individuare le complesse relazioni che sussistono tra territorio, comunità, attività e rischi (Azzari & Andreani, 2008). Questo insieme di elementi permette di costruire basi di dati solide a cui possono attingere le diverse professioni, favorendo così un auspicato e necessario approccio multidisciplinare alla complessità territoriale. Nello studio di Roopnarine et al. (2022) condotto presso Trinidad i dati sono strutturati secondo due categorie di fattori: di *condizionamento* (pericolosità) e di *vulnerabilità*. I fattori di condizionamento fanno riferimento alle caratteristiche geomorfologiche e meteorologiche del territorio (precipitazioni, pendenza, densità dei fiumi, distanza dai fiumi, accumulo dei deflussi, altitudine, indice di umidità topografica (TWI¹¹⁴), uso del suolo, curve number¹¹⁵ e litologia). I fattori di vulnerabilità fanno riferimento alla localizzazione delle comunità e degli insediamenti (densità di popolazione, strade e abitazioni). In sintesi, nella fase di apprendimento del contesto, è necessario in primo luogo definire un obiettivo, in questo caso la valutazione del rischio idrologico, uno schema processuale, dunque, proseguire a identificare gli indicatori che determinano i fattori di pericolosità e vulnerabilità

Il passaggio successivo, che consiste nell'identificazione delle zone a rischio rappresenta la sintesi della prima fase di conoscenza del territorio, il cui esito è una zonizzazione del territorio, sulla base di un macro indicatore di rischio ottenuto

¹¹⁴ L'indice di umidità topografica (TWI) è un indicatore utile per stimare dove si accumula l'acqua in un'area con dislivelli. È espresso in funzione della pendenza e dell'area di contribuente a monte.

¹¹⁵ Il Curve Number è un indice con valore compreso tra 0-100 il cui valore è dipendente dal tipo di suolo, dal suo utilizzo e dalle condizioni antecedenti di umidità.

Con valori di CN uguali o prossimi allo 0, si è in presenza di una superficie assimilabile alla perfetta "spugna" con assorbimento e trattenuta della totalità o quasi della precipitazione. Con valori di CN uguali o prossimi a 100, siamo in presenza di terreni o superfici impermeabili dove la precipitazione si trasforma interamente, o quasi, in deflusso.

dalla pesatura dei dati utilizzati nella prima fase. La pesatura dei dati consente di modellare il sistema di valutazione del rischio in base alle caratteristiche geomorfologiche e socio-economiche di un territorio. Nello studio condotto da Torre et al. (2006), presso il Comune di Monopoli (BA) viene proposto un modello di valutazione del danno da calamità volto a valutare la presenza e la consistenza sul territorio di certi fattori ritenuti incidenti su pericolosità o vulnerabilità, mediante un'operazione di overlay topografico con il fine di ottenere ulteriori informazioni rispetto ai metodi di analisi convenzionale, andando proprio a stabilire dei rapporti di complementarità tra i fattori considerati. Anche nello studio di Cherubini et al. (2006), emerge la volontà di integrare i modelli tradizionali di valutazione del rischio, tramite un approccio che tenga conto della complessità delle relazioni che sussistono tra sistema idrogeologico e socio-economico. Nello studio di Fedeski & Gwilliam (2007) il focus è invece incentrato sulla stima del danno, in particolare su come i cambiamenti climatici possano incrementare i livelli di rischio idrogeologico al fine di sviluppare una adeguata strategia di adattamento.

Il metodo utilizzato, negli studi sopra citati per la pesatura degli indicatori, è *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (Saaty, 1980), metodologia che permette di destrutturare l'obiettivo (in questo caso la mappatura del rischio) in una serie di obiettivi minori (pericolosità e vulnerabilità) di più facile gestione. Nella pratica, l'AHP prevede la scomposizione di un problema decisionale complesso in maniera gerarchica per definire un ranking di priorità tra gli elementi presi in considerazione. In generale, gli studi in materia di valutazione della pericolosità e del rischio tramite metodologia AHP sono numerosi e diffusi a livello globale, come quello di Seejata et al (2018), condotto nella provincia di Sukhothai in Thailandia, quello di Khosravi et al. (2016) condotto in Iran o quello di Dash & Sar nel distretto di Allahabad in India (2020).

Ad ogni elemento che costituisce la gerarchia (figura 19) viene assegnato un valore pesato (peso locale) che esprime l'importanza dell'elemento non in termini complessivi (cioè, riferiti all'obiettivo principale), ma solo in rapporto all'elemento sovraordinato rispetto al quale sono stati confrontati. Il peso globale di un elemento (e.g. le precipitazioni) deriva dal prodotto del suo peso locale con i pesi locali di tutti

gli elementi a cui esso è subordinato. La sommatoria dei pesi locali, all'interno dello stesso livello è sempre 1. Il peso globale è dunque esprimibile come il seguente prodotto (Torre et al., 2005): $W_j = w_{4j} * w_{3j} * w_{2j} * w_{1j}$

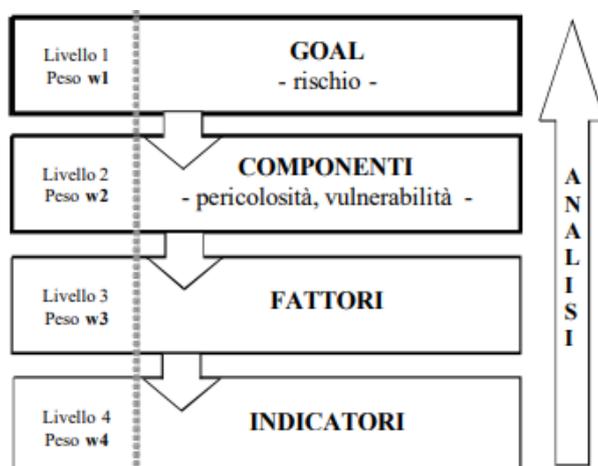


Figura 19: Struttura gerarchica per l'analisi del rischio (Cherubini et al., 2006).

I principi fondamentali della AHP comprendono:

- Principio della *scomposizione*: prevede la divisione e la gerarchizzazione degli elementi del problema decisionale in obiettivo, criteri, sotto-criteri e alternative.
- Principio dei *giudizi comparati*: prevede di stabilire gli elementi prioritari a ciascun livello gerarchico mediante il metodo dei confronti a coppie (tabella 7), i quali assegnano punteggi di priorità definiti dalla scala fondamentale di Saaty, da 1 a 9 (dove 1 non esprime una preferenza, eguagliando i due elementi, e dove 9 esprime estrema importanza di un elemento rispetto all'altro). I confronti vengono effettuati su matrici quadrate, con una dose accettabile di incoerenza della decisione, stabilito dal rapporto di inconsistenza, che deve essere minore del 10%. Nella scala di Saaty i giudizi di valore pari rappresentano i livelli intermedi tra le due
- *Sintesi delle priorità*: prevede la sintetizzazione in un unico modello finale di tutti i punteggi definiti risultanti dalla somma algebrica del principale autovettore per ciascuna matrice, pesato sulla priorità dell'elemento rispetto al

quale il confronto si svolge. Il modello finale restituisce la gerarchia finale delle alternative.

$m/n = 1/9 = 0,111$	estremamente meno
$m/n = 1/7 = 0,143$	molto meno
$m/n = 1/5 = 0,2$	meno
$m/n = 1/3 = 0,333$	moderatamente meno
$m/n = 1/1$	indifferente
$m/n = 3/1$	moderatamente di più
$m/n = 5/1$	di più
$m/n = 7/1$	molto di più
$m/n = 9/1$	estremamente di più

Tabella 7: Relazione quantitative-semantiche della scala di Saaty (Torre et al., 2005).

È importante sottolineare che ai giudizi espressi tramite la scala di Saaty non è applicabile la proprietà transitiva poiché, generalmente vale la seguente relazione (Torre et al., 2005):

$$m_{AB}/n_{AB} \neq \left(\frac{m_{AJ}/n_{AJ}}{m_{BJ}/n_{BJ}} \right)$$

In cui m_{AB}/n_{AB} esprime la relazione di importanza tra l'incidenza del fattore A e l'incidenza del fattore B; m_{AJ}/n_{AJ} esprime la relazione di importanza tra l'incidenza del fattore A e l'incidenza del fattore generico J¹¹⁶; m_{BJ}/n_{BJ} esprime la relazione di importanza tra l'incidenza del fattore B e l'incidenza del fattore J.

I rapporti definiti all'interno del confronto a coppie forniscono una definizione quali-quantitativa della sistematicità che lega le differenti componenti degli elementi esposti a vulnerabilità, all'interno del contesto di analisi. Proprio per questa ragione, il confronto a coppie della metodologia AHP consente di calare i rapporti che sussistono tra le componenti all'interno delle specificità del contesto territoriale in

¹¹⁶ Il fattore generico J può assumere un valore da 1 a n.

analisi. La specificità territoriale con cui è stato costruito il metodo analitico riprende il concetto di vulnerabilità sistemica, introdotto nel primo capitolo (Torre et al., 2005). Dunque, nel caso della valutazione del rischio idrogeologico è necessario utilizzare un approccio critico territorializzato, poiché l'analisi del rischio è fortemente dipendente dalle caratteristiche intrinseche di un territorio, degli elementi che lo compongono e delle relazioni che tra loro intercorrono.

Riprendendo lo studio di Roopnarine et al. (2022) la pesatura separata dei fattori di condizionamento e di vulnerabilità permette di ottenere due indici rispettivamente: *Flood hazard index* (tabella 8) e *Vulnerability index* (tabella 9). Tali indici sono il risultato di un'operazione di *overlay*, tramite cui è possibile costruire un'informazione complessa attraverso relazioni di causalità tra informazioni più semplici (Torre et al., 2005). Le mappature sul territorio del *Flood hazard index* e del *Vulnerability index* sono dunque il risultato della sommatoria pesata degli indicatori rispettivamente relativi a *pericolosità* e *vulnerabilità*.

Factors	Rainfall	Slope	River Density	Distance from Rivers	Flow Accumulation	Elevation	TWI	Land Use	CN	Lithology	Criteria Weights
Rainfall	0.34	0.41	0.39	0.35	0.30	0.27	0.24	0.22	0.20	0.18	0.29
Slope	0.17	0.34	0.26	0.26	0.24	0.22	0.21	0.19	0.18	0.16	0.22
River Density	0.11	0.17	0.13	0.17	0.18	0.18	0.17	0.16	0.15	0.15	0.16
Distance from Rivers	0.09	0.11	0.06	0.09	0.12	0.13	0.14	0.14	0.13	0.13	0.11
Flow Accumulation	0.07	0.09	0.04	0.04	0.06	0.09	0.10	0.11	0.11	0.11	0.08
Elevation	0.05	0.07	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07	0.08	0.09	0.09	0.06
TWI	0.05	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.07	0.07	0.04
Land Use	0.04	0.05	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.03
CN	0.04	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.02
Lithology	0.03	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02

Tabella 8: Matrice di confronto normalizzata con i pesi relativi ai fattori di condizionamento della pericolosità (Roopnarine et al., 2022).

NORMALIZED PAIRWISE MATRIX				
Factors	Population Density	Building Density	Road Density	Criteria Weights
Population Density	0.546	0.571	0.500	0.539
Building Density	0.273	0.286	0.333	0.297
Road Density	0.180	0.143	0.167	0.163

Tabella 9: Matrice di confronto normalizzata con i pesi relativi ai fattori di vulnerabilità (Roopnarine et al., 2022).

Una volta ottenute le mappe di pericolosità e di vulnerabilità, tramite un'operazione di *overlay* tra i due livelli si ottiene lo scenario di valutazione del rischio (figura 20), secondo la formula: $R = H * V$ (Roopnarine et al., 2022).

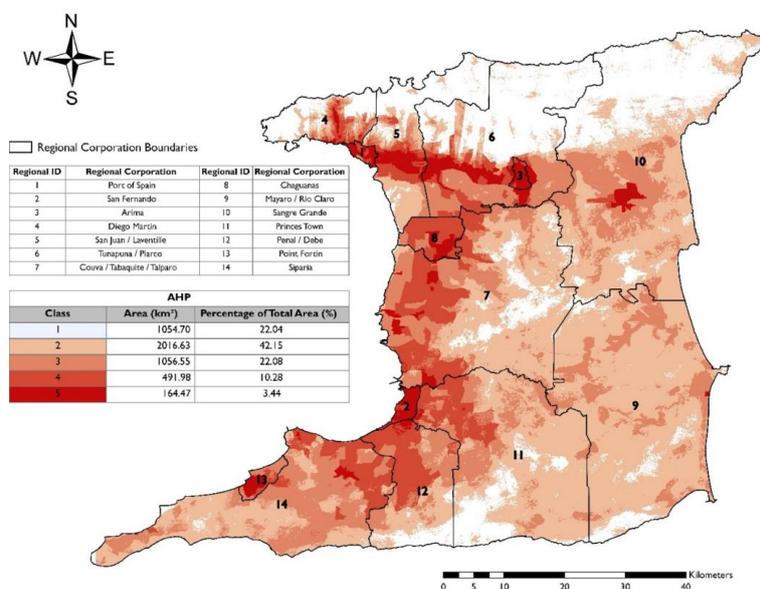


Figura 20: Scenari di rischio alluvionale per l'Isola di Trinidad secondo la pesatura degli indicatori tramite metodologia AHP (Roopnarine et al., 2022).

La combinazione degli strumenti GIS con la metodologia AHP permette di ottenere diversi scenari previsionali in base alla pesatura degli indicatori, la quale può essere calibrata in funzione del contesto territoriale e dell'obiettivo dello studio. Nell'ambito di questa tesi, si è scelto di applicare la metodologia sopra descritta ad un contesto locale italiano, quello della Val Bisagno, all'interno della provincia di Genova.

5. CASO STUDIO DI GENOVA: UNA PROPOSTA PER LA VAL BISAGNO

5.1 Inquadramento del contesto ligure

Il territorio ligure, con il 65% del territorio montano e il 35% collinare, è fortemente caratterizzato da un'elevata vulnerabilità a eventi di dissesto idrogeologico. Inoltre, la regione ricade all'interno dell'area occidentale europea in cui si osservano i valori più elevati di intensità di precipitazioni di breve durata. La stretta relazione che sussiste tra mare e montagna condiziona notevolmente le condizioni meteorologiche, anche in relazione al fatto che entrambi gli ambienti risentono fortemente delle alterazioni dei cambiamenti climatici.

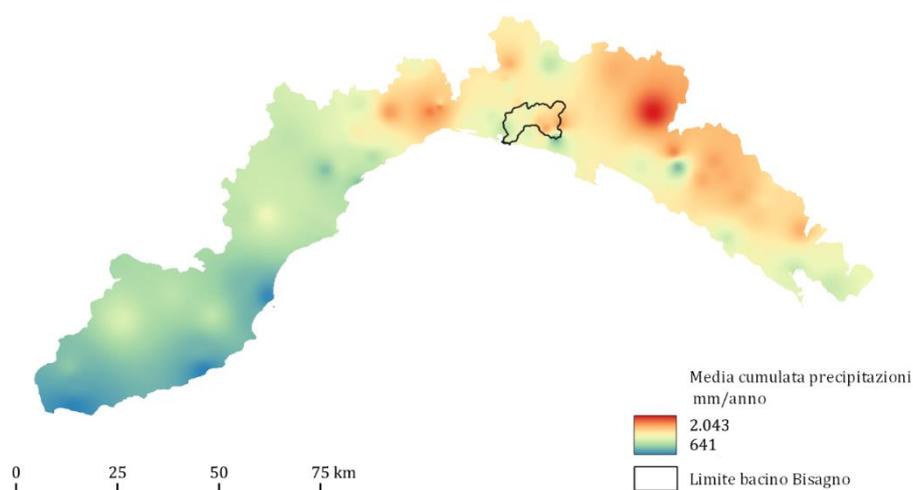


Figura 21: Media ventennale (periodo 2000-2023) delle precipitazioni cumulate (mm/anno) su base annua (elaborazione propria).

La figura 21 offre una panoramica sulla distribuzione della media delle precipitazioni cumulate annue su tutto il territorio regionale. I dati ottenuti dal servizio meteorologico ARPAL¹¹⁷ sono stati filtrati al fine di ottenere una serie storica con almeno 20 anni di osservazione, ottenendo 70 stazioni rispondenti a tale criterio. Partendo dalla lista delle stazioni presente nel portale, sono state recuperate le coordinate e costruita una tabella per la successiva elaborazione in ambiente GIS. Partendo dai dati georeferenziati delle stazioni, al fine di ottenere una distribuzione

¹¹⁷ AMBIENTE IN LIGURIA: METEO (regione.liguria.it).

spaziale delle precipitazioni sul tutto il territorio regionale, si è utilizzato un algoritmo di interpolazione IDW (*Inverse Distance Weighted*) che assegna dei pesi ai punti campione, in modo tale che l'influenza di un punto su un altro diminuisca in base alla distanza dal nuovo punto stimato.

A quanto detto si aggiunge la particolare struttura insediativa ligure, la quale è frutto di un'evoluzione storica che a partire dai nuclei¹¹⁸ e dai borghi storici, ha generato una densità abitativa fortemente sbilanciata sulla costa e sui principali fondovalle interni collocati lungo le principali direttrici infrastrutturali. La geografia del territorio, dunque, ha una significativa influenza sui fattori di vulnerabilità e sui processi meteo-climatici che caratterizzano la Liguria. I fattori di vulnerabilità crescono ulteriormente se si considera la fragile struttura demografica della Regione caratterizzata al 2023: da un'età media della popolazione piuttosto elevata di 49,5 anni, un indice di vecchiaia¹¹⁹ di 271 e un indice di dipendenza strutturale¹²⁰ di 65,4. La popolazione con più di 65 anni tra il 2002-2023, è cresciuta del+8,2%; mentre, la popolazione in età attiva si è ridotta del-8,9%, quella con meno di 15 anni del -4%¹²¹.

¹¹⁸ Prevalentemente attestati sui versanti a mezza costa e con una distribuzione abbastanza uniforme su tutto il territorio regionale.

¹¹⁹ rapporto tra la popolazione di 65 anni e oltre e la popolazione di età 0-14 anni, moltiplicato per 100. La variazione dell'indice nel tempo dipende dalla dinamica sia della popolazione anziana che di quella giovane. Valori pari a 100 indicano la parità generazionale. Valori superiori a 100 indicano una maggiore presenza di soggetti anziani rispetto ai molto giovani. Il valore 200 indica la presenza di due persone over 65 per ogni under 14, il valore 50 la presenza di una persona over 65 ogni due under 14. La variazione positiva di tale indice indica una crescita degli over 65 maggiore rispetto a quella degli under 14.

¹²⁰ Rapporto tra la popolazione in età non attiva (0-14 anni e 65 anni e oltre) e la popolazione in età attiva (15-64 anni), moltiplicato per 100. Il denominatore rappresenta la fascia di popolazione che dovrebbe provvedere al sostentamento della fascia indicata al numeratore. Tale rapporto esprime il carico sociale ed economico teorico della popolazione in età attiva: valori superiori a 50 indicano una situazione di squilibrio generazionale.

¹²¹ Indici demografici e Struttura popolazione Liguria (tuttitalia.it).

5.2 Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici

L'Atlante Climatico della Regione Liguria, a cura di ARPAL¹²² offre una panoramica dettagliata su precipitazioni e temperature, e sui processi che le hanno caratterizzate, per il periodo 1961-2010. I dati raccolti mostrano una significativa evoluzione nei processi meteo-climatici con variazioni significative delle temperature¹²³ e delle precipitazioni. Per quanto riguarda le precipitazioni, nonostante l'elevata variabilità del dato, si è registrato un trend negativo per le precipitazioni primaverili nel 32% dei casi; mentre, per le precipitazioni invernali, nel confronto tra il primo ventennio e il secondo trentennio del periodo in analisi, si evidenzia una crescita significativa nel 63% dei casi.

La Liguria rientra prevalentemente¹²⁴ all'interno della *Macroregione 1* del PNACC¹²⁵ (2018), al cui interno vengono individuati valori intermedi per temperatura media e precipitazioni invernali e valori elevati per precipitazioni estreme (R20 e R95). Lo studio individua una serie di indicatori¹²⁶ utili come *proxy*¹²⁷ per l'identificazione di differenti scenari (tabella 10). La porzione di territorio regionale presa in considerazione per lo studio del rischio alluvionale ricade interamente all'interno della macroregione 1, in particolare nella sottozona B. Secondo quanto riportato nella tabella 10, all'interno del cluster B, per RPC 4.5, si prevede un incremento delle temperature medie di +1,3 °C, questo incremento, come visto all'interno del secondo capitolo può andare ad alterare l'umidità relativa, incidendo e modificando i regolari cicli dell'acqua, incrementando anche il rischio di eventi alluvionali estremi. Nella

¹²² Atlante_climatico_della_Liguria.pdf (arpal.liguria.it).

¹²³ Le temperature minime sono aumentate nel 70% dei casi a livello annuale; le massime sono aumentate significativamente nel 55% dei casi a livello annuale.

¹²⁴ La regione ricade per il 54% all'interno della macroregione 1, per il 33% nella macroregione 5 e per il 13% nella macroregione 3 (MASE).

¹²⁵ Confronto del periodo 2021-2050 (rispetto al 1981-2010) riguardo le possibili implicazioni dei CC sul dissesto idrogeologico, in riferimento agli scenari RPC 4.5 e RPC 8.5.

¹²⁶ Cerchio grigio per variazioni percentuali nell'intervallo [-10%; 10%] o per variazioni del numero di giorni minori o uguali a ± 2 giorni; un cerchio giallo per variazioni [10%; 20%]; rosso per variazioni nell'intervallo [20%; 100%]; un cerchio viola per variazioni superiori al 100%.

¹²⁷ Temperatura media (Tmean); copertura nevosa (Sc), dinamiche nivali, evapotraspirazione; numero di giorni di pioggia con precipitazioni maggiori di 20 mm/giorno (R20); 95° percentile della distribuzione delle precipitazioni giornaliere (R95); totale precipitazioni invernali per eventi con finestre temporali significative (WP).

zona B per RPC 8.5 sono previste le ricadute più significative con il superamento del gradiente di riscaldamento di +1,6 °C. Per entrambi gli scenari RPC la variazione di frequenza degli eventi estremi (R20) è trascurabile, mentre l'incremento dell'intensità può comportare dissesti idraulici in bacini di ridotte dimensioni e fenomeni gravitativi nei suoli a maggiore permeabilità.

Macroregione 1	presente	RCP4.5			RCP8.5		
cluster		A	B	D	B	C	E
<i>Tmean</i> (Δ °C)	13 °C	1.4	1.3	1.2	1.6	1.5	1.5
<i>R20</i> (Δ giorni/anno)	10 giorni/anno	-1	-1	1	0	1	1
<i>SC</i> (Δ giorni/anno)	-	-12	-8	-1	-18	-1	-9
<i>WP</i> (%)	187 mm	-4	-2	8	-7	3	16
<i>R95</i> (%)	28 mm	1	3	11	6	13	9

Tabella 10: Scenario di riferimento climatico, macroregione 1 (PNACC, 2018).

In riferimento agli scenari futuri *Fondazione CIMA* ha prodotto una simulazione climatica per il periodo 2038-2068 per Regione Liguria. Tale simulazione ha individuato tre aree geografiche della regione che potrebbero caratterizzarsi per differenti scenari climatici futuri: Ponente, Area montana e Levante. Il levante potrebbe risentire maggiormente dell'incremento delle precipitazioni con crescita dell'intensità degli eventi estremi e dei giorni di pioggia; invece, il ponente potrebbe risentire di una riduzione delle cumulate annuali di pioggia; per l'area montana si prevede, a causa dell'aumento delle temperature, una riduzione delle nevicate con conseguente riduzione dell'accumulo nivale e un'anticipazione dei deflussi primaverili (figura 22; figura 23)(SRACC, 2023).

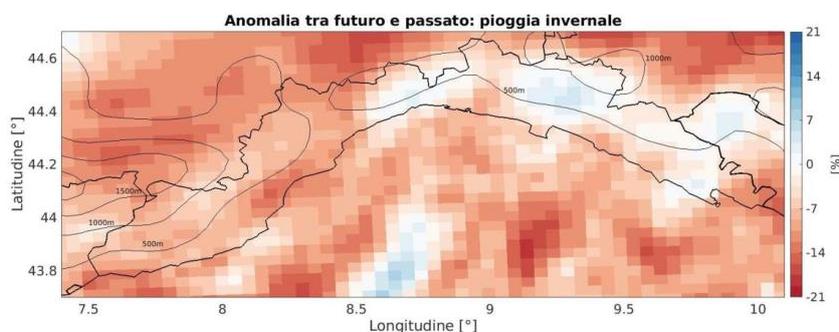


Figura 22: Variazione futura % rispetto alla simulazione storica della cumulata delle precipitazioni nella stagione invernale isolinee dell'altitudine a 500m, 1000m e 1500m (SRACC, 20203).

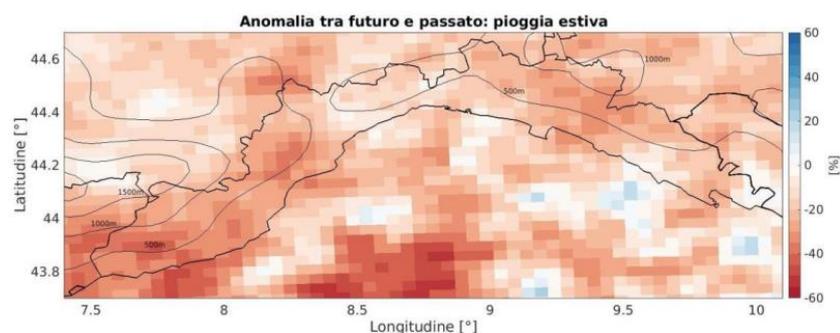


Figura 23: Variazione futura in percentuale rispetto alla simulazione storica della cumulata delle precipitazioni nella stagione estiva, isolinee dell'altitudine a 500m, 1000m e 1500m (SRACC, 2023).

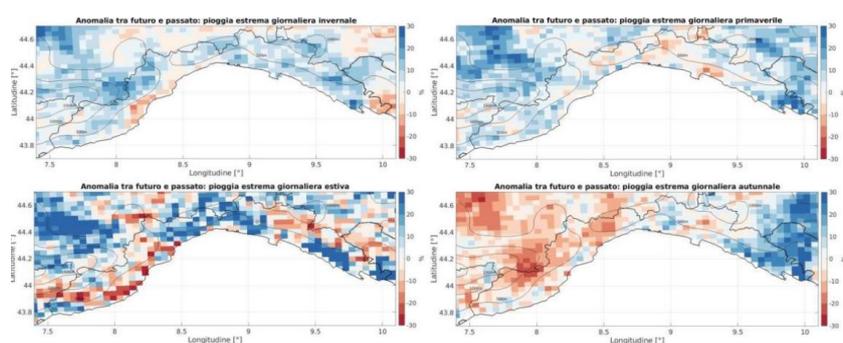


Figura 24: Variazione futura stagionale in percentuale rispetto alla simulazione storica del 95° percentile del dataset di precipitazione giornaliera, isolinee dell'altitudine a 500m, 1000m e 1500m (SRACC, 2023).

La figura 24 fa riferimento agli scenari futuri delle precipitazioni¹²⁸ estreme, tramite cui è possibile osservare differenti dinamiche tra il ponente e il levante ligure nel confronto inter-stagionale. Ciò che emerge, è un significativa variazione delle precipitazioni estreme, soprattutto durante il periodo autunnale, con intervalli compresi tra il -30% e +60% e quello estivo, con variazioni tra il -50% e il +100%. Per i periodi invernali e primaverili, per gran parte del territorio regionale, si assiste ad un incremento piuttosto costante compreso tra il 5-10%. Nel confronto tra le differenti aree geografiche, quella di Levante sembra essere maggiormente soggetta ad un incremento delle precipitazioni estreme rispetto al Ponente.

¹²⁸ Variazioni stagionali del 95° percentile della precipitazione giornaliera, calcolato solo sui giorni di pioggia.

La figura 25 offre una panoramica sugli scenari futuri della temperatura per le quattro stagioni, da cui si evince che le temperature medie sono destinate a salire su gran parte del territorio regionale. L'area geografica che potrebbe risentire maggiormente dell'incremento delle temperature medie quella montana, specialmente durante la stagione invernale e quella estiva; l'incremento delle temperature in quest'area potrebbe generare profondi squilibri del ciclo idrogeologico, con riduzione delle nevicate invernali, riduzione della ricarica degli acquiferi profondi e del deflusso a valle durante le stagioni calde.

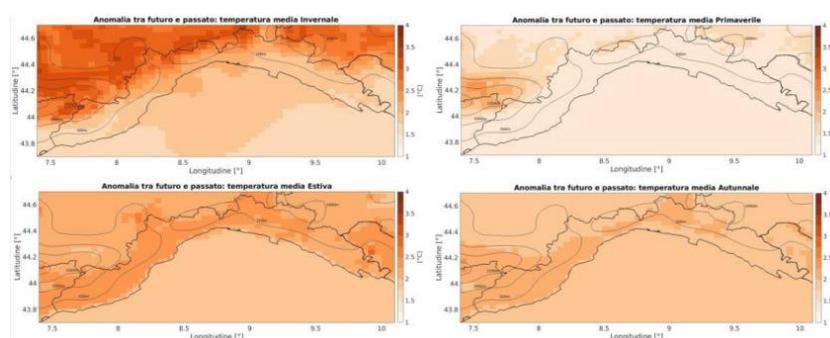


Figura 25: Differenza tra la simulazione futura e storica della media stagionale della temperatura a due metri dal suolo, isolinee dell'altitudine a 500m, 1000m e 1500m (SRACC, 2023).

La SRACC si occupa di approfondire, attraverso delle catene¹²⁹ di impatto, la relazione che sussiste tra cambiamenti climatici e alterazioni del sistema socio-economico. Le catene di impatto sono utili a costruire uno schema logico che a partire dai driver climatici e, attraverso lo studio degli impatti, degli elementi esposti e della sensibilità fornisca un punto di vista operativo per sviluppare strategie, obiettivi e capacità di adattamento.

¹²⁹ Una catena d'impatto è uno strumento analitico che aiuta ad approfondire, descrivere e valutare i fattori rispetto ai quali valutare la vulnerabilità e la propensione al rischio nel sistema di interesse (IPCC 2014).

SETTORI	IMPATTI POTENZIALI	OBIETTIVI STRATEGICI DI ADATTAMENTO	CODIFICA
8- DISSESTO IDROGEOLOGICO E PROTEZIONE CIVILE	1. Incremento dei danni alle persone e al territorio per fenomeni di dissesto idrogeologico e allagamenti, anche a causa della "poca prevedibilità" degli eventi (multirischio)	Migliorare il monitoraggio del territorio per la produzione di basi dati aggiornate	OS8.1.1
		Migliorare la gestione e la manutenzione del territorio	OS8.1.2
		Migliorare la gestione delle emergenze da parte delle amministrazioni a tutti i livelli e aumento della partecipazione della popolazione	OS8.1.3
		Migliorare i modelli per la simulazione e la previsione degli impatti su differenti orizzonti temporali	OS8.1.4
		Integrare la prevenzione, gestione e mitigazione dei rischi tra politiche intersettoriali (foreste, agricoltura, risorse idriche, energia, etc.)	OS8.1.5
		Integrare i rischi connessi al cambiamento climatico nella pianificazione e progettazione verso la resilienza e l'adattamento	OS8.1.6
		Sensibilizzare e migliorare la consapevolezza dei cittadini e dei decisori pubblici sui problemi della gestione del rischio in relazione al cambiamento climatico	OS8.1.7

Figura 26: Strategie di adattamento per Dissesto idrogeologico Protezione Civile (SRACC, 2023).

Per quanto riguarda il settore *Dissesto idrogeologico e Protezione Civile*, tramite la catena d'impatto, sono state individuate sette obiettivi strategici in risposta alle alterazioni dei cambiamenti climatici su questo settore (figura 26).

5.3 Analisi del contesto della Val Bisagno

All'intero del settore centro-orientale della città di Genova si sviluppa il bacino idrografico della Val Bisagno, che si caratterizza per una morfologia complessa ed articolata, sviluppata sia in direzione nord-sud che est-ovest (prevalentemente). Una delle sue caratteristiche principali è la stretta relazione che sussiste tra appennino e mare, infatti, tra il punto più alto del bacino posto a 1036 m.s.l.m. e la linea di costa intercorrono circa 10 km.

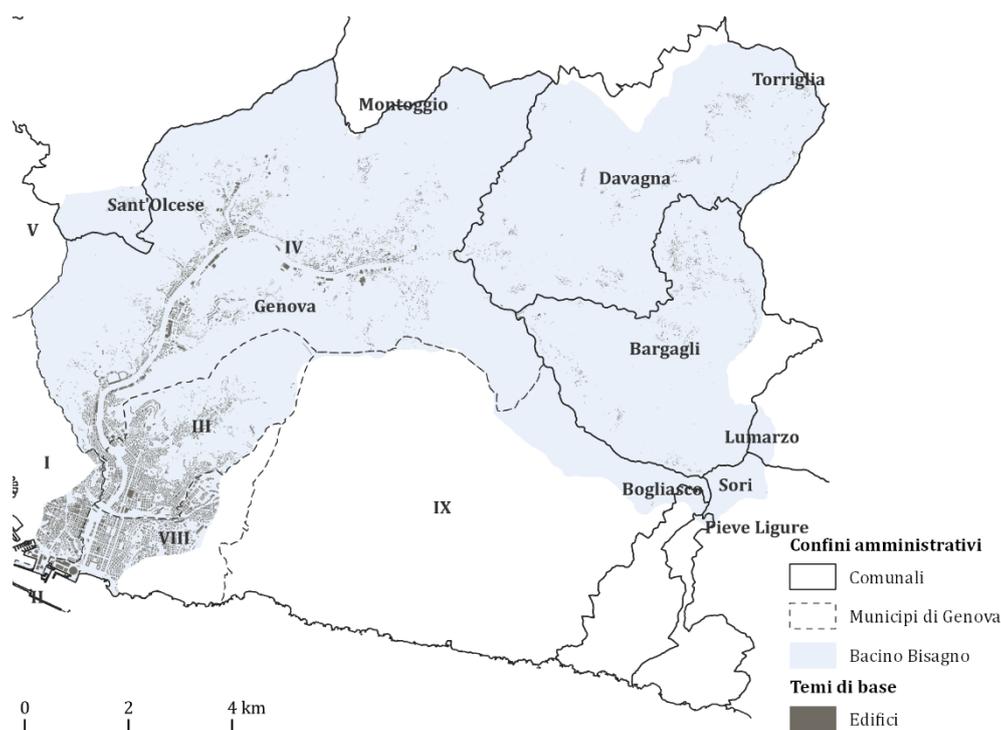


Figura 27: Ripartizione amministrativa del territorio del Bacino Bisagno. I toponimi riportano i nomi dei Comuni ricadenti nel bacino e i Municipi di Genova (elaborazione propria).

Scegliere un contesto come quello della Val Bisagno, per condurre uno studio sul rischio alluvionale, è una scelta consapevole del fatto che il territorio in questione è una delle zone della Città Metropolitana di Genova in cui si verificano con maggior frequenza esondazioni di natura torrenziale¹³⁰; sia a causa delle sue caratteristiche morfo-metriche, quali la ridotta estensione territoriale e la forte acclività dei

¹³⁰ Dall'inizio del secolo, ad oggi, si sono verificati almeno sei eventi alluvionali rilevanti nel 1907, 1908, 1945, 1953, 1970, 1992, 2011 e 2014.

versanti, che genera un ridotto tempo di concentrazione (Lunardi et al., 2020), sia per la vicinanza delle catene montuose col mare, condizione che favorisce la formazione di precipitazioni convettive a carattere stazionario e intenso, soprattutto nel periodo tardo estivo ed autunnale (Cassola et al., 2023). Inoltre, secondo Paliaga et al. (2020) l'azione antropica e la densa infrastrutturazione del territorio hanno modificato così radicalmente la rete idrografica da costituire, ormai, il fattore morfogenico dominante della valle. A tal proposito, è importante sottolineare il fatto che, nel tratto urbano della Città di Genova tra il nodo ferroviario della stazione di Brignole e la foce del Bisagno, il torrente è completamente interrato e tombato¹³¹. La tombatura del torrente ha rappresentato una delle scelte di urbanistiche più sciagurate per la valle, in particolare per i densi quartieri residenziali che si vi si sviluppano sopra e intorno; quartieri che durante le piene del Bisagno sono i primi ad essere coinvolti con grande intensità dall'esondazione. Questo accade perché l'azione antropica ha ristretto notevolmente il letto di naturale esondazione ed ha sottostimato la portata delle opere idrauliche necessarie a realizzare una sicura tombatura dell'alveo. Nel 2015, anche a fronte della pesante alluvione dell'ottobre dell'anno precedente sono iniziati i lavori per incrementare la portata del tratto tombato dai 450 m³/s agli 850 m³/s.

Questa concomitanza di elementi in passato ha determinato danni ingenti e vittime, in particolare quando le precipitazioni hanno innescato una risposta idrologica molto rapida, in un bacino medio-piccolo con la presenza di aree urbane densamente popolate, come nel caso della Val Bisagno.

Tra i comuni che ricadono all'interno della valle, quello che storicamente e morfologicamente è più vulnerabile alle esondazioni del Torrente Bisagno è il Comune di Genova; nello specifico i Municipi III e IV del capoluogo ricadono interamente all'interno del bacino, i Municipi I (ad est) e VIII (ad ovest) solo parzialmente in prossimità del tratto finale del torrente Bisagno. Il tessuto insediativo della Città di Genova che ricade all'interno della Val Bisagno, si

¹³¹ Opera degli anni '30 del XX secolo.

caratterizza in sinistra orografica per un forte sviluppo del settore produttivo; mentre, in destra orografica, lungo la viabilità storica, si estende il tessuto urbano compatto, con una densità decrescente da valle a monte.

La popolazione residente della valle si concentra in gran parte all'interno del comune di Genova (figura 28; tabella 11) e la sua distribuzione segue l'andamento della densità del tessuto urbano del capoluogo metropolitano, con una concertazione densa su entrambe le sponde in prossimità della zona della foce; densità (allegato 11) che decresce e si concentra in sponda destra, risalendo a monte oltre l'interruzione del tessuto urbano data dal cimitero di Staglieno. Nell'area montana del bacino si sviluppano i nuclei insediativi di Davagna e Bargagli, caratterizzati da una bassa densità e una ridotta taglia demografica. Il numero dei residenti entro l'area del bacino per ogni comune è stato calcolato ritagliando le sezioni di censimento all'interno dell'area del bacino, per i Comuni di Genova, Bargagli e Davagna non vi sono state problematiche in quanto le sezioni di censimento ricadono interamente all'interno del Bacino, per gli altri Comuni, avendo solo una porzione di sezione di censimento all'interno dell'area del bacino è stato valutato sulla base della presenza di edifici se considerare o meno il valore di residente dell'intera sezione di censimento.

Comune	Residenti	%
Bargagli	2.493	1,38%
Genova	175.442	97,06%
Davagna	1.857	1,03%
Sant'Olcese	608	0,34%
Bogliasco	0	0,00%
Pieve Ligure	44	0,02%
Sori	15	0,01%
Lumarzo	0	0,00%
Torriglia	0	0,00%
Montoggio	227	0,13%
Totale	180.686	

Tabella 11: Popolazione residente all'interno del Bacino Bisagno suddivisa per comuni (elaborazione propria).

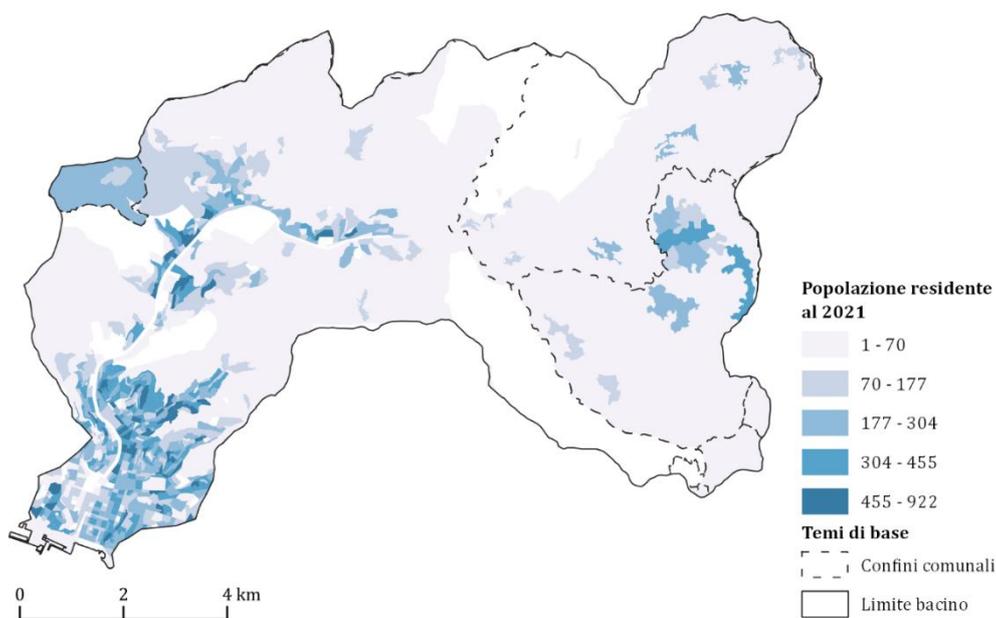


Figura 28: Popolazione residente per sezione di censimento 2021 (elaborazione propria).

Come osservabile dalla figura 29, il bacino presenta un elevato grado di antropizzazione, specie nel fondovalle della Città di Genova, con il 15,7% dei suoli urbanizzati sul totale della superficie del bacino. La copertura del suolo prevalente rimane comunque quella interessata da superfici boscate, al cui interno, grazie alle valli minori e al fitto reticolo idrografico si mantiene un buon grado di conservazione della biodiversità floro-faunistica.

Nell'area urbana genovese della valle insistono diverse problematiche di degrado del territorio legate agli impatti negativi generati dalle attività estrattive, e alla presenza delle infrastrutture densamente diffuse nella porzione finale del bacino. Tra l'altro, la valle sarà sede di un nuovo progetto infrastrutturale, lo SkyMetro, che collegherà la stazione di Brignole con Molassana per una lunghezza complessiva di 6,9 km; la particolarità del progetto è che l'infrastruttura verrà realizzata in sede sopraelevata in sponda sinistra, parallelamente all'alveo del torrente Bisagno. Nella valle si concentrano anche importanti servizi come lo stadio Marassi, il cimitero di Staglieno, la stazione ferroviaria di Brignole e numerose emergenze architettoniche come l'acquedotto storico e i sistemi di fortificazioni ottocenteschi.

Si tratta, dunque, di un contesto urbano piuttosto attivo, frequentato e densamente popolato, in cui un elevato mix di funzioni caratterizza gli usi del suolo e le attività presenti.

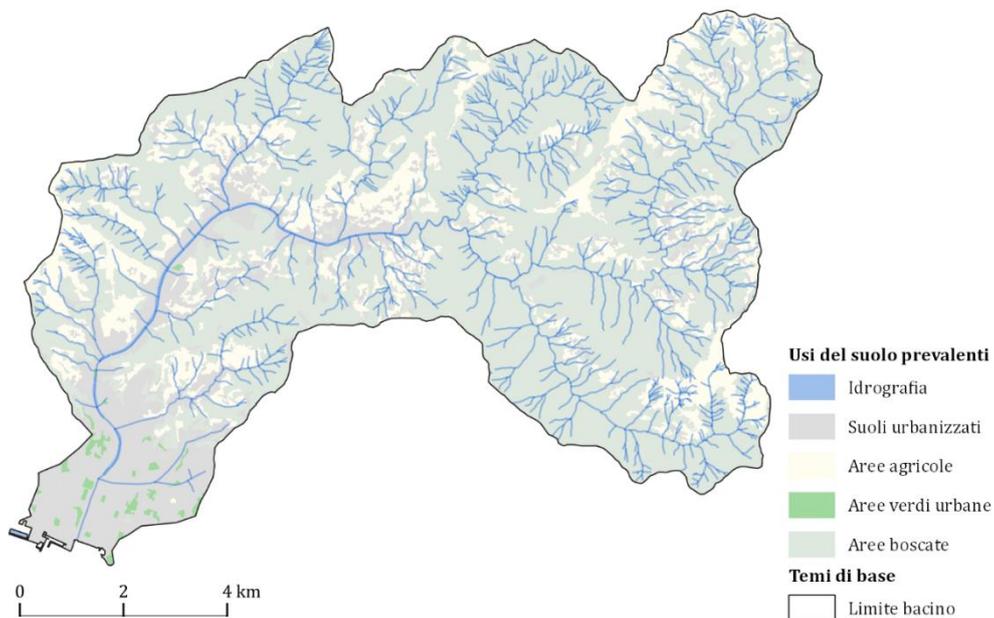


Figura 29: Usi del suolo prevalenti (elaborazione propria).

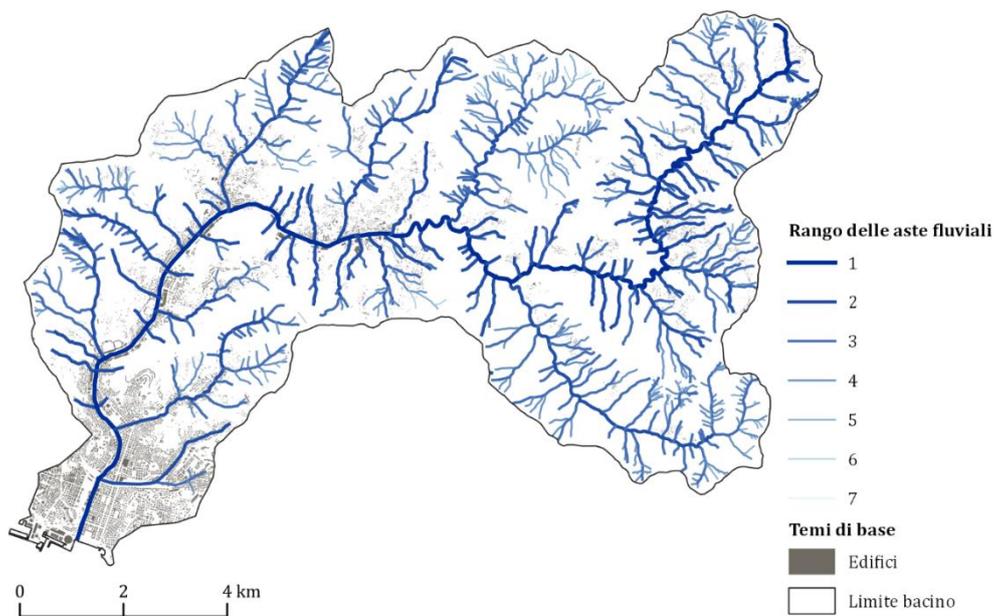


Figura 30: Reticolo idrografico del Bacino Bisagno, con categorizzazione delle aste fluviali secondo una scala gerarchica a sette valori (elaborazione propria).

Il principale collettore della valle è il Torrente Bisagno che, a partire dalla sua sorgente in prossimità del *Passo della Scoffera*, confluisce nel mar ligure, presso la sua foce localizzata ad est del porto di Genova, all'interno dell'omonimo quartiere *Foce*. All'interno del bacino il reticolo idrografico si differenzia in sette ordini: il primo livello è assegnato all'asta principale, il Torrente Bisagno, e il livello decresce in proporzione alla portata dell'asta.

A causa delle caratteristiche geomorfologiche e litologiche dei suoli, nella valle i fenomeni di dissesto idrogeologico maggiormente consistenti sono frane di scivolamento e colamento; in particolare, durante piogge intense e concentrate, dai versanti si sviluppano soil-slip e debris-flow. Ciò che caratterizza questi movimenti franosi è la ridotta estensione geografica e l'elevata concentrazione per unità di superficie, le zone maggiormente esposte a questa tipologia di fenomeni hanno la caratteristica comune di favorire una rapida saturazione del terreno con conseguente crescita del deflusso superficiale, dunque, condizione che riguarda principalmente zone non boschive e con una ridotta pendenza del terreno. Tra le principali cause di riattivazione di fenomeni gravitativi preesistenti, la relazione generale del piano di bacino individua l'attività antropica e le precipitazioni. Inoltre, sono molto influenti i fenomeni erosivi, con un elevato numero di frane innescate dall'interferenza del reticolo idrografico sia principale che secondario che alimenta il trasporto solido. La tabella 12 riassume i principali aspetti del bacino.

Superficie	96,3 km ²
Aree interessate	Comuni di Genova, Bargagli, Davagna Sant'Olcese, Bogliasco, Pieve Ligure, Sori, Lumarzo, Torriglia e Montoggio
Quota massima del bacino	1034 m s.l.m. - Monte Candelozzo
Lunghezza asta principale	26,6 km

Lunghezza complessiva delle aste	314,2 km
Pendenza media dei versanti	31%
Tessuto urbano	15,7%
Opere idrauliche censite	oltre 290
Densità dei dissesti	censiti oltre 300 eventi franosi
Attività estrattive	una cava attiva
Portata di piena T200	1300 m ³ /s

Tabella 12: Dati generali del bacino val Bisagno in parte ricavi dal Piano di Bacino (elaborazione propria).

5.4 Analisi del rischio alluvionale della Val Bisagno

La componente operativa di questa tesi è incentrata sullo studio del rischio alluvionale del bacino della Val Bisagno tramite strumenti GIS, utilizzando la metodologia AHP per la pesatura degli indicatori. Lo studio riprende la metodologia e la pesatura degli indicatori utilizzata nello studio di (Roopnarine et al., 2022). L'obiettivo è di applicare una metodologia di studio del rischio alluvionale che non sia rigida ma che, attraverso le differenti pesature attribuite degli indicatori, possa adattarsi a diversi contesti territoriali e contribuire a comprendere le future variazioni degli scenari di rischio generate dai cambiamenti climatici.

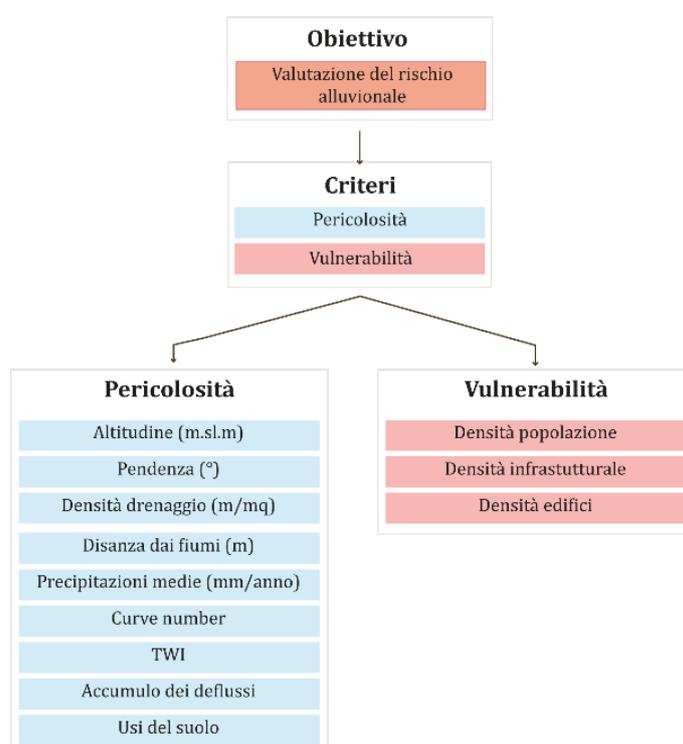


Figura 31: Struttura gerarchica del metodo AHP (elaborazione propria).

Il metodo è quello di definire e utilizzare una serie di indicatori relativi a fattori di pericolosità (H) e vulnerabilità (V), per la produzione di un indice di pericolosità idraulica ed uno di vulnerabilità, dalla cui combinazione è possibile ottenere un indice di rischio da mappare sul territorio. Una volta scelti gli indicatori, si producono le relative cartografie e si crea un ranking crescente del valore degli

indicatori (da 1 a 5), al fine di rendere indicatori di diversa natura confrontabili tra loro e, tramite il metodo AHP, passare al confronto degli indicatori selezionati. Una volta pesati gli indicatori che compongono i fattori di condizionamento della pericolosità e di vulnerabilità è possibile realizzare due cartografie di sintesi: *Indice di Pericolosità Idraulica* e *Indice di vulnerabilità*. Dal prodotto dei due indici di pericolosità e vulnerabilità si può ottenere una mappatura del rischio, secondo la formula: $R=H*V$ (Cherubini et al., 2006; Roopnarine et al., 2022).

La scelta degli indicatori (tabella 13) relativi ai due indici è stata ripresa dallo studio di Roopnarine et al. (2022) e comprende nove indicatori di *pericolosità* (media delle precipitazioni cumulate annuali (2000-2023), pendenza, densità dei fiumi, distanza dai fiumi, accumulo dei deflussi, altitudine, indice di umidità topografica (TWI), usi del suolo, curve number) e tre di *vulnerabilità* (densità di: popolazione, infrastrutture viarie e edifici).

Nome del dato	Scala	Formato	Indicatori	Riferimento	Anno
Reticolo Idrografico e Bacini Idrografici	10.000	Vettoriale	densità dei fiumi, distanza dai fiumi	Acquisizione del reticolo idrografico e dei bacini, conformi alla C.T.R. 1:5000, a partire dai dati vettoriali e alfanumerici della Regione Liguria e delle Autorità di Distretto (DGR n.507/2019)	2019
DEM	10.000	Raster	altitudine, pendenza accumulo dei deflussi, TWI	Tarquini S., Isola I., Favalli M., Battistini A. (2007). TINITALY, a digital elevation model of Italy with a 10 meters cell size (Version 1.0) [Data set]. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). https://doi.org/10.13127/tinality/1.0	2007

Usi del suolo	10.000	Vettoriale	usi del suolo	Fotoanalisi e fotointerpretazione di immagini digitali aeree Agea 2016. La cartografia è aggiornata in modo dinamico tramite l'analisi delle immagini satellitari più recenti disponibili: Agea, Sentinel 2, Google Earth e Bing Maps	agg. 2019
Global Hydrologic Curve Number (GCN250)	250.000	Raster	curve number	Jaafar, H.H., Ahmad, F.A. & El Beyrouthy, N. GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design. Sci Data 6, 145 (2019). https://doi.org/10.1038/s41597-019-0155-x	2019
Precipitazioni cumulate annue	100.000	Raster	media precipitazioni ventennali	I dati di precipitazione sono stati ottenuti dal portale dell'ARPAL Liguria, filtrati per precipitazione cumulata per il periodo 2000-2023. (https://ambientepub.regione.liguria.it/SiraQualMeteo/script/PubbAccessoDatiMeteo.asp)	2000-2023
Edifici	5.000	Vettoriale	densità degli edifici	Gli Edifici e i Manufatti sono derivati dallo strato IMMOBILIE ANTROPIZZAZIONI della Carta Tecnica Regionale 1:5000 - 2007/2013 - II Edizione 3D / DB Topografico. La carta è stata realizzata in lotti successivi dal 2007 al 2013	2013
Rete viaria	5.000	Vettoriale	densità delle infrastrutture viarie	La rete viaria, costituita dalla rete autostradale, stradale, ferroviaria, trasporto a fune e trasporto su acqua, è derivata dallo strato VIABILITÀ, MOBILITÀ E TRASPORTI della Carta Tecnica	2013

				Regionale sc. 1:5000 - 2007/2013 - II Edizione 3D / DB Topografico	
Popolazione	sezioni di censim ento	Vettoriale	densità della popolazio ne residente	Censimento permanente della popolazione e delle abitazioni 2021	2021

Tabella 13: Metadati degli indicatori (elaborazione propria).

Una volta individuati gli indicatori relativi agli indici di pericolosità e vulnerabilità, si è proceduto con la loro omogeneizzazione di formato; infatti, come mostra la tabella 13, c'è la necessità di trasformare alcuni indicatori in scala 1:5.000 e 1:10.000, dal formato *vettoriale* a quello *raster*. Per compiere questa trasformazione è stato necessario effettuare un'operazione di rasterizzazione, utilizzando una cella di 10mx10m, scelta ponderata sul fatto che tali indicatori hanno scale nominali elevate, da cui è possibile ottenere un buon livello di dettaglio. La tabella 14 sintetizza le stime degli errori geometrici per le tre scale nominali utilizzate per i dati elencati nella tabella 13. I valori dell'errore di graficismo (0,25mm) e di quello di digitalizzazione (0,2mm) sono ricavati da ISPRA¹³². Il valore dell'errore totale pari a 0,32 mm è ottenuto sulla base della legge di propagazione dell'errore, è dunque il risultato della radice quadrata della somma dei quadrati dell'errore di graficismo e di quello di digitalizzazione.

Scala nominale	Errore di graficismo (m)	Errore di digitalizzazione (m)	Errore totale (m)
5.000	1,25	1	1,60
10.000	2,5	2	3,20
100.000	25	20	32,02
250.000	75	60	96,05

Tabella 14: Stima degli errori grafici per gli indicatori (elaborazione propria).

¹³² Quaderni, serie III, n. 6 - Carta Geologica d'Italia - 1:50.000 (isprambiente.gov.it).

Il passaggio successivo è quello di riclassificare i raster degli indicatori, al fine di renderli sommabili tra di loro, raggruppando i valori all'interno di cinque classi secondo un ranking da 1 (valore minimo) a 5 (valore massimo). La tabella 15 aiuta a comprendere meglio il concetto di ranking utilizzato nell'analisi. In sostanza, il valore del ranking assegnato ad una cella del raster, indica che al suo crescere corrisponde una crescita del fattore di pericolosità o vulnerabilità. Il ranking, però, non segue lo stesso andamento; infatti, se per molti indicatori alla crescita del valore numerico dell'indicatore corrisponde un valore maggiore di ranking; per alcuni vale il contrario, come per la pendenza l'altitudine e la distanza dai fiumi. Nel caso del TWI il ranking sale al crescere dell'indicatore, poiché un valore più alto di TWI indica una maggiore capacità di deflusso superficiale. Al contrario, per quanto riguarda l'altitudine, con la crescita della quota, il ranking decresce poiché al decrescere della quota si avrà una maggiore esposizione alla pericolosità idraulica.

Indicatore	Valore dato	Ranking
TWI	<=11,94	1
	11,94 - 15,14	2
	15,14 - 18,34	3
	18,34 - 21,54	4
	>21.54	5
Altitudine	<=205	5
	205 - 410	4
	410 - 615	3
	615 - 820	2
	>820	1

Tabella 15: Esempio delle due tipologie di ranking crescente e decrescente (elaborazione propria).

Per compiere questa operazione si è scelto di classificare il raster utilizzando come interpolazione "discreto" e scegliendo "equal interval" come moda. A differenza dello studio di Roopnarine et al., (2022) non è stato possibile classificare il raster secondo il metodo Natural Breaks poiché questa funzione non è disponibile nella classificazione dei raster in QGIS. La scelta dell'utilizzo del sopracitato metodo di

classificazione è frutto della necessità di racchiudere i valori dei raster all'interno di cinque classi di cui devono essere noti gli estremi. Il metodo equal interval aiuta ad enfatizzare l'entità del valore di un attributo¹³³ rispetto agli altri valori, specie nelle distribuzioni gaussiane in cui mette in risalto la classe centrale e facendo emergere gli estremi sulle code, come nel caso dell'indice di pericolosità (18).

Fattori di pericolosità: i dati delle *precipitazioni* sono stati riclassificati con valori crescenti che indicano un ranking più alto; la *pendenza* è stata classificata in gradi, con valori crescenti che indicano un ranking più basso; la *densità fluviale* è stata classificata con valori crescenti di densità che indicano un ranking più alto; la *distanza dai fiumi* è stata riclassificata con valori crescenti di distanza che indicano un ranking più basso; *l'accumulo dei deflussi* è stato derivato dal DEM e riclassificato in base ai valori dei pixel, con valori crescenti che indicano un ranking più alto; *l'altitudine* è stata classificata con l'aumento della quota sul livello del mare che indica un ranking più basso; il *TWI* è stato classificato con valori crescenti che indicano un ranking più alto; gli *usi del suolo* sono stati classificati assegnando all'idrografia il ranking più alto, seguita dalle aree urbanizzate, dalle infrastrutture, dalle aree agricole e infine dalle zone boscate; il *curve number* è stato classificato con valori crescenti che assumono un ranking più alto (allegati 1-9).

Fattori di vulnerabilità: tutti e tre gli indicatori di vulnerabilità sono stati riclassificati secondo un ranking crescente all'aumentare della densità (allegati 10-12).

A seguito di quest'operazione di riclassificazione dei dati è stato ottenuto per ciascuno dei 12 indicatori un raster a cinque classi con celle contenenti valori discreti compresi tra 1 e 5. A questo punto, avendo riportato tutti gli indicatori ad un ranking di valori comuni, si è potuto procedere con la sommatoria raster pesata degli indicatori per il calcolo dei due indici secondo le pesature degli indicatori risultanti dall'AHP (tabelle 16 & 17) (Roopnarine et al., 2022). Sulla diagonale principale delle

¹³³ Data classification methods—ArcGIS Pro | Documentation.

matrici di confronto a coppie non compare il valore 1 perché si tratta di valori normalizzati (Balubaid & Alamoudi, 2015)

Indice di pericolosità idraulica (allegato 13) = *"Precipitazioni"* * 0.29 + *"Pendenza"**0.22 + *"Densità dei fiumi"**0.16 + *"Distanza dai fiumi"* * 0.11 + *"Accumulo dei deflussi"**0.08 + *"Altitudine"* * 0.06 + *"TWI"* * 0.04 + *"Usi del suolo"* * 0.03 + *"Curve Number"* * 0.02.

Indice di pericolosità idraulica										
Indicatori	Precipitazioni	Pendenza	Densità dei fiumi	Distanza dai fiumi	Accumulo dei deflussi	Altitudine	TWI	Usi del suolo	CN	Pesatura indicatore
Precipitazioni	0,34	0,41	0,39	0,35	0,3	0,27	0,24	0,22	0,2	0,29
Pendenza	0,17	0,34	0,26	0,26	0,24	0,22	0,21	0,19	0,18	0,22
Densità dei fiumi	0,11	0,17	0,13	0,17	0,18	0,18	0,17	0,16	0,15	0,16
Distanza dai fiumi	0,09	0,11	0,06	0,09	0,12	0,13	0,14	0,14	0,13	0,11
Accumulo dei deflussi	0,07	0,09	0,04	0,04	0,06	0,09	0,1	0,11	0,11	0,08
Altitudine	0,05	0,07	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07	0,08	0,09	0,06
TWI	0,05	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,07	0,04
Usi del suolo	0,04	0,05	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,04	0,03
CN	0,04	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02

Tabella 16: Pesatura normalizzata degli indicatori di pericolosità, sulla base dello studio di Roopnarine et al. (2022) (elaborazione propria).

Indice di vulnerabilità (allegato 15) = *"Densità popolazione"* * 0.54 + *"Densità edifici"**0.297 + *"Densità strade"**0.163.

Indice di vulnerabilità				
Indicatori	Densità popolazione	Densità edifici	Densità strade	Pesatura indicatore
Densità popolazione	0.546	0.571	0.500	0,54
Densità edifici	0,273	0,286	0,333	0,297
Densità strade	0,18	0,143	0,167	0,163

Tabella 17: Pesatura normalizzata degli indicatori di vulnerabilità, sulla base dello studio di Roopnarine et al. (2022) (elaborazione propria).

La pesatura degli indicatori, tramite metodologia AHP, è soggetta ad un certo valore di incertezza, derivante da possibili incongruenze nel confronto a coppie degli indicatori. Per questo motivo è stato necessario calcolare il *consistency ratio* (CR) della matrice con cui sono stati distribuiti i pesi al fine di verificare che il valore fosse inferiore al 10%. Avendo utilizzato le pesature degli indicatori di Roopnarine et al. (2022) dal medesimo studio è stato ricavato il CR. Le valutazioni mostrano un buon livello di coerenza con un CR del 4% per i fattori di pericolosità e un CR dello 0,4% per i fattori di vulnerabilità. L'indice di rischio (allegato 17) è stato ottenuto come il prodotto tra l'indice di vulnerabilità e quello di pericolosità. Si rimanda agli allegati per la consultazione degli elaborati cartografici prodotti.

Il passaggio finale è stato quello di riclassificare i valori degli indici al fine di ottenere una zonizzazione a cinque classi, seguendo lo stesso principio del ranking degli indicatori in cui 1 è il valore minore e 5 il maggiore (allegati 14, 16 e 18). All'interno della tabella 18 sono riportati i valori delle superfici ricadenti in ciascuna classe per i tre indici prodotti. La discussione dei risultati ottenuti verrà affrontata nel paragrafo successivo relativo alla validazione dei risultati.

Indicatore	Classe	Area (Km²)	Percentuale
Pericolosità	1	1,00	1,0%
	2	18,50	19,2%
	3	52,32	54,4%
	4	21,86	22,7%
	5	2,42	2,5%
Vulnerabilità	1	62,95	65,3%
	2	19,97	20,7%
	3	7,78	8,1%
	4	4,74	4,9%
	5	0,90	0,9%
Rischio	1	61,94	64,5%
	2	23,48	24,4%
	3	7,03	7,3%
	4	3,43	3,6%
	5	0,19	0,2%

Tabella 18: Riclassificazione dei prodotti cartografici di pericolosità, vulnerabilità e rischio (elaborazione propria).

5.5 Validazione dei risultati

La validazione dei risultati ottenuti permette di valutare se il prodotto di un modello soddisfa adeguatamente la sua funzione di progettazione o l'uso previsto; in particolare la convalida dei modelli di rischio di alluvione ha l'obiettivo di valutare come un modello sia in grado di stimare, in modo affidabile, la probabilità e le caratteristiche di un evento alluvionale (Molinari et al., 2017). In un'ottica di prevenzione e gestione del rischio, nel caso di analisi incentrate sulla valutazione della pericolosità alluvionale, la conformità della valutazione rispetto agli scenari reali è un aspetto di cui è fondamentale sottolineare l'importanza.

Per la validazione di un modello di stima del rischio alluvionale si può dunque confrontare la mappa di pericolosità con il dato binario¹³⁴ fornito dalle geometrie che individuano l'estensione spaziale di eventi alluvionali passati; dunque, le mappe degli eventi storici rappresentano un buono strumento di convalida (Dash & Sar, 2020). Molinari et al. (2017) suggeriscono come, in assenza di dati di validazione, sia possibile discutere i risultati forniti dal modello con figure esperte in materia che possano evidenziare eventuali incongruenze o peculiarità del modello.

In un modello in cui si ha una significativa capacità predittiva, le aree che si sono allagate durante eventi storici dovrebbero coincidere maggiormente con le zone in cui il modello stima una pericolosità medio-alta. La validazione dell'accuratezza e dell'affidabilità dei risultati è fondamentale per la costruzione di un sistema decisionale consapevole e capace di affrontare le emergenze, mitigandone gli impatti, tramite un approccio place-based con azioni di breve temine e strategie di lungo corso.

Per la validazione del modello di stima della pericolosità alluvionale si è scelto di utilizzare la *Kappa di Cohen*, che rappresenta un coefficiente statistico per rappresentare l'accuratezza e l'affidabilità di un modello previsionale. Per l'individuazione di tale indice è necessaria la costruzione di una matrice di

¹³⁴ Con Si che indica che l'area è stata allagata; con No che indica che l'area non è stata allagata.

confusione (figura 32) in cui: le righe rappresentano le classi effettive e dunque le risposte corrette (aree allagate); mentre, le colonne rappresentano le classi previste, dunque, le risposte fornite dal modello (pericolosità). Dalla matrice possono quindi generarsi quattro differenti scenari:

- true positive (TP) fattispecie in cui il modello ha correttamente risposto SI;
- true negative (TN) fattispecie in cui che il modello ha correttamente risposto NO;
- false positive (FP) fattispecie in cui il modello ha erroneamente risposto SI;
- false negative (FN) fattispecie in cui il modello ha erroneamente risposto NO.

		CLASSI PREVISTE	
		SI	NO
CLASSI EFFETTIVE	SI	TP	FN
	NO	FP	TN

Figura 32: La matrice di confusione (Andrea Minini.it).

Una volta costruita la matrice di confusione è possibile procedere con il calcolo della Kappa di Cohen il cui valore è esprimibile come:

$$\frac{\Pr(a) - \Pr(e)}{1 - \Pr(e)}$$

$\Pr(a)$ esprime la proporzione osservata ed equivale a:

$$\frac{(TP + TN)}{\text{Totale osservazioni}}$$

$\Pr(e)$ esprime la proporzione dovuta al caso ed equivale a:

$$\frac{((TP + FP) * (TP + FN)) * ((FN + TN) * (FP + TN))}{(\text{Totale osservazioni})^2}$$

Per effettuare una validazione dell'indice di pericolosità è stato preso in considerazione l'evento alluvionale del 9 e 10 ottobre 2014 (figura 33). Il dato sull'estensione delle aree inondate rappresenta la mappatura, in scala 1:10.000, delle zone interessate da inondazioni nei mesi di ottobre e novembre 2014, costituita dall'insieme delle aree segnalate da Comuni e Province, ed approvata con DGR n. 59/2015. La scala nominale del dato permette di avere un buon livello di dettaglio, anche se nei metadati non vengono chiarite le tecniche di rilevamento utilizzate per la mappatura. Secondo Paliaga et al (2020) durante l'evento alluvionale sono stati rilevati picchi di pioggia di 141 mm/h e cumulate di 401 mm/24h; i torrenti esondati sono stati il Bisagno e il suo affluente Fereggiano e la portata massima stimata è stata di 1.000 m³/s. Nel confronto con lo scenario di allagamento fornito dalla direttiva alluvioni con TR di 500 anni, e quello dell'evento dell'ottobre 2014, emerge addirittura una sottostima della pericolosità, con aree allagate non previste dallo scenario di pericolosità (figura 33).

In questo caso, però, sussistono degli evidenti limiti, dati dal fatto che i due valori che si stanno per mettere a confronto, quali indice di pericolosità ed estensione dell'evento alluvionale, hanno in realtà due significati differenti. Inoltre, prendere in considerazione un solo evento alluvionale come riferimento per una validazione del modello di pericolosità alluvionale è piuttosto limitante ma, questo è l'unico dato georeferenziato disponibile per effettuare una valutazione dell'accuratezza.

Poiché la validazione è una tipologia di analisi da condurre su valori binari, l'indice di pericolosità è stato convertito in due classi in cui lo 0 indica le i valori più bassi di pericolosità (classi 1-2) mentre 1 indica i valori più elevati (classi 3-4-5); alle aree colpite dall'evento alluvionale è stato assegnato il valore 1. Quando si conduce una validazione dei risultati è dunque necessario stabilire una soglia al cui superamento scatta una risposta positiva del modello. In questo caso, trattandosi delle valutazione della pericolosità è meglio adottare una scelta della soglia che sia cautelativa; dunque, in una classificazione a cinque valori è maggiormente opportuno stabilire una soglia posta al di sotto della mediana, dunque in questo caso al di sotto della terza classe. Inoltre, la distribuzione normale dell'indice di pericolosità suggerisce

che, considerando solo le ultime due classi, si avrebbe avuto una stima sbagliata della pericolosità, espressa in valori binari, in numerose zone che si sono allagate.

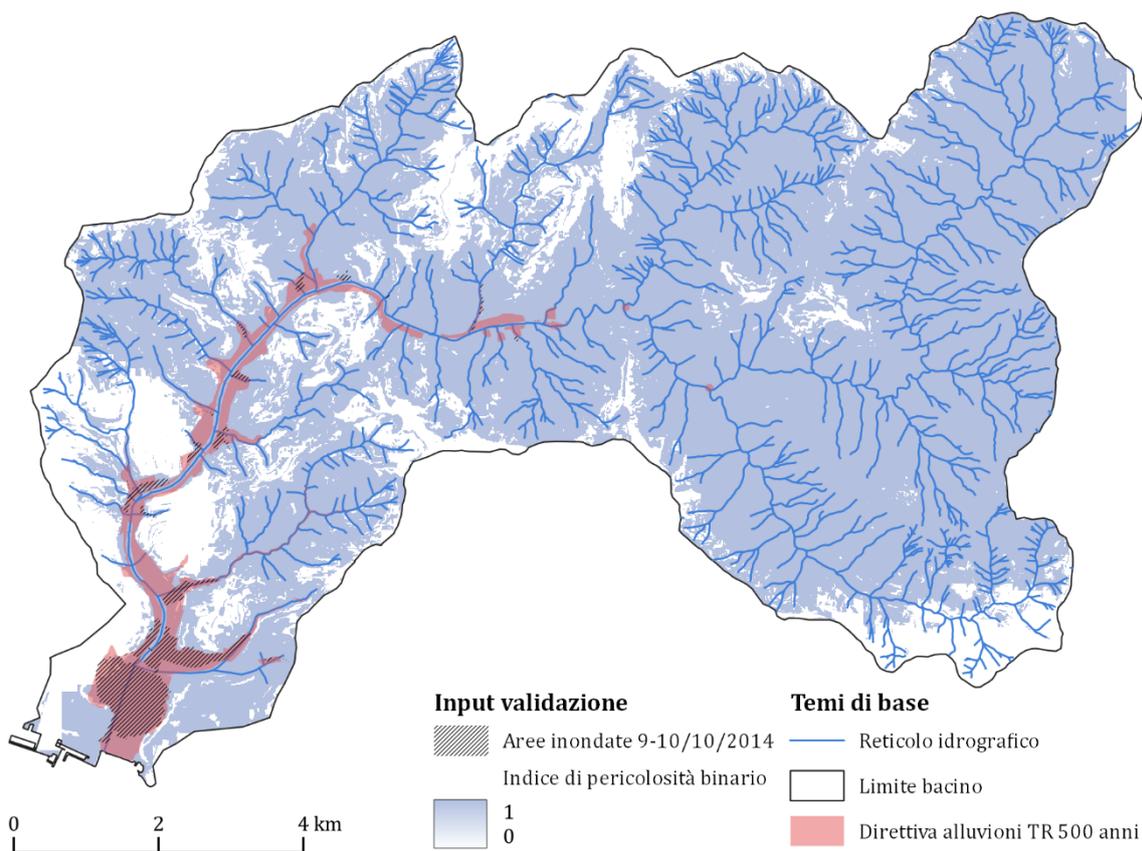


Figura 33: Estensione delle aree alluvionate dell'evento dell'ottobre 2014 confrontata con lo scenario di pericolosità della direttiva alluvioni con TR 500 anni e l'indice di pericolosità binario (elaborazione propria).

Dunque, per calcolare la Kappa di Cohen per l'intera estensione del modello, rispetto all'evento alluvionale del 2014, si è proceduto calcolando il numero di pixel per ciascuno dei quattro quadranti della matrice di confusione (tabella 19). Nella tabella 19 si evidenzia un'elevata quantità di pixel falsi positivi, ciò è dovuta all'enorme differenza, in termini di estensione spaziale, tra le aree allagate e l'intero bacino del Bisagno su cui è stato calcolato l'indice di pericolosità. Inoltre, l'area montana, in cui il modello di pericolosità in scala binaria individua un gran numero di pixel contenenti il valore 1, non è stata minimamente interessata dall'esondazione del Bisagno e del Fereggiano.

		Pericolosità		
		Si	No	Totale
Evento	Si	1.438.072	75.164.581	76.602.653
	No	66.664	19.430.911	19.497.575
	Totale	1.504.736	94.595.492	96.100.228

Tabella 19: Matrice di confusione nel confronto tra il modello di stima della pericolosità idraulica e l'evento alluvionale del 9-10 ottobre 2014 (elaborazione propria).

Una volta ottenuta la matrice si è proceduto calcolando la Kappa di Cohen:

$$\frac{0,22 - 0,21}{1 - 0,21} = 0,01$$

Il valore ottenuto della Kappa di Cohen rientra all'interno della prima fascia di valori (0-0,4), il che indica una scarsa concordanza tra modello ed evento. Comunque, se si considera solo la prima colonna della matrice, al cui interno sono contenute le stime ricadenti all'interno delle aree alluvionate, si evidenzia come il modello abbia un rapporto tra veri positivi e falsi negativi di circa 21,5:1. Infatti, per il tipo di validazione effettuata, tra due tipologie di dati non puramente concordi, come l'indice di pericolosità e l'estensione delle aree alluvionate, l'unico aspetto che può essere validato significativamente è quello relativo al conteggio dei falsi negativi e dei veri positivi.

Accuratezza Pr(a)	21,7%
Producer accuracy	95,6%
User accuracy	1,9%
Probabilità mancato allarme	4,4%

Tabella 20: Accuratezza, Producer e User Accuracy, Probabilità di mancato allarme (elaborazione propria).

Nella tabella 20 sono riportati i valori di ulteriore metriche utilizzate per valutare l'accuratezza del modello. Ciò che è di particolare interesse è la *probabilità di mancato allarme* che, come visibile, è piuttosto contenuta, frutto della buona capacità del modello binario di individuare valori (1), all'interno delle aree allagate

dall'evento del 2014; per le medesime ragioni anche il *producer accuracy*¹³⁵ presenta un elevato valore. Per quanto riguarda l'*user accuracy* il valore molto basso è dato dall'elevata quantità di falsi positivi, derivanti dal fatto che l'estensione dell'evento alluvionale si concentra solo nei pressi dei torrenti Bisagno e Fereggiano, non interessando minimamente l'area montana, su cui insiste un'elevata quantità di valori positivi (1).

Ritornando alla classificazione a 5 classi, tramite la figura 34 e la tabella 21 è possibile avere un confronto tra gli scenari di pericolo stimati dal modello e l'estensione delle aree inondate durante l'evento alluvionale del 9 e 10 ottobre 2014. Ciò che emerge è la buona capacità del modello di individuare come zone a pericolosità media, elevata e molto elevata le aree che sono state allagate durante l'evento considerato e di non stimare per nessuna delle aree allagate un livello basso (1). Infatti, il modello stima per le aree alluvionate dall'evento del 2014 nel 95,6% delle superfici le classi 3, 4 e 5.

Il modello tende a sottostimare il livello di pericolosità nell'area sud dell'inondazione, in prossimità della foce; mentre, risalendo a monte, si evidenzia come il modello sia maggiormente in grado di prevedere livelli di pericolo alti e molto alti (classi 4 e 5). Inoltre, tramite la tabella 18 è possibile osservare che la distribuzione in classi delle classi di pericolosità segue un andamento gaussiano con la maggior parte dei valori concentrati nelle classi centrali, e gli estremi esigui; questo aiuta a spiegare l'elevata consistenza della classe 3 all'interno delle aree allagate. Un aspetto che può spiegare come mai il modello tenda a sottostimare la pericolosità, soprattutto in ambito urbano, può essere legata alle caratteristiche profondamente differenti che caratterizzano la zona urbana della valle rispetto a quella montana. Infatti, se si osserva la cartografia relativa alla pericolosità idraulica, il modello tende a stimare come zone a maggior pericolosità quelle montane, anche perché in queste zone si osservano i valori più elevati di precipitazioni cumulate annue, indicatore che all'interno dell'AHP presenta il peso maggiore. Questa

¹³⁵ CLASSIFICATION OF ACCURACY ASSESSMENT.pdf (dspmuranchi.ac.in).

eterogeneità territoriale, in cui l'area urbana ha una limitata estensione rispetto al bacino della Valle, fa sì che ci sia una sottostima della pericolosità nell'area urbana più densa. Dunque, per migliorare la precisione della capacità predittiva del modello, si potrebbe prevedere di restringere il campo di ricerca e di costruzione degli indicatori, concentrando la valutazione limitatamente all'area urbana, ossia la zona in cui si riscontrano i valori più elevati di vulnerabilità; è da tenere in conto che per compiere tale operazione andrebbe ristrutturato il metodo, il metodo di classificazione in ranking e la pesatura degli indicatori. In alternativa, si potrebbe ripartire dall'analisi AHP variando le pesature degli indicatori e valutando come il modello si comporta in funzione di tali variazioni.

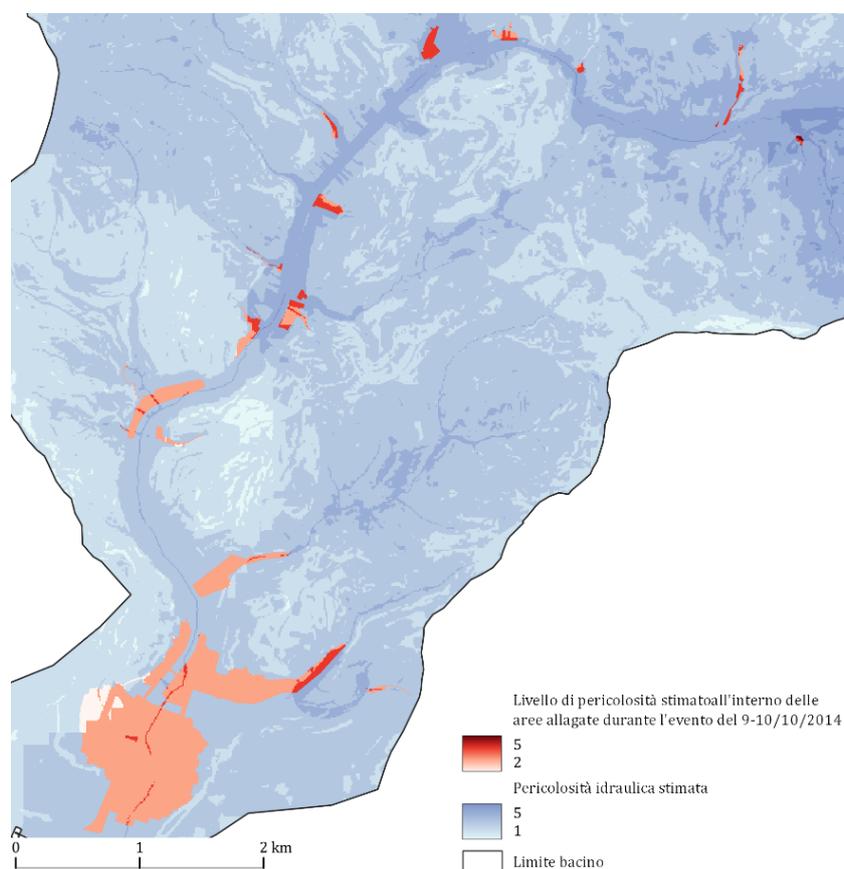
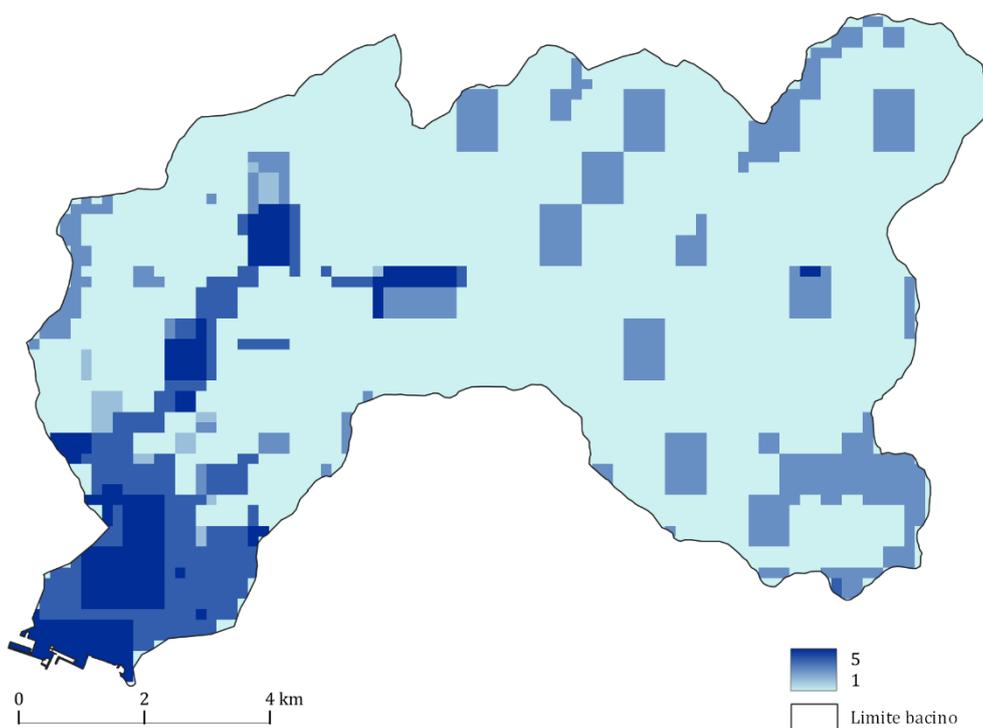


Figura 34: Valutazione del livello di pericolosità idraulica stimato dal modello per le aree inondate durante l'evento alluvionale del 9 e 10 ottobre 2014 (elaborazione propria).

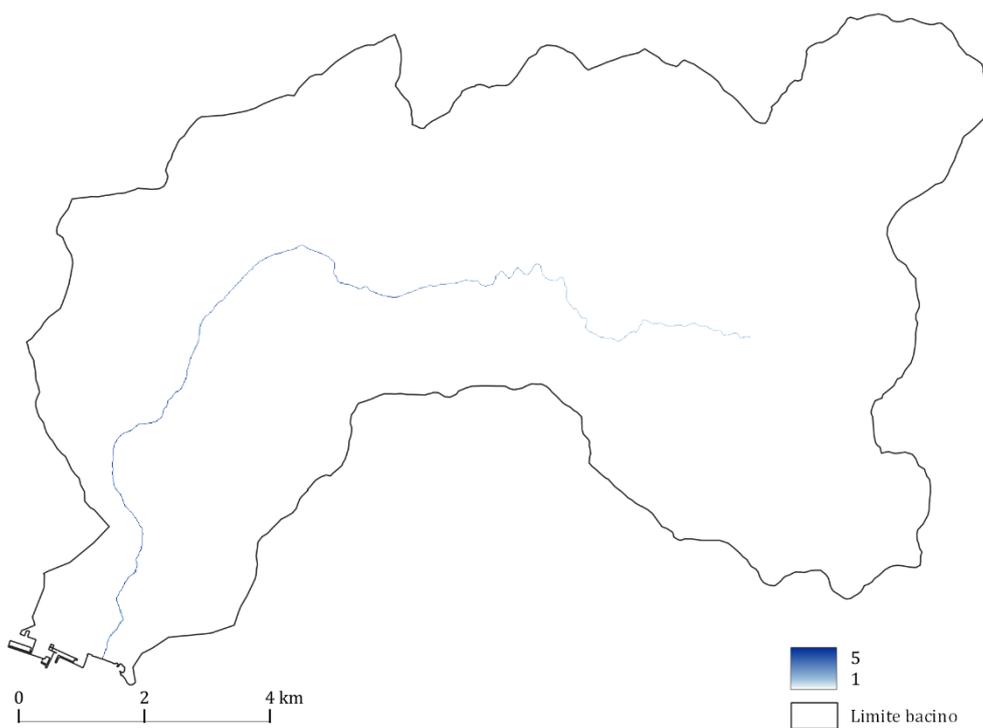
Livello di pericolosità stimato dal modello	Area (Km²)	Percentuale
2	0,067	4,4%
3	1,298	86,3%
4	0,139	9,2%
5	0,001	0,1%

Tabella 21: Livelli di pericolosità stimati dal modello all'interno delle aree inondate durante l'evento del 9-10 ottobre 2014 (elaborazione propria).

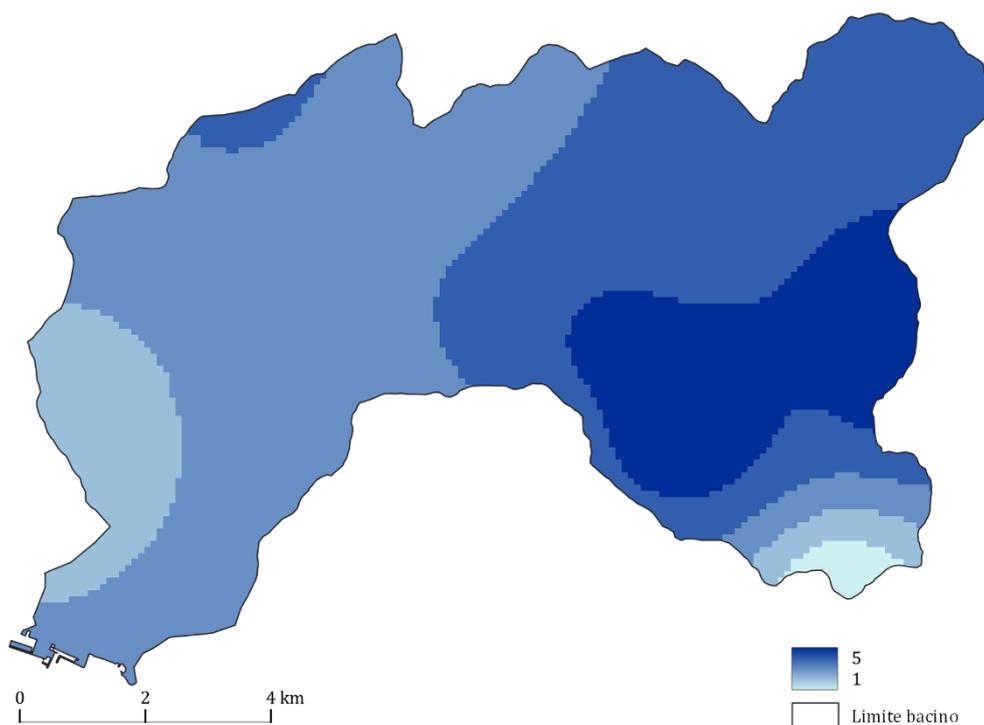
5.6 Allegati



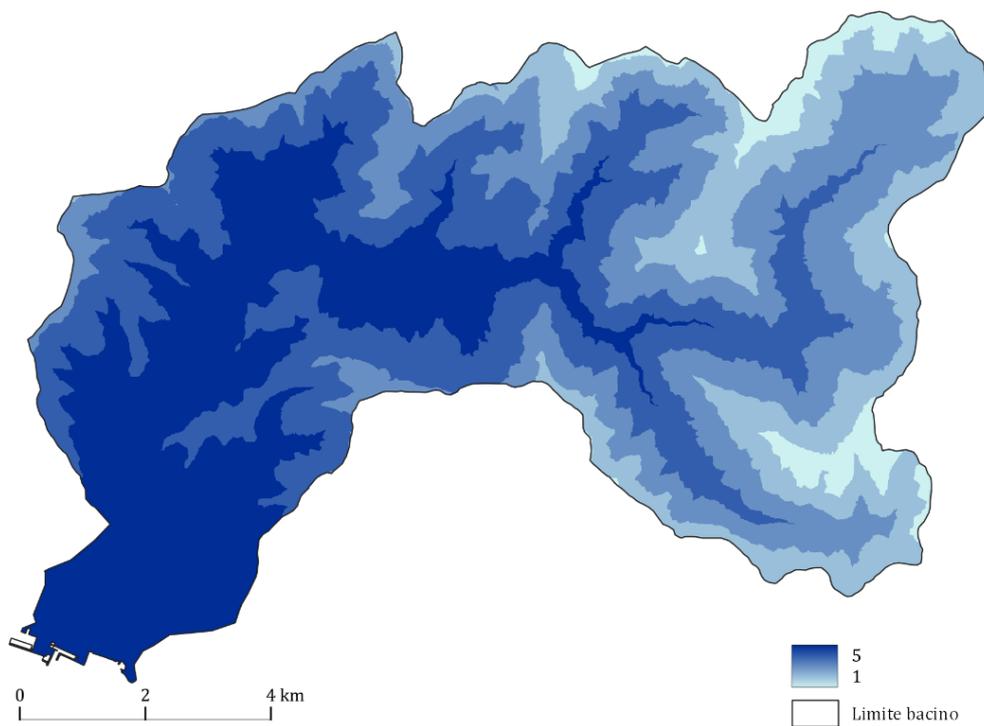
Allegato 1: Curve number (elaborazione propria).



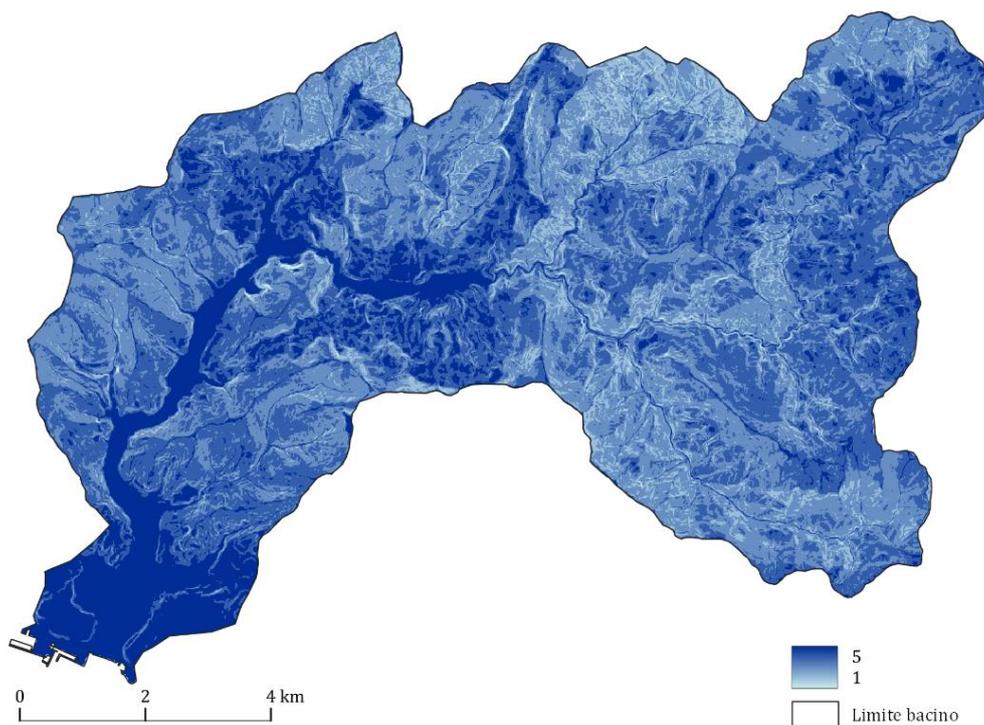
Allegato 2: Accumulo dei deflussi (elaborazione propria).



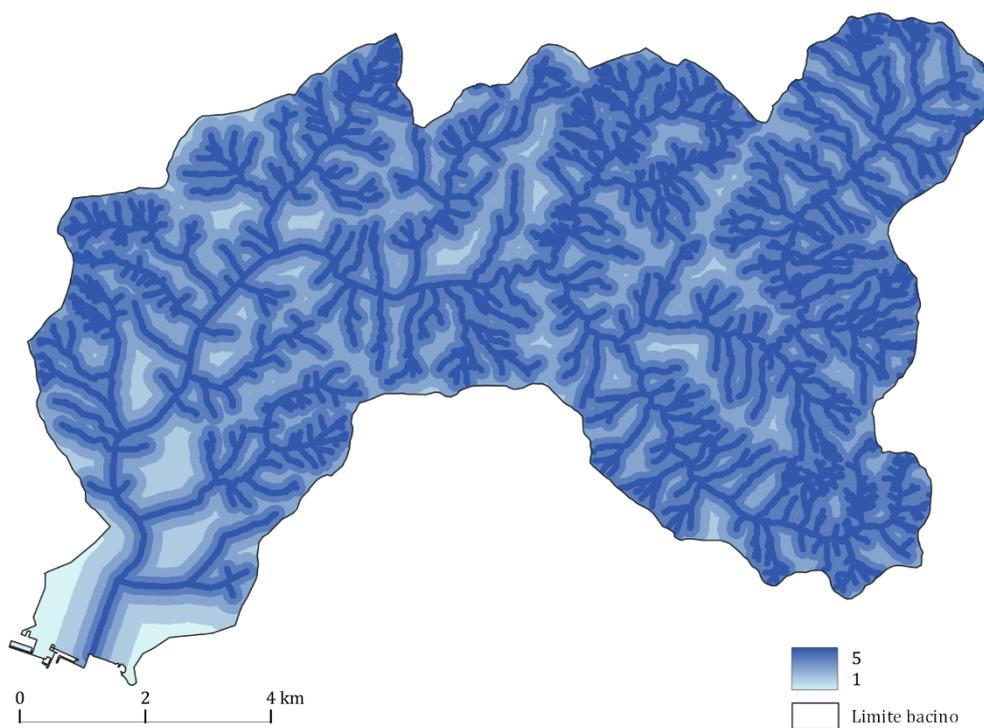
Allegato 3: Precipitazione cumulata, media annua 2000-2023 (elaborazione propria).



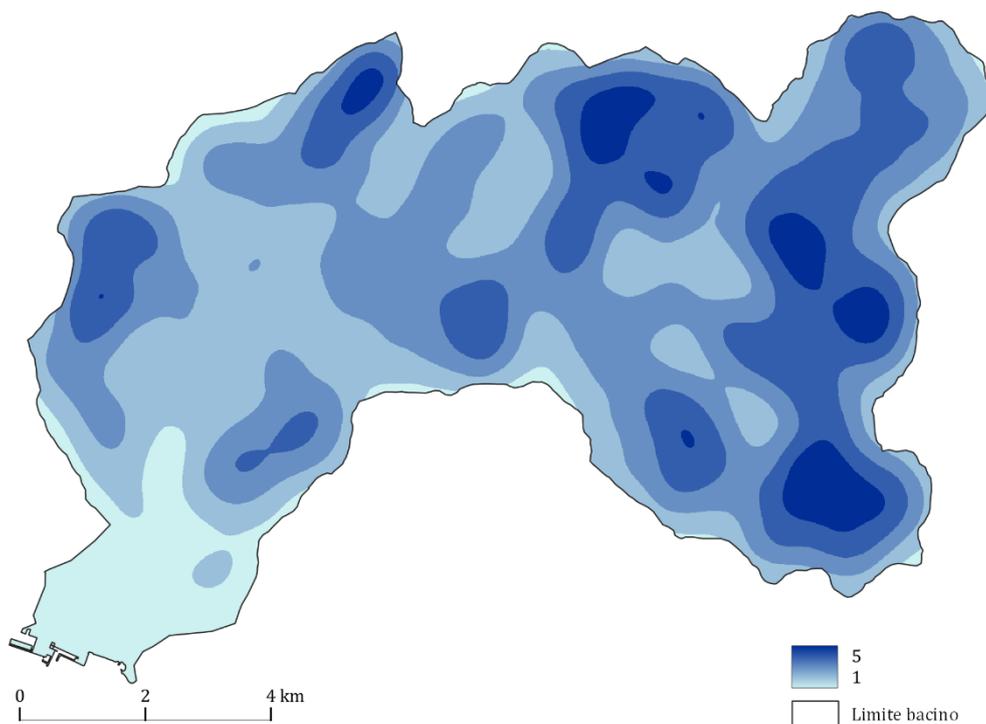
Allegato 4: Altitudine (elaborazione propria).



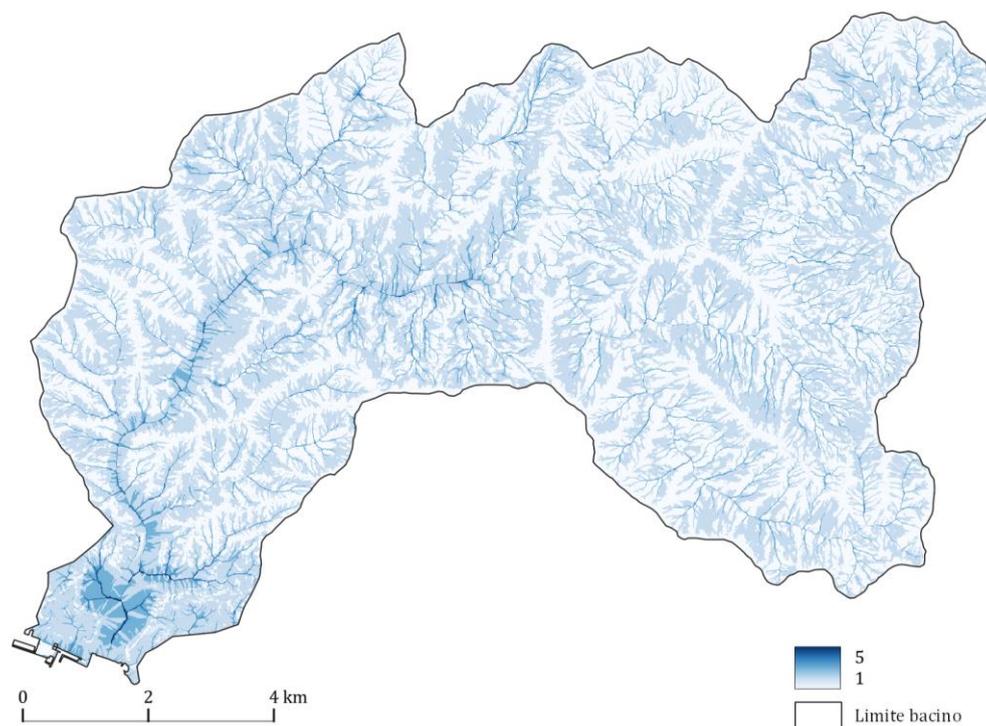
Allegato 5: Pendenza (elaborazione propria).



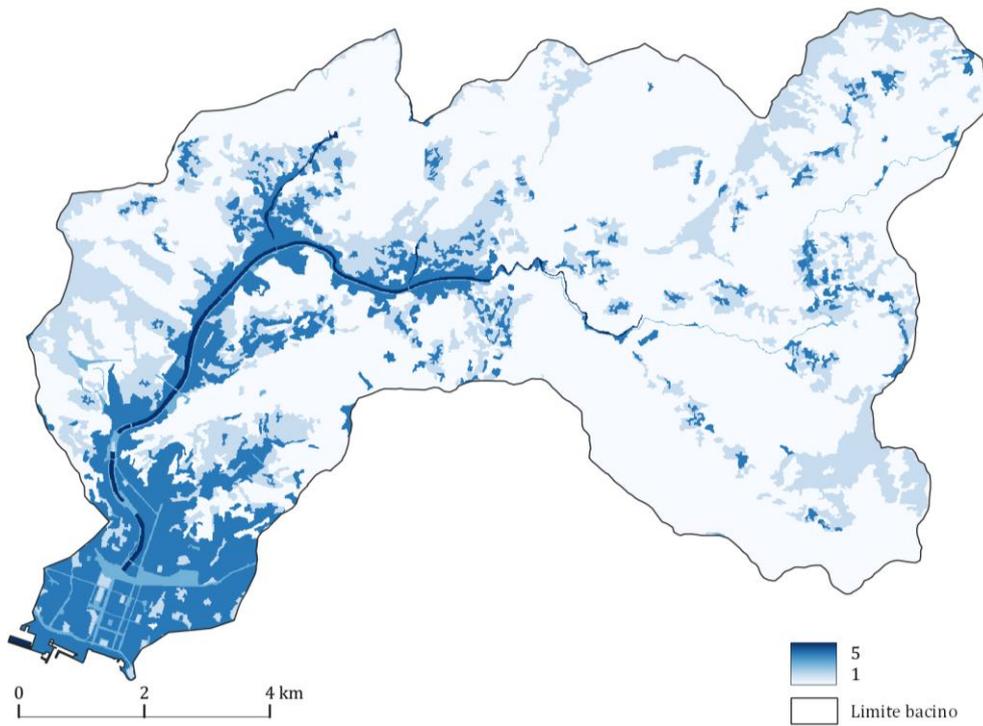
Allegato 6: Distanza dai fiumi (elaborazione propria).



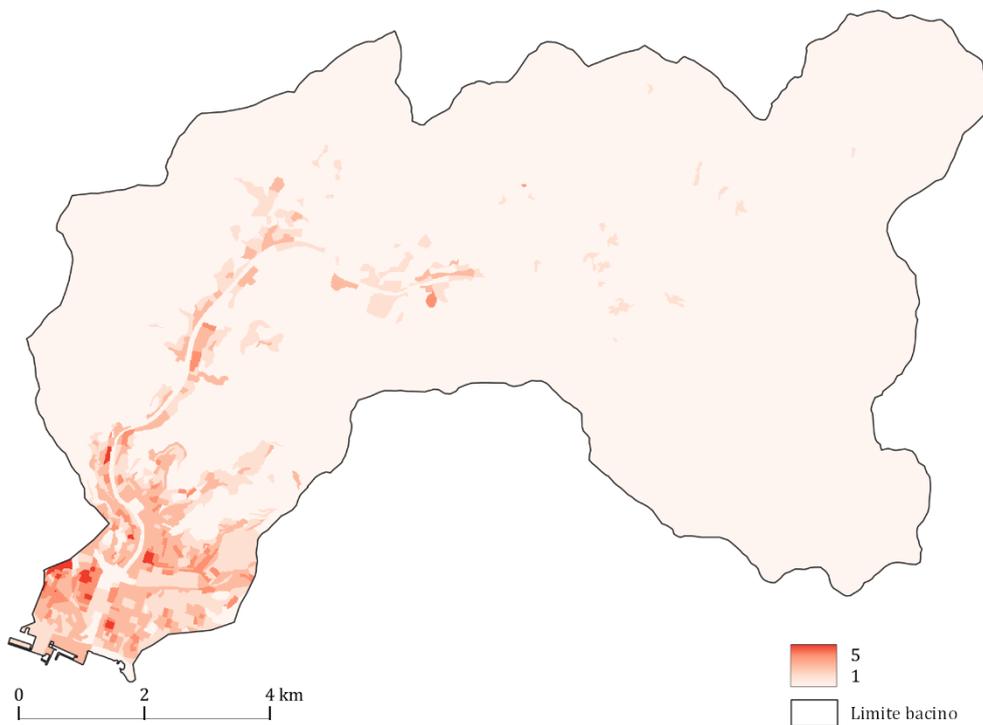
Allegato 7: Densità dei fiumi (elaborazione propria).



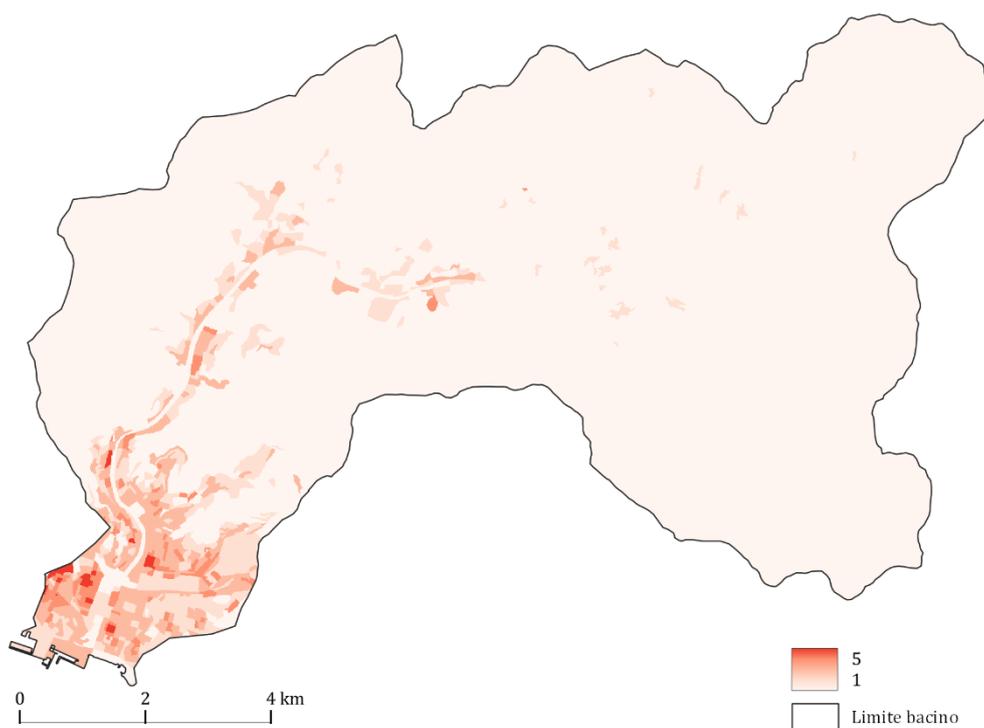
Allegato 8: TWI (elaborazione propria).



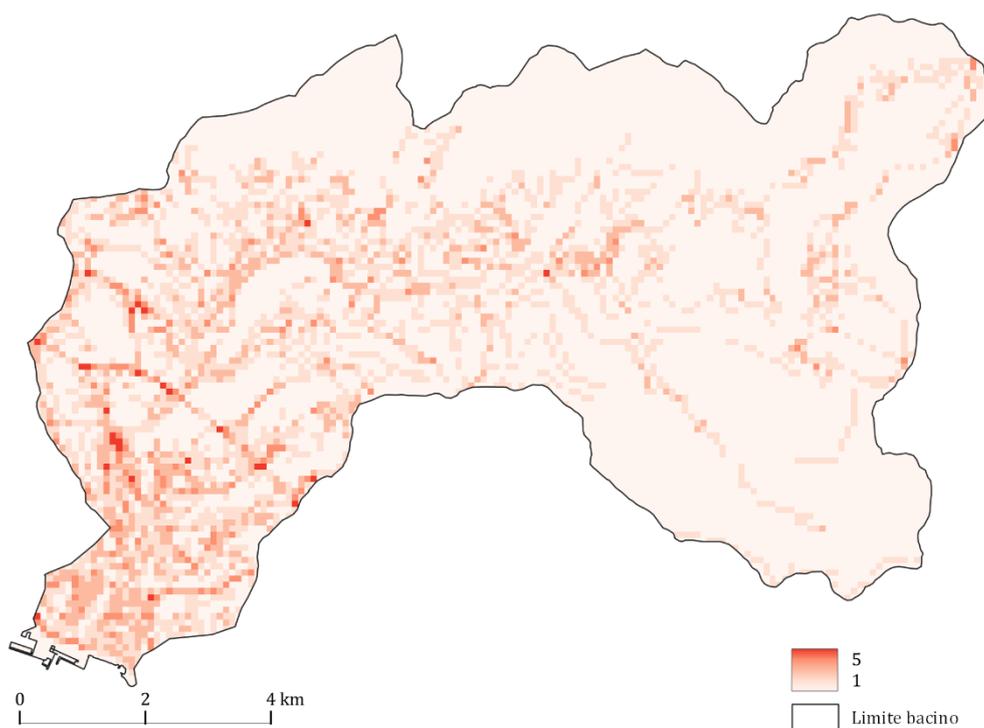
Allegato 9: Usi del suolo (elaborazione propria).



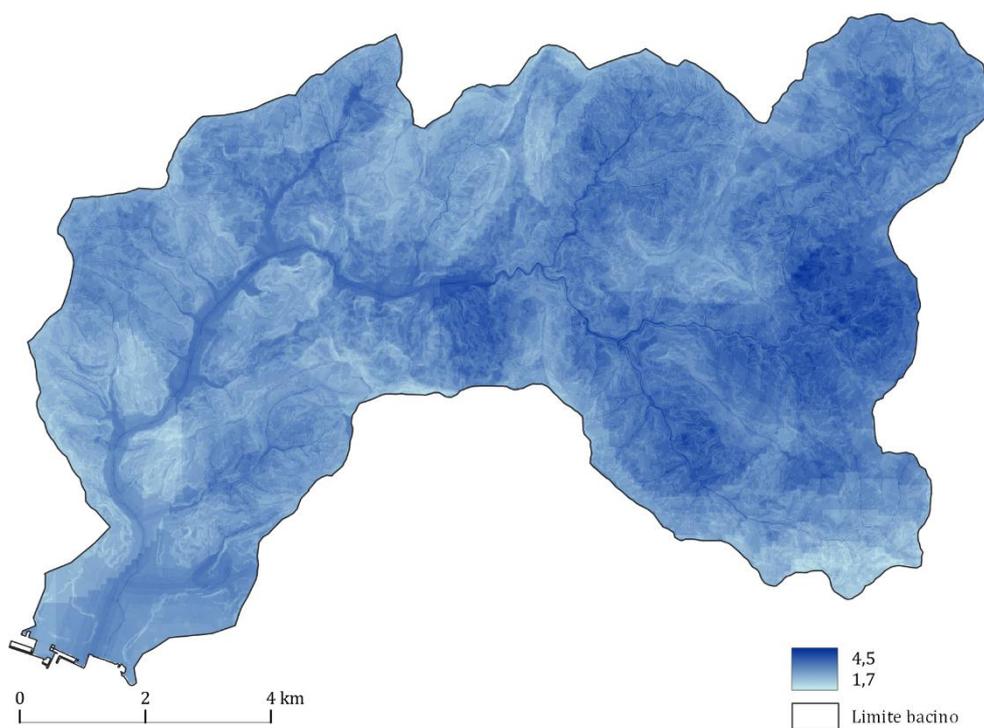
Allegato 10: Densità degli edifici (elaborazione propria).



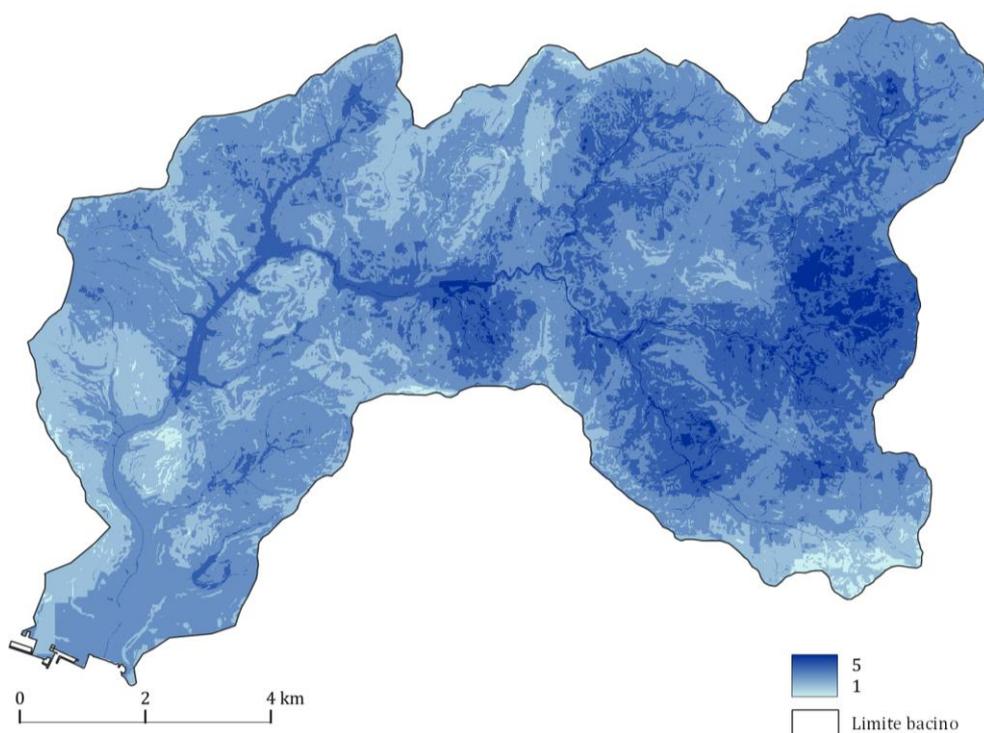
Allegato 11: Densità della popolazione residente (elaborazione propria).



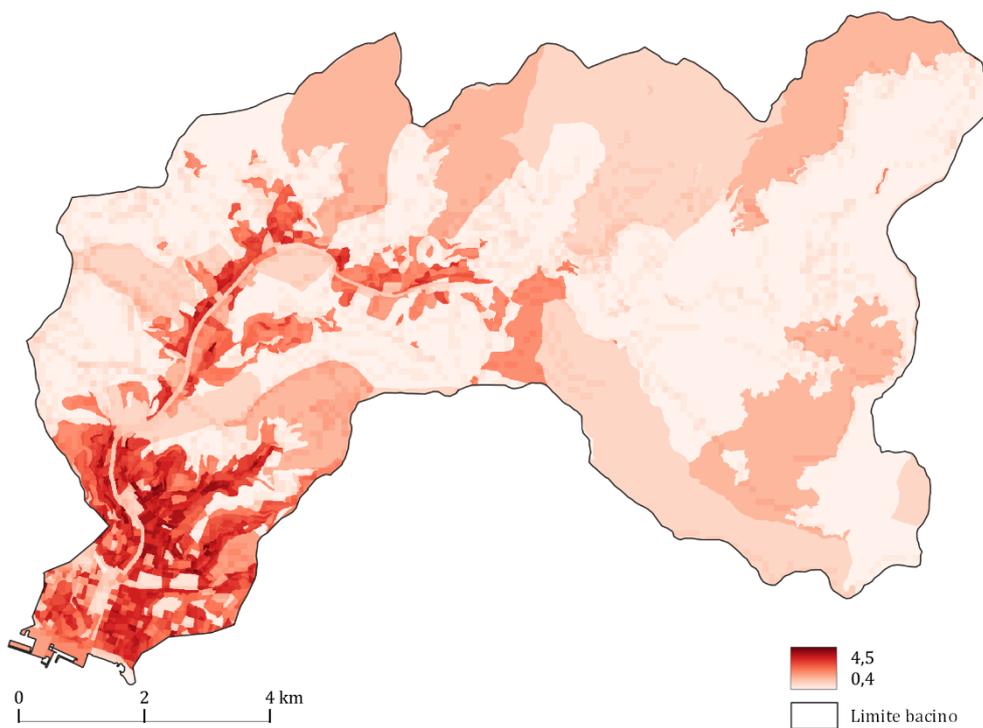
Allegato 12: Densità delle infrastrutture viarie (elaborazione propria).



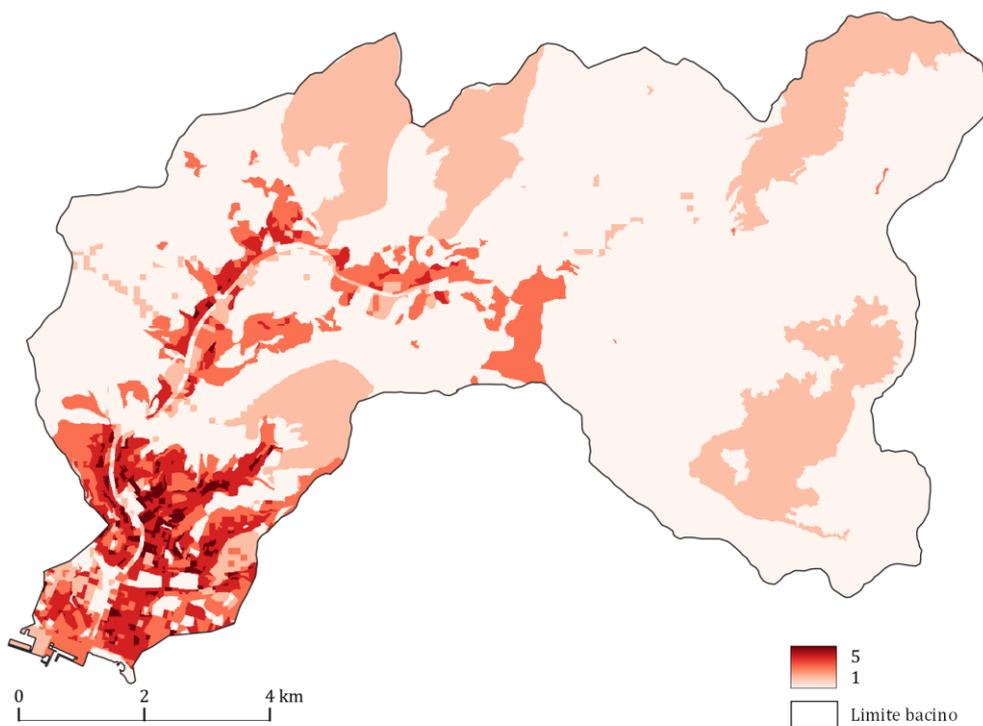
Allegato 13: Indice di pericolosità idraulica (elaborazione propria).



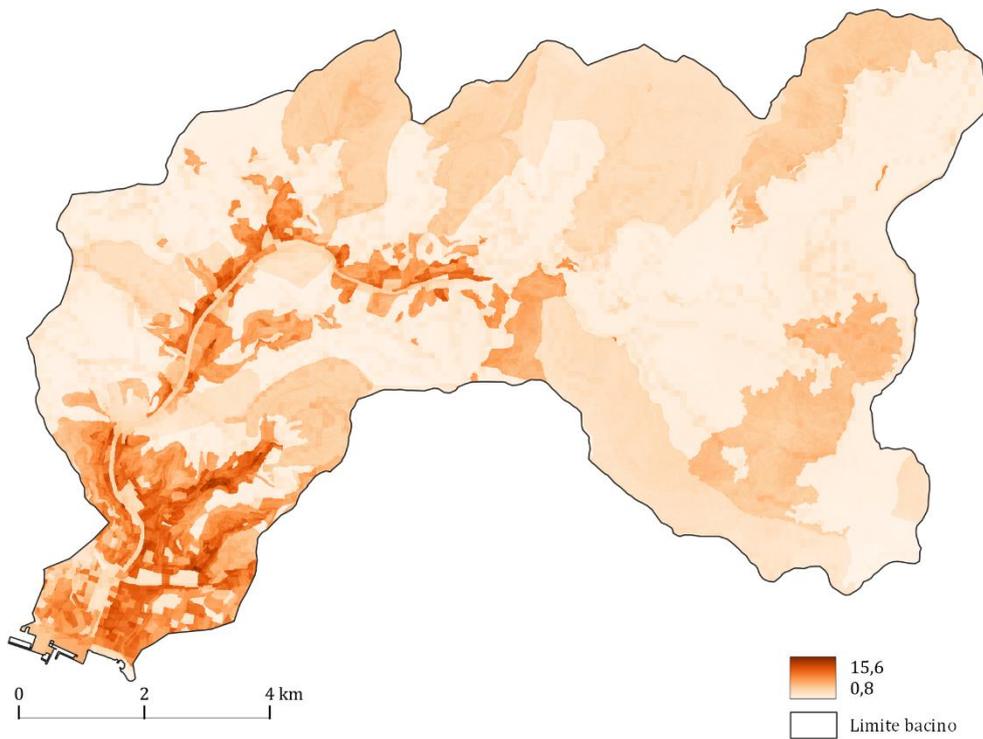
Allegato 14: Riclassificazione in cinque classi dell'indice di pericolosità idraulica (elaborazione propria).



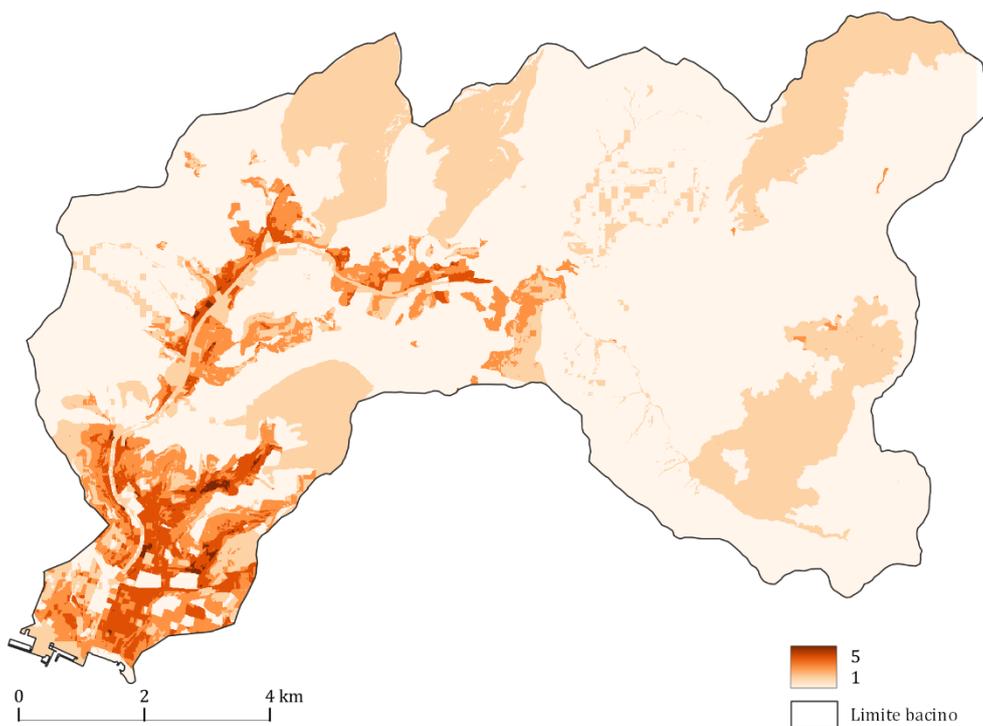
Allegato 15: Indice di vulnerabilità (elaborazione propria).



Allegato 16: Riclassificazione in cinque classi dell'indice di vulnerabilità (elaborazione propria).



Allegato 17: Indice di rischio (elaborazione propria).



Allegato 18: Riclassificazione in cinque classi dell'indice di rischio (elaborazione propria).

6. CONCLUSIONI

6.1 Considerazioni finali sul rischio idrogeologico

Il concetto di rischio ha una definizione complessa, che necessita di una scomposizione delle sue componenti per essere esplicitato. Come si è visto, il rischio si compone di tre elementi: pericolosità (H), vulnerabilità (V) e valore degli elementi esposti (W). L'attenzione di questa tesi è stata incentrata sul rischio derivante da eventi di dissesto idrogeologico; dunque, con pericolosità determinata dalla frequenza e dall'intensità dei fenomeni di dissesto e; vulnerabilità dipendente dalle caratteristiche intrinseche degli elementi esposti sul territorio, a cui è associato un certo valore. I tre fattori che compongono il rischio non sono costanti nel tempo ma, variano secondo le alterazioni degli scenari meteo-climatici e degli assetti territoriali, influenzandosi reciprocamente.

Uno degli aspetti che caratterizza maggiormente il punto di vista della pianificazione territoriale rispetto al rischio idrogeologico, è la sua dimensione fortemente territorializzata. Infatti, è proprio attraverso tale dimensione che è possibile esplicitare l'elevata complessità della geografia territoriale in cui aspetti fisici e comunitari si intrecciano tra loro generando una pluralità di relazioni verticali. Proprio per questo la pianificazione, attraverso un processo incrementale di acquisizione della conoscenza, ha il compito di comprendere la complessità di un territorio e delle dinamiche che lo caratterizzano con l'obiettivo di sviluppare strategie resilienti, per mitigare gli impatti negativi generati dai fattori di rischio e accrescere la capacità di adattamento delle comunità. Un ulteriore aspetto fondamentale è quello della temporalità, caratterizzato da due velocità: una molto veloce, tipica delle azioni di risposta all'emergenza messe in campo dalla protezione civile; l'altra molto lenta, legata alla pianificazione della ricostruzione degli elementi territoriali e degli assetti socio-economici che sono stati compromessi da un evento di dissesto; nonché alla costruzione sul lungo periodo di un sistema territoriale resiliente adattivo.

Come si è visto, per la riduzione della pericolosità è necessario avviare una strutturata attività di prevenzione nel tempo reale, anche perché è stato dimostrato che i costi di un'efficace prevenzione sono decisamente inferiori ai costi di ricostruzione in caso di danno (Albala-Bertrand, 1993; Cohen & Werker, 2008). Dunque, deve essere garantita una gestione territoriale attiva, che garantisca i servizi ecosistemici di protezione e, dove necessario, la realizzazione di opere strutturali che limitino le possibilità che l'evento si verifichi o, che vada ad interessare gli insediamenti e le persone. Questo aspetto è fondamentale soprattutto sul territorio italiano che, come si è visto, è uno dei più esposti a frane e alluvioni, all'interno del contesto europeo.

Invece, per la riduzione del danno, è compito della pianificazione e del sistema di governance territoriale, garantire che gli strumenti di regolamentazione degli usi del suolo non abbiano previsione urbanistiche in zone soggette a rischio e, ove possibile, di rilocalizzare gli insediamenti e le comunità in zone meno pericolose. Inoltre, è necessario costruire strategie che combinino principi di resistenza per la salvaguardia degli elementi strutturali e strutturanti di un territorio; nonché strategie resilienti, capaci di costruire capacità di adattamento delle comunità e del sistema economico, per la gestione dei rischi residuali, i quali possono propagarsi sul lungo periodo in seguito ad un evento calamitoso. In questo senso, il filone degli studi sulla resilienza socio-ecologica ha fornito un importante contributo per inquadrare i principi necessari alla costruzione di strategie di adattamento riassumibili in: imparare a convivere con il cambiamento e l'incertezza; coltivare un approccio aperto alla diversità nelle sue molteplici forme (economica, politica etc.); utilizzare un approccio multi-disciplinare; favorire la capacità auto-organizzativa delle comunità. Questi sono concetti generali, che è necessario calare all'interno della realtà dei singoli territori, poiché, nelle differenti geografie sinergie e conflitti di varia natura possono manifestarsi in modo differenziato, ed è necessario partire dal comprendere tali relazioni per costruire un approccio durevole, e realmente capace di affrontare eventuali crisi derivanti da calamità ambientali, e non solo.

Il territorio italiano, per la sua conformazione geomorfologica e le sue caratteristiche meteorologiche, risulta particolarmente vulnerabile a eventi di dissesto idrogeologico, i quali si ripresentano annualmente con frequenza. Dati alla mano, in Italia, il 93,3% dei comuni ricadono in aree a pericolosità idrogeologica e il 13,7% della popolazione è esposta a rischio medio-alto. L'incidenza delle superfici esposte a pericolosità da frane elevata o molto elevata e/o pericolosità idraulica media è pari al 18,4% del territorio nazionale (Trigila et al., 2021). Il dato sulla pericolosità negli ultimi anni è cresciuto notevolmente, nel confronto tra il 2018-2021 emerge una significativa crescita delle superfici esposte a pericolosità da frana elevata o molto elevata del +3,8% e di pericolosità idraulica media del +18,9%. I dati fanno emergere la significativa e diffusa necessità, su tutto il territorio nazionale, di occuparsi di prevenzione e protezione da frane e alluvioni.

Dall'analisi delle conseguenze degli eventi di dissesto idrogeologico, avvenuti in Italia tra il 1964 e il 2021, emerge in primo luogo come su un totale di circa 2.146 vittime, le frane in confronto alle inondazioni abbiano causato circa il doppio delle vittime. Mentre, se si osserva la variazione della frequenza inter-annuale delle vittime, non vi è riscontro di una tendenza univoca di crescita o decrescita inter-annuale delle vittime; quanto piuttosto, si osserva una ciclicità che si ripete con picchi di frequenza coincidenti con gli anni in cui si sono presentati uno o più eventi di dissesto a carattere estremo. Ad esempio, l'anno con la frequenza più elevata è il 1985, anno in cui si è verificato il disastro di Stava con 268 vittime. È da considerare che, all'interno del periodo cronologico analizzato, l'evoluzione del sistema legislativo e le sempre maggiori conoscenze acquisite nel campo della protezione civile e di pianificazione del territorio in campo di previsione, prevenzione e gestione dell'emergenza, hanno contribuito, pur limitatamente rispetto agli eventi estremi, a ridurre la vulnerabilità delle comunità esposte e gli scenari di pericolosità.

Lo sviluppo insediativo, soprattutto nel secondo post-guerra, non ha tenuto conto della componente del rischio, con un'urbanizzazione sregolata del fondo valle, delle aree costiere e in generale di numerose aree soggette a pericolosità idraulica e gravitativa. Ulteriormente, il progressivo spopolamento e abbandono delle aree

periferiche e interne del Paese ha comportato una sempre meno diffusa manutenzione del territorio con incremento dei fenomeni erosivi. Per di più, si aggiunge il ruolo giocato dai cambiamenti climatici, i quali determinano una variazione degli scenari di temperatura e precipitazione con una crescita nella frequenza e nell'intensità degli eventi meteorologici estremi. A quanto detto si congiunge un sistema di governance territoriale, sovente, troppo incentrato sulla risposta emergenziale ad un evento piuttosto che sull'attività di manutenzione ordinaria del territorio. Per questo insieme di ragioni, sarebbe necessaria una rimodulazione dei fondi stanziati per il contrasto del rischio idrogeologico con un incremento delle risorse dedicate alle attività di prevenzione del rischio. In questo senso, il PNRR può fornire un'importante opportunità, che non deve essere sprecata; infatti, tramite l'investimento 2.1 lo Stato italiano prevede di investire 2,49 miliardi di euro per la gestione del rischio di alluvione e per la riduzione del rischio idrogeologico.

Inoltre, come si è visto l'evoluzione legislativa in materia di prevenzione dal rischio idrogeologico, soprattutto nel contesto italiano, ma anche in quello europeo, è stata fortemente dipendente dalla spinta emotiva derivante da grandi disastri ambientali; ne sono esempi significativi: l'alluvione di Firenze e la frana di Agrigento nel 1966 a cui seguì l'istituzione della *Commissione De Marchi* e della Legge Ponte, che rendeva attraverso il D.M. 1444/68 obbligatoria la redazione dei piani regolatori comunali su tutto il territorio nazionale; l'alluvione di Sarno e Quindici nel 1998 a cui seguì il Decreto Sarno convertito con L. n. 267/1998, tramite cui si realizzò il completamento su tutto il territorio italiano delle mappe di rischio idraulico e geologico, redatte dalle Autorità di Bacino (PAI). Dunque, la logica con cui è stato costruito il quadro normativo di riferimento, soprattutto durante la seconda metà del XX secolo, è fortemente caratterizzata da una visione di breve termine, a carattere emergenziale e non improntata alla costruzione di un efficace ed efficiente sistema di prevenzione.

Questa logica di tipo emergenziale comincia ad evolversi verso una incentrata sulla prevenzione del rischio a partire dall'inizio del XXI secolo, grazie a importanti

riforme, come quella del titolo V, che inquadra la protezione civile e il governo del territorio come competenza concorrente stato regioni. Inoltre, a partire dal 2000, all'interno dell'Unione Europea ci si inizia a rendere conto che è necessario un sistema condiviso a livello comunitario, per la valutazione, la prevenzione e la gestione del rischio idrogeologico; in tal senso le direttive 2000/60/CE e 2007/60/CE rappresentano gli strumenti cardine dell'innovazione comunitaria.

Nella legislazione italiana il passaggio fondamentale è rappresentato dall'istituzione, nel 2006, del Codice dell'Ambiente, strumento che ha permesso di riunire all'interno di un unico strumento, l'insieme poco ordinato delle disposizioni legislative in materia di dissesto idrogeologico, abrogando così la maggior parte dei loro contenuti e identificando chiaramente gli strumenti in capo alle Autorità di Bacino Distrettuali quali i piani stralcio di distretto per l'assetto idrogeologico (PAI, ex l. 267/1998) e i Piani di Gestione Rischio Alluvioni (PGRA, ex direttiva alluvioni 2007/60/CE)

6.2 Considerazioni finali sul rapporto tra rischio idrogeologico e cambiamenti climatici

Obiettivo di questa tesi è stato quello di mettere in luce le evidenze scientifiche su come i cambiamenti climatici possano determinare un incremento del rischio idrogeologico e su come strategie di adattamento e mitigazione possano contribuire a compensare tale incremento.

L'IPCC tramite i rapporti AR si occupa di mettere in luce le evidenze sui cambiamenti climatici e sui loro effetti settoriali. I rapporti si concentrano sul ruolo che le attività umane giocano nell'accrescimento delle concentrazioni di gas climalteranti¹³⁶ in atmosfera e di come questi vadano a modificare gli scenari meteo climatici globali. Già dal rapporto AR5 del 2014 vengono esplicitati i Percorsi Rappresentativi di Concentrazione (RPC), tramite cui si mettono in evidenza gli scenari climatici futuri sulla base di quanto forzante radiativo in termini di W/m^2 verrà raggiunto rispetto ai livelli del 1850 per la fine del XXI secolo. Gli studi evidenziano che gli scenari attuali sono già fortemente condizionati dall'intensificarsi dei fenomeni meteorologici, e che gli effetti negativi provocati dai cambiamenti climatici hanno una distribuzione geografica fortemente diseguale, dipendente dalle condizioni socio-economiche dei differenti contesti territoriali. Il rapporto AR6 evidenzia che la temperatura media degli ultimi 20 anni è stata superiore di 0,99 °C rispetto al 1850-1900; che le concentrazioni di GHG sono le più alte degli ultimi 800.000 anni; che il livello del mare tra il 2006-2018 è cresciuto tre volte più velocemente rispetto al periodo 1901-1971; e che le attività umane hanno accelerato il processo di riduzione dei ghiacciai, della calotta artica, della copertura nevosa primaverile nell'emisfero boreale e l'acidificazione degli oceani.

Dunque, è possibile affermare che i cambiamenti climatici giochino un ruolo significativo nell'alterazione delle condizioni meteo climatiche contribuendo a variare l'equilibrio dei cicli idrici ordinari. La variazione delle caratteristiche delle

¹³⁶ L'anidride carbonica (CO₂), il metano (CH₄), l'ossido di diazoto (N₂O), l'ozono troposferico (O₃) e i gas alogenati (IPCC, 2023).

precipitazioni, dell'accumulo di neve, dell'umidità del suolo, del livello del mare, della vegetazione, degli usi del suolo hanno come conseguenza l'alterazione delle caratteristiche del deflusso; determinando un'intensificazione dei fenomeni alluvionali ed erosivi; dunque, contribuendo ad accrescere i livelli di rischio per le comunità e gli insediamenti esposti. Nel contesto italiano gli effetti dei cambiamenti climatici, combinati ad un'elevata antropizzazione delle aree perifluviali, determinano un accrescimento dei fattori di rischio per la popolazione. Ne sono dimostrazione gli ultimi 60 anni di storia in cui il costo medio dei danni da dissesto idrogeologico ha superato i due miliardi di euro ogni anno.

Gli studi evidenziano, comunque, come la previsione degli scenari pluviali futuri sia soggetta ad un certo grado di incertezza dovuto alla scarsa risoluzione spaziale dei dati e dall'assenza di serie storiche di lungo corso; per questa ragione, gli scenari futuri relativi all'intensificarsi dei fenomeni estremi, sono soggetti ad un elevato grado di incertezza. Secondo AR6 emerge, comunque, una più significativa crescita statistica degli eventi estremi, piuttosto che una loro diminuzione, da associare soprattutto ad un incremento delle temperature; inoltre, l'impoverimento della biodiversità, a causa dei cambiamenti climatici, comporta una riduzione dei servizi ecosistemici e della resilienza degli habitat, esacerbando così gli impatti, anche in condizioni di eventi atmosferici ordinari.

Numerosi studi hanno evidenziato come gli effetti dei cambiamenti climatici non riguardano solo fenomeni naturali ma, le loro ripercussioni sono ampie, anche all'interno dei differenti settori economici. In futuro si prevede un impoverimento delle risorse naturali primarie su cui la società si sostiene, con ripercussioni su importanti settori economici, come quello agro-alimentare, dei servizi, quello sanitario etc. Infatti, è importante ricordare che i cambiamenti climatici sono un fenomeno livello globale i cui effetti negativi emergono particolarmente alla scala locale.

I cambiamenti climatici, dunque, rappresentano un problema per società e ambiente perché contribuiscono ad accrescere i livelli di pericolosità, vulnerabilità e

conseguentemente di rischio. A livello globale l'*UNFCCC* (1992), il *Protocollo di Kyoto* (1997) e l'*Accordo di Parigi* (2015) sono i principali strumenti per incoraggiare gli stati membri a portare avanti politiche di mitigazione delle emissioni di GHG e di adattamento ai CC. Tali strumenti, pur avendo contribuito a ridurre in molti paesi le emissioni, hanno compensato solo parzialmente la crescita globale delle emissioni. Gli scenari futuri stimano che la temperatura superi la soglia dei +1,5 °C entro il 2030 e che rischi di superare i +2,8 °C [2,1-3,4 °C] entro la fine XXI secolo, se non vengono messi rapidamente in campo ulteriori sforzi significativi da parte degli stati.

A livello europeo vi è già dagli anni '90 un'attenzione verso le politiche di mitigazione, le quali hanno avuto un discreto successo con una riduzione tra il 1990-2022 del -31% di GHG; invece, le politiche di adattamento sono rimaste in sordina, fino ai primi anni del '2000, per timore che potessero distogliere l'attenzione politica dalla riduzione dei gas serra. Lo scenario politico europeo in materia di cambiamenti climatici cambia a partire dal 2007, con la pubblicazione del *Libro Verde* tramite cui si inizia a costruire la *strategia UE di adattamento ai cambiamenti climatici* (2013, agg. 2021). La costruzione di una politica di adattamento dell'unione europea ha uno scopo ben preciso: individuare l'UE come coordinatore per la redazione di linee guida per la costruzione di strategie e piani di adattamento a livello nazionale e regionale con il fine di favorire la coesione europea, per non lasciare indietro nessuno territorio; infatti, spesso gli effetti negativi dei CC si ripercuotono sui contesti più vulnerabili. L'adattamento è, inoltre, una questione profondamente economica poiché, come si è visto, i cambiamenti climatici producono effetti negativi diretti su differenti aspetti socio-economici e la mancata applicazione di politiche di adattamento e prevenzione può far lievitare notevolmente i costi dei danni.

A livello italiano, in attuazione della SNACC è stato previsto il PNACC, considerato come strumento guida di alta pianificazione e programmazione, con l'obiettivo di costruire un quadro di riferimento allineato tra regioni ed enti locali e fornire un supporto tecnico-decisionale agli enti territoriali nella messa in pratica di politiche, piani, strategie e azioni di adattamento. Nel PNACC si favorisce dunque un approccio *bottom-up* e *place-based* rimandando agli enti locali il compito di applicare i principi

contenuti nel piano sulla base delle proprie specificità territoriali. A partire dall'analisi delle criticità l'obiettivo del PNACC è quello di accrescere la resilienza urbana e territoriale attraverso approcci *soft* e *green*, assorbendo le minacce all'interno del sistema territoriale e trasformandole, quando possibile, in opportunità. La letteratura evidenzia come, anche per le strategie di adattamento, sia necessario un monitoraggio che tenga conto: dei processi politici istituzionali, dello stato di attuazione delle strategie, degli effetti settoriali e della loro efficacia rispetto all'obiettivo stabilito.

6.3 Considerazioni sul caso studio

Per quanto concerne la componente operativa di questo lavoro di tesi, si è scelto di riprendere il filone degli studi sul che unisce l'analisi degli indicatori di rischio tramite strumenti GIS, alla loro pesatura tramite metodologia AHP. Nella letteratura di analisi del rischio idrogeologico, questa combinazione appare sempre più strutturata, grazie alle numerose applicazioni in differenti contesti. In particolare, lo studio di Roopnarine et al. (2022) è stato utilizzato come guida per l'identificazione degli indicatori relativi alla pericolosità idraulica e alla vulnerabilità.

La scelta del contesto ligure, e nello specifico quello del Val Bisagno, è frutto di una scelta basata sulle particolari caratteristiche morfologiche e climatiche dell'area, che determinano un'elevata pressione del rischio idrogeologico sui sistemi insediativi e un'elevata vulnerabilità delle comunità. Infatti, la Liguria, dopo la Valle d'Aosta, è la seconda regione italiana per indice di mortalità da inondazioni (0,06 vittime e dispersi ogni 100.000 abitanti); inoltre, gli scenari climatici messi in evidenza dal PNACC e dalla SRACC sottolineano come in futuro il territorio regionale potrebbe diventare più vulnerabile a causa dell'incremento delle temperature, della riduzione dei giorni di pioggia e dall'intensificazione dei fenomeni estremi.

Lo studio condotto sulla Val Bisagno si rifà agli obiettivi strategici della SRACC riguardo al *Settore 8 - Dissesto idrogeologico e protezione civile*, fornendo uno strumento di supporto decisionale per migliorare il monitoraggio territoriale e la produzione di basi di dati aggiornate, integrando i risultati ottenuti con gli strumenti pianificatori al fine di costruire strategie resilienti di adattamento.

Per quanto riguarda l'indice di vulnerabilità (allegati 15, 16), la cartografia prodotta evidenzia, soprattutto nell'area urbana di Genova, un buon livello di dettaglio grazie alla dimensione ridotta delle sezioni di censimento; dettaglio che però viene perso per i nuclei insediativi di Davagna e Bargagli posti nella zona est del bacino, in cui le sezioni di censimento sono di ampie dimensioni. L'indice di pericolosità idraulica (allegati 13, 14) mette piuttosto bene in evidenza i fondovalle e le zone prossime ai corsi d'acqua come zone con un livello medio-alto di pericolosità; è da considerare

che l'indicatore che ha il peso maggiore, quello relativo alle precipitazioni, ha un andamento dei valori decrescente da monte a valle, questo giustifica gli elevati valori di pericolosità in alta quota nella zona est del bacino. Dal prodotto dei due indici di vulnerabilità e pericolosità è stato possibile ottenere la mappatura dell'indice di rischio (allegati 17, 18), tramite cui è possibile evidenziare particolarmente i differenti livelli di rischio che caratterizzano il tessuto urbano di Genova. Si ricorda che la densità abitativa è l'indicatore con il peso più elevato tra quelli di vulnerabilità e ciò si riflette nell'indice di rischio, con i valori più elevati all'interno delle sezioni di censimento più dense.

Nel confronto tra le aree alluvionate dall'evento dell'ottobre del 2014 e i valori di pericolosità stimati, si evidenzia come il modello abbia una buona capacità di stima all'interno delle aree allagate, individuando come zone a pericolosità media, elevata e molto elevata le aree che sono state allagate durante l'evento considerato e di non stimare per nessuna delle aree allagate un livello basso (classe 1). Nel confronto sull'intero bacino, tra il dato binario delle alluvioni e quello binario del modello di pericolosità emerge una buona stima dei veri positivi espressa dal *producer accuracy* ma, a causa delle profonde differenze che caratterizzano i due dati, nel confronto emerge un gran numero di pixel falsi positivi, esterni alle aree allagate. Per queste ragioni i valori dell'*user accuracy* e della *Kappa di Cohen* sono piuttosto bassi.

Producer accuracy	95,6%
User accuracy	1,9%
Probabilità mancato allarme	4,4%
Accuratezza Pr(a)	21,7%
Kappa di Cohen	0,01

Tabella 22: Coefficienti di accuratezza (elaborazione propria).

Di seguito si riportano alcune considerazioni su quali potrebbero essere le applicazioni disciplinari di questo studio e su alcuni aspetti del calcolo degli indicatori che potrebbero essere migliorati per l'applicazione del metodo in differenti contesti.

Il primo aspetto da tenere in considerazione è che tale metodologia non vuole andare a sostituire gli attuali strumenti e le zonizzazioni del rischio fornite dall'autorità di bacino; quanto piuttosto, fornire uno strumento di supporto per la pianificazione territoriale e di bacino, capace, variando la pesatura degli indicatori e integrandone di ulteriori, di cogliere le future variazioni del rischio idrologico legate ai cambiamenti climatici.

Il secondo aspetto è quello della scala nominale dei dati con cui si costruiscono gli indici di vulnerabilità e pericolosità. Migliorare la risoluzione spaziale dei dati, contribuirebbe a creare indicatori più dettagliati, capaci di cogliere più dettagliatamente le relazioni verticali che insistono sul territorio. Inoltre, concentrare l'analisi nell'area geografica in cui si evidenziano i valori più elevati di vulnerabilità, a fronte di un buon livello di dettaglio dei dati in uso, può contribuire a migliorare la capacità predittiva del modello. In tal senso, lo sviluppo di un sempre più ampio sistema di distribuzione degli *open-data*, in Italia soprattutto attraverso i geoportali regionali, contribuirà in futuro a rendere questo filone di modelli per la stima del rischio più affidabili. Inoltre, in questa tesi si è scelto di riproporre la pesatura degli indicatori proposta da Roopnarine et al. (2022) ma, in ulteriori e future applicazioni di questa metodologia sarebbe opportuno rivedere la pesatura degli indicatori in funzione delle caratteristiche del luogo che si sta studiando. In tal senso, se si dovesse rivedere la pesatura degli indicatori utilizzati in questa analisi, sarebbe sicuramente da ricalibrare il peso dei fattori meteorologici e di quelli morfologici, con l'obiettivo di far risaltare come zona maggiormente esposta alle inondazioni torrentizie quella della piana alluvionale su cui si sviluppa la città di Genova, dove storicamente si sono verificati gli allagamenti più rilevanti. Utilizzare come pesature di riferimento quelle di ulteriori casi studio può essere utile per stabilire un punto di partenza, che può anche essere utilizzato come benchmark di riferimento, per lo sviluppo di un modello calato specificatamente sulle caratteristiche territoriali.

Il terzo aspetto da considerare è quello della capacità del modello di prefigurare degli scenari di rischio per le previsioni urbanistiche non attuate sul territorio.

Infatti, tale metodologia permetterebbe di individuare, a priori, il livello di rischio di una nuova zona urbana ricalcolando l'indice di vulnerabilità in funzione della nuova densità insediativa e quello di pericolosità sulla base della variazione dei parametri di deflusso del suolo per l'area in analisi. Dunque, questo strumento potrebbe essere utilizzato anche durante la fase di analisi preliminare, all'interno del processo di costruzione dei piani territoriali alle differenti scale, fornendo un'indicazione della compatibilità delle previsioni urbanistiche e delle strategie individuate sul territorio con gli scenari di pericolosità, vulnerabilità e rischio potenziale.

Il quarto aspetto che emerge è quello della natura multidisciplinare della pianificazione territoriale. Infatti, in questo studio, sono stati presi in considerazione una serie di indicatori di pericolosità afferenti a diversi settori delle scienze idrauliche, metereologiche, geologiche e ambientali, combinati con gli indicatori di vulnerabilità affini alla pianificazione urbana e territoriale. A tal proposito, si evidenzia, dunque, come in ambito istituzionale e professionale, la costruzione di un gruppo di lavoro multidisciplinare sia un aspetto di fondamentale nella valutazione della complessità del rischio; in particolare, il contributo di più ambiti disciplinari può contribuire a modificare in corso d'opera la costruzione di un modello di stima del rischio, secondo le criticità e le peculiarità evidenziate da diversi settori scientifici, con il fine di migliorarne la capacità predittiva.

Infine, l'ultimo aspetto da tenere in considerazione, quando si costruisce un modello che vuole simulare scenari reali, è quello relativo alla validazione dei risultati stimati. Per compiere tale operazione, è necessario disporre di alcuni scenari significativi di allagamento relativi ad eventi passati, che permettano di effettuare un confronto tra l'estensione delle aree allagate e il livello di pericolosità stimato dal modello al fine di costruire la matrice di confusione e procedere con una valutazione statistica dei risultati come nel caso della Kappa di Cohen.

6.4 Considerazioni sugli impatti dei cambiamenti climatici sulla pianificazione

Stabilire a priori quali possono essere le conseguenze dei cambiamenti sul sistema di pianificazione è un'operazione soggetta ad un elevato grado di incertezza, poiché tali impatti dipenderanno fortemente dalla capacità di contenere a livello globale il surriscaldamento terrestre entro un gradiente di +1,5 °C e di costruire un'elevata capacità di resilienza dei territori e delle comunità. Ciò di cui si può star certi è che i cambiamenti climatici, i cui effetti negativi crescono al crescere del gradiente di temperatura, hanno già un impatto sul territorio, riducendo la capacità di adattamento, incrementando la vulnerabilità delle comunità, specie quelle più fragili e accrescendo i fattori di rischio. In questo scenario la pianificazione gioca un ruolo fondamentale, poiché ad essa è demandato il compito di costruire un sistema territoriale e socio-economico resiliente rispetto ai rischi esacerbati dai cambiamenti climatici; compito che può essere portato a termine solo tramite un'attenta attività di prevenzione e mitigazione del rischio. La pianificazione deve dunque mettersi in prima fila e farsi portavoce della lotta ai cambiamenti climatici, poiché è proprio sul territorio che si esplicitano le implicazioni negative dei cambiamenti climatici. In tal senso, la natura multidisciplinare della pianificazione può costituire un'importante opportunità per integrare, all'interno dei processi di costruzione dei piani, una quanto più ampia conoscenza degli elementi e delle relazioni che insistono sul territorio. L'obiettivo è di costruire una coscienza tecnica, che sia consapevole degli scenari di rischio che possono interessare il territorio e dal fatto che tali scenari sono fortemente influenzati dalla capacità, a livello globale di rallentare e contenere il riscaldamento del pianeta, alla scala locale di mitigare i rischi dei cambiamenti climatici e di costruire delle strategie di adattamento realmente capaci di incrementare la resilienza territoriale. Integrare maggiormente gli scenari di rischio legati ai cambiamenti climatici all'interno dei piani regolatori comunali, potrebbe essere un importante passaggio per raccordare la coerenza e la staticità del piano che disciplina gli usi del suolo con strumenti strategici, che

indirizzino qualitativamente le nuove trasformazioni, specialmente quelle strutturalmente più rilevanti per il futuro della città, verso la produzione di contesti urbani maggiormente capaci di essere resilienti ai principali effetti negativi generati dai cambiamenti climatici in ambiente urbano, come ondate di calore e alluvioni. Infatti, è al piano che deve essere demandato il compito di costruire una città resiliente. Senza un indirizzo strategico unitario le singole progettualità rischiano di diventare solo degli hotspot all'interno del tessuto urbano, e la città consolidata rischierebbe di trovarsi svantaggiata se non inserita anch'essa all'interno della strategia.

7. BIBLIOGRAFIA

7.1 Libri, riviste articoli e scientifici

- Adger, W. N., Hughes, T. P., Folke, C., Carpenter, S. R., & Rockstrom, J. (2005). Social-ecological resilience to coastal disasters. *Science*, 309(5737), 1036-1039.
- Agenzia nazionale per la protezione dell'ambiente. (2001). *Atlante delle opere di sistemazione dei versanti*. ANPA. Dipartimento rischio tecnologico e naturale. Unità interdipartimentale rischio idrogeologico.
- Agenzia nazionale per la protezione dell'ambiente. (2003). *Atlante delle opere di sistemazione fluviale*. APAT.
- Albala-Bertrand, J. M. (1993). *Political economy of large natural disasters: with special reference to developing countries*. Oxford University Press.
- Alberti, M., Marzluff, J. M., Shulenberger, E., Bradley, G., Ryan, C., & Zumbrunnen, C. (2003). Integrating humans into ecology: opportunities and challenges for studying urban ecosystems. *BioScience*, 53(12), 1169-1179.
- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G.,... & Vazquez-Aguirre, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5).
- Allan, C., Xia, J., & Pahl-Wostl, C. (2013). Climate change and water security: challenges for adaptive water management. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(6), 625-632.
- Allan, R. P., & Soden, B. J. (2008). Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 321(5895), 1481-1484.
- ARPAL (2012): *Genova 4-9 novembre 2011. Rapporto di evento meteo-idrologico. Quaderni ARPAL n. 2/2012*. ISBN 978-88-95470-38-2

- Arrow, K. J., & Lind, R. C. (1978). Uncertainty and the evaluation of public investment decisions. In *Uncertainty in economics* (pp. 403-421). Academic Press.
- Aryal, S. K., Bates, B. C., Campbell, E. P., Li, Y., Palmer, M. J., & Viney, N. R. (2009). Characterizing and modeling temporal and spatial trends in rainfall extremes. *Journal of Hydrometeorology*, *10*(1), 241-253.
- Ayyub, B. M., Beach, J. E., Sarkani, S., & Assakkaf, I. A. (2002). Risk analysis and management for marine systems. *Naval Engineers Journal*, *114*(2), 181-206.
- Azzari, M., & Andreani, G. (2008). Tecniche GIS per lo studio dei territori a rischio. In *Acqua, risorsa e bene culturale. Sistemi Informativi Geografici per il monitoraggio, la gestione e la tutela delle acque* (pp. 1-15). Kinzica.
- Balubaid, M., & Alamoudi, R. (2015). Application of the analytical hierarchy process (AHP) to multi-criteria analysis for contractor selection. *American journal of industrial and business management*, *5*(09), 581.
- Benedetti Cecchi, L., Airoidi, L., & Frascchetti, S. (2008). BIORES-Resistenza e resilienza della biodiversità costiera agli effetti sinergici di cambiamenti ambientali su scala locale e globale.
- Berkes, F. (2007). Understanding uncertainty and reducing vulnerability: lessons from resilience thinking. *Natural hazards*, *41*, 283-295.
- Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (Eds.). (2008). *Navigating social-ecological systems: building resilience for complexity and change*. Cambridge university press.
- Bianchi, C., & Salvati, P. (2022). Rapporto Periodico sul Rischio posto alla Popolazione italiana da Frane e Inondazioni. *Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (IRPI). Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)*. Available at: polaris.irpi.cnr.it (Accessed July 20, 2022).
- Bignami, D. F. (2010). *Protezione civile e riduzione del rischio disastri. Metodi e strumenti di governo della sicurezza territoriale e ambientale*. Maggioli Editore.

- Bijma, J., Pörtner, H. O., Yesson, C., & Rogers, A. D. (2013). Climate change and the oceans—What does the future hold? *Marine pollution bulletin*, 74(2), 495-505.
- Boberg, F., Berg, P., Thejll, P., Gutowski, W. J., & Christensen, J. H. (2010). Improved confidence in climate change projections of precipitation further evaluated using daily statistics from ENSEMBLES models. *Climate dynamics*, 35, 1509-1520.
- Brunetti, M., Buffoni, L., Mangianti, F., Maugeri, M., & Nanni, T. (2004). Temperature, precipitation and extreme events during the last century in Italy. *Global and planetary change*, 40(1-2), 141-149.
- Bulkeley, H., & Betsill, M. M. (2005). *Cities and climate change: urban sustainability and global environmental governance* (Vol. 4). Psychology Press.
- Canale, S., Fabiano, C., & Leonardi, S. (1998). *Il concetto di rischio e gli ambiti applicativi dell'analisi del rischio. Istituto strade ferrovie aeroporti*.
- Canale, S., Leonardi, S., & Nicosia, F. (2014) *Definizione di un indice di performance per caratterizzare il livello di pericolosità delle infrastrutture stradali*.
- Cassola, F., Iengo, A., & Turato, B. (2023). Extreme convective precipitation in Liguria (Italy): a brief description and analysis of the event occurred on October 4, 2021. *Bulletin of Atmospheric Science and Technology*, 4(1), 4.
- Castellari, S., Venturini, S., Giordano, F., Denti, A. B., Bigano, A., Bindi, M., ... & Vurro, M. (2014). Elementi per una Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici.
- Cazzuola, U., (1998). *Gli interventi a favore della popolazione*, in Insedimenti di Emergenza in Umbria e Marche – Crisi sismica 1997-1998, Dipartimento della Protezione Civile.
- Charlesworth, S. M., Harker, E., & Rickard, S. (2003). *A review of sustainable drainage systems (SuDS): A soft option for hard drainage questions?* *Geography*, 99-107.

- Cherubini, C., Orlando, G., Reina, A., & Torre, C. M. (2006). La sinergia tra analisi multicriteriale (AMC) e GIS nella valutazione del rischio di esondazione: Il bacino della lama Baronale-Picone (Ba). *Giornale di geologia applicata*, 3, 109-113.
- Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., ... & Whetton, P. (2007). Regional climate projections. Chapter 11.
- Cohen, C., & Werker, E. D. (2008). The political economy of "natural" disasters. *Journal of Conflict Resolution*, 52(6), 795-819.
- Colucci, A. (2012). *Le città resilienti: approcci e strategie*. Università, Polo interregionale di eccellenza Jean Monnet.
- Dansero, E., Pettenati, G., & Toldo, A. (2014). Alimentare la resilienza urbana: nuove prospettive verso un'agenda locale del cibo. In *Resilienza/Resilience* (Vol. 12, pp. 117-120). Società di Studi Geografici.
- Dash, P., & Sar, J. (2020). Identification and validation of potential flood hazard area using GIS-based multi-criteria analysis and satellite data-derived water index. *Journal of Flood Risk Management*, 13(3), e12620.
- Dauphiné, A., & Provitolo, D. (2013). *Risques et catastrophes: observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Armand Colin.
- Davide M., Giannini V., Venturini S., Castellari S. (2013). *Questionario per la Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici: elaborazione dei risultati*. Rapporto per il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Roma.
- DeGaetano, A. T. (2009). Time-dependent changes in extreme-precipitation return-period amounts in the continental United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(10), 2086-2099.
- Dei Cas L., Trigila A., Iadanza C. (eds) *Linee Guida per il monitoraggio delle frane. Linee Guida SNPA 32/2021*

- Di Lascio F., (2004), *La protezione civile nella legislazione successiva alla riforma del titolo V*, *Giornale di diritto amministrativo* n. 4/2004.
- Etkin, D., Haque, E., Bellisario, L., & Burton, I. (2004). *An assessment of natural hazards and disasters in Canada: A report for decision-makers and practitioners*. The Canadian Natural Hazards Assessment Project.
- Fedeski, M., & Gwilliam, J. (2007). Urban sustainability in the presence of flood and geological hazards: The development of a GIS-based vulnerability and risk assessment methodology. *Landscape and urban planning*, 83(1), 50-61.
- Folke, C., Colding, J., & Berkes, F. (2003). Synthesis: building resilience and adaptive capacity in social-ecological systems. *Navigating social-ecological systems: Building resilience for complexity and change*, 9(1), 352-387.
- Gallozzi P.L. et al. (2020); *ReNDiS 2020 La difesa del suolo in vent'anni di monitoraggio ISPRA sugli interventi per la mitigazione del rischio idrogeologico - Edizione 2020. ISPRA, Rapporti 328/2*
- Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). *Landslides in a changing climate. Earth-Science Reviews*, 162, 227-252.
- Gisotti, G. (2012). *Il dissesto idrogeologico. Previsione, prevenzione e mitigazione del rischio*. Dario Flaccovio Editore.
- Giuseppe, M., Parise, M., Damiano, V., Giovanna, C., Claudia, M., Dario, P., & Veronica, T. (2020). Le frane connesse agli incendi boschivi: stato dell'arte e sviluppi futuri della ricerca anche alla luce dei cambiamenti climatici. *GEOLOGIA DELL'AMBIENTE*, 1(suppl.), 137-143.
- Hegerl, G. C., Zwiers, F. W., Braconnot, P., Gillett, N. P., Luo, Y., Orsini, J. A. M., ... & Planton, S. (2007). Understanding and attributing climate change. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M.

Marquis, KB Averyt, M. Tignor and HL Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC, 2023: Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Kamiguchi, K., Kitoh, A., Uchiyama, T., Mizuta, R., & Noda, A. (2006). Changes in precipitation-based extremes indices due to global warming projected by a global 20-km-mesh atmospheric model. *Sola*, 2, 64-67.

Khosravi, K., Nohani, E., Maroufinia, E., & Pourghasemi, H. R. (2016). A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: a comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multi-criteria decision-making technique. *Natural hazards*, 83, 947-987.

- Klostermann, J., van de Sandt, K., Harley, M., Hildén, M., Leiter, T., van Minnen, J., ... & van Bree, L. (2018). Towards a framework to assess, compare and develop monitoring and evaluation of climate change adaptation in Europe. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 23, 187-209.
- Kundzewicz, Z.W., L.J. Mata, N.W. Arnell, P. Doll, P. Kabat, B. Jimenez, K.A. Miller, T. Oki, Z. Sen, and I.A. Shiklomanov, 2007: Freshwater resources and their management. In: Climate Change 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Parry, M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. Van Der Linde, and C.E. Hanson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 173-210.
- Lai, F. (2020). Antropocene; per un'antropologia dei mutamenti socio ambientali, *Antropocene*, 1-16.
- Lamhauge, N., Lanzi, E., & Agrawala, S. (2012). Monitoring and evaluation for adaptation: lessons from development co-operation agencies.
- Lenderink, G., & Van Meijgaard, E. (2008). Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience*, 1(8), 511-514.
- Lucantoni, A., Bosi, V., Brammerini, F., De Marco, R., Lo Presti, T., Naso, G., & Sabetta, F. (2001). Il rischio sismico in Italia. *Ingegneria Sismica*, 1(2001), 5-36.
- Lunardi, G., Cassani, G., Gatti, M., Spigarelli, B., & Zenti, C. L. (2020). Resilient city: The case of Bisagno diversion tunnel. *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art; Peila, D., Viggiani, G., Celestino, T., Eds*, 5159-5169.
- Manzo, G. (2010). Applicazioni di tecniche GIS e modelli di suscettibilità per la previsione del rischio da frana a scala regionale.

- Mazzorana, B. (2011). *Strumenti e concetti per strutturale l'analisi di pericolosità idraulica*. Workshop pericolosità idraulica nel territorio montano italiano ed applicazione della direttiva europea "alluvioni". Ripartizione opere idrauliche, Provincia autonoma di Bolzano, Italia, p. 28.
- Milli, S., & Prestininzi, A. (2015). *Il dissesto idrogeologico*.
- Molinari, D., De Bruijn, K., Castillo, J., Aronica, G. T., & Bouwer, L. M. (2017). validation of flood risk models: current practice and innovations. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1-18.
- Monacelli, G., & Spiniello, O. (2018). *Esperienze italiane sul Dissesto Idrogeologico tra Normativa ed Attuazione*. *GEOmedia*, 22(4).
- Paliaga, G., Luino, F., Turconi, L., Marincioni, F., & Faccini, F. (2020). Exposure to Geo-hydrological hazards of the Metropolitan area of Genoa, Italy: A Multi-Temporal analysis of the Bisagno Stream. *Sustainability*, 12(3), 1114.
- Pepe, V., (1993). *La nuova Protezione Civile in Italia*, Università degli Studi di Salerno, ELEA PRESS, "I Tribunali Amministrativi Regionali", n. 10, Roma.
- Peterson, T. C., & Manton, M. J. (2008). Monitoring changes in climate extremes: a tale of international collaboration. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(9), 1266-1271.
- Prestininzi A., *Editoriali*, «*Italian journal of engineering geology and environment*», (2005-2013). www.ijege.uniroma1.it/rivista.
- Rayner, T., & Jordan, A. (2016). Climate change policy in the European Union. In *Oxford research encyclopedia of climate science*.
- Reilly, J., Tubiello, F., McCarl, B., Abler, D., Darwin, R., Fuglie, K., ... & Rosenzweig, C. (2003). US agriculture and climate change: new results. *Climatic Change*, 57, 43-67.
- Remling, E. (2018). Depoliticizing adaptation: A critical analysis of EU climate adaptation policy. *Environmental Politics*, 27(3), 477-497.

- Rezvani, S. M., Falcão, M. J., Komljenovic, D., & de Almeida, N. M. (2023). A Systematic Literature Review on Urban Resilience Enabled with Asset and Disaster Risk Management Approaches and GIS-Based Decision Support Tools. *Applied Sciences*, *13*(4), 2223.
- Rimba, A. B., Setiawati, M. D., Sambah, A. B., & Miura, F. (2017). Physical flood vulnerability mapping applying geospatial techniques in Okazaki City, Aichi Prefecture, Japan. *Urban Science*, *1*(1), 7.
- Rojas-Downing, M. M., Nejadhashemi, A. P., Harrigan, T., & Woznicki, S. A. (2017). Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate risk management*, *16*, 145-163.
- Roopnarine, C., Ramlal, B., & Roopnarine, R. (2022). A Comparative Analysis of Weighting Methods in Geospatial Flood Risk Assessment: A Trinidad Case Study. *Land*, *11*(10), 1649.
- Saaty, T. (1980, November). The analytic hierarchy process (AHP) for decision making. In *Kobe, Japan* (Vol. 1, p. 69).
- Seejata, K., Yodying, A., Wongthadam, T., Mahavik, N., & Tantanee, S. (2018). Assessment of flood hazard areas using analytical hierarchy process over the Lower Yom Basin, Sukhothai Province. *Procedia engineering*, *212*, 340-347.
- Selin, H., & VanDeveer, S. D. (2015). Broader, deeper and greener: European Union environmental politics, policies, and outcomes. *Annual review of environment and resources*, *40*, 309-335.
- Stott, P. A., Gillett, N. P., Hegerl, G. C., Karoly, D. J., Stone, D. A., Zhang, X., & Zwiers, F. (2010). Detection and attribution of climate change: a regional perspective. *Wiley interdisciplinary reviews: climate change*, *1*(2), 192-211.
- Tanca, M. (2017). L'Egitto a Vienna: la geografia del Flauto magico di Mozart. *SCIENZE GEOGRAFICHE*, 214-253.

- Torre, C. M., Reina, A., Selicato, F., & Orlando, G. (2005). *Valutazione del rischio a pianificazione territoriale: approcci multicriteriali e gis-based per la valutazione del danno potenziale*. Valutazione del rischio a pianificazione territoriale, 1000-1020.
- Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Solden, and P. Zhai, (2007). Observations: Surface and atmospheric climate change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, pp. 235-336.
- Trigila, A., & Iadanza, C. (2007). *Statistiche nazionali ed elaborazioni dati del Progetto IFFI. APAT (2007), Rapporto sulle frane in Italia. Il Progetto IFFI: metodologia, risultati e rapporti regionali*. Rapporti, 78, 2007.
- Trigila, A., & Iadanza, C. (2018). *Assetto del territorio e difesa del suolo. Rivista giuridica del Mezzogiorno*, 32(4), 1053-1066.
- Trigila, A., Iadanza C., Lastoria B., Bussetini M., Barbano A. (2021) *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio - Edizione 2021*. ISPRA, Rapporti 356/2021
- Turco, A. (2015). Ontologia della territorialità: diciottesima contraddizione del capitalismo. *Bollettino della Società Geografica Italiana*, 4.
- Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., ... & Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the national academy of sciences*, 100(14), 8074-8079.

- Verde, S., Reale, D., Pauciullo, A., Sansosti, E., & Fornaro, G. (2022, June). Spaceborne SAR remote sensing for hydrogeological risk monitoring. In *2022 IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)* (pp. 448-453). IEEE.
- Wang, J., & Zhang, X. (2008). Downscaling and projection of winter extreme daily precipitation over North America. *Journal of Climate*, *21*(5), 923-937.
- Ward, K., Lauf, S., Kleinschmit, B., & Endlicher, W. (2016). Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers. *Science of the Total Environment*, *569*, 527-539.
- Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., & Shaffer, P. (2007). *The SUDS manual* (Vol. 697). London: Ciria.

7.2 Sitografia

[12 novembre, tre anni dalla storica acqua alta a Venezia: i video \(ilmeteo.net\)](#)

[2 maggio 2023 - Frane e piene in Emilia-Romagna orientale \(cnr.it\)](#)

[5.4 affrontare i cambiamenti climatici attraverso l'adattamento e la mitigazione — Inglese \(europa.eu\)](#)

[2007-2021: quindici anni di frane e inondazioni in Italia \(cnr.it\).](#)

[Alluvione a Genova \(cnr.it\)](#)

[Alluvione a Lentigione, Brescello \(PR\) \(cnr.it\)](#)

[Alluvione a Livorno \(cnr.it\)](#)

[Alluvione a Senigallia \(cnr.it\)](#)

[Alluvione del Friuli 1965 - CeRVEnE](#)

[Alluvione di Benevento del 15 ottobre 2015 - Wikipedia](#)

[Alluvione di Bitti \(NU\) \(cnr.it\)](#)

[Alluvione di Genova del 9 e 10 ottobre 2014 - Wikipedia](#)

[Alluvione in Liguria e Piemonte \(cnr.it\)](#)

[Alluvione in Sicilia \(cnr.it\)](#)

[Alluvione nel Gargano, un morto e un disperso - La Stampa](#)

[Alluvione nelle Marche \(cnr.it\)](#)

[AMBIENTE IN LIGURIA: METEO \(regione.liguria.it\)](#)

[Atlante climatico della Liguria.pdf \(arpal.liguria.it\)](#)

[CFDUmbria RapportoEvento Nov2013.pdf \(cfumbria.it\)](#)

[Cinquanta anni di frane e inondazioni in Italia \(1964 - 2013\) \(cnr.it\)](#)

[CLASSIFICATION OF ACCURACY ASSESSMENT.pdf \(dspmuranchi.ac.in\).](#)

[Data classification methods—ArcGIS Pro | Documentation](#)

[DRMKC Risk Data Hub \(europa.eu\)](#)

[EmiliaRomagna Meteo - 11-13 maggio 2019, una fase di forte maltempo in Emilia Romagna](#)

[Evento alluvionale 2-3 ottobre 2020 in Piemonte: analisi meteorologica ed idraulica preliminare — Arpa Piemonte](#)

[Evento alluvionale in Piemonte \(cnr.it\) \(1994\)](#)

[Evento alluvionale in Piemonte \(cnr.it\) \(1968\)](#)

[Frana a Ischia: sette le vittime accertate, 5 i dispersi. Disposto lo stato di emergenza - Notizie - Ansa.it](#)

[FRANE E PIENE IN EMILIA-ROMAGNA ORIENTALE \(16-17 MAGGIO 2023\) \(cnr.it\)](#)

[Gazzetta Ufficiale](#)

[IFFI - Inventario dei fenomeni franosi in Italia — Italiano \(isprambiente.gov.it\)](#)

[Il disastro di Stava \(cnr.it\)](#)

[Il disastro di via Digione a Genova \(cnr.it\)](#)

[Il Patto dei Sindaci per il Clima e l'Energia — GELSO - GESTione Locale per la SOstenibilità ambientale \(isprambiente.it\)](#)

[Implement the suitability modeling workflow—ArcGIS Pro | Documentation](#)

[Indici demografici e Struttura popolazione Liguria \(tuttitalia.it\)](#)

[Inondazioni e frane nel nord Italia \(cnr.it\)](#)

[ISPRA: Idrologia, Idromorfologia, Risorse Idriche, Inondazioni e Siccità \(isprambiente.gov.it\)](#)

[L'alluvione di Sarno e Quindici | Dipartimento della Protezione Civile](#)

[L'Istituto — Italiano \(isprambiente.gov.it\)](#)

[Le alluvioni del Novembre 1966 \(cnr.it\)](#)

[Le alluvioni di dicembre: la mappatura delle aree allagate e la stima del quantitativo di acqua - CIMA Research Foundation \(cimafoundation.org\)](#)

[Linee guida per il monitoraggio delle frane | SNPA - Sistema nazionale protezione ambiente \(snpambiente.it\)](#)

[List of EMS Rapid Mapping Activations | COPERNICUS EMERGENCY MANAGEMENT SERVICE](#)

[Maltempo in Italia \(cnr.it\)](#)

[Maltempo. Rotta Panaro del 6 dicembre 2020: rimborsi al 100% per i danni subiti da cittadini e imprese dei Comuni di Nonantola, Campogalliano, Castelfranco Emilia e Modena. Bonaccini-Priolo: “Un risultato importante raggiunto grazie al grande lavoro di squadra con il Governo e gli enti locali” — Emilia-Romagna Notizie \(regione.emilia-romagna.it\)](#)

[Microsoft Word - R.I. 876 Alluvione di Crotone 21 nov. 2020 \(cnr.it\)](#)

[Misure per la mitigazione del rischio idrogeologico — Italiano \(isprambiente.gov.it\)](#)

[Mitigazione dei cambiamenti climatici: ridurre le emissioni \(europa.eu\)](#)

[Nimbus Web Eventi Meteorologici](#)

[Nubifragi e colate di fango Sicilia 22/23 Ottobre 2021 | Rete Meteo Amatori](#)

[Piano di gestione del rischio di alluvioni - secondo ciclo — Ambiente \(regione.emilia-romagna.it\)](#)

[PIANO GESTIONE RISCHIO ALLUVIONI – AUTORITÀ DI BACINO DISTRETTUALE DELL'APPENNINO SETTENTRIONALE](#)

[PSFF – PAI \(adbpo.it\)](#)

[Pubblicato il Rapporto annuale 2020 \(cnr.it\)](#)

[Quaderni, serie III, n. 6 - Carta Geologica d'Italia - 1:50.000 \(isprambiente.gov.it\)](#)

[Rapporto dissesto idrogeologico italia ispra 356 2021 finale web.pdf \(isprambiente.gov.it\)](#)

[ReNDiS - Repertorio Nazionale degli interventi per la Difesa del Suolo — Italiano \(isprambiente.gov.it\)](#)

[Report | Annuario dei Dati Ambientali \(isprambiente.it\)](#)

[Report evento 14 settembre 2015 \(regione.emilia-romagna.it\)](#)

[Report: tutti i danni e i dati dell'alluvione nel Gargano nel 2014 \(FOTO\) | Stato Quotidiano](#)

[Rieti, Piana reatina allagata: esposto su eventuali responsabilità \(ilmessaggero.it\)](#)

[Toscana, vite in emergenza: cosa resta dopo l'alluvione \(la7.it\)](#)