

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale



POLITECNICO
MILANO 1863

**La definizione di scenari di rischio alluvione nella
pianificazione di protezione civile.**

Un caso di studio in Sicilia

Relatore: Prof. Giovanni Menduni

Correlatore: Prof. Daniele Bignami

Tesi di laurea di:

Alessandro Piazzì 897285

Anno accademico 2018/2019

RINGRAZIAMENTI

INDICE DELLE FIGURE.....	VI
INDICE DELLE TABELLE	XI
SOMMARIO	XII
ABSTRACT	XIV
1 INTRODUZIONE	1
2 OGGETTO E FINALITÀ DELLA TESI.....	3
3 IL RISCHIO ALLUVIONALE.....	5
3.1 Definizione e classificazione delle alluvioni	6
3.2 Le alluvioni in Italia.....	9
4 LA MAPPATURA DEL RISCHIO IN ITALIA.....	13
4.1 Cenni storici sulla normativa	13
4.2 Il PAI e il PGRA.....	15
4.3 Gli strumenti di pianificazione: le mappe di pericolosità e le mappe di rischio...	17
4.4 Limiti delle mappe di pericolosità	24
4.5 Introduzione di una nuova metodologia: l'analisi di suscettività	25
5 L'ANALISI DI SUSCETTIVITÀ	28
5.1 Metodologia dell'analisi di suscettività	28
5.2 Analisi di suscettività in Italia e nel mondo: aree di interesse e metodi utilizzati	30
5.3 PON – Governance	31
5.4 Fattori predisponenti utilizzati	34
5.5 Scelta del metodo: Weight Of Evidence (WOE)	37
6 CASO DI STUDIO: LA REGIONE SICILIANA	39
6.1 Storia delle normative nella Regione Siciliana.....	39
6.2 Criteri adottati per la produzione delle mappe di pericolosità.....	42

6.3	Eventi alluvionali nella Regione Siciliana.....	46
6.4	Casi di studio comunali.....	47
6.4.1	Lentini.....	48
6.4.2	Messina.....	54
7	PREDISPOSIZIONE AL MODELLO.....	59
7.1	Individuazione di Unità Territoriali Omogenee.....	59
7.2	Base dei dati utilizzati nella suscettività da alluvione	68
7.2.1	Il modello digitale del terreno e il reticolo idrografico	68
7.2.2	Eventi alluvionali.....	71
7.3	Fattori predisponenti	73
7.3.1	Pendenza.....	73
7.3.2	Quota relativa	75
7.3.3	Distanza euclidea.....	77
1.1.1	Curve-Number	79
7.4	Pesi attribuiti ai fattori predisponenti.....	81
7.5	Produzione delle mappe di suscettività da alluvione	84
7.6	Discussione dei risultati	87
7.7	Proposta di concettualizzazione	94
7.8	Quota relativa.....	99
7.9	Produzione della seconda mappa di suscettività per il comune di Lentini	103
7.10	Produzione della seconda mappa di suscettività per il comune di Messina	105
7.11	Validazione del modello	107
8	RISULTATI.....	109
8.1	Confronto tra la mappa di suscettività e la mappa di pericolosità	109
8.1.1	Comune di Lentini.....	110
8.1.2	Comune di Messina	115

9	CONCLUSIONE E SVILUPPI FUTURI.....	121
	Bibliografia.....	123

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Numero di disastri classificati per tipologia dal 1998 al 2017, CRED, UNISDR,2018	5
Figura 2. Alluvione Myanmar 2008	8
Figura 3. Alluvione in Olanda nel 1953	8
Figura 4. Crollo della diga Banqiao in Cina	9
Figura 5. Atlante delle alluvioni in Italia dal 1950 ad oggi	12
Figura 6. Suddivisione del territorio italiano in Autorità di bacino (sinistra) e in distretti idrografici (destra)	15
Figura 7. Mappe di pericolosità in Italia per i tre differenti scenari ad alta (P3), media (P2) e bassa pericolosità(P1)	20
Figura 8. Matrice del rischio per il reticolo principale	23
Figura 9. Aree inondate dal fiume Tanaro ad Alessandria a monte della confluenza con il fiume Po, immagine Cosmo-SkyMed del 26/11/2016 ore 6:05	26
Figura 10. Suddivisioni in regioni più sviluppate, in transizione e meno sviluppate (Monitoraggio Politiche di Coesione Programmazione 2014-2020, 2018)	32
Figura 11. Distribuzione temporale degli eventi con conseguenze per la popolazione in Sicilia dal 1900 al 2013	47
Figura 12. Localizzazione comune di Lentini	48
Figura 13. Localizzazione ospedale di Lentini	50
Figura 14. Tratto del canale del Giudice che esonda e invade la SS194	50
Figura 15. Punto di immissione dello scarico del lago di Lentini nel fiume San Leonardo	51
Figura 16. Stato di uno dei canali.	51
Figura 17. Area che durante le esondazioni viene completamente allagata	52
Figura 18. Azienda agricola situata nell'area soggetta ad inondazioni	52
Figura 19. tratto della SS194 soggetto ad inondazione	53
Figura 20. Localizzazione comune di Messina	54
Figura 21. Stato del torrente Giampilieri	55
Figura 22. Stato del torrente Pace	56
Figura 23. Abitazione costruita nell'alveo del torrente Giampilieri	56
Figura 24. Stato del torrente Tarantonio	57

Figura 25. Tratto del torrente Calamona ristretto per la costruzione del camping	57
Figura 26. Localizzazione area "Papardo"	58
Figura 27. Rappresentazioni delle dieci geomorfologie	60
Figura 28. Rappresentazione delle tre geomorfologie Flat, valley e footslope nel comune di Lentini	60
Figura 29. Rappresentazione delle tre geomorfologie Flat, valley e footslope nel comune di Messina	61
Figura 30. Rappresentazione delle tre geomorfologie e dei depositi alluvionali del comune di Lentini	62
Figura 31. Rappresentazione delle tre geomorfologie e dei depositi alluvionali del comune di Messina	62
Figura 32. Rappresentazione delle tre geomorfologie e delle aree inondate nel comune di Lentini	63
Figura 33. Rappresentazione delle tre geomorfologie e delle aree inondate nel comune di Messina	64
Figura 34. Rappresentazione del territorio di Lentini a quota inferiore di 350 metri	65
Figura 35. Rappresentazione del territorio di Messina a quota inferiore di 350 metri	66
Figura 36. Rappresentazione delle aree del PAI e delle aree inondate all'interno della fascia altimetrica 0-350 m	67
Figura 37. Modello digitale del terreno del comune di Lentini	68
Figura 38. Modello digitale del terreno del comune di Messina	69
Figura 39. Reticolo idrografico del comune di Lentini	70
Figura 40. Reticolo idrografico del comune di Messina	70
Figura 41. Dataset degli eventi alluvionali del comune di Lentini	72
Figura 42. Dataset degli eventi alluvionali del comune di Messina	72
Figura 43. Rappresentazione in ambiente GIS dello strato della pendenza del	73
Figura 44. Rappresentazione in ambiente GIS dello strato della pendenza del	74
Figura 45. Grafico della distribuzione dei pixels alluvionati della pendenza nelle quattro classi	75
Figura 46. Rappresentazione in ambiente Gis della quota relativa del comune di Lentini	75
Figura 47. Rappresentazione in ambiente GIS della quota relativa del comune di Messina	76

Figura 48. Grafico della distribuzione dei pixels alluvionati della quota relativa nelle quattro classi	77
Figura 49. Rappresentazione in ambiente GIS della distanza del comune di Lentini suddivisa nelle cinque classi	77
Figura 50. Rappresentazione in ambiente GIS della distanza del comune di Messina suddivisa nelle cinque classi	78
Figura 51. Grafico della distribuzione dei pixels alluvionati della distanza nelle cinque classi	79
Figura 52. Rappresentazione in ambiente GIS del Curve-Number del comune di Lentini suddiviso nelle quattro classi	79
Figura 53. Rappresentazione in ambiente GIS del Curve-Number del comune di Messina suddiviso nelle quattro classi	80
Figura 54. Grafico della distribuzione dei pixels alluvionati del Curve-Number nelle quattro classi	81
Figura 55. Istogrammi dei pesi W^- , W^+ e C del fattore predisponente della pendenza	83
Figura 56. Istogrammi dei pesi W^- , W^+ e C del fattore predisponente della quota relativa	83
Figura 57. Istogrammi dei pesi W^- , W^+ e C del fattore predisponente della distanza dal reticolo	84
Figura 58. Istogrammi dei pesi W^- , W^+ e C del fattore predisponente del Curve-Number	84
Figura 59. Rappresentazione in ambiente GIS dell'indice di suscettività del comune di Lentini	85
Figura 60. Rappresentazione in ambiente GIS dell'indice di suscettività del comune di Messina	85
Figura 61. Distribuzione dei pixels alluvionati nelle 20 classi	86
Figura 62. Mappa di suscettività da alluvione del comune di Lentini	86
Figura 63. Mappa di suscettività da alluvione del comune di Messina	87
Figura 64. Confronto tra le aree inondate e la mappa di suscettività nel comune di Lentini	88
Figura 65. Distribuzione dei pixels alluvionati usati durante la fase di calibrazione per il comune di Lentini	88
Figura 66. Confronto tra le aree inondate e la mappa di suscettività nel comune di Messina	89

Figura 67. Distribuzione dei pixels alluvionati usati durante la fase di calibrazione per il comune di Messina	89
Figura 68. Esondazione tratto tombato a San Martino Valle Caudina il 31 dicembre 2019	91
Figura 69. Alluvione a Livorno il 10 settembre 2017	91
Figura 70. Tratto tombato si riappropria del suo percorso originale, Livorno 2017	91
Figura 71. Esondazione del torrente Seveso	92
Figura 72. Fuoriuscita dal tombino del torrente Seveso	92
Figura 73. Esondazione del fiume Fereggiano nell'omonima via (Genova) il 4/11/2011	92
Figura 74. Tre fasi (a distanza di pochi minuti l'una dall'altra) dell'esonazione a Cardoso di Stazzema (Lucca) il 19 giugno 1996	93
Figura 75. Alluvione a Livorno il 9 settembre 2017	94
Figura 76. Tag utilizzato nel geodatabase della Campania per inquadrare il tipo di elemento idrico	95
Figura 77. Classificazione della distanza euclidea utilizzata nella prima mappa prodotta	96
Figura 78. Modifiche apportate al fattore predisponente della distanza euclidea per i tratti tombati.	99
Figura 79. Rappresentazione della mappa di suscettività a Capo Peloro (sinistra) e nella zona del Porto (destra)	100
Figura 80. Rappresentazione in ambiente GIS delle cinque classi della quota relativa	102
Figura 81. Distribuzione dei pixels alluvionati nelle classi della quota relativa	103
Figura 82. Mappa di suscettività del comune di Lentini	104
Figura 83. Distribuzione dei pixels di calibrazione nelle 20 classi	106
Figura 84. Mappa di suscettività del comune di Messina	107
Figura 85. Grafico della validazione del comune di Lentini	108
Figura 86. Grafico della validazione del comune di Messina	109
Figura 87. Rappresentazione in ambiente GIS delle aree classificate dal PAI	110
Figura 88. Confronto tra le aree a pericolosità del PAI e le aree inondate	111
Figura 89. Sovrapposizione delle aree a pericolosità da inondazione alla mappa di suscettività	111
Figura 90. Grafico della distribuzione delle aree presenti nel PAI nelle quattro classi di suscettività: trascurabile, bassa, media e alta	112

Figura 91. Rappresentazione della mappa di suscettività nei pressi dell'ospedale di Lentini	113
Figura 92. Rappresentazione della mappa di suscettività nell'area a sud del lago di Lentini	114
Figura 93. Rappresentazione della mappa di suscettività nell'area dove è presente	114
Figura 94. Rappresentazione delle aree a pericolosità idraulica presenti nel PAI	115
Figura 95. Sovrapposizione delle aree a pericolosità da inondazione alla mappa di suscettività	116
Figura 96. Grafico della distribuzione delle aree presenti nel PAI nelle quattro classi di suscettività: trascurabile, bassa, media e alta	117
Figura 97. Grafico della distribuzione dei nodi idraulici critici nelle quattro classi di suscettività: trascurabile, bassa, media e alta	118
Figura 98. Rappresentazione della mappa di suscettività nell'area "Papardo"	119
Figura 99. Rappresentazione della mappa di suscettività alla foce del fiume Calamona	119
Figura 100. Rappresentazione della mappa di suscettività nell'area del centro urbano di Messina.	120

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Tempi di ritorno per ciascun scenario di probabilità	19
Tabella 2. Valori del parametro CN	36
Tabella 3. Calcolo della pericolosità idraulica e secondo la modalità semplificata	45
Tabella 4. Valutazione del rischio idraulico secondo la metodologia semplificata	45
Tabella 5. Calcolo della probabilità idraulica secondo la metodologia completa	45
Tabella 6. Valutazione del rischio idraulico secondo la metodologia completa	45
Tabella 7. Percentuali di pixels alluvionati per ciascuna classe del fattore predisponente della pendenza	74
Tabella 8. Percentuali di pixels alluvionati per ciascuna classe del fattore predisponente della quota relativa	76
Tabella 9. Percentuali di pixels alluvionati per ciascuna classe del fattore predisponente della distanza	78
Tabella 10. Percentuali di pixels alluvionati per ciascuna classe del fattore predisponente del Curve-Number	80
Tabella 11. Pesi delle classi ottenuti con il modello WOE	82
Tabella 12. Pesi delle classi ottenuti con il modello WOE	104
Tabella 13. Pesi delle classi ottenuti con il modello WOE	105

SOMMARIO

Il lavoro di tesi rientra nell'ambito del progetto PON Governance e Capacità Istituzionale 2014-2020. Una delle azioni proposte nell'attività di riduzione del rischio idraulico ai fini di protezione civile è quella del potenziamento dei sistemi di previsione e di allertamento attraverso lo strumento di mappatura della pericolosità dei fenomeni idrogeologici e idraulici non analizzati nei PAI e/o PGRA.

La metodologia che si va a proporre è quella dell'analisi di suscettività, che permette una mappatura della totalità dell'area presa in esame, classificandola speditivamente a seconda della sua predisposizione al fenomeno alluvionale. Un approccio innovativo nel campo delle alluvioni, che si basa su un dataset osservazioni storiche registrate e su un determinato numero di fattori predisponenti descrittivi.

L'obiettivo dell'elaborato di tesi è quello di produrre un'analisi di suscettività di due comuni della Regione Sicilia, Lentini e Messina, che presentino caratteristiche differenti (il primo è prevalentemente rurale, il secondo fortemente urbanizzato) tali da rappresentare due casi studio esemplificativi di realtà completamente diverse. Per entrambi i casi studio è stata applicata l'analisi di suscettività proposta nel progetto PON Governance, ma, mentre per Lentini i risultati prodotti dal metodo originario sono stati soddisfacenti, le peculiarità del territorio di Messina, su tutte la presenza di torrenti tombati fonte di rischio idraulico nel centro della città, hanno imposto ulteriori accorgimenti metodologici e valutazioni. Si è tratto da ciò spunto per la definizione di una proposta metodologica originale che fosse in grado di descrivere adeguatamente tali fattispecie all'interno dell'analisi di suscettività da alluvione. Al fine di svolgere un'analisi accurata, oltre allo studio della letteratura, sono stati effettuati sopralluoghi in entrambi i comuni, condotti da tecnici che, grazie alla loro conoscenza diretta del territorio, hanno permesso di individuare e approfondire le aree a maggiore criticità idraulica.

Il lavoro si pone come obiettivo quello di approfondire e risolvere eventuali limiti dell'analisi di suscettività da alluvione, già proposta nel progetto come metodo speditivo per la pianificazione di protezione civile e la valutazione del rischio idraulico, in affiancamento agli approcci già correntemente in uso.

ABSTRACT

The thesis work falls within the scope of the project PON Governance and Institutional Capacities 2014-2020.

One of the main actions proposed in the hydraulic risk reduction activity for civil protection goals is the forecasting and warning systems' improvement through mapping the hazard of hydrogeological and hydraulic phenomena not covered in the "Hydrogeological Structure Plans" (PAI), or "Flood Risk Management Plans" (PGRA).

The suggested method is the flood susceptibility analysis, which allows mapping the whole examined area classifying it according to its proneness to flood phenomena. This analysis it is a relative innovative approach in flood susceptibility mapping and it is based on a dataset of historical events and several predisposing factors.

This thesis aim to produce a flood susceptibility map of the two studied municipalities in the Sicilia region, Lentini and Messina. Due of their very separate characteristics (the first one is mainly rural, the second one, on the contrary, is strongly urbanized) the results were very different. While for Lentini the results produced were acceptable, for Messina instead, given some peculiarities of the municipality such as the presence of buried torrents transformed into important roads, it was necessary to apply some further evaluations and adjustments to the method. This was the starting point for the definition of an original methodological proposal that was able to adequately describe these cases within the flood susceptibility analysis. In order to conduct an analysis as accurate as possible, in addition to the study of the literature, it was necessary to carry out inspections in both municipalities led by municipal engineers who, thanks to their in-depth knowledge of the territory, made it possible identifying the most critical areas.

The work aims to investigate and resolve further issues of the flood susceptibility analysis, already proposed in the project as a rapid method for civil protection planning and hydraulic risk assessment, alongside the approaches already in use.

1 INTRODUZIONE

Il territorio italiano, a causa delle sue caratteristiche morfologiche, idrologiche, fisiche e climatiche, è generalmente soggetto a frequenti calamità naturali. Tra le diverse tipologie, una delle più rilevanti e che ha provocato ingenti danni sia in termini economici sia di vite umane, è il dissesto idrogeologico. Dal secondo dopoguerra si è avuta una forte urbanizzazione che ha determinato un aumento considerevole degli elementi esposti a frane e ad alluvioni. Nel 2018 i dati (ISPRA, 2018) hanno confermato che il 91% dei comuni è a rischio per frane e/o alluvioni, il 16,6% del territorio è stato classificato a maggiore pericolosità, 1,28 milioni di abitanti sono a rischio frane e oltre 6 milioni a rischio alluvioni. Per far fronte a questo tipo di emergenza, mentre prima si poneva l'attenzione solamente sull' utilizzo di opere di tipo strutturale, quali argini o casse di espansione, negli ultimi anni è diventato sempre più importante l'affiancamento di interventi di tipo non strutturale. Una corretta pianificazione di protezione civile comunale costituisce un elemento strategico per la gestione delle emergenze, che si basa sulla costruzione di scenari di evento che sono definiti considerando la pericolosità e la vulnerabilità.

Per valutare la pericolosità di una specifica area, i comuni fanno molto spesso riferimento alle mappe di pericolosità, redatte nell'ambito del Piano di Assetto Idrogeologico e nel Piano di Gestione del Rischio Alluvioni. La produzione delle mappe di pericolosità, secondo la classica impostazione delle Autorità, richiede l'utilizzo di una complessa modellazione idraulica e idrologica e la disponibilità di dati che non sempre sono facilmente reperibili. Non solo per queste criticità, spesso associate a carenza di risorse economiche, ma per evidenti ragioni connesse alla complessità dei fenomeni alluvionali, non è stato possibile (né lo sarà in futuro) produrre una mappa completa e omogenea di tutti i tratti fluviali. In generale prevale un approccio gerarchico ove siano presi in esame solamente quelli più importanti appartenenti al reticolo idrografico principale.

A causa dei numerosi e frequenti eventi, generati da tratti fluviali secondari che causano danni cospicui e la perdita di vite umane in aree (sistematicamente) non classificate nella mappa di pericolosità, si è proceduto con la ricerca di nuove metodologie per acquisire una classificazione il più completa e omogenea possibile di tutto il territorio.

Questi temi sono peraltro collocati nell'ambito del progetto PON Governance e capacità istituzionali 2014-2020 che, tra le altre cose, si pone l'obiettivo di realizzare per la prima volta sul territorio italiano, la mappa di suscettività per le 5 regioni del sud Italia: Basilicata, Calabria, Campania, Puglia e Sicilia, individuando le criticità e i vantaggi di questa nuova metodologia. L'analisi di suscettività non si propone come un approccio alternativo o sostitutivo rispetto alle mappe di pericolosità presenti nel PAI o PGRA, ma è concepita come un ulteriore strumento a supporto del pianificatore di protezione civile per l'individuazione delle aree da sottoporre ad una specifica attenzione.

2 OGGETTO E FINALITÀ DELLA TESI

L'oggetto del presente lavoro di tesi è l'applicazione dell'analisi di suscettività da alluvione nella costruzione della base conoscitiva finalizzata alla formulazione di scenari di evento, per l'aggiornamento dei piani di Protezione Civile di due comuni della Sicilia: Lentini e Messina.

L'analisi di suscettività da alluvione indica la propensione di un sito ad essere inondato sulla base della individuazione di fattori predisponenti e la conseguente applicazione di un modello adeguatamente addestrato sulla base di osservazioni storiche. La prima criticità affrontata riguarda la bassa disponibilità di dati storici relativi all'estensione di aree storicamente inondate, questo è dovuto, oltre al carattere effimero del fenomeno alluvionale, alla mancanza di direttive che impongano agli Enti tale forma di documentazione. Per incrementare il database, ai fini di migliorare l'addestramento del modello, sono stati effettuati sopralluoghi in loco, interviste al personale tecnico degli enti locali e analisi del materiale in rete.

Il lavoro di tesi affronta un aspetto di particolare criticità del metodo, legato allo studio di aree fortemente antropizzate, in particolar modo laddove sussistano corsi d'acqua tombinati che provochino alluvioni ricorrenti. Nel caso in esame (sempre nel contesto del progetto PON Idrogeologico), si è voluto analizzare il problema specifico con riferimento ai due casi di studio sopra citati. Il comune di Lentini (a carattere prettamente rurale e con pochi interventi significativi sul territorio), in cui i fattori predisponenti geomorfologici e di uso del suolo utilizzati offrono buoni risultati, dato che tale ordine di parametri governa il processo di inondazione. Il comune di Messina in cui, al contrario, alcune delle arterie principali del centro storico sono tracciate su antichi corsi fluviali tombinati. In quest'ultimo caso, proprio in corrispondenza di tali asservimenti, si sono osservati fenomeni alluvionali ricorrenti con notevole impatto dannoso.

A tal fine, attraverso analisi storiche e sopralluoghi in loco, si sviluppa una proposta destinata a trattare anche questo tipo di singolarità nell'ambito del metodo, senza particolari limitazioni all'uso estensivo che ne costituisce uno dei principali vantaggi applicativi.

Infine, si confrontano i risultati della mappa di suscettività con le mappe di pericolosità redatte nel PAI, per individuarne i vantaggi e i punti critici su cui si dovrà porre l'attenzione per eventuali sviluppi futuri.

3 IL RISCHIO ALLUVIONALE

«Le alluvioni possono provocare vittime, l'evacuazione di persone e danni all'ambiente, compromettere gravemente lo sviluppo economico e mettere in pericolo le attività economiche della Comunità». (DIRETTIVA 2007/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO, 2007)

Negli ultimi decenni, a causa del cambiamento climatico e della continua urbanizzazione dei territori, determinata dall'aumento della popolazione, si è verificata una considerevole crescita del numero di alluvioni, tanto da divenire il primo fenomeno mondiale per numero di disastri (Figura 1) con ricadute tragiche sull'ambiente (Huong & Pathirana, 2013), (Milly, Wetherald, Dunn, & Delworth, 2002). Nell'ultimo decennio del secolo scorso, solo le alluvioni sono state responsabili della morte di 100.000 persone e hanno provocato danni e perdite economiche ad un altro miliardo e mezzo (Jonkman, 2005), mentre, tra il 2000 e il 2008, la media di persone all'anno, che subisce danni provocati dal fenomeno alluvionale, si assesta sui 99 milioni (Opolot, 2013).

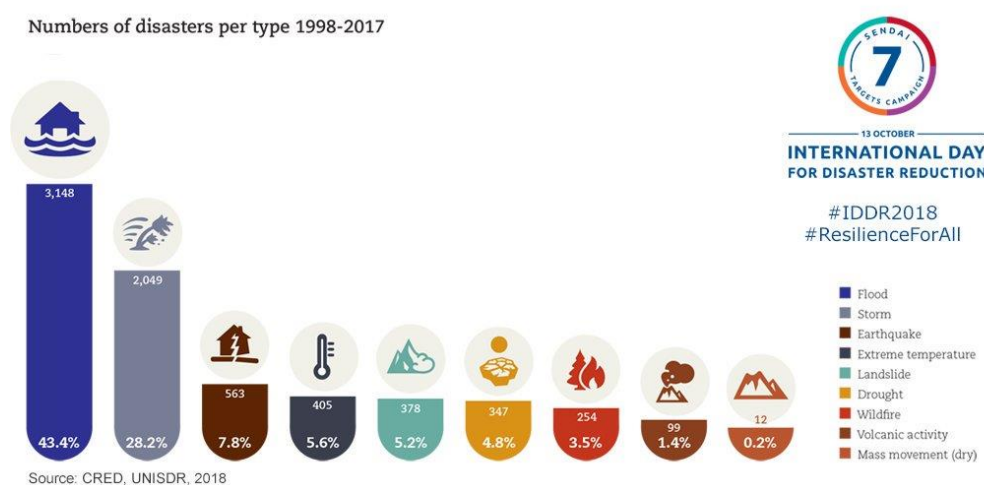


Figura 1. Numero di disastri classificati per tipologia dal 1998 al 2017, CRED, UNISDR, 2018

3.1 Definizione e classificazione delle alluvioni

Per definire il termine di alluvione sono state utilizzate differenti definizioni ma, generalmente, si intende la copertura temporanea di terre asciutte dall'acqua (Opolot, 2013). Una delle più utilizzate è quella della Comunità Europea nella (Union, 2007): «Per alluvione si intende la copertura temporanea con l'acqua di terreni normalmente non coperti dall'acqua. Ciò include le inondazioni causate da fiumi, torrenti montani, corsi d'acqua effimeri mediterranei e le inondazioni marine delle zone costiere, e può escludere gli allagamenti causati dagli impianti fognari». Un'altra definizione a cui molto spesso si fa riferimento è quella impiegata da Kron (Kron, 2005) dove per alluvione si intende «copertura temporanea di terreni con l'acqua a causa di acque superficiali che fuoriescono dai loro normali confini o a causa di forti precipitazioni».

Il fenomeno delle alluvioni può essere distinto in due categorie principali: quelle guidate da processi di tipo idrologico, quindi determinate dalla trasformazione degli afflussi in deflussi, e quelle dovute a cause di altro tipo (sia naturale che antropico).

Le alluvioni determinate dalla catena idrologica sono costituite da una serie di anelli, il primo dei quali è rappresentato dalla precipitazione che, dopo essersi manifestata su un determinato territorio, si trasforma in deflusso idrico che scorre all'interno del bacino idrografico, definito dalla Direttiva 2000/60/CE « come il territorio nel quale scorrono tutte le acque superficiali attraverso una serie di torrenti, fiumi ed eventualmente laghi per sfociare al mare in un'unica foce, a estuario o delta ».

Il passaggio da precipitazione a deflusso dipende dal dominio e dalle caratteristiche intrinseche del bacino, quali la morfologia, la litologia, la copertura dei suoli e lo stato di umidità iniziale.

Successivamente, con il progressivo inalveamento nei rami del reticolo ai diversi ordini, si ha il passaggio da deflusso a portata. Il tasso di deflusso è legato principalmente alla configurazione della rete di drenaggio, alle caratteristiche e alla condizione del singolo canale.

Il terzo anello consiste nella trasformazione da portata a livello idrometrico funzione della scabrezza, alla pendenza, alla forma e all'ampiezza.

L'ultimo passaggio della catena porta alla trasformazione da livelli idrometrici ad effetti al suolo: questo avviene quando le sponde o gli argini non sono più in grado di contenere il corpo idrico all'interno del proprio alveo. A tal proposito, gli argini hanno lo scopo di

contenere le portate con un determinato tempo di ritorno e il superamento di questi può avvenire o per un evento eccezionale con un tempo di ritorno superiore a quello progettato, oppure per un qualsiasi malfunzionamento dell'opera.

All'interno delle alluvioni determinate dalla catena idrologica si possono distinguere le alluvioni guidate da processi iso-frequenti e quelle da processi non iso-frequenti (Rosso, 2017).

Una catena idrologica si definisce iso-frequente se la frequenza, osservata dai vari processi che la compongono, è circa la stessa, quindi se il tempo di ritorno delle precipitazioni, delle portate, dei livelli idrici e degli effetti al suolo, è lo stesso (Bocchiola & Rosso, 2009).

A rigore si potrebbe applicare il concetto di iso-frequenza solo se fosse verificata l'ipotesi di stazionarietà del clima, ma negli ultimi decenni le temperature stanno subendo un generale innalzamento e questo comporta sia l'aumento della temperatura del mare (con l'effetto di un incremento di fenomeni convettivi autorigeneranti che si abbattano sulle zone costiere), sia l'incremento dell'evapotraspirazione, che porta nei bacini una significativa diminuzione del coefficiente di deflusso, cioè del rapporto tra volume defluito e volume affluito in un anno. Nonostante ciò, per eventi di breve durata come le alluvioni, soprattutto per quanto attiene alle aree interne, si assume di poter considerare stazionaria la serie storica delle portate massime annuali.

Molte alluvioni però sono guidate da processi non iso-frequenti, cioè la portata prodotta da un determinato evento di precipitazione e la precipitazione da cui si origina non hanno lo stesso tempo di ritorno: questo può dipendere da vari fattori ambientali come l'umidità del suolo o la stagionalità, oppure da fattori antropici, quali per esempio l'intasamento delle luci di un ponte a causa di detriti o di imbarcazioni, come accadde a Roma il 12 dicembre 2008, quando una piena con tempo di ritorno di venti anni rischiò di avere conseguenze drammatiche (Menduni, 2013). In questo secondo caso potrebbero essere causate dalla rottura di una diga o di un argine che possono provocare danni al suolo con tempo di ritorno maggiore rispetto alla precipitazione, oppure potrebbero essere dovute alla costruzione di casse di espansione, il cui funzionamento genera una portata con un tempo di ritorno inferiore rispetto a quello della precipitazione.

Un'ultima classificazione viene fatta tra alluvioni dirette, ovvero quando l'alveo non è più in grado di contenere al proprio interno il corso d'acqua e fuoriesce e alluvioni da ristagno che sono dovute a una crisi del drenaggio urbano dove le condutture, a causa della scarsa

manutenzione, della mancanza di pulizia o del sovraccarico di afflussi, non sono più in grado di contenere l'acqua al proprio interno.

La seconda categoria invece rappresenta le alluvioni causate da tutti i fenomeni che non riguardano le precipitazioni: queste possono essere determinate da fenomeni di marea estrema di tipo costiero o fluviale, come il caso, nel maggio del 2008, dell'inondazione costiera del Myanmar nel delta del fiume Irrawaddy (Figura 2 **Error! Reference source not found.**) (Wolf, 2009) o quella del 1953, in Olanda, che provocò più di 1800 vittime (Figura 3) (Gerritsen, 2005).



Figura 2. Alluvione Myanmar 2008



Figura 3. Alluvione in Olanda nel 1953

Possono essere causate dalle mareggiate, come nel caso della centrale nucleare di Fukushima, inondata l'11 marzo 2011, o possono essere provocate dalle frane che

intercettano un corso d'acqua bloccandolo e causando un allagamento dei territori a monte (e poi a valle, al cedimento dello sbarramento effimero).

Un altro fattore è rappresentato dalla crisi delle dighe che, a causa di varie tipologie di incidenti, possono essere sorpassate dall'acqua come il caso del Vajont il 9 Ottobre 1963 che ha provocato più di 2000 vittime (Kilburn & Petley, 2003), oppure dallo stesso crollo di esse come il caso di Gleno del 1923 (Pilotti, Maranzoni, Tomirotti, & Valerio, 2011) o quello della diga Banqiao in Cina nel 1975 (Figura 4) (Yi, 1998).



Figura 4. Crollo della diga Banqiao in Cina

3.2 Le alluvioni in Italia

L'Italia, a causa della sua morfologia e della sua posizione, è un territorio soggetto a rischi ambientali di varie tipologie tra i quali tsunami, incendi boschivi, subsidenza, frane, terremoti, alluvioni, vulcani, valanghe e uragani.

Le alluvioni sono uno dei disastri che ha sempre caratterizzato il nostro territorio, la più antica testimonianza storica risale al 414 a.C. quando Tito Livio descrisse l'esondazione del Tevere.

Dal Catalogo delle Aree Vulnerate Italiane (AVI) richiesto il 23 giugno 1989 dal Ministero della Protezione Civile al Consiglio di Ricerca Nazionale (CNR) per la catalogazione di tutti gli eventi alluvionali e franosi dal 1917 si nota come, sul territorio italiano, si siano verificati più di 32.000 eventi franosi e più di 29.000 eventi alluvionali. Questi hanno provocato più di 10.000 tra vittime e persone scomparse e più di 700.000 sfollati. Successivamente il

catalogo AVI è stato inserito all'interno del sistema informativo noto come SICI (Sistema Informativo sulle Catastrofi Idrogeologiche), la più grande risorsa di informazione per le frane e le alluvioni.

All'interno di esso, oltre all'AVI, sono presenti altri database tra cui Giano, che copre il periodo tra il 1700 e il 1899, in cui sono stati catalogati 793 eventi alluvionali: 388 nel XVIII secolo e 405 nel XIX.

Di seguito sono riportati alcuni eventi, di cui abbiamo maggiori informazioni e che hanno provocato il maggior numero di vittime e di perdite economiche, che si sono verificati prevalentemente a partire dalla seconda metà del secolo scorso (Figura 5) (Guzzetti & Tonelli, 2004)

Il 22 ottobre 1951 si è scatenato, sulla Calabria meridionale, uno dei peggiori eventi mai verificatisi, a causa della notevole quantità di acqua caduta sul territorio in poco più di 100 ore (1.170 mm di pioggia, molto superiore alle medie annuali), molti torrenti sono esondati allagando i territori circostanti e provocando 70 morti, 4.500 sfollati, 1.700 abitazioni crollate e un danno economico di 30 miliardi di lire.

Il mese seguente dello stesso anno un violento nubifragio causò lo straripamento del Po nella zona di Rovigo: l'acqua invase campi, borghi e numerosi comuni causando 138 morti, 140.000 sfollati, 1.200 abitazioni danneggiate e 52 ponti distrutti, provocando inoltre ingenti danni all'allevamento e all'agricoltura, dove si contò la perdita di 9.000 fattorie, 13.000 animali e 100.000 tonnellate di grano.

Il 25 ottobre 1954 precipitazioni di portata eccezionale si manifestarono in Campania, nella costiera amalfitana, colpendo in special modo la città di Salerno: il numero di morti fu di 318 e 5.500 furono gli sfollati, per 45 miliardi di lire di danni nei comuni colpiti.

Nel 1963 il disastro del Vajont, uno dei più catastrofici verificatosi sul nostro territorio: questo evento drammatico non fu provocato da precipitazioni, ma dal crollo di 300 milioni di m³ di roccia del monte Toc nel lago artificiale del Vajont e il superamento della diga da parte dell'onda generata determinò la distruzione delle abitazioni del fondovalle veneto e la morte di 1917 persone.

Nel 1966 l'esondazione del fiume Arno colpì la città di Firenze e molti altri comuni del bacino dell'Arno: fu causata da ingenti precipitazioni avvenute sul territorio, e provocò, oltre la morte di 35 persone, di cui 17 a Firenze, la perdita inestimabile di parte del patrimonio artistico della città tra cui migliaia di volumi e opere pittoriche.

Il 7 ottobre 1970 la città di Genova fu inondata dai torrenti Fareggiano, Leira e Bisagno a causa di precipitazioni che portarono sul territorio 900 mm in 24 ore: questi produssero danni non solo nella città di Genova ma in oltre venti comuni nelle province di Genova e Alessandria; i morti furono 35, gli sfollati più di 2000 e le perdite economiche di circa 45 miliardi di lire.

Tra il 2 e il 6 novembre del 1994 le province di Cuneo, Asti, Torino e Alessandria furono colpite da un violento evento alluvionale che causò l'esondazione dei fiumi Po, Tanaro e dei loro affluenti. Morirono 70 persone, gli sfollati furono 2.200 e si registrarono, inoltre, ingenti danni alle infrastrutture: 10 ponti furono distrutti e altri 100 danneggiati. Molte strade furono rese inagibili con la conseguente isolamento, per settimane, di diversi comuni. Il danno economico di questo evento fu ragguardevole, stimato tra i 15.000 e i 25.000 miliardi di lire. Il 5 maggio del 1998 sul territorio campano, in particolar modo sulle aree di Sarno, Quindici, Siano e Bracigliano, ci furono rilevanti precipitazioni che provocarono numerose frane e colate detritiche e di fango, con la conseguente morte di 160 persone.

Tra il 13 e il 16 ottobre del 2000 abbondanti piogge nel nord del Piemonte e in Val d'Aosta favorirono l'esondazione del fiume Po e dei suoi affluenti. Questo evento interessò marginalmente anche Lombardia e Liguria, ma è proprio in Piemonte che causò maggiori conseguenze: il numero di vittime fu di 23 e gli sfollati oltre 40.000. In Val d'Aosta le vittime furono 17 e gli sfollati 5000.

Il 1° ottobre 2009 nel Nord-Est della Sicilia, a sud di Messina, una zona a elevato rischio idrogeologico, abbondanti precipitazioni, 220 mm in poche ore, si abbatterono provocando colate detritiche e di fango che travolsero numerose abitazioni. Dopo alcuni giorni dall'evento, il numero di morti accertati fu di 37.

Il 18 novembre 2013, un ciclone violentissimo e raro investì la Sardegna, portando con sé notevoli precipitazioni sull'isola: si registrarono 400 mm. di pioggia in poche ore; l'area di Olbia, in particolar modo, fu colpita da questo evento, e qui l'acqua raggiunse i 2 metri nelle abitazioni e le strade furono sommerse dal fango causando la morte di 13 persone. Le vittime in tutta la Sardegna furono 18 e gli sfollati quasi 3000.

Tra il 9 e il 10 settembre 2017 si scatenarono su Livorno straordinarie precipitazioni: caddero sul suolo livornese oltre 200 mm di pioggia in due ore, al pari dei precedenti otto mesi, che portarono all'esondazione di due torrenti, il Rio Maggiore, torrente tombato, e l'Ardenza. I morti furono 8 mentre si stimarono 26 milioni di danni.

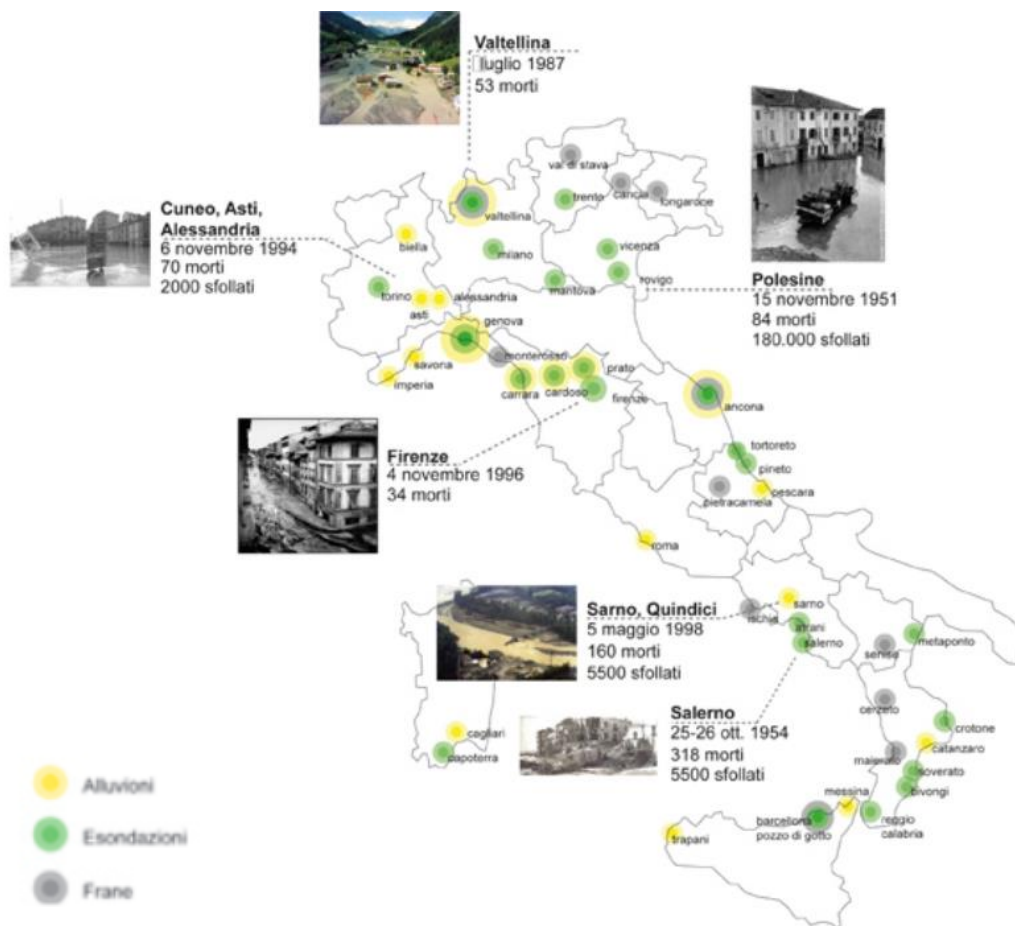


Figura 5. Atlante delle alluvioni in Italia dal 1950 ad oggi

4 LA MAPPATURA DEL RISCHIO IN ITALIA

4.1 Cenni storici sulla normativa

In Italia le prime iniziative politiche per prevenire o per arginare le conseguenze dei disastri alluvionali ebbero inizio nella seconda metà del secolo scorso. Fu proprio dopo la terribile alluvione del Polesine, avvenuta nel 1951, che fu varata la prima legge sulle alluvioni.

Di fronte a questa catastrofe e grazie all'analisi tecnica del professore Giulio De Marchi (Menduni, 2013), l'anno successivo fu emanata la legge 184/52 che era incentrata sulla formulazione di un piano che prevedeva la «sistematica regolazione delle acque, sia ai fini della loro più razionale utilizzazione, sia a quelli della lotta contro l'erosione del suolo e della difesa del territorio contro le esondazioni dei corsi d'acqua» (Menduni, 2013).

La Commissione interministeriale De Marchi, istituita l'anno successivo all'alluvione di Firenze nel 1966, ebbe come obiettivo principale la sistemazione idraulica e idrogeologica del territorio e la difesa del suolo inoltre istituì una politica di difesa del suolo che poteva avere successo solo se attuata attraverso l'attività di pianificazione e di programmazione rivolta alla scala dell'intero bacino idrografico, transcendendo i tradizionali limiti amministrativi, di comuni, province, regioni.

Solo alla fine degli anni Ottanta, con la legge 183/1989 fu possibile però impostare il quadro generale della difesa del suolo.

Si ebbe quindi l'individuazione dei bacini idrografici suddivisi in tre categorie: quelli a livello nazionale (7, di cui uno quello del Serchio definito come bacino pilota), quelli a livello interregionale (13) e infine quelli a rilievo regionale (18 di cui 2 provinciali), (Figura 6).

Da qui derivò la necessità dell'istituzione dell'Autorità Di Bacino, soggetto deputato a perseguire il governo unitario dei Bacini Idrografici mediante azioni di indirizzo, coordinamento e controllo delle attività conoscitive, pianificatorie e di programmazione inerenti alla difesa del suolo. Queste avevano l'obiettivo di produrre i Piani di bacino per l'Assetto Idrogeologico (PAI) uno strumento dinamico e in continuo aggiornamento preposto alla tutela dell'integrità fisica del territorio sotto i suoi molteplici aspetti.

Nel 1998 dopo gli eventi che colpirono la Campania fu emanata la legge n.267/1998 che

sollecitò le Autorità di Bacino a emanare i Piani stralcio per l'assetto idrogeologico in particolar modo per i territori a rischio.

A poco più di un mese dalla tragedia che colpì vari comuni della Campania, in particolar modo quello di Sarno con 160 vittime e danni gravissimi alle strutture, venne emanato il Decreto Legislativo 180/98 noto anche come il Decreto "Sarno". Questo fu il primo decreto normativo ad esplicitare il concetto di rischio nella difesa del suolo quale combinazione tra la pericolosità di un fenomeno con il valore e la vulnerabilità del bene coinvolto. L'obiettivo principale del Decreto fu quello di censire in breve tempo le situazioni di rischio idrogeologico presenti sul territorio nazionale al fine di salvaguardare le persone e i beni, impedire un aggravio delle condizioni critiche e intervenire rapidamente per la riduzione del rischio stesso.

Con il DPCM 29/9/1998 (Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri) si cercò di spiegare come doveva essere eseguita la pianificazione in modo da realizzare prodotti il più possibile omogenei e quindi confrontabili a scala nazionale, soprattutto in quei luoghi dove la fase di pianificazione era ancora agli inizi. L'anno successivo fu emanata la legge 226/99 per disporre l'immediata predisposizione e approvazione di piani straordinari per le situazioni a più alto rischio e, il 23 ottobre del 2000 la Direttiva 2000/60/CE che stabiliva come gli Stati Membri dell'Unione Europea avrebbero dovuto affrontare la tutela delle acque a livello di bacino idrografico e l'unità di riferimento fosse individuata nel distretto idrografico, definito dall'articolo 2 della Direttiva quale «area di terra e di mare, costituita da uno o più bacini idrografici limitrofi e dalle rispettive acque sotterranee e costiere che, a norma dell'articolo 3, paragrafo 1, è definito la principale unità per la gestione dei bacini idrografici».

Questa direttiva fu recepita in Italia con il Decreto legislativo 3 aprile 2006 n.152. Il territorio italiano fu così suddiviso in otto distretti idrografici (Alpi Orientali, Padano, Appennino Settentrionale, pilota del Serchio, Appennino Centrale, Appennino Meridionale, Sardegna, Sicilia) e si dovette prevedere per ogni distretto la redazione di un piano di gestione, attribuendone la competenza all'attività di distretto idrografico (Figura 6). Il Decreto 152/2006 inoltre definì anche le Autorità di bacino distrettuale quali enti di riferimento per la gestione del distretto idrografico.

Nel 2007, a causa dei danni significativi che avevano colpito negli anni precedenti alcuni Stati membri dell'Unione Europea come Francia, Romania, Austria, Germania e Repubblica

Ceca (Menduni, 2013) venne pubblicata la Direttiva 2007/60/CE dal Parlamento Europeo. Lo scopo della Direttiva fu quello di istituire un quadro per la valutazione e la gestione dei rischi di alluvioni volto a ridurre le conseguenze negative connesse alle alluvioni per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche.

Con questa direttiva l'Unione Europea ha imposto a tutti i 29 Stati Membri la produzione di mappe di pericolosità e di rischio entro il giugno 2013, da rinnovarsi ogni sei anni, questo a causa delle considerevoli perdite umane ed economiche che avevano provocato le alluvioni su tutto il suolo europeo, soltanto nel ventennio tra il 1986 e il 2006 le alluvioni avevano causato danni per oltre 100 miliardi di euro (CEA, 2007).

Venne recepita a sua volta in Italia con il D. Lgs 94/2010 che prevede, al suo interno, la produzione delle mappe di pericolosità e di rischio a livello di distretto come indirizzo per la stesura dei piani di gestione del rischio alluvionale (PGRA) coordinati a livello di distretto idrografico per le zone in cui potesse sussistere un rischio potenziale ritenuto significativo.

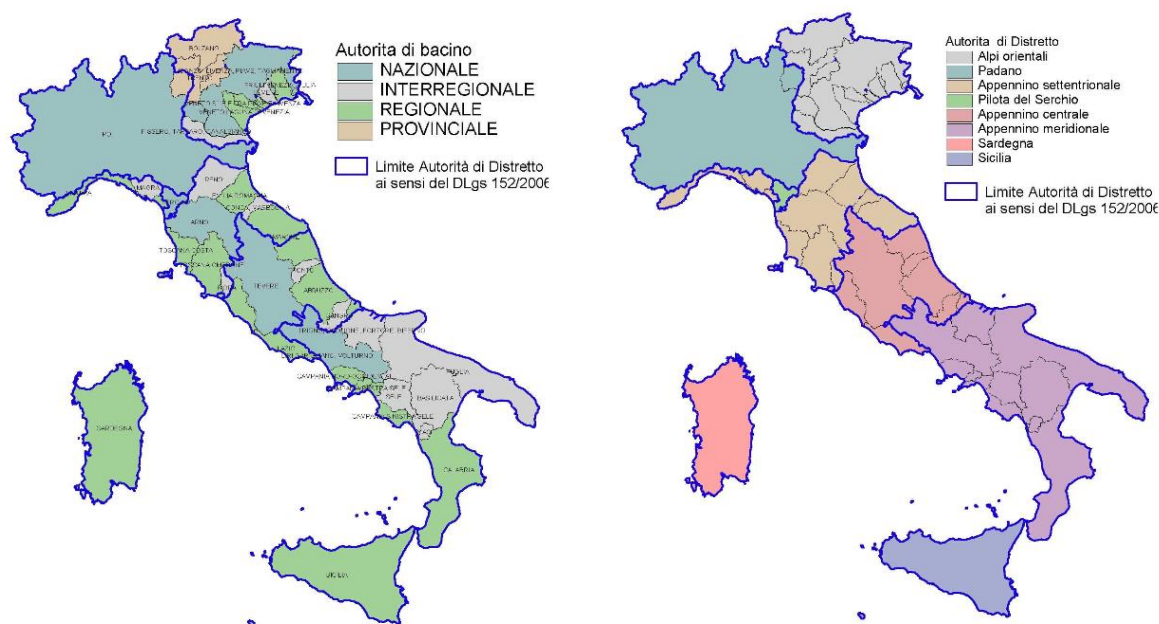


Figura 6. Suddivisione del territorio italiano in Autorità di bacino (sinistra) e in distretti idrografici (destra)

4.2 Il PAI e il PGRA

Con la legge 183/89 è stato imposto per ogni bacino idrografico (nazionale, interregionale e regionale) la produzione del piano di bacino. Questo è uno strumento conoscitivo, normativo e tecnico operativo mediante il quale sono pianificate e programmate le azioni e le norme d'uso finalizzate alla conservazione, alla difesa e alla valorizzazione del suolo e alla corretta

utilizzo delle acque, sulla base delle caratteristiche fisiche ed ambientali del territorio interessato.

Il piano di bacino è quindi uno strumento dinamico e in continuo aggiornamento preposto alla tutela dell'integrità fisica del territorio, uno strumento conoscitivo in quanto offre un quadro di riferimento del contesto fisico, ambientale ed antropico del bacino idrografico, normativo, in quanto detta vincoli, prescrizioni e direttive per la salvaguardia, la tutela e la bonifica delle risorse suolo ed acqua nella loro accezione più ampia, tecnico-operativo perché individua gli interventi strutturali e non strutturali per la difesa del suolo a seconda della loro finalità.

Il piano può essere anche elaborato per stralci, relativi ad aree omogenee costruiti in aderenza alle criticità del bacino idrografico in modo da consentire di affrontare prioritariamente i problemi più urgenti non dovendo aspettare la produzione dell'intero piano di bacino.

È composto principalmente da tre ambiti: il primo consiste nella perimetrazione delle aree a diverso grado di pericolosità e di rischio, il secondo nella definizione delle misure di salvaguardia e vincoli all'uso del suolo, atti a non incrementare il rischio nelle zone in cui esiste già un pericolo, il terzo tratta dell'individuazione degli interventi di difesa (strutturali, non strutturali, di manutenzione, ecc.) atti a ridurre il rischio idrogeologico nelle aree riconosciute a rischio e a non incrementarlo nelle aree critiche.

Il PAI (Piano di Assetto Idrogeologico) è un piano territoriale che la legge colloca in una posizione sovraordinata nei confronti degli strumenti di pianificazione di settore, ponendosi come vincolo anche rispetto alla pianificazione urbanistica. Una volta che il Piano è elaborato e adottato, gli strumenti di pianificazione settoriale e territoriale dovranno essere adeguati ad esso.

Con l'attuazione della Direttiva Europea 2007, tramite il D. Lgs 49/2010, l'Italia ha dovuto provvedere alla redazione del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni per ciascuno degli otto distretti.

Il Piano riguarda tutti gli aspetti della gestione del rischio di alluvioni, in particolare la prevenzione, la protezione e la preparazione, comprese le previsioni di alluvione e il sistema di allertamento nazionale, tenendo conto delle caratteristiche del bacino idrografico o del sottobacino interessato.

Le Autorità di Bacino Distrettuali sono le autorità competenti nel distretto idrografico per la redazione del piano, quindi svolgono le attività per la realizzazione e la produzione delle

mappe di pericolosità e di rischio, mentre le Regioni, in coordinamento tra loro e con il Dipartimento nazionale della Protezione Civile, sono responsabili della parte dello stesso Piano relativa al sistema di allertamento nazionale, statale e regionale per il rischio idraulico connesso con le piene.

La Direttiva 2007/60/CE ha inoltre fissato le scadenze per le tre fasi della produzione del piano che ogni Stato membro doveva rispettare: entro il 22 settembre 2011 doveva essere completata la valutazione preliminare del rischio di alluvione, entro il 22 giugno 2013 dovevano essere realizzate e aggiornate le mappe della pericolosità da alluvione e quella del rischio di alluvione. Entro il 22 giugno 2015 doveva essere ultimato e pubblicato il Piano di Gestione e del Rischio Alluvioni.

La normativa prevede, inoltre, che le tre fasi per la produzione del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni siano soggette ad un riesame periodico ogni sei anni tenendo conto degli effetti dei cambiamenti climatici sul verificarsi delle alluvioni. Quindi alla scadenza del 2018 era previsto un primo riesame della valutazione preliminare del rischio cui avrebbe fatto seguito la revisione delle mappe di pericolosità e rischio nel 2019 e del piano di gestione del rischio nel 2021.

4.3 Gli strumenti di pianificazione: le mappe di pericolosità e le mappe di rischio

La mappatura della pericolosità è uno strumento utilizzato già dalla seconda metà del secolo scorso in alcune nazioni, come Stati Uniti (Burby, 2011), Canada (Watt, 2000), e anche in alcuni paesi dell'Unione Europea.

Per la produzione della mappa di pericolosità possono essere usati differenti metodi di varia complessità a seconda dei dati, delle risorse e dei tempi che si hanno a disposizione (Buchele, et al., 2006).

Secondo la Direttiva Europea 2007, tra le altre cose, è necessario considerare la pericolosità delle alluvioni su tre scenari, dei quali uno frequente, uno eccezionale (con periodo di ritorno di ordine secolare) e uno catastrofico, mentre in alcuni Stati, a seconda delle normative vigenti, se ne prendono in esame anche altri tenendo in considerazione alluvioni con differenti tempi di ritorno (in nazioni come Italia e Spagna vengono considerati tre scenari, in Gran Bretagna e Svizzera quattro, mentre in Norvegia addirittura sei) (De Moel, Van Alphen, & Aerts, 2009).

Nonostante l'utilizzo di differenti modelli e la varietà dei dati a disposizione, la produzione della mappa di pericolosità da alluvione consiste prevalentemente in tre passaggi (De Moel, Van Alphen, & Aerts, 2009).

Innanzitutto, mediante l'analisi idrologica si determinano gli eventi di piena corrispondenti ad un determinato tempo di ritorno, successivamente si procede con la modellazione idraulica con modelli monodimensionali o bidimensionali che permettono di ricavare i livelli idrici associati agli eventi di piena considerati, infine, l'ultima fase si focalizza sulla perimetrazione delle aree inondabili confrontando l'altezza raggiunta dall'acqua con il modello digitale del terreno (DTM).

L'accuratezza di quest'ultimo è di fondamentale importanza, infatti, la qualità della mappa di pericolosità dipende fortemente da quella del DTM utilizzato (Buchele, et al., 2006), (Knebl, Yang, Hutchison, & Maidment, 2005).

A seconda dei dati a disposizione e della morfologia del territorio i modelli possono lavorare tanto in moto permanente che in moto vario, mentre l'uso del moto uniforme è del tutto inadeguato.

Oltre al livello idrico, nelle mappe di pericolosità, possono o devono essere considerati anche altri parametri che possono essere determinanti come: la velocità del flusso e la durata dell'inondazione (Ahmadisharaf, Kalyanapu, & Chung, 2015), (Soetanto & Proverbs, 2004). Per ricavare i livelli idrici da eventi di piena in sezioni con geometrie semplici è possibile utilizzare modelli monodimensionali mentre in caso di geometrie e modelli di flusso complessi, dove è richiesto il calcolo di parametri locali come la velocità del flusso, è indispensabile l'utilizzo di modelli bidimensionali (Buchele, et al., 2006).

In Italia la Direttiva Europea 2007 è stata recepita con il D.Lgs. 49/2010 che descrive la pericolosità da alluvione come «la probabilità di accadimento di un evento alluvionale in un intervallo temporale prefissato e su una determinata area».

L'obiettivo delle mappe di pericolosità da alluvione è quello di delimitare l'estensione delle aree che potrebbero essere inondate secondo tre diversi scenari di evento, corrispondenti a bassa, media, elevata probabilità di accadimento.

Il D.Lgs 49/2010, prevede che nelle mappe di pericolosità siano riportati almeno l'estensione dell'inondazione, il livello o altezza idrica e le caratteristiche del deflusso (velocità e portata). Inoltre, a differenza della Direttiva europea dove è presente solamente il tempo di

ritorno per lo scenario di media probabilità, nel D.Lgs 49/2010 vengono definiti i seguenti intervalli di tempo di ritorno per i tre diversi scenari considerati:

- a) $20 \leq T \leq 50$ anni (alluvioni frequenti – elevata probabilità di accadimento, P3);
- b) $100 \leq T \leq 200$ anni (alluvioni poco frequenti – media probabilità di accadimento, P2);
- c) $200 < T \leq 500$ anni (alluvioni rare di estreme intensità – bassa probabilità di accadimento, P1)

Probabilità	Direttiva 2007/60/CE	DLgs 49/2010
Bassa (eventi estremi)	-	$Tr \leq 500$ anni
Media	≥ 100 anni	$100 \leq Tr \leq 200$ anni
Alta	-	$20 \leq Tr \leq 50$ anni

Tabella 1. Tempi di ritorno per ciascun scenario di probabilità

In base al tipo di approccio adottato vengono distinti tre differenti livelli delle mappe di pericolosità ottenute: il livello base, quando si sono eseguite unicamente analisi di tipo storico-inventariale e geomorfologiche; il livello intermedio, quando sono state applicate analisi idrologico-idrauliche di tipo speditivo con un grado di attendibilità medio; il livello avanzato, quando le analisi idrologico-idrauliche risultano essere specifiche e ad alto grado di attendibilità.

Inoltre, le mappe di pericolosità devono essere riportate su un adeguato supporto idrografico utilizzando una scala possibilmente 1: 10.000 ma non inferiore a 1: 25.000 (Figura 7).

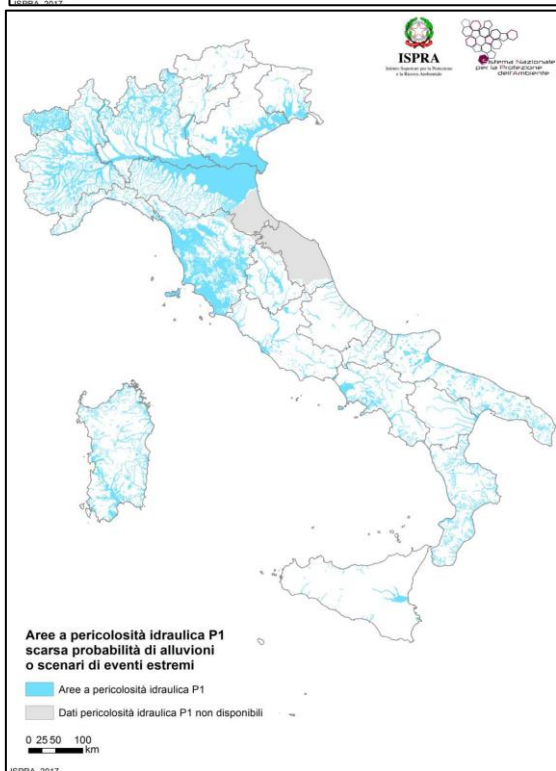
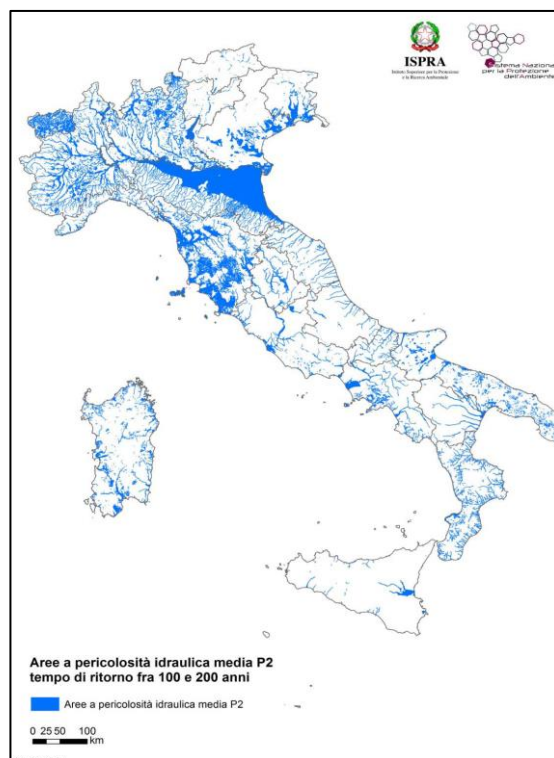
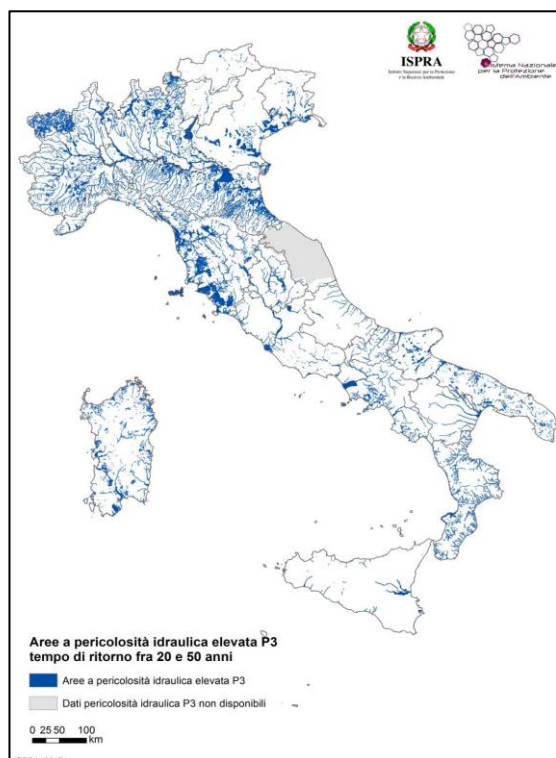


Figura 7. Mappe di pericolosità in Italia per i tre differenti scenari ad alta (P3), media (P2) e bassa pericolosità(P1)

La seconda tipologia di mappa che ogni nazione dell'Unione Europea deve produrre è la mappa del rischio, secondo la Direttiva 2007/60/CE con il termine “rischio alluvioni” si fa riferimento alla combinazione della probabilità di un evento alluvionale e delle potenziali conseguenze negative per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e l'attività economica derivanti da tale evento.

Queste devono essere espresse in termini di:

- a) numero indicativo di abitanti potenzialmente interessati;
- b) tipo di attività economiche insistenti sull'area potenzialmente interessata;
- c) impianti che potrebbero provocare inquinamento accidentale in caso di alluvione e aree protette potenzialmente interessate;
- d) aree in cui possono verificarsi alluvioni con elevato volume di sedimenti trasportati e colate detritiche.

Il D.Lgs 49/2010, oltre alle categorie sopracitate della direttiva, prende in considerazione ulteriori due categorie:

- e) infrastrutture e strutture strategiche (autostrade, ferrovie, ospedali, scuole, ecc.);
- f) beni ambientali, storici e culturali di rilevante interesse presenti nell'area potenzialmente interessata

Il rischio espresso secondo la formula di Varnes (Varnes, 1984) è espresso come prodotto della pericolosità e del danno potenziale in corrispondenza di un determinato evento:

$$R = pvE$$

dove:

- p (pericolosità) è la probabilità di accadimento, all'interno di una certa area e di un certo intervallo di tempo, di un fenomeno naturale di assegnata intensità;
- E (elementi esposti) rappresenta il valore degli elementi a rischio (intesi come persone, beni, patrimonio culturale ed ambientale, ecc.) presenti nell'area inondabile;
- v (vulnerabilità) è il grado di perdita o danno associato a un elemento o a un gruppo di elementi a rischio soggetto al fenomeno preso in considerazione.

La valutazione del rischio comporta molte difficoltà perché, quantificare il valore esatto del danno potenziale (dato dal prodotto tra elementi esposti e vulnerabilità), è un passaggio molto complesso, quindi, si è ritenuto necessario adottare alcune semplificazioni.

Le categorie di elementi esposti già indicati nel D.P.C.M. 29.09.89 che devono essere considerati come elementi a rischio sono innanzitutto l'incolumità delle persone e, successivamente, ma sempre con carattere di priorità:

- a) gli agglomerati urbani comprese le zone di espansione urbanistica;
- b) le aree su cui insistono insediamenti produttivi, impianti tecnologici di rilievo, in particolare quelli definiti a rischio ai sensi di legge;
- c) le infrastrutture a rete e le vie di comunicazione di rilevanza strategica, anche a livello locale;
- d) il patrimonio ambientale e i beni culturali di interesse rilevante;
- e) le aree sede di servizi pubblici e privati, di impianti sportivi e ricreativi, strutture ricettive ed infrastrutture primarie.

Quindi è possibile classificare gli elementi esposti in sei macrocategorie:

- 1. Zone urbanizzate, con indicazione sul numero di abitanti potenzialmente interessati da possibili eventi alluvionali;
- 2. Strutture strategiche;
- 3. Infrastrutture strategiche principali;
- 4. Beni ambientali, storici e culturali di rilevante interesse;
- 5. Distribuzione e tipologia delle attività economiche insistenti sull'area potenzialmente interessata;
- 6. Zone interessate da insediamenti produttivi o impianti tecnologici, potenzialmente pericolosi dal punto di vista ambientale.

La vulnerabilità di un'area nel suo complesso rappresenta, invece, la percentuale del valore perduto a causa dell'evento considerato. È indispensabile, per la sua esatta determinazione, conoscere la tipologia, la magnitudo e la frequenza del fenomeno considerato ed inoltre il comportamento delle strutture quando sono soggette all'evento.

Quindi con opportune semplificazioni è possibile ottenere le quattro classi omogenee di danno potenziale, queste tengono in considerazione, innanzitutto il danno alle persone, poi quello di tessuto socioeconomico e infine ai beni non monetizzabili.

Le quattro classi sono così suddivise:

D4 (*Danno potenziale molto elevato*): aree in cui si può verificare la perdita di vite umane, ingenti danni ai beni economici, naturali storici e culturali di rilevante interesse, gravi disastri ecologico-ambientali;

D3 (Danno potenziale elevato): aree con problemi per l'incolumità delle persone e per la funzionalità del sistema economico, aree attraversate da linee di comunicazione e da servizi di rilevante interesse, le aree sedi di importanti attività produttive;

D2 (Danno potenziale medio): aree con limitati effetti sulle persone e sul tessuto socioeconomico. Aree attraversate da infrastrutture secondarie e attività produttive minori, destinate sostanzialmente ad attività agricole o a verde pubblico;

D1 (Danno potenziale moderato o nullo): comprende le aree libere da insediamenti urbani o produttivi dove risulta possibile il libero deflusso delle piene.

Una volta definite le quattro classi di danno (D1, D2, D3, D4) ed essendo già stati definiti i tre livelli di pericolosità (P1, P2, P3), è possibile stabilire le seguenti quattro classi di rischio R1, R2, R3, R4 (Figura 8) e quindi può essere sviluppata la mappa di rischio.

Le quattro classi simboleggiano il grado di rischio presente nella determinata zona:

- **R4** corrisponde ad un rischio molto elevato, in questo caso è possibile la perdita di vite umane, danni gravi agli edifici e distruzione di attività socioeconomiche;
- **R3** rappresenta il rischio elevato dove sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture;
- **R2** corrisponde al rischio medio per il quale sono possibili danni minori agli edifici e alle infrastrutture ma non pregiudicano l'incolumità delle persone;
- **R1** raffigura un rischio moderato o nullo dove i danni sociali economici ed al patrimonio ambientale sono nulli.

CLASSI DI RISCHIO		CLASSI DI PERICOLOSITA'		
		P3	P2	P1
CLASSI DI DANNO	D4	R4	R4	R2
	D3	R4	R3	R2
	D2	R3	R2	R1
	D1	R1	R1	R1

Figura 8. Matrice del rischio per il reticolo principale

4.4 Limiti delle mappe di pericolosità

Le mappe di pericolosità del territorio italiano presenti nel PAI e nel PGRA manifestano diverse criticità che, al fine di produrre l'informazione richiesta su tutto il territorio italiano, devono essere prese in considerazione.

Come riportato nel capitolo precedente, secondo il D.Lgs n. 49/2010, le mappe di pericolosità devono rappresentare la situazione per tre differenti scenari che corrispondono ai tre periodi di ritorno presi in considerazione.

La prima problematica da affrontare riguarda la generale carenza di dati quantitativi relativi anche alla semplice perimetrazione di eventi storici, per non parlare di dati di livello e velocità, anche raccolti indirettamente. I in molti casi, anche considerando gli eventi alluvionali più frequenti (con tempo di ritorno tra 20 e 50 anni) non sono (neppure lontanamente) presenti dati sufficienti che permettano di costruire un modello di probabilità del processo stocastico "alluvione in un dato sito" e, di conseguenza, di creare mappe di pericolosità di un determinato territorio di tipo empirico-statistico.

La soluzione più generalmente adottata è quella di trasferire il carattere stocastico dell'alluvione a quello della precipitazione (Merz, Blöschl, & Humer, 2008), assumendo così che gli effetti al suolo di assegnato tempo di ritorno siano generati da un evento di precipitazione iso-frequente.

Questa semplificazione risolve in effetti problemi relativi alla carenza dei dati ma introduce diverse problematiche collaterali, per molti aspetti superabili, ma che comunque vale la pena di considerare.

L'ipotesi di isofrequenza ne presuppone un'altra tutt'altro che trascurabile: si considerino solo processi alluvionali da inondazione diretta e non le (numerose e tutt'altro che trascurabili) ulteriori classi di fenomeni di interesse per la gestione del rischio idrogeologico. Inoltre prevede che tutta la catena idrologica, dalla depurazione delle perdite, alla propagazione della piena, fino alla generazione dei livelli in alveo (e sul territorio), sia tale da conservare la probabilità iniziale. Tale ipotesi risulta relativamente vulnerabile (Bocchiola & Rosso, 2009) a causa di numerosi fattori come la presenza di dighe di regolazione o di casse di espansione, oppure la scarsa manutenzione o la rottura di un argine o per la stagionalità e l'umidità iniziale.

Un'altra tematica di estrema importanza, peraltro connessa con le precedenti, è rappresentata dalla comprensibile impossibilità di una copertura completa del territorio in termini

modellistici, sia per ragioni economiche che per quantità e qualità di dati osservazionali. Generalmente si procede con un approccio gerarchico, ove la mappatura è condotta a partire dai corsi d'acqua principali. Questo fatto comporta la presenza di zone “bianche” nell'intorno dei corsi d'acqua secondari, questa mancanza di mappatura è una condizione che non può essere trascurata, infatti, come studiato in letteratura (Camarasa-Belmonte & Soriano-Garcia, 2012), una parte non irrilevante dei danni da inondazione è causato proprio da corsi d'acqua secondari o effimeri.

4.5 Introduzione di una nuova metodologia: l'analisi di suscettività

L'analisi di suscettività per le alluvioni si è avviata in tempi relativamente recenti. Al contrario delle classiche mappe di pericolosità, è un approccio poco indicato come strumento a supporto di regolazione urbanistica. Appare invece come un eccellente ausilio supporto per la pianificazione e la gestione del territorio in ambito di protezione civile.

Per

questo motivo, l'introduzione di tale tipologia di mappatura non si configura come un'alternativa alle perimetrazioni del PAI e del PGRA ma, come strumento complementare di supporto per la risoluzione di alcune delle problematiche trattate in precedenza.

L'analisi di suscettività è un metodo studiato e utilizzato da molto tempo nel campo delle frane (Reichenbach, Rossi, Malamud, Mihir, & Guzzetti, 2018), mentre è stato adottato solo ultimamente per le alluvioni. A differenza delle mappe di pericolosità, questo non tratta l'evento in relazione al tempo di ritorno, quindi alla sua frequenza e alla sua magnitudo, ma si basa su quanto un determinato territorio sia predisposto ad essere sede dell'evento considerato.

Per la produzione di tali mappature, è necessario avere a disposizione un sufficiente numero di eventi nel territorio considerato sui quali addestrare e convalidare la procedura. Questo è uno dei motivi per il quale questa analisi è molto impiegata nel campo delle frane: gli effetti al suolo di una frana sono duraturi nel tempo e quindi sono facili da rilevare, mentre per le alluvioni è più difficile trovare una mappatura completa del carattere dell'evento.

Proprio per porre rimedio a questa criticità, negli ultimi decenni sono diventati di fondamentale importanza i dati di osservazione tramite satellite, per l'individuazione dei disastri avvenuti nei diversi Paesi (Figura 9).

L'articolo di Voigt (Voigt, et al., 2016) mostra come la mappatura satellitare delle emergenze, tramite opportuni sensori ad apertura sintetica (SAR), che sono in grado di rilevare immagini sia di giorno che di notte, anche attraverso le nuvole e quindi di verificare quasi in tempo reale l'estensione delle alluvioni, abbia avuto un incremento notevole negli anni, passando dalle 7 mappature del 2000 alle 124 del 2014 e diventando la tecnica più utilizzata in Asia e in Europa.

Un programma utilizzato per l'osservazione satellitare della Terra è Copernicus Emergency Management Service lanciato dalla Commissione Europea nel 1998 con il principale obiettivo di garantire all'Europa una sostanziale indipendenza nel rilevamento e nella gestione dei dati sullo “stato di salute del pianeta”. Il servizio di gestione delle emergenze è stato lanciato nel 2015 con una copertura globale, ed affronta numerose situazioni di necessità causate dalle catastrofi naturali, comprese le alluvioni: è quindi in grado di fornire in tempi brevi una mappatura delle aree colpite da alluvione.



Figura 9. Aree inondate dal fiume Tanaro ad Alessandria a monte della confluenza con il fiume Po, immagine Cosmo-SkyMed del 26/11/2016 ore 6:05

Un altro fattore, che ha inciso sullo sviluppo di questa metodologia, anche nell'ambito delle alluvioni, è stato l'avvento di nuove tecniche basate su GIS (Geographic Information System). Il modo di trattare e studiare tali fenomeni è radicalmente cambiato poiché queste innovazioni hanno permesso l'introduzione di nuove tecniche in grado di sostituire quelle manuali, ottimizzando i tempi di calcolo con costi ragionevoli (Morelli, Battistini, & Catani, 2014) (Cao, et al., 2016)

Infine, un altro vantaggio di questa nuova metodologia, rispetto alle perimetrazioni di pericolosità del PAI, è che una mappa prodotta in un breve periodo sia in grado di classificare la totalità del territorio secondo un criterio il più omogeneo possibile, dalle zone vicino ai

corsi d'acqua principali, in generale già classificate dal PAI, fino alle zone più lontane da essi, ovvero spesso le cosiddette “aree bianche” prive di una definizione della reale pericolosità idraulica.

5 L'ANALISI DI SUSCETTIVITÀ

5.1 Metodologia dell'analisi di suscettività

La difficoltà nel produrre le mappe di pericolosità e di rischio ha portato quindi ad una perimetrazione solo parziale dei territori, per questo motivo si è optato per l'utilizzo di un'altra metodologia più speditiva, che richiedesse parametri facilmente reperibili e in grado di mappare la totalità del territorio.

In questo capitolo si tratta dell'analisi di suscettività, una metodologia “nuova” nel campo delle alluvioni ma di cui sono già presenti numerosi studi in letteratura, si tratta di una metodologia che mette in relazione l'evento considerato, in questo elaborato le alluvioni, ad un determinato numero di fattori predisponenti di carattere geo-lito-morfologico o climatico che ne favoriscono o meno il verificarsi. Quindi tramite questa analisi si individuano in un territorio le aree che sono soggette o meno ad essere colpite dall'evento considerato.

Di seguito vengono illustrate le fasi per la produzione della mappa di suscettività:

1. La prima operazione consiste nel campionare in un dataset gli eventi storici del fenomeno trattato che si sono presentati su un determinato territorio: maggiore è il numero di eventi che si hanno a disposizione maggiore sarà l'accuratezza della mappa prodotta. I dati saranno quindi suddivisi e utilizzati per la calibrazione e per la validazione del modello.
2. Dopo aver catalogato gli eventi, vengono individuati i fattori predisponenti del fenomeno considerato, che devono essere in grado di rappresentare al meglio il territorio. Infatti, pur occupandosi della descrizione di uno stesso fenomeno fisico un fattore predisponente potrebbe avere grande impatto in una determinata area e non avere alcuna influenza in un'altra (Tehrany, Pradhan, & Jebur, 2013), (Kia, et al., 2012) perciò la scelta di quali utilizzare è un'operazione di grande importanza in quanto la qualità finale della mappa dipende dalla citata operazione, cioè dalla capacità del modello di descrivere il territorio in maniera esaustiva nelle sue caratteristiche geo-lito-morfologiche (Guzzetti, Carrara, Cardinali, & Reichenbach, 1999).

I fattori predisponenti per le alluvioni sono di diverse tipologie: possono essere indici semplici come pendenza, elevazione, curvatura, litologia, distanza dal corso d'acqua, uso del suolo e copertura del suolo (*land use and land cover*, LULC), intensità di precipitazione, oppure indici definiti complessi come l'indice di vegetazione (NDVI), l'indice di umidità (TWI), lo *stream power index* (SPI) ecc.

Gli indici possono essere ricavati o direttamente dal modello digitale del terreno (DTM) come elevazione, pendenza, curvatura e distanza dal reticolo, o dalle immagini satellitari come il LULC, o dalle mappe geologiche come la litologia oppure dalle serie storiche come le precipitazioni.

Dopo la scelta dei fattori predisponenti per il territorio considerato, ognuno di questi viene diviso in un determinato numero di classi, attraverso i vari strumenti di riclassificazione in ambiente GIS.

3. La terza fase consiste nel mettere in relazione i fattori predisponenti e l'occorrenza o meno di eventi storici registrati attraverso l'uso di un determinato modello, tra i quali si possono citare i più usati come la *frequency ratio* (FR), la *logistic ratio* (LR), modelli decisionali ad albero (*decision tree*, DT), modello dei pesi (*weight of evidence*, WOE), le reti neurali (*artificial neural networks*, ANN) ecc.
4. Infine, si ha la rappresentazione della mappa di suscettività che può essere raffigurata tramite il *flood susceptibility index* (FSI) e quindi senza una suddivisione in classi oppure l'intera zona può essere suddivisa in aree con un determinato grado di suscettività, il *range* e il numero dei livelli dipendono dal territorio preso in esame, vanno dalla bassa suscettività o trascurabile, quando il territorio è poco predisposto per l'evento considerato, fino alla suscettività alta o molto alta, cioè quando tutte le caratteristiche del territorio lo portano ad essere molto predisposto per essere sede dell'evento alluvionale.

5.2 Analisi di suscettività in Italia e nel mondo: aree di interesse e metodi utilizzati

In Italia le mappe di suscettività ottenute con il metodo descritto precedentemente sono molto utilizzate nell'ambito del rischio frane (Bartolomei, et al., 2006): infatti solo sul nostro territorio ne sono state censite più di 600.000.

Nell'ambito della suscettività da alluvione, invece, si tratta di un metodo ancora poco utilizzato anche per via della scarsa disponibilità di dati storicamente registrati. Tuttavia, si attesta in alcuni studi l'utilizzo di questo metodo per la produzione di mappe, come per esempio l'analisi elaborata da Forte 2005 (Forte, Pennetta, & Strobl, 2005) nel Salento, nella quale viene proposta una mappatura di suscettività prendendo in considerazione fattori come la litologia, la pendenza e l'intensità di precipitazione.

Un altro rilevante studio sulla suscettività da alluvione in Italia è quello di Degiorgis (Degiorgis, et al., 2012) che tratta l'area del bacino del Tanaro, prendendo in considerazione ulteriori caratteristiche morfologiche del territorio (pendenza, altezza del sito, distanza dal reticolo idrografico e concavità).

All'estero invece, soprattutto in alcune regioni in cui il rischio alluvioni è molto elevato e in cui potrebbero non esserci modellazioni idrologico-idrauliche, questo tipo di procedura è molto diffusa e, negli ultimi anni, si sono studiati nuovi metodi per individuare quello che meglio rappresenti la situazione reale.

Numerose analisi di suscettività sono state svolte in varie regioni della Malesia, una delle nazioni più colpite dal fenomeno delle alluvioni, con notevoli perdite in termini di vite umane e danni economici e all'ecosistema (Pradhan & Youssef, 2011).

In uno studio di suscettività svolto nel nord-est della Malesia (Tehrany, Pradhan, & Jebur, 2013) sono stati testati due diversi modelli, per confrontarne l'efficienza. Il primo utilizza un modello decisionale ad albero (DT), metodo nuovo nell'ambito dell'analisi di suscettività da alluvione, mentre il secondo prevede l'utilizzo congiunto della *frequency ratio* (FR) e della *logistic regression* (LR) per conseguire un migliore risultato.

Sempre nel nord-est della Malesia (Tehrany, Pradhan, & Jebur, 2014) si è utilizzato il metodo dei pesi (WOE), considerando i medesimi dieci fattori predisponenti citati nell'articolo precedente.

In un altro studio svolto nel sud-est della Malesia (Kia, et al., 2012), sono stati considerati sette fattori predisponenti ed è stata realizzata la mappa di suscettività grazie all'utilizzo delle reti neurali (*artificial neural network*, ANN) impiegate anche vicino al fiume Yangtze in Cina (Chau, Wu, & Li, 2005).

Diversi modelli per la suscettività da alluvione sono stati presi in esame anche in Iran (Khosravi, Nohani, Maroufini, & Pourghasemi, 2016) dove a causa della deforestazione per l'ampliamento delle aree urbane, il numero di danni causati da alluvioni è aumentato del 250% (Khosravi, Nohani, Maroufini, & Pourghasemi, 2016). In questo articolo sono stati impiegati il FR, il metodo dei pesi, l'*analytical hierarchy process model* (AHP) e la combinazione dei metodi FR e AHP. Sono state prese in esame 211 alluvioni avvenute nel passato, di cui il 70% è stato adoperato nella fase di calibrazione e la restante parte nella validazione (Ohlmacher & Davis, 2003), e dieci fattori predisponenti: pendenza, curvatura, elevazione, TWI, SPI, precipitazione, distanza dal reticolo idrografico, geologia, uso del suolo e NDVI. Nella stessa area geografica (Khosravi, et al., 2018) si è prodotta una mappa di suscettività impiegando diverse varianti del modello ad albero decisionale per poterli confrontare con i metodi precedentemente utilizzati.

Nel lavoro di Tehrany (Tehrany, et al., 2017) è stata prodotta una mappa di suscettività per la regione dello Xing guo in Cina. In questo caso sono stati confrontati quattro metodi: la LR, il FR, il metodo dei pesi, la combinazione dei metodi di frequency ratio e di regressione logistica e infine di LR e WOE. Sono stati campionati 190 eventi storici e sono stati utilizzati quindici fattori predisponenti.

5.3 PON – Governance

Il progetto «Programma Operativo Nazionale Governance e capacità istituzionale 2014-2020» si estende a tutto il territorio nazionale e si pone come obiettivo quello di sostenere il paese nello sviluppo, nel miglioramento e nel rafforzamento della capacità amministrativa e istituzionale, in linea con obiettivi della Strategia Europa 2020 (crescita intelligente, inclusiva e sostenibile).

Il programma dispone di una dotazione finanziaria di circa 828 milioni di euro che provengono dal Fondo Sociale Europeo (FSE) e dal Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (FESR), di cui oltre l'80% è assegnato alle regioni meno sviluppate (Basilicata, Calabria,

Campania, Puglia Sicilia) (PON- Governance e capacità istituzionale 2014-2020, 2018) mentre il restante è suddiviso tra le regioni in transizione e quelle più sviluppate (Figura 10)

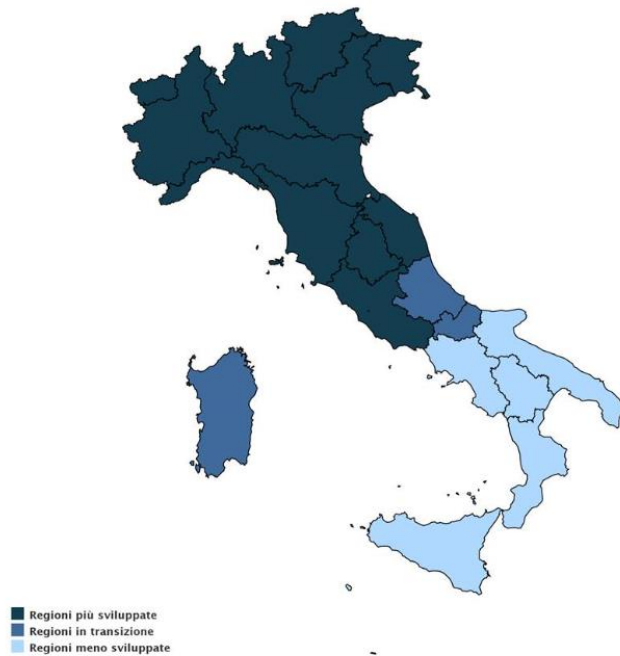


Figura 10. Suddivisioni in regioni più sviluppate, in transizione e meno sviluppate (Monitoraggio Politiche di Coesione Programmazione 2014-2020, 2018)

Tra tutti gli ambiti trattati dal PON Governance è presente anche il “programma di supporto al rafforzamento della governance in Italia in materia di riduzione del rischio idrogeologico e idraulico ai fini di protezione civile”, il cui il soggetto attuatore è il Dipartimento della Protezione Civile. Il rafforzamento della governance riguarda le misure non strutturali di mitigazione del rischio ai fini di protezione civile, destinate solo alle cinque regioni meno sviluppate.

I servizi che riguardano il rafforzamento della governance sono:

- progetti standard e linee guida per la programmazione degli interventi in materia di riduzione del rischio idrogeologico e idraulico (Attività A);
- affiancamento delle Regioni in merito alla corretta applicazione delle linee guida (Attività B).

La programmazione degli interventi (attività A) è suddivisa per le seguenti fasi:

- Fase generale 1: “Analisi dei fabbisogni e individuazione dei contesti territoriali”.
- Fase generale 2: Analisi per tipo di rischio e definizione di scenari di rischio.

Fase specifica 2.1: “Potenziamento dei sistemi di previsione e di allertamento: mappatura della pericolosità dei fenomeni idrogeologici e idraulici non analizzati nei PAI e/o PGRA”.

- Fase generale 3: “Analisi ed eventuale aggiornamento e implementazione dei Piani di emergenza comunali, intercomunali, sovracomunali e regionali”.
- Fase generale 4: “Valutazione operatività del sistema di risposta in caso di emergenza”.
- Fase generale 5: “Programmazione degli interventi per il miglioramento dell’operatività del sistema di gestione dell’emergenza e della mitigazione delle condizioni di rischio”.
- Fase generale 6: “Valutazione complessiva dell’efficacia degli interventi”.

In questo quadro generale, la produzione delle mappe di suscettività si pone all’interno della fase 2, in particolar modo nella fase specifica 2.1 dove si provvede alla mappatura delle aree non trattate dai PAI e dai PGRA.

La prima mappa di suscettività realizzata nell’ambito del progetto PON è stata quella della regione Puglia: infatti, avendo a disposizione una buona perimetrazione delle aree storicamente alluvionate, è stato possibile produrre una prima versione della mappa stessa.

In questo studio iniziale si sono confrontati i diversi fattori predisponenti, citati dalla letteratura, e si è optato per l’utilizzo di quei quattro che rappresentassero al meglio il territorio: la pendenza, la distanza dal reticolo, la quota relativa e la litologia. (Diozzi & Menduni, 2017). Sempre nel sopracitato elaborato di tesi, dopo aver scelto i fattori predisponenti, è stato validato tramite l’analisi di correlazione, come nessun fattore fosse correlato con gli altri.

Due fattori, la pendenza e la quota relativa, sono ricavati direttamente dal Modello Digitale del Terreno (DTM), la distanza dai corsi d’acqua utilizza le informazioni contenute all’interno del reticolo idrografico cartografato sulla carta tecnica regionale, mentre lo strato informativo della litologia sfrutta le indicazioni fornite dalla carta geo-litologica regionale in merito alla permeabilità media dei singoli strati litologici.

In generale, all’interno dei metodi geomorfologici, la precisione del DTM è di fondamentale importanza per la realizzazione dall’analisi di suscettività: infatti, dall’accuratezza di quest’ultimo, dipendono i fattori predisponenti ricavati e quindi la qualità della mappa (Kia, et al., 2012). Il DTM è la rappresentazione della superficie geodetica priva di elementi quali vegetazione, edifici ed altri manufatti e può essere prodotto con diverse tecniche, come

quelle di telerilevamento – dove si prevede l’elaborazione di dati acquisiti attraverso un sensore montato su satellite – oppure possono provenire da cartografia o misure fotogrammetriche. Viene rappresentato in formato *raster* in cui ogni cella è identificata mediante delle coordinate X, Y e gli viene assegnato il valore Z che rappresenta la quota di quella cella in metri sul livello del mare. Per l’analisi di suscettività delle cinque regioni del progetto PON si è scelto l’utilizzo di una maglia che fosse disponibile a tutte le regioni con il medesimo passo, ovvero di 5 metri, questo permette di essere sufficientemente accurati e al tempo stesso essere in grado di produrre una mappatura per territori ampi.

5.4 Fattori predisponenti utilizzati

La pendenza è uno dei fattori predisponenti di più alto impatto per quanto riguarda le alluvioni (Chapi, et al., 2017), viene usato nella maggior parte degli studi in letteratura nell’ambito della suscettività da alluvione e mostra come le zone a bassa pendenza siano maggiormente predisposte ad eventi alluvionali (Tehrany, Pradhan, & Jebur, 2013), (Khosravi, Nohani, Maroufini, & Pourghasemi, 2016).

La pendenza locale, ricavata dal DTM 5x5 m mediante l’utilizzo del software *ArcGIS 10.7*, è stata calcolata sfruttando una finestra mobile di dimensione 3x3 pixels e con metodo planare. Successivamente i valori ottenuti sono stati suddivisi in quattro classi.

Un altro fattore predisponente presente in tutti gli studi di suscettività da alluvione (Tehrany, Pradhan, & Jebur, 2014), (Khosravi, et al., 2018), (Samanta, Pal, & Palsamanta, 2018) e uno di quelli di maggiore importanza è la distanza dal reticolo idrografico (Fernandez & Lutz, 2010), (Glenn, et al., 2012). Come riportato negli articoli sopra citati esiste una forte correlazione, facilmente intuibile, tra le aree inondate e la vicinanza al reticolo idrografico: infatti le zone più vicine ai corsi d’acqua sono quelle più soggette ad essere alluvionate mentre, allontanandosi dal reticolo, questa predisposizione decresce.

Il tool “*euclidean distance*” in ambiente *GIS* ha permesso il calcolo della distanza euclidea di ogni *pixel* dal reticolo idrografico. Infine, il fattore predisponente della distanza è stato suddiviso in classi costruite in base alle caratteristiche del territorio preso in esame.

L’elevazione rispetto al livello del mare, ovvero la quota assoluta, è un fattore molto utilizzato in letteratura (Tehrany, Pradhan, & Jebur, 2014), ma nel metodo proposto si è deciso di utilizzare la quota relativa, cioè la differenza di quota tra il reticolo idrografico e

quella del DTM circostante. Si è optato per questa decisione dato che la quota assoluta trascura il legame tra la quota di un punto del reticolo e quella del territorio a lui circostante. La costruzione dello strato informativo della quota relativa viene effettuata tramite il software *ArcGIS* e consiste nel mettere in relazione ogni punto del territorio con i punti circostanti all'interno di un determinato buffer, per determinarne la differenza di elevazione (Zhao, Pang, Xu, Yue, & Tu, 2017). La dimensione di quest'ultimo, per far in modo che il minimo locale all'interno del buffer sia con buona probabilità un punto del reticolo idrografico, è stata correlata alla densità di drenaggio e quindi la distanza media tra i corsi d'acqua. Dopo aver definito la massima distanza di ruscellamento in funzione della densità di drenaggio, ovvero come metà di essa, si è costruito un raster dei minimi locali con raggio di esplorazione l_0 (*length of overland flow*) definito nella seguente formula:

$$l_0 = \frac{1}{2D}$$

dove per l'appunto D è la densità di drenaggio (Dingman, 1978). Infine, viene sottratto al DTM di partenza il raster dei minimi locali così da ottenere lo strato informativo delle quote relative che è successivamente suddiviso in un determinato numero di classi.

Infine, la permeabilità del suolo è un fattore che viene spesso preso in considerazione nel campo della suscettività da alluvione (Hong, et al., 2017). In letteratura uno dei fattori più utilizzati che rappresenta questa caratteristica è la litologia che considera la natura litologica del suolo e utilizzato insieme ad altri fattori come l'uso e la copertura del suolo riesce a rappresentare in maniera adeguata la permeabilità del territorio (Samanta, Pal, & Palsamanta, 2018).

Inizialmente per il calcolo della mappa di suscettività si è utilizzato il parametro della litologia, ricavato dalle carte geologiche pubblicate sul sito dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) all'interno del progetto CARG (CARtografie Geologiche), ma dato che il solo utilizzo di questo fattore non rappresentava al meglio la permeabilità del territorio, successivamente si è deciso di utilizzare il *Curve-Number* (CN), un parametro che non considera solamente la natura litologica ma anche la copertura del suolo.

Il parametro CN è un numero adimensionale che varia tra 30 per suoli permeabili con elevati tassi di infiltrazione a valori fino a 100 per corpi idrici e suoli completamente impermeabili. Per la valutazione di questo parametro innanzitutto si è suddiviso il suolo in quattro classi in base alla sua capacità di assorbimento:

-Gruppo A: suoli aventi scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde con scarsissimo limo e argilla, ghiaie profonde molto permeabili. Capacità di infiltrazione molto elevata.

-Gruppo B: suoli aventi moderata potenzialità di deflusso. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A e con maggiore aliquota di argilla e limo. Elevate capacità di infiltrazione anche in condizione di saturazione.

-Gruppo C: suoli aventi potenzialità di deflusso moderatamente alta. Suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e collodi. Scarsa capacità di infiltrazione.

-Gruppo D: suoli con potenzialità di deflusso molto elevata. Argille con elevata capacità di rigonfiamento, suoli sottili con orizzonti pressoché impermeabili in vicinanza della superficie. Scarsa capacità di infiltrazione a saturazione.

Per la determinazione del valore del CN (Tabella 2) si è fatto, infine, riferimento al tipo di copertura e quindi di uso del suolo.

Valori del parametro CN (adimensionale)	← Tipo idrologico Suolo →			
↓ Tipologia di Uso del Territorio	A	B	C	D
Coltivazioni, in presenza di pratiche di conservazione del suolo	62	71	78	81
Coltivazioni, in assenza di pratiche di conservazione del suolo	72	81	88	91
Terreno da pascolo: cattive condizioni	68	79	86	89
buone condizioni	39	61	74	80
Boschi, in presenza di copertura rada e senza sottobosco	45	66	77	83
Boschi e foreste, in presenza di copertura fitta e con sottobosco	25	55	70	77
Spazi aperti con manto erboso superiore al 75% dell'area	39	61	74	80
Spazi aperti con manto erboso compreso tra il 50 ed il 75% dell'area	49	69	79	84
Spazi aperti con manto erboso inferiore al 50% dell'area	68	79	86	89
Zone industriali (area impermeabile 72%)	81	88	91	93
Zone commerciali e industriali (area imperm. 85%)	89	92	94	95
Zone residenziali, lotti fino a 500 m ² (area imperm. 65%)	77	85	90	92
Zone residenziali, lotti di 500÷1000 m ² (area imperm. 38%)	61	75	83	87
Zone residenziali, lotti di 1000÷1500 m ² (area imperm. 30%)	57	72	81	86
Zone residenziali, lotti di 1500÷2000 m ² (area imperm. 25%)	54	70	80	85
Zone residenziali, lotti di 2000÷5000 m ² (area imperm. 20%)	51	68	79	84
Zone residenziali, lotti di 5000÷10000 m ² (area imperm. 12%)	46	65	77	82
Parcheggi, tetti, autostrade,	98	98	98	98
Strade pavimentate o asfaltate, dotate di drenaggio	98	98	98	98
Strade con letto in ghiaia	76	85	89	91
Strade battute in terra	72	82	87	89

Tabella 2. Valori del parametro CN

Dopo avere ottenuto la mappa del CN, quest'ultimo è stato diviso in classi a seconda della permeabilità: dalla classe più permeabile con CN bassi fino alla classe impermeabile con CN elevati.

5.5 Scelta del metodo: Weight Of Evidence (WOE)

Per la produzione della mappa di suscettività è stato individuato un modello di cui è solita valersi la letteratura soprattutto nell'ambito della suscettività da frana: il Weight Of Evidence (Pradhan, Oh, & Buchroithner, 2010), (Tseng, Lin, & Hsieh, 2015), (Neuhäuser & Terhorst, 2007).

Questo metodo è stato proposto originariamente per la ricerca mineraria (Bonham-Carter, 1989) e, in un secondo momento, è stato applicato alla suscettività da frana, e ora anche per le alluvioni (Tehrany, Pradhan, & Jebur, 2014).

Si tratta di un approccio statistico per l'analisi multifattoriale basato sul teorema di Bayes della probabilità condizionata, viene attribuito un peso ad ogni classe di tutti i fattori predisponenti, indipendenti tra loro, mettendo in relazione l'evento alluvionale con la presenza o l'assenza del fattore predisponente.

Il metodo è basato sul teorema di Bayes dove con "B" si indica ciascun fattore predisponente e con "B_i" ciascuna delle sue classi, mentre si indica con "s" l'evidenza dell'evento alluvionale, la probabilità di avere un evento "s" data la classe del fattore predisponente "B_i" è:

$$P(s|B_i) = \frac{[P(B_i|s) * P(s)]}{P(B_i)}$$

Dove:

$P(B_i|s)$ è la probabilità di trovare la classe "B_i" al verificarsi dell'evento "s";

$P(s)$ è la probabilità di avere un evento nell'area di studio;

$P(B_i)$ è la probabilità di trovare una determinata classe di un fattore predisponente.

Mentre la probabilità condizionale di trovare "s" dove non è presente la classe "B_i" è:

$$P(s|\bar{B}_i) = \frac{[P(\bar{B}_i|s) * P(s)]}{P(\bar{B}_i)}$$

Dove:

$P(\bar{B}_i)$ è la probabilità di non avere la classe "B_i";

$P(\bar{B}_i|s)$ è la probabilità di non avere la classe " B_i " dato l'evento " s ".

Le probabilità vengono calcolate come rapporto tra le aree, viene quindi assegnata a ciascuna classe di ogni fattore predisponente un determinato peso in base alla presenza o all'assenza dell'evento secondo le seguenti equazione:

$$W^+ = \ln \frac{P(B_i|s)}{P(B_i)}$$

$$W^- = \ln \frac{P(\bar{B}_i|s)}{P(\bar{B}_i)}$$

Dove:

W^+ : è il peso positivo che rappresenta il rapporto tra la probabilità di trovare una classe dove si è verificato l'evento e la probabilità di trovare la classe stessa in un luogo in cui non si è verificato l'evento, un peso positivo indica l'influenza della classe sul verificarsi dell'evento.

W^- : è il peso negativo che rappresenta il rapporto tra la probabilità di non trovare una classe dove si è verificato l'evento e la probabilità di non trovare la stessa classe in un'area priva di evento, tanto è maggiore, tanto è minore il valore della classe nel prevedere l'evento.

Il peso di contrasto " C " è la differenza dei due pesi ($C = W^+ - W^-$), questa rappresenta la correlazione spaziale nella valutazione alla predisposizione, valori positivi indicano una correlazione positiva mentre valori negativi indicano una correlazione negativa. Se il peso di contrasto è uguale a 0 vuol dire che la classe non è significativa nell'analisi (Tseng, Lin, & Hsieh, 2015).

Infine, la mappa di suscettività è calcolata attraverso una combinazione lineare dei diversi pesi di contrasto delle classi andando a calcolare la probabilità a posteriori come:

$$P_s(s) = \sum c_i \cdot \ln P(s)$$

6 CASO DI STUDIO: LA REGIONE SICILIANA

6.1 Storia delle normative nella Regione Siciliana

Con l'emanazione del decreto-legge n.132/99 la Regione Siciliana si è dotata del Piano Straordinario per l'Assetto Idrogeologico. Con questo è stata individuata una prima perimetrazione delle aree a rischio elevato e molto elevato per garantire l'incolumità delle persone e la salvaguardia delle infrastrutture. Secondo il decreto, la mappatura di queste aree doveva essere approvata dalle Autorità di bacino e dalle regioni entro il 31 ottobre 1999.

Con il decreto n. 298, 4 luglio 2000, l'Assessore regionale del Territorio e Ambiente ha adottato il Piano Straordinario e ha individuato le corrispondenti aree a rischio elevato e molto elevato (a scala 1: 50.000). L'articolo 4 del decreto, inoltre, prevedeva la possibilità di perfezionare la perimetrazione delle aree in relazione a successivi studi e ricerche, quindi nel settembre del medesimo anno la Giunta Regionale ha avviato l'aggiornamento del suddetto Piano. Innanzitutto si è ritenuto necessario definire una metodologia per l'individuazione delle aree a rischio che fosse più affidabile ed efficace rispetto a quelle adoperate nell'elaborazione del Piano Straordinario. Inoltre, in questo contesto si è lavorato con una maggiore accuratezza metodologica, altrimenti impossibile, visti i tempi ridotti per l'approvazione del Piano Straordinario: infatti, per esempio, nel Piano si è lavorato ad una scala di dettaglio inferiore (1: 50.000) mentre per l'aggiornamento è stata utilizzata, dove era disponibile, la carta tecnica regionale in scala 1: 10.000.

Con l'aggiornamento del Piano Straordinario sono stati pubblicati gli Atlanti contenenti le carte del rischio idrogeologico in scala 1:10.000 di 180 comuni siciliani.

Nello stesso periodo in relazione a quanto disposto dalla L.226/99 è stata avviata l'elaborazione del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI), attraverso questo piano la Sicilia si è dotata per la prima volta, di uno strumento strategico di pianificazione, di prevenzione e di gestione delle problematiche territoriali riguardanti la difesa del suolo. Questo è un atto di pianificazione territoriale di settore che fornisce un quadro di conoscenze e di regole basate anche sulle caratteristiche fisiche e ambientali del territorio, finalizzate a proteggere l'incolumità della popolazione esposta ed a salvaguardare gli insediamenti, le infrastrutture e in generale gli investimenti.

Il piano è composto da tre fasi: la prima consiste nell'individuazione delle aree soggette a rischio idrogeologico attraverso l'acquisizione delle informazioni disponibili sullo stato del dissesto; la seconda fase prevede la perimetrazione, la valutazione dei livelli di rischio e quindi la definizione delle conseguenti misure di salvaguardia; infine, l'ultima fase consiste nella programmazione della mitigazione del rischio.

Il riferimento territoriale del PAI è la regione Sicilia che costituisce un unico bacino di rilievo regionale. La Sicilia è stata suddivisa in 102 bacini idrografici e aree territoriali intermedie oltre alle isole minori; di questi 57 sono i bacini idrografici principali individuati nel Piano Straordinario approvato con il Decreto n.298 del 4 luglio 2000, mentre le aree intermedie sono state individuate con il successivo aggiornamento n.543 del 22 luglio 2002. Per ognuno dei bacini è stato realizzato un piano stralcio, che è stato pubblicato per singoli bacini nel caso dei più estesi mentre per gruppi di bacini nel caso di quelli meno estesi o intermedi.

Il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico è stato redatto dall'Assessorato al Territorio e Ambiente della Regione Siciliana, Dipartimento Territorio e Ambiente, mentre per l'aspetto idrologico – idraulico è stato necessario il supporto del Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Applicazioni Ambientali dell'Università degli Studi di Palermo –.

Considerata la vastità del territorio regionale è stato possibile in quanto stabilito dall'art. 17 della L.183/89 redigere il Piano di bacino per stralci che possono riguardare sottobacini o settori funzionali. La scelta dei bacini principali dai quali avviare il Piano stralcio per l'Assetto idrogeologico è stata stabilita sulla base dei seguenti criteri, citati direttamente dal piano:

- situazione generale di più elevato rischio idrogeologico sulla base delle perimetrazioni effettuate dal Piano Straordinario e relativo aggiornamento;
- contiguità territoriale con i bacini idrografici prioritari;
- appartenenza territoriale a tutte le province siciliane.

La redazione del Piano Stralcio per l'assetto idrogeologico della Regione ha avuto inizio, quindi, con lo studio dei bacini idrografici prioritari.

Per la produzione dei piani è stata condotta una ricerca approfondita sulle metodologie adottate dalle altre regioni italiane e Autorità di bacino, quindi fra le varie metodologie è stata scelta quella più adattabile al territorio siciliano e sotto l'aspetto tecnico più valida, anche se nel corso dei mesi sono stati introdotti piccoli aggiustamenti e modifiche a seconda

delle realtà territoriali riscontrate. Infatti, la Sicilia è una regione molto estesa e molto variegata dal punto di vista geologico, quindi pur volendo applicare la stessa metodologia ad ogni studio di bacino a causa delle caratteristiche differenti del territorio ogni piano avrà la sua precisa connotazione rispetto agli altri.

Il processo di redazione del PAI per tutti i bacini idrografici è stato completato nel 2007 con l'approvazione di 70 piani in cui sono stati studiati i 102 bacini idrografici ed i 5 raggruppamenti delle isole minori.

Con l'entrata in vigore della Direttiva 2007/60, recepita in Italia dal D.Lgs 49/2010, è stato avviato il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA) per tutti i distretti italiani. La regione Sicilia, prima identificata come un unico bacino regionale, viene successivamente raggruppata in un unico Distretto idrografico. Uno dei punti principali del PAI è la produzione delle mappe di pericolosità e di rischio da alluvione in scala non inferiore a 1:10.000 per ogni distretto: questa attività è stata indirizzata principalmente alla valorizzazione e omogeneizzazione degli studi e delle aree individuate nei PAI vigenti per i quali è stato verificato che avessero tutti i contenuti previsti dalla Direttiva.

La mappa prodotta dal PAI per la perimetrazione delle aree a rischio inondazione è stata svolta con un approccio omogeneo su tutto il territorio siciliano, seppur con studi idraulici condotti solamente per i tratti vallivi dei bacini idrografici e integrati, solo in alcuni casi, con l'individuazione di eventuali situazioni critiche lungo l'intera asta fluviale.

La stesura della mappa di pericolosità redatta dal PAI è stata condotta per i periodi di ritorno di 50, 100 e 300 anni (corrispondenti alle pericolosità P3, P2, P1) che coincidono con quelli stabiliti dalla normativa e quindi sono state individuate le aree soggette a pericolosità e rischio, per le quali sono disponibili i livelli di informazione richiesti.

Questa è organizzata per bacino idrografico e coordinate a livello di distretto idrografico. Per ciascun bacino sono riportati i valori delle portate dei tiranti e delle velocità, le mappe di rischio e l'elenco delle aree da studiare per l'aggiornamento delle mappe.

Per tutte le aree individuate dal PAI, per le quali non sono presenti i dati richiesti dalla direttiva, si è proceduto con l'aggiornamento e l'approfondimento per completare le valutazioni necessarie. Inoltre, si è provveduto a integrare la mappa prodotta dal PAI con nuove aree soggette a fenomeni di allagamento individuate con studi svolti successivamente. Per la quanto riguarda le mappe del rischio, la normativa indica con precisione i criteri di massima sia per la valutazione degli elementi esposti sia delle condizioni di rischio. La

mappa del rischio è il risultato del prodotto della pericolosità e del danno potenziale (dato dal prodotto del valore dell'elemento esposto e della vulnerabilità) in corrispondenza di un determinato evento. La vulnerabilità assume valori compresi tra 0 (struttura non vulnerabile) e 1 (struttura molto vulnerabile), ma data la difficoltà di stimare questo parametro gli è stato attribuito il valore 1, così è stata possibile la suddivisione delle aree a rischio in quattro classi da R1 a R4.

Le mappe di pericolosità e di rischio devono essere aggiornate, come detto in precedenza, ogni 6 anni poiché la probabilità di accadimento degli eventi alluvionali può cambiare a causa sia del cambiamento climatico, sia delle modifiche sul territorio come l'urbanizzazione: nel caso specifico della regione Sicilia il consumo del suolo è passato dal 3% del 1956 all'8% del 2010).

6.2 Criteri adottati per la produzione delle mappe di pericolosità

L'approccio per l'individuazione e la perimetrazione delle aree a rischio per inondazione è stato di tipo metodologico analitico e omogeneo su tutto il territorio siciliano.

Lo studio è stato condotto per i tempi di ritorno di 50, 100 e 300 anni e si può suddividere in quattro fasi:

- analisi storico-inventariale e analisi territoriale;
- studio idrologico;
- studio idraulico;
- perimetrazione delle aree a diversa pericolosità di inondazione e valutazione del rischio idraulico.

Per l'analisi storico inventariale sono state utilizzati: articoli in letteratura e pubblicazioni scientifiche, dati storici, dati archiviati nel catalogo Aree Vulnerate Italiane (AVI), ordinanze di protezione civile ecc.

La seconda fase consiste nello studio idrologico: l'obiettivo è quello di stimare la massima portata relativa alla sezione fissata del corso d'acqua in esame e la probabilità che tale portata venga raggiunta o superata. Come trattato in precedenza, uno dei problemi di questa metodologia è la mancanza di un campione rappresentativo di osservazioni di portate (o di

altezze idrometriche), quindi si è utilizzato un approccio probabilistico indiretto, stimando la portata di piena dalle precipitazioni nel bacino interessato. Lo studio per i tre tempi di ritorno presi in considerazione si basa sull'ipotesi di isofrequenza.

La prima operazione consiste nello studio della piovosità, al fine di condurre il calcolo dei parametri statistici necessari per la costruzione delle curve di probabilità pluviometrica (CPP).

Per la costruzione delle CPP si è fatto riferimento alle stazioni pluviografiche ricadenti nel territorio regionale siciliano ed aventi almeno dieci anni di funzionamento anche non consecutivo. Per ciascuna di queste stazioni si è proceduto alla raccolta dei dati delle altezze di pioggia massime annuali per assegnate durate di 1, 3, 6, 12, 24 ore. Per la determinazione delle CPP si è utilizzata la legge di distribuzione di probabilità del massimo valore meglio nota come legge di Gumbel.

Quindi si è proceduto con il modello di formazione del deflusso di piena, che permette di calcolare l'intensità di pioggia netta contribuente al deflusso di piena tolta dalla precipitazione lorda quella parte che si perde a causa dell'intercettazione per l'effetto della copertura vegetale, dell'infiltrazione del terreno e la saturazione dello stesso. Il modello utilizzato è quello del Curve Number (SCS-CN), un modello empirico a base fisica che si presta ad un utilizzo con dati spazialmente distribuiti.

Infine, il calcolo degli idrogrammi di piena è stato effettuato con il metodo della corrivazione, ottenendo così i valori di portata massima in un determinato tempo di ritorno. La terza fase consiste nello studio idraulico, la scelta del modello idraulico di propagazione è di fondamentale importanza in questo tipo di analisi. L'analisi del rischio idraulico è stata condotta in dettaglio sui tratti vallivi delle aste fluviali principali interessati dalla presenza di centri abitati, non si è ritenuto necessario proseguire l'indagine verso monte dato che gli eventi di piena in questo caso sono solitamente contenuti nei versanti e non vi sono consistenti elementi a rischio nelle zone golenali salvo limitate opere puntuali.

Gli idrogrammi di piena, ricavati nella fase precedente, sono utilizzati come dati di ingresso dei modelli idraulici impiegati per lo studio della propagazione della piena dei corsi d'acqua. La scelta del modello dipende dalla qualità della cartografia disponibile, nel caso in cui la cartografia non consente un'affidabile ricostruzione delle sezioni trasversali e della valle fluviale circostante il modello idraulico di propagazione utilizzato è HEC-RAS, questo è un modello che lavora in moto stazionario e che permette di individuare l'entità e l'estensione

delle zone di allagamento, sia all'interno dell'alveo che nelle zone contigue valutando anche l'influenza di eventuali ponti o di vari ostacoli sul normale deflusso della corrente. Le ipotesi di questo modello sono quelle di condizioni di moto permanente unidimensionale, corrente gradualmente variata e pendenze longitudinali del fondo dell'alveo non eccessive.

Nei casi più complessi invece dove il modello monodimensionale trova notevoli difficoltà è necessario ricorrere a modelli più sofisticati, in particolare sono stati utilizzati il “metodo dei volumi statici” e il modello bidimensionale. Il primo consiste nel valutare il volume d'acqua che fuoriesce dall'alveo nel tratto di esondazione e nel determinare l'estensione delle zone prossime al tratto dove l'acqua esondata si dispone in funzione delle informazioni ricavate da un modello digitale del terreno dell'area in esame suddiviso in celle di dimensioni uniformi. La propagazione dei livelli idrici nelle celle avviene sulla base della conservazione della massa e dunque utilizzando la sola equazione di continuità.

Nel caso in cui invece è disponibile una cartografia dettagliata in scala 1: 2.000 è possibile utilizzare un modello bidimensionale, quindi oltre al calcolo dell'altezza idrica è possibile ricavare anche il valore della velocità della corrente.

Dopo aver completato lo studio idrologico e l'analisi idraulica è stato possibile perimetrare le aree a diversa pericolosità di inondazione e valutare il rischio idraulico.

La stima della pericolosità costituisce il presupposto essenziale per la valutazione del rischio sul territorio: questa è stata valutata in maniera differente a seconda delle informazioni disponibili e dell'affidabilità delle ricostruzioni delle aree inondabili. Nel caso in cui la scala della cartografia disponibile e le connesse sezioni trasversali della valle fluviale non fossero in grado di fornire un'affidabile distribuzione spaziale dell'altezza idrica all'interno dell'area inondata, si è utilizzata una metodologia semplificata, cioè valutando la pericolosità solo in funzione del tempo di ritorno (Tabella 3, Tabella 4). Mentre nel caso in cui i risultati della modellazione idraulica fossero stati supportati da elementi conoscitivi di dettaglio come una cartografia in scala 1: 2.000, si è utilizzata una metodologia completa che valutasse la pericolosità incrociando le informazioni relative al tempo di ritorno con quelle relative alla distribuzione spaziale delle altezze idriche (Tabella 5, Tabella 6)

T	P
50	P3
100	P2
300	P1

Tabella 3. Calcolo della pericolosità idraulica e secondo la modalità semplificata

Rischio	E1	E2	E3	E4
P1	R1	R1	R2	R3
P2	R1	R2	R3	R4
P3	R2	R2	R4	R4

Tabella 4. Valutazione del rischio idraulico secondo la metodologia semplificata

Battente Idraulico	Tempo di Ritorno		
	50	100	300
$H < 0.3$ m	P1	P1	P1
$0.3 < H < 1$ m	P2	P2	P2
$1 < H < 2$ m	P4	P3	P2
$H > 2$ m	P4	P4	P3

Tabella 5. Calcolo della probabilità idraulica secondo la metodologia completa

Rischio	E1	E2	E3	E4
P1	R1	R1	R2	R2
P2	R1	R2	R3	R3
P3	R2	R2	R3	R4
P4	R2	R3	R4	R4

Tabella 6. Valutazione del rischio idraulico secondo la metodologia completa

Infine sono stati definiti gli interventi necessari per la mitigazione del rischio che possono essere di tipo non strutturale, finalizzati a ridurre le conseguenze della piena e volti ad evitare o ridurre l'impatto e i danni attraverso operazioni sia di carattere preventivo che di gestione degli eventi di piena (piani di protezione civile). Possono altresì configurarsi come interventi strutturali, ovvero quegli interventi che agiscono sulla pericolosità degli eventi di piena tramite l'aumento della capacità idraulica del corso d'acqua (come argini o ricalibrature), o la riduzione della massima portata (diversivi o scolmatori, casse di espansione ecc.).

L'ordine di priorità degli interventi è stabilito con livelli successivi dove viene considerato prioritariamente il grado di rischio, poi il valore dell'elemento a rischio e infine il valore della pericolosità.

6.3 Eventi alluvionali nella Regione Siciliana

La Sicilia è una delle regioni in Italia maggiormente soggette ad essere colpite da fenomeni alluvionali ad alto numero di vittime ed ingenti danni al territorio: solo nel XX secolo si sono verificati sul suolo siciliano molteplici eventi di cui 86 fatali che hanno portato alla morte di 478 persone (Guzzetti, Stark, & Salvati, 2005).

Nel catalogo prodotto dal CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) sono presenti gli eventi di inondazione di maggior impatto che si sono verificati sul suolo siciliano, a partire dall'alluvione del 1557 che si abbatté sulla città di Palermo causando migliaia di vittime fino a quelli verificatisi negli ultimi anni. I dati del catalogo del CNR mostrano come, negli eventi storicamente registrati, il numero di morti e dispersi a causa delle inondazioni sia di oltre 7.750, con un numero di sfollati che sale fin oltre 12.000.

Gli eventi di maggior impatto più antichi sono quello del 26 novembre 1666 che causò numerose vittime a Palermo, quello a Messina il 31 gennaio 1763 e l'alluvione di Modica del 1833, mentre per quanto riguarda gli eventi alluvionali più recenti nella tabella sottostante sono rappresentati quelli che hanno colpito il suolo siciliano dagli inizi del 1900 fino al 2013 (Figura 11), a cui si deve aggiungere l'alluvione del 18 ottobre 2018 che ha colpito la Sicilia orientale (nella piana di Catania) e dove sono caduti oltre 200 mm di pioggia provocando molti danni ma nessuna fatalità, e l'evento del 2 novembre 2018 dove intense precipitazioni si sono abbattute sull'intero suolo siciliano e hanno provocato esondazioni e allagamenti di numerose aste fluviali e torrentizie e quindi prodotto ingenti danni all'agricoltura e alle infrastrutture e la morte di 12 persone (di cui 9 bloccate in casa e sommerse dalle acque del fiume Milicia a Casteldaccia).

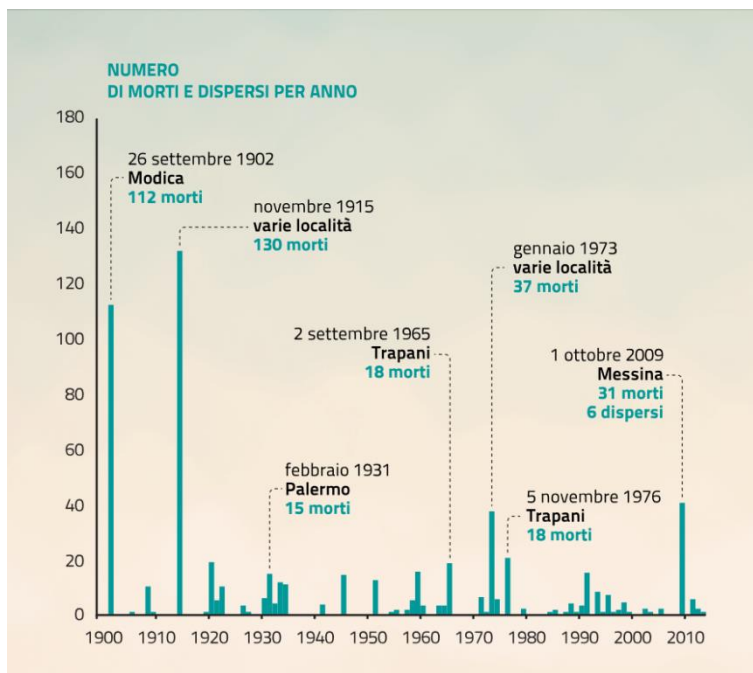


Figura 11. Distribuzione temporale degli eventi con conseguenze per la popolazione in Sicilia dal 1900 al 2013

6.4 Casi di studio comunali

Prima di trattare specificatamente i due casi comunali si cerca di inquadrare la Regione Siciliana nella sua interezza.

La Sicilia ricopre una superficie di 25.707 km² ed è la regione più estesa della penisola italiana, si trova nel centro del mar Mediterraneo ed è separata dalla Calabria dallo stretto di Messina (3,4 km), e dal continente africano dal canale di Sicilia (140 km). Ha una forma pressoché triangolare e, data la sua conformazione, può essere suddivisa in tre distinti versanti: quello settentrionale, quello meridionale e quello orientale. Il territorio siciliano presenta una morfologia collinare per il 62% dell'intera superficie, per il 24% è montuosa e per il 14% è pianeggiante, inoltre le coste si sviluppano per 1637 km incluse le isole minori. La parte settentrionale è prevalentemente montuosa e composta da fiumi con portate modeste come il fiume Freddo, l'Oreto e il Milicia, mentre la parte centro-meridionale e sud-occidentale è prevalentemente collinare e pianeggiante, i fiumi hanno maggiori lunghezze e portate e per questo motivo sono utilizzati, in prevalenza, per lo scopo irriguo; i principali corsi d'acqua sono: il Belice, il Simeto e l'Imera meridionale.

A quote basse le precipitazioni sono abbastanza scarse, oscillano cioè tra i 400 e i 600 millimetri all'anno.

Fatta questa breve introduzione si possono ora presentare i due comuni della Regione Siciliana su cui si concentra lo studio e che in passato sono stati soggetti a frequenti fenomeni alluvionali: Lentini e Messina.

6.4.1 Lentini

Il Comune di Lentini, situato nella parte sud-orientale della Sicilia, in provincia di Siracusa, è ubicato alla quota indicativa di 53,50 m s.l.m. (quota relativa al centro abitato), a 33 km a sud-sud-ovest da Catania, a 50 km a nord-nord-ovest da Siracusa, a 12 km a sud-ovest dalla costa ionica estendendosi verso nord nella Piana di Catania (Figura 12).



Figura 12. Localizzazione comune di Lentini

Il 98% del territorio si trova ad una quota tra i 0 e i 200 m s.l.m. mentre il restante 2% si trova tra i 200 e i 400 m. s.l.m., si estende per 216,78 km² di cui più del 30% sono suoli alluvionali, il 46% viene utilizzato per colture arboree e agrumeti mentre il 44% è seminativo irriguo.

Il comune è attraversato nella parte centro-meridionale dal fiume San Leonardo e dai suoi affluenti mentre, a nord, scorre il Gornalunga con i suoi immissari; nella parte centrale è presente l'invaso artificiale di Lentini con un'estensione di 1.000 ha, l'altezza del tirante d'acqua varia tra i 12 e i 32 metri, mentre la portata di scarico superficiale è di 160 m³/s e quella di fondo è di 300 m³/s. Il lago, originariamente, si estendeva per una superficie maggiore ma, all'inizio del XX secolo, a causa della diffusione di malattie come la malaria

è stato prosciugato e, alla fine degli anni Settanta, è stato ricreato il serbatoio con un invaso più piccolo ma più profondo per uso agricolo e industriale.

La piovosità media annua si assesta tra i 580 mm e i 650 mm, dati rilevati su territorio comunale da quattro stazioni pluviometriche.

In merito al rischio idrogeologico, il comune di Lentini presenta un grado di pericolosità geologica che può essere definito basso, infatti, il territorio è caratterizzato da una morfologia composta da pianura per il 60% della sua estensione areale e di collina moderata per circa il 40%; inoltre, le aree collinari sono caratterizzate dall'affioramento di terreni di tipo litoide quindi con buone caratteristiche meccaniche, mentre gli affioramenti argillosi si trovano esclusivamente in aree pianeggianti.

Nel comune sono presenti aree depresse che, anche se oggi sono bonificate con la realizzazione di un efficiente reticolo di drenaggio, quando si presentano eventi meteorici particolarmente intensi, vengono completamente sommerse a causa anche degli afflussi del fiume S.Leonardo e dei suoi affluenti, come accaduto nel 1951, 1984 e 2003, con ingenti danni alle infrastrutture di attraversamento e quindi con l'interruzione delle vie di collegamento con i comuni limitrofi. L'alluvione del 2005, invece, ha interessato in particolar modo la zona a nord del comune compresa tra il fiume Gornalunga e i canali Benante e Palazzelli.

Durante il sopralluogo guidato dal tecnico comunale sono stati individuati numerosi punti che, durante eventi alluvionali, manifestano le maggiori criticità.

Una delle più evidenti riguarda la zona dell'ospedale di Lentini (Figura 13), non tanto per l'edificio stesso che è stato costruito a quota rialzata rispetto al territorio circostante, ma per le strade di collegamento che vengono frequentemente inondate durante eventi alluvionali. Questo è dovuto alle esondazioni dei canali che intersecano le vie vicino all'ospedale, sia a Nord della rotonda dove il canale del Giudice intercetta la Strada Statale 194 (SS194) (Figura 14), sia a Ovest dove è la Strada Provinciale 16 ad essere interrotta a causa delle alluvioni.

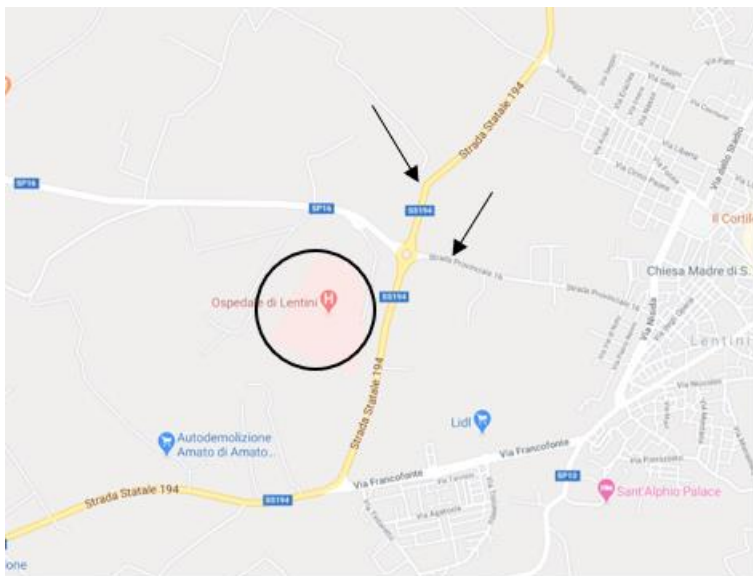


Figura 13. Localizzazione ospedale di Lentini



Figura 14. Tratto del canale del Giudice che esonda e invade la SS194

Uno dei territori che ad ogni evento alluvionale viene completamente inondato è quello a sud del lago di Lentini. Ciò è dovuto in particolar modo alla esondazione del fiume San Leonardo che aumenta notevolmente la sua portata sia a causa delle forti precipitazioni, sia a causa del contributo dello scolmatore di piena del lago di Lentini che si immette direttamente nel fiume. (Figura 15), ma anche per la scarsa manutenzione dei canali che scorrono in questa area (Figura 16).



Figura 15. Punto di immissione dello scarico del lago di Lentini nel fiume San Leonardo



Figura 16. Stato di uno dei canali.

Il terreno circostante è quindi completamente allagato e questo determina ingenti danni alle coltivazioni e l'isolamento delle poche abitazioni presenti in questa porzione di territorio e dei lavoratori della struttura consortile del lago. Durante il sopralluogo si è potuto notare come, all'interno di questa area, fosse presente anche un'azienda agricola che, ad ogni evento alluvionale, viene inondata con gravi conseguenze economiche (Figura 17, Figura 18).



Figura 17. Area che durante le esondazioni viene completamente allagata



Figura 18. Azienda agricola situata nell'area soggetta ad inondazioni

Infine, un altro punto critico è la Strada Statale 194 (SS194) che collega Lentini a Catania: durante eventi di particolare intensità la strada viene completamente allagata impedendo così la circolazione e non permettendo il collegamento tra le due città, come successo durante l'alluvione del 2018 (Figura 19).



Figura 19. tratto della SS194 soggetto ad inondazione

6.4.2 Messina

Il comune di Messina è situato nell'angolo nordorientale della Sicilia, compreso tra la costa ionica e i monti Peloritani, si affaccia sullo stretto di Messina che lo separa dalla Calabria (Figura 20).

Il comune ha una superficie territoriale di 213,75 km² con una densità abitativa di 1190 abitanti/km² e, data la vastità del territorio, è suddiviso in sei circoscrizioni (Area Sud, San Filippo, Gazzi, Centro, Annunziata, Peloro).



Figura 20. Localizzazione comune di Messina

L'altezza del territorio si eleva progressivamente dal livello del mare, dove è situato il centro urbano, fino ai 1127 metri della vetta di Antennamare, per poi assestarsi intorno agli 800 metri. Mentre le quote sono modeste rispetto alle catene montuose vicine come Etna e Aspromonte, le pendenze invece sono elevatissime con una media del 15-20% e punte che superano il 50%. Il territorio, soprattutto alle quote maggiori, è costituito in prevalenza da rocce metamorfiche (gneiss, scisti, micascisti, graniti ecc.), mentre la formazione di base è ricoperta ai fianchi da rocce sedimentarie via via più recenti, dalle mioceniche alle quaternarie, fino ai materassi alluvionali del fondovalle e dei litorali.

Il reticolo idrografico è rappresentato da numerosi torrenti che scorrono paralleli verso il mare, questi hanno andamento contorto con brevi lunghezze e forti pendenze che ne determinano tempi di corrivazione inferiore ai 30 minuti. I bacini sono numerosi e di piccole dimensioni, nel lato tirrenico sono presenti 22 bacini idrografici di cui il più esteso è quello

del torrente Tarantonio (8,22 km²), mentre sul lato ionico scorrono 44 torrenti tra cui il più ampio risulta essere la fiumara Santo Stefano (16,46 km²).

Anche in questo caso, per conoscere in maniera diretta il territorio ed avere utili informazioni dai tecnici comunali si è svolto il sopralluogo il 6 e il 7 febbraio 2020, coordinato dall'Ing. Rizzo e l'Ing. Manfrè, durante il quale sono stati analizzati alcuni dei torrenti che scorrono all'interno del comune.

Il primo giorno si è esaminato il versante ionico, in cui scorrono numerosi torrenti di modeste dimensioni che, per parte dell'anno e in particolar modo nei mesi estivi sono in secca ma durante gli eventi meteorologici di particolare intensità straripano, provocando numerosi danni alle aree circostanti: Inoltre, a causa delle forti pendenze e della morfologia del territorio, gli eventi alluvionali sono legati al trasporto di detriti e a colate di fango che sommergono e distruggono tutto ciò che incontrano lungo il loro percorso. Durante il sopralluogo si è posta l'attenzione sui torrenti più critici del versante: il Santo Stefano, il torrente Milli, il Larderìa, il Giampilieri e il torrente Pace.

Le problematiche su cui ci si è focalizzati per tutti i torrenti analizzati sono: la mancanza di manutenzione, infatti ogni corso d'acqua è invaso dalla vegetazione e dai rifiuti (Figura 21, Figura 22) e l'urbanizzazione delle frazioni all'interno delle quali scorrono i torrenti: questa ha portato alla costruzione di abitazioni e di strade, non solo nei pressi degli argini, ma in alcuni casi anche all'interno dell'alveo (Figura 23).

Un altro dei problemi legati all'urbanizzazione consiste nella tombinatura dei torrenti, che scorrono nel centro urbano di Messina, trasformati in strade: questi, data la notevole riduzione della sezione dell'alveo, provocano frequenti inondazioni che causano ingenti danni alle abitazioni e alle infrastrutture.



Figura 21. Stato del torrente Giampilieri

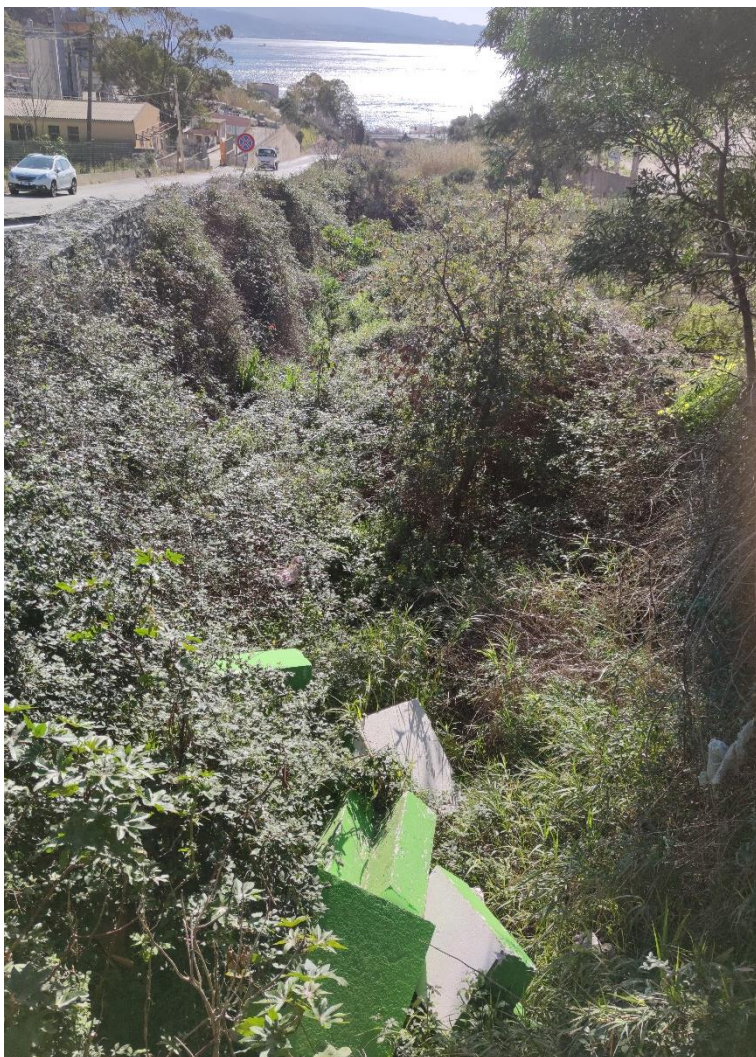


Figura 22. Stato del torrente Pace



Figura 23. Abitazione costruita nell'alveo del torrente Giampileri

Il secondo giorno si è proceduto al sopralluogo del versante tirrenico. I torrenti, anche in questo caso, sono di modeste dimensioni ma, a differenza del versante ionico, le inondazioni sono di carattere prettamente alluvionale senza la presenza di detriti o di colate di fango. Anche sul versante tirrenico si riscontrano le medesime problematiche individuate precedentemente, il corso dei torrenti è completamente invaso dalla vegetazione e dai rifiuti (Figura 24) ed inoltre, sempre all'interno di essi, è considerevole la presenza di abitazioni e di strade, come nel caso del torrente Tarantonio, del Mormora, del Rodia e addirittura l'alveo del torrente Calamona, è stato ristretto per la creazione di un camping (Figura 25).



Figura 24. Stato del torrente Tarantonio



Figura 25. Tratto del torrente Calamona ristretto per la costruzione del camping

Infine, si è ultimato il sopralluogo nell'area a nord-est del comune sul versante ionico, zona in cui il torrente Papardo scorre in prossimità dell'Agenzia Ospedaliera Papardo e all'Università degli studi di Messina (Figura 26).

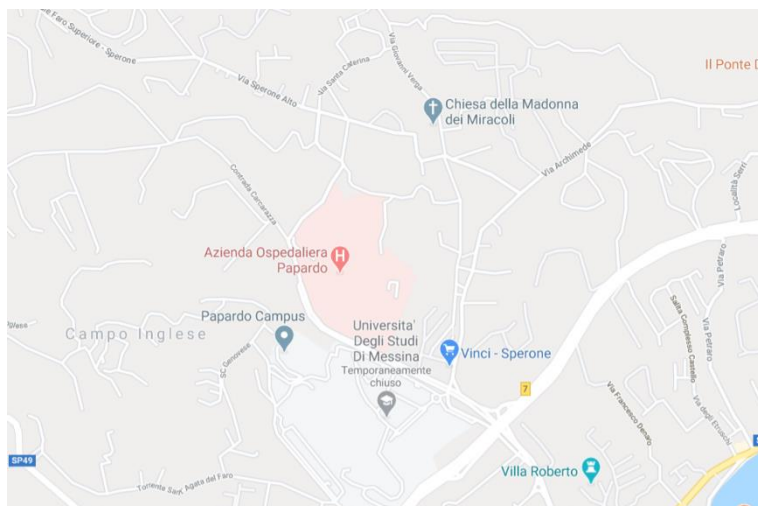


Figura 26. Localizzazione area "Papardo"

7 PREDISPOSIZIONE AL MODELLO

7.1 Individuazione di Unità Territoriali Omogenee

Nell'intraprendere la fase di calibrazione di un modello di suscettività, tanto per le frane che per le alluvioni, conviene preventivamente caratterizzare uno o più specifici contesti geomorfologici sui quali impostare correttamente l'addestramento del modello. Non è difatti pensabile che una intera regione possa presentare caratteristiche di tale omogeneità da poter essere descritta grazie a unico set di parametri predisponenti validi, ad esempio, tanto per le pianure alluvionali che per le aree montagnose o collinari. Apparrebbe pertanto opportuno raffinare l'analisi individuando un numero di "unità territoriali omogenee" (UTO) sufficiente a coprire quantomeno le principali fattispecie sedi di fenomeni dannosi. Questo ragionamento, che in linea di principio potrebbe essere molto esteso, risulta in realtà limitato dalla disponibilità dei dati storici di addestramento in grado da garantire una buona copertura per ognuno dei singoli contesti considerati.

Tale disponibilità è generalmente soddisfatta quando si tratta di frane, garantendo soltanto l'IFFI (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, s.d.) un *parterre* di quasi 700.000 fenomeni sui 230.000 chilometri quadrati di territorio montagnoso e collinare italiano. Per le alluvioni, come si è più volte ricordato nel corso di questa tesi, non è così e, al contrario, i dati sono decisamente scarsi.

Alla luce di queste considerazioni, si è ritenuto opportuno condurre una classificazione geomorfologica del territorio per valutarne le forme e, al contempo, effettuarne la statistica sul dominio dei fenomeni osservati.

A tal fine si è operato con un classico metodo di letteratura (Stepinski & Jasiewicz, 2011), applicato all'altimetria dell'intera zona di studio. Per il calcolo si è utilizzato il modello digitale del terreno SRTM (VanZyl, 2001) a passo 90 metri ben più ampio di quello in uso per l'analisi di suscettività (5 metri) e pertanto in grado di mediare di per sé spazialmente le discontinuità minori del terreno prodotte dal modello ad alta risoluzione.

L'approccio "Geomorphon" è in sostanza un metodo per la classificazione e la mappatura di *landform* a partire dall'altimetria. La procedura è basata sul principio del riconoscimento dei *pattern* geomorfologici, piuttosto che sulla semplice analisi geometrica differenziale della

superficie. Al centro del metodo c'è il concetto di “geomorfone” in sostanza un fenotipo geomorfologico, che funge da archetipo di una specifica morfologia del terreno. Gli autori individuano un numero finito di “geomorfon” che, secondo il loro intendimento, costituiscono l'insieme completo ed esaustivo dei possibili tipi morfologici, inclusi elementi standard del paesaggio, nonché forme meno note più raramente riscontrabili nelle superfici naturali. Una singola scansione del DEM, assegna ad ogni pixel il “geomorfone” più appropriato, usando una procedura che si auto-adatta per seguire al meglio il carattere multiscala delle forme del territorio, scegliendo tra dieci tipologie diverse (Figura 27)

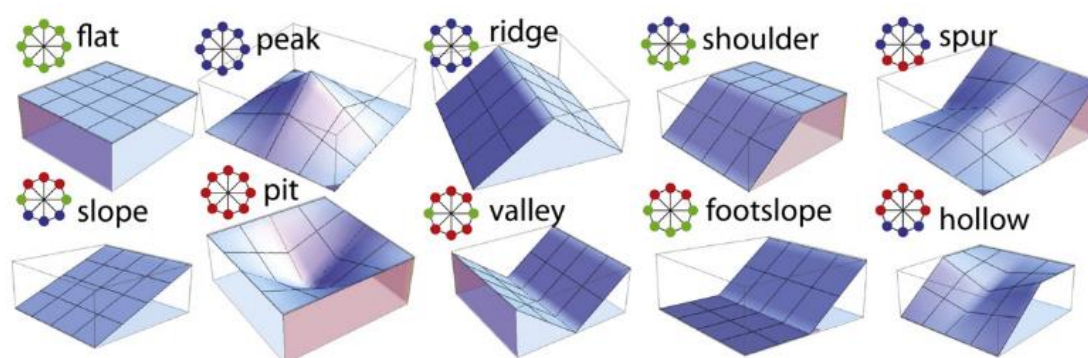


Figura 27. Rappresentazioni delle dieci geomorfologie

Di tali morfologie omogenee ne sono state individuate quattro che sono quelle caratteristiche dei territori soggetti ad inondazione: *flat*, *valley* e *footslope* e *pit*. (Figura 28, Figura 29)

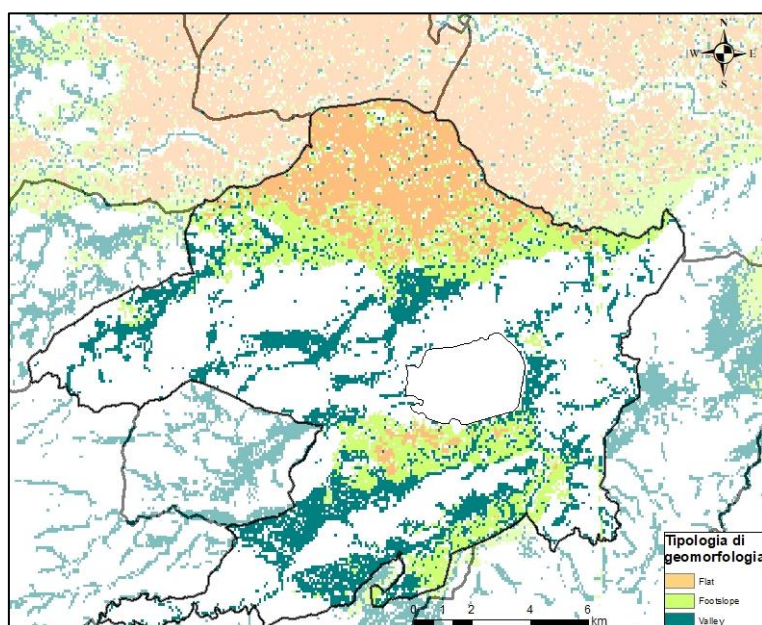


Figura 28. Rappresentazione delle tre geomorfologie Flat, valley e footslope nel comune di Lentini

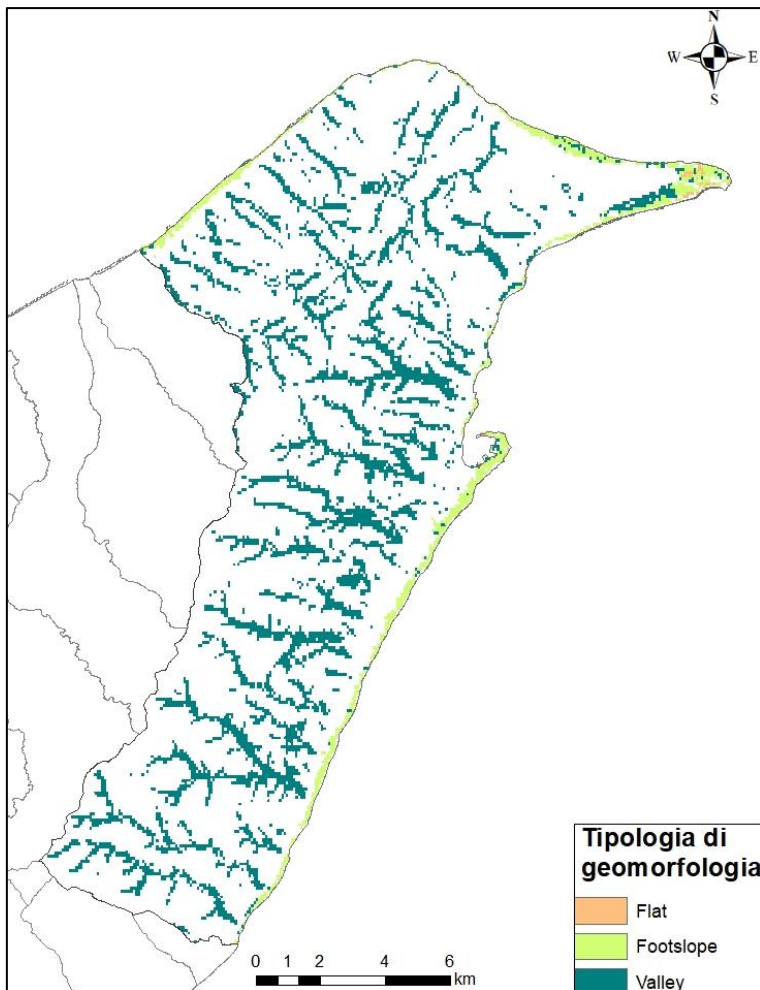


Figura 29. Rappresentazione delle tre geomorfologie Flat, valley e footslope nel comune di Messina

Al fine di rendere più robusta l'informazione ricavata su base morfologica, si è deciso di aggiungere un contenuto di tipo litologico utilizzando la classica Carta geologica d'Italia in scala 1:100.000. In questo senso si sono aggregate le formazioni tipiche per i fenomeni di inondazione sui tematismi "Depositi alluvionali", "Depositi marini lacustri e fluviali", "spiagge", "dune costiere", "coni di deiezione", "terrazzamenti" (Figura 30, Figura 31).

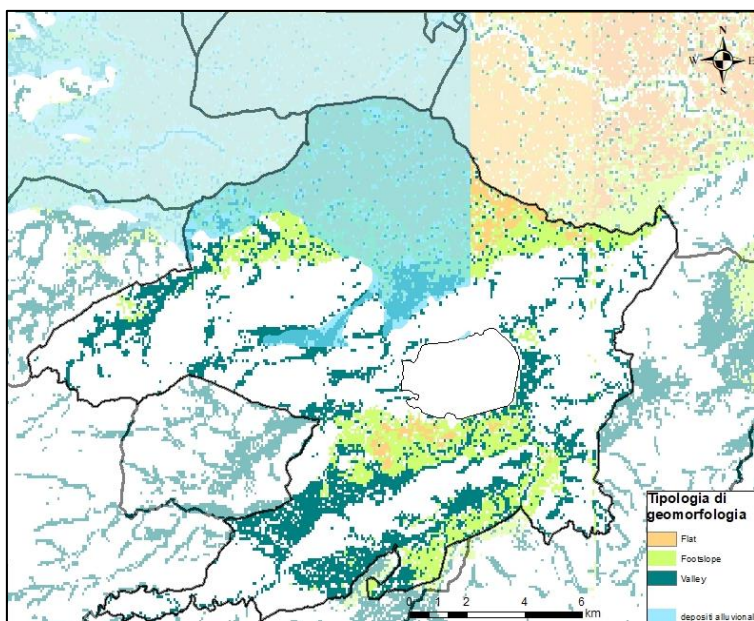


Figura 30. Rappresentazione delle tre geomorfologie e dei depositi alluvionali del comune di Lentini

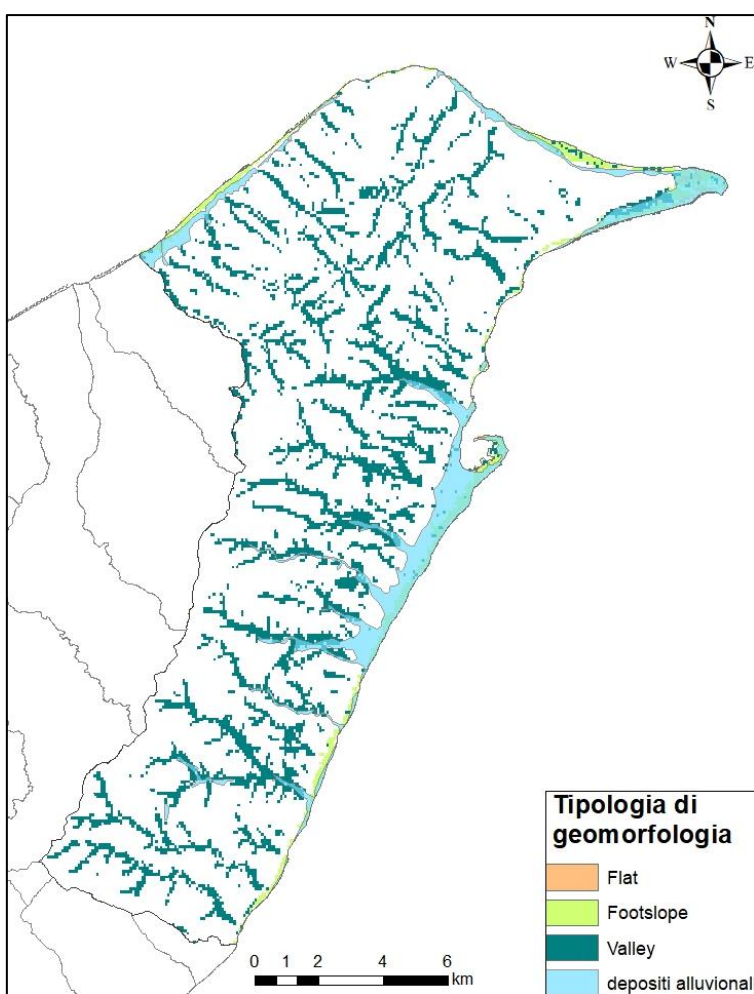


Figura 31. Rappresentazione delle tre geomorfologie e dei depositi alluvionali del comune di Messina

Le mappe mostrano che la quasi totalità dei fenomeni alluvionali osservati ricadono in aree segnate dai “geomorfon” più sopra indicati (Figura 32, Figura 33)

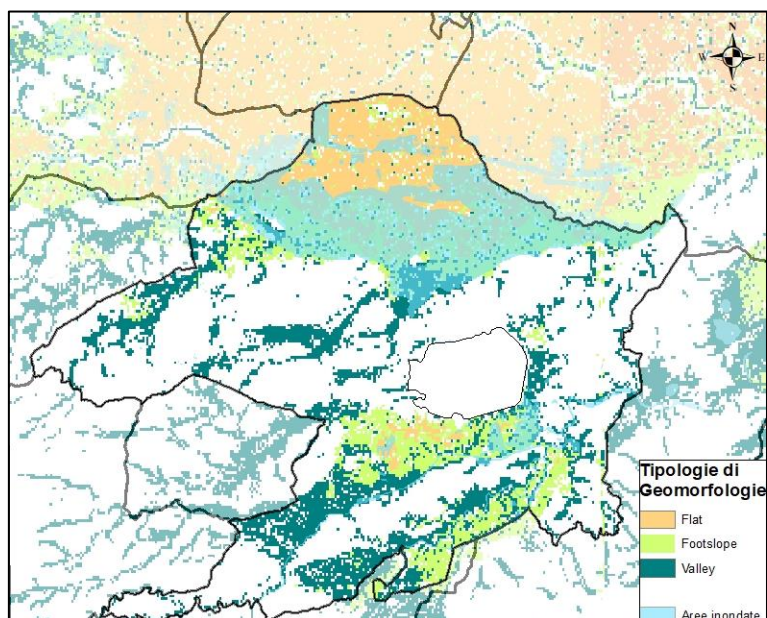


Figura 32. Rappresentazione delle tre geomorfologie e delle aree inondate nel comune di Lentini

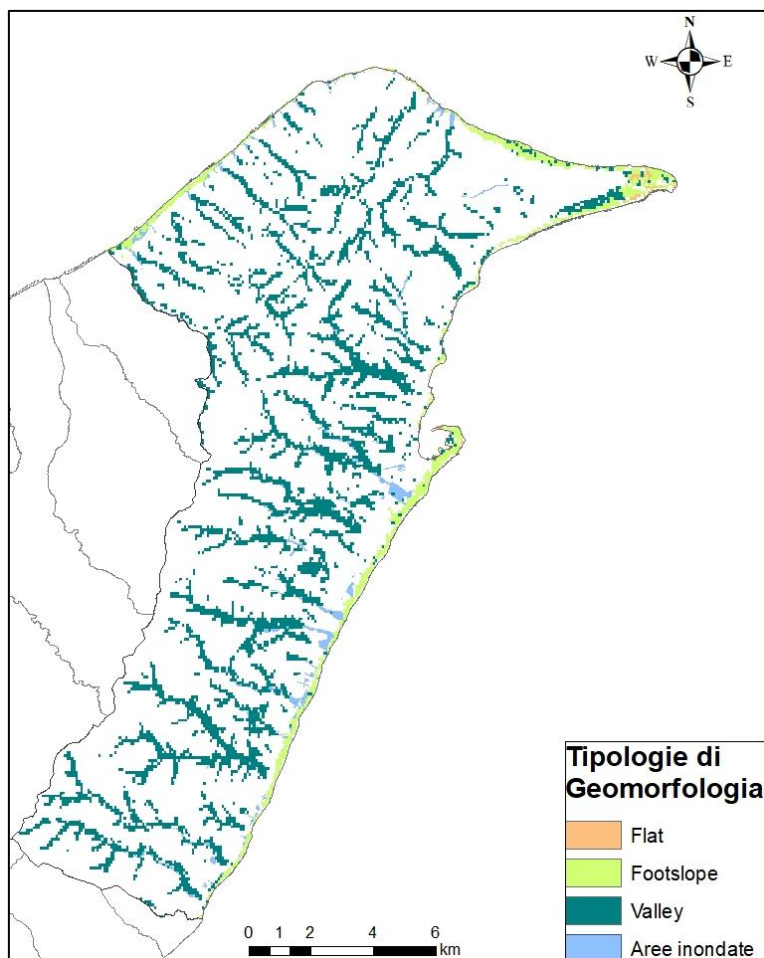


Figura 33. Rappresentazione delle tre geomorfologie e delle aree inondate nel comune di Messina

Con tali approfondimenti, resta pur sempre il fatto che l'aggregazione, tanto per unità morfologiche che litologiche, al fine di identificare unità omogenee, non è semplice per chi deve poi trovarsi a gestire il metodo. Anche fornendo una maschera informatizzata per definire le aree, resta comunque il problema di una vasta eterogeneità degli interlocutori e il conseguente timore di trasmettere informazioni non chiare o comunque di interpretazione tutt'altro che immediata.

Per questa ragione è stata condotta una ulteriore verifica per fasce altimetriche, metodologia comunemente utilizzata anche da ISTAT per la ripartizione del territorio. Si tratta delle scelte operate nell'ambito del sistema circoscrizionale statistico istituito nel 1958, che definisce una ripartizione del territorio nazionale per zone altimetriche (montagna, collina, pianura). Tali zone derivano dall'aggregazione di comuni contigui e sono identificate sul territorio sulla base di valori soglia altimetrici¹. Una tale forma di identificazione dell'area di studio

¹ https://www.istat.it/it/files//2013/12/Cap_1.pdf

può semplificare l'applicazione del metodo, richiedendo dati facilmente reperibili, altrettanto interpretabili e comunque di uso corrente in aggiunta alla classica suddivisione del territorio per zone altimetriche è stato applicato un franco di sicurezza di 50 metri, per questo la fascia di esplorazione è stata definita sotto i 350 metri di quota (Figura 34, Figura 35).

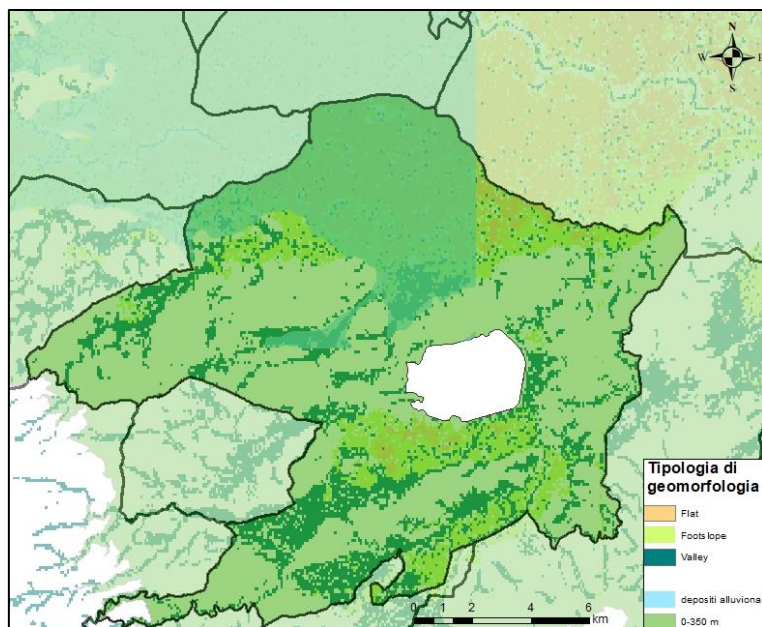


Figura 34. Rappresentazione del territorio di Lentini a quota inferiore di 350 metri

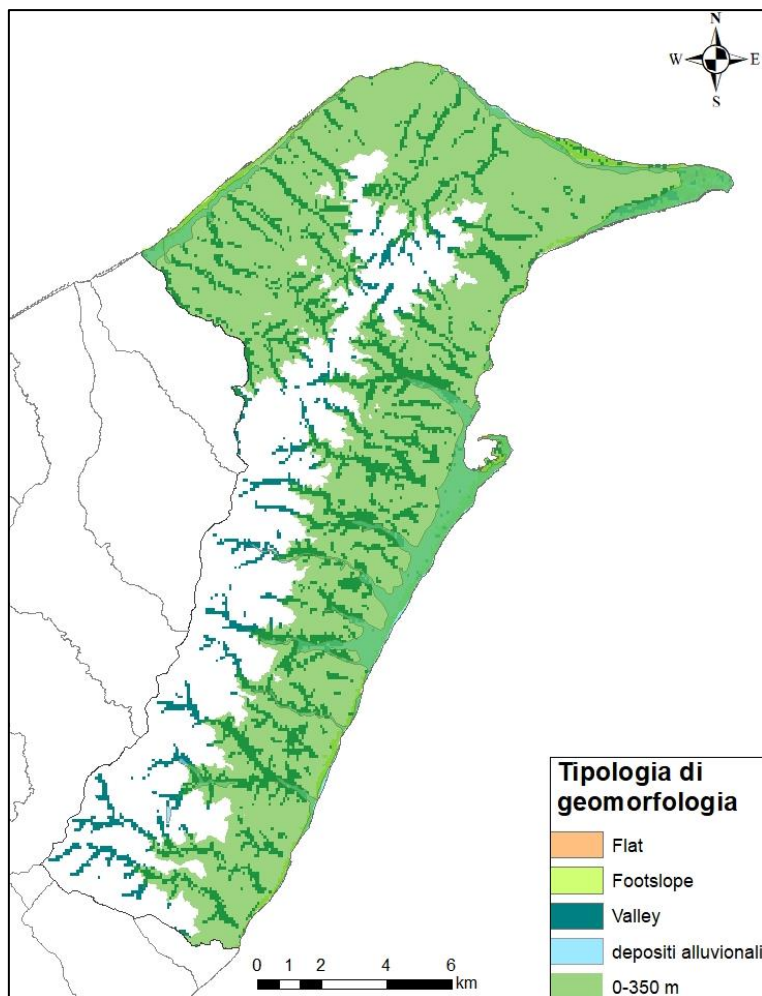


Figura 35. Rappresentazione del territorio di Messina a quota inferiore di 350 metri

Per il comune di Lentini l'area compresa tra 0 e 350 metri racchiude al suo interno quasi la totalità del territorio e di conseguenza tutte le aree inondate e le aree a pericolosità del PAI. Per il comune di Messina la fascia altimetrica di 350 metri esclude il 30% del territorio dall'analisi, nonostante questo il 100% delle aree classificate nel PAI e il 100% delle aree inondate ricade nell'area individuata come pianura alluvionale (Figura 36).

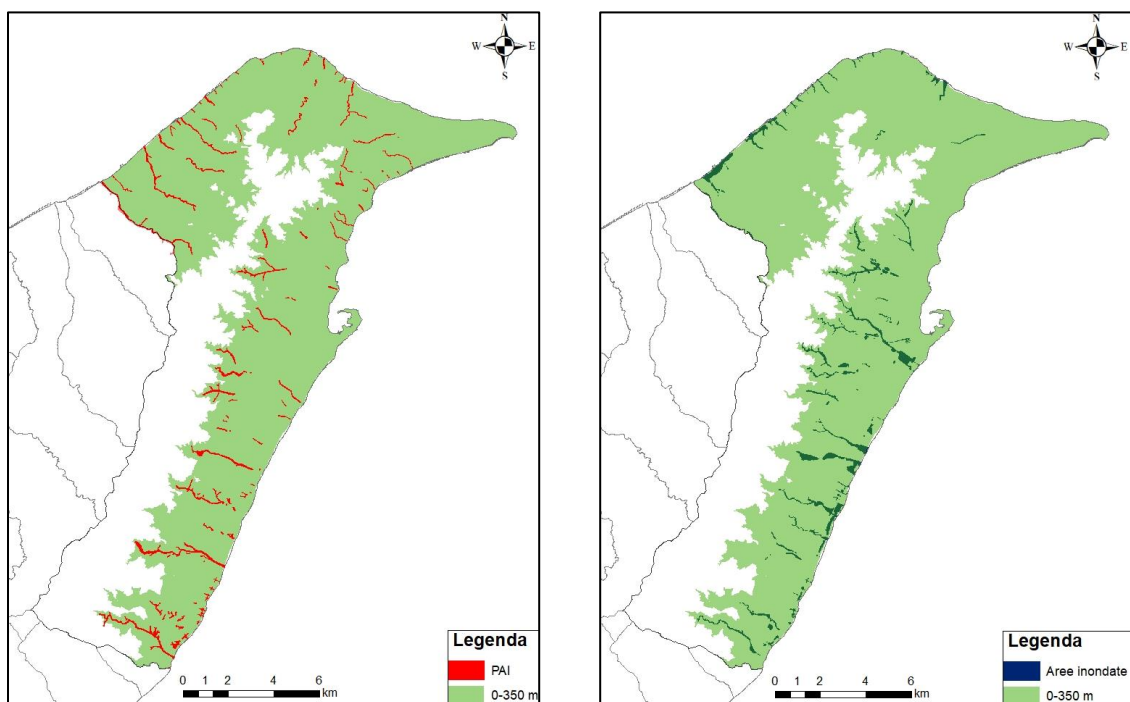


Figura 36. Rappresentazione delle aree del PAI e delle aree inondate all'interno della fascia altimetrica 0-350 m

7.2 Base dei dati utilizzati nella suscettività da alluvione

7.2.1 Il modello digitale del terreno e il reticolo idrografico

Il modello digitale del terreno (DTM) utilizzato per i due comuni è quello regionale a scala 2x2 metri, ricampionato a 5x5 metri dal gruppo di lavoro del Politecnico di Milano nel progetto PON Governance 2014-2020. Come analizzato in precedenza, viene presa in esame solo la porzione di DTM inferiore a 350 metri. Mentre per Messina si è utilizzata solo l'area del territorio comunale, per Lentini si è deciso di considerare anche i territori al di fuori dei limiti amministrativi per far in modo di non escludere una cospicua parte di aree inondate interessate dagli eventi del 2005 e del 2018 (Figura 37, Figura 38).

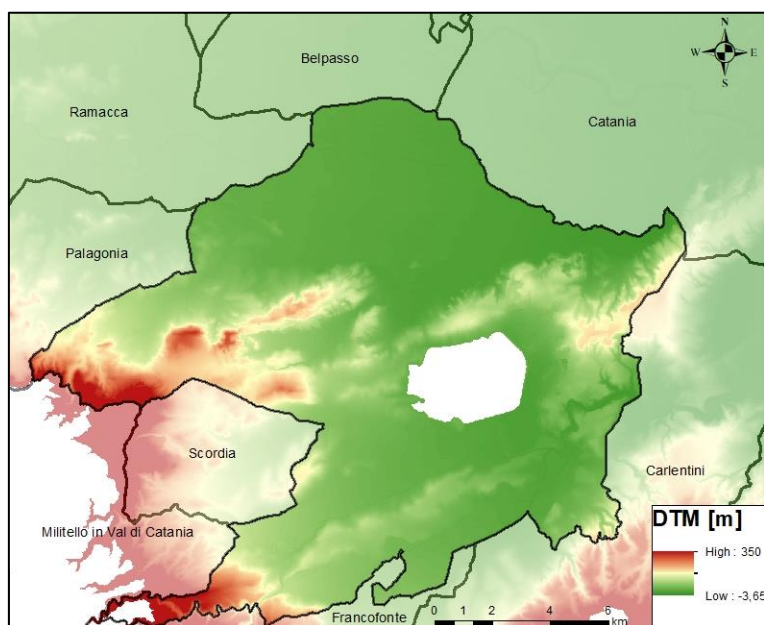


Figura 37. Modello digitale del terreno del comune di Lentini

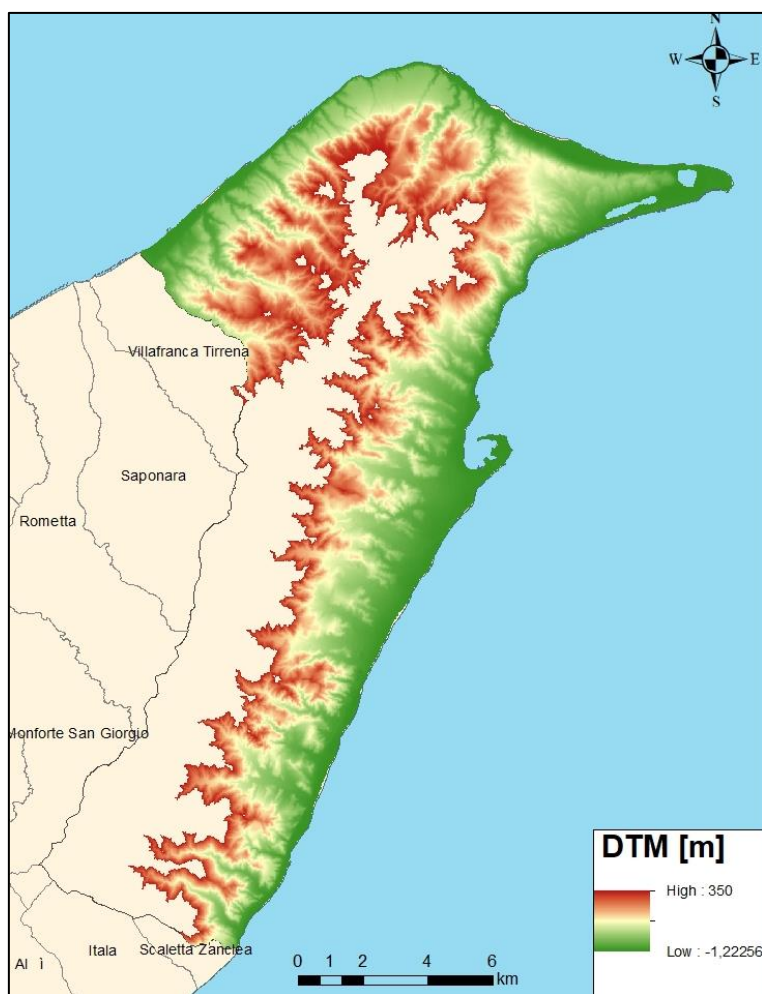


Figura 38. Modello digitale del terreno del comune di Messina

Per entrambi i comuni, è stato utilizzato il reticolo idrografico ricavato dalla carta tecnica regionale, per il comune di Lentini sono stati presi in considerazione sia i tratti del reticolo idrografico naturale, sia i canali, mentre per il comune di Messina sia i tratti scoperti sia quelli coperti (Figura 39, Figura 40).

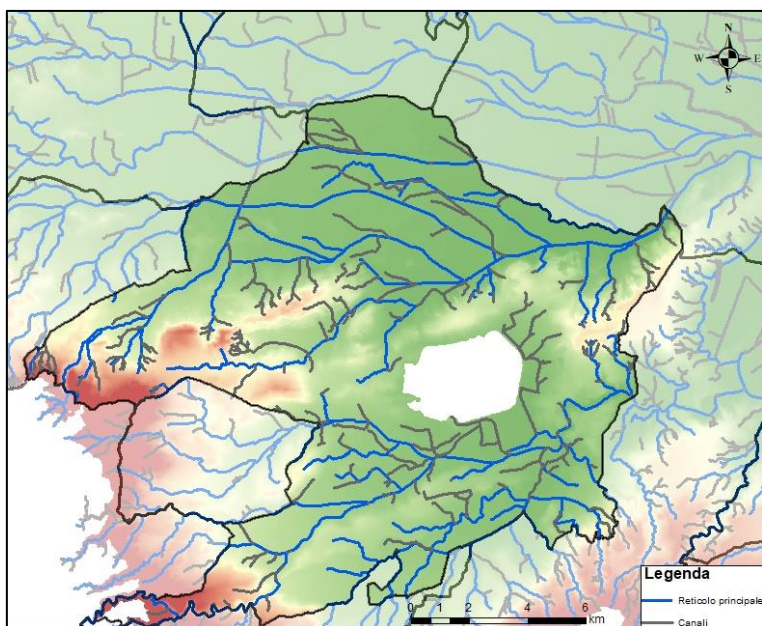


Figura 39. Reticolo idrografico del comune di Lentini

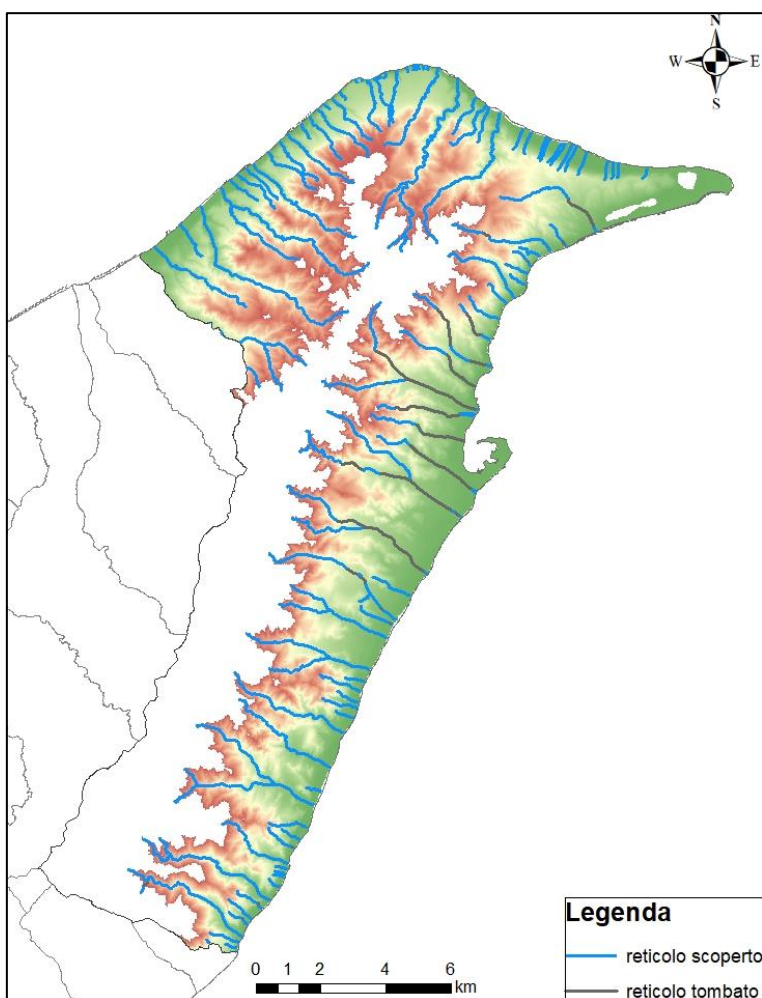


Figura 40. Reticolo idrografico del comune di Messina

7.2.2 Eventi alluvionali

Per la produzione della mappa di suscettività dei comuni, essendo un modello “*data-driven*”, la prima operazione imprescindibile consiste nella raccolta degli eventi storici verificati sul territorio in un dataset.

Per quanto concerne il comune di Lentini, il geom. Carlo Maci, tecnico comunale ha fornito le cartografie delle aree inondate durante gli eventi del 2003 quando esondò il fiume San Leonardo, e durante l’evento del 2005 quando furono il Gornalunga ed i suoi affluenti ad esondare e ad allagare una vasta area a nord del comune.

Inoltre, grazie al programma satellitare Copernicus EMS, attivato durante gli stati di emergenza per l’osservazione dei fenomeni in atto, è stato possibile ottenere la perimetrazione delle aree inondate durante l’evento del 18 ottobre 2018 che ha colpito il sud-est dell’isola, compreso il comune di Lentini.

Il satellite è passato sulla zona interessata dall’alluvione il 25 ottobre, quindi sette giorni dopo l’evento, questo è un fattore di particolare importanza dato il carattere effimero delle alluvioni, tuttavia alcune aree erano ancora inondate e quindi ha potuto fornire delle indicazioni, non complete, ma sicuramente utili.

Al contrario, il comune di Messina, pur avendo subito, nel corso della storia, numerosi eventi alluvionali, non dispone di alcuna perimetrazione. Per ovviare a questa carenza si è deciso di esaminare la carta delle aree storicamente alluvionate e vulnerate da frana nel territorio comunale della città, che conteneva informazioni puntuali sugli eventi storici che si sono presentati all’interno del comune, e la carta degli scenari di evento attesi e del rischio idraulico e da frana.

Da queste due mappe sono stati rimossi tutti gli eventi e gli scenari riguardanti le frane e si sono considerati solamente i poligoni degli scenari nei quali ci fosse la presenza di un evento storico puntuale.

Il dataset degli eventi storici è stato diviso considerando quelli di Lentini del 2003 e del 2005 e il 60% dei poligoni degli eventi di Messina per la calibrazione mentre l’evento del 2018 e la restante parte dei poligoni di Messina è stato utilizzato per la validazione. La selezione dei due sottoinsiemi di calibrazione e validazione è avvenuta su base randomica, proprio per evitare di creare una correlazione tale da alterare le effettive prestazioni dell’analisi di suscettività da alluvione (Figura 41, Figura 42).

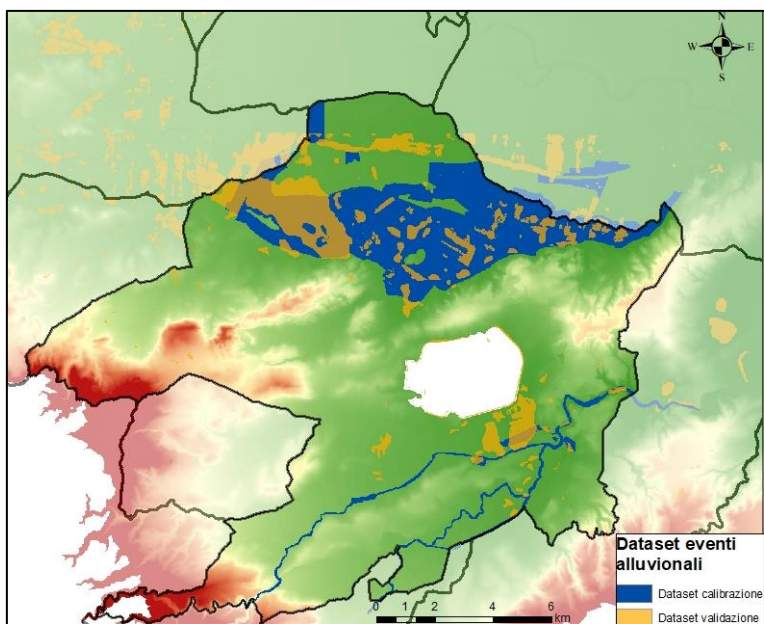


Figura 41. Dataset degli eventi alluvionali del comune di Lentini

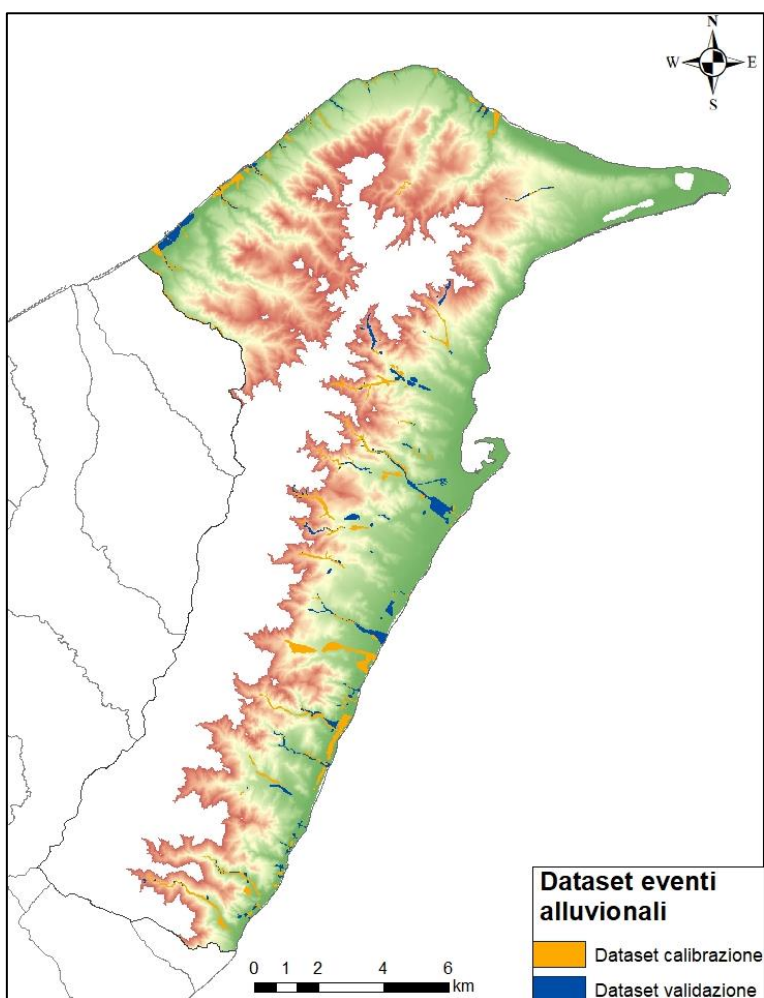


Figura 42. Dataset degli eventi alluvionali del comune di Messina

7.3 Fattori predisponenti

Per i comuni di Lentini e Messina si sono individuati i quattro fattori predisponenti analizzati nei capitoli precedenti: la pendenza, la quota relativa, la distanza dal reticolo, mentre per un'attenta valutazione del legame tra fenomeni alluvionali e permeabilità connessa agli strati litologici si è deciso di utilizzare il parametro del *Curve Number*.

7.3.1 Pendenza

Il fattore predisponente della pendenza, con valori compresi tra 0° e 79° , è stato suddiviso in quattro classi: le prime due hanno intervalli ristretti e raccolgono la porzione di territorio pianeggiante, la prima è composta da pixels con pendenze molto basse da 0 a 1° , la seconda da 1° fino a $2,5^\circ$, le successive due classi comprendono i pixels con pendenze più elevate, dai 5 ai 10° per la terza classe, e pendenze superiori ai 10° per la quarta (Figura 43, Figura 44).

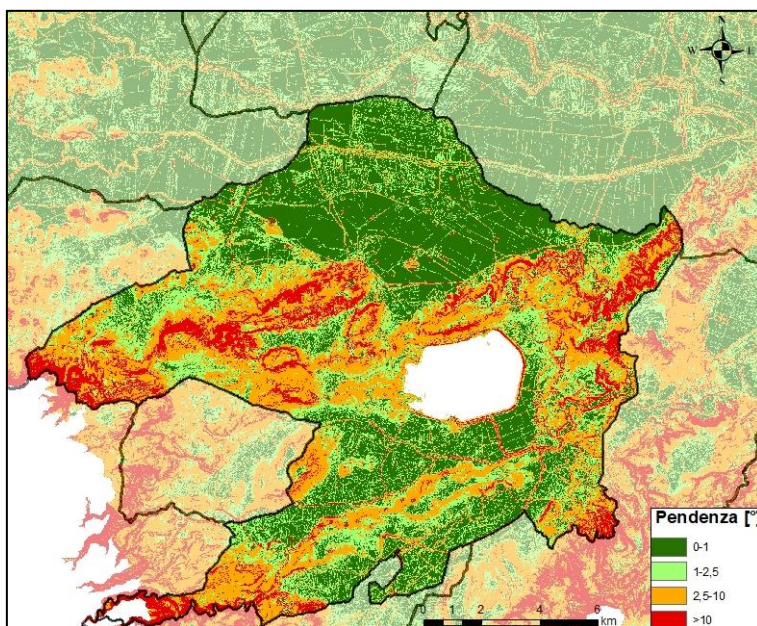


Figura 43. Rappresentazione in ambiente GIS dello strato della pendenza del comune di Lentini suddiviso nelle quattro classi

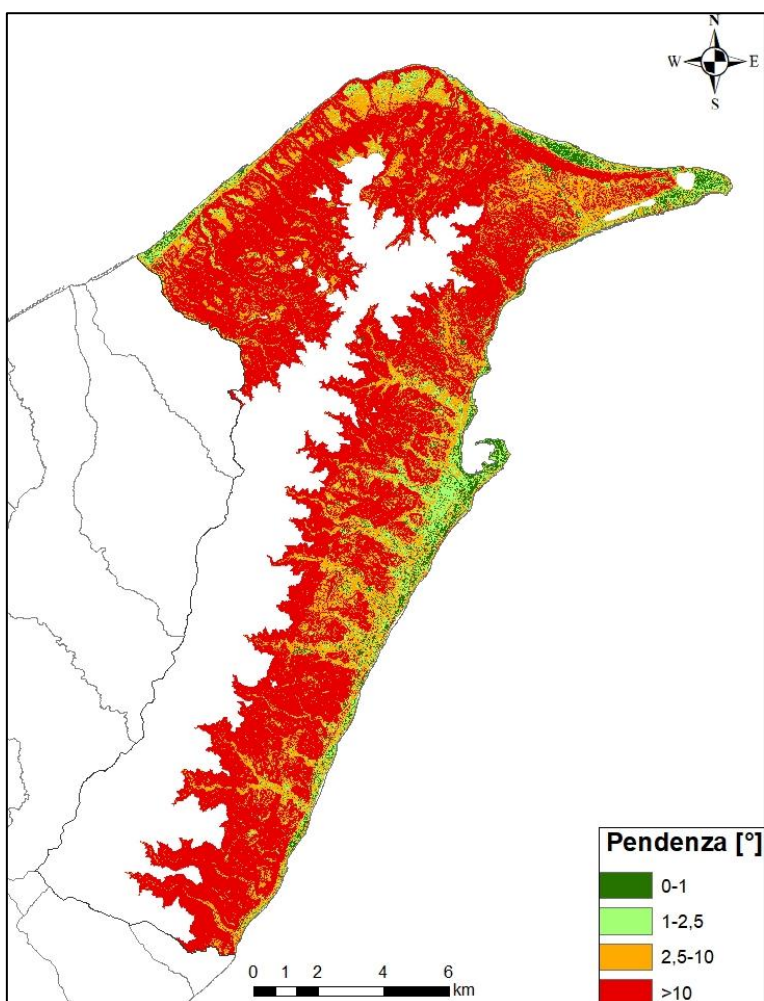


Figura 44. Rappresentazione in ambiente GIS dello strato della pendenza del comune di Messina suddiviso nelle quattro classi

Dall'analisi della tabella (Tabella 7) si evince come oltre l'80% dei pixels alluvionati ricada in aree con pendenze basse e molto basse, quindi nelle prime due classi, mentre solo il 16% del totale si verifica nelle ultime due (Figura 45).

Classe (°)	% pixels alluvionati	% cumulata
0-1	70,53%	70,53%
1-2,5	13,17%	83,70%
2,5-10	12,50%	96,19%
>10	3,81%	100,00%

Tabella 7. Percentuali di pixels alluvionati per ciascuna classe del fattore predisponente della pendenza

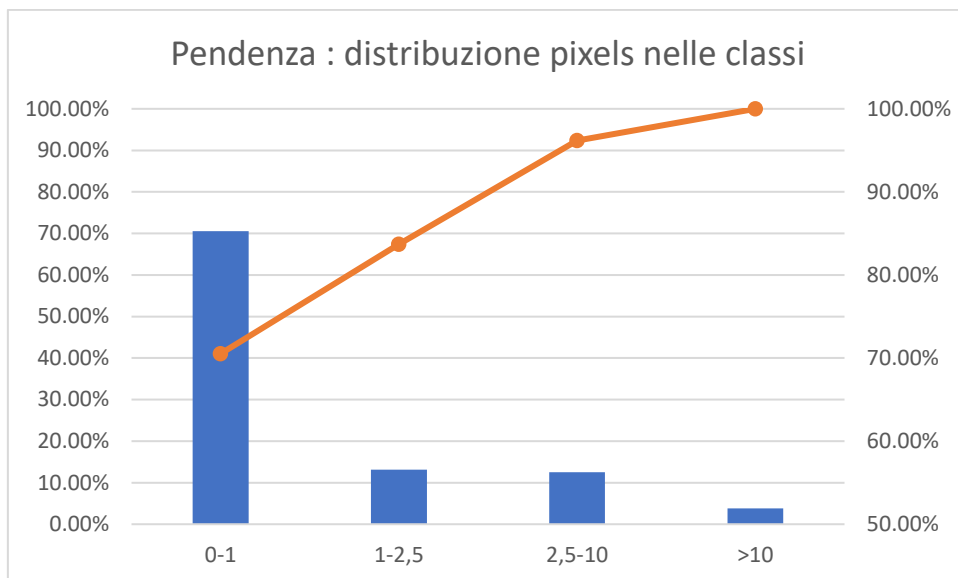


Figura 45. Grafico della distribuzione dei pixels alluvionati della pendenza nelle quattro classi

7.3.2 Quota relativa

Anche il fattore della quota relativa è stato suddiviso in 4 classi sempre prendendo in esame la morfologia del territorio: la prima classe comprende i pixels con una quota fino ai 5 metri rispetto al corso d'acqua più vicino, la seconda classe dai 5 ai 10 metri, la terza fino ai 20 metri, mentre l'ultima racchiude i pixels con quote superiori ai 20 metri (Figura 46, Figura 47).

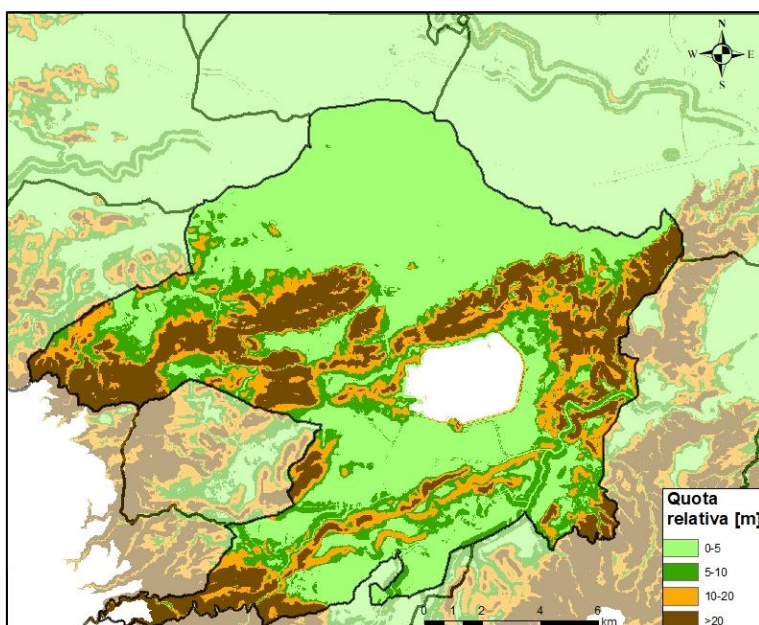


Figura 46. Rappresentazione in ambiente GIS della quota relativa del comune di Lentini

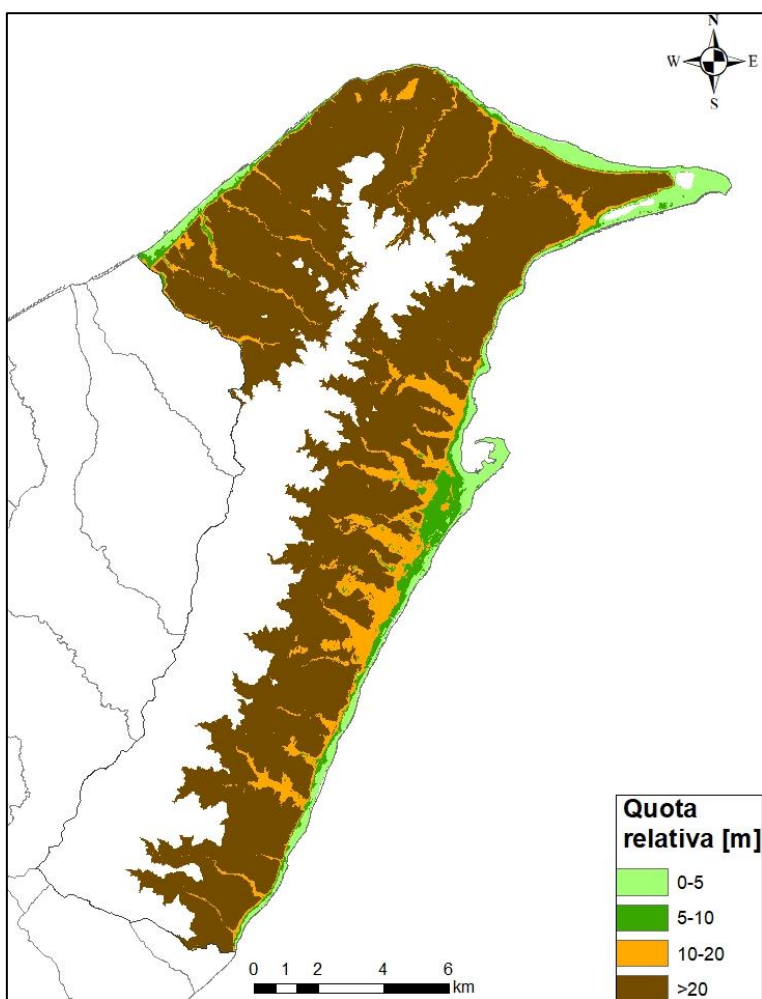


Figura 47. Rappresentazione in ambiente GIS della quota relativa del comune di Messina

In questo caso l'attenzione si è focalizzata sul legame esistente tra le zone allagate e le quote a bassa pendenza: questo è influenzato, in particolar modo, dalla morfologia del comune di Lentini che presenta una rilevante parte di territorio con quote relative inferiori ai 5 metri. Il 92% dei pixels alluvionati è concentrato nella prima classe, mentre solo il restante 8% è suddiviso in parti simili nelle altre tre classi (Tabella 8, Figura 48).

Classe (m)	% pixels alluvionati	% cumulata
0-5	92,74%	92,74%
5-10	2,87%	95,61%
10-20	2,36%	97,98%
>20	2,02%	100,00%

Tabella 8. Percentuali di pixels alluvionati per ciascuna classe del fattore predisponente della quota relativa

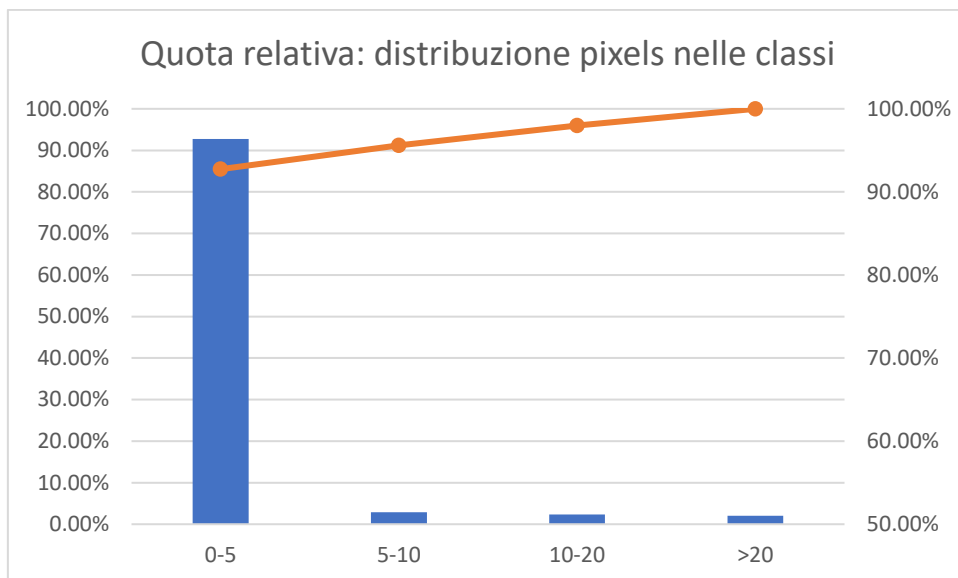


Figura 48. Grafico della distribuzione dei pixels alluvionati della quota relativa nelle quattro classi

7.3.3 Distanza euclidea

Il fattore predisponente della distanza è stato suddiviso in 5 classi con valori fino a 1.400 metri dal reticolo per Lentini e fino a 2.600 metri per Messina. Sono stati presi in considerazione in questa analisi tutti i corsi d'acqua principali di entrambi i comuni, i canali nel territorio di Lentini e i tratti tombati nel centro urbano di Messina.

I valori delle 5 classi sono stati così suddivisi: da 0 a 75 metri per la prima classe, da 75 a 150 per la seconda, da 150 a 250 per la terza, tra 250 e 400 per la quarta e i valori maggiori di 400 per l'ultima classe (Figura 49, Figura 50).

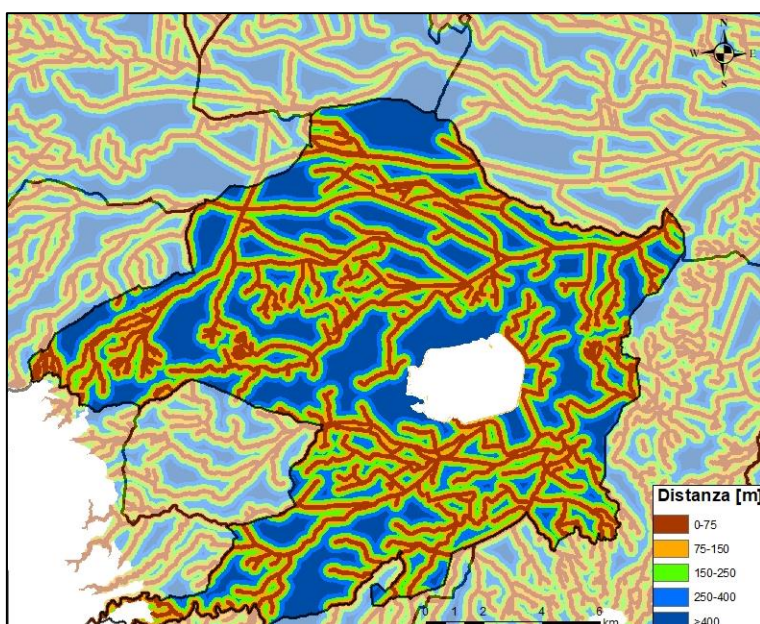


Figura 49. Rappresentazione in ambiente GIS della distanza del comune di Lentini suddivisa nelle cinque classi

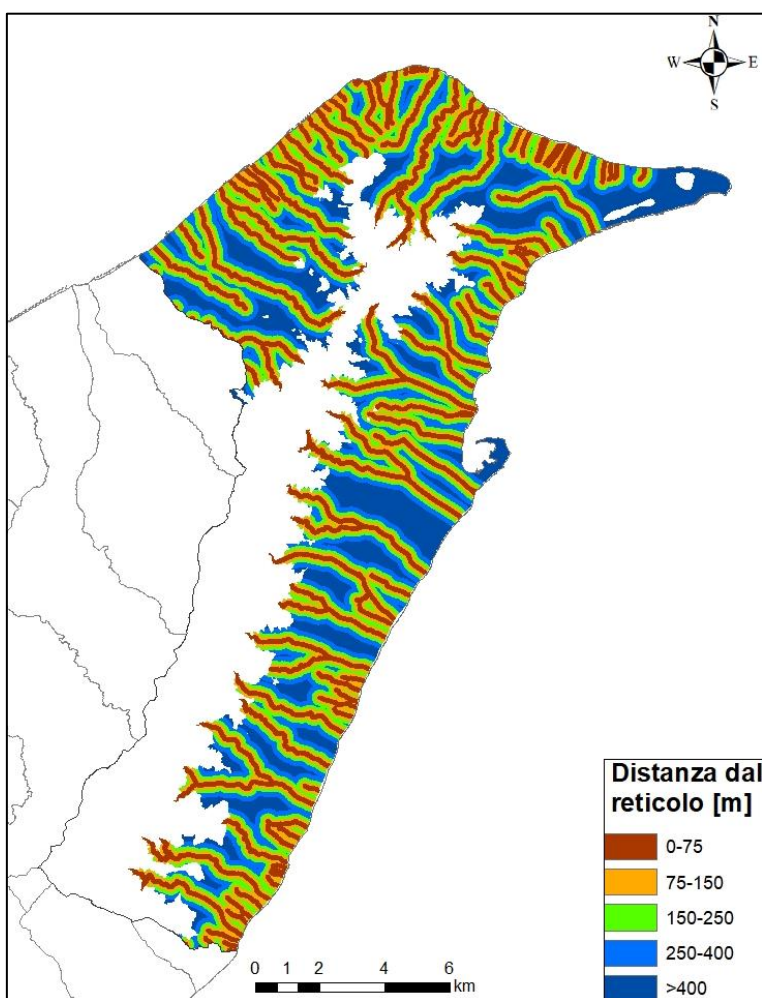


Figura 50. Rappresentazione in ambiente GIS della distanza del comune di Messina suddivisa nelle cinque classi

Come si evince dalla tabella la prima classe è quella in cui si concentra il maggior numero di pixels alluvionati, le successive tre variano tra il 20% della seconda classe, il 15% della quarta e poco meno del 10% del totale delle osservazioni contenuto nell'ultima (Tabella 9, Figura 51).

Classe (m)	% pixels alluvionati	% cumulata
0-75	34,36%	34,36%
75-150	20,34%	54,71%
150-250	19,01%	73,72%
250-400	16,42%	90,14%
>400	9,86%	100,00%

Tabella 9. Percentuali di pixels alluvionati per ciascuna classe del fattore predisponente della distanza

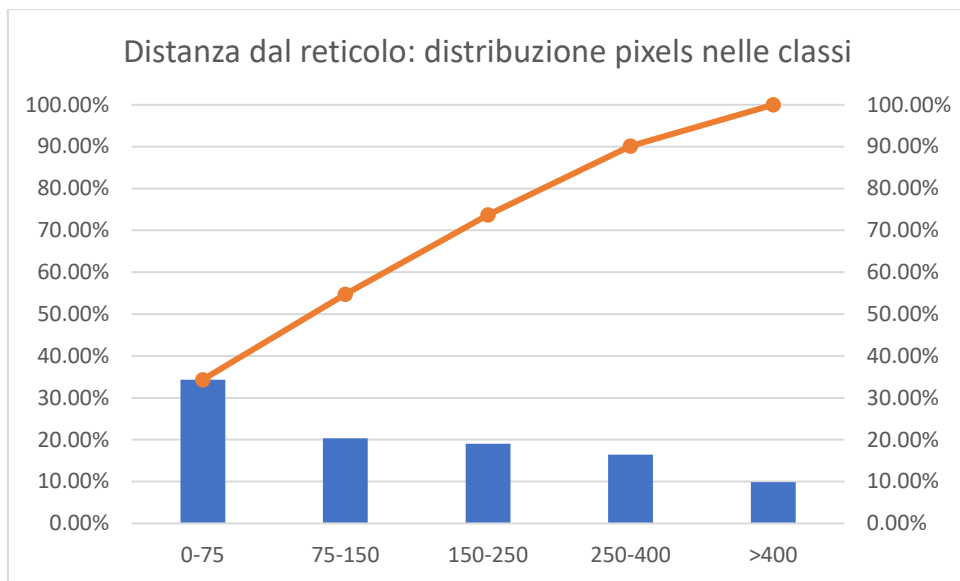


Figura 51. Grafico della distribuzione dei pixels alluvionati della distanza nelle cinque classi

1.1.1 Curve-Number

I valori del *Curve-Number* sono compresi tra 36, per aree con alta permeabilità, e 98 per le aree fortemente impermeabili. Questo fattore è stato suddiviso in 4 differenti classi: da 35 a 56, da 56 a 64, da 64 a 72 e l'ultima classe da 72 a 98 (Figura 52 ,Figura 53).

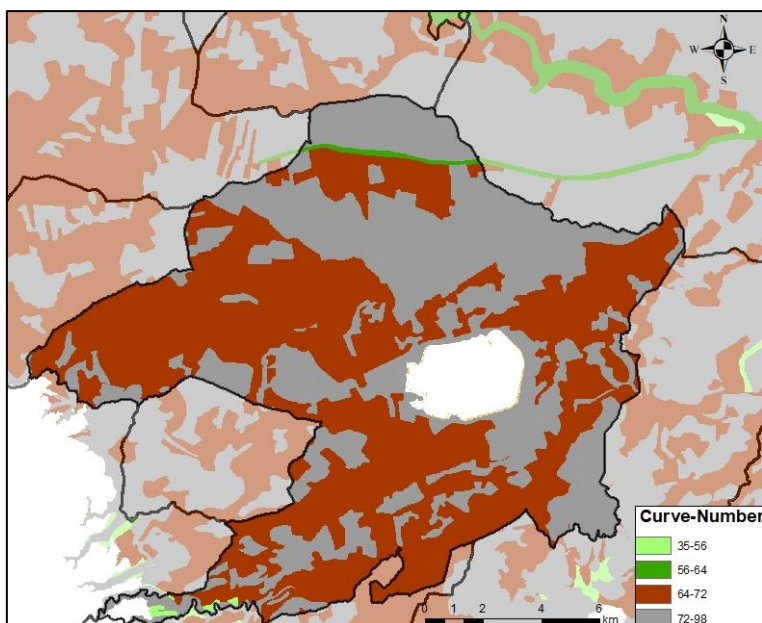


Figura 52. Rappresentazione in ambiente GIS del Curve-Number del comune di Lentini suddiviso nelle quattro classi

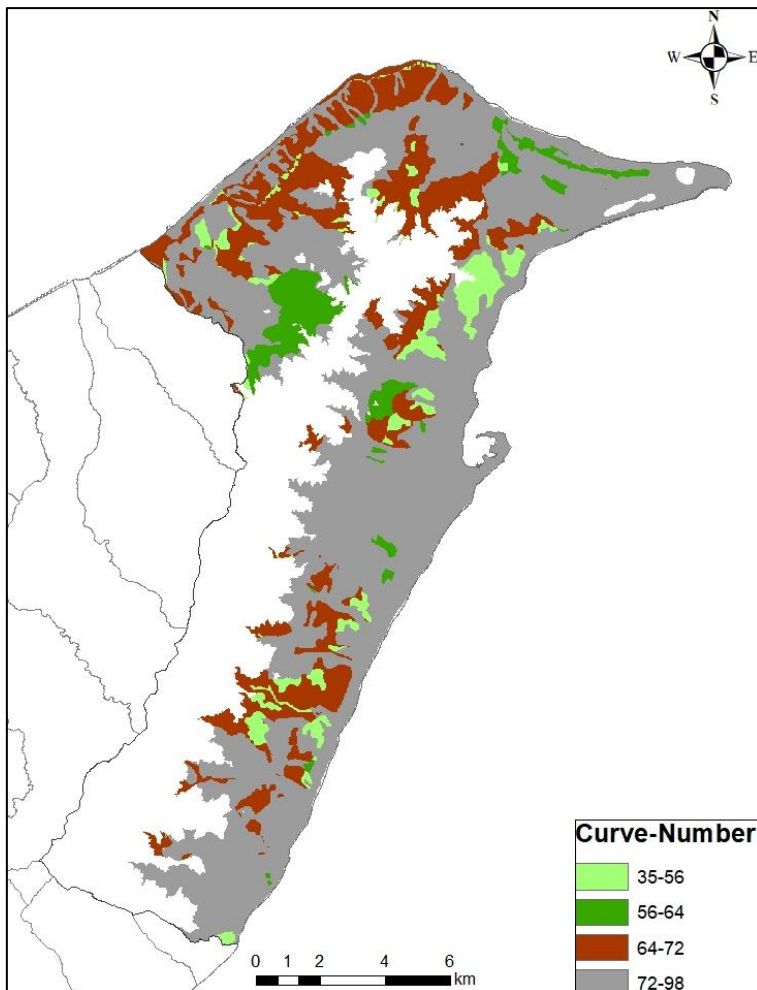


Figura 53. Rappresentazione in ambiente GIS del Curve-Number del comune di Messina suddiviso nelle quattro classi

La tabella evidenzia come la maggior parte dei pixels alluvionati siano presenti nell'ultima classe (81,11%). Questo è dovuto sia all'impermeabilità dell'ultima classe sia al fatto che la maggior parte del territorio ha un CN maggiore di 70 (Tabella 10, Figura 54).

Classe	% pixels alluvionati	% cumulata
36-60	0,09%	0,09%
60-65	0,95%	1,04%
65-70	17,85%	18,89%
>70	81,11%	100,00%

Tabella 10. Percentuali di pixels alluvionati per ciascuna classe del fattore predisponente del Curve-Number

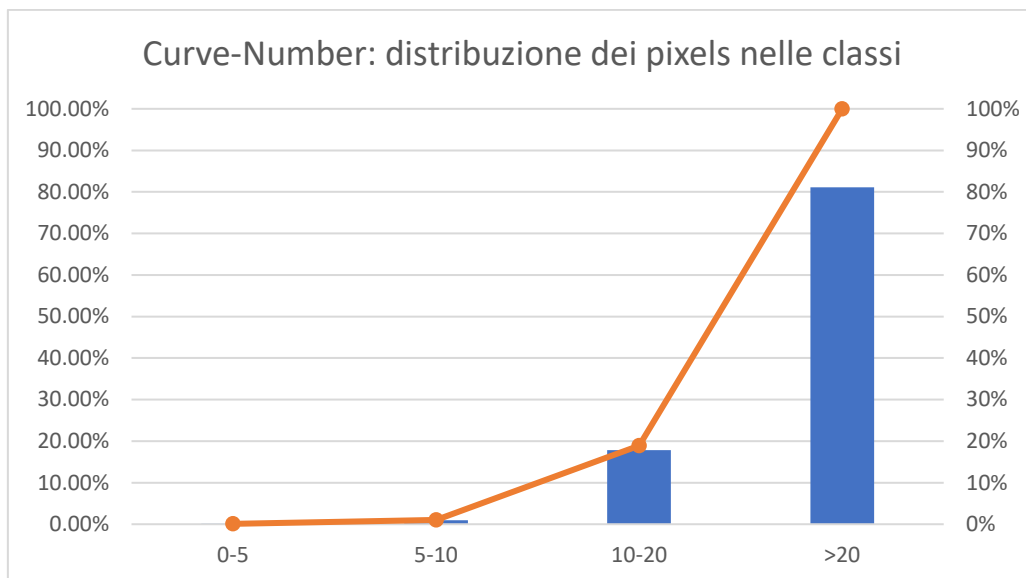


Figura 54. Grafico della distribuzione dei pixels alluvionati del Curve-Number nelle quattro classi

7.4 Pesi attribuiti ai fattori predisponenti

Per l'assegnazione dei pesi ad ogni classe di ogni fattore predisponente si è utilizzato il metodo dei pesi (WOE). I risultati della fase di calibrazione sviluppata attraverso l'uso degli eventi alluvionali del 2003 e del 2005 per il comune di Lentini e il 60% dei poligoni per il comune di Messina è riportata nella seguente tabella.

Fattore	Classe	W+	W-	C
PENDENZA	0-1	0,945	-0,901	1,846
	1-2,5	-0,338	0,063	-0,401
	2,5-10	-0,836	0,207	-1,043
	>10	-1,893	0,252	-2,146
QUOTA RELATIVA	0-5	0,896	-2,147	3,042
	5-10	-1,532	0,114	-1,646
	10-20	-1,745	0,122	-1,867
	>20	-2,859	0,415	-3,274
CURVE-NUMBER	35-56	-3,009	0,017	-3,027
	56-64	-1,018	0,017	-1,036
	64-72	-0,844	0,340	-1,184
	72-98	0,406	-0,889	1,295
DISTANZA DAL RETICOLO	0-75	0,367	-0,149	0,517
	75-150	0,006	-0,002	0,008
	150-250	-0,095	0,024	-0,118
	250-400	-0,163	0,035	-0,198
	>400	-0,470	0,068	-0,537

Tabella 11. Pesi delle classi ottenuti con il modello WOE

I pesi ottenuti in tabella (Tabella 11) evidenziano quali classi abbiano maggiore influenza sul fenomeno e, in particolar modo, la correlazione positiva o negativa al verificarsi di un'alluvione per ogni determinata classe di ciascun fattore predisponente.

Per il fattore della pendenza si nota come la prima classe, con pendenza molto bassa, abbia una forte correlazione con il fenomeno alluvionale, avendo un peso di 1,846, mentre le altre classi hanno un peso negativo che cresce progressivamente, dalla seconda alla quarta classe, in cui assume il valore di -2,146.

La quota relativa, così come si era previsto, mostra una correlazione fortemente positiva per la classe con quote non superiori ai 5 metri (3,042), mentre, come nel caso della pendenza, le successive tre classi hanno valori negativi, in particolar modo l'ultima, che ha un peso di -3,274: questo permette di sottolineare come ci sia un'importante correlazione negativa tra le quote superiori ai 20 metri e l'insorgenza del fenomeno alluvionale.

Il CN ha un unico valore positivo (1,295) per la quarta classe, che racchiude le aree impermeabili, le due intermedie hanno valori negativi simili (-1,184 per la terza e -1,036 per la seconda) mentre la prima ha un valore molto negativo (-3,027).

La distanza ha mediamente valori meno importanti rispetto agli altri fattori predisponenti: questi variano tra 0,517 per la prima classe, che comprende le aree distanti fino ai 75 metri rispetto al corso d'acqua più vicino, e -0,537 per le aree distanti più di 400 metri. Le tre classi intermedie hanno valori vicini allo zero, in particolar modo la seconda che ha un peso quasi nullo (0,008) e quindi non è significativa nell'analisi di suscettività.

Di seguito vengono mostrati i grafici dei pesi W^- , W^+ e C dei quattro fattori predisponenti (Figura 55, Figura 56, Figura 57, Figura 58).

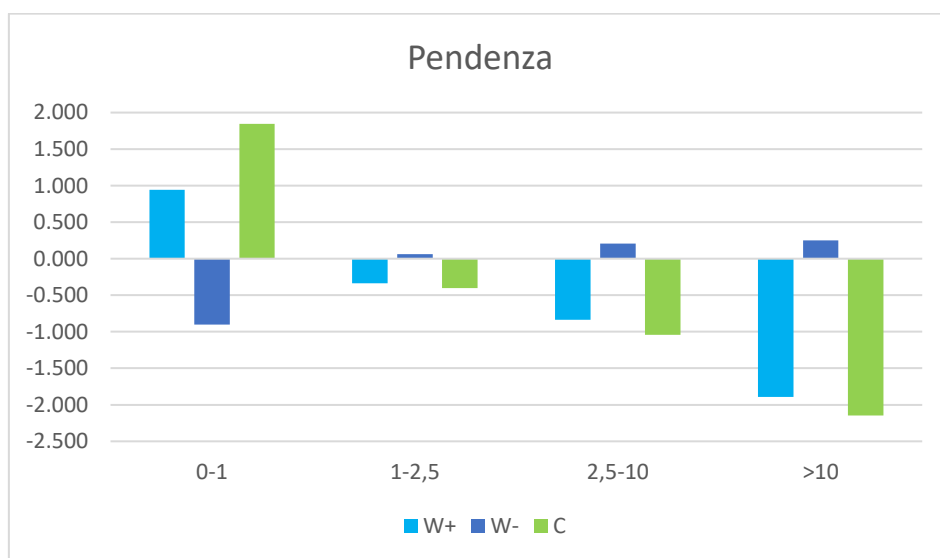


Figura 55. Istogrammi dei pesi W^- , W^+ e C del fattore predisponente della pendenza

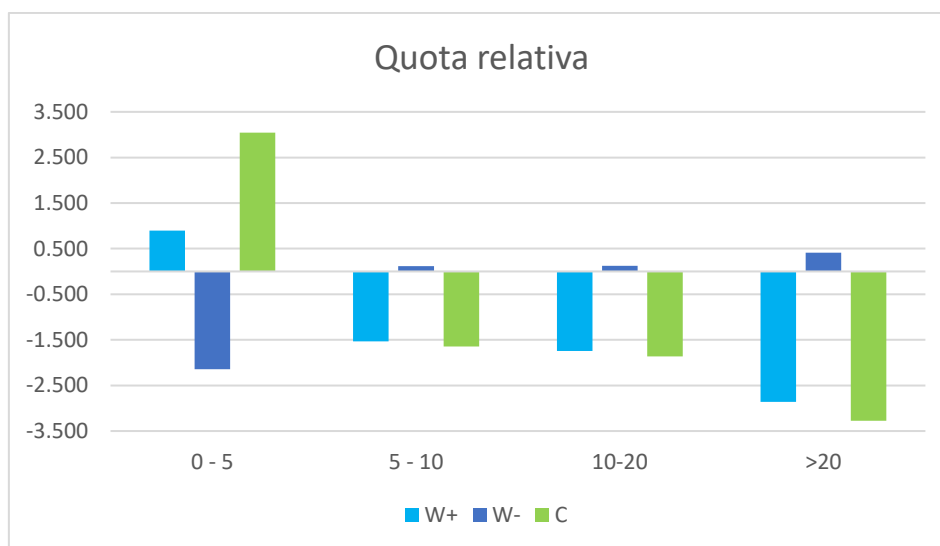


Figura 56. Istogrammi dei pesi W^- , W^+ e C del fattore predisponente della quota relativa

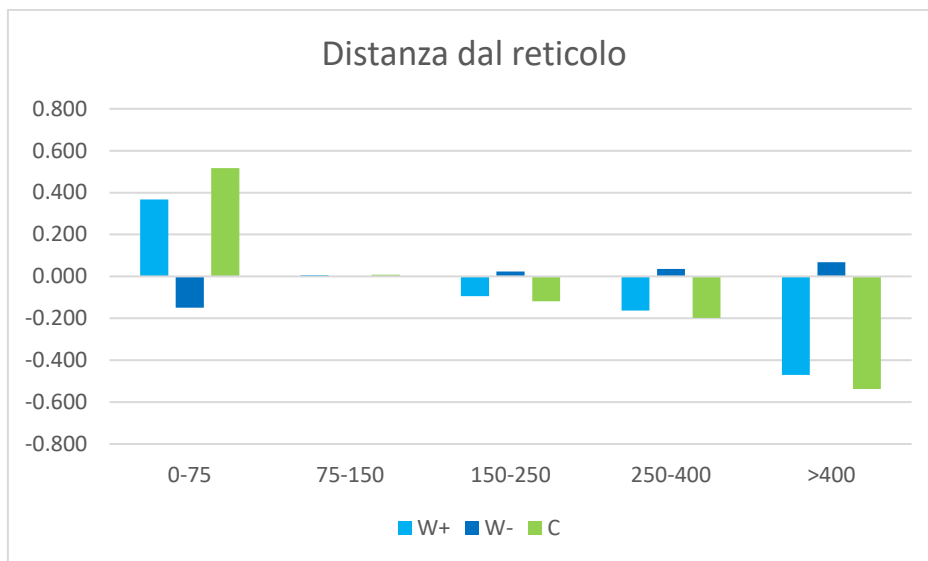


Figura 57. Istogrammi dei pesi W^- , W^+ e C del fattore predisponente della distanza dal reticolo

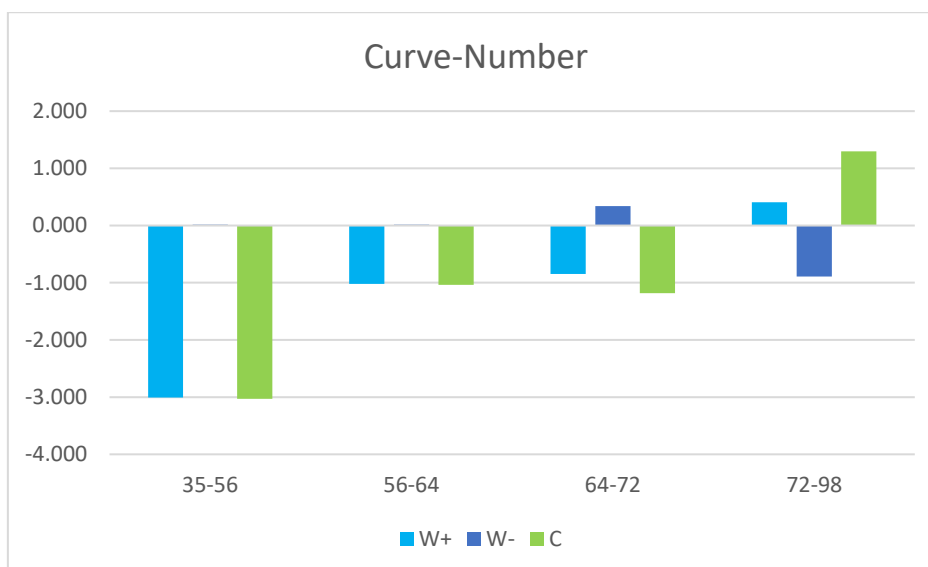


Figura 58. Istogrammi dei pesi W^- , W^+ e C del fattore predisponente del Curve-Number

7.5 Produzione delle mappe di suscettività da alluvione

Una volta attribuiti tutti i pesi alle classi di ogni fattore predisponente si è ottenuta la mappa di suscettività come sovrapposizione dei layers pesati. La mappa mostra il territorio attraverso l'indice di suscettività (cosiddetto "flood susceptibility index"), che varia tra un massimo di 6,7 e un minimo di -8,984, in cui, ad alti valori, corrisponde un'alta probabilità del territorio di essere inondato, mentre valori negativi rappresentano un'area poco suscettibile alle alluvioni (Figura 59, Figura 60).

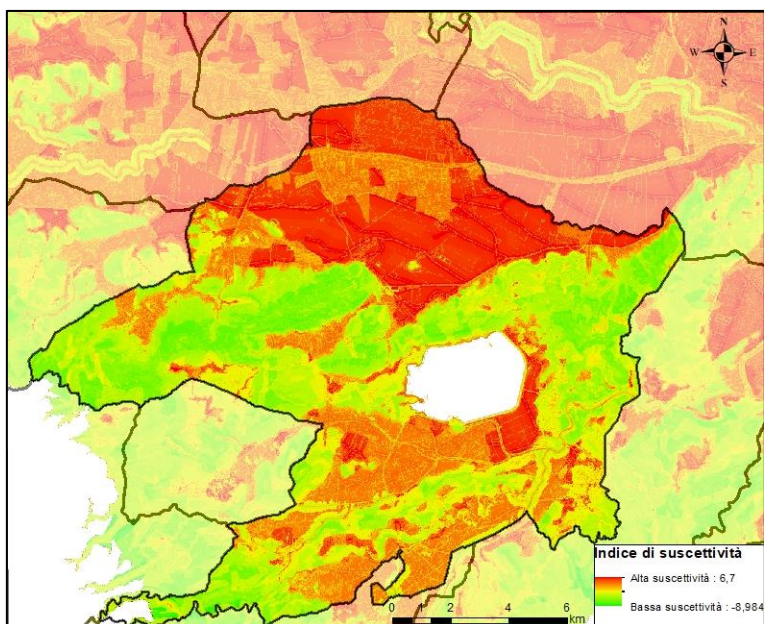


Figura 59. Rappresentazione in ambiente GIS dell'indice di suscettività del comune di Lentini

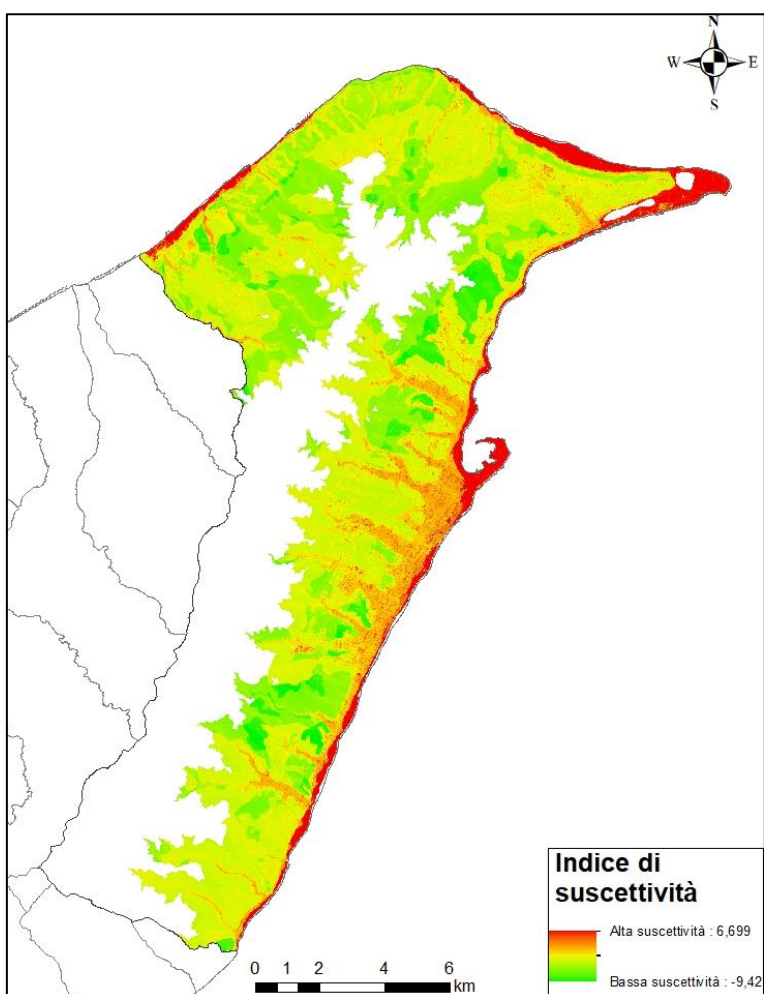


Figura 60. Rappresentazione in ambiente GIS dell'indice di suscettività del comune di Messina

La mappa inizialmente è stata suddivisa in venti classi con il metodo degli intervalli uguali e, successivamente, dopo aver valutato la distribuzione dei dati nelle classi, in quattro intervalli di suscettività: trascurabile, bassa, media e alta.

La distribuzione dei dati all'interno delle venti classi segue un andamento crescente: le prime dieci contengono solamente il 5% della totalità dei dati e quindi sono state raggruppate nella classe di suscettività trascurabile; le successive quattro contengono il 9,15% dei pixels e sono state riunite nella classe di suscettività bassa; le classi dalla 14 alla 17 sono state accorpate nella classe a suscettività media; le ultime tre classi, che contengono il 65,40% del totale dei pixels alluvionati, sono considerate come suscettività alta, in particolar modo solo l'ultima classe che ne contiene il 54,64% (Figura 61).

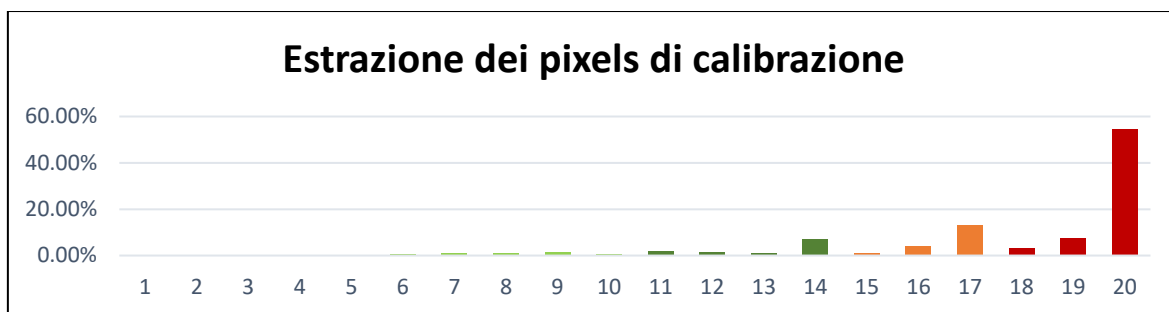


Figura 61. Distribuzione dei pixels alluvionati nelle 20 classi

Infine, dopo aver riunito le classi, si è prodotta la mappa di suscettività dei comuni di Lentini e di Messina (Figura 62, Figura 63).

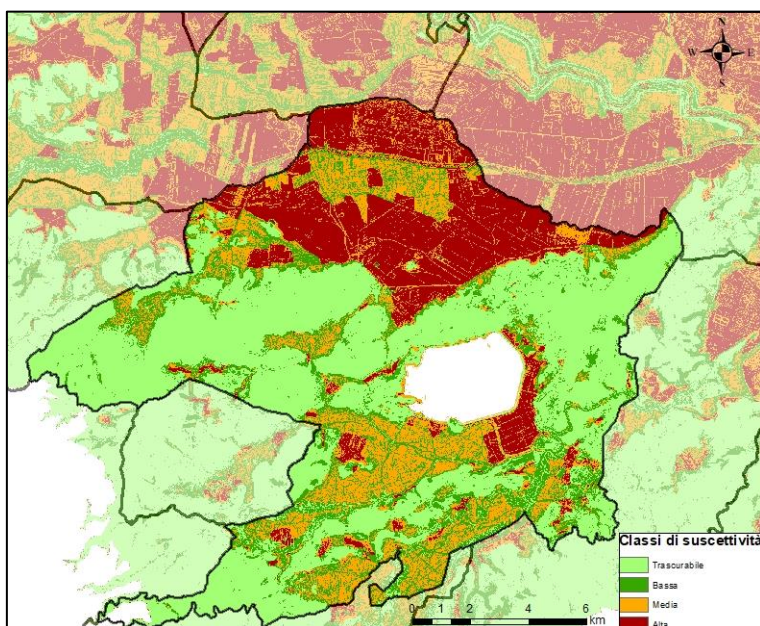


Figura 62. Mappa di suscettività da alluvione del comune di Lentini

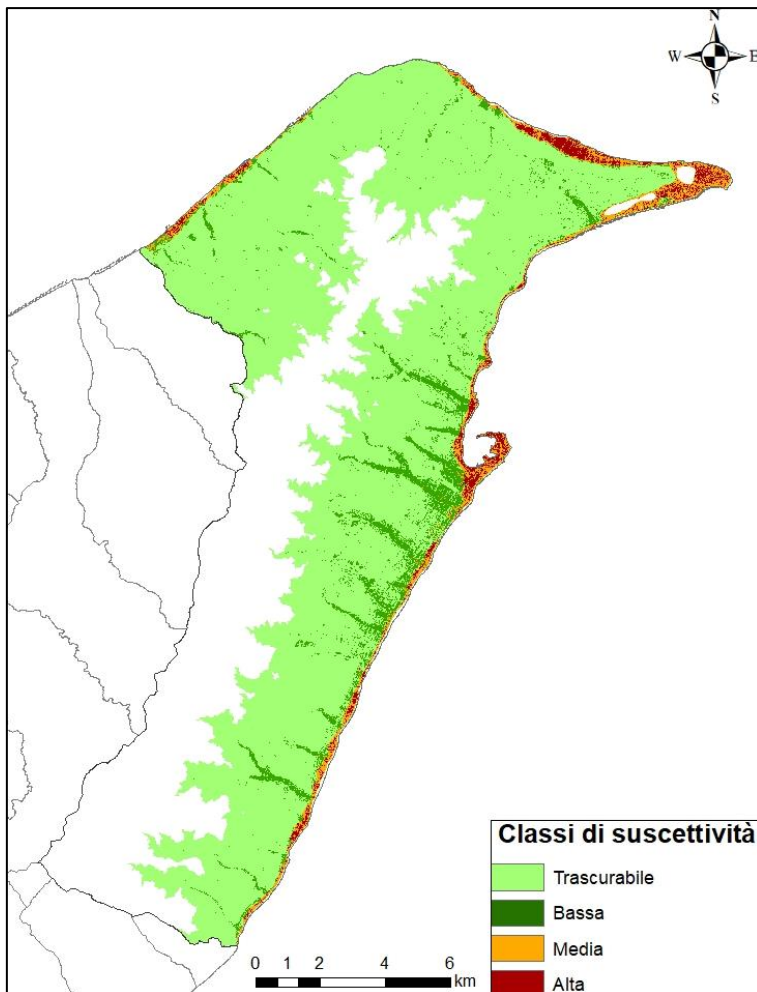


Figura 63. Mappa di suscettività da alluvione del comune di Messina

7.6 Discussione dei risultati

Di seguito è analizzato il comportamento della mappa per i due comuni.

Nel caso di Lentini si evince come la mappa di suscettività rappresenti, in modo corretto, la distribuzione del dataset di eventi presi in esame, durante la fase di calibrazione, all'interno delle diverse classi (Figura 64). Come mostra il grafico (Figura 65), quasi il 70% dei pixels ricade nell'area ad alta suscettività, il 18% in quella classificata come media suscettività e solamente il 12% in quella bassa (10,12%) e trascurabile (1,79%). Dati i risultati confortanti la mappa di suscettività può essere adoperata per il comune di Lentini.

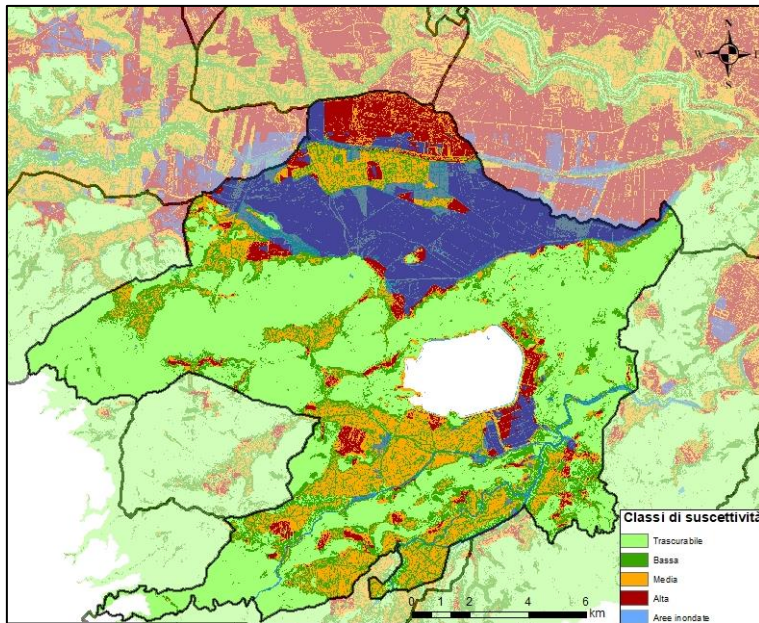


Figura 64. Confronto tra le aree inondate e la mappa di suscettività nel comune di Lentini

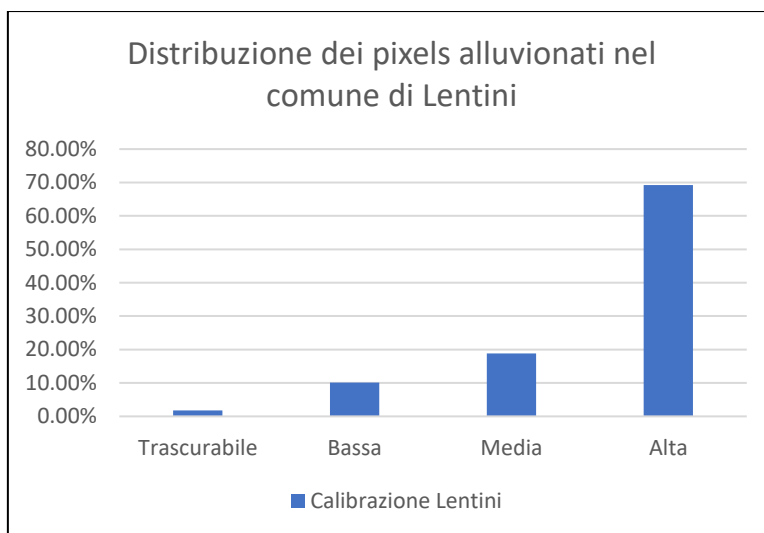


Figura 65. Distribuzione dei pixels alluvionati usati durante la fase di calibrazione per il comune di Lentini

Per il comune di Messina invece la mappa non rappresenta, in modo analogo a quella di Lentini, una corretta distribuzione del dataset osservato all'interno delle classi di suscettività (Figura 66, Figura 67). Il 54% dei pixels alluvionati ricade nella zona di suscettività trascurabile e quasi il 30% nella classe di bassa suscettività; solamente il 16% è posizionato nelle ultime due classi, dove invece dovrebbe essere concentrata la maggior parte.

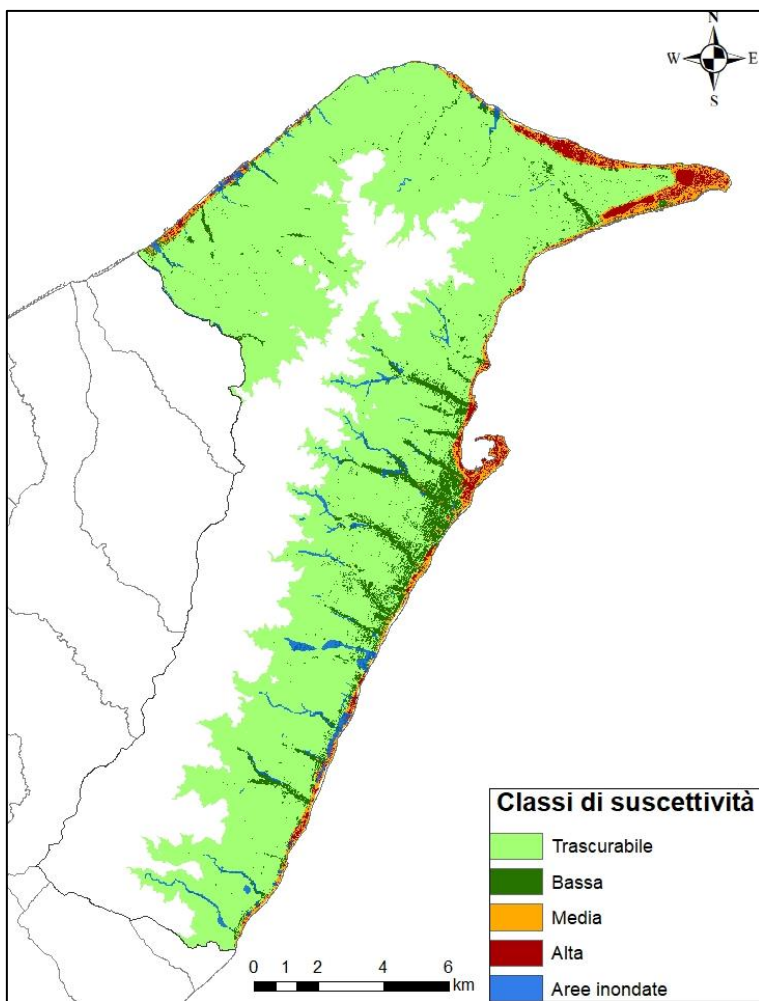


Figura 66. Confronto tra le aree inondate e la mappa di suscettività nel comune di Messina

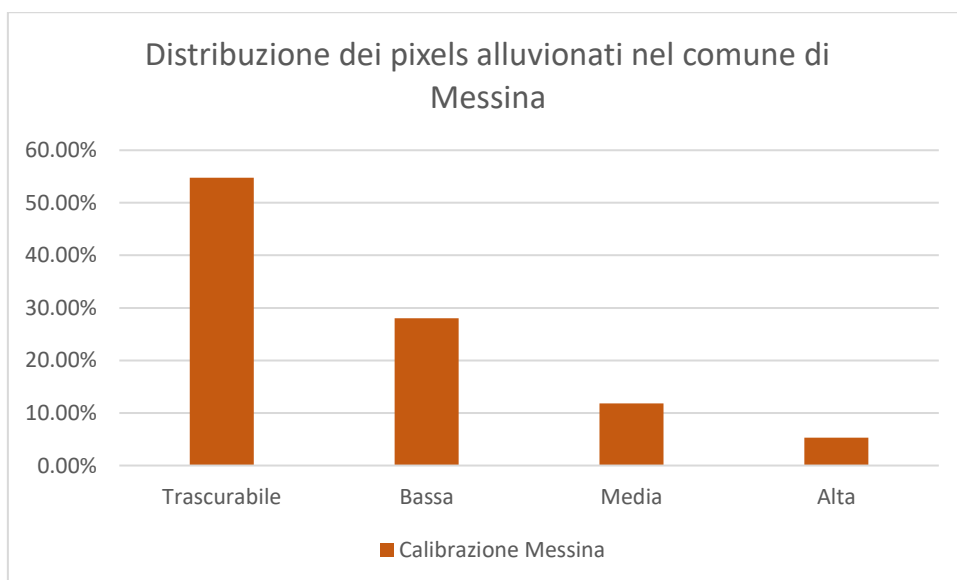


Figura 67. Distribuzione dei pixels alluvionati usati durante la fase di calibrazione per il comune di Messina

In conclusione, emerge come la mappa sia in grado di riprodurre in maniera adeguata un territorio poco urbanizzato come Lentini mentre mostri molte criticità per quanto riguarda un comune fortemente soggetto a interventi di antropizzazione del territorio, come Messina, in particolare per quanto riguarda la oblitterazione del reticolo naturale di drenaggio.

In special modo la tombinatura dei torrenti altera significativamente il risultato ottenuto, dato che i fenomeni di esondazione da parte di un torrente coperto e trasformato in asse viario avvengono in modo differente e molto più frequentemente rispetto a un corso d'acqua scoperto (GeoArbor Studio, 2018).

Infatti, la capacità di smaltimento del tratto tombinato, a parità di sezione idraulica, è fortemente ridotta rispetto alle condizioni naturali. Questo a causa del forte incremento della resistenza al moto dovuto all'interazione delle onde di superficie con la copertura, anche con livelli di riempimento relativamente distanti da quello di piene rive. A ciò si aggiungono le problematiche relative al trasporto solido, tanto flottante che al fondo, che tende rapidamente a limitare il deflusso o, addirittura, a impedirlo del tutto nei casi più gravi. Per quanto riguarda l'aspetto strutturale va osservato che nel caso di funzionamento in pressione la copertura dell'alveo risulta sollecitata da una distribuzione di pressione rivolta verso l'alto che ne può provocare il cedimento (Bovolin, 2012) o l'espulsione dei chiusini dalle loro sedi laddove non adeguatamente zavorrati.

A causa di questo, il meccanismo di inondazione non avviene per il superamento del livello delle ripe, quindi con una erogazione distribuita della portata per l'intera lunghezza del tratto e sotto carichi idraulici relativamente modesti.

Una volta che il tombino inizia a lavorare a bocca piena, la necessità di recuperare energia da parte della corrente richiede generalmente un forte rigurgito verso monte. Se le condizioni topografiche lo consentono, il livello può arrivare ad elevarsi anche di metri, superando il ciglio superiore del tombino e propagandosi in superficie. In sostanza il deflusso avviene (nel migliore dei casi) solo in parte nel tratto coperto, mentre il corso d'acqua si riappropria, per così dire, dell'originale tracciato in superficie, che riveste a tutti gli effetti il ruolo di alveo fluviale (Figura 68, Figura 69, Figura 70, Figura 71, Figura 72, Figura 73).

Si ha dunque una concentrazione di buona parte della (o addirittura dell'intera) portata prodotta dal bacino a monte, in corrispondenza della sezione di imbocco del tombino (Figura 74). Un'altra problematica dei tratti tombinati riguarda la vicinanza all'edificato: quando avviene l'esondazione non è presente alcun ostacolo tra l'asse viario sul quale scorre il fiume

e le abitazioni adiacenti, che vengono in pochissimo tempo invase o addirittura sommerse dall'acqua (Consiglio di Ricerca Nazionale, 2017)



Figura 68. Esondazione tratto tombato a San Martino Valle Caudina il 31 dicembre 2019



Figura 69. Alluvione a Livorno il 10 settembre 2017



Figura 70. Tratto tombinato si riappropria del suo percorso originale, Livorno 2017



Figura 71. Esondazione del torrente Seveso



Figura 72. Fuoriuscita dal tombino del torrente Seveso



Figura 73. Esondazione del fiume Fereggiano nell'omonima via (Genova) il 4/11/2011



Figura 74. Tre fasi (a distanza di pochi minuti l'una dall'altra) dell'esondazione a Cardoso di Stazzema (Lucca) il 19 giugno 1996



Figura 75. Alluvione a Livorno il 9 settembre 2017

7.7 Proposta di concettualizzazione

Il principale vantaggio dei metodi di analisi della suscettività sta nella possibilità di conseguire applicazioni massive alla scala regionale o addirittura a quella sovraregionale, disponendo di dati sostanzialmente semplici da reperire e di facile trattazione analitica. Per questa ragione è di per sé sconsigliabile generare eccezioni al metodo che, forzatamente, verrebbero a richiedere specifiche modifiche caso per caso, con l'effetto di pregiudicare la semplicità, la speditezza e il carattere generale del metodo.

Tra i dati necessari a generare le mappe spicca quello del reticolo di drenaggio la cui scala di restituzione deve essere coerente con quella del modello digitale in uso. La scelta di un passo del DEM pari a 5 metri indirizza la scelta verso le usuali carte tecniche prodotte dalle Regioni, generalmente 1: 5.000 o 1: 10.000.

L'attuale filosofia di produzione delle carte tecniche regionali è generalmente affidata a database topografici² che sostanzialmente associano ad ogni elemento grafico, sia esso areale, puntale o lineare, il record di un database che ne conservi le necessarie informazioni testuali.

I temi del reticolo, in particolare, presentano molte tipologie legate alle dimensioni, alle caratteristiche di naturalità o artificialità, alla presenza di opere idrauliche. In numerosi casi, si riscontra una specifica tipologia relativa ai tombini. I tratti tombinati sono dunque

² Art.3 della legge regionale della Lombardia 12/2005

immediatamente indirizzabili con specifici tag, come per esempio nel geodatabase della regione Campania si riscontrano specifici tag per inquadrare i tratti cosiddetti “fittizi” (Figura 76).

Questo aspetto conforta sul fatto che, identificando una adeguata concettualizzazione, sia possibile affrontare questo importante tema senza pregiudicare in alcun modo la generalità della metodologia e l’automazione del metodo.

Attributi di questa componente spaziale						RC0	RC5
04040101	EL_IDR_TY	Tipo di elemento idrico	Enum	aTratti su	Tracciato	P	P
specifica se si tratta di mezzeria, di tracciato virtuale (all'interno di uno specchio d'acqua) o di tracciato fittizio (nel caso ad esempio di percorsi sotterranei o tombinati) introdotto per garantire la connessione del reticolo idrografico							
Dominio (Tipo di elemento idrico)						RC0	RC5
01	mezzeria	rappresenta il flusso dell'acqua di un corso d'acqua: ogni tratto di mezzeria può essere contenuto, anche parzialmente in una superficie di alveo inciso				P	P
02	virtuale	rappresenta il flusso virtuale di un corso d'acqua all'interno di uno specchio d'acqua				P	P
03	fittizio	rappresenta il flusso di un corso d'acqua non visibile (sotterraneo o tombinato). NOTE: è opportuna una metainformazione che specifichi l'affidabilità del tracciato fittizio: se cioè corrispondente alla realtà o no				P	P

Figura 76. Tag utilizzato nel geodatabase della Campania per inquadrare il tipo di elemento idrico

Il reticolo idrografico di Messina, come affermato precedentemente, è composto sia da tratti scoperti che coperti, in particolar modo nel centro urbano, in cui molti di essi sono diventati importanti assi viari della città a seguito di una sua ristrutturazione urbanistica post-terremoto del 1908, con palazzi di modesta altezza, lunghe strade diritte perpendicolari, pianta ortogonale e isolati a scacchiera (Mercadante, 2009).

Trascurando queste peculiarità urbanistiche e basandosi sulla classificazione generalmente suggerita in letteratura per la costruzione delle classi del fattore predisponente della distanza dal reticolo idrografico è stata inizialmente prodotta una prima versione di mappatura di suscettività. In tale mappa, le due tipologie di reticolo idrografico sono state trattate in egual modo, tenendo in considerazione, ai fini dei fattori predisponenti, le stesse classi di distanza orizzontale dal reticolo, cioè: 0-75 metri per la prima classe, 75-150 per la seconda, 150-250 per la terza, 250-400 per la quarta e la restante parte del territorio con distanza maggiore di 400 metri per la quinta classe (Figura 77).

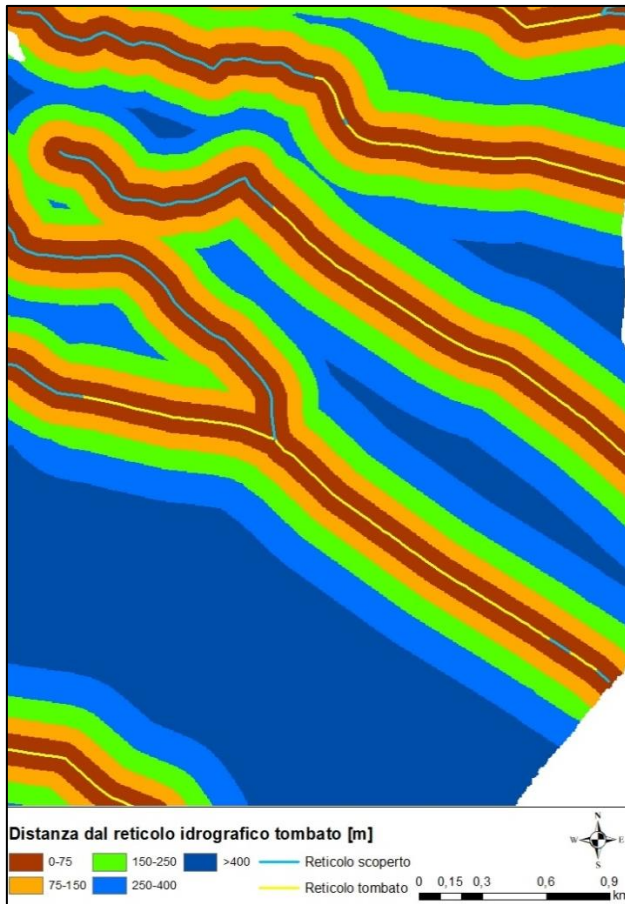


Figura 77. Classificazione della distanza euclidea utilizzata nella prima mappa prodotta

Da una prima analisi dei risultati del modello, per quanto speditiva, emerge con forza il fatto che questa classificazione, pur rappresentando adeguatamente la suscettività del territorio adiacente ai tratti non tombati, non riesce ad interpretare allo stesso modo la peculiarità dei tratti coperti. Difatti, nella composizione delle classi risulta abbastanza evidente, anche osservando alcune alluvioni storicamente registrate su aree attraversate sia da tratti scoperti che tombati, come l'espansione laterale dell'alluvionamento indotto da questi ultimi risultati più contenuta. Tale fenomeno si configura come determinante nell'influenza del peso che hanno le classi a distanze più contenute dai corsi d'acqua, riducendone la rilevanza nella interpretazione della suscettività di un territorio ad alluvionarsi. Considerare, infatti, la stessa classe omogenea di *buffer* indistintamente per i due tratti porta in maniera inevitabile: in un caso a estromettere un maggior numero di aree alluvionate (*buffer* più ristretto) dalle prime classi e nell'altro ad aumentare il rumore bianco all'interno della totalità della classe selezionata (*buffer* più ampio). Entrambe queste fattispecie contribuiscono a ridurre il rapporto in probabilità delle suddette classi alla base del metodo *Weight of Evidence* e quindi a depotenziare la capacità descrittiva del fattore predisponente.

A tale proposito conviene svolgere qualche specifica osservazione. Infatti, non è infrequente che il tombinamento di corsi d'acqua in area urbana e metropolitana avvenga secondo direttrici che, per evidenti ragioni di ordine morfologico e di assetto del territorio, rivestono una posizione di centralità rispetto al tessuto insediativo. In altri casi, come quello di Messina, tale fenomeno accompagna specifiche trasformazioni urbanistiche di grande rilievo. I tronchi coperti coincidono dunque frequentemente con arterie principali.

Tali percorsi verranno così a costituire nei fatti l'effettiva sede di transito della portata esondata, impedendone la libera espansione laterale, vincolata per buona parte dall'edificato. Ricordiamo che la descrizione del territorio utilizzata nel caso di specie, ma in via generale in tutti gli esempi applicativi che si sono analizzati in letteratura, fa riferimento a modelli digitali del terreno a media risoluzione (5 metri nel caso in esame). Si tratta, appunto, di DTM che descrivono l'altimetria della nuda superficie terrestre, al contrario dei DSM ad alta risoluzione che danno ragione degli oggetti (edifici, manufatti, vegetazione) rilevati dalle diverse eco del sensore (Borgogno Mondino, Bellone, Giulio Tonolo, & Lingua, 2004). Per questa ragione l'ambiente costruito viene tradotto nei confronti del modello, per nulla o in maniera fortemente non realistica. Si ricorda per di più che il reticolo è descritto a livello informatico, a causa della trasformazione tipologica da *vector* a *raster*, da una singola linea larga generalmente la dimensione di un pixel.

È facile immaginare (e constatare nel caso di Lentini) come tali limitazioni di ordine cartografico non provochino particolari problemi in contesti naturali o rurali. Lo stesso ragionevolmente avviene in ambienti costruiti, laddove l'esondatazione si propaghi effettivamente per superamento della linea di sponda, su fronti significativamente estesi.

Non accade così, come si è più sopra chiaramente rilevato, in presenza di tronchi tombinati, ove l'idrologia e l'idraulica dei processi risultano del tutto avulse dallo schema ipotizzato in via generale. A maggior ragione in un caso come quello della città di Messina dove dal punto di vista idrologico ci si trova in presenza di bacini di superficie contenuta (che non superano i 10 km²) e il reticolo idrografico è rappresentato da numerosi torrenti, con un regime idrologico tipico delle fiumare, con i corsi d'acqua che scorrono paralleli tra loro, con brevi lunghezze e forti pendenze che ne determinano tempi di corrivazione inferiore ai 30 minuti. Da un punto di vista concettuale si è ritenuto di affrontare il problema ponendo l'accento sul confinamento del flusso sulla strada soprastante il tombino, che costituisce generalmente il tratto tipico di queste situazioni. Poiché uno dei principali fattori predisponenti della

suscettività è proprio la distanza orizzontale dal reticolo, si è sviluppata una proposta metodologica attraverso la modifica delle dimensioni dei buffer corrispondenti alle diverse classi del relativo fattore predisponente.

Occorre dunque adesso inferire un qualche concetto di ordine generale per orientare tale scelta. Le dimensioni caratteristiche delle strade paiono in questo senso l'unica via da percorrere per sviluppare qualche ipotesi di ordine (almeno orientativamente) quantitativo. A tal fine è possibile ad esempio riferirsi al Decreto-legge³ vengono stabilite le distanze dal confine stradale dei centri abitati che deve essere di 20 metri per quanto riguarda le strade urbane di scorrimento e di 10 metri per le strade di quartiere. Data la presenza di entrambe le tipologie di strade si è ritenuto opportuno considerare la prima classe della distanza dal reticolo idrografico dai 0 fino ai 15 metri, così da ricomprendere al suo interno sia l'intera carreggiata, che gli edifici ai lati di essa che naturalmente risultano non solo i primi a essere inondati, ma anche quelli che sperimentano gli effetti dinamici dell'inondazione in maniera più severa.

Le successive classi sono state scelte per via empirica, considerando in forma del tutto indiretta, la propagazione attraverso il reticolo stradale, verso le zone retrostanti, più lontane dal tracciato del tombino. Si sono dunque fissati gli intervalli delle seguenti classi: da 15 a 30 metri per la seconda classe, da 30 a 75 per la terza, da 75 a 150 per la quarta e oltre 150 metri per l'ultima classe (Figura 78).

³ Art.28 del decreto del Presidente della Repubblica 16 dicembre 1992, n.495

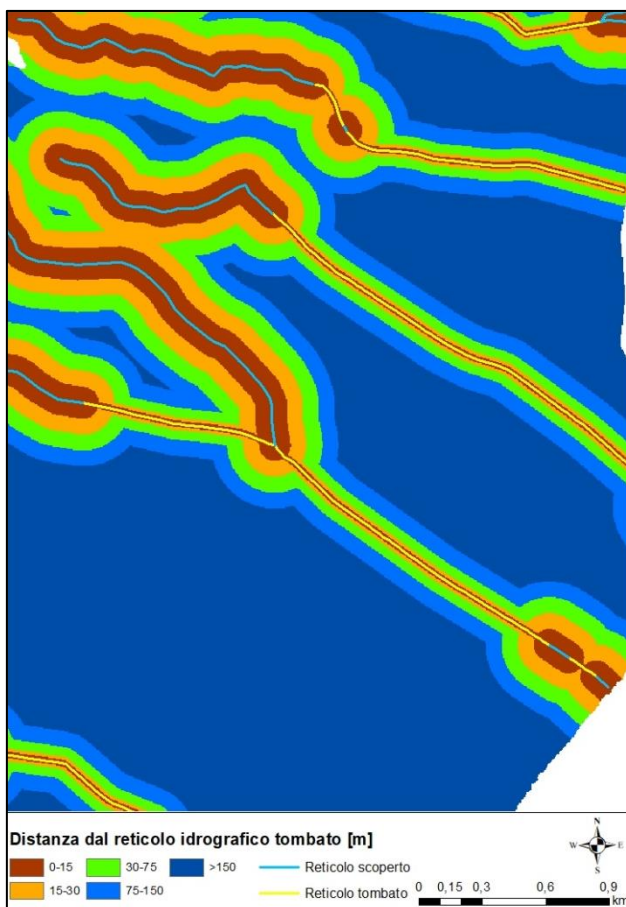


Figura 78. Modifiche apportate al fattore predisponente della distanza euclidea per i tratti tombati.

7.8 Ulteriori proposte: la quota relativa

Dalla mappa di suscettività prodotta con la prima metodologia la maggior parte del territorio comunale risulta a suscettività bassa e trascurabile, mentre alcune aree, in cui non si sono mai verificati eventi alluvionali e che sono anche molto distanti dal reticolo idrografico, vengono classificate come zone ad alta suscettività. È questo il caso, ad esempio, del porto e di Capo Peloro (Figura 79).

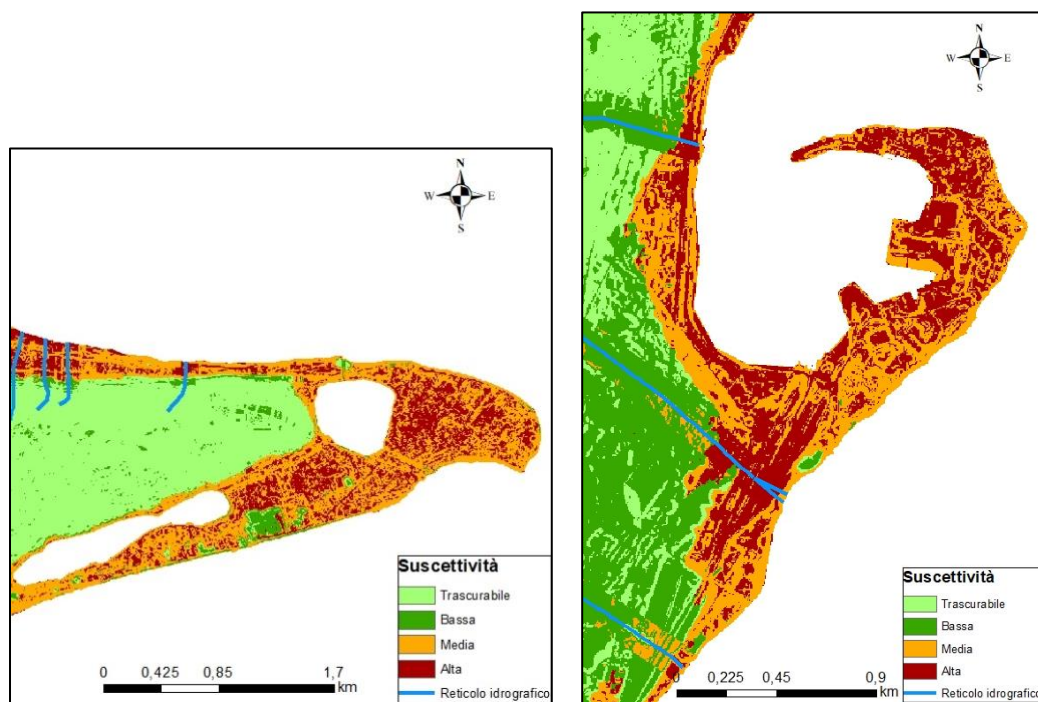


Figura 79. Rappresentazione della mappa di suscettività a Capo Peloro (sinistra) e nella zona del Porto (destra)

Questa peculiarità riscontrata nell'analisi di suscettività da alluvione attraverso il metodo geomorfologico in uso risulta particolarmente evidente in un caso come quello del comune di Messina ove vi sono ampie aree densamente urbanizzate e impermeabilizzate dalle attività di origine antropica. Nelle aree citate, l'alterazione prodotta sulla morfologia naturale preesistente del territorio da parte dell'impatto antropico (p.e. bonifica dell'area paludosa circostante il lago di Ganzirri e successiva urbanizzazione massiccia anche intorno al cosiddetto "Pantano piccolo", la cui toponomastica dà importanti suggerimenti sui fenomeni ivi in atto) risulta talmente forte da rendere necessarie delle ulteriori considerazioni sul fattore predisponente della quota relativa. Infatti, quest'ultimo, date le scarse variazioni delle altitudini nelle zone in esame, tenderebbe a definire il territorio come in condizioni altamente favorevoli per lo svilupparsi di fenomeni alluvionali. Tuttavia, come accennato in precedenza, le notevoli alterazioni antropiche o la morfologia assolutamente peculiare (la forma a falce che contraddistingue l'area del porto per quanto modificata dell'intervento dell'uomo risulta essere una struttura preesistente, le cui origini si perdono nella mitologia greca) fanno sì che tali aree non vengano minimamente raggiunte dal reticolo idrografico e vanifichino completamente gli sforzi prodotti per correlare il raggio di esplorazione dei minimi locali ad una qualche componente di natura idrologico-idraulica.

Infatti, come spiegato in precedenza, il fattore della quota relativa viene ricavato tramite sottrazione tra il modello digitale delle quote assolute del terreno e il DTM dei minimi locali. Correlando perciò il raggio di ricerca dei minimi locali con la massima distanza di ruscellamento superficiale, si prevede di individuare punti di minimo locale che siano anche punti di drenaggio, tuttavia questo evidentemente non avviene in queste determinate, rendendo i minimi locali individuati ben lontani dall'essere punti di alto accumulo di flusso. Le celle su cui si ricerca il minimo locale si trovano ad essere in porzioni di territorio a distanze superiori ai 2 km rispetto al corso d'acqua più vicino e, di conseguenza, dal momento che la distanza media tra due corsi d'acqua per il comune di Messina è di soli 280 metri, il punto individuato come minimo all'interno del raggio di esplorazione non è minimamente connesso con le informazioni relative alla quota di una qualunque cella del reticolo idrografico

Per tale motivo, per rispondere a questa specifica peculiarità individuata in territori a forte alterazione di origine antropica o di forma che naturalmente provvede alla messa in sicurezza dal reticolo idrografico, si è elaborata una proposta di correzione alla costruzione del fattore predisponente della quota relativa in questi specifici ambiti territoriali. Si è costruito intorno ad ogni tratto di reticolo un *buffer* di 500 metri, distanza collegata alla distanza media fra i corsi d'acqua nella parte pianeggiante del territorio comunale. Si è calcolato il fattore predisponente della quota relativa solo all'interno di tale *buffer*, così da poter aggiungere oltre alle 4 classi della quota relativa un'ulteriore classe che rappresentasse tutti i pixels del territorio oltre la massima distanza selezionata (Figura 80).

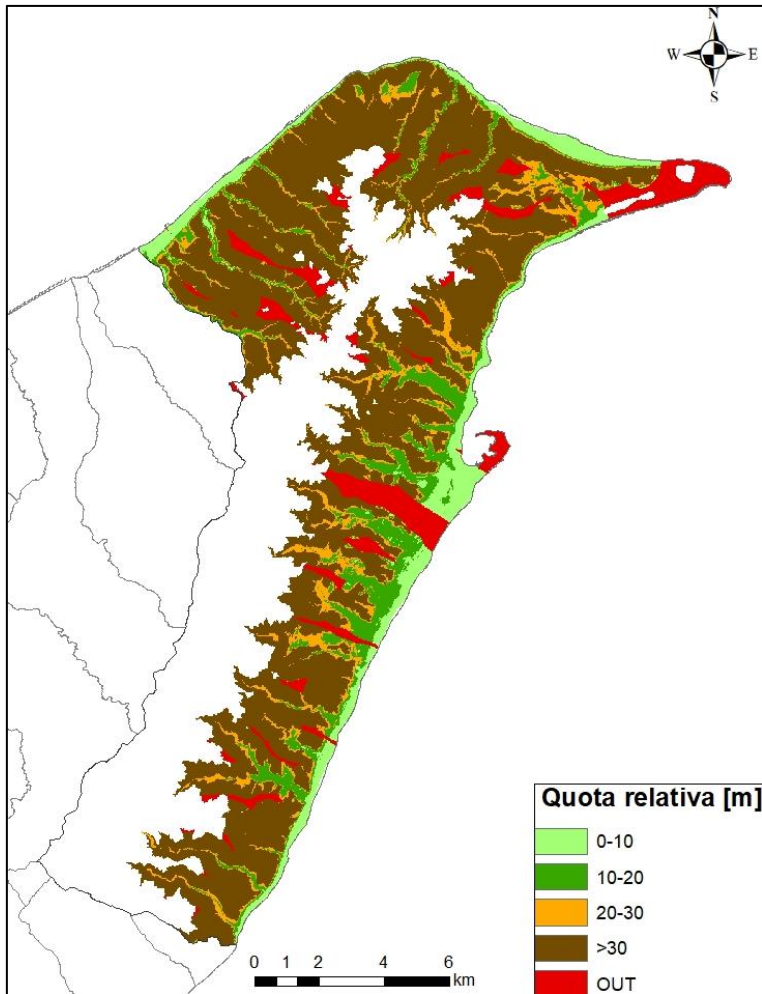


Figura 80. Rappresentazione in ambiente GIS delle cinque classi della quota relativa

Questo ha permesso di individuare, come mostrato in figura, le quote relative rispetto al reticolo idrografico solo ed esclusivamente per le porzioni di territorio ad una distanza tale da essere effettivamente influenzate dalla differenza di quota rispetto ai punti della rete di drenaggio.

A testimonianza di ciò si può facilmente notare come la quasi totalità del dataset storicamente osservato si disponga all'interno della fascia di esplorazione dei minimi locali del 99,5% (Figura 81).

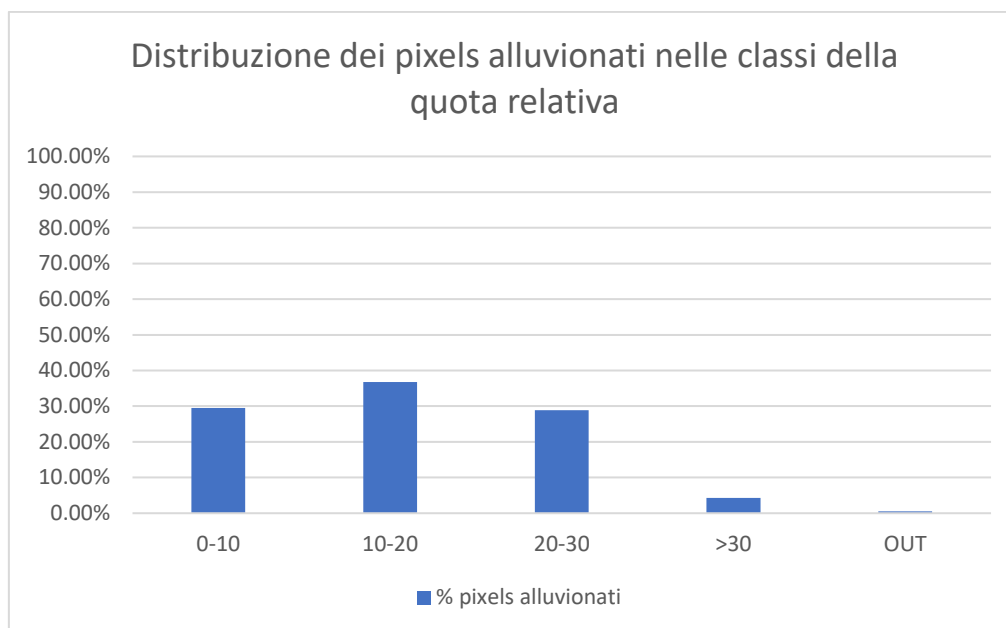


Figura 81. Distribuzione dei pixels alluvionati nelle classi della quota relativa

7.9 Produzione della seconda mappa di suscettività per il comune di Lentini

Per il comune di Lentini è stata prodotta la mappa di suscettività utilizzando gli stessi criteri utilizzati nella prima mappa, ma considerando solamente i dati di calibrazione ricadenti all'interno del comune e delle zone limitrofe quindi considerando solamente quelli degli eventi del 2003 e del 2005.

I quattro fattori predisponenti sono stati classificati con gli stessi intervalli usati precedentemente e si sono quindi calcolati i pesi per ogni classe, e successivamente si è prodotta la mappa di suscettività (Tabella 12, Figura 82).

Fattore	Classe	W+	W-	C
PENDENZA	0-1	0,777	-0,946	1,723
	1-2,5	-0,534	0,110	-0,643
	2,5-10	-1,129	0,266	-1,394
	>10	-1,576	0,110	-1,686
QUOTA RELATIVA	0-5	0,724	-3,053	3,777
	5-10	-1,932	0,152	-2,085
	10-20	-4,582	0,158	-4,740
	>20	-8,361	0,247	-8,609
CURVE-NUMBER	35-56	-2,904	0,006	-2,910
	56-64	-0,657	0,009	-0,666
	64-72	-0,957	0,443	-1,400
	72-98	0,478	-0,955	1,433
DISTANZA DAL RETICOLO	0-75	0,291	-0,115	0,406
	75-150	0,018	-0,005	0,023
	150-250	-0,066	0,017	-0,082
	250-400	-0,113	0,025	-0,138
	>400	-0,414	0,060	-0,474

Tabella 12. Pesi delle classi ottenuti con il modello WOE

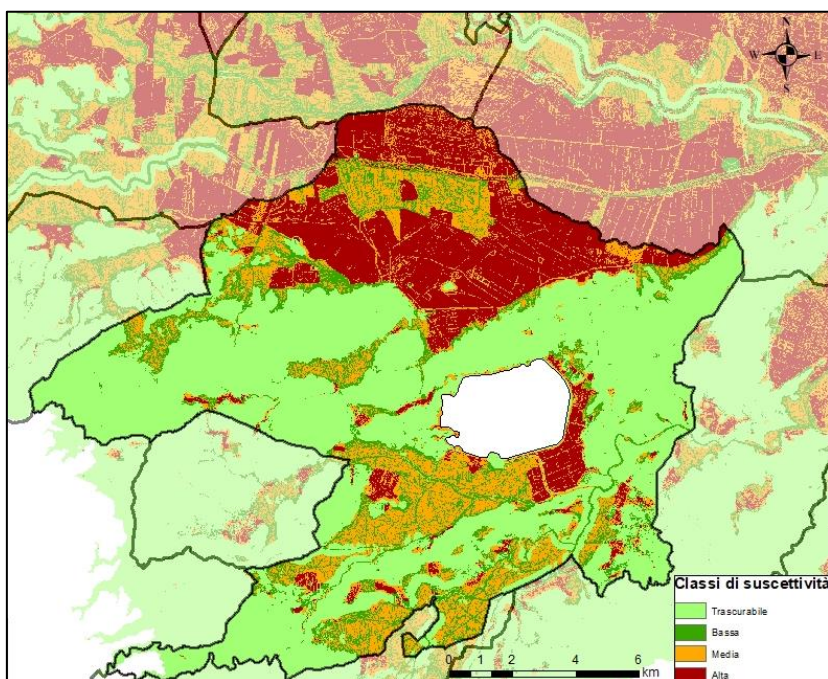


Figura 82. Mappa di suscettività del comune di Lentini

7.10 Produzione della seconda mappa di suscettività per il comune di Messina

Per il comune di Messina sono state applicate le modifiche ai fattori predisponenti della quota relativa e della distanza dal reticolo, e sono stati scelti intervalli di classificazione empirici. Quindi sono stati calcolati i pesi per ogni classe di ogni fattore predisponente (Tabella 13).

Fattore	Classe	W+	W-	C
PENDENZA	0-5	0,978	-0,518	1,497
	5-10	0,716	-0,167	0,882
	10-30	-0,324	0,072	-0,396
	>30	-2,002	0,556	-2,558
QUOTA RELATIVA	0-10	1,402	-0,275	1,676
	10-20	1,395	-0,363	1,758
	20-30	1,185	-0,248	1,433
	>30	-2,721	1,025	-3,746
	OUT	-2,906	0,090	-2,996
CURVE-NUMBER	35-56	-1,814	0,051	-1,865
	56-64	-1,512	0,044	-1,556
	64-72	-0,615	0,118	-0,733
	72-98	0,249	-0,868	1,117
DISTANZA DAL RETICOLO	0-75	1,102	-0,691	1,793
	75-150	-0,318	0,060	-0,378
	150-250	-0,506	0,072	-0,578
	250-400	-0,831	0,080	-0,912
	>400	-1,052	0,276	-1,328

Tabella 13. Pesi delle classi ottenuti con il modello WOE

Per il fattore predisponente della pendenza, dato che il territorio di Messina mostra pendenze elevate, sono stati scelti intervalli più ampi rispetto alla mappa precedente: la prima classe comprende i pixels fino ai 5° e mostra una correlazione positiva tra la classe e il verificarsi di eventi alluvionali; anche la seconda classe presenta valore positivo, mentre le ultime due hanno pesi negativi, in particolar modo l'ultima (-2,558). I pesi attribuiti ad ogni classe del fattore predisponente mostrano come siano le zone a bassa pendenza quelle maggiormente soggette ad alluvione.

La quota relativa evidenzia una correlazione positiva e molto simile per le prime tre classi fino ai 30 metri di quota; la quarta classe, che comprende quote superiori ai 30 metri, presenta una correlazione molto negativa (-3,746); anche l'ultima classe ha un valore negativo, anche se minore rispetto alla classe precedente. Questo è dovuto al fatto che, nonostante i mq di alluvioni storicamente osservate siano poco rilevanti nell'ultima classe, tuttavia l'estensione della porzione di territorio compresa all'interno di questa classe risulta minore e quindi contribuisce ad abbassare in modulo il peso prodotto dal modello statistico.

Il CN mostra una correlazione positiva solamente per la classe più impermeabile, mentre le tre classi precedenti hanno valori di contrasto negativi, in particolar modo le prime due, a dimostrazione del fatto come più è permeabile il terreno e maggiore è l'anti correlazione con il fenomeno alluvionale.

Infine, anche il fattore predisponente della distanza ha un unico valore positivo (1,793) attribuito alla prima classe, che dimostra come le aree più suscettibili siano quelle più prossime ai corsi d'acqua. Le successive quattro classi hanno valori negativi crescenti dalla seconda (-0,328) fino alla quinta, che racchiude i pixels oltre 400 metri dal reticolo (-1,328). Dopo aver attribuito i pesi ad ogni classe, si è prodotta la mappa degli indici di suscettività e, successivamente, si è suddivisa nelle quattro classi di suscettività: nella classe trascurabile sono state raggruppate le classi dalla 1 alla 8, nella bassa dalla 9 alla 14, nella media dalla 14 alla 16 e le ultime quattro classi, che contengono il 74,74% dei pixels alluvionati, sono state raggruppate nell'ultima classe di suscettività (Figura 83, Figura 84).

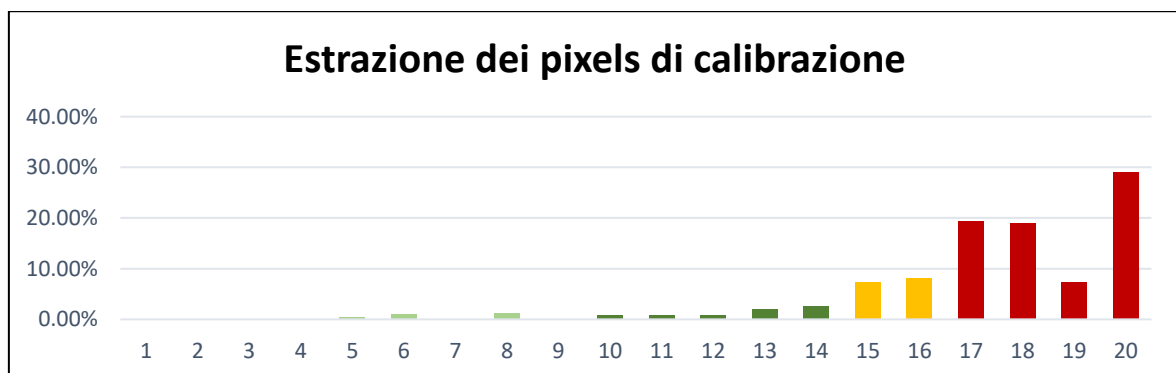


Figura 83. Distribuzione dei pixels di calibrazione nelle 20 classi

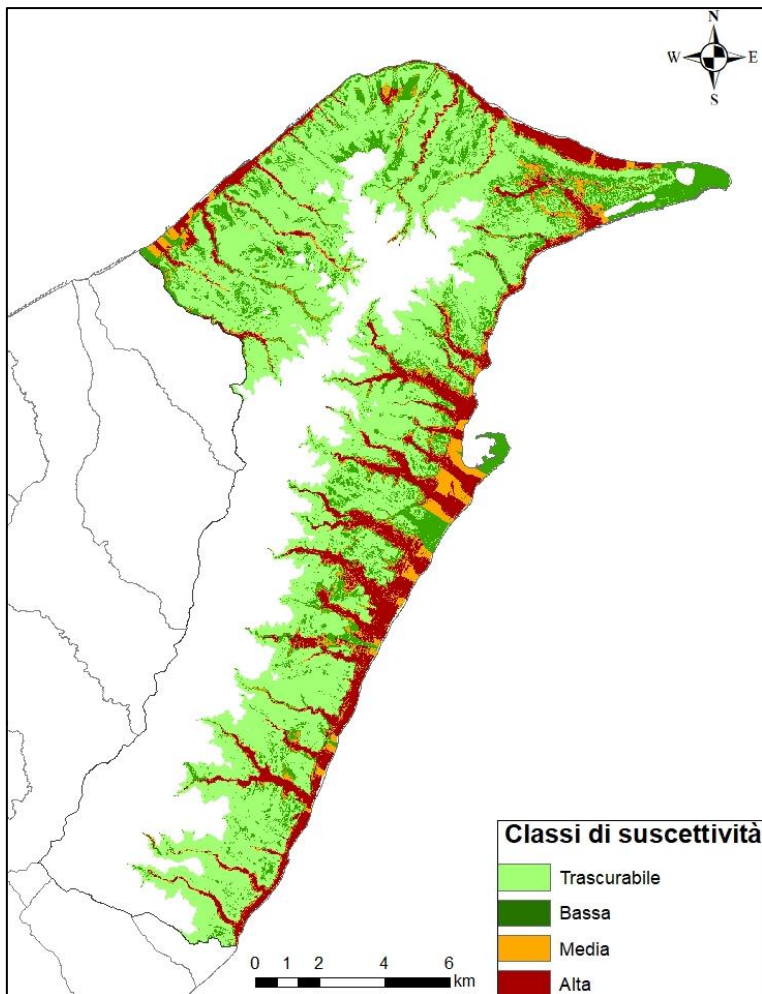


Figura 84. Mappa di suscettività del comune di Messina

7.11 Validazione del modello

Dopo aver addestrato il modello sui due comuni separatamente, si procede con la fase di validazione, e la distribuzione del relativo dataset di osservazioni nelle quattro classi di suscettività per verificare la stabilità del modello. Oltre a ciò viene resa graficamente la distribuzione dei territori oggetto dell'analisi di suscettività all'interno delle quattro classi di suscettività: questo per valutare l'efficacia dello strumento nella descrizione dei comuni. Infatti, una mappatura che definisca come ad alta suscettività da alluvioni porzioni troppo ampie del territorio comunale rischia di essere uno strumento inefficace ai fini della pianificazione di protezione civile. Per quanto concerne Lentini, durante la fase di

validazione si è utilizzato il dataset di dati corrispondente all'evento alluvionale del 2018 mappato grazie all'utilizzo dei satelliti di Copernicus Emergency.

Dalla mappa così ottenuta emerge che quasi il 60% del territorio appartiene alle classi di suscettività trascurabile (47,96%) e bassa (11,27%), mentre la restante porzione ricade nelle classi media e alta. Solo una minima percentuale di pixels utilizzati nella fase di validazione, viene definita a suscettività trascurabile; il restante 97% viene valutato dal modello in uso in aree a suscettività da alluvione, di cui meno del 5% in quella a bassa suscettività e il 92,63% tra media e alta suscettività (Figura 85). Questi risultati sono molto confortanti e confermano come la l'analisi proposta descriva accuratamente le aree soggette ad alluvione del territorio.

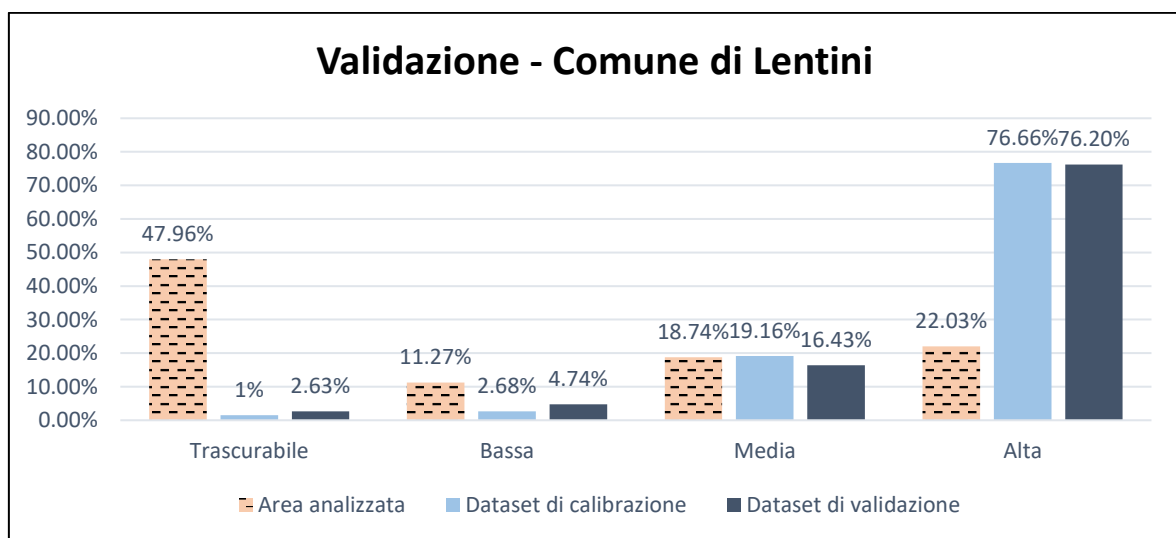


Figura 85. Grafico della validazione del comune di Lentini

Nel caso del comune di Messina è stato utilizzato come dataset di validazione il restante 40% dei poligoni rappresentanti eventi alluvionali osservati.

Considerando la seconda versione dell'analisi di suscettività prodotta, emerge come il 60% del territorio comunale ricada nell'area a suscettività trascurabile, quasi il 18% in quella a suscettibilità bassa e il 22% nell'area media e alta.

Anche in questo caso, grazie alle modifiche applicate, si hanno risultati positivi: solamente il 3,82% ricade in aree a suscettibilità trascurabile, il 4,35% viene classificato a suscettività bassa; mentre il 90% ricade nelle classi di suscettività media e alta. (Figura 86).

Il risultato ottenuto dalla validazione dimostra la stabilità del modello che dà risultati confortanti anche con un dataset di eventi indipendenti dal dataset usato durante la fase di calibrazione.

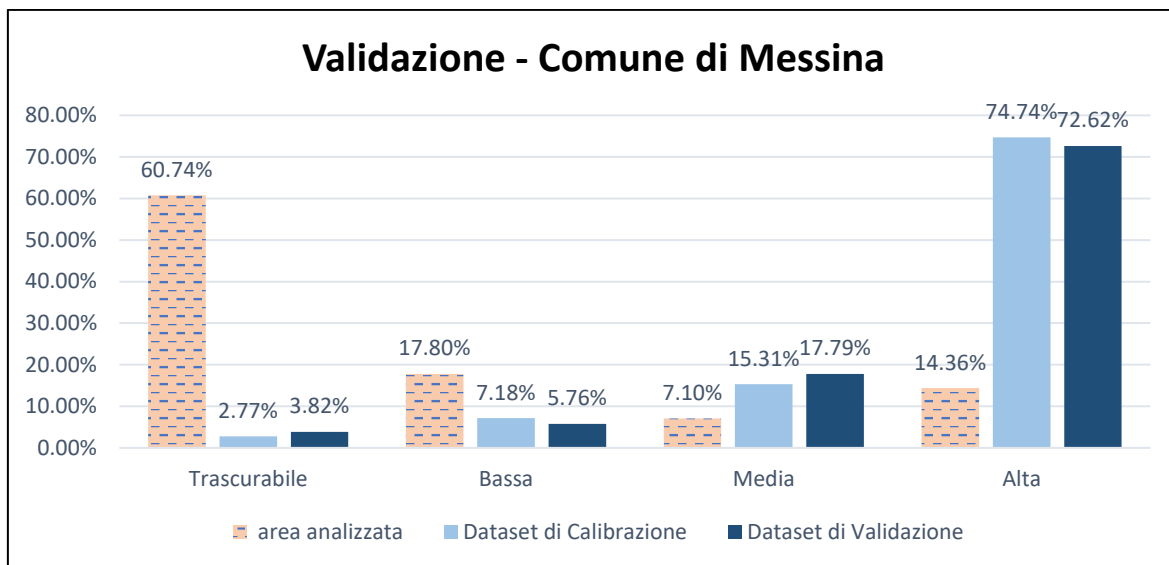


Figura 86. Grafico della validazione del comune di Messina

8 RISULTATI

8.1 Confronto tra la mappa di suscettività e la mappa di pericolosità

Come già anticipato, la mappa di suscettività non va intesa come uno strumento alternativo o sostitutivo rispetto a quelle presenti nel PAI, ma come un approccio a supporto del pianificatore di protezione civile nella produzione degli scenari di evento atteso e di rischio idraulico.

Nel Piano di Assetto Idrogeologico infatti sono state svolte accurate analisi idrauliche solamente per i corsi d'acqua più importanti, classificando le zone in P3, P2, P1 e siti di attenzione, ma all'interno di queste perimetrazioni mancano una serie di punti di criticità. Per questo motivo la pianificazione comunale ha compensato questa mancanza di informazione con metodi alternativi, come la segnalazione sul territorio dei nodi idraulici critici, il riferimento ad eventi storici osservati (come per il caso di Lentini) oppure la produzione a livello comunale di scenari di evento idraulico (come per il caso di Messina).

8.1.1 Comune di Lentini

Dei due fiumi di maggiori dimensioni che scorrono all'interno del comune di Lentini, il Gornalunga e il San Leonardo, sono state svolte analisi idrauliche solamente per il primo, con la conseguente classificazione delle zone del territorio a diversa pericolosità, per il secondo, nonostante sia stato protagonista di numerose inondazioni come quelle più recenti del 2003 e del 2018 con danni significativi, non è stato svolto alcun tipo di analisi e di conseguenza non risulta nessuna perimetrazione di pericolosità idraulica (Figura 87, Figura 88).

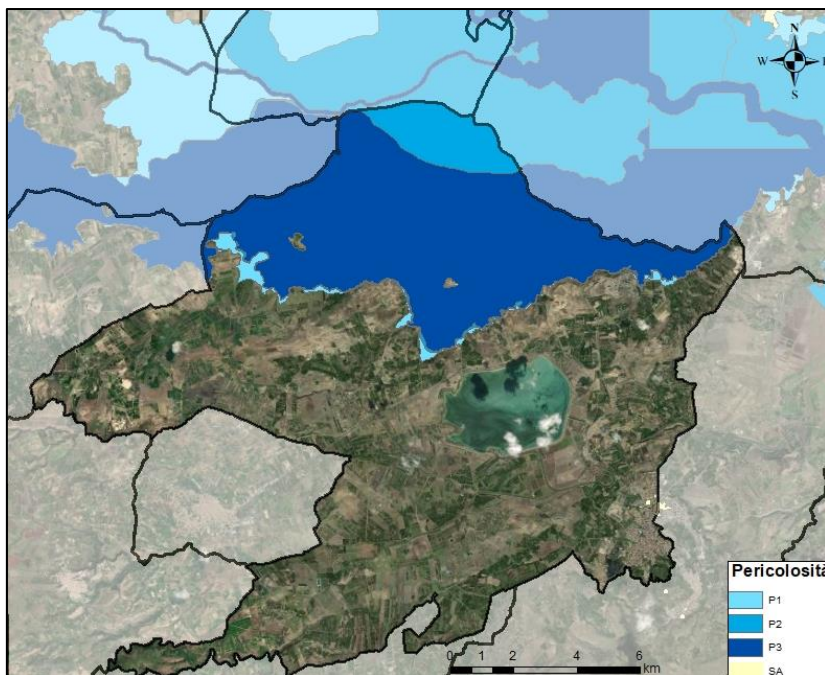


Figura 87. Rappresentazione in ambiente GIS delle aree classificate dal PAI

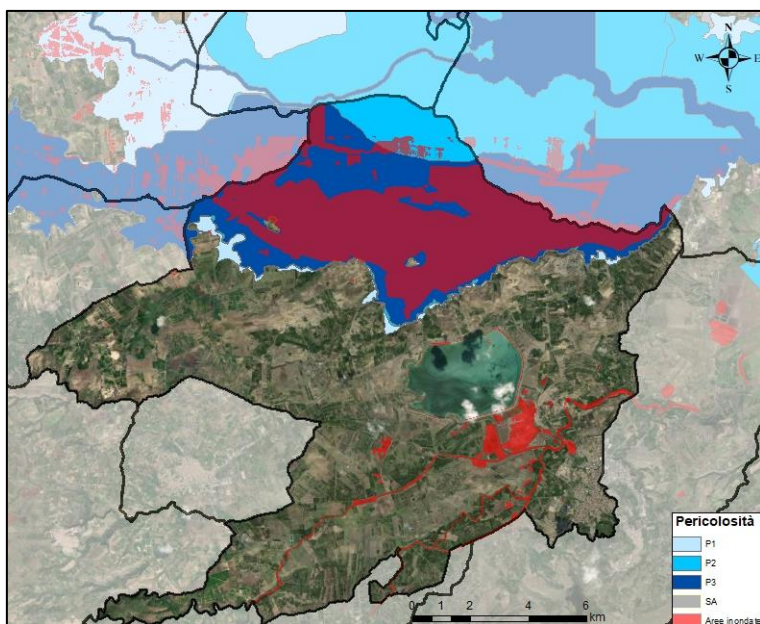


Figura 88. Confronto tra le aree a pericolosità del PAI e le aree inondate

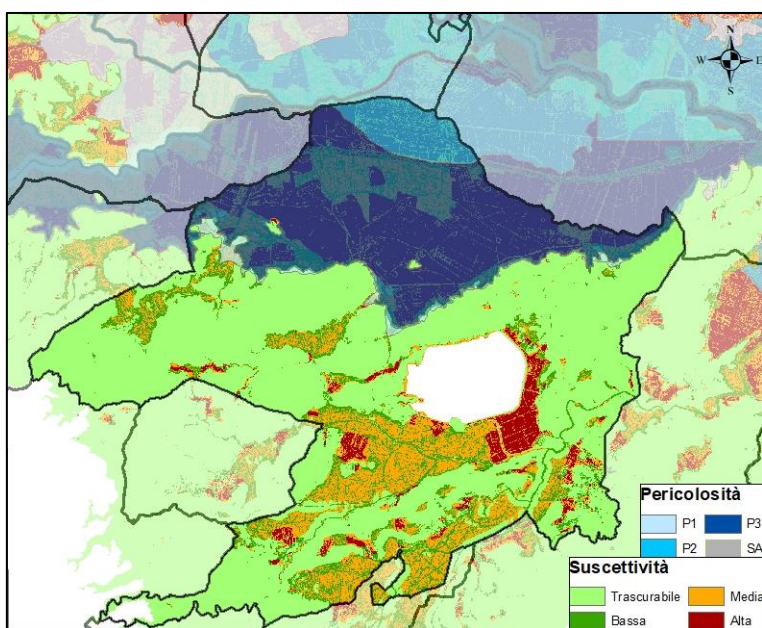


Figura 89. Sovrapposizione delle aree a pericolosità da inondazione alla mappa di suscettività

Da un primo confronto visivo (Figura 89), si constata come la mappa di suscettività riesca a individuare le aree classificate dal PAI a nord del comune come aree a suscettività bassa, media e alta.

Le aree a diversa pericolosità (bassa, media e alta) sono collocate per meno del 15% all'interno delle classi di suscettività trascurabile e bassa, il restante 85%, invece, viene classificate nelle classi a media e alta suscettività (Figura 90).

I Siti di Attenzione (SA), che sono quei luoghi individuati dal PAI, ma sui quali non è stato eseguito alcun tipo di studio e approfondimento (necessitano di un'analisi idraulica per determinarne il livello di pericolosità) seguono un andamento più randomico.

Sembra confermarsi una coerenza tra la suscettività da alluvione evidenziata dal metodo proposto e quanto già presente sul territorio in termini di pericolosità idraulica. Lo strumento dell'analisi di suscettività da alluvione inoltre potrebbe proporsi per una prima speditiva valutazione sulla natura più o meno pericolosa dal punto di vista idraulico dei siti di attenzione non ancora classificati.

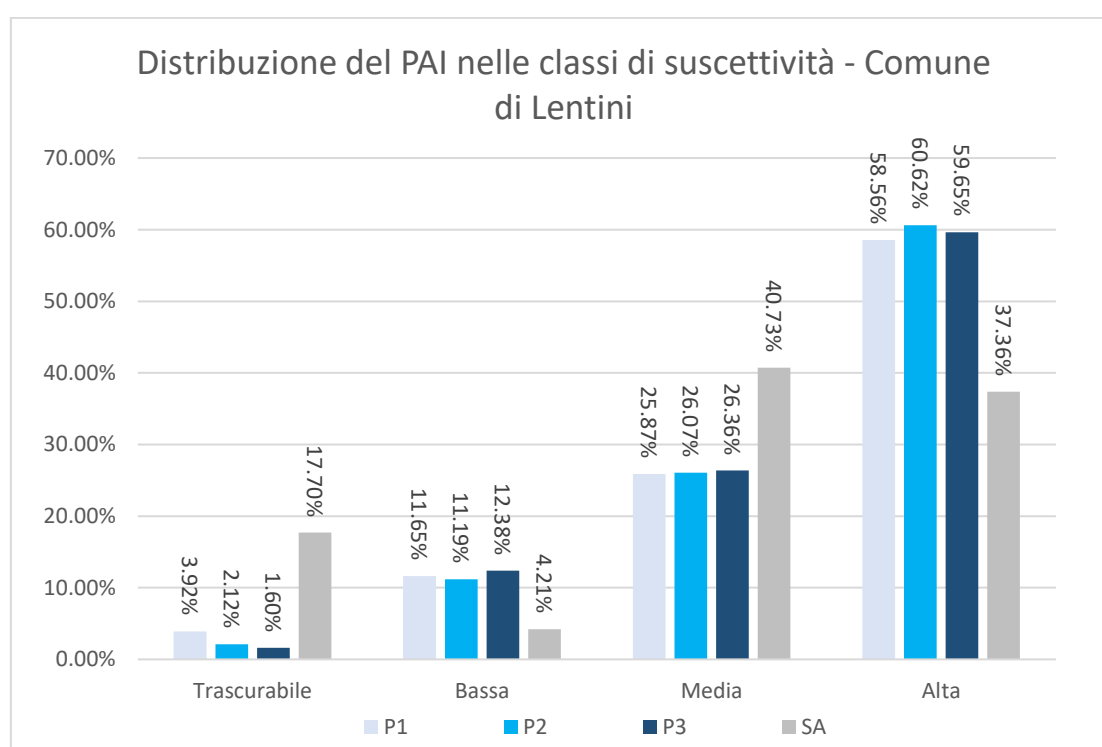


Figura 90. Grafico della distribuzione delle aree presenti nel PAI nelle quattro classi di suscettività: trascurabile, bassa, media e alta

Dopo aver verificato come la mappa di suscettività riesca a rappresentare le aree di pericolosità tracciate dal PAI (Figura 90), si è proceduto ad analizzare i punti critici precedentemente elencati, che non sono inseriti in nessuna perimetrazione di pericolosità ma che, durante il sopralluogo, sono stati individuati dal tecnico comunale come zone a rischio. Una di queste è l'ospedale di Lentini che, durante le esondazioni, diventa irraggiungibile a causa dell'allagamento delle strade di collegamento, la SS194 e la SP16. La mappa mette in evidenza come entrambe le strade presentino dei tratti ad alta suscettività proprio nella zona su cui insistono i canali, che quando esondano impediscono i collegamenti con l'ospedale,

che è individuato a suscettività trascurabile grazie alla quota in sicurezza a cui si trova (Figura 91).

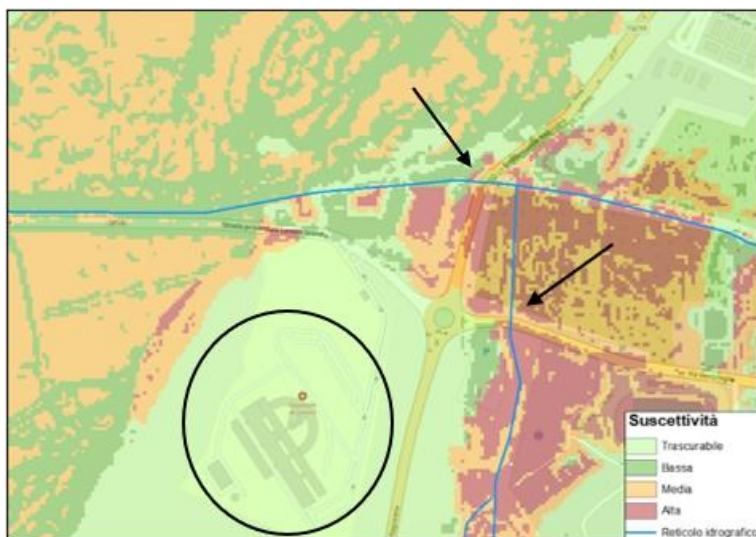


Figura 91. Rappresentazione della mappa di suscettività nei pressi dell'ospedale di Lentini

Un'altra zona di peculiare interesse è quella riguardante il fiume San Leonardo: infatti l'area a sud del lago di Lentini, dove i canali di scolo del lago si immettono nel fiume, viene spesso inondata attraverso l'azione combinata delle piene del fiume San Lorenzo, dello scolmatore di piena del lago e dell'insufficienza idraulica dei suddetti canali, causando l'isolamento di ampie porzioni. L'intera superficie viene completamente sommersa, in particolar modo tutti i campi presenti e le strutture agricole ad essi connesse vengono interessati dall'esondazione. Nella mappa di suscettività l'intera area su cui si registrano allagamenti osservati viene classificata a suscettività media e alta, proprio a conferma del fatto che questa sia una zona particolarmente critica dal punto di vista idraulico (Figura 92).



Figura 92. Rappresentazione della mappa di suscettività nell'area a sud del lago di Lentini

La mappa di suscettività mostra come anche parte della SS194, che collega la città di Lentini a quella di Catania e quindi risulta essere uno snodo fondamentale, sia collocata in un'area ad alta suscettività, all'interno della quale è situato, peraltro, il distaccamento dei vigili del fuoco (Figura 93), collocato in un'ampia area depressa.



Figura 93. Rappresentazione della mappa di suscettività nell'area dove è presente il dipartimento dei vigili del fuoco (cerchiato) e la SS194

Come mostrato nei risultati la mappa di suscettività individua le aree critiche, non studiate nel PAI, come zone a suscettività media e alta, fornendo quindi un elemento valutativo di queste zone.

8.1.2 Comune di Messina

Per il comune di Messina le aree classificate all'interno del PAI sono esigue: a livello di pianificazione di bacino, infatti, sono state svolte analisi idrauliche solo su una minima parte dei torrenti presenti nel comune, tra cui il Santo Stefano, il Giampilieri, il Pace e il Tarantonio. Molte altre aree, nei pressi dei corsi d'acqua, sono invece state classificate come siti di attenzione, in attesa di svolgere studi di approfondimento e quindi inserirli in una classe di pericolosità.

Nell'area del comune di Messina, per quanto concerne il PAI, non sono presenti zone a pericolosità P1, ma solo P2 e P3 la maggioranza delle quali appartiene a quest'ultima classe (Figura 94).

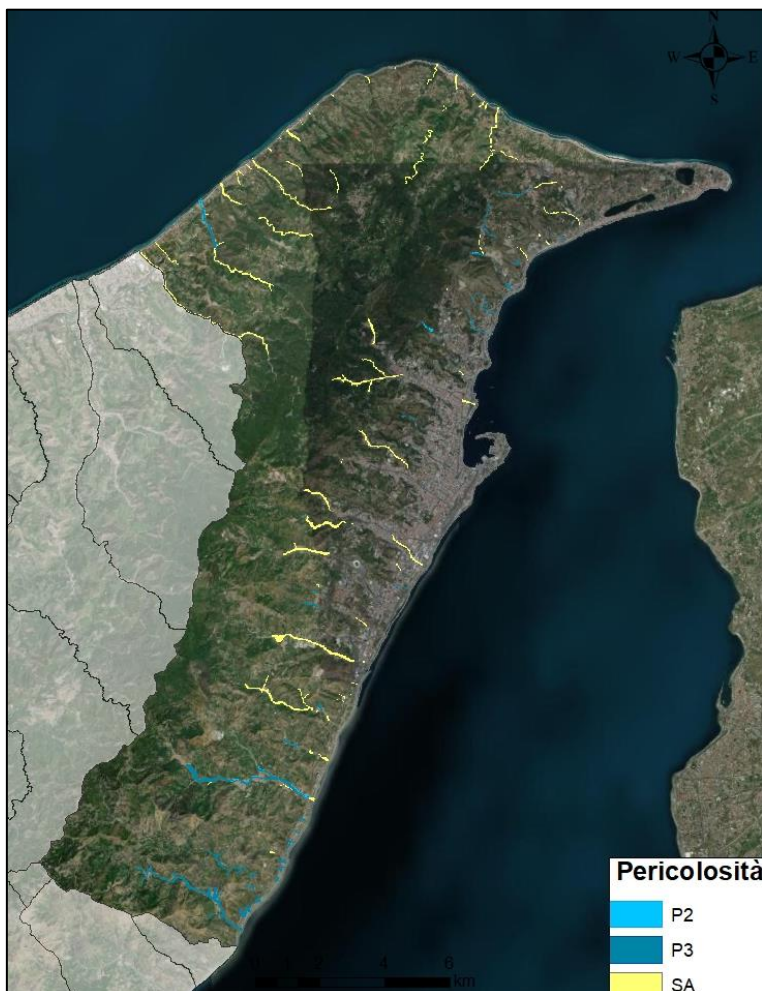


Figura 94. Rappresentazione delle aree a pericolosità idraulica presenti nel PAI

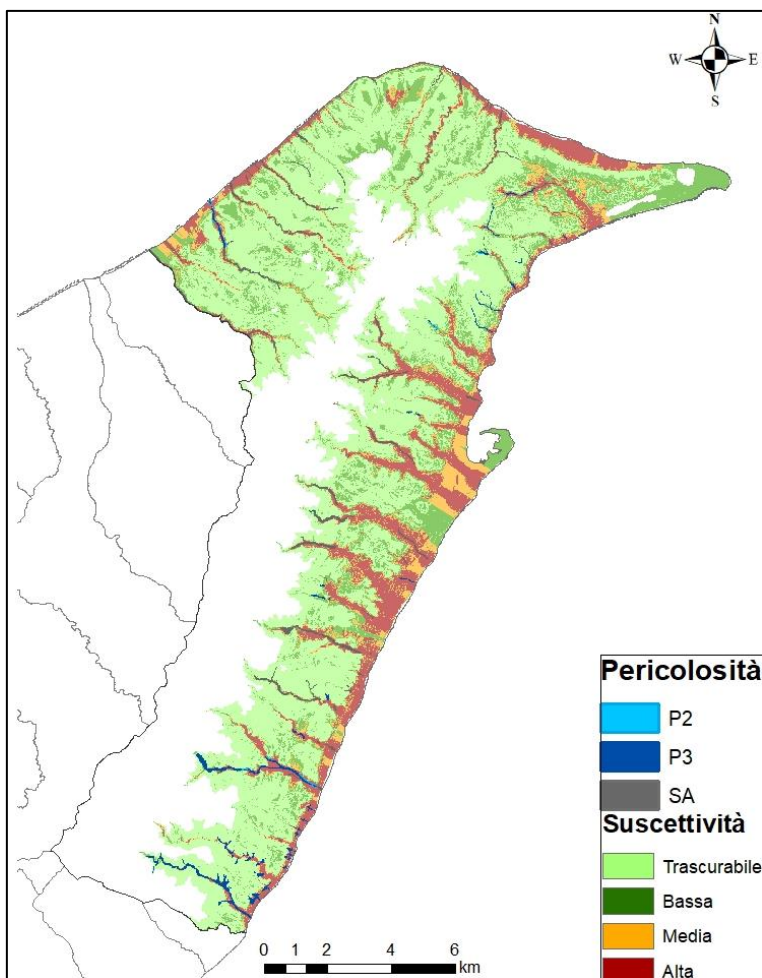


Figura 95. Sovrapposizione delle aree a pericolosità da inondazione alla mappa di suscettività

Dal confronto tra la mappa di pericolosità e quella di suscettività (Figura 96, Figura 97), si evince come quest'ultima riesca a rappresentare una buona parte delle aree del PAI, circa il 75% ricade nelle aree a media e alta suscettività mentre il restante 25% in quelle a suscettività bassa e trascurabile. I siti di attenzione seguono un andamento simile a quello delle classi di pericolosità ma, in questo caso, solamente il 4% ricade nelle aree a suscettività trascurabile. Come nel caso precedente, lo strumento dell'analisi di suscettività da alluvione potrebbe proporsi come un primo metodo speditivo per la valutazione dei siti di attenzione a maggiore criticità idraulica.

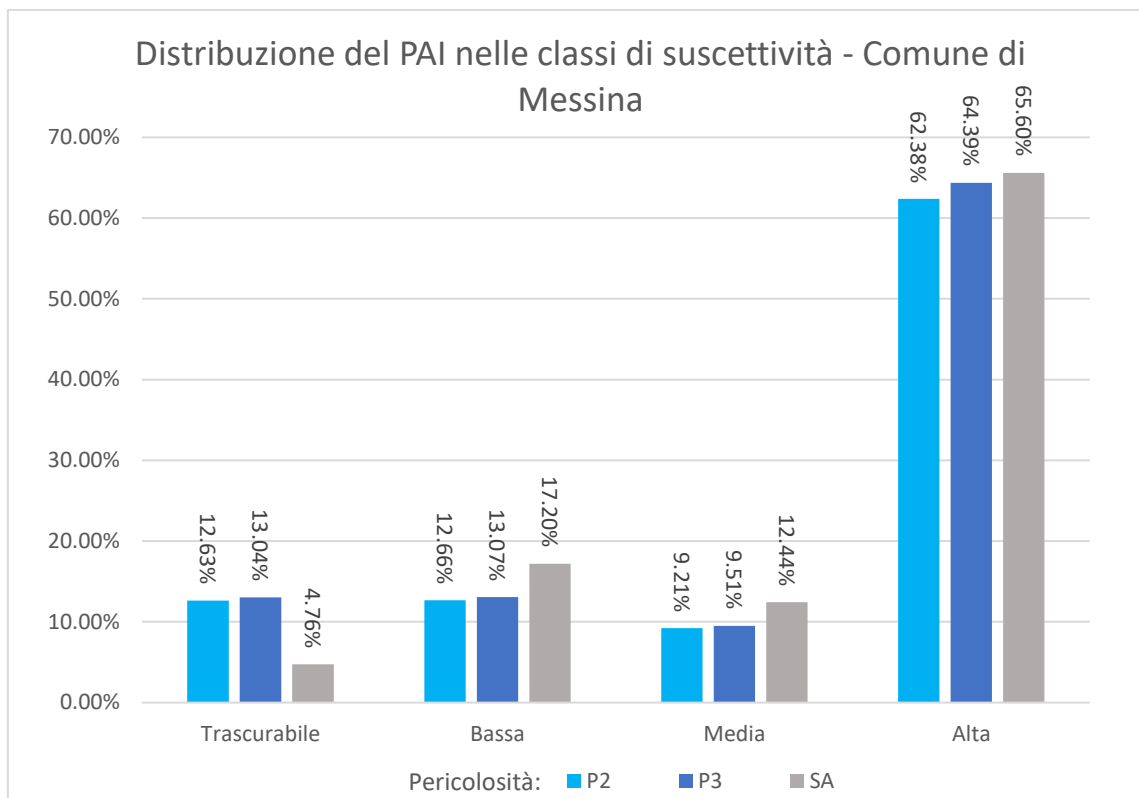


Figura 96. Grafico della distribuzione delle aree presenti nel PAI nelle quattro classi di suscettività: trascurabile, bassa, media e alta

Oltre ai dati relativi alle aree classificate del PAI, il Dipartimento di Protezione Civile del comune di Messina ha anche classificato i nodi critici, che sono i punti di intersezione tra il reticolo idrografico e l'asse viario, in quattro classi di rischio: basso, medio, elevato e molto elevato. Dei 1219 nodi classificati solamente 470 ricadono nelle aree perimetrate nel PAI e di questi più della metà si trovano in aree individuate come siti di attenzione (275).

Si è, perciò, valutata la distribuzione dei nodi nelle quattro classi di suscettività, tenendo in considerazione la tipologia di rischio assegnata ad ogni nodo (Figura 97).

Per tutte le tipologie di rischio, quasi il 70% dei nodi critici ricade nelle classi di suscettività media e alta mentre, solamente il 16% della totalità dei nodi appartiene alla classe trascurabile.

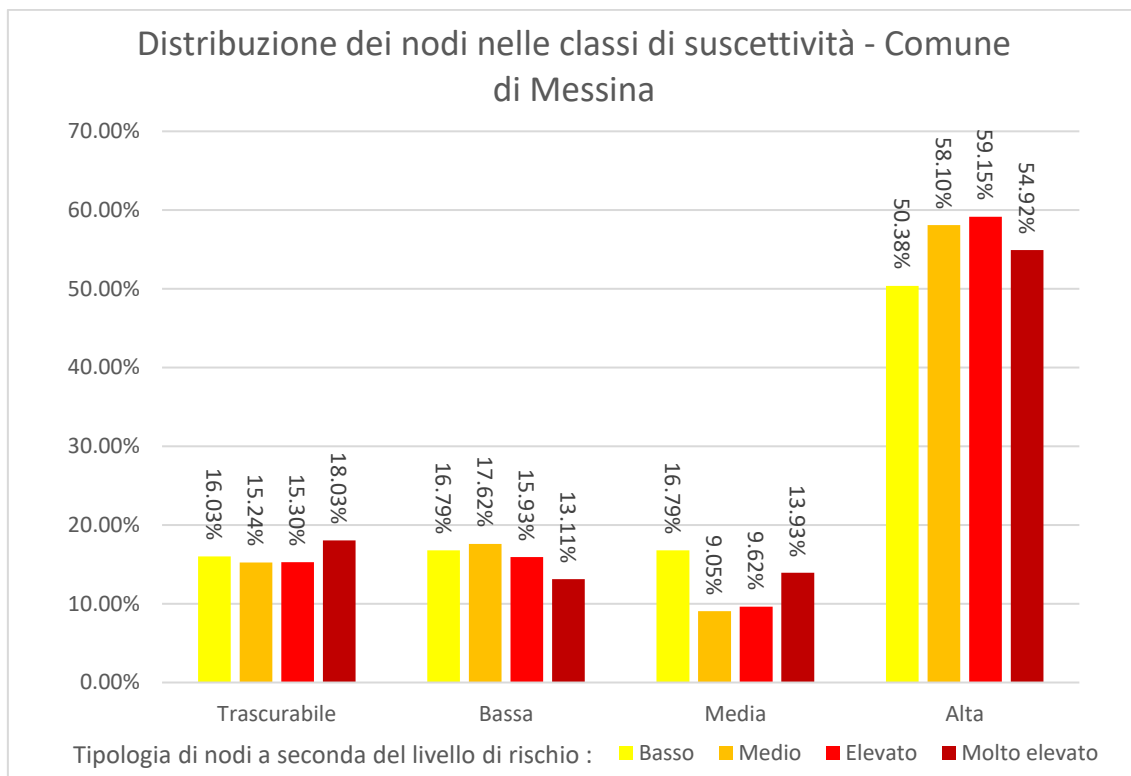


Figura 97. Grafico della distribuzione dei nodi idraulici critici nelle quattro classi di suscettività: trascurabile, bassa, media e alta

Dalla mappa di suscettività emerge, inoltre, come alcune delle aree critiche individuate durante il sopralluogo e non classificate all'interno del PAI rientrino nella zona a suscettività media e alta come ad esempio l'area "Papardo" (sede dell'ospedale e dell'Università degli Studi di Messina) (Figura 98), l'area del torrente Calamona (dove continua la costruzione delle ville) (Figura 98), e i tratti tombati che scorrono nel centro urbano (Figura 100).

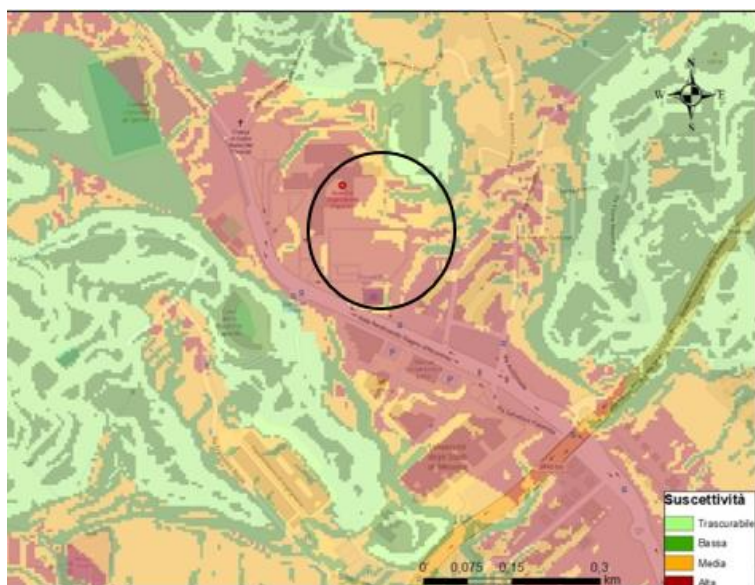


Figura 98. Rappresentazione della mappa di suscettività nell'area "Papardo"



Figura 99. Rappresentazione della mappa di suscettività alla foce del fiume Calamona

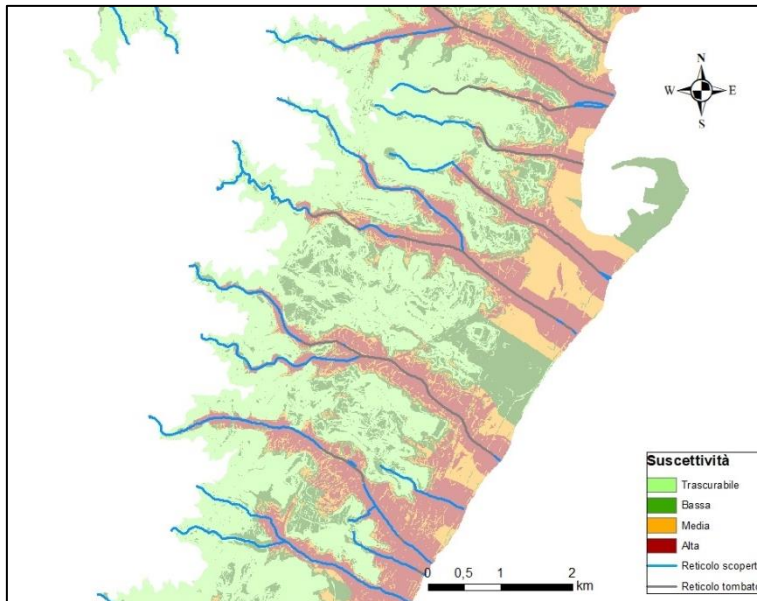


Figura 100. Rappresentazione della mappa di suscettività nell'area del centro urbano di Messina.

Il metodo proposto mostra buoni risultati per il comune di Messina e si conferma una nuova metodologia per la valutazione speditiva delle aree a maggiore criticità idraulica.

9 CONCLUSIONE E SVILUPPI FUTURI

In questo elaborato si è proposta l'applicazione dell'analisi di suscettività su due casi studio della regione Sicilia al fine di fornire un contributo ulteriore, rispetto alle classiche mappe di pericolosità dei PAI, alla pianificazione di protezione civile. L'intento è quello di svincolarsi da una pianificazione strettamente limitata alla modellazione numerica isofrequente di alcuni tratti, ma ottenere un dato con adeguate caratteristiche di uniformità e completezza nella copertura del territorio.

L'analisi di suscettività è stata svolta su due comuni con caratteristiche completamente differenti: quelli di Lentini e di Messina, il primo di carattere prettamente rurale, il secondo fortemente antropizzato, infatti, molti dei torrenti che scorrono lungo il centro urbano sono stati tombinati e trasformati in importanti assi viari.

Nella prima fase è stata applicata l'analisi preliminare di suscettività proposta dalla squadra del Politecnico di Milano nell'ambito del progetto PON Governance, sulla regione Puglia, per poi verificarne l'applicabilità su entrambi i comuni. La prima criticità, determinata dalla carenza della perimetrazione di aree storicamente inondate, ha reso imprescindibile il contatto diretto con i tecnici comunali, con i quali si è avviato un dialogo proficuo, anche con sopralluoghi e incontri sui siti di interesse. Tale attività ha consentito di reperire una ulteriore mole di documentazione indispensabile per avviare l'analisi assicurandone l'affidabilità.

Dopo aver ridotto l'area di studio, considerando solamente le pianure alluvionali contenenti sia il 100% dei pixels inondati sia la totalità delle aree del PAI, si è prodotta una prima versione di mappa di suscettività che ha riportato risultati contrastanti per i due comuni. Nel caso di Lentini la mappa ha fornito difatti risposte concordanti, concorrenti e sinergiche tra memoria storica, modellazione numerica e suscettività. Per il comune di Messina si è invece ottenuta una mappatura assai dubbia, dato che la maggior parte dei *pixels* alluvionati ricadono nella classe trascurabile della mappa di suscettività prodotta durante il lavoro.

La quesitone è stata analizzata e discussa. Ne è emersa l'opportunità di applicare alcuni adattamenti al modello basati su un incremento del livello di concettualizzazione del modello

di suscettività, per meglio descrivere le condizioni densamente antropizzate tipiche del contesto.

Viste le caratteristiche del centro urbano si è agito modificando il fattore predisponente della distanza dal reticolo: si sono considerati intervalli di classificazione per i torrenti tombati, che rappresentassero al meglio il tipico meccanismo esondativo da tombino. Questo difatti procede tipicamente da monte verso valle a partire dalla sezione di imbocco, seguendo poi in superficie il corso sotterraneo ormai insufficiente, al contrario di quanto accade nei tratti scoperti, ove l'esondazione avviene lateralmente, allorché il tirante viene a superare il livello di piene rive.

I risultati dell'applicazione della proposta correttiva al metodo sono apparsi confortanti. La mappa di suscettività ha riprodotto le aree inondate, quelle a differente pericolosità già classificate nel PAI, quelle individuate durante i sopralluoghi e i nodi idraulici critici in zone a media e alta suscettività.

È opinione di chi scrive che la proposta non sia da limitarsi al semplice caso di specie. Le legende dei più recenti database topografici a supporto della redazione delle Carte tecniche regionali, riportano spesso specifici tematismi relativi ai tratti tombinati. Questi dunque individuabili e trattabili per via automatica, adattando i parametri di classazione dei fattori predisponenti secondo la tipologia. Basti citare, un caso recente fra tanti, quello dell'esondazione del Rio Maggiore a Livorno, che nel 2017 ha provocato nove vittime in un'area ove la superficie del territorio non mostrava alcuna linea di drenaggio mentre, nel sottosuolo era stato tombinato un corso d'acqua di dimensioni tutt'altro che trascurabili: anche in quel caso, appena esaurita la ridotta capacità di smaltimento del tombino, la piena si è propagata per le strade con violenza inusitata, ripercorrendo il tracciato dell'antico corso con esiti devastanti.

Il modello maturato nell'ambito di questa tesi di laurea, pur segnalando risultati decisamente confortanti, è ancora allo stato prototipale. Questo aspetto pone le basi per ulteriori sviluppi, analizzando casistiche diverse in una molteplicità di contesti.

Bibliografia

- (s.d.). Tratto da CGIAR: <http://srtm.csi.cgiar.org/download>
- Neuhäuser, B., & Terhorst, B. (2007). Landslide susceptibility assessment using "weights-of-evidence" applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany). *Geomorphology*, 86, 12-24.
- 2000/60/CE, D. (2000). Direttiva 2000/60/CE.
- Ahmadisharaf, E., Kalyanapu, A. J., & Chung, E.-S. (2015). Evaluating the Effects of Inundation Duration and Velocity on Selection of Flood Management Alternatives Using Multi-Criteria Decision Making. *Water Resources Management*, 29, 2543-2561.
- Bartolomei, A., Brugioni, M., Canuti, P., Casagli, N., Catani, F., Ermini, L., . . . Tofani, V. (2006). Analisi della suscettibilità da frana a scala di bacino (Bacino del Fiume Arno, Toscana-Umbria, Italia). *Giornale di geologia applicata*, 3, 189-195.
- Bocchiola, D., & Rosso, R. (2009). Use of a derived distribution approach for flood prediction in poorly gauged basins: A case study in Italy. *Advances in Water Resources*, 1284-1296.
- Bonham-Carter, G. F. (1989). Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. *Geological Survey of Canada*, 171-183.
- Borgogno Mondino, E., Bellone, T., Giulio Tonolo, F., & Lingua, A. (2004). Generazione di DSM da immagini satellitari stereoscopiche: primi risultati e validazione.
- Bovolin, V. (2012). *Studio idraulico dell'evento alluvionale avvenuto ad Atrani (SA) il 9 settembre 2010*.
- Buchele, R., Kreibich, H., Kron, A., Thieken, A., Ihringer, J., Oberle, P., & Merz, B. (2006). Flood-risk mapping: Contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(4), 483-503.
- Burby, R. (2011). Flood insurance and floodplain management: the US experience. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 3, 111-122.

- Camarasa-Belmonte, A. M., & Soriano-Garcia, J. (2012). Flood risk assessment and mapping in peri-urban Mediterranean environments using hydrogeomorphology. Application to ephemeral streams in the Valencia region (eastern Spain). *Landscape and Urban Planning*, 189-200.
- Cao, C., Xu, P., Wang, Y., Chen, J., Zheng, L., & Niu, C. (2016). Flash Flood Hazard Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio and Statistical Index Methods in Coalmine Subsidence Areas. *Sustainability*.
- CEA. (2007). Reducing the social and economic impact of climate change and natural catastrophes – insurance solutions and public-private partnerships. Brussels, Belgio.
- Chapi, K., Singh, V. P., Shirzadi, A., Shahabi, H., Bui, D. T., Pham, B. T., & Khosravi, K. (2017). A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment. *Environmental Modelling & Software*, 229-245.
- Chau, K. W., Wu, C. L., & Li, Y. (2005). Comparison of several flood forecasting models in Yangtze River. *Journal of Hydrologic Engineering*, 485-491.
- Coela, S., Laio, F., & Montanari, A. (2014). Satellite nighttime lights reveal increasing human exposure to floods worldwide. *Geophysical Research Letters*, 7184-7190.
- Consiglio di Ricerca Nazionale. (2017). *Alluvione a Livorno 09 settembre 2017*.
- De Moel, H., Van Alphen, J., & Aerts, J. (2009). Flood maps in Europe - Methods, availability and use. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(2), 289-301.
- Degiorgis, M., Gnecco, G., Gorni, S., Roth, G., Sanguineti, M., & Taramasso, A. C. (2012). Classifiers for the detection of flood-prone areas using remote sensed elevation data. *Journal of Hydrology*, 302-315.
- Dingman, L. S. (1978). Drainage Density and Streamflow: A Closer Look. *WATER RESOURCES RESEARCH*.
- Diozzi, I., & Menduni, G. (2017). *Proposta metodologica per l'analisi di suscettibilità da alluvione in aree non coperte da pianificazione di bacino: il caso del territorio pugliese*.
- DIRETTIVA 2007/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO. (2007).
- El Fahchouch, A. N.-E., Brahim, L. A., Mastere, M., & Abdelouafi, A. (2010). Landslide Susceptibility Assessment by Weights of Evidence (WOE) in the BENI AHMED Area (RIF, MOROCCO).

- F.Guzzetti. (2005). Evaluation of Flood and Landslide Risk to the Population of Italy. *Environmental Management*, 15-36.
- Fernandez, D., & Lutz, M. A. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 90-98.
- Forte, F., Pennetta, L., & Strobl, R. O. (2005). Historic records and GIS applications for flood risk analysis in the Salento peninsula (southern Italy). *Natural Hazards and Earth System Science*, 5, 833-844.
- Garcia-Castellanos, E.-M. G. (2009). Catastrophic flood of the Mediterranean after the Messinian salinity crisis. *Nature*, 462(7274), 778-781.
- GeoArbor Studio. (2018). *Studio idraulico di dettaglio sul Torrente Seveso*.
- Gerritsen, H. (2005). What happened in 1953? The Big Flood in the Netherlands in retrospect. *The Royal Society*.
- Glenn, E. P., Morino, K., Nagler, P. L., Murray, R. S., Pearlstein, S., & Hultine, K. R. (2012). Roles of saltcedar (*Tamarix* spp.) and capillary rise in salinizing a non-flooding terrace on a flow-regulated desert river. *Journal of Arid Environments*, 56-65.
- Guzzetti, F., & Tonelli, G. (2004). Information system on hydrological and geomorphological catastrophes in Italy (SICI): a tool for managing landslide and flood hazards. *Natural Hazards and Earth*, 213-232.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 13, 181-216.
- Guzzetti, F., Stark, C., & Salvati, P. (2005). Evaluation of flood and landslide risk to the population of Italy. *Environmental Management*, 15-36.
- Hong, H., Tsangaratos, P., Ilia, I., Liu, J., Zhu, A.-X., & Chen, W. (2017). Application of fuzzy weight of evidence and data mining techniques in construction of flood susceptibility map of Poyang County, China. *Science of the Total Environment*, 575-588.
- Huong, H. T., & Pathirana, A. (2013). Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam. *Hydrology and Earth System Sciences*, 379-394.
- ISPRA. (2018). *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio*.

- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. (s.d.). *Sistema Nazionale per la protezione dell'ambiente*. Tratto da <https://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/cartella-progetti-in-corso/suolo-e-territorio-1/iffi-inventario-dei-fenomeni-franosi-in-italia>
- Jasiewicz, J., & Stepinski, T. (2013). Geomorphons-a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, 147-156.
- Jonkman, S. N. (2005). Global Perspectives on Loss of Human Life Caused by Floods. *Natural Hazards*, 151-175.
- Khosravi, K., Nohani, E., Maroufini, 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*, 947-987.
- Khosravi, K., Pham, B. T., Chapi, K., Shirzadi, A., Shahabi, H., Revhaug, I., . . . Bui, D. T. (2018). A comparative assessment of decision trees algorithms for flash flood susceptibility modeling at Haraz watershed, northern Iran. *Science of the Total Environment*, 627, 744-755.
- Kia, M. B., Pirasteh, S., Pradhan, B., Mahmud, A. R., Sulaiman, W. A., & Moradi, A. (2012). An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, 251-264.
- Kilburn, C., & Petley, D. (2003). Forecasting giant, catastrophic slope collapse: lessons from Vajont, Northern Italy. *Geomorphology*, 21-32.
- Knebl, M., Yang, Z.-L., Hutchison, K., & Maidment, D. R. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/ RAS: A case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 325-336.
- Kron, W. (2005). Flood risk= hazard• values• vulnerability. *Water International*, 58-68.
- Menduni, G. (2013). *Perchè- le ragioni dell'Italia dei disastri e qualche idea per cambiare le cose*. Narcissus.me.
- Mercadante, R. (2009). *Messina dopo il terremoto del 1908 : la ricostruzione dal piano Borzì agli interventi fascisti*.
- Merz, R., Blöschl, G., & Humer, G. (2008). National flood discharge mapping in Austria. *Natural Hazards*, 46(1), 53-72.

- Milly, P. C., Wetherald, R. T., Dunn, K. A., & Delworth, T. L. (2002). Increasing risk of great floods in changing climate. *Nature*, 514-517.
- Monitoraggio Politiche di Coesione Programmazione 2014-2020. (2018, ottobre 31). Tratto da http://www.rgs.mef.gov.it/_Documenti/VERSIONE-I/attivita_istituzionali/monitoraggio/rapporti_finanziari_ue/monitoraggio_politiche_di_coesione_2014-2020/2018-10-31/MPC_Situazione_al_31_ottobre_2018.pdf
- Morelli, S., Battistini, A., & Catani, F. (2014). Rapid assessment of flood susceptibility in urbanized rivers using digital terrain data: Application to the Arno river case study (Firenze, northern Italy). *Applied Geography*, 35-53.
- Ohlmacher, G. C., & Davis, J. C. (2003). Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering Geology*, 331-343.
- Opolot, E. (2013). Application of Remote Sensing and Geographical Information Systems in Flood Management: A Review. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 1884-1894.
- Pilotti, M., Maranzoni, A., Tomirotti, M., & Valerio, G. (2011). 1923 Gleno Dam Break: Case Study and Numerical Modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137.
- PON- Governance e capacità istituzionale 2014-2020. (2018). Tratto da <http://www.pongovernance1420.gov.it/wp-content/uploads/2018/09/Sintesi-per-il-cittadino-2017.pdf>
- Pradhan, B., & Youssef, A. M. (2011). A 100-year maximum flood susceptibility mapping using integrated hydrological and hydrodynamic models: Kelantan River Corridor, Malaysia. *Journal of Flood Risk Management*.
- Pradhan, B., Oh, H.-J., & Buchroithner, M. (2010). Weights-of-evidence model applied to landslide susceptibility mapping in a tropical hilly area. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1, 199-223.
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Journal of Hydrology*, 180, 60-91.
- Rosso, R. (2017). *Bombe d'acqua*. Marsilio.
- Samanta, S., Pal, D., & Palsamanta, B. (2018). Flood susceptibility analysis through remote sensing, GIS and frequency ratio model. *Applied Water Science*, 1-14.

- Soetanto, R., & Proverbs, D. G. (2004). impact of flood characteristics on damage caused to UK domestic properties: the perceptions of building surveyors. *Structural Survey*, 22, 95-104.
- Stepinski, T. F., & Jasiewicz, J. (2011). Geomorphons-a new approach to classification of landforms. *Proceedings of geomorphometry*, 109-112.
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2013). Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *Journal of Hydrology*, 69-79.
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2014). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of hidrology*, 332-343.
- Tehrany, M. S., Shabani, F., Jebur, M. N., Hong, H., Chen, W., & Xie, X. (2017). GIS-based spatial prediction of flood prone areas using standalone frequency ratio, logistic regression, weight of evidence and their ensemble techniques. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8, 1538-1561.
- Tseng, M.-L., Lin, C. W., & Hsieh, W.-D. (2015). Landslide susceptibility analysis by means of event-based multi-temporal landslide inventories. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 3, 1137-1173.
- Union, E. (2007). Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. *Official Journal Volume*, 50, 27-34.
- VanZyl, J. (2001). The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. *Acta Astronautica*, 48(5-12), 559-565.
- Varnes, D. (1984). Landslide hazard zonation: are view of principles and practise. *Unesco*. Parigi.
- Voigt, S., Giulio-Tonolo, F., Lyons, J., Kučera, J., Jones, B., Schneiderhan, T., . . . Guha-Sapir, D. (2016). Global trends in satellite-based emergency mapping. *Science*, 247-252.
- Watt, E. (2000). Twenty Years of Flood Risk Mapping Under the Canadian National Flood Damage Reduction Program. *Flood Issues in Contemporary Water Management*, 155-165.

- Wolf, J. (2009). Coastal flooding: Impacts of coupled wave-surge-tide models. *Natural hazards*, 49, 241-260.
- Yi, S. (1998). *The world's most catastrophic dam failures: the August 1975 collapse of the Banqiao and Shimantan Dams. In The River Dragon Has Come*. New York: Dai Qing.
- Zhao, G., Pang, B., Xu, Z., Yue, J., & Tu, T. (2017). Mapping flood susceptibility in mountainous areas on a national scale in China. *Science of the Total Environment*, 1133-1142.