



UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente



*Dottorato di ricerca in Scienze ed Ingegneria per
l'Ambiente, le Costruzioni e l'Energia*
(SIACE) XXXIII Ciclo

TESI DI DOTTORATO

**APPROCCIO METODOLOGICO PER LA
VALUTAZIONE MODULARE DELLA VULNERABILITA'
FINALIZZATA ALLA RIDUZIONE DEI RISCHI
NATURALI E ANTROPICI**

Coordinatore: Ch.mo Prof. Salvatore Critelli

Supervisore: Ch.mo Prof. Giuseppe Mendicino

Dottoranda: Ing. Roberta Maletta

The best we can do is seize the opportunities, calculate the associated risks, estimate our ability to manage them, and do our projects with confidence (Henry Ford)

La crescita di una persona è fortemente influenzata dall'ambiente umano e fisico in cui vive e lavora. Io negli ultimi anni ho avuto la fortuna di essere affiancata da persone che in modo diretto e non, mi hanno stimolato nell'affrontare e superare alcuni di quelli che consideravo miei "limiti". Con l'età aumenta la percezione del rischio e l'esposizione ai pericoli, aumenta la consapevolezza delle proprie vulnerabilità e di conseguenza spesso non si trova il coraggio di osare. Io nel lavoro, così come nello sport, provo a mettermi in gioco con entusiasmo e tenacia. Affrontando le sfide ho imparato ad accogliere le sconfitte, i cambiamenti e le occasioni di crescita. Non mi sono mai sentita sola in questo lungo percorso, per questo motivo non posso fare a meno di ringraziare alcune persone.

Innanzitutto un grazie a mio marito che continua a supportarmi nei miei tanti impegni e crede fortemente nelle mie capacità. Ringrazio il dott. Tansi che per primo ha pensato e creduto a questo progetto ponendo come obiettivo ambizioso quello di poter coniugare le esigenze operative della protezione civile con la ricerca scientifica. Ringrazio il mio tutor, prof. Mendicino, che con professionalità e disponibilità mi ha guidato nel percorso di dottorato; Il dott. Mollica per i confronti molto utili sulle tematiche della pianificazione d'emergenza e l'ing. Colosimo che ha avuto un peso determinante nel conseguimento dei risultati. Ringrazio il coordinatore prof. Critelli, sempre disponibile e incoraggiante nell'attività di orientamento degli studi e della ricerca.

Infine voglio ringraziare tutte quelle persone che ho incontrato durante la mia esperienza di ricerca presso la Protezione Civile, per le *skills* acquisite sul campo e per aver favorito la mia crescita emotiva ed intellettuale.

Aprire la mente verso nuove possibili visioni del mondo è uno sforzo complicato, soprattutto nell'ambito scientifico, bisognerebbe spingersi oltre i limiti della realtà per poter immaginare possibili sviluppi e intuirne i livelli di applicabilità. Questi anni di studio universitari e di esperienza operativa nella Protezione Civile mi hanno consentito di sviluppare un maggiore senso critico ed analitico. Ho accresciuto le mie conoscenze, sviluppando competenze trasversali che sicuramente risulteranno utili nell'ambito lavorativo così come nella vita quotidiana.

INDICE

Abstract	10
Introduzione	12
PRIMA PARTE: IL CONTESTO DELL'ANALISI	16
1 Disastri naturali e antropici	16
1.1 Processi di sviluppo antropico ed i loro potenziali effetti negativi	18
1.2 La ripartizione delle competenze di protezione civile, fra Stato ed enti territoriali	19
1.2.1 Attività di protezione civile.....	20
2 La vulnerabilità in letteratura.....	21
2.1 La vulnerabilità nei rischi naturali	23
2.2 La vulnerabilità nei cambiamenti climatici.....	29
2.3 La vulnerabilità sociale, sistema uomo-ambiente.....	32
2.3.1 Indicatori di vulnerabilità sociale	34
2.3.2 Tecniche di classificazione degli indici di vulnerabilità	35
2.4 La vulnerabilità nelle infrastrutture stradali	35
2.5 Il concetto di vulnerabilità utilizzato dalle istituzioni pubbliche nell'analisi dei rischi naturali e antropici.	36
2.5.1 Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) e Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA)	36
2.5.2 Piano di Emergenza comunali (PEC).....	39
3 Eventi naturali ed antropici in Calabria e strumenti di pianificazione	42
3.1 Eventi idrogeologici	42
3.1.1 Strumenti di pianificazione del rischio meteo-idrogeologico	51
3.2 Incendi boschivi	52
3.2.1 Strumenti di pianificazione del rischio incendio	53
SECONDA PARTE: RISULTATI PRINCIPALI DELLA RICERCA.....	55
4 Dati e metodi adottati	55
4.1 Obiettivi	55
4.2 Schema generale delle attività svolte	57
4.3 Dataset	58
4.4 Il Contesto Territoriale come unità geografica di analisi	60
4.5 Metodologia di calcolo della vulnerabilità	61
4.5.1 Analisi delle Componenti Principali -PCA	63
4.5.2 Modellazione dei trasporti e calcolo del percorso stradale più breve.....	66
4.5.3 Rappresentazione cartografica degli indici di vulnerabilità attraverso funzioni fuzzy.....	70

4.6	Metodologia di calcolo della pericolosità.....	72
5	Caso studio: il Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica.....	73
5.1	Inquadramento territoriale.....	75
5.2	Inquadramento urbanistico.....	77
5.3	Inquadramento climatico.....	77
6	Modellazione e metodologie usate per la definizione delle mappe di pericolosità.....	85
6.1	Pericolosità incendio boschivo.....	85
6.1.1	Dataset e approccio metodologico dei criteri di analisi.....	86
6.1.2	Elaborazione mappe cartografiche dei criteri.....	88
6.1.3	Analisi multicriteriale (AHP) e mappa finale di suscettibilità degli incendi boschivi.....	92
6.1.4	Validazione dei risultati ottenuti.....	95
6.1.5	Mappa di suscettibilità di incendio boschivo del Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica	97
6.2	Pericolosità idraulica.....	98
6.2.1	Studio idrologico.....	98
6.2.2	Studio idraulico.....	106
6.3	Pericolosità frana.....	121
6.3.1	Modello geotecnico.....	121
6.3.2	Modello idrologico.....	124
6.3.3	Modello combinato.....	125
6.3.4	Dataset e mappa di suscettibilità da frana del Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica	126
6.3.5	Mappa della pericolosità da frana PAI.....	128
7	Approccio di calcolo modulare dell'Indice di Vulnerabilità del Contesto Territoriale.....	129
7.1	TCVI people.....	129
7.1.1	Confronto con analisi di normalizzazione.....	138
7.2	TCVI exposure.....	140
7.2.1	Confronto con analisi di normalizzazione.....	147
7.3	TCVI emergency.....	148
7.4	Mappa aggregata di vulnerabilità (TCVI).....	152
7.5	TCVI nello scenario incendio boschivo.....	153
7.5.1	Modelli di regressione per validare l'indice proposto.....	154
7.6	TCVI nello scenario frana.....	157
7.7	TCVI nello scenario alluvione.....	159
8	Valutazione del rischio.....	160
9	Conclusioni.....	163

Bibliografia.....	165
-------------------	-----

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1-1. PAESI CHE HANNO REGISTRATO INGENTI DANNI ECONOMICI A CAUSA DEGLI EVENTI ESTREMI DAL 1998 AL 2017 (FONTE: CRED'S EMERGENCY EVENTS DATABASE (EM-DAT)).....	17
FIGURA 1-2. NUMERO TOTALE DEI DISASTRI PIÙ FREQUENTI REGISTRATI NEL MONDO DAL 1998 AL 2017 (FONTE: CRED'S EMERGENCY EVENTS DATABASE (EM-DAT)).....	17
FIGURA 1-3. QUOTA DI INFRASTRUTTURE (STRADE, RETE FERROVIARIA, AEROPORTI E PORTI) ESPOSTE A PERICOLI NATURALI (FONTE: WORLD RISK REPORT 2016).....	18
FIGURA 1-4. INFOGRAFICHE DEL CENTRO EURO-MEDITERRANEO SUI CAMBIAMENTI CLIMATICI.....	19
FIGURA 1-5. LE 4 FASI DELLA GESTIONE DELL'EMERGENZA (NEHRP 2009).....	21
FIGURA 2-1. FRAMEWORK CONCETTUALE PER LA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ DI BOHLE (FONTE: BOHLE 2001).....	24
FIGURA 2-2. FRAMEWORK CONCETTUALE PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO (FONTE: DAVIDSON, 1997; BOLLIN ET AL., 2003).....	24
FIGURA 2-3. RISCHIO ESPRESSO ATTRAVERSO LA VULNERABILITÀ, LA PERICOLOSITÀ E LA CARENZA NELLA PREPARAZIONE (FONTE: VILLAGRÁN DE LEÓN, 2001/2004).....	25
FIGURA 2-4. RISCHIO ESPRESSO ATTRAVERSO LA VULNERABILITÀ, LA PERICOLOSITÀ E LA CARENZA NELLA PREPARAZIONE (FONTE: UN/ISDR, 2004).....	25
FIGURA 2-5. SCHEMA CONCETTUALE DELLA VULNERABILITÀ (FONTE: TURNER ET AL., 2003).....	26
FIGURA 2-6. SCHEMA CONCETTUALE DEL MODELLO PAR (FONTE: WISNER ET AL., 2004).....	27
FIGURA 2-7. SCHEMA CONCETTUALE DELL'APPROCCIO OLISTICO (FONTE: CARDONA AND BARBAT, 2000).....	27
FIGURA 2-8. SCHEMA CONCETTUALE BCC (FONTE: BOGARDI/BIRKMANN (2004) AND CARDONA (1999/2001)).....	28
FIGURA 2-9. SCHEMA SINOTTICO DEL RISCHIO LEGATO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI (IPCC, 2014).....	30
FIGURA 2-10. SCHEMA DEL MODELLO "HUMAN ADJUSTMENT" AI RISCHI NATURALI (MODELLO ADATTATO DA KATES 1971).....	32
FIGURA 2-11. SCHEMA DEL MODELLO HOP (ADATTATO DA CUTTER 1996).....	33
FIGURA 3-1. ANDAMENTO DELLE TEMPERATURE MEDIE DEL TRIMESTRE ESTIVO DAL 1989 AD OGGI (FONTE: ARPACAL-CENTRO FUNZIONALE MULTIRISCHI DELLA CALABRIA 2019).....	42
FIGURA 3-2. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELLE PRECIPITAZIONI CUMULATE DURANTE GLI EVENTI (FONTE: CENTRO FUNZIONALE MULTIRISCHI DELLA CALABRIA- ARPACAL).....	45
FIGURA 3-3. ZONE DI ALLERTAMENTO DELLA CALABRIA.....	47
FIGURA 3-4. DIAGRAMMA SANKEY RIFERITO ALLE SCHEDE DI SOMMA URGENZA (SX) E ALLE ZONE DI ALLERTAMENTO(DX).....	48
FIGURA 3-5. CATEGORIE CHE HANNO SUBITO MAGGIORI DANNI ECONOMICI DURANTE GLI EVENTI REGISTRATI SUL TERRITORIO REGIONALE DAL 2015 AL 2018.....	48
FIGURA 3-6. FOTO DELL'EVENTO REGISTRATO NELLA REGIONE CALABRIA NEL PERIODO 30 OTTOBRE 2 NOVEMBRE 2015: (A) FRANA COMUNE DI AFRICO (RC); (B) TORRENTE BRUZZANO, COMUNE DI BRANCALEONE (RC); (C) CEDIMENTO DEL PONTE SULLA SP65; (D) ABBASSAMENTO DI UNA PILA DEL PONTE SUL FIUME ALLARO A CAULONIA (RC) CON GRAVI DANNI AL VIADOTTO DELLA SS 106; (E) COMUNE DI ARDORE (RC); (F) CEDIMENTO STRADALE AL DI SOTTO DEL PONTE FERROVIARIO COMUNE DI FERRUZZANO (RC).....	49
FIGURA 3-7. FOTO DELL'EVENTO REGISTRATO NELLA REGIONE CALABRIA NEL PERIODO NOVEMBRE 2016 E GENNAIO 2017: (A) CARAFFA DEL BIANCO (RC); (B) SANT'AGATA DEL BIANCO (RC); (C) FRANA GROTTERIA (RC); (D) SIMERI CRICHI (CZ); (E) FRANA SULLA S.P.110 TRA BENESTARE E S. NICOLA DI ARDORE (RC);(F) S.P. BOVALINO-CARERI (RC).....	50
FIGURA 3-8. MISURE DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO (FONTE: PROTEZIONE CIVILE NAZIONALE).....	51
FIGURA 3-9. NUMERO DI INCENDI E SUPERFICIE BRUCIATA IN ETTARI CHE HANNO INTERESSATO LA REGIONE CALABRIA DAL 2008 AL 2019 (FONTE: COMANDO REGIONE CARABINIERI FORESTALI).....	52
FIGURA 3-10. AREE PERCORSE DA INCENDIO DAL 2008 AL 2019: (A) CARTA DEL NUMERO DI INCENDI PREGRESSI NELLA STESSA ZONA; (B) CARTA DELLA SUPERFICIE BOSCATI INCENDIATA IN ETTARI SU BASE COMUNALE.....	53
FIGURA 4-1. SCHEMA GENERALE DELL'ATTIVITÀ DI RICERCA.....	57
FIGURA 4-2. LOGICAL FRAMEWORK_ UNITÀ GEOGRAFICA DEL CONTESTO TERRITORIALE (FONTE: PROTEZIONE CIVILE NAZIONALE).....	60
FIGURA 4-3. ANALISI SWOT DEI CONTESTI TERRITORIALI (FONTE: PROTEZIONE CIVILE NAZIONALE).....	61
FIGURA 4-4. SCHEMA CONCETTUALE DELL'APPROCCIO DI CALCOLO DELL'INDICE TCVI.....	62
FIGURA 4-5. SCHEMA GENERALE DELLE DIVERSE STRUTTURE DI CALCOLO DELLA VULNERABILITÀ: A) APPROCCIO DEDUTTIVO; B) APPROCCIO GERARCHICO E C) APPROCCIO INDUTTIVO (FONTE: TATE[98]).....	63

FIGURA 4-6. FUNZIONE DI APPARTENENZA (MA): (A) LINEARE; (B) TRIANGOLARE; (C) TRAPEZOIDALE; (D) GAUSSIANA; (E,F) SIGMOIDALE	70
FIGURA 5-1. CONTESTO TERRITORIALE DI MARINA DI GIOIOSA IONICA: A) INQUADRAMENTO GENERALE SU BASE REGIONALE; B) LIMITI AMMINISTRATI DEL CONTESTO TERRITORIALE DI MARINA DI GIOIOSA IONICA	73
FIGURA 5-2. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELLA POPOLAZIONE NEL CONTESTO TERRITORIALE DI MARINA DI GIOIOSA IONICA	74
FIGURA 5-3. INQUADRAMENTO TERRITORIALE DEL CONTESTO TERRITORIALE DI MARINA DI GIOIOSA IONICA: (A) OVERVIEW EUROPA; (B) INQUADRAMENTO AMMINISTRATIVO REGIONE CALABRIA; (C) MODELLO DIGITALE DEL TERRENO DEL CONTESTO TERRITORIALE	75
FIGURA 5-4. INQUADRAMENTO TERRITORIALE: (A) CARTA DELL'ESPOSIZIONE; (B) CARTA DELLA PENDENZA (GRADI)	76
FIGURA 5-5. CARTA DELL'USO DEL SUOLO DEL CT DI MARINA DI GIOIOSA IONICA	76
FIGURA 5-6. INQUADRAMENTO URBANISTICO: (A) LIMITI AMMINISTRATIVI DELLE ZONE CENSUARIE ISTAT E DISTRIBUZIONE SPAZIALE DEGLI EDIFICI PRESENTI SUL TERRITORIO; (B) RETE STRADALE CON INDICAZIONE DELLA TIPOLOGIA SS(STRADA STATALE), SP (STRADA PROVINCIALE, SC/PR (STRADA COMUNALE E/O PRIVATA)	77
FIGURA 5-7. LOCALIZZAZIONE DELLE STAZIONI PLUVIOMETRICHE E TERMOMETRICHE	78
FIGURA 5-8. DISTRIBUZIONE DEL VALORE MASSIMO DI PRECIPITAZIONE GIORNALIERA REGISTRATO IN 1 GIORNO (RX1DAY) (FONTE: CFM ARPACAL)	79
FIGURA 5-9. SERIE DELLE ANOMALIE MEDIE ANNUALI DEL MASSIMO ANNUALE DI PRECIPITAZIONE GIORNALIERA, RX1DAY, RISPETTO AL VALORE MEDIO 1990-2019	79
FIGURA 5-10. DISTRIBUZIONE DEL VALORE MASSIMO DI PRECIPITAZIONE GIORNALIERA REGISTRATO IN 1 GIORNO (RX1DAY) (FONTE: CFM ARPACAL)	80
FIGURA 5-11. SERIE DELLE ANOMALIE MEDIE ANNUALI DEL MASSIMO ANNUALE DI PRECIPITAZIONE GIORNALIERA, RX1DAY, RISPETTO AL VALORE MEDIO 1990-2019	80
FIGURA 5-12. DISTRIBUZIONE DEL VALORE MASSIMO DI PRECIPITAZIONE GIORNALIERA REGISTRATO IN 1 GIORNO (RX1DAY) (FONTE: CFM ARPACAL)	81
FIGURA 5-13. SERIE DELLE ANOMALIE MEDIE ANNUALI DEL MASSIMO ANNUALE DI PRECIPITAZIONE GIORNALIERA, RX1DAY, RISPETTO AL VALORE MEDIO 1990-2019	81
FIGURA 5-14. DISTRIBUZIONE DEL VALORE MASSIMO DI PRECIPITAZIONE GIORNALIERA REGISTRATO IN 1 GIORNO (RX1DAY) (FONTE: CFM ARPACAL)	82
FIGURA 5-15. SERIE DELLE ANOMALIE MEDIE ANNUALI DEL MASSIMO ANNUALE DI PRECIPITAZIONE GIORNALIERA, RX1DAY, RISPETTO AL VALORE MEDIO 1990-2019	82
FIGURA 5-16. DISTRIBUZIONE DEL MASSIMO ANNUALE DELLE TEMPERATURE MINIME TNx E DEL MINIMO ANNUALE DELLE TEMPERATURE MINIME TNN (FONTE: CFM ARPACAL)	83
FIGURA 5-17. DISTRIBUZIONE DEL MASSIMO ANNUALE DELLE TEMPERATURE MASSIME Txx E DEL MINIMO ANNUALE DELLE TEMPERATURE MASSIME TXN (FONTE: CFM ARPACAL)	83
FIGURA 5-18. DISTRIBUZIONE DEL MASSIMO ANNUALE DELLE TEMPERATURE MINIME TNx E DEL MINIMO ANNUALE DELLE TEMPERATURE MINIME TNN (FONTE: CFM ARPACAL)	84
FIGURA 5-19. DISTRIBUZIONE DEL MASSIMO ANNUALE DELLE TEMPERATURE MASSIME Txx E DEL MINIMO ANNUALE DELLE TEMPERATURE MASSIME TXN (FONTE: CFM ARPACAL)	84
FIGURA 6-1. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DEI QUATTRO CRITERI UTILIZZATI: (A) PENDENZA; (B) ESPOSIZIONE); (C) USI DEL SUOLO E (D) INDICE CLIMATICO	90
FIGURA 6-2. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELLE ZONE DI PROBABILE INNESCO: (A) DISTANZA DALLE STRADE; (B) DISTANZA DAGLI INSEDIAMENTI ABITATIVI; (C) DISTANZA DALLE ZONE AGRICOLE E (D) MAPPA FINALE CUMULATIVA DELLE ZONE DI PROBABILE INNESCO.	91
FIGURA 6-3. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELLA MAPPA DI SUSCETTIBILITÀ DEGLI INCENDI BOSCHIVI	94
FIGURA 6-4. CURVA ROC DELLA MAPPA DI SUSCETTIBILITÀ DA INCENDIO BOSCHIVO	96
FIGURA 6-5. MAPPA DI SUSCETTIBILITÀ DA INCENDIO BOSCHIVO DEL CONTESTO TERRITORIALE DI MARINA DI GIOIOSA IONICA, A) CARTA TEMATICA, B) DISTRIBUZIONE PERCENTUALE DELLE CLASSI DI SUSCETTIBILITÀ	97
FIGURA 6-6. SCHEMA IDROLOGICO	99
FIGURA 6-7. CURVE DI POSSIBILITÀ PLUVIOMETRICA DELL'INTERO BACINO IDROGRAFICO, CON TEMPO DI RITORNO DI 50,200 E 500 ANNI	100
FIGURA 6-8. IDROGRAMMA IN CORRISPONDENZA DELLA SEZIONE DI FOCE, TEMPO DI RITORNO 50 ANNI	104
FIGURA 6-9. IDROGRAMMA IN CORRISPONDENZA DELLA SEZIONE DI FOCE, TEMPO DI RITORNO 200 ANNI	105
FIGURA 6-10. IDROGRAMMA IN CORRISPONDENZA DELLA SEZIONE DI FOCE, TEMPO DI RITORNO 500 ANNI	105
FIGURA 6-11. ESEMPIO DI DIAGRAMMA DELAUNAY – VORONOI	108
FIGURA 6-12. DOMINIO DI STUDIO NELLA MODELLAZIONE IDRAULICA BIDIMENSIONALE	109

FIGURA 6-13. DOMINIO DELLA MODELLAZIONE BIDIMENSIONALE CON INDICAZIONE DEGLI ATTRAVERSAMENTI E DELLE OPERE DI DIFESA IDRAULICA.....	110
FIGURA 6-14 . ESEMPIO DI INSERIMENTO DI UN ATTRAVERSAMENTO	110
FIGURA 6-15. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELLE AREE ALLAGATE: (A) DOMINIO DI ANALISI T50 ANNI; (B) DETTAGLIO DI UNA AREA.....	111
FIGURA 6-16. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELLE AREE ALLAGATE: (A) DOMINIO DI ANALISI T200 ANNI; (B) DETTAGLIO DI UNA AREA.....	112
FIGURA 6-17. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELLE AREE ALLAGATE: (A) DOMINIO DI ANALISI T500 ANNI; (B) DETTAGLIO DI UNA AREA.....	113
FIGURA 6-18 . DETTAGLIO DELL'AREA ALLAGATA CON LA MESH DI LAVORO DI HEC RAS, TEMPO DI RITORNO 50 ANNI.....	114
FIGURA 6-19 . DETTAGLIO DELL'AREA ALLAGATA CON LA MESH DI LAVORO DI HEC RAS, TEMPO DI RITORNO 200 ANNI.....	115
FIGURA 6-20. DETTAGLIO DELL'AREA ALLAGATA CON LA MESH DI LAVORO DI HEC RAS, TEMPO DI RITORNO 500 ANNI	115
FIGURA 6-21. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DEI TIRANTI IDRICI: (A) DOMINIO DI ANALISI T 50 ANNI; (B) ISTOGRAMMA CON LE PERCENTUALI DI PIXEL APPARTENENTI AD OGNI SINGOLA CLASSE DELLA MAPPA DEI TIRANTI IDRICI	116
FIGURA 6-22. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DEI TIRANTI IDRICI: (A) DOMINIO DI ANALISI T 200 ANNI; (B) ISTOGRAMMA CON LE PERCENTUALI DI PIXEL APPARTENENTI AD OGNI SINGOLA CLASSE DELLA MAPPA DEI TIRANTI IDRICI	117
FIGURA 6-23. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DEI TIRANTI IDRICI: (A) DOMINIO DI ANALISI T 500 ANNI; (B) ISTOGRAMMA CON LE PERCENTUALI DI PIXEL APPARTENENTI AD OGNI SINGOLA CLASSE DELLA MAPPA DEI TIRANTI IDRICI	118
FIGURA 6-24. DETTAGLIO DELLA VELOCITÀ CON LA MESH DI LAVORO DI HEC RAS, TEMPO DI RITORNO 50 ANNI	119
FIGURA 6-25. DETTAGLIO DELLA VELOCITÀ CON LA MESH DI LAVORO DI HEC RAS, TEMPO DI RITORNO 200 ANNI	119
FIGURA 6-26. DETTAGLIO DELLA VELOCITÀ CON LA MESH DI LAVORO DI HEC RAS, TEMPO DI RITORNO 500 ANNI	120
FIGURA 6-27. SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SU UN CONCIO DI TERRENO CON SUPERFICIE DI SCORRIMENTO PARALLELA AL VERSANTE ...	122
FIGURA 6-28. SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SU UN CONCIO DI TERRENO NEL CASO DI PENDIO INDEFINITO CON PRESENZA DI FALDA E COESIONE TERRENO	122
FIGURA 6-29. SHALSTAB MODELLO CONCETTUALE SECONDO MONTGOMERY AND DIETRICH, 1994). A) PENDIO INFINITO; B) MODELLO IDROLOGICO (P, PRECIPITAZIONE; E, EVAPOTRASPIRAZIONE; R, DRENAGGIO PROFONDO; A, AREA DRENATA; H, ALTEZZA DEL LIVELLO DELL'ACQUA; Z, SPESSORE DEL SUOLO; U, VELOCITÀ DEL FLUSSO SUBSUPERFICIALE; HW, LIVELLO DELL'ACQUA DEL FLUSSO SUPERFICIALE; Ø, PENDENZA DEL VERSANTE; B, LARGHEZZA DEL CANALE DI FLUSSO).(FONTE: "RECOMMENDED PROCEDURES FOR VALIDATING LANDSLIDE MODEL 7TH FRAMEWORK PROGRAMME SAFELAND D2-8 2011").....	125
FIGURA 6-30. CONDIZIONI ESTREME DI STABILITÀ ED INSTABILITÀ INDIPENDENTI DALLA SATURAZIONE.	125
FIGURA 6-31. MAPPA DI SUSCETTIBILITÀ DA FRANA DEL CONTESTO TERRITORIALE DI MARINA DI GIOIOSA IONICA (A); DIAGRAMMA DELLE CLASSI DI SUSCETTIBILITÀ (B)	127
FIGURA 6-32. DISTRIBUZIONE CLASSI DI SUSCETTIBILITÀ DA FRANA	127
FIGURA 6-33. MAPPA DI SUSCETTIBILITÀ DA FRANA, OTTENUTA ATTRAVERSO IL PROGRAMMA SHALSTAB E MAPPE DI PERICOLOSITÀ DA FRANA PAI 2016	128
FIGURA 7-1. DIAGRAMMA DELLA FUNZIONE DI APPARTENENZA MS LARGE DELLE COMPONENTI DI VULNERABILITÀ $TCVI_{PEOPLE}$	135
FIGURA 7-2. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DEGLI INDICI DI VULNERABILITÀ $TCVI_{PEOPLE}$: A) INDICE RELATIVO ALLA COMPONENTE PRINCIPALI PC1; B) INDICE RELATIVO ALLA COMPONENTE PRINCIPALI PC2; C) INDICE RELATIVO ALLA COMPONENTE PRINCIPALI PC3; D) INDICE RELATIVO ALLA COMPONENTE PRINCIPALI PC4	136
FIGURA 7-3. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELL'INDICE DI VULNERABILITÀ $TCVI_{PEOPLE}$: A) INDICE AGGREGATO; B) DIAGRAMMA SULLA DISTRIBUZIONE PERCENTUALE DELLE 5 CLASSI DI VULNERABILITÀ NEL CONTESTO TERRITORIALE	137
FIGURA 7-4. DISTRIBUZIONE PERCENTUALE DEL NUMERO DI RESIDENTI IN RELAZIONE ALLE DIVERSE FASCE DI ETÀ, NEI SEI COMUNI DEL CT	138
FIGURA 7-5. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELL'INDICE DI VULNERABILITÀ $TCVI_{PEOPLE}$ RICAIVATO CON IL SEMPLICE METODO DELLA NORMALIZZAZIONE DELLE VARIABILI	139
FIGURA 7-6. DIAGRAMMA DELLA FUNZIONE DI APPARTENENZA MS LARGE DELLE COMPONENTI DI VULNERABILITÀ $TCVI_{EXPOSURE}$	144
FIGURA 7-7. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DEGLI INDICI DI VULNERABILITÀ $TCVI_{EXPOSURE}$: A) INDICE RELATIVO ALLA COMPONENTE PRINCIPALI PC1; B) INDICE RELATIVO ALLA COMPONENTE PRINCIPALI PC2; C) INDICE RELATIVO ALLA COMPONENTE PRINCIPALI PC3	145
FIGURA 7-8. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELL'INDICE DI VULNERABILITÀ $TCVI_{EXPOSURE}$: A) INDICE AGGREGATO; B) DIAGRAMMA SULLA DISTRIBUZIONE PERCENTUALE DELLE 5 CLASSI DI VULNERABILITÀ NEL CONTESTO TERRITORIALE	146
FIGURA 7-9. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELL'INDICE DI VULNERABILITÀ $TCVI$ RICAIVATO CON IL SEMPLICE METODO DELLA NORMALIZZAZIONE DELLE VARIABILI.....	147
FIGURA 7-10. MAPPE VETTORIALI: A) PUNTI DI ORIGINE RIFERITI AI CENTROIDI DELLE ZONE CENSUARIE ISTAT; B) CENTROIDI E RETE STRADALE	148

FIGURA 7-11. MAPPE CON I PUNTI DI ORIGINE(CENTROIDI) ED I PUNTI DI DESTINAZIONE (ELEMENTI DELLA PIANIFICAZIONE DI EMERGENZA) CON INDICAZIONE DEI PERCORSI PIÙ BREVI FRA GLI STESSI (A); DETTAGLIO CARTOGRAFICO (B); TABELLA CON INDICAZIONE DEI DIVERSI PUNTI DI DESTINAZIONE (C)	149
FIGURA 7-12. SIMULAZIONE TRAFFICO VEICOLARE FRA I PUNTI DI ORIGINE ED I PUNTI DI DESTINAZIONE, RAPPRESENTAZIONE DELLE BANDE DI LARGHEZZA (BANDWIDTH) DEI FLUSSI DI TRAFFICO	150
FIGURA 7-13. MAPPA DELL'INDICE DI VULNERABILITÀ $TCVI_{EMERGENCY}$: A)SCENARIO DI PERICOLOSITÀ DA INCENDIO BOSCHIVO; B) SCENARIO DI PERICOLOSITÀ DA ALLUVIONE; C) SCENARIO DI PERICOLOSITÀ DA FRANA.....	151
FIGURA 7-14. SCHEMA GENERALE DI AGGREGAZIONE MODULARE DELL'INDICE $TCVI$	152
FIGURA 7-15. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELLE CLASSI DI VULNERABILITÀ $TCVI$ IPOTIZZANDO UNO SCENARIO DI PERICOLOSITÀ DA INCENDIO BOSCHIVO; A) MAPPA DI VULNERABILITÀ AGGREGATA $TCVI$; B) DIAGRAMMA DI DISTRIBUZIONE DELLE CLASSI DI VULNERABILITÀ IN RELAZIONE AL NUMERO DI ZONE CENSUARIE, NEI 6 COMUNI DI APPARTENENZA DEL CT	153
FIGURA 7-16. DISTRIBUZIONE AREALE IN KMQ DEI LIVELLI DI VULNERABILITÀ $TCVI$, NEI 6 COMUNI DEL CT, IPOTIZZANDO UNO SCENARIO DI PERICOLOSITÀ DA INCENDIO BOSCHIVO	154
FIGURA 7-17. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELLE CLASSI DI VULNERABILITÀ $TCVI$ IPOTIZZANDO UNO SCENARIO DI PERICOLOSITÀ DA FRANA; A)MAPPA DI VULNERABILITÀ AGGREGATA $TCVI$; B) DIAGRAMMA DI DISTRIBUZIONE DELLE CLASSI DI VULNERABILITÀ IN RELAZIONE AL NUMERO DI ZONE CENSUARIE, NEI 6 COMUNI DI APPARTENENZA DEL CT	157
FIGURA 7-18. DISTRIBUZIONE AREALE IN KMQ DEI LIVELLI DI VULNERABILITÀ $TCVI$, NEI 6 COMUNI DEL CT, IPOTIZZANDO UNO SCENARIO DI PERICOLOSITÀ DA FRANA	158
FIGURA 7-19. DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELLE CLASSI DI VULNERABILITÀ $TCVI$ IPOTIZZANDO UNO SCENARIO DI PERICOLOSITÀ DA ALLUVIONE; A)MAPPA DI VULNERABILITÀ AGGREGATA $TCVI$, L'AREA IN ROSSO INDICA IL DOMINIO DI STUDIO DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA; B) DIAGRAMMA DI DISTRIBUZIONE DELLE CLASSI DI VULNERABILITÀ IN RELAZIONE AL NUMERO DI ZONE CENSUARIE, NEI 6 COMUNI DI APPARTENENZA DEL CT	159
FIGURA 8-1. SCHEMA CONCETTUALE DELL'APPROCCIO DI CALCOLO DELLA MAPPA DEL RISCHIO.....	160
FIGURA 8-2. MAPPA DEL RISCHIO DA INCENDIO BOSCHIVO, A LIVELLO DI ZONA CENSUARIA.....	161
FIGURA 8-3. MAPPA DEL RISCHIO DA FRANA, A LIVELLO DI ZONA CENSUARIA	162
FIGURA 8-4. MAPPA DEL RISCHIO ALLUVIONE, A LIVELLO DI ZONA CENSUARIA.....	162

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 2-1 . INDICI ESTREMI DI TEMPERATURA DEFINITI DALL'ETCCDI	31
TABELLA 2-2. INDICI ESTREMI DI PRECIPITAZIONE DEFINITI DALL'ETCCDI	31
TABELLA 2-3. INDICATORI DI VULNERABILITÀ DI TIPO SOCIALE	35
TABELLA 2-4. TIPI DI CLASSIFICAZIONE DELLE MAPPE DI VULNERABILITÀ	35
TABELLA 2-5. MATRICE DELLA CARTA DELLO SCENARIO DI RISCHIO NEL CASO DI INONDAZIONE O FRANA	40
TABELLA 2-6. MATRICE DELLA CARTA DELLO SCENARIO DI RISCHIO NEL CASO DI INCENDIO BOSCHIVO	41
TABELLA 3-1. ORDINANZE DI PROTEZIONE CIVILE PER GLI EVENTI REGISTRATI SUL TERRITORIO REGIONALE DAL 2008 AL 2019 (FONTE: REGIONE CALABRIA)	46
TABELLA 4-1. NOTAZIONE DELLA MATRICE O-D	68
TABELLA 5-1. CARATTERISTICHE FISICHE E DEMOGRAFICHE DEL CONTESTO TERRITORIALE DI MARINA DI GIOIOSA IONICA.....	74
TABELLA 6-1. CRITERI E SOTTO CRITERI UTILIZZATI NEL CALCOLO DELLA MAPPA DI SUSCETTIBILITÀ DEGLI INCENDI BOSCHIVI	85
TABELLA 6-2. LIVELLI DI IMPORTANZA DEI CINQUE CRITERI UTILIZZATI NEL CALCOLO DELLA MAPPA DI SUSCETTIBILITÀ	89
TABELLA 6-3. SCALA DI SAATY	92
TABELLA 6-4. MATRICE DEI PESI AHP	93
TABELLA 6-5. PARAMETRI CURVA POSSIBILITÀ PLUVIOMETRICA CON TEMPO DI RITORNO DI 50 ANNI	99
TABELLA 6-6. PARAMETRI CURVA POSSIBILITÀ PLUVIOMETRICA CON TEMPO DI RITORNO DI 200 ANNI	100
TABELLA 6-7. PARAMETRI CURVA POSSIBILITÀ PLUVIOMETRICA CON TEMPO DI RITORNO DI 500 ANNI	100
TABELLA 6-8. MODELLO IDROLOGICO – CARATTERISTICHE SOTTOBACINI	102
TABELLA 6-9. TEMPI DI CORRIVAZIONE: FORMULE EMPIRICHE	103
TABELLA 6-10. TEMPI DI CORRIVAZIONE.....	103
TABELLA 6-11. PORTATE MASSIME DI PROGETTO CON TEMPO DI RITORNO DI 50, 200 E 500 ANNI.....	104
TABELLA 6-12. DEFINIZIONE DELLE CLASSI DI PERICOLOSITÀ.....	127
TABELLA 7-1. STATISTICHE DESCRITTIVE DEL DATASET DELL'INDICE $TCVI_{PEOPLE}$	130
TABELLA 7-2. AUTOVALORI DELLA MATRICE COMPLETA E VARIANZA SPIEGATA DELLE COMPONENTI PRINCIPALI DELLA $TCVI_{PEOPLE}$	131
TABELLA 7-3. RISULTATI DELL'ANALISI STATISTICA DELLA PCA CON ROTAZIONE VARIMAX E CRITERIO DI SELEZIONE DI KAISER, PER L'INDICE $TCVI_{PEOPLE}$	132
TABELLA 7-4. METRICHE STATISTICHE DELLA $TCVI_{PEOPLE}$ APPLICATE ALLA FUNZIONE FUZZY "LINEAR"	134
TABELLA 7-5. METRICHE STATISTICHE DELLA $TCVI_{PEOPLE}$ APPLICATE ALLA FUNZIONE FUZZY "LARGE"	134
TABELLA 7-6. METRICHE STATISTICHE DELLA $TCVI_{PEOPLE}$ APPLICATE ALLA FUNZIONE FUZZY "MS LARGE"	134
TABELLA 7-7. STATISTICHE DESCRITTIVE DEL DATASET DELL'INDICE $TCVI_{EXPOSURE}$	140
TABELLA 7-8. AUTOVALORI DELLA MATRICE COMPLETA E VARIANZA SPIEGATA DELLE COMPONENTI PRINCIPALI DELLA $TCVI_{EXPOSURE}$	141
TABELLA 7-9. RISULTATI DELL'ANALISI STATISTICA DELLA PCA CON ROTAZIONE VARIMAX E CRITERIO DI SELEZIONE DI KAISER, PER L'INDICE $TCVI_{EXPOSURE}$	142
TABELLA 7-10. METRICHE STATISTICHE DELLA $TCVI_{EXPOSURE}$ APPLICATE ALLA FUNZIONE FUZZY "LINEAR"	143
TABELLA 7-11. METRICHE STATISTICHE DELLA $TCVI_{EXPOSURE}$ APPLICATE ALLA FUNZIONE FUZZY "LARGE"	143
TABELLA 7-12. METRICHE STATISTICHE DELLA $TCVI_{EXPOSURE}$ APPLICATE ALLA FUNZIONE FUZZY "MS LARGE"	143
TABELLA 7-13. RISULTATI DEL TEST DI MULTICOLLINEARITÀ E DELLA REGRESSIONE OLS E GWR	156

Abstract

Vulnerability is an important component of risk assessment and represents the main element in the risk perception. Typically, the characteristics related to social, cultural, physical and institutional factors increase the susceptibility of an individual or a community, to the impacts of hazards. Vulnerability is described as a dynamic phenomenon that can vary significantly across time and space; it is greatly influenced by human actions and behaviors, by the emergency response related to road accessibility. As a consequence, there is a continuing need for risk reduction disaster strategies to shift attention from assessing hazard events toward reducing vulnerabilities within social systems. Describing and quantifying vulnerability is an important challenge along this path. Our current understanding of vulnerability is guided by methodologies, indicators and measurement standards derived from different schools of thought.

This thesis presents a methodological approach to describe and to assess the vulnerability index at the inter-municipal scale, using three indices. Spatial analysis is conducted on the basis of census zones in an area defined as "Territorial Context" (TC) characterized by the union of municipalities. A measure of modular vulnerability is evaluated on the basis of inductive methods. Vulnerability is defined as the conditions determined from social and economic factors from human and climatic territorial pressures, from critical issues generated by past events and from the functioning of road infrastructures during an event. The three modular components of the vulnerability are: $TCVI_{people}$ (Territorial Context Vulnerability index-people); $TCVI_{exposure}$ (Territorial Context Vulnerability index-exposure); and $TCVI_{emergency}$ (Territorial Context Vulnerability index-emergency). Thirty-eight variables are selected and geoprocessed for each of the 195 census analysis units in the Mediterranean study area of southern Italy. Using Principal Components Analysis (PCA) with varimax rotation and Kaiser criterion for component selection, the social and territorial vulnerability index, are identified. The third vulnerability index, $TCVI_{emergency}$, is processed through the transport modeling technique. In the latter case, a contextual interruption of all road network exposed to the highest level of hazard is assumed. Models are implemented to assess the forest fire, flood and landslide hazards. The $TCVI_{emergency}$ index is calculated (on the basis of the differences in travel time, after and before the event, from the origin (centroids of the census areas) to the destination points (strategic buildings in emergency planning and civil protection operational structures), using the shortest paths network model. This index can provides useful information for evacuation planning and rescue operation during emergency situations.

A fuzzy logic model is used to evaluate the vulnerability classification, while the fuzzy overlay function is used to calculate the final aggregate TCVI index. The performance of classification models is measured by some statistical metrics.

A dedicated Geographic Information System (GIS) is used to capture, geo-process and display spatial data recorded at different scales. The GIS technology allows to evaluate and visualize the results, through maps, as a realistic representation and to identify and manage the process.

The results contribute to debates in contemporary literature on vulnerability in many ways. First these analyses constitute an attempt to quantify and mapping vulnerability at census area in a natural or handmade scenario. Secondly new variables like the road network representing the category most damaged during the events, with the greatest repercussions on the community and on the economy, are introduced. The current methods of vulnerability assessment are in fact mainly based on social aspects, the built environment and climatic factors, leaving out the importance of the road infrastructure. The model is developed at the census area, which is the smallest geographic unit that the National Institute of Statistics uses to aggregate demographic data, in an inter-municipal area. It is well known that vulnerability is a scale-dependent variable and it could be very accurate for larger spatial scales than the TC area. Moreover, new classification criteria for vulnerability maps are investigated,

using fuzzy set theories. Finally, working with the territorial contexts TC, a new approach for risk reduction is defined, in order to better meet the needs of the Civil protection activities. This is the first national attempt to calculate the spatial distribution of vulnerability in a territorial context functional to emergency planning.

Through this study, a comprehensive understanding of the relative driving components contributing to the overall vulnerability is achieved. Results show significant differences in the spatial distribution of the social vulnerability, highlighting the multidimensionality and heterogeneity of the municipal characteristics. The TCVI in the southern and central part of TC is higher than that its northern and western parts. In general, by analyzing the results of the vulnerability values it must be noted that about 56% of census areas are characterized by low and low-medium, while 35 % fall into categories labelled with high, very high and the remaining 9% falls into the moderate vulnerability category.

The vulnerability maps provide useful territorial information, that can support policy-makers for prevention and emergency management. Within the context of natural and handmade hazards, the TCVI could be used to manage the repartition of resource, helps to determine which places may need specialized attention during immediate response and long-term recovery after an extreme event. It can provide an indication of the housing areas that need development and humanitarian aids and can provide guidance for better preparedness, response and mitigation strategies. The vulnerability maps can also be used as guidance to road administrations in the planning and in their investment to prioritize interventions and for normal maintenance and control activities. Actions and emergency measure are directly connected with resilience, then this work can help to strong intent to increase capacity building of human resources, better land use management, increasing preparedness and emergency measures that are taken during and after event.

Following the introduction section, the present study is composed by two main sections that delve into:

- 1) conceptual frameworks for vulnerability and hazards assessments. This is accomplished by discussing the relevant primary research literature and analyzing the events recorded in the past;
- 2) methodological approaches to model natural and anthropic hazards and for vulnerability measuring in a Territorial Context. An application in the Territorial Context of Marina of Gioiosa Ionica in Southern Italy, is developed.

Finally, the last section presents the main conclusions of the study and potential developments.

Keywords: *forest fire, landslide and flood hazard, vulnerability index, territorial context, indices and maps, social and territorial vulnerability, road susceptibility.*

Introduzione

I rischi naturali e antropici rappresentano spesso un problema per la società e per lo sviluppo economico della stessa. Essi sono collegati a fenomeni su grande scala, come quello relativo ai cambiamenti climatici e richiedono attività di prevenzione, pianificazione e mitigazione sia da parte delle amministrazioni che dei cittadini. Le conoscenze scientifiche sul rischio si basano spesso sulla descrizione della pericolosità legata ad una specifica realtà territoriale, ma un altro aspetto molto importante da indagare riguarda la percezione del rischio ed il livello di vulnerabilità sociale e territoriale. Lo studio su come le persone percepiscono il rischio è importante al fine di comprendere come le stesse lo affrontano. Le percezioni sono legate a una molteplicità di fattori riferiti ai livelli culturali, alle regole sociali e valoriali, del ruolo dei media, ecc... Inoltre il comportamento verso specifiche tipologie di rischio è influenzato nel tempo e nello spazio e risulta quindi diverso a seconda degli individui e delle comunità (Regione Emilia-Romagna and Arpa Emilia-Romagna[1]). Esistono diverse definizioni del concetto di rischio ed anche diverse quantificazioni ed indicatori. Un interessante aspetto risulta quello legato alla rappresentazione mentale del pericolo. Il paradigma psicometrico, sviluppato da Slovic *et al.*[2] ha come obiettivo di ricerca quello di identificare le strategie mentali che i cittadini comuni utilizzano per formulare i giudizi sul rischio. Nelle loro ricerche, gli autori effettuano diverse interviste chiedendo alle persone di valutare una serie di eventi estremi giudicandone il livello di rischiosità. Le ricerche in questo ambito mostrano come gli esperti e le persone comuni utilizzino diverse definizioni di rischio durante il processo decisionale che porta poi alla valutazione del comportamento da adottare durante l'esposizione diretta al rischio. Dalle indagini emerge che spesso quelli considerati "esperti" basano il rischio sul numero di eventi fatali che si aspettano, mentre le persone "comuni" percepiscono il rischio in modo più complesso considerando alcuni aspetti qualitativi, come l'immediatezza o meno dell'effetto. Con riferimento invece alla sfera emotiva gli "esperti" valutano i rischi in base a modelli scientifici, mentre le persone "comuni" li valutano in base alle emozioni positive e negative suscitate dal rischio stesso. Gli aspetti indagati riguardano anche altri ambiti come quello dei benefici, della catastrofe, dell'esposizione, ecc.

A differenza di quello psicometrico l'approccio culturale al rischio ne evidenzia i fattori sociali caratteristici. La teoria culturale del rischio proposta da Douglas and Wildavsky[3], mette in evidenza come la definizione ed il riconoscimento del rischio siano connessi e filtrati dalla specifica cultura e organizzazione sociale entro cui le persone si muovono. La percezione del rischio quindi non avviene solo a livello individuale ma anche e soprattutto a livello collettivo. Gli autori identificano 4 differenti gruppi di persone: i gruppi gerarchici che rispettano le autorità; i gruppi egualitari, costituiti da individui che si identificano fortemente con il proprio gruppo; i fatalisti, che mancano di legami forti con il gruppo ma tendono ad affidarsi alla sorte e i gruppi individualisti che sostengono che ognuno debba affrontare il rischio sulla base dei propri individuali criteri. Spesso in tali studi non è considerato l'aspetto dinamico legato alla visione del mondo e quindi del fatto che le persone tendono ad adottare una visione diversa del rischio in base alla situazione. Le rappresentazioni sociali del concetto di rischio, si costruiscono spesso intorno a credenze, opinioni, valori e vengono alimentate dal confronto reciproco fra gli individui di una comunità. Essi sono molto importanti e meritano di essere investigati in quanto influenzano la percezione del rischio stesso e quindi il comportamento dell'individuo durante un'emergenza.

In merito alla definizione del rischio, la visione più comune e documentata in letteratura è quella riferita alla gestione dei disastri. In tale ottica il rischio è legato alla possibilità che si verifichi un fenomeno avverso e deriva dall'interazione fra i processi sociali e ambientali, e dalla combinazione della pericolosità fisica con la vulnerabilità degli elementi esposti (UNDRR[4], Cardona[5], UNISDR[6], Birkmann[7]). Il concetto di rischio legato ai disastri è dinamico ed è associato con i diversi livelli e tipologie di fenomeni avversi. Gli effetti al suolo possono assumere livelli catastrofici o meno. Alcuni

sono rapportati a grosse ed ingenti perdite economiche o di vite umane, altri producono prevalentemente danni economici ed in alcuni casi ambientali. Studi scientifici mettono in luce che gli effetti cumulativi di piccoli disastri, possono influenzare direttamente la capacità di una comunità di affrontare disastri a livello locale o nazionale (Alexander[8], Quarantelli[9], Marulanda *et al.*[10]). Nell'ambito della gestione del rischio i fattori legati alla sua valutazione sono quelli riferiti alla pericolosità, all'esposizione ed alla vulnerabilità. La pericolosità si riferisce alla possibilità che si verifichi un evento naturale o indotto dall'uomo che può avere effetti negativi sull'uomo stesso (Cardona[11]). L'intensità o la frequenza con cui si manifestano gli eventi può essere parzialmente influenzata dal livello di degrado ambientale e dalle attività umane che spesso vanno a modificare l'equilibrio degli ecosistemi. L'esposizione si riferisce invece agli elementi (beni o persone) presenti in una area esposta ad un pericolo. L'esposizione è un elemento necessario ma non sufficiente alla valutazione del rischio. Infatti è possibile essere esposti ma non vulnerabili, per esempio vivendo in una pianura alluvionale si è esposti ma si può essere dotati di mezzi sufficienti per contrastare il fenomeno o magari si possono adottare i comportamenti corretti per mitigare le perdite. L'uso del suolo e la pianificazione territoriale sono fattori chiave nella riduzione del rischio. L'aumento demografico, la graduale diminuzione della disponibilità di terre più sicure, rende quasi inevitabile l'esposizione ai pericoli delle persone così come spesso vanifica gli sforzi umani di messa in sicurezza di alcuni luoghi (Lavell[12]). Un altro importante fattore legato al concetto di rischio è quello di vulnerabilità, che si riferisce alla propensione degli elementi esposti come gli esseri umani, i beni o le risorse a subire dei danni a seguito di eventi pericolosi (UNDRR[4, Cardona[5]). La vulnerabilità è legata con la predisposizione, la suscettibilità, la fragilità, la debolezza o la mancanza di capacità di reagire agli eventi degli elementi esposti (Thywissen[13, Manyena[14]).

Negli ultimi vent'anni, le tematiche relative alla mitigazione del rischio, nonché alla pianificazione e gestione delle emergenze sono divenute di grande interesse anche nell'ambito scientifico. Atteso che oggi si dispone di strumenti e metodologie per definire in maniera sempre più puntuale e precisa la pericolosità di un territorio **la nuova sfida per la riduzione del rischio invece consiste proprio nell'intervento sulla vulnerabilità**, ad oggi amplificata da un rapporto poco sostenibile dell'uomo nei confronti dell'ambiente circostante.

Il presente lavoro fornisce importanti contributi. Per prima cosa vengono **analizzati i dati riferiti agli eventi calamitosi registrati nell'ultimo decennio sul territorio della regione Calabria**, evidenziando le categorie che hanno subito maggiori danni e gli effetti al suolo e sulla popolazione. Vengono altresì analizzate le problematiche legate alla gestione dell'emergenza ed agli strumenti di pianificazione dei rischi che si manifestano con maggiore frequenza sul territorio.

Un contributo innovativo è legato all' **utilizzo del Contesto Territoriale**, come limite amministrativo dell'analisi, mentre come unità spaziale di calcolo è utilizzata la zona censuaria ISTAT. Il Contesto Territoriale rappresenta la nuova frontiera nell'ambito della pianificazione d'emergenza, esso è costituito da un insieme di comuni scelti sulla base di specifici criteri finalizzati alla prevenzione dei rischi ed alla programmazione degli interventi.

Lo studio, sulla base del predetto livello di analisi territoriale, cerca di rispondere innanzitutto alla domanda *"chi e che cosa è vulnerabile?"* A tal fine si individua e si focalizza l'attenzione su tre componenti vulnerabili: le persone, il territorio e le infrastrutture stradali. Viene così sviluppata una **metodologia di calcolo dell'indice di vulnerabilità del Contesto Territoriale basata sull'elaborazione di tre diversi indici**: $TCVI_{\text{exposure}}$ (componente dell'Indice di Vulnerabilità del Contesto Territoriale basata sull'esposizione del territorio), $TCVI_{\text{people}}$ (componente sociale dell'Indice di Vulnerabilità del Contesto Territoriale) e $TCVI_{\text{emergency}}$ (componente dell'Indice di Vulnerabilità del Contesto Territoriale basata sulla risposta all'emergenza). In particolare la prima componente $TCVI_{\text{exposure}}$ è calcolata sulla base di variabili

riferite alla pressione antropica, climatica e sulle criticità presenti sul territorio a seguito del verificarsi di eventi calamitosi. La seconda componente $TCVI_{people}$, fa riferimento alle caratteristiche demografiche, economiche e sociali riferite ai residenti, ai lavoratori, turisti, ecc.. Tali variabili sono state scelte sulla base dei diversi lavori presenti in letteratura (Borden *et al.*[15], Holand *et al.*[16], Maharani *et al.*[17], Cutter *et al.*[18], Roncancio *et al.*[19]). Questi due primi indici di vulnerabilità sono calcolati utilizzando il metodo statistico delle Componenti Principali (detto PCA). La terza componente $TCVI_{emergency}$, è stata creata con l'obiettivo di analizzare il disagio generato dall'interruzione dei tratti di strada durante un evento calamitoso. Spesso infatti, la prima categoria che subisce danni durante un evento è quella delle infrastrutture stradali, con conseguenze che si ripercuotono sulla sicurezza dei viaggiatori, ma anche sull'accessibilità di insediamenti abitativi che in alcuni casi rimangono del tutto isolati (Garschagen *et al.*[20], Trigila *et al.*[21]). L'introduzione del terzo indice, elaborato attraverso tecniche di modellazione dei trasporti, rappresenta un elemento nuovo nel calcolo della vulnerabilità in quanto tiene conto degli elementi della pianificazione dell'emergenza e delle dinamiche legate alla fase di soccorso ed evacuazione, che si possono verificare durante un evento. Esso è inoltre calcolato sulla base dell'assunzione di determinati scenari di pericolosità. $TCVI_{emergency}$ stima quindi la vulnerabilità del sistema operativo di gestione dell'emergenza basato essenzialmente sulla possibilità di potersi spostare verso le aree sicure (per i cittadini), o spostarsi verso i centri di coordinamento e soccorso (per i soccorritori).

In generale l'indice di vulnerabilità TCVI ha caratteristiche multidimensionali, che variano nello spazio e nel tempo. Esso analizza il contesto socio-demografico, economico, territoriale, climatico, infrastrutturale, fornendo una misura della debolezza di un dato sistema. Con riferimento alla variabile temporale si precisa che: $TCVI_{exposure}$ si riferisce alle criticità legate al costruito ed agli eventi critici registrati nel passato, pertanto rappresenta la memoria storica del territorio; $TCVI_{people}$ fornisce una fotografia dello stato socio-demografico, mentre $TCVI_{emergency}$ fa riferimento all'evento.

Per la **rappresentazione cartografica degli indici di vulnerabilità e per l'indice finale aggregato TCVI, sono state utilizzate specifiche funzioni di appartenenza fuzzy.** Le metodologie di calcolo sono state applicate all'area di studio del Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica, nella provincia di Reggio Calabria nella zona Sud-Est della Calabria.

L'attività di ricerca fornisce un altro importante contributo nell'ambito della modellazione riferita a tre specifici scenari di rischio: frana, idraulico e incendio boschivo. Tali rischi sono stati scelti in considerazione della frequenza ed intensità con cui si verificano sul territorio in esame, provocando ingenti danni economici, effetti al suolo anche di natura ambientale e in alcuni casi perdita di vite umane. In particolare è stato implementato un nuovo modello di calcolo della suscettibilità dell'incendio boschivo per la regione Calabria, adattabile ad altre regioni del Mediterraneo. È stato altresì applicato al caso studio un modello idraulico bidimensionale per la valutazione delle zone allagabili e un modello fisico, sviluppato per prevedere i movimenti superficiali innescati da fenomeni meteorici intensi.

Infine il lavoro propone il calcolo della mappa del rischio utilizzando le mappe di pericolosità e quelle di vulnerabilità definite a livello di Contesto Territoriale.

Il documento è diviso in due sezioni principali: nella prima si fornisce una descrizione generale dei rischi naturali e antropici, nonché dei lavori presenti in letteratura sulla vulnerabilità. Sono riportati inoltre i principali eventi calamitosi registrati in Calabria negli ultimi anni e vengono presentati gli elementi caratteristici della pianificazione del rischio meteo-idrogeologico, idraulico e degli incendi boschivi. La seconda parte riporta i risultati dell'attività di ricerca. Sono descritte l'unità geografica del Contesto Territoriale, scelta come caso studio, la metodologia di calcolo degli indici di vulnerabilità, le procedure di implementazione dei tre scenari di pericolosità, nonché il calcolo delle mappe di rischio.

Il lavoro di ricerca si è svolto nella prima parte presso la Protezione Civile della Regione Calabria, dove sono stati acquisiti utili dati riferiti alle Ordinanze del Capo Dipartimento della Protezione Civile (OCDPC), relative agli eventi estremi registrati sul territorio regionale e dove sono stati analizzati gli strumenti di pianificazione e gestione dell'emergenza e le problematiche ad esso legate. Una parte dell'attività di ricerca, inoltre, è stata svolta in collaborazione con l'U.O.A. Politiche della Montagna, Foreste Forestazione e Difesa del Suolo della regione Calabria, per quanto concerne la modellazione della pericolosità da incendio boschivo.

Gli strumenti operativi utilizzati durante la fase di lavoro hanno riguardato principalmente i Sistemi Informativi Geografici (GIS). I dati alfanumerici e cartografici infatti, sono stati gestiti attraverso le moderne tecnologie GIS, che hanno consentito non solo l'archiviazione dei dati, ma anche la loro elaborazione e successiva rappresentazione su carte tematiche, per come dettagliato nei paragrafi successivi. Sono stati inoltre utilizzati programmi come: Matlab, SPSS, HEC-HMS, HEC-RAS e SHALSTAB.

PRIMA PARTE: IL CONTESTO DELL'ANALISI

1 Disastri naturali e antropici

La salvaguardia del territorio è uno dei punti fondamentali della strategia di azione per lo sviluppo sostenibile, e uno dei criteri di orientamento della politica di sostenibilità è individuato nella riduzione dei rischi. Tra questi, in primo piano vi è il rischio naturale, inteso come il prodotto tra la probabilità che accada un fenomeno naturale potenzialmente pericoloso (pericolosità), la vulnerabilità del territorio colpito (compresi i beni in esso contenuti) ed i beni esposti nel territorio stesso. Pericolosità e rischio sono quindi aspetti complementari dello stesso problema; tali concetti tendono spesso a essere usati in maniera confusa e ambigua, fino a scambiare il significato. La pericolosità di un evento naturale (es., terremoti, eruzioni vulcaniche, frane, inondazioni, valanghe, etc.) è definita come la probabilità che l'evento, di una certa magnitudo, si verifichi in una specifica area ed entro un determinato periodo di tempo. Il rischio naturale consegue dalla pericolosità, ma tiene conto del livello di vulnerabilità del territorio e degli elementi esposti che insistono sullo stesso. Il rapporto tra pericolosità naturale ed attività umane è fortemente condizionato dall'incessante sviluppo edilizio ed infrastrutturale, e dagli interventi mirati a ridurre la vulnerabilità. Il rischio quindi dipende dalla pericolosità, quando l'evento minaccia, in maniera più o meno intensa, la vita umana, i beni, le risorse economiche e l'ambiente.

L'Italia, in considerazione anche dell'assetto geomorfologico e della sua alta densità demografica è spesso colpita da eventi calamitosi di origine prevalentemente naturale. Le tipologie di rischio che verranno trattate in questo studio, scelte per la frequenza con cui si verificano sul territorio e per i danni economici che producono, sono le seguenti:

- **Rischio meteo-idrogeologico.** Consiste negli effetti delle condizioni meteorologiche avverse e dell'azione delle acque in generale. Esso è fortemente condizionato da fattori antropici, quali la densità della popolazione, l'urbanizzazione, l'abusivismo edilizio, il disboscamento e la manutenzione degli alvei dei fiumi.
- **Rischio incendi boschivi:** il 30 % della superficie territoriale italiana è costituita da boschi e gli incendi soprattutto nel periodo estivo colpiscono tutta la penisola e le isole, con una maggiore frequenza nella parte meridionale. Ogni anno migliaia di ettari di bosco bruciano a causa di incendi di natura dolosa o colposa, prodotti soprattutto dall'attività dell'uomo. Negli ultimi 30 anni è andato distrutto il 12 % del patrimonio forestale nazionale.

Secondo quanto riportato nel rapporto "Economic Losses, Poverty and Disasters 1998-2017" (Wallemacq *et al.*[22]) tra il 1998 e il 2017 i disastri climatici e geofisici hanno portato alla morte di 1,3 milioni di persone, ferendone circa 4,4 miliardi fra persone lasciate senz'atetto, sfollati o bisognosi di assistenza di emergenza. Mentre la maggior parte dei decessi è stata dovuta a eventi geofisici, principalmente terremoti e tsunami, il 91% di tutti i disastri è stato causato da inondazioni, tempeste, siccità, ondate di calore e altri eventi meteorologici estremi. Nel periodo 1998-2017 i paesi colpiti da catastrofi hanno registrato perdite economiche dirette per un valore di 2.908 miliardi di dollari, aumentando del 68 % rispetto quelle riportate nel periodo tra il 1978 e il 1997. Nel complesso, le perdite riportate da eventi meteorologici estremi sono aumentate di circa il 251% tra questi due periodi ventennali. In termini monetari assoluti, negli ultimi 20 anni, gli Stati Uniti hanno registrato le perdite maggiori (945 miliardi di dollari), mentre l'Italia nello stesso periodo ha registrato perdite per circa 57 miliardi di dollari (Figura 1-1). In termini di numero di eventi, i disastri legati al clima dominano il quadro degli ultimi 20 anni, rappresentando il 91% di tutti i 7.255 eventi registrati tra il 1998 e il 2017 (Figura 1-2).

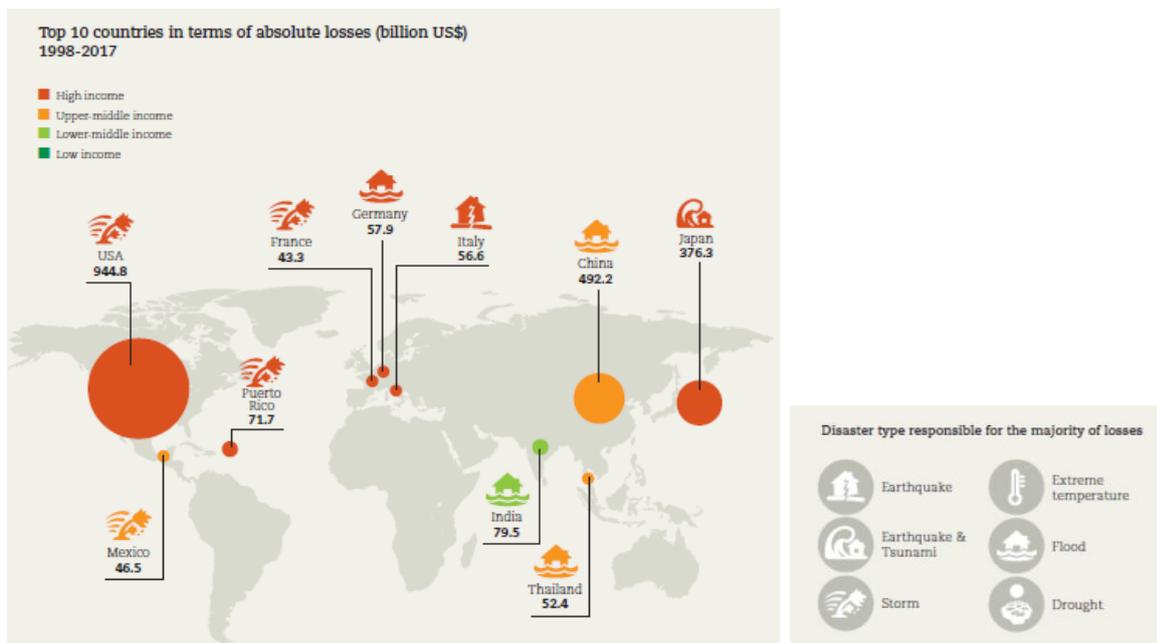


Figura 1-1. Paesi che hanno registrato ingenti danni economici a causa degli eventi estremi dal 1998 al 2017 (fonte: CRED's Emergency Events Database (EM-DAT))

Numbers of disasters per type 1998-2017

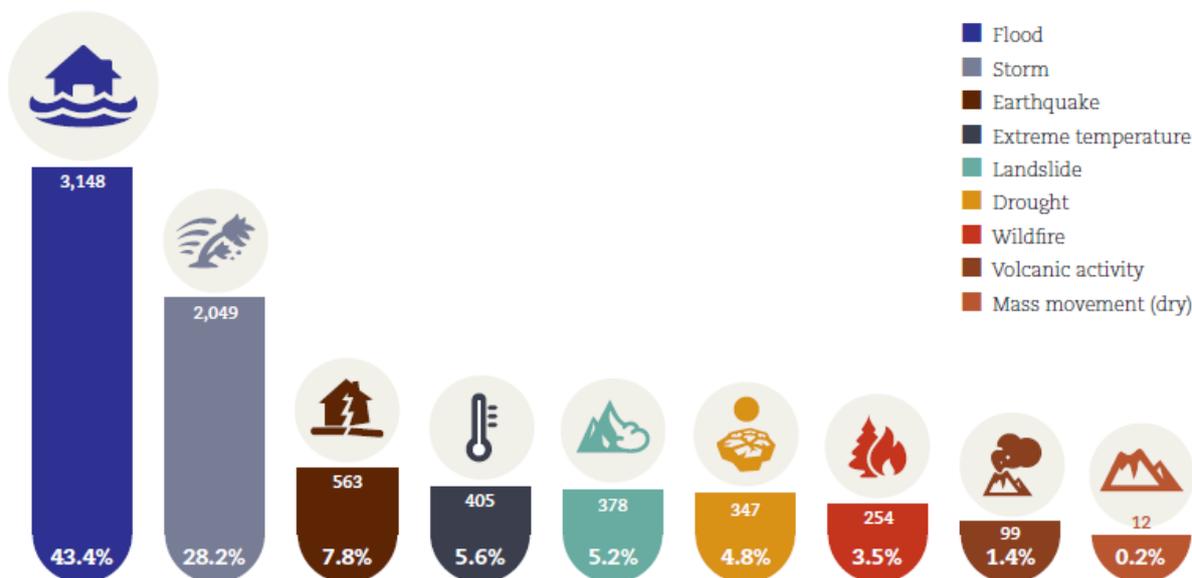


Figura 1-2. Numero totale dei disastri più frequenti registrati nel mondo dal 1998 al 2017 (fonte: CRED's Emergency Events Database (EM-DAT))

Una delle maggiori categorie coinvolte nei disastri naturali è quella relativa alle infrastrutture. Solo in Europa, si stima che i danni a strade e ferrovie, causati da inondazioni ammontano a circa 470 milioni di

Dollari (USA FORZIERI *et al.*[23]). La figura successiva mostra come l'Italia presenti un livello alto di esposizione delle infrastrutture ai pericoli naturali.

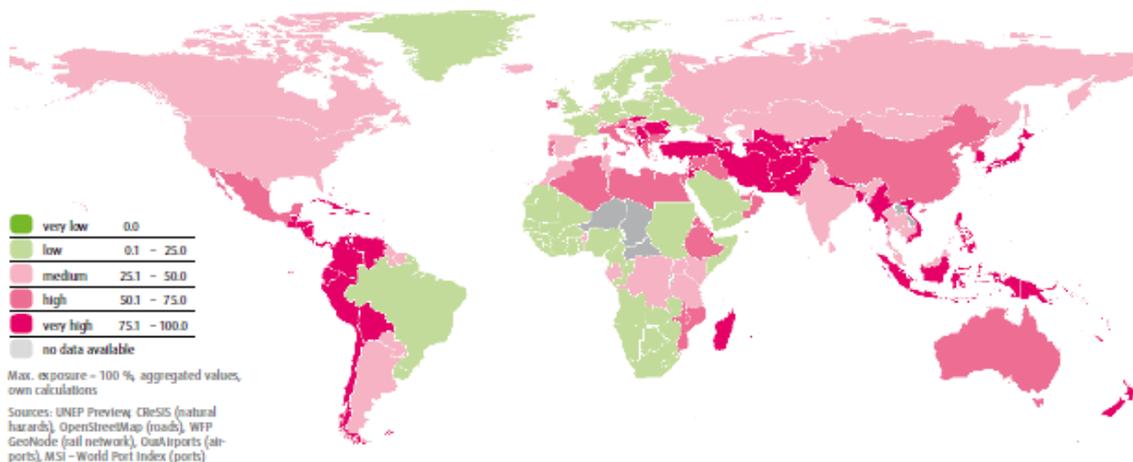
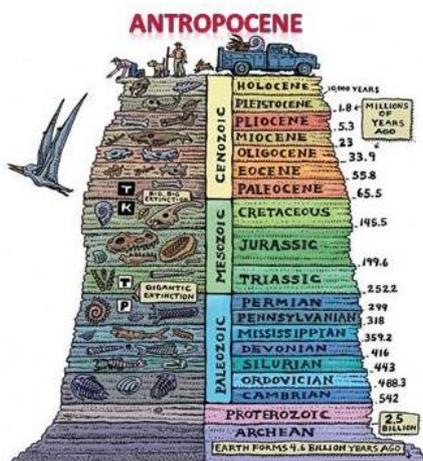


Figura 1-3. Quota di infrastrutture (strade, rete ferroviaria, aeroporti e porti) esposte a pericoli naturali (fonte: World Risk Report 2016)

1.1 Processi di sviluppo antropico ed i loro potenziali effetti negativi

In Italia la popolazione è cresciuta notevolmente, nei secoli, con un fenomeno di urbanizzazione che ha modificato gli equilibri ecosistemici. La crescita demografica complessiva dal 1861, momento dell'unificazione nazionale, al 2020 è più che raddoppiata, aumentando da 26 a circa 60 milioni di abitanti. L'ambiente naturale ha iniziato a subire una lenta ma irreversibile trasformazione: sono aumentate le aree urbane con progressivo sfruttamento del suolo e trasformazione morfologica del territorio, sono stati modificati gli assetti morfologici dei corpi idrici con uno sconvolgimento anche dell'equilibrio tra le acque superficiali e sotterranee, inoltre la progressiva artificializzazione del territorio ha modificato le caratteristiche della rete di drenaggio naturale.



Questa situazione ha portato inevitabilmente a rendere il territorio più fragile esponendolo maggiormente ai fenomeni calamitosi ed amplificando gli effetti al suolo degli eventi meteorici intensi, sia di breve che di lunga durata indotti dalle modificazioni che il clima sta subendo a grande scala.

L'epoca geologica attuale è definita "Antropocene" (dal greco "uomo"), termine coniato nel 2000 dal chimico olandese premio Nobel Paul Crutzen e con essa si indica l'era dell'uomo. Tale epoca è caratterizzata dall'azione dell'uomo che ha fortemente modificato le caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche dell'ambiente terrestre, influenzando su scala locale e globale. Tenendo conto dei cambiamenti climatici, dell'erosione del suolo, del riscaldamento degli oceani o ancora dell'estinzione di numerose specie, il "peso" delle attività antropiche sembra evidente. La definizione della nuova epoca geologica, ancora non ufficiale, è stata ampiamente dimostrata da diversi studiosi a partire da un gruppo di

scienziati riunitisi a Città del Capo per il Congresso Internazionale di Geologia. Il suo inizio è datato intorno al 1950 ed i geologi stanno tentando di avere anche una conferma dalle rocce: se per esempio nei ghiacci, nel sottosuolo o nei coralli verranno trovate tracce di plastica, cemento, alluminio o la presenza di radioattività dispersa durante i vari test nucleari, la prova dell'impatto umano sarebbe evidente e incontrovertibile. Gli studiosi prevedono che in futuro, a meno che una catastrofe naturale non interrompa il dominio dell'uomo, gli impatti sull'ambiente circostante continueranno a farsi sentire.

Le conseguenze degli sconvolgimenti climatici, dei progetti di urbanizzazione, della sottrazione delle risorse naturali hanno una diretta incidenza su grande scala sulle condizioni dell'intero pianeta e in piccola scala sulle comunità che risultano maggiormente esposte ai fenomeni estremi e violenti. Le figure successive, elaborate dal Centro Euro-mediterraneo sui cambiamenti climatici, mostrano gli effetti del riscaldamento globale e le proiezioni future.



Figura 1-4. Infografiche del Centro Euro-mediterraneo sui Cambiamenti Climatici

1.2 La ripartizione delle competenze di protezione civile, fra Stato ed enti territoriali

In Italia la protezione civile non è un compito assegnato a una singola Amministrazione ma è una funzione attribuita a un sistema complesso. Questo sistema è il Servizio nazionale della Protezione Civile, coordinato dal Dipartimento della Protezione Civile facente capo alla Presidenza del Consiglio dei Ministri.

L'attuale assetto del sistema italiano di protezione civile è normato dal Decreto Legislativo 2 gennaio 2018 n. 1 "Codice della protezione civile". Dalla carta costituzionale si evidenzia che il sistema di protezione civile è improntato alla "sussidiarietà verticale", cioè al principio per cui l'intervento ad un livello superiore è possibile soltanto laddove il livello inferiore non riesca a curare gli interessi affidati. Ad esso partecipano, infatti, tanto le amministrazioni dello Stato, quanto le regioni, le città metropolitane, le province e i comuni (art. 11 e 12 D.Lgs n. 1 del 2/01/2018). Gli enti territoriali hanno un ruolo centrale anche nella fase di risposta agli eventi calamitosi. Tale ruolo è definito in base alla combinazione tra l'intensità ed estensione dell'evento e la capacità di reazione che l'ente presenta nei confronti di quest'ultimo. Secondo l'art. 7 del suddetto decreto si distinguono tre diverse tipologie di evento emergenziale di protezione civile:

- a) emergenze connesse con eventi calamitosi di origine naturale o derivanti dall'attività dell'uomo che possono essere fronteggiati mediante interventi attuabili, dai singoli enti e amministrazioni competenti in via ordinaria. L'ente principalmente responsabile per la risposta a tali accadimenti è il comune;
- b) emergenze connesse con eventi calamitosi di origine naturale o derivanti dall'attività dell'uomo che per loro natura o estensione comportano l'intervento coordinato di più enti o amministrazioni, e debbono essere fronteggiati con mezzi e poteri straordinari da impiegare durante limitati e predefiniti periodi di tempo, disciplinati dalle Regioni e dalle Province autonome di Trento e di Bolzano nell'esercizio della rispettiva potestà legislativa;
- c) emergenze di rilievo nazionale connesse con eventi calamitosi di origine naturale o derivanti dall'attività dell'uomo che in ragione della loro intensità o estensione debbono, con immediatezza d'intervento, essere fronteggiate con mezzi e poteri straordinari da impiegare durante limitati e predefiniti periodi di tempo ai sensi dell'articolo 24.

Il sistema della protezione civile italiana è caratterizzato non soltanto dalla ripartizione delle competenze, ma anche dalla divisione dei compiti operativi. Sono molteplici, infatti, gli enti coinvolti nelle attività materiali della protezione civile e rientrano nelle strutture operative del Servizio Nazionale.

1.2.1 Attività di protezione civile

Secondo l'art. 2 del D.lgs 1/2018 sono attività di Protezione Civile (PC) quelle volte alla previsione, prevenzione e mitigazione dei rischi, alla gestione delle emergenze e al loro superamento. Come previsione si intende l'insieme delle attività, svolte anche con il concorso della comunità scientifica, tecnica ed amministrativa, dirette all'identificazione e allo studio, anche dinamico, degli scenari di rischio possibili, per le esigenze di allertamento del Servizio nazionale, ove possibile, e di pianificazione di PC. Prevenzione e mitigazione dei rischi si riferisce all'insieme delle attività di natura strutturale e non strutturale, svolte anche in forma integrata, dirette a evitare o a ridurre la possibilità che si verifichino danni conseguenti a eventi calamitosi anche sulla base delle conoscenze acquisite per effetto delle attività di previsione. La gestione dell'emergenza consiste nell'insieme, integrato e coordinato, delle misure e degli interventi diretti ad assicurare il soccorso e l'assistenza alle popolazioni colpite dagli eventi calamitosi e agli animali e la riduzione del relativo impatto, anche mediante la realizzazione di interventi indifferibili e urgenti ed il ricorso a procedure semplificate, e la relativa attività di informazione alla popolazione. Con il superamento dell'emergenza ci si riferisce all'attuazione coordinata delle misure volte a rimuovere gli ostacoli alla ripresa delle normali condizioni di vita e di lavoro, per ripristinare i servizi essenziali e per ridurre il rischio residuo nelle aree colpite dagli eventi calamitosi, oltre che alla ricognizione dei fabbisogni per il ripristino delle strutture e delle infrastrutture pubbliche e private danneggiate, nonché dei danni subiti dalle attività economiche e produttive, dai beni culturali e dal patrimonio edilizio e all'avvio delle prime misure.

Negli Stati Uniti la gestione dell'emergenza da decenni è schematizzata secondo i seguenti 4 processi: mitigazione; preparazione; risposta e soccorso. Come mostra la figura successiva, le quattro fasi sono spesso descritte come parte continua di un processo. Nel corso degli anni questa rappresentazione è stata rivista e modificata da diversi Enti e Stati.



Figura 1-5. Le 4 fasi della gestione dell'emergenza (NEHRP 2009)

2 La vulnerabilità in letteratura

Prima di fornire una misura quantitativa della vulnerabilità è fondamentale comprenderne il significato. Ad oggi non esiste una definizione univoca e condivisa del termine vulnerabilità. In generale si può dire che la parola vulnerabile (dal latino vulnerabilis, der. di vulnerare “ferire”) si riferisce a ciò che può essere attaccato, danneggiato o ferito. Il concetto di vulnerabilità dipende fortemente dal punto di vista di analisi, dal settore e dagli scopi specifici di studio. Quindi studiosi in diversi ambiti di ricerca definiscono e quantificano la vulnerabilità con diversi approcci relazionati ai loro scopi e obiettivi di ricerca.

La valutazione della vulnerabilità risulta fortemente connessa con la scala spaziale di riferimento, non solo nell'applicazione tecnica ma anche nella stessa concettualizzazione (Fekete *et al.*[24]). Infatti la vulnerabilità rapportata a specifiche unità di analisi spaziali, quali il livello comunale, influenza la selezione di determinate variabili territoriali (Cutter *et al.*[25]). Così come l'analisi estesa su grande scala, sia spaziale che temporale, richiede un approccio di analisi di tipo olistico, in quanto entrano in gioco diversi fattori (Kasperson *et al.*[26]).

Un primo punto di vista della vulnerabilità nella gestione del rischio è legato alla resistenza fisica delle strutture ingegneristiche (Lonetti and Maletta[27],UNDHA[28]). Nell'ambito dell'ingegneria strutturale per esempio il concetto di vulnerabilità è utilizzato su scala puntuale, riferito cioè ad una particolare struttura (ponte, edificio, ecc.), nonché ad una specifica tipologia di rischio, quale il sisma, frana, ecc. In tale contesto la stima della vulnerabilità di un elemento esposto, data una certa tipologia di fenomeno, avviene attraverso la misura della propensione al danno dell'elemento.

Studi recenti analizzano invece le caratteristiche sociali e ambientali della vulnerabilità. Nell'ambito delle scienze umanistiche il concetto di vulnerabilità è utilizzato su scale spaziali ampie (comunali, regionali, ecc.) e può far riferimento contemporaneamente anche a diverse tipologie di eventi calamitosi. In tale contesto la vulnerabilità si basa sulla suscettibilità di singoli individui, famiglie o intere comunità e si pone in contrapposizione al concetto di resilienza. La ricerca nel settore sociale mira a risolvere domande del tipo: “quali sono le variabili sociali che rendono una comunità vulnerabile? perché le persone vivono in aree pericolose? quali i fattori che influenzano l'adattamento umano ai pericoli? e come la percezione del rischio influenza i comportamenti?” (White[29]).

Un altro punto di vista della vulnerabilità è connesso con le tematiche dei cambiamenti climatici, con il concetto di resilienza o capacità del sistema di reagire ad un evento ed adattarsi ai fenomeni (Schröter *et al.*[30], Boko *et al.*[31], Change[32]).

La vulnerabilità è un concetto chiave nell'ambito dei rischi naturali e antropici ma è anche utilizzato in ambiti epidemiologici, psicologici o in altre circostanze che rendono le persone più vulnerabili a fattori di stress naturali, economici o medici (Ehlers *et al.*[33], Haines *et al.*[34]).

La vulnerabilità può anche essere vista come condizione che si crea interagendo con un pericolo, per esempio la vulnerabilità alla crisi finanziaria. Il cambiamento continuo delle condizioni meteo ed ambientali induce nella società nuove forme di vulnerabilità. Per esempio eventi frequenti ed intensi possono introdurre fattori di rischio in alcune aree, generando nuove vulnerabilità.

Sebbene la vulnerabilità sia vista come fattore di un determinato rischio, alcune variabili come la povertà, la mancanza di reti sociali o reti infrastrutturali, aggraveranno o influenzeranno i livelli di vulnerabilità indipendentemente dal tipo di rischio (Marchezini *et al.*[35]). La vulnerabilità degli insediamenti umani e degli ecosistemi infatti, è intrinsecamente legata ai diversi aspetti socio culturali e ambientali (Cutter *et al.*[36], Williams *et al.*[37]). In alcuni casi la vulnerabilità è legata anche alla comunicazione, alla mancanza di informazioni adeguate che possono portare a false percezioni del rischio (Birkmann and Fernando[38],Rodrigues *et al.*[39]).

Dal punto di vista della gestione del rischio di catastrofi, lo studio della vulnerabilità presenta molti lavori scientifici. I punti chiave che vengono spesso trattati nei diversi studi sono i seguenti:

- Come l'azione umana influenza i livelli di esposizione e vulnerabilità di fronte a diversi eventi fisici;
- Come l'intervento umano nell'ambiente porta alla creazione di nuovi pericoli o ad un aumento dei livelli o del potenziale di danno di quelli esistenti;
- Come la percezione umana, l'informazione, la comprensione e la consapevolezza dei fattori di rischio influenzano le reazioni della società, la definizione delle priorità e i diversi processi decisionali.

Alla luce dei diversi approcci di analisi di riduzione del rischio presenti in letteratura, appare evidente come gli attuali studi stiano orientando le loro ricerche anche sulla maggiore conoscenza del fattore vulnerabilità. Mentre nel passato la mitigazione del rischio avveniva attraverso la determinazione della pericolosità indotta dai fenomeni naturali e la determinazione delle eventuali opere necessarie per la sua stessa attenuazione, oggi gli studi scientifici puntano l'attenzione anche sulla definizione e diminuzione dei livelli di vulnerabilità. A tal fine appare essenziale comprendere quali sono le variabili che rendono vulnerabile una area o una comunità e quali i fattori che ne amplificano l'effetto. Essa è sicuramente rapportata in molti studi al patrimonio storico, culturale, sociale del territorio, nonché al contesto ambientale politico ed economico. In tal senso una comunità non è a rischio solo perché è esposta a un pericolo ma come risultato dell'interazione sociale, dell'organizzazione logistica, dell'accesso alle risorse, ecc. (Bankoff[40]). Quindi le comunità o sistemi insediativi non sono solo le vittime di un evento ma potrebbero essere causa stessa della vulnerabilità.

In considerazione dei diversi approcci metodologici sopra citati, di seguito si forniscono maggiori dettagli su studi mirati alla conoscenza della vulnerabilità nei diversi settori ed alle cause che la generano. In particolare vengono trattati i seguenti aspetti:

- La vulnerabilità nei rischi naturali, tenendo conto anche di analisi di tipo olistico;
- La vulnerabilità nel contesto dei cambiamenti climatici;

- La vulnerabilità sociale legata al sistema accoppiato uomo-ambiente;
- La vulnerabilità nelle infrastrutture stradali. Quest'ultima assume molta importanza nell'accessibilità delle risorse infrastrutturali, durante un evento nella fase di gestione dell'emergenza.

2.1 La vulnerabilità nei rischi naturali

Lo sforzo nel cercare di fornire una definizione nonché una misura della vulnerabilità è mirato spesso ad una efficace riduzione dei rischi naturali ed allo studio ed alla promozione di una cultura di resilienza verso le catastrofi. Nello stesso tempo la difficoltà che emerge nella definizione della vulnerabilità spesso è legata al fatto che entrano in gioco diversi fattori di difficile parametrizzazione legati all'organizzazione sociale dell'area in esame (Presidenza del Consiglio dei Ministri[41]).

In tale ambito di ricerca Birkmann[42] rileva che in letteratura sono presenti oltre 25 differenti definizioni e metodi di valutazione della vulnerabilità. L'autore in particolare distingue 6 differenti approcci concettuali ed analitici nella valutazione della vulnerabilità:

1. La scuola della doppia struttura della vulnerabilità -Bohle[43];
2. Il concetto del rischio di catastrofi della comunità -Davidson[44]; Bollin *et al.*[45];
3. L'approccio analitico riferito ai cambiamenti climatici -Turner *et al.*[46];
4. La scuola dell'economia politica -Wisner *et al.*[47];
5. L'approccio olistico -Cardona[48], Tibaduiza *et al.*[49], Cardona and Hurtado[50], Carreño *et al.*[51], Cardona[52];
6. L'approccio concettuale BBC (basato sul lavoro di Bogardi and Birkmann[53], Cardona[54], Cardona[48]).

La scuola della "doppia struttura della vulnerabilità" considera l'aspetto esterno ed interno della vulnerabilità (Figura 2-1). Il lato interno si riferisce alla capacità di prevenzione, reazione e recupero a seguito di un evento pericoloso. Al contrario il lato esterno fa riferimento all'esposizione ed ai fattori di pericolo.

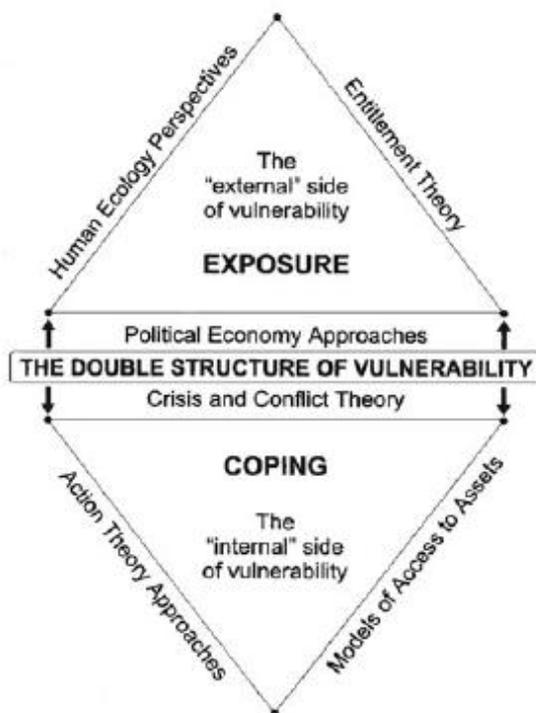


Figura 2-1. Framework concettuale per la valutazione della vulnerabilità di Bohle (Fonte: Bohle 2001)

La seconda scuola di pensiero definisce la vulnerabilità come una componente del rischio, separata dai concetti di esposizione e capacità di reazione. In tale ambito si riscontrano tre approcci:

- Per Davidson (1997) il concetto del rischio è definito da quattro componenti: pericolosità, esposizione, vulnerabilità e capacità di reazione (Figura 2-2). La vulnerabilità assume una dimensione fisica, sociale, economica ed ambientale.
- Villagràn de Leòn (2004) riprende il “triangolo del rischio” sviluppato da Crichton (1999) e definisce la vulnerabilità come la condizione preesistente che rende le infrastrutture, i processi, i servizi e la produttività più inclini ad essere colpiti da un pericolo esterno (Figura 2-3).
- L’UN/ISDR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction) (2004) considera la vulnerabilità come un fattore determinante del rischio. Essa può essere classificata attraverso la componente sociale, economica, fisica e ambientale (Figura 2-4).



Figura 2-2. Framework concettuale per la valutazione del rischio (Fonte: Davidson, 1997; Bollin et al., 2003)



Figura 2-3. Rischio espresso attraverso la vulnerabilità, la pericolosità e la carenza nella preparazione (Fonte: Villagrán de León, 2001/2004)

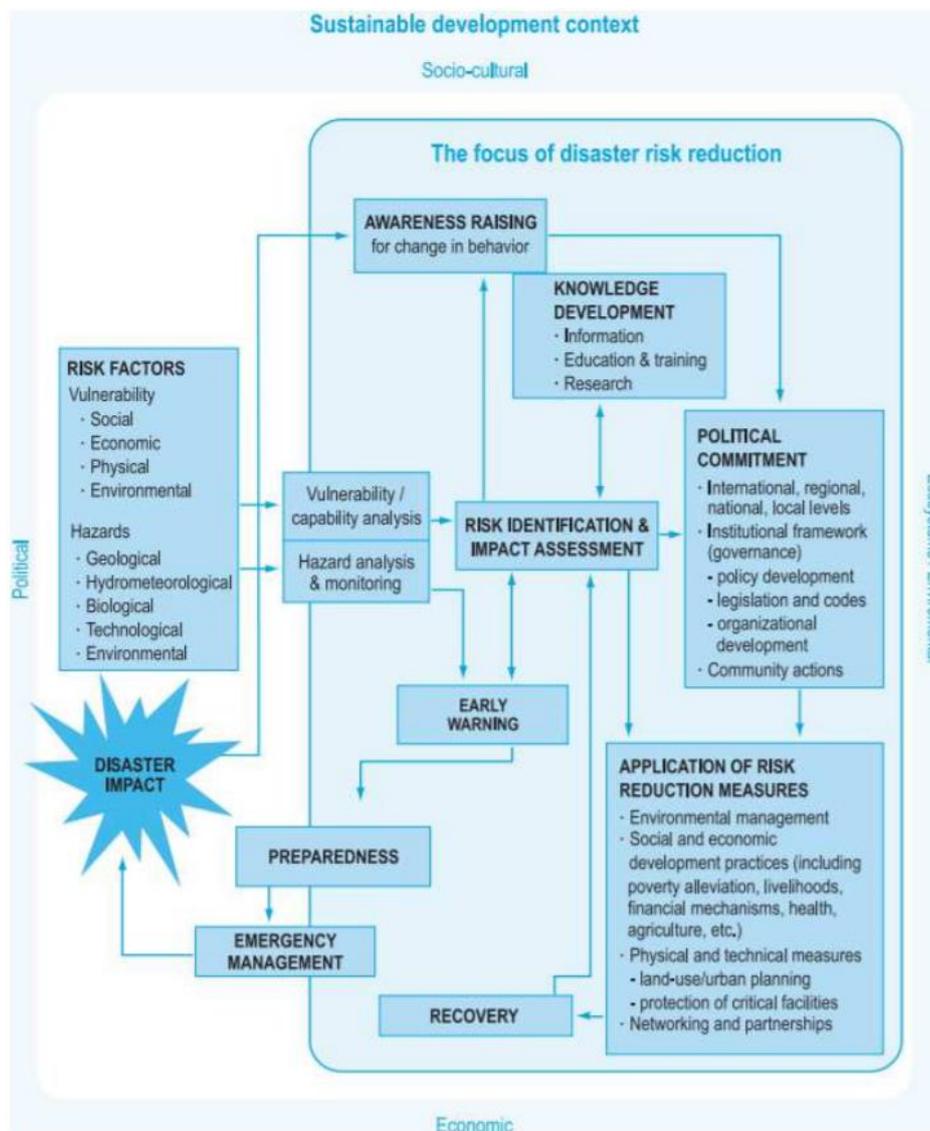


Figura 2-4. Rischio espresso attraverso la vulnerabilità, la pericolosità e la carenza nella preparazione (Fonte: UN/ISDR, 2004)

Nell'ambito dei cambiamenti ambientali, Turner et al., (2003) considerano la vulnerabilità funzione della capacità di reazione, dell'esposizione, della risposta di adattamento di un sistema ad un evento pericoloso. Inoltre la vulnerabilità è vista nel contesto accoppiato uomo-ambiente ed il concetto di adattamento è visto come un elemento che aumenta la resilienza (Figura 2-5). A riguardo nel paragrafo successivo vengono forniti ulteriori dettagli.

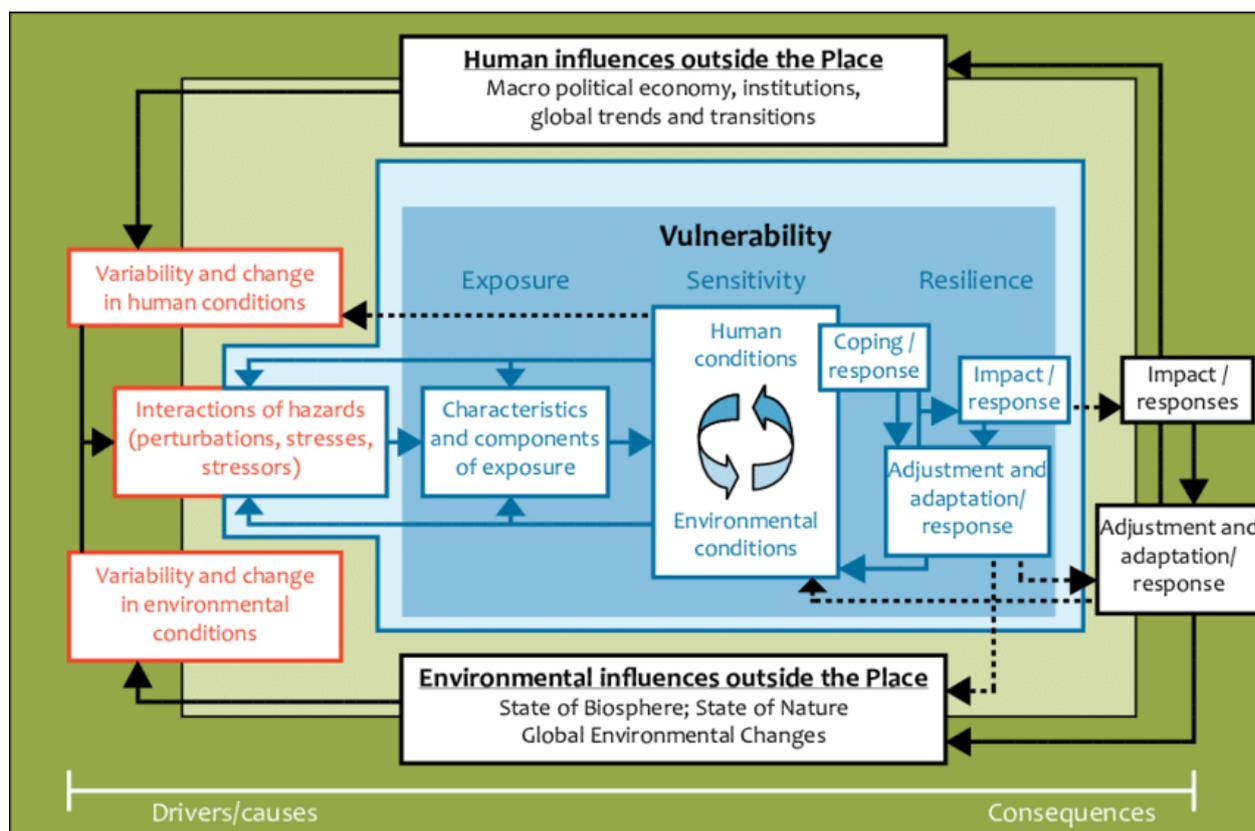


Figura 2-5. Schema concettuale della vulnerabilità (Fonte: Turner et al., 2003)

Nell'ambito dell'economia politica il modello PAR (Pressure and Release model) vede il rischio come l'interazione di due grandi forze: processi che generano vulnerabilità e gli eventi naturali (Wisner et al., 2004). L'approccio PAR evidenzia come il disastro si verifica quando la pericolosità naturale colpisce le persone vulnerabili. La vulnerabilità è definita come un processo che coinvolge tre livelli progressivi: cause primarie, pressioni dinamiche e condizioni insicure (Figura 2-6). In tale schema i livelli sono dinamici in quanto soggetti a costante cambiamento. Il modello PAR è uno dei più noti, esso pone grande enfasi sul concetto che la riduzione della vulnerabilità e del rischio comporta cambiamenti politici ed economici, in quanto esse sono viste come cause primarie (come l'esempio della variazione demografica e del fenomeno di urbanizzazione).

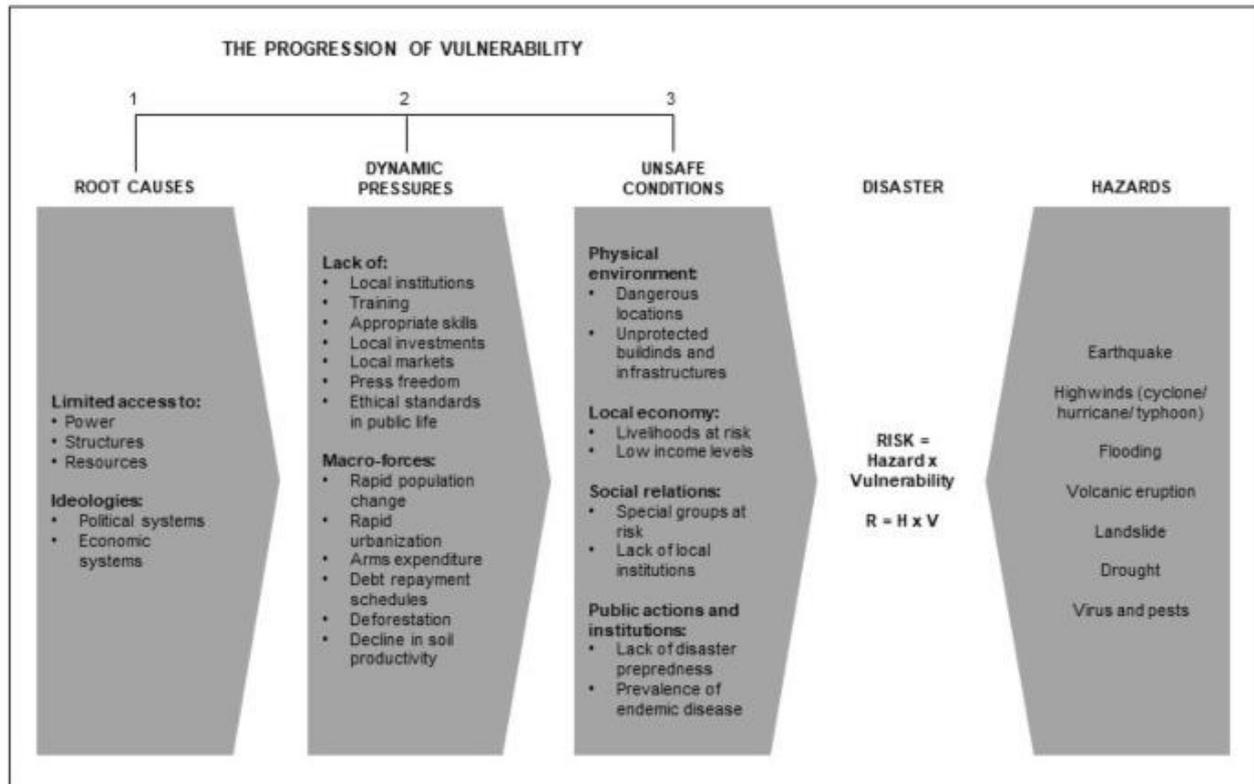


Figura 2-6. Schema concettuale del modello PAR (Fonte: Wisner et al., 2004)

Nell'approccio olistico la vulnerabilità è valutata in modo globale e multidisciplinare. La vulnerabilità è caratterizzata da diversi fattori suddivisi in tre categorie: esposizione fisica e suscettibilità, fragilità del sistema socio-economico e resilienza. Queste tre categorie di fattori determinano gli impatti diretti, indiretti e immateriali di un evento pericoloso.

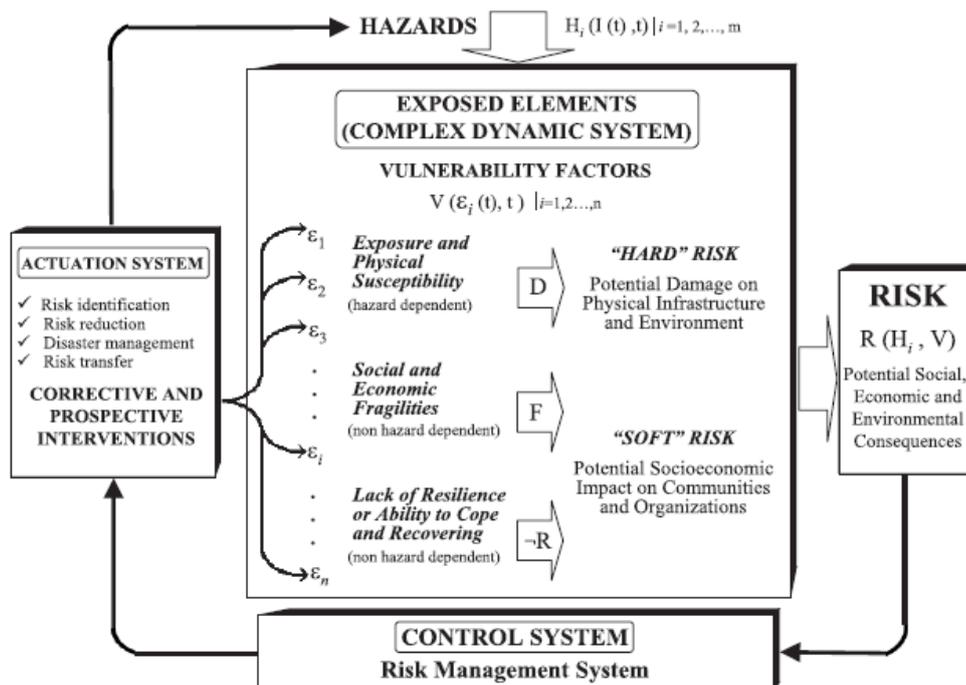


Figura 2-7. Schema concettuale dell'approccio olistico (Fonte: Cardona and Barbat, 2000)

L'ultimo approccio si riferisce allo schema concettuale BBC, che combina diversi elementi analizzati in precedenza (Figura 2-8). Esso è orientato allo studio socioeconomico e collega il concetto di vulnerabilità a quello di sviluppo sostenibile. Esso inquadra la vulnerabilità all'interno di un processo dinamico, evidenziando la necessità di concentrarsi su elementi esposti e sensibili e sulle capacità di reazione. In questo scenario la vulnerabilità coinvolge la sfera sociale, ambientale ed economica.

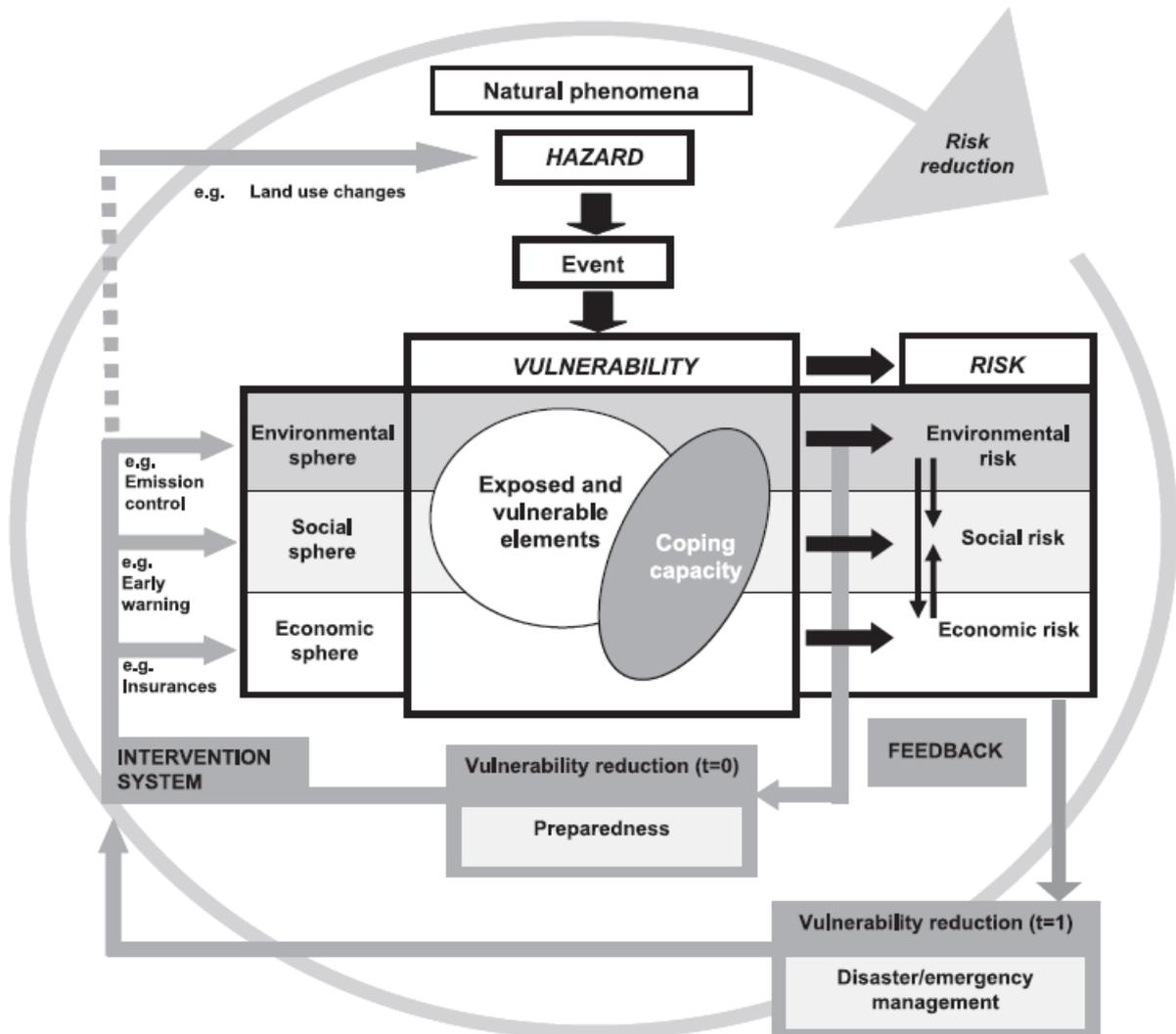


Figura 2-8. Schema concettuale BBC (Fonte: Bogardi/Birkmann (2004) and Cardona (1999/2001))

I diversi modelli interpretativi presenti in letteratura, mostrano da una parte interessanti approcci di studio, dall'altra mettono anche in luce la mancanza di una precisa ed univoca definizione del concetto di vulnerabilità nonché della stessa concettualizzazione della teoria del rischio.

2.2 La vulnerabilità nei cambiamenti climatici

Inizialmente lo studio dei cambiamenti climatici era considerato un ambito di interesse proprio della climatologia, scienza che studia il funzionamento del sistema clima. Successivamente, con la Conferenza delle Nazioni Unite su Ambiente e Sviluppo, tenutasi a Rio de Janeiro nel 1992, la questione assunse una grande rilevanza a livello internazionale. Infatti dal punto di vista scientifico si costituì un gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change), con il compito di studiare il fenomeno secondo differenti indirizzi di ricerca. Dal punto di vista politico ci fu l'istituzione della United Nation Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), un trattato internazionale nell'ambito del quale, attraverso le annuali CONference of the Parties (COP), tutti gli Stati sottoscrittori, si impegnano a definire accordi internazionali per la stabilizzazione nell'atmosfera della concentrazione di gas serra (GHG - GreenHouse Gas) provenienti da fonti antropiche e per la ripartizione dei fondi destinati alle misure per adattarsi ai cambiamenti climatici. Nell'ultimo trentennio di ricerche, con il riconoscimento dei molteplici impatti diretti ed indiretti che i mutamenti climatici hanno generato sui sistemi umani e sulle risorse che ne determinano la sopravvivenza, la lotta ai cambiamenti climatici si è tramutata da questione prettamente ambientale a questione di interesse anche economico, sociale e politico.

A livello internazionale l'IPCC definisce la vulnerabilità di un sistema come il "grado in cui un sistema è suscettibile, o incapace di far fronte, agli effetti avversi del cambiamento climatico, inclusi la variabilità climatica e gli estremi. La vulnerabilità è funzione del carattere, dell'ampiezza e della velocità del cambiamento climatico e della variazione a cui un sistema è esposto, della sua sensibilità e della sua capacità di adattamento" (Intergovernmental Panel on Climate[55]). La Figura 2-9 fornisce uno schema concettuale del rischio che interagisce con la vulnerabilità, l'esposizione e la pericolosità.

Secondo la precedente definizione, **la vulnerabilità è strettamente connessa con tre dimensioni: esposizione; sensibilità e capacità d'adattamento** o resilienza (Adger[56]). Questi concetti sono stati sviluppati in diversi progetti sia su scala europea che globale (PROVIA[57]). Un indice molto utilizzato in letteratura è l'Indice Comunale di vulnerabilità (MVI, Municipal Vulnerability Index) in cui vengono analizzate le caratteristiche socio-ambientali dei comuni nei diversi scenari di cambiamento climatico, al fine di identificare quelli che potrebbero essere più colpiti dai cambiamenti climatici (Borja-Vega and Fuente[58, Menezes *et al.*[59]).

Nell'analisi dell'indice di vulnerabilità spesso rientrano degli indici degli estremi climatici definiti dall'ETCCDI un gruppo di esperti sui cambiamenti climatici (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) del "CCL/CLIVAR Working Group on Climate Change Detection". L' ETCCDI ha definito infatti un insieme di 27 indici, idonei a descrivere gli estremi di temperatura (Tabella 2-1) e precipitazione (Tabella 2-2) in termini di frequenza, intensità e durata.

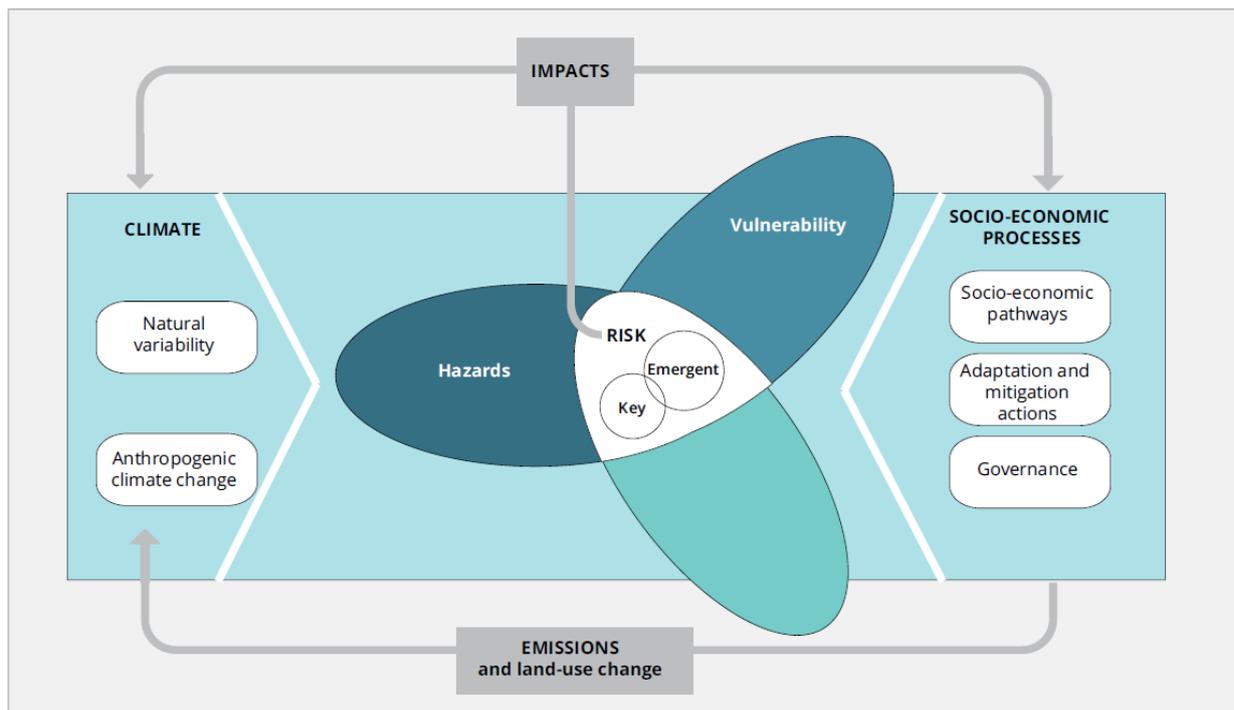


Figura 2-9. Schema sinottico del rischio legato ai cambiamenti climatici (IPCC, 2014)

INDICI DI TEMPERATURA			
ID	Nome dell'indice	Definizione	Unità di misura
FD0	Giorni con gelo	Numero di giorni nell'anno con temperatura minima < 0 °C	Giorni
SU25	Giorni estivi	Numero di giorni nell'anno con temperatura massima > 25 °C	Giorni
IDO	Giorni senza disgelo	Numero di giorni nell'anno con temperatura massima < 0 °C	Giorni
TR20	Notti tropicali	Numero di giorni nell'anno con temperatura minima > 20 °C	Giorni
GSL	Durata della stagione vegetativa	Numero di giorni nell'anno (dal 1 Gennaio al 31 Dicembre nell'emisfero Nord, dal 1 Luglio al 30 Giugno nell'emisfero Sud) compresi fra il primo periodo di almeno 6 giorni con temperatura media > 5 °C e il primo periodo di almeno 6 giorni dopo il 1 Luglio (1 Gennaio nell'emisfero Sud) con temperatura media < 5 °C	Giorni
TXx	Massimo delle temperature massime	Valore massimo mensile delle temperature massime giornaliere	°C
TNx	Massimo delle temperature minime	Valore massimo mensile delle temperature minime giornaliere	°C
TXn	Minimo delle temperature massime	Valore minimo mensile delle temperature massime giornaliere	°C
TNn	Minimo delle temperature minime	Valore minimo mensile delle temperature minime giornaliere	°C
TN10p	Notti fredde	Percentuale di giorni in cui la temperatura minima giornaliera è inferiore al 10° percentile	%
TX10p	Giorni freddi	Percentuale di giorni in cui la temperatura massima giornaliera è inferiore al 10° percentile	%
TN90p	Notti calde	Percentuale di giorni in cui la temperatura minima giornaliera è superiore al 90° percentile	%
TX90p	Giorni caldi	Percentuale di giorni in cui la temperatura massima giornaliera è superiore al 90° percentile	%
WSDI	Indice di durata dei periodi di caldo	Numero di giorni nell'anno in cui la temperatura massima è superiore al 90° percentile per almeno 6 giorni consecutivi	Giorni

INDICI DI TEMPERATURA			
CSDI	Indice di durata dei periodi di freddo	Numero di giorni nell'anno in cui la temperatura minima è inferiore al 10° percentile per almeno 6 giorni consecutivi	Giorni
DTR	Escursione termica giornaliera	Differenza media mensile fra temperatura massima e temperatura minima giornaliera	°C

Tabella 2-1. Indici estremi di temperatura definiti dall'ETCCDI

INDICI DI PRECIPITAZIONE			
ID	Nome dell'indice	Definizione	Unità di misura
RX1day	Massima precipitazione in 1-giorno	Valore massimo mensile di precipitazione in 1 giorno	mm
Rx5day	Massima precipitazione in 5-giorni	Valore massimo mensile di precipitazione in 5 giorni consecutivi	mm
SDII	Intensità di pioggia giornaliera	Totale annuale di precipitazione diviso per il numero di giorni piovosi nell'anno (definiti come giorni con precipitazione ≥ 1 mm)	mm/giorno
R10	Numero di giorni con precipitazione intensa	Numero di giorni nell'anno con precipitazione ≥ 10 mm	Giorni
R20	Numero di giorni con precipitazione molto intensa	Numero di giorni nell'anno con precipitazione ≥ 20 mm	Giorni
Rnn	Numero di giorni con precipitazione superiore a nn mm	Numero di giorni nell'anno con precipitazione $\geq nn$ mm, dove nn è definito dall'operatore	Giorni
CDD	Giorni consecutivi senza pioggia	Numero massimo di giorni consecutivi con precipitazione giornaliera < 1 mm	Giorni
CWD	Giorni piovosi consecutivi	Numero massimo di giorni consecutivi con precipitazione giornaliera ≥ 1 mm	Giorni
R95p	Precipitazione nei giorni molto piovosi	Somma nell'anno delle precipitazioni giornaliere superiori al 95° percentile	mm
R99p	Precipitazione nei giorni estremamente piovosi	Somma nell'anno delle precipitazioni giornaliere superiori al 99° percentile	mm
PRCPTOT	Totale annuale di precipitazione	Totale annuale di precipitazione nei giorni piovosi (con precipitazione ≥ 1 mm)	mm

Tabella 2-2. Indici estremi di precipitazione definiti dall'ETCCDI

Con riferimento all'approccio di calcolo della vulnerabilità in letteratura, si fa riferimento a due principali metodologie: top-down o bottom-up (Dessai and Hulme[60]). L'approccio dall'alto verso il basso inizia con un'analisi del cambiamento climatico e i suoi impatti, mentre l'approccio dal basso verso l'alto inizia con un'analisi delle persone colpite dal cambiamento climatico (van Aalst, et al., 2008)(Aalst et al.[61]). Questa distinzione riappare nella letteratura scientifica ed è anche etichettato come "punto finale" contro "punto di partenza" (Kelly & Adger, 2000) , "biofisico" contro la vulnerabilità "sociale" (Brooks, 2003), o "risultato" contro vulnerabilità "contesto" (O'Brien et al.[62]). La scelta metodologica influenza anche la scelta delle variabili da utilizzare e la scala spaziale di analisi. Gli approcci dall'alto verso il basso sono generalmente preferiti a livello globale e nazionale, mentre gli approcci dal basso verso l'alto trovano applicazione a livello locale (ad esempio famiglie, villaggi, comunità).

2.3 La vulnerabilità sociale, sistema uomo-ambiente

La ricerca scientifica dimostra che la vulnerabilità non può riferirsi solo all'esposizione dei rischi ma risiede anche nella sensibilità, nella resilienza del sistema che fa esperienza dei pericoli. Questa consapevolezza porta a studiare la vulnerabilità in funzione della coppia uomo-ambiente (Turner *et al.*[46]).

La Figura 2-10 mostra un esempio di un modello di adeguamento umano ai rischi naturali "Human Adjustment". Esso definisce il pericolo come l'intersezione dei sistemi di eventi naturali e attività umane, governati entrambi da un processo di adattamento umano. Questa interazione di sistemi produce effetti pericolosi, come impatti sulle persone, sui loro beni, sull'attività economica e sui sistemi sociali Burton *et al.*[63].

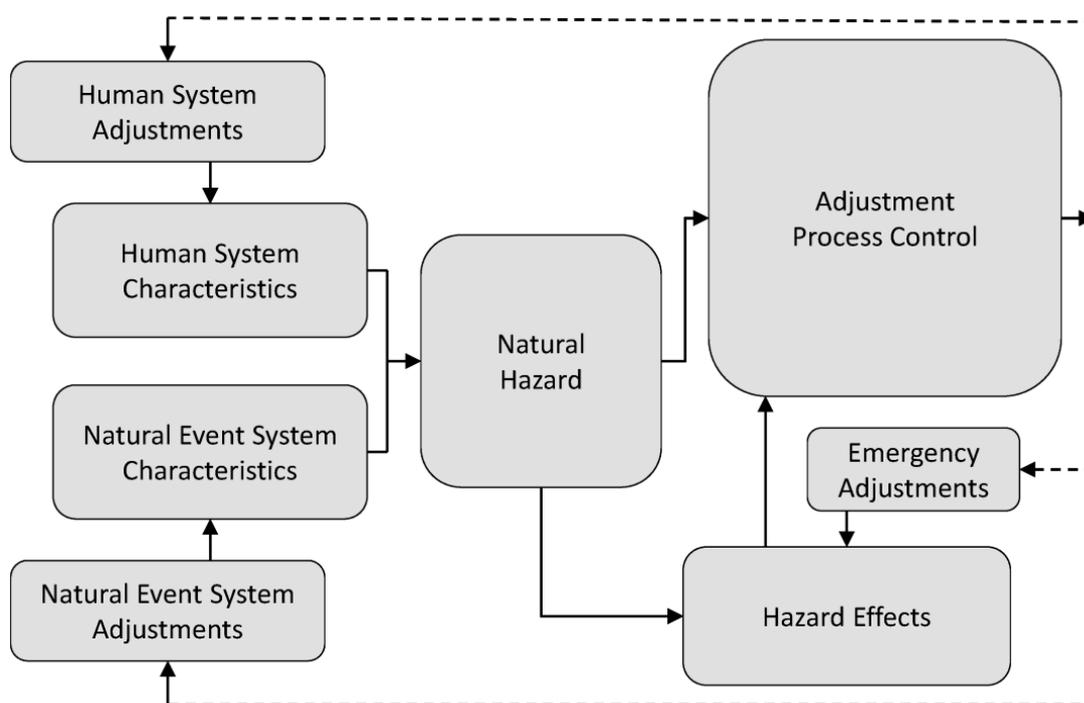


Figura 2-10. Schema del modello "Human Adjustment" ai rischi naturali (modello adattato da Kates 1971)

Il sistema degli eventi naturali è descritto dalla grandezza, frequenza, durata, estensione areale degli eventi geologici, idrologici, meteorologici e biologici. Al contrario, il sistema umano è definito dalla presenza delle persone, delle attività umane, degli elementi materiali e del processo decisionale che va dalla scala domestica a quella nazionale. Un rischio naturale si verifica quando questi sistemi entrano in collisione e creano minacce dirette e indirette alle persone e alle cose a cui danno valore. Tali impatti subiscono l'influenza umana in base a quelli che sono i vincoli ambientali, economici, tecnologici e sociali. Gli aggiustamenti (*adjustments*) nella fase di emergenza includono le operazioni di soccorso, mentre gli adeguamenti (*adaptation*) a lungo termine alterano in modo più incisivo i sistemi naturali e umani. Esempi di adeguamenti ai sistemi naturali includono strutture di controllo delle inondazioni, stoccaggio di serbatoi per la siccità e diradamento delle foreste per ridurre il rischio di incendi. Gli adeguamenti quindi del sistema umano tengono conto degli sforzi di riduzione delle perdite (White[64], Burton *et al.*[65]). L'insieme degli *adjustments* implementati a diverse scale determina la gravità dei rischi naturali.

In tale ottica, gli studiosi criticano il classico approccio di valutazione del rischio, in quanto non tengono conto del contesto sociale in cui si verificano i pericoli né del fatto che spesso le persone amplificano o attenuano gli impatti di un evento stesso (Turner *et al.*[46]).

Una idea analoga a quella maturata nel modello degli adeguamenti umani è quello sviluppato nel modello di pericolo del luogo, *Hazard of Place-HOP* (Cutter[66]). Il modello HOP combina la vulnerabilità dei sistemi biofisici e sociali e ne esamina la variazione nel tempo, ponendo al centro dell'analisi il luogo geografico dove l'evento si verifica, che diviene l'unità fondamentale di analisi (Figura 2-11). Il rischio di un evento si combina con la mitigazione per creare il potenziale totale del disastro. Nel modello HOP infatti, il rischio e la mitigazione del pericolo interagiscono per determinare la potenziale pericolosità iniziale di un luogo. Il rischio può essere quindi attenuato da una buona politica di mitigazione, oppure al contrario amplificato da processi di mitigazione inesistenti o non adeguati. Questo disastro potenziale è filtrato sia attraverso la società, determinando la vulnerabilità sociale totale, sia tramite il contesto geografico, determinando la vulnerabilità biofisica. Il luogo (*place*) nel modello si riferisce non ad una scala spaziale particolare ma piuttosto alla comunità.

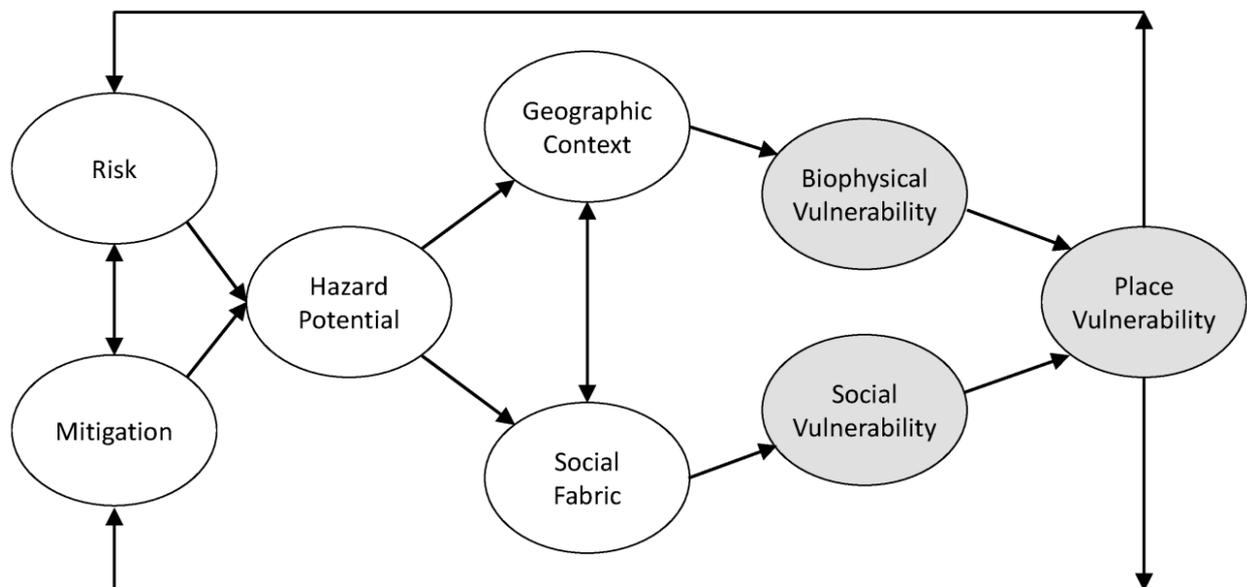


Figura 2-11. Schema del modello HOP (adattato da Cutter 1996)

Una delle prime implementazioni del modello HOP è stato un caso di studio della contea di Georgetown, South Carolina che ha mappato gli indicatori delle caratteristiche di rischio sociale e naturale (Cutter *et al.*[67]). I ricercatori hanno sviluppato un indice di vulnerabilità sociale a livello di sub-contea utilizzando i dati demografici del censimento. Poi hanno creato una mappa della vulnerabilità biofisica dalle frequenze degli eventi storici. Le mappe sociali e biofisiche sono state combinate e i valori sommati per produrre una mappa composita che rappresenta la vulnerabilità complessiva del luogo. Questo approccio di analisi è stato utilizzato in numerosi studi sulla vulnerabilità integrata (Koks *et al.*[68]). Un modello attualmente molto usato che si basa sull' HOP è quello riferito all'indice di vulnerabilità sociale SOVI (*Social Vulnerability Index*), sviluppato qualche anno dopo (Cutter *et al.*[25]).

2.3.1 Indicatori di vulnerabilità sociale

Gli indici sono delle variabili quantitative e possono essere composti da una singola variabile o da una combinazione di esse. Attualmente sono il metodo più adottato dai ricercatori poiché risultano utili per valutare e monitorare la vulnerabilità sociale nel tempo e nello spazio. Lo sviluppo di un indice richiede la scelta dell'unità areale di riferimento e delle variabili che si adattano meglio al tipo di analisi ed alla zona geografica in esame, in base anche alla disponibilità dei dati.

Di seguito si fornisce un elenco sintetico dei diversi indici usati in letteratura per la quantificazione della vulnerabilità sociale. La rappresentazione tematica si concentra sugli indici riferiti alla vita sociale, all'interazione con l'ambiente e con il clima, nonché ai principali scenari di rischio Schumann and Moura[69].

Categoria	Nome Indice	Riferimenti bibliografici
Social vulnerability	Social Vulnerability Index (SoVI)	Cutter <i>et al.</i> [70]
Social and environmental vulnerability	Socioeconomic vulnerability (SeVI) Built environment vulnerability (BEVI)	Borden <i>et al.</i> [15]
Social vulnerability with regard to flood-risk zones	Vulnerability index	Wu <i>et al.</i> [71]
Social vulnerability with regard to coastal erosion hazard	Place Vulnerability Index (PVI)	Boruff <i>et al.</i> [72]
Social vulnerability with regard to hurricane hazard and a changing climate	Coastal Community Social Vulnerability Index (CCSVI)	Bjarnadottir <i>et al.</i> [73]
Social vulnerability with regard to flood hazard	Coastal City Flood Vulnerability Index (CCFVI)	Balica <i>et al.</i> [74]
Social vulnerability with regard to climate change	Socio-Environmental Vulnerability Index for Coastal Areas (SEVICA)	Zanetti <i>et al.</i> [75]
Social vulnerability under the perspective of the environmental and health	Cumulative Environmental Vulnerability Assessment (CEVA) including a Cumulative Environmental Hazard Index (CEHI), a Social Vulnerability Index (SVI) and a Health Index (HI)	Huang and London[76]
Socio-environmental vulnerability	Environmental Vulnerability Index (EVI)	Zanella <i>et al.</i> [77]
General Vulnerability Index under the perspective of the social, environmental and health	Municipal Vulnerability Index (MVI)	Freitas and Cunha[78]
Social and Physical-Spatial Vulnerability Index to Floods	Social and Environmental Vulnerability Index (SEVI)	Almeida[79]
Social vulnerability	Heat Vulnerability Index (HVI)	Reid <i>et al.</i> [80]
Vulnerability Index under the Socioenvironmental perspective and climatic conditions	Cumulative General Vulnerability Index (GVI) including a Socioeconomic vulnerability index (SVI), a Epidemiological vulnerability index (EVI) and a Climate Vulnerability Index (CVI)	Tibúrcio and de Paula Correa[81]
Social vulnerability	Families Vulnerability Index regarding Disability and Dependency (IVF-ID)	Amendola <i>et al.</i> [82]
Social vulnerability	Family Development Index (FDI)	Barros <i>et al.</i> [83]
Social vulnerability	Youth Development Index (YDI)	Secretariat[84]

Social vulnerability	Youth Vulnerability Index (YVI)	Geraghty <i>et al.</i> [85]
Social Vulnerability Index under the flood hazard perspective	Social Vulnerability Index (SVI)	Fekete[86]
Geo-physical	Chronic Vulnerability Index (CVI)	Burg[87]
Geo-physical	Coastal Vulnerability Index (CVI)	Abdul Hamid <i>et al.</i> [88]

Tabella 2-3. Indicatori di vulnerabilità di tipo sociale

2.3.2 Tecniche di classificazione degli indici di vulnerabilità

Il calcolo di indici di tipo sociale o territoriale comporta spesso la costruzione di indici aggregati in cui vengono applicati diversi metodi e diversi approcci di classificazione dei livelli di vulnerabilità Reckien[89]. Tali indici, influenzati fortemente dalla scala spaziale scelta come base dell'analisi, possono cambiare in base alle seguenti scelte:

- Metodo di calcolo dei singoli indici;
- Assunzione di pesi per ogni singolo indice o meno;
- Metodo di classificazione e visualizzazione grafica dei livelli di importanza della vulnerabilità.

La tabella di seguito riportata elenca alcune fra le principali tecniche di calcolo e classificazione della vulnerabilità, usate in letteratura.

Approccio metodologico indice	Descrizione classi	Esempi in letteratura
Metodo delle Componenti Principali (PCA)	Deviazione standard	Cutter <i>et al.</i> [25] Borden <i>et al.</i> [15] Solangaarachchi <i>et al.</i> [90]
Analisi fattoriale	Deviazione standard	Holand <i>et al.</i> [16] Spielman <i>et al.</i> [91]
Metodo delle Componenti Principali (PCA) con pesi basati sulla varianza	Deviazione standard	Mwale <i>et al.</i> [92] Török[93] de Sherbinin and Bardy[94]
Metodo delle Componenti Principali (PCA)	Normalizzazione (intervalli uguali)	Abson <i>et al.</i> [95]
Normalizzazione dei dati	Normalizzazione (intervalli uguali)	Tran <i>et al.</i> [96]
Approccio deduttivo basato sulla normalizzazione dei dati ed approccio induttivo basato su relazioni statistiche (analisi fattoriale)		Yoon[97], Tate[98]
Approccio semi-quantitativo	Normalizzazione attraverso Funzioni fuzzy	Lissner <i>et al.</i> [99] Mullick <i>et al.</i> [100] Tran <i>et al.</i> [101]

Tabella 2-4. Tipi di classificazione delle mappe di vulnerabilità

2.4 La vulnerabilità nelle infrastrutture stradali

In tale ambito la definizione di vulnerabilità si distingue in base all'attenzione che si pone sulla funzionalità della rete stradale o sulle caratteristiche dell'infrastruttura stessa. Nella disamina sulle diverse metodologie di valutazione della vulnerabilità, analizzata da Mattsson and Jenelius[102] si

considerano due differenti filoni di ricerca: il primo fa riferimento all'analisi topologica della rete di trasporto; il secondo si basa su un'analisi della vulnerabilità sistemica delle reti di trasporto.

Husdal[103] identifica tre tipologie di vulnerabilità a cui può essere soggetta una rete stradale:

- *vulnerabilità strutturale*: si riferisce alle caratteristiche costruttive della strada, in termini, ad esempio, di larghezza, di caratteristiche geometriche e di progetto, di presenza e caratteristiche delle opere d'arte (ponti, gallerie, tombini, ecc.);
- *vulnerabilità naturale*: si riferisce alle caratteristiche del territorio attraversato dalla strada e ai livelli di pericolosità che lo caratterizzano;
- *vulnerabilità relativa al traffico o generata dal traffico*: si riferisce alle caratteristiche che descrivono il flusso di traffico e le condizioni risultanti al variare di quest'ultimo in particolari situazioni (ore di punta, particolari giorni della settimana, operazioni di manutenzione, ecc.).

Berdica[104] combina invece i due concetti di affidabilità e vulnerabilità, definendo la vulnerabilità come la suscettibilità a incidenti che possono avere come conseguenza la riduzione della funzionalità della rete, cioè la capacità della rete di assolvere ai propri compiti in un determinato periodo di tempo.

Taylor and D'Este[105] legano invece il concetto di vulnerabilità a quello di accessibilità, intesa come la possibilità di raggiungere tutte le zone da una determinata origine. Per gli autori quindi la vulnerabilità è intesa come una perdita di accessibilità di una comunità valutata attraverso la variazione del costo generalizzato del trasporto.

D'Andrea *et al.*[106] definiscono la vulnerabilità come la propensione di beni, persone o attività a subire danni o mutamenti, in seguito al verificarsi dell'evento. Gli autori, concentrandosi soprattutto sul rischio sismico, introducono i concetti di vulnerabilità diretta cioè la propensione di un singolo elemento a subire danni e la vulnerabilità indotta riferita agli effetti della crisi dell'organizzazione del territorio provocati dal collasso di uno o più elementi che lo costituiscono.

Jenelius and Mattsson[107], Jenelius *et al.*[108] legano il concetto di vulnerabilità al concetto di criticità dei diversi componenti che costituiscono la rete. Maggiore è la criticità di un elemento del sistema (arco o nodo) e maggiore è il danno causato dall'intero sistema dall'interruzione dello stesso elemento. Gli autori introducono i concetti di importanza di una griglia e di esposizione per gli utenti. Loro valutano l'importanza di un arco della rete e l'esposizione di un nodo valutando gli incrementi del costo di viaggio tra i nodi a seguito dell'interruzione di un elemento della rete:

$$Importance(k) = \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (c_{ij}^k - c_{ij}^0)}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \quad (2-1)$$

Dove k è l'arco di cui si calcola l'importanza, w_{ij} rappresenta i flussi attribuiti ai tratti stradali per poter valutare l'importanza che i singoli nodi rivestono all'interno della rete e c_{ij} rappresenta il costo di trasporto da un nodo i a un nodo j .

2.5 Il concetto di vulnerabilità utilizzato dalle istituzioni pubbliche nell'analisi dei rischi naturali e antropici.

Di seguito si riporta il concetto di vulnerabilità ed i relativi metodi di quantificazione adottati dagli enti preposti nei documenti di pianificazione territoriale regionale e sovregionale.

2.5.1 Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) e Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA)

Secondo le norme adottate nel Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) del 2001, dalla già Autorità di bacino della regione Calabria (oggi Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale) il concetto di

vulnerabilità si riferisce fondamentalmente alle definizioni qualitative del Rapporto UNESCO (Varnes J.E. and IAEG[109], ABR Autorità di Bacino Regionale[110]). Essa è considerata come la perdita di valore prodotta dal verificarsi di un evento di data pericolosità ed intensità su uno o più elementi esposti e viene valutata qualitativamente in termini di danno. La vulnerabilità quindi è relazionata al valore degli elementi esposti e calcolata come danno potenziale. Gli elementi a rischio considerati sono i seguenti riportati in ordine prioritario:

1. l'incolumità delle persone,
2. gli abitati,
3. le aree degli insediamenti produttivi, degli impianti tecnologici di rilievo,
4. le infrastrutture a rete e le vie di comunicazione strategiche,
5. il patrimonio ambientale ed i beni culturali di interesse rilevante,
6. le aree sede dei servizi pubblici e privati, di impianti sportivi e ricreativi, le strutture ricettive e le infrastrutture primarie.

L'ordine di priorità adottato ha portato alla formulazione di 4 classi di danno applicate esclusivamente nelle zone soggette a pericolosità frana e idraulica. Infine mediante operazione di *overlap* tra i due strati informativi del danno e della pericolosità, con riferimento alla classica matrice moltiplicativa è stato ricavato il valore del rischio.

Si fa presente che anche a seguito degli aggiornamenti del PAI e della successiva redazione del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA) il concetto di vulnerabilità è rimasto invariato. In particolare con riferimento ad entrambi i documenti sono state utilizzate procedure in accordo ai contenuti del D.Lgs 49/2010 ed agli "Indirizzi operativi per l'attuazione della Direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione ed alla gestione dei rischi da alluvioni con riferimento alla predisposizione delle mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni" pubblicati dal MATTM. Il rischio è espresso come prodotto della pericolosità e del danno potenziale in corrispondenza di un determinato evento.

$$R = P * E * V = P * Dp \quad (2-2)$$

dove:

- P =pericolosità: probabilità di accadimento, all'interno di una certa area e in un certo intervallo di tempo t, di un fenomeno naturale di assegnata intensità (probabilità che l'evento si verifichi almeno una volta in t anni);
- E =elementi esposti: persone e/o beni (abitazioni, strutture, infrastrutture, ecc.) e/o attività (economiche, sociali, ecc.) esposte ad un evento naturale;
- V=vulnerabilità: grado di capacità (o incapacità) di un sistema/elemento a resistere all'evento naturale;
- Dp=danno potenziale: perdita prevedibile a seguito di un fenomeno naturale di data intensità, funzione sia del valore che della vulnerabilità dell'elemento esposto;
- R=rischio: numero atteso di vittime, persone ferite, danni a proprietà, beni culturali e ambientali, distruzione o interruzione di attività economiche, in conseguenza di un fenomeno naturale di assegnata intensità (valore medio del danno in t anni).

Si evidenzia che, con riferimento al PAI ed al PGRA della regione Calabria, non è stato mai calcolato alcun valore specifico per la vulnerabilità, per carenza di informazioni, bensì è sempre stata ipotizzata pari a V=1, massimizzandone gli effetti per tutti gli elementi esposti.

L'identificazione delle aree a diverso danno potenziale è avvenuta attraverso l'utilizzo delle informazioni contenute nelle Carte dei Luoghi redatta dalla Regione Calabria che rappresenta un notevole

aggiornamento dell'uso del suolo contenuto nel Corine. Le quattro classi omogenee di Danno Potenziale hanno tenuto conto in primo luogo, del danno alle persone, e poi di quello al tessuto socio-economico ed ai beni non monetizzabili. Esse sono così definite:

- 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.

Pertanto, in riferimento alle definizioni sopra riportate e utilizzando le categorie individuate dalla Carta dei Luoghi, integrate con ulteriori dati provenienti da strumenti di pianificazione di dettaglio, le classi di danno potenziale sono state calcolate in base ai seguenti elementi:

- D4 - Danno potenziale molto elevato:
 - Zone urbanizzate (agglomerati urbani, nuclei abitati con edificazione diffusa e sparsa);
 - Zone interessate da attività economiche e produttive di rilevante interesse (zone commerciali, industrie, centri di ricerca, etc. non potenzialmente pericolose dal punto di vista ambientale);
 - Strutture Strategiche (ospedali e centri di cura pubblici e privati, centri di attività collettive civili, sedi di centri civici, centri di attività collettive militari);
 - Infrastrutture strategiche (autostrade, tangenziali, grandi strade e/o strade a scorrimento veloce, strade statali, provinciali e comunali principali, stazioni FS, Linee ferroviarie, aeroporti, eliporti, porti, invasi idroelettrici, dighe, elettrodotti, gasdotti, acquedotti, metanodotti, linee elettriche, oleodotti);
 - Beni ambientali, storici e culturali di rilevante interesse (aree naturali, aree boscate, aree protette e vincolate, aree di vincolo paesaggistico, aree di interesse storico e culturale, zone archeologiche);
 - Zone interessate da attività economiche, industriali o impianti tecnologici, potenzialmente pericolosi dal punto di vista ambientale (ai sensi di ai sensi di quanto individuato nell'allegato I del D.L. 59/2005).
- D3 - Danno potenziale elevato:
 - Discariche, depuratori, inceneritori;
 - Zone omogenee presenti negli strumenti urbanistici comunali e individuati come cimiteri, cave, discariche anche se non in esercizio;
 - Beni ambientali, paesaggistici e storico-archeologici che racchiudono potenziali valori, ma non riconosciuti in termini normativi.
- D2 - Danno potenziale medio:
 - Zone agricole specializzate;
 - Zone estrattive;
 - Zone omogenee presenti negli strumenti urbanistici comunali e individuati come ad esempio, verde urbano e parchi urbani, borghi rurali;

- Infrastrutture secondarie: intese come strade secondarie, linee ferroviarie e stazioni nel caso in cui il danno non provochi l'isolamento di uno o più centri urbani.
- D1 – Danno potenziale moderato o nullo:
 - Aree incolte o di scarso valore ambientale;
 - Aree agricole non specializzate (prati, pascoli, etc.);
 - Aree umide (zone umide, corpi idrici, boschi igrofili, lanche e meandri abbandonati, ecosistemi sito-specifici, etc.);
 - Superfici costruite, a bassa densità di edificazione in stato di abbandono o degrado riconosciuto. Il valore è principalmente legato alla perdita dell'elemento costruito.

Dopo l'individuazione delle classi di danno è stata effettuata una operazione di sovrapposizione cartografica, attraverso strumenti GIS, tra le aree a diversa pericolosità e aree a diverso danno potenziale per l'individuazione delle aree a rischio.

Una volta definite quindi le varie classi di danno così come riportato precedentemente è stato definito il valore del rischio in funzione della pericolosità dell'evento atteso e quindi redatta la carta del rischio.

Il D.P.C.M. 29.09.98 "Atto di indirizzo e coordinamento per l'individuazione dei criteri relativi agli adempimenti di cui all'art. 1, commi 1 e del D.L. 11.06.98, n. 180" nel ribadire che i Piani di Bacino, devono tener conto delle disposizioni del D.P.R. 18.07.95, definisce, con riferimento ad esperienze di pianificazione già effettuate quattro classi di rischio:

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	R2	R1	R1

- R4 =rischio molto elevato: per il quale sono possibili perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture ed al patrimonio ambientale, la distruzione di attività socio-economiche;

- R3 =rischio elevato: per il quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi, la interruzione di funzionalità delle attività socio-economiche e danni relativi al patrimonio ambientale;

- R2 =rischio medio: per il quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità delle persone, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche;
- R1 =rischio moderato o nullo: per il quale i danni sociali, economici ed al patrimonio ambientale sono trascurabili o nulli.

L'adozione della medesima procedura per l'aggiornamento del PAI e successivamente per la redazione del Piano di Gestione delle Rischio Alluvioni ha portato ad una coerenza tra i due strumenti di pianificazione nel rispetto delle attuali normative.

2.5.2 Piano di Emergenza comunali (PEC)

Per quanto riguarda la pianificazione di emergenza sono state prese come riferimento le norme attualmente in vigore nella regione Calabria.

Con Delibera di Giunta Regionale n. 611 del 20 dicembre 2019 sono state approvate le nuove "Linee Guida per la redazione del Piano di Protezione Civile Comunale" e contestualmente sono state revocate le precedenti di cui alla DGR n. 472 del 24 luglio 2007 (Regione Calabria[111]).

Nelle nuove linee guida vengono introdotti i concetti di scenari di evento e di rischio. Essi sono gli strumenti che definiscono le caratteristiche degli eventi che potrebbero accadere e dei danni agli elementi esposti (cioè alle persone, ai beni e agli animali) che ne potrebbero conseguire.

La vulnerabilità degli elementi esposti è indicata in base alla loro propensione ad essere danneggiati da un dato evento ovvero dall'entità del danno che potrebbero subire. Essa è espressa con un valore numerico compreso tra 0 (nessun danno) e 1 (distruzione). Nelle linee guida viene richiesto di indicare i luoghi dove è maggiore la vulnerabilità delle persone, degli animali e dei beni che sono maggiormente vulnerabili per un determinato rischio. In particolare con riferimento al rischio idrogeologico è richiesta l'elaborazione di una carta di vulnerabilità contenente gli elementi a rischio presenti nell'area vulnerabile, soggetta cioè a frane o inondazioni, ad ognuno dei quali è associato un indice compreso tra 0 e 1.

La carta riporta nel caso di inondazione le seguenti tipologie, presenti all'interno delle aree vulnerabili:

- edifici con piano terra e/o seminterrato abitato;
- sottopassi stradali che possono essere inondati;
- tratti stradali e spazi aperti nei quali la corrente idrica è in grado di trascinare le persone;
- edifici abitati fatiscenti che potrebbero crollare per effetto della piena;
- asili nido, asili, ospedali, cliniche, case di riposo e altre strutture dove sono presenti persone con limitata autonomia e capacità di fronteggiare l'evoluzione dell'evento.

Nel caso di frane la carta riporta le seguenti tipologie, presenti all'interno delle aree vulnerabili:

- tratti stradali e spazi aperti che possono essere investiti dalla frana;
- edifici abitati fatiscenti, collocati sul corpo frana o nelle zone limitrofe che potrebbero crollare per effetto del movimento franoso;
- asili nido, asili, ospedali, cliniche, case di riposo e altre strutture dove sono presenti persone con limitata autonomia e capacità di fronteggiare l'evoluzione dell'evento.

Dopo aver creato la carta della vulnerabilità il passaggio successivo prevede la costruzione della carta dello scenario di rischio, in cui si va ad incrociare la vulnerabilità con un indice di affollamento dell'oggetto espresso in modo qualitativo. Le classi di affollamento sono 3: bassa (da 1 a 5 persone), media (da 6 a 10 persone), alta (più di 10 persone). Pertanto la valutazione del rischio per le persone relativo alla tipologia considerata si ricava dalla matrice riportata di seguito, espressa in base all'affollamento previsto nella tipologia (sottopasso, scantinato, ecc.) e che può assumere tre valori: basso, medio, alto.

Rischio		Vulnerabilità
		Molto alta
Affollamento	Basso	Alto
	Medio	Molto alto
	Alto	Molto alto

Tabella 2-5. Matrice della carta dello scenario di rischio nel caso di inondazione o frana

Con riferimento al rischio incendio boschivo e di interfaccia, la vulnerabilità è relazionata al grado di urbanizzazione, dalla viabilità, dal livello socio-economico della zona e più in generale dall'uso del suolo

e del territorio. La zonazione della vulnerabilità segue fundamentalmente la procedura speditiva suggerita dal “Manuale operativo per la predisposizione di un piano comunale o intercomunale di protezione civile” redatto dal Dipartimento di Protezione Civile nell’ottobre del 2007 Presidenza del Consiglio dei Ministri[41]. Essa attribuisce a ciascun elemento esposto un valore di vulnerabilità basato solo sulla sua natura. Le classi di vulnerabilità sono tre (alta, media, bassa) e si vanno ad incrociare con la pericolosità per ottenere la carta del rischio, attraverso la classica matrice moltiplicativa.

Rischio		Vulnerabilità		
		Alta	Media	Bassa
Pericolosità	Alta	Molto alta	Molto alta	Alta
	Media	Molto alta	Alta	Moderata
	Bassa	Alta	Moderata	Bassa

Tabella 2-6. Matrice della carta dello scenario di rischio nel caso di incendio boschivo

3 Eventi naturali ed antropici in Calabria e strumenti di pianificazione

3.1 Eventi idrogeologici

Il cambiamento climatico è una questione cruciale per la salvaguardia dell'ambiente e la sostenibilità. I suoi effetti sono sempre più evidenti anche nel bacino del mar Mediterraneo. In particolare, per quanto riguarda il territorio calabrese, negli ultimi anni gli eventi estremi, intesi sia come estremi piovosi che siccitosi, sono aumentati, come conseguenza del cambiamento climatico stesso.

Caloiero *et al.*[112] mostrano come applicando diverse metodologie statistiche, riconosciute dalla comunità scientifica, emerge un trend di diminuzione delle piogge annuali sul territorio calabrese, anche se con alcune differenze a seconda della zona considerata, in funzione probabilmente della complessa orografia che caratterizza il territorio calabrese. Mentre analizzando gli eventi estremi nel periodo autunnale vi è un chiaro aumento delle anomalie. Caloiero *et al.*[113] attraverso una modellazione stocastica, dimostrano un'elevata probabilità di incorrere in condizioni di siccità applicando indici come l'SPI (Standardized Precipitation Index) o il DSI (Drought Severity Index). Per quanto concerne le temperature, una recente analisi pubblicata dal Centro Funzionale Multirischi della regione Calabria (Arpacal[114]), mostra l'andamento delle temperature medie annuali dal 1989 al 2019, evidenziando il trend di aumento delle temperature medie estive nell'ultimo trentennio, come mostrato nella successiva figura.

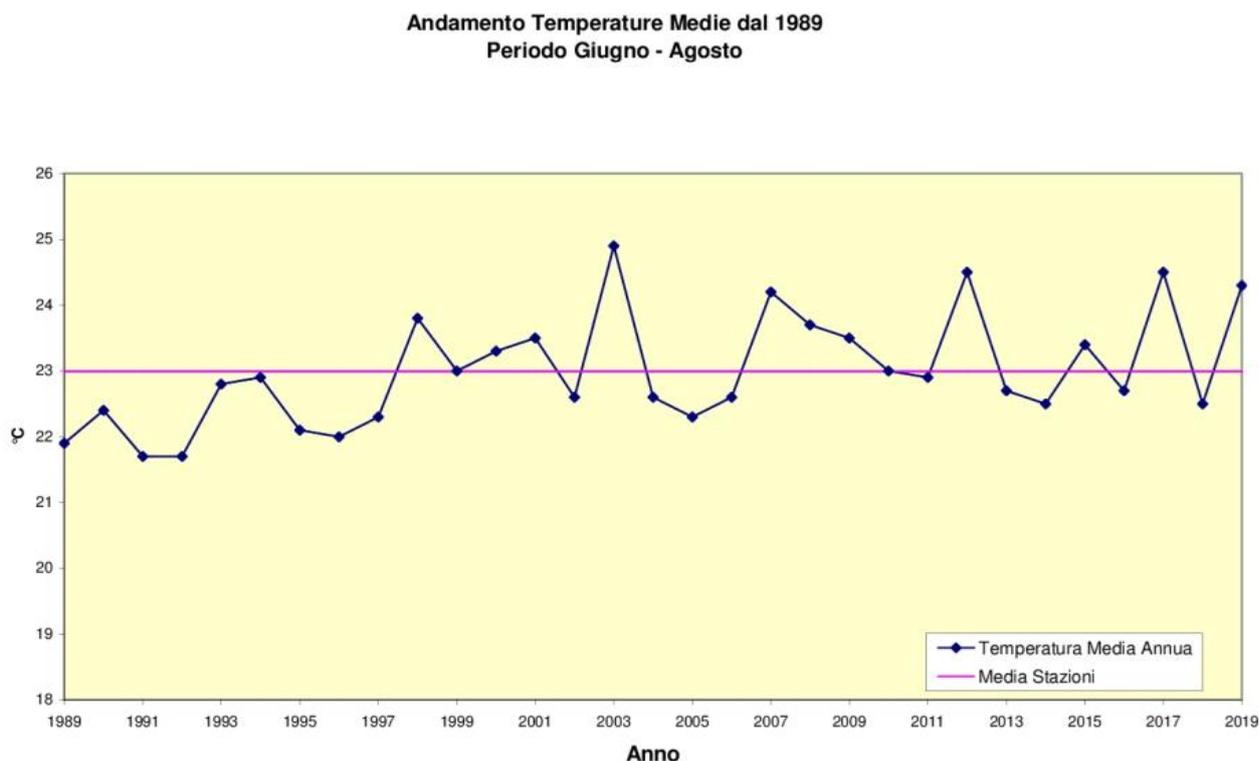


Figura 3-1. Andamento delle temperature medie del trimestre estivo dal 1989 ad oggi (fonte: ARPACAL-Centro Funzionale Multirischi della Calabria 2019)

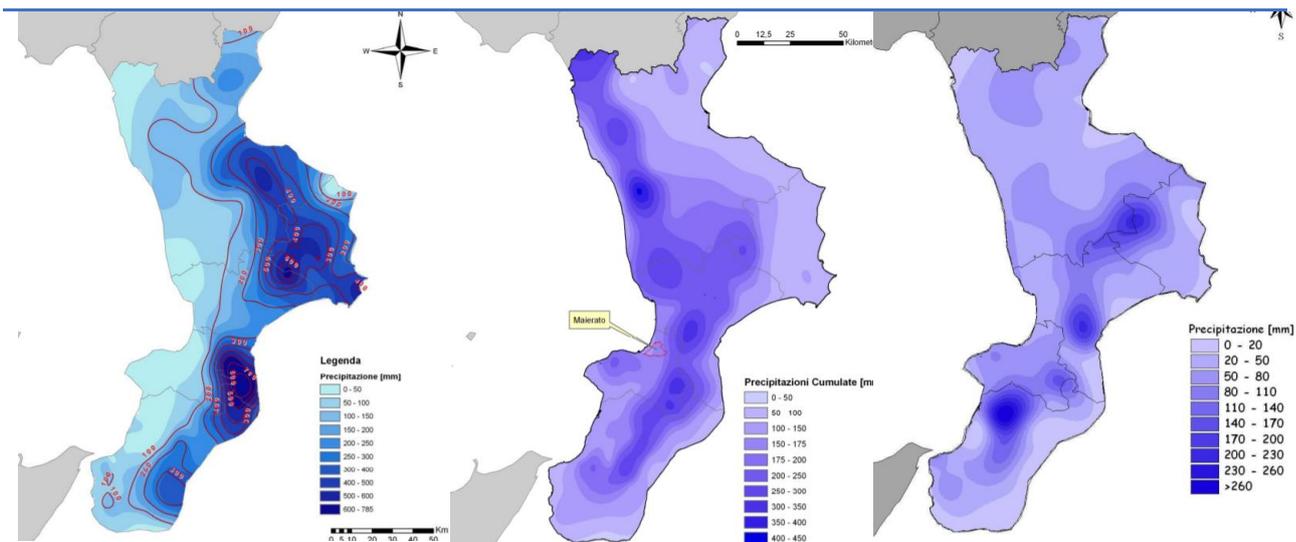
L'innalzarsi delle temperature inoltre, in combinazione con la diminuzione delle precipitazioni crea un notevole aumento delle portate di magra all'interno dei corsi d'acqua, nonché un aumento della pericolosità incendi nelle zone di interfaccia urbanizzate e nelle zone forestali.

La regione Calabria risulta una delle regioni italiane maggiormente esposte ai rischi naturali e antropici (idraulico, frana, incendi, ecc.). Secondo l'ultimo rapporto ISPRA del 2018 "Dissesto idrogeologico in

Italia: pericolosità e indicatori di rischio (Trigila et al.[21]) redatto sulla base della nuova mosaicatura nazionale del 2017 delle aree a pericolosità dei Piani di Assetto Idrogeologico -PAI, in Calabria il 3.6% (pari a 545,6 km²) della superficie totale rientra fra le aree a pericolosità da frana elevata e molto elevata (P3,P4), mentre il 5.9% (pari a 903 km²) rientra fra le aree totali vincolate a pericolosità da frana (P1,P2,P3,P4,AA). Con riferimento invece al rischio idraulico lo stesso rapporto ISPRA, sulla base degli scenari definiti a seguito del D.Lgs. 49/2010 ha definito per la regione Calabria le seguenti percentuali di aree interessate dalla pericolosità idraulica: 3.7 % pericolosità elevata (P3); 3.8 % pericolosità media (P2); e 4% pericolosità bassa (P1). In totale sul territorio regionale si registra una percentuale di 11.5% di area soggetta a pericolosità idraulica, pari a 1741.3 km².

La Calabria è stata da sempre colpita da eventi alluvionali catastrofici causati da precipitazioni continue e/o improvvise a carattere eccezionale in grado di causare gravi danni ai centri abitati, alle reti viarie ed ai litorali. Il rischio di alluvione ha caratterizzato il territorio della Calabria, potendosi annoverare già in epoca storica infatti, centinaia di episodi di vere e proprie catastrofi conseguenti a esondazioni dei corsi d'acqua. Tuttavia, la probabilità che gli eventi naturali provochino danni, è fortemente influenzata dalle azioni umane, come, ad esempio, il disboscamento, l'alterazione del corso d'acqua, l'eliminazione delle pianure alluvionali, l'occlusione degli impluvi, le sistemazioni errate, l'edilizia in zone ad alto rischio d'inondazione. Non meno rilevanti sono i disastri conseguenti alla franosità, che interessa una parte consistente del territorio calabrese. In Calabria, al pari di altre Regioni dell'Italia meridionale, sono stati ripetutamente registrati eventi franosi che hanno coinvolto persone e beni, caratterizzati frequentemente da livelli di intensità tale da produrre consistenti modifiche al paesaggio. All'elevata pericolosità direttamente correlabile all'assetto geologico della regione è associata una vulnerabilità molto alta dei sistemi insediativi.

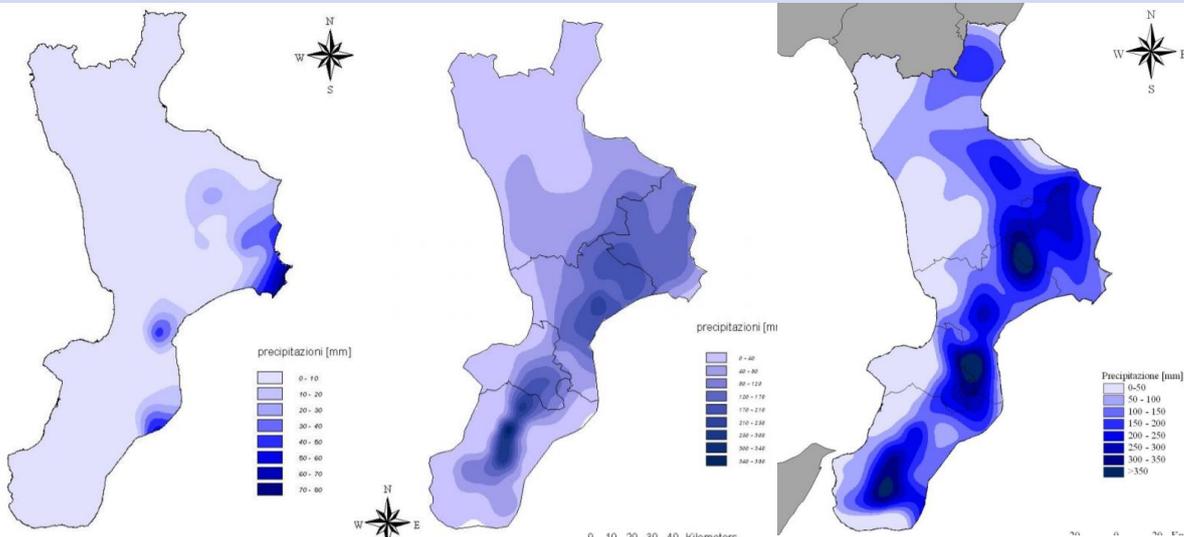
L'elevata frequenza quindi di fenomeni meteorologici estremi e un territorio sempre più vulnerabile, fanno registrare ogni anno ingenti danni sul territorio, con diretti risconti sociali, ambientali e purtroppo di vite umane. Nella figura riportata di seguito (Figura 3-2) sono mostrate le cartografie elaborate dal Centro Funzionale Multirischi della Calabria, riferite alle precipitazioni cumulate durante gli eventi estremi, che hanno interessato il territorio regionale dal 2008 al 2019. La Tabella 3-1 riporta invece un elenco delle ordinanze di Protezione Civile riferite allo stesso periodo storico. Si precisa infatti che alla dichiarazione di uno stato di emergenza il Commissario delegato - nominato con Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile, si occupa delle attività mirate alla ricognizione dei fabbisogni per il ripristino delle strutture e infrastrutture pubbliche e private e dei danni subiti dalle attività economiche e produttive, dai beni culturali e dal patrimonio edilizio privato. La Tabella 3-1 riporta le coperture finanziarie a fronte degli effetti al suolo registrati sul territorio regionale a seguito di eventi estremi.



23-28 SETTEMBRE 2009

1-15 FEBBRAIO 2010

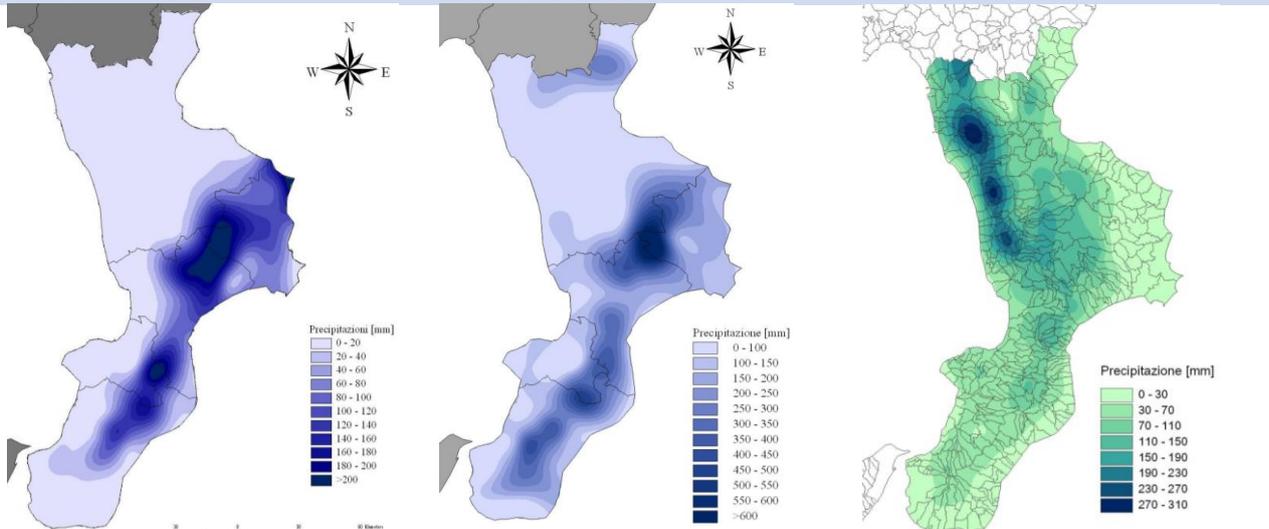
2-3 NOVEMBRE 2010



3-4 NOVEMBRE 2010

21-23 NOVEMBRE 2011

21-23 FEBBRAIO 2012



18-19 NOVEMBRE 2013

31/01/2014 - 03/02/2014

29/01/2015 - 02/02/2015

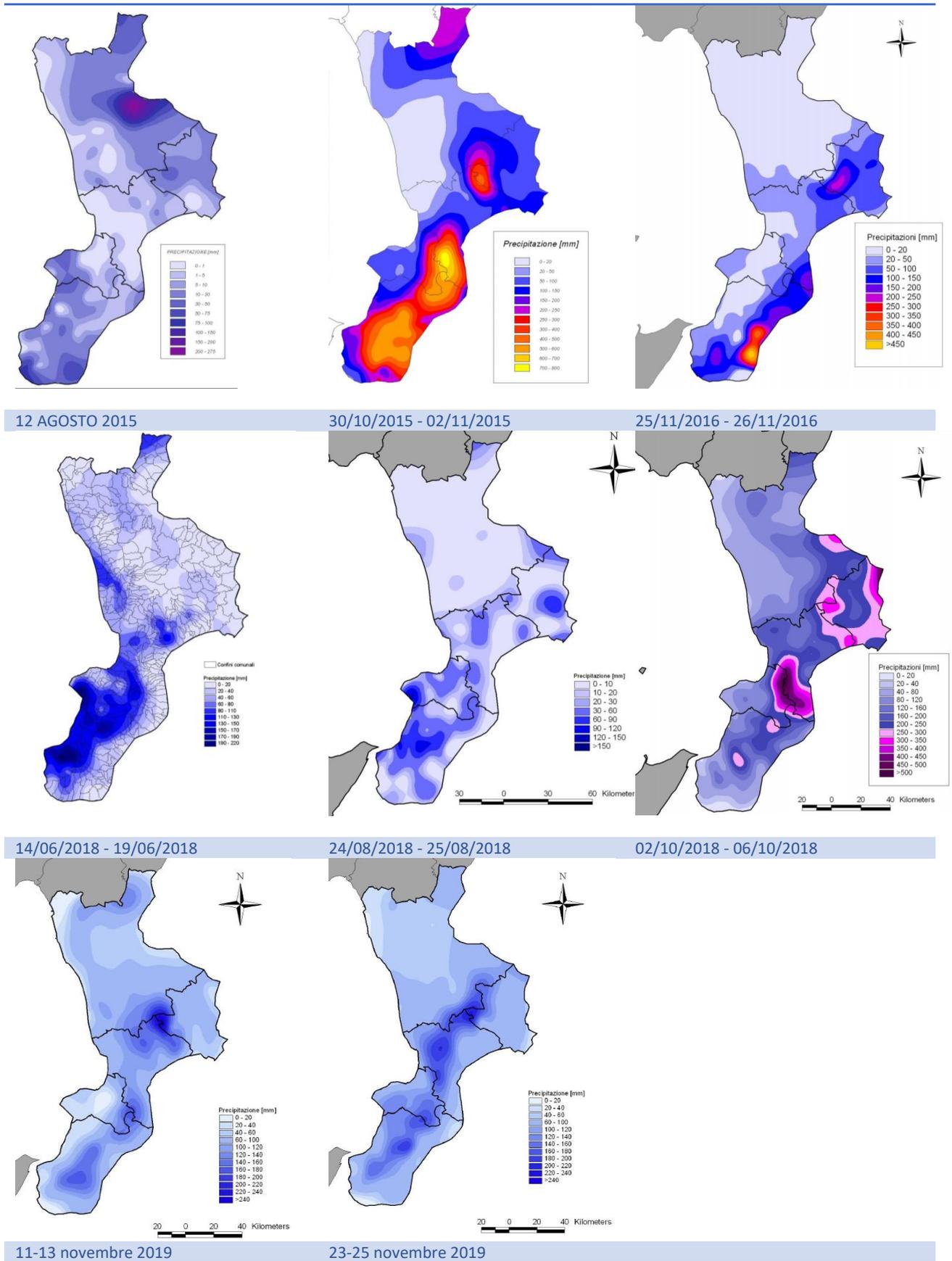


Figura 3-2. Distribuzione spaziale delle precipitazioni cumulate durante gli eventi (fonte: Centro Funzionale Multirischi della Calabria- ARPACAL)

Anno	Periodo eventi	Territori	n° Ordinanza di Protezione	Fondi stanziati
			Civile	(euro)
2008	novembre e dicembre 2008	Regione Calabria	OPCM n. 3734 del 16/01/2009	172,23 Milioni
2009	gennaio 2009	Regione Calabria	OPCM n. 3741 del 18/02/2009	
2010	11 - 17 febbraio 2010.	Regione Calabria (Maierato)	OPCM n. 3862 del 31/03/2010	15 Milioni
	3 - 5 settembre, 17 -			
2010	20 ottobre e 1- 4 novembre 2010	Regione Calabria	OPCM n. 3918 del 18/01/2011	7 Milioni
2011	22 e 23 novembre 2011	Province di Catanzaro, Reggio Calabria e Crotone	OCDPC n. 8 del 14/06/2012	6 Milioni
2013-2014	novembre e dicembre 2013 e febbraio 2014	Regione Calabria	OCDPC n. 185 del 29/07/2014	2,4 Milioni
2015	dal 29 gennaio al 2 febbraio 2015	Province di Cosenza, Catanzaro e Crotone		
2015	dal 22 febbraio al 26 marzo 2015	Comuni di Petilia Policastro (KR), di Scali Coeli e Oriolo Calabro (CS) e di Canolo e Antonimina (RC)	OCDPC n. 289 del 29/09/2015	3,1 Milioni
2015	12 agosto 2015	Comuni di Rossano Calabro e Corigliano Calabro	OCDPC n. 285 del 16/09/2015	3,92 Milioni
2015	30 ottobre al 2 novembre 2015	Province di Catanzaro, Cosenza e Reggio Calabria	OCDPC n.330 del 1/04/2016	11,80 Milioni
2016	24 - 26 novembre 2016	Province di Crotone e Reggio Calabria		
2017	22 - 25 gennaio 2017	Province di Catanzaro, Crotone, Reggio Calabria e dei Comuni di Longobucco, Oriolo e Trebisacce in Provincia di Cosenza e di Vazzano in Provincia di Vibo Valentia.	OCDPC n.473 del 4/08/2017	21,24 Milioni
2018	14 - 19 giugno 2018	Comuni di Reggio Calabria, Bagnara Calabra, Scilla, Joppolo e Nicotera	OCDPC n. 545 del 18/09/2018	0,5 Milioni
2018	ottobre 2018	Regione Calabria	OCDPC n. 558 del 15/11/2018	79,985 Milioni
2019	10-13 Novembre 23-25 Novembre	Regione Calabria	OCDPC n. 622 del 17/12/2019 (Delibera CM 2/12/2019)	0,66 Milioni
			TOTALE	323,835 Milioni

Tabella 3-1. Ordinanze di Protezione Civile per gli eventi registrati sul territorio regionale dal 2008 al 2019 (fonte: Regione Calabria)

Nel corso degli anni, come mostrato dalle immagini e dalle ordinanze di protezione civile, sopra riportate, si sono verificati diversi eventi estremi che hanno interessato il territorio regionale producendo gravi effetti al suolo e ingenti danni economici con perdite di vite umane.

Dal 1980 al 2016 in Calabria circa 200 persone all'anno sono rimaste coinvolte in eventi idrogeologici; ogni 100 persone interessate circa 10 persone sono rimaste ferite e una è morta (Petrucci *et al.*[115]).

Uno studio condotto sul triennio 2015-2017, basato sull'elaborazione di circa 2000 schede riferite alle somme urgenze (scheda A: *interventi volti a rimuovere situazioni di rischio*; Scheda B: *Attività poste in essere, anche in termini di somma urgenza, per la messa in sicurezza delle aree interessate dagli eventi* e Scheda C: *Interventi urgenti volti ad evitare situazioni di pericolo o maggiori danni a persone o cose*) e circa 4000 schede riferite alla ricognizione post evento e post ordinanza (Scheda A: *Ricognizione del fabbisogno per il ripristino del patrimonio pubblico*; Scheda B: *Ricognizione del fabbisogno per il ripristino del patrimonio privato*; Scheda C: *Ricognizione dei danni subiti dalle attività economiche e produttive*) ha messo in luce come la zona maggiormente colpita dagli eventi estremi sia stata quella jonica (Maletta and Mendicino[116]). La Figura 3-3 mostra la suddivisione in aree omogenee meteorologiche adottata dalla regione Calabria come zone di allertamento. La Figura 3-4 mostra un diagramma Sankey realizzato utilizzando il numero di schede delle somme urgenze compilate dalla Protezione Civile regionale dal 2015 al 2017 (sinistra) e le zone di allertamento interessate dai danni (destra). Sulla base di tale elaborazione si evince come la zona di allertamento regionale maggiormente colpita nel periodo analizzato sia Cala 8 "Zona Ionica meridionale".

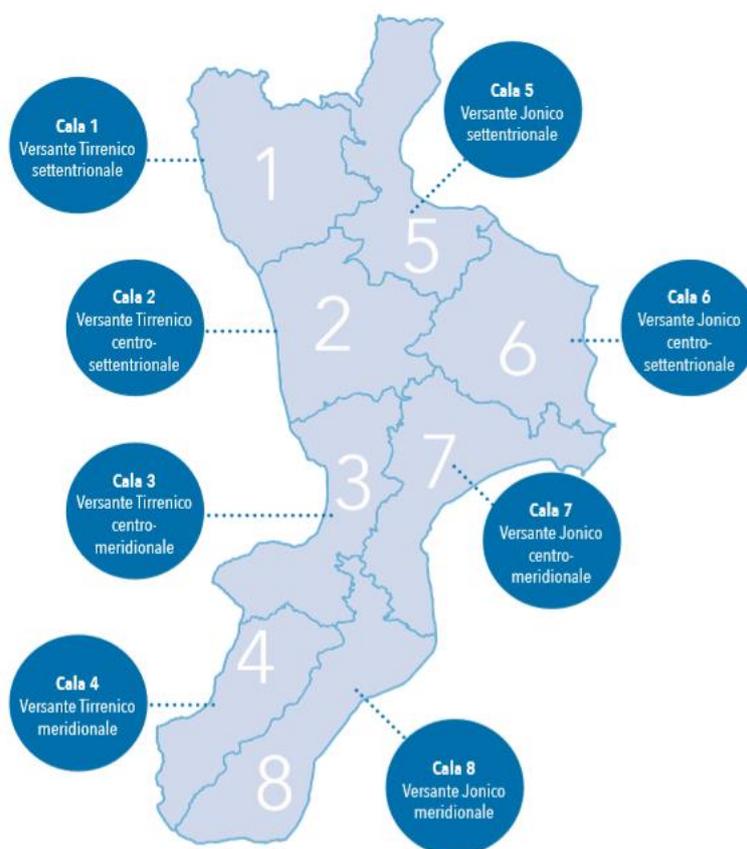


Figura 3-3. Zone di Allertamento della Calabria

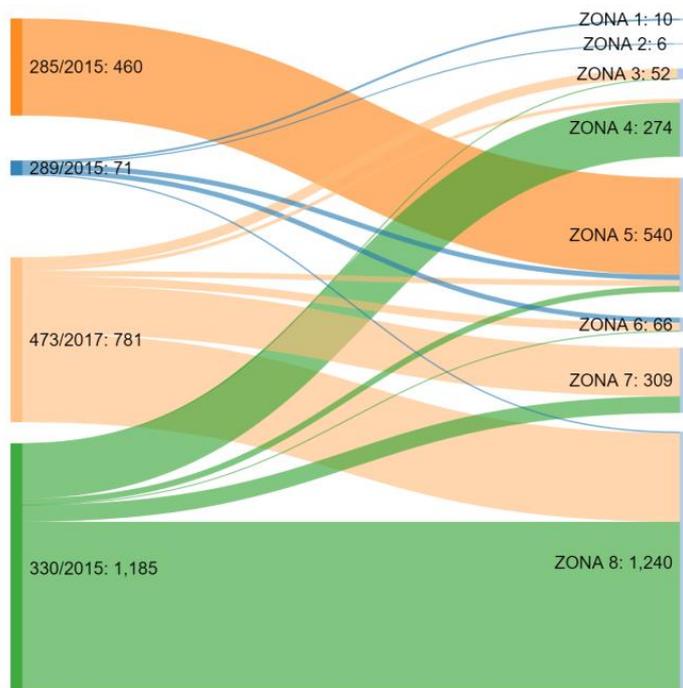


Figura 3-4. Diagramma Sankey riferito alle schede di somma urgenza (sx) e alle zone di allertamento(dx)

La Figura 3-5, sulla base dei dati elaborati nel periodo 2015-2018, mostra come le categorie che hanno subito maggiori danni economici a seguito degli eventi calamitosi, con conseguenti disagi per la popolazione, siano quelle riferite alle infrastrutture viarie. A seguire si registrano danni alle opere di difesa del suolo e opere idrauliche. Le fotografie riportate nella Figura 3-6 e Figura 3-7, riferite agli eventi alluvionali del 2015, 2016 e 2017, mettono in luce le principali tipologie di danno che ha subito il territorio regionale.

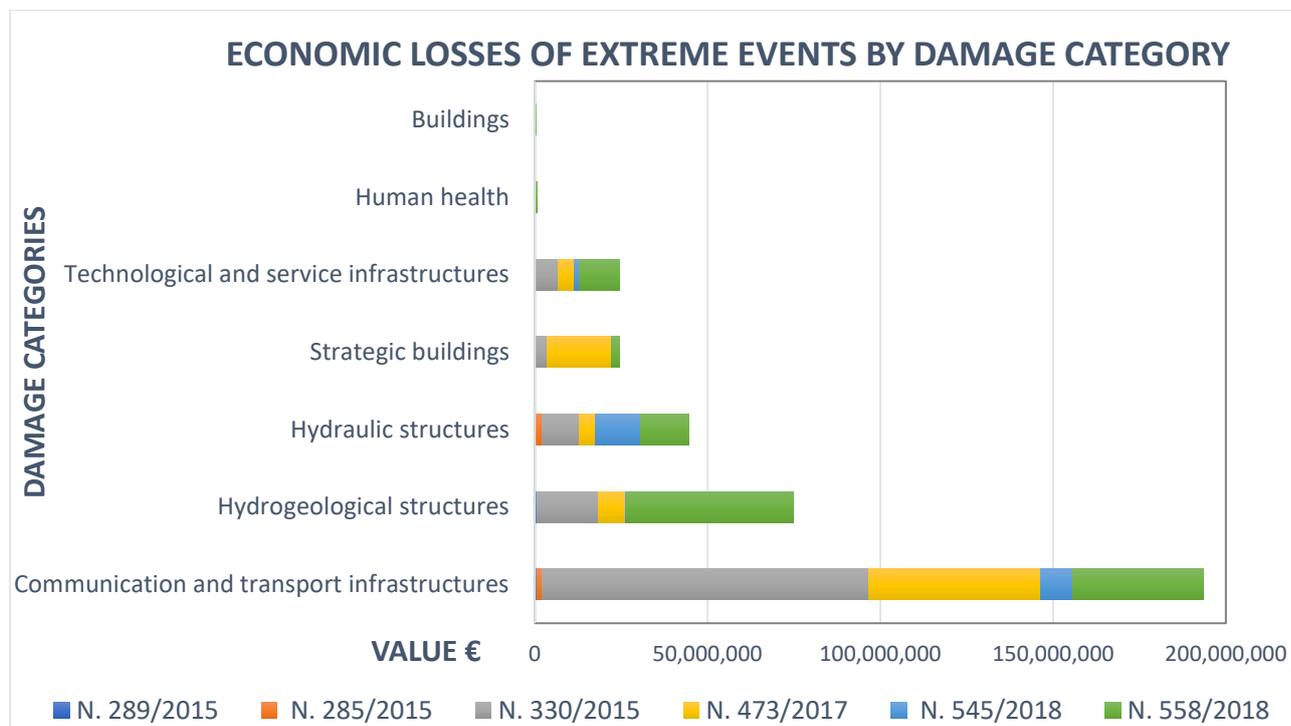


Figura 3-5. Categorie che hanno subito maggiori danni economici durante gli eventi registrati sul territorio regionale dal 2015 al 2018

(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



Figura 3-6. Foto dell'evento registrato nella Regione Calabria nel periodo 30 ottobre 2 novembre 2015: (a) Frana comune di Africo (RC); (b) Torrente Bruzzano, Comune di Brancaleone (RC); (c) Cedimento del Ponte sulla SP65; (d) Abbassamento di una pila del Ponte sul Fiume Allaro a Caulonia (RC) con gravi danni al viadotto della SS 106; (e) Comune di Ardore (RC); (f) Cedimento stradale al di sotto del ponte ferroviario Comune di Ferruzzano (RC)



Figura 3-7. Foto dell'evento registrato nella Regione Calabria nel periodo novembre 2016 e gennaio 2017: (a) Caraffa del Bianco (RC); (b) Sant'Agata del Bianco (RC); (c) Frana Grotteria (RC); (d) Simeri Crichi (CZ); (e) Frana sulla S.P.110 tra Benestare e S. Nicola di Ardore (RC);(f) S.P. Bovalino-Careri (RC)

3.1.1 Strumenti di pianificazione del rischio meteo-idrogeologico

Gli strumenti attraverso cui si sta esprimendo l'azione di tutela dell'assetto idrogeologico del territorio sono attualmente costituiti dai Piani per l'Assetto Idrogeologico (PAI) e dal Piano di Gestione Rischio Alluvioni (PGRA). I Piani per l'Assetto Idrogeologico (PAI) sono dei Piani Stralcio dei Piani di bacino (ex legge 183/89), redatti ai sensi della legge 267/98 (cd «Legge Sarno») e che concernono in particolare la mappatura delle aree a rischio idrogeologico per frana e alluvione. Il PAI della regione Calabria, redatto dall'ex autorità di bacino regionale, oggi è uno strumento gestito ed aggiornato dall'Autorità di Distretto Idrografico dell'Appennino Meridionale. Il Piano di gestione del rischio di alluvioni (PGRA), redatto dall'Autorità di Distretto Idrografico dell'Appennino Meridionale ai sensi della Direttiva europea 2007/60/CE, è lo strumento di cui la Comunità Europea si sta dotando per la valutazione e la gestione dei rischi di alluvione. Il Piano mira, tramite misure di previsione, prevenzione, preparazione, risposta e ripristino, a ridurre i possibili danni per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche.

I piani e i programmi di gestione e tutela e risanamento del territorio devono essere coordinati con i piani di protezione civile al fine di assicurare la coerenza con gli scenari di rischio e le strategie operative, ai sensi dell'art.18 D.lgs n.1 del 2/1/2018. La pianificazione di emergenza è lo strumento attraverso il quale la previsione degli eventi trova una corrispondenza sul territorio nella immediata, graduale e predefinita risposta del sistema di protezione civile secondo scenari preventivamente costruiti e procedure stabilite e concordate. I piani di emergenza sono redatti ai diversi livelli territoriali, comunali, provinciali e regionali. Essi tengono conto delle misure di mitigazione del rischio, come mostrato nella figura successiva.

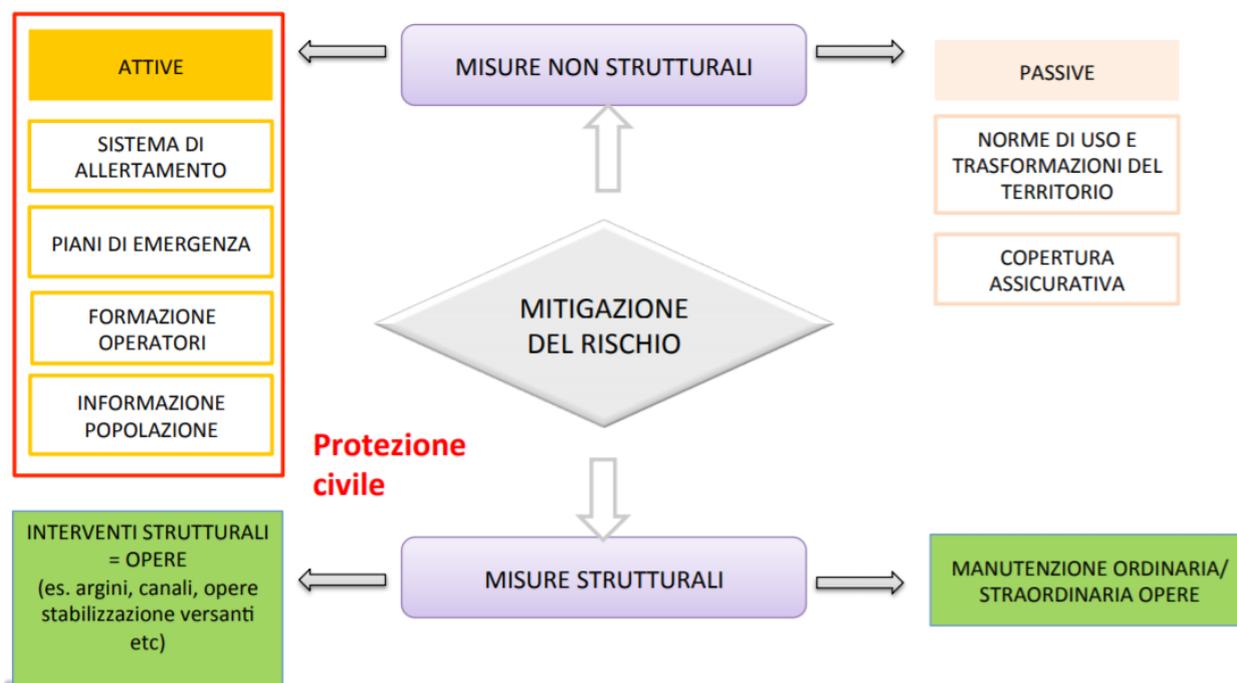


Figura 3-8. Misure di mitigazione del rischio idrogeologico (fonte: protezione Civile Nazionale)

Si precisa che a livello comunale, con riferimento alla Delibera di Giunta della regione Calabria DGR n. 611 del 20 dicembre 2019, ogni comune all'interno del proprio Piano di Emergenza Comunale (PEC) è tenuto a valutare gli scenari di evento e di rischio meteo idrogeologico del proprio territorio.

3.2 Incendi boschivi

Gli incendi boschivi possono avere cause sia naturali che antropiche, anche se gli incendi di origine naturale avvengono molto raramente e possono essere causati da fulmini o autocombustione; mentre quelli di origine antropica si distinguono in:

- colposi, quindi causati da comportamenti irresponsabili e imprudenti dell'uomo, spesso in violazione di norme; tra questi possiamo annoverare le attività agricolo-forestali, abbandono di mozziconi e fiammiferi, attività ricreative (barbecue, lanci di petardi, rifiuti, etc.);
- dolosi, ovvero quegli incendi appiccati volontariamente con l'intento di arrecare danno al bosco e all'ambiente.

Ci sono anche incendi di origine ignota, per i quali non è possibile individuare una causa precisa. In Calabria i Carabinieri forestali segnalano sul territorio una altissima percentuale di incendi dovuti a cause umane di origine volontaria e non. Gli incendi boschivi rappresentano uno dei fenomeni con maggiore impatto sull'ambiente e costituiscono un costo notevolissimo per la collettività, sia in termini di risorse finanziarie derivanti dalle attività di lotta attiva contro gli incendi sia di misure di recupero successive. Negli ultimi decenni il problema degli incendi boschivi ha assunto una grande rilevanza sul territorio regionale. La realtà forestale della Calabria infatti è una delle più interessanti d'Italia per: l'estensione della superficie boscata (612.934 ettari), l'indice di boscosità di circa il 40.6%, la molteplicità delle tipologie forestali, la specificità di alcune formazioni, l'indotto attivato dalla filiera bosco-legno, la diversificazione della produzione legnosa, la varietà dei paesaggi, nonché per il ruolo storico, culturale e sociale.

La figura successiva (Figura 3-9) mostra il numero di incendi boschivi registrati per ogni singolo anno, dal 2008 al 2019 e la relativa superficie bruciata. Il maggior numero di incendi (1489) è stato registrato nel 2017 con una superficie di terreno bruciata pari a circa 33'000 ettari. Gli altri anni maggiormente colpiti dal fenomeno risultano il 2012 e il 2008 con una superficie bruciata pari a circa 22'579 ha e 18'040 ha rispettivamente.

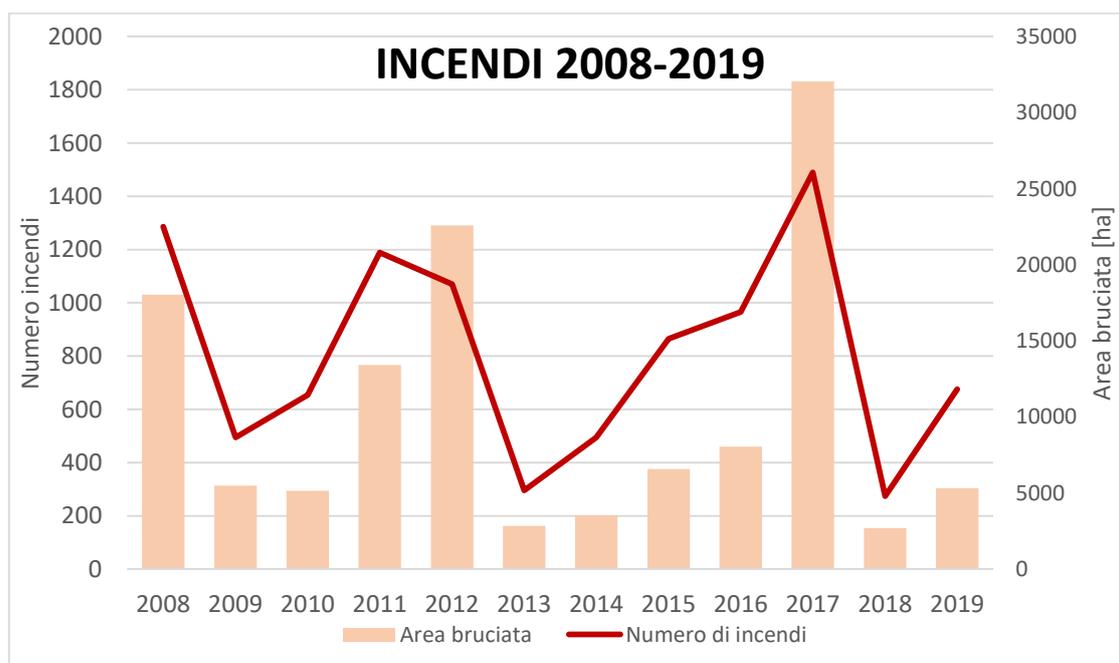


Figura 3-9. Numero di incendi e superficie bruciata in ettari che hanno interessato la regione Calabria dal 2008 al 2019 (fonte: Comando Regione Carabinieri Forestali)

Le figure successive, elaborate sulla base degli incendi registrati in Calabria dal 2008 al 2019, mostrano la distribuzione spaziale degli stessi nonché la frequenza con cui si manifestano sul territorio.

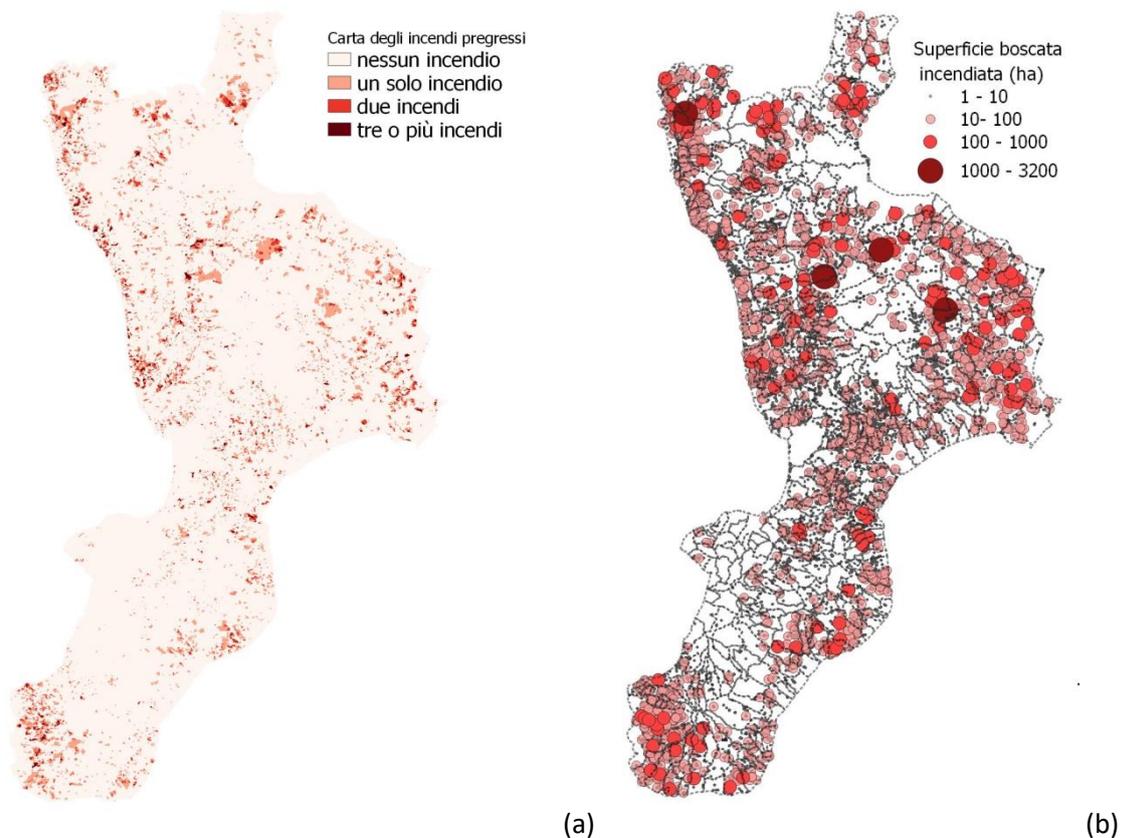


Figura 3-10. Aree percorse da incendio dal 2008 al 2019: (a) carta del numero di incendi pregressi nella stessa zona; (b) carta della superficie boscata incendiata in ettari su base comunale

3.2.1 Strumenti di pianificazione del rischio incendio

Il principale riferimento normativo di livello nazionale in tema di incendi boschivi è rappresentato dalla L. 21 novembre 2000, n. 353, nota come “Legge-quadro in materia di incendi boschivi”, sulla cui base le regioni hanno adeguato i propri ordinamenti. Tale legge, recepita in Calabria dalla LR n. 51 del 22 dicembre 2017, stabilisce che la regione predispone il Piano Regionale Antincendi Boschivi (AIB), di previsione, prevenzione e lotta attiva agli incendi boschivi.

Il Piano AIB è predisposto dall’U.O.A. Politiche della Montagna-Foreste e Forestazione - Difesa del Suolo della regione Calabria, con il contributo di rappresentanti dei seguenti soggetti:

- Agenzia regionale per la protezione ambientale della Calabria (ARPACAL);
- Parchi nazionali;
- Azienda Calabria Verde;
- Consorzi di bonifica calabresi;
- Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco;
- Associazione nazionale dei comuni Italiani (ANCI);

- g) Guardie ambientali d'Italia;
- h) Associazioni di volontariato operanti nel settore;
- i) Protezione civile regionale.

Per ciò che concerne il rischio incendi d'interfaccia, ogni Comune è tenuto all'interno del Piano di Emergenza Comunale (PEC) ad individuare le porzioni di territorio che potenzialmente potrebbero essere interessate da possibili eventi di incendio. La metodologia utilizzata segue le indicazioni operative fornite dal Dipartimento Nazionale di Protezione Civile, nonché le indicazioni regionali riportate nella Delibera di Giunta Regionale n. 611 del 20 dicembre 2019.

SECONDA PARTE: RISULTATI PRINCIPALI DELLA RICERCA

4 Dati e metodi adottati

4.1 Obiettivi

Uno dei primi obiettivi del lavoro di ricerca è stato quello di investigare ed analizzare i dati afferenti agli eventi calamitosi che hanno interessato con maggiore frequenza il territorio regionale negli ultimi anni, al fine di individuare le categorie che hanno registrato maggiori danni e quei fattori climatici, antropici e naturali che contribuiscono ad amplificare gli effetti stessi degli eventi. Inoltre sono stati studiati con attenzione i diversi strumenti di pianificazione, di cui è dotata la regione, al fine di evidenziarne eventuali carenze o elementi di potenziamento. Questa attività è stata svolta in collaborazione con la Regione Calabria ed in particolare con l'U.O.A. Protezione Civile.

L'obiettivo principale invece, è stato quello di individuare una metodologia di calcolo della vulnerabilità al fine di fornire un approccio innovativo nella mitigazione e riduzione del rischio. In particolare si è cercato di fornire una risposta a domande legate a ciò che è vulnerabile ("*cosa è vulnerabile?*", "*perché è importante?*"), all'individuazione del pericolo esterno ("*a che cosa il sistema è vulnerabile?*") e al riferimento temporale ("*quando?*") (Füssel[117]). È stato inoltre individuato il dominio significativo di analisi, riscontrando nella delimitazione amministrativa del Contesto Territoriale con unità spaziale data dalle zone censuarie ISTAT, la giusta dimensione per l'elaborazione delle cartografie di vulnerabilità e rischio. In letteratura esistono diverse definizioni e metodi di calcolo della vulnerabilità che si differenziano in base al settore di studio ed allo specifico scopo cui si adattano. Poiché la vulnerabilità non può essere misurata direttamente, assume molta importanza la fase relativa all'identificazione delle "variabili indicatrici", che puntano alla costruzione della vulnerabilità, ed il processo di aggregazione (Hinkel[118]). Per tale motivo, una fase delicata del lavoro, è stata quella relativa all'individuazione delle variabili in termini geometrici, climatici, geomorfologici, sociali, demografici, infrastrutturali, strutturali e di pianificazione di emergenza, che influenzano maggiormente la vulnerabilità. Le tematiche di ricerca del tutto trasversali spaziano su argomenti multidisciplinari e considerano tutti gli aspetti della filiera che concorre alla determinazione della vulnerabilità.

In generale in questo lavoro l'attenzione è stata rivolta ai seguenti aspetti:

- Fornire un quadro concettuale della vulnerabilità esaminando i diversi approcci di calcolo presenti in letteratura;
- Trovare una dimensione spaziale significativa per il calcolo dell'indice di vulnerabilità che assuma importanza anche nella pianificazione d'emergenza;
- Individuare le variabili che caratterizzano maggiormente la realtà territoriale e che influenzano in modo diretto e non, i diversi livelli di vulnerabilità;
- Individuare le componenti che concorrono al calcolo dell'indice aggregato di vulnerabilità (rispondendo alla domanda: *cosa è vulnerabile?*);
- Proporre un approccio di calcolo modulare degli indici di vulnerabilità;
- Implementare una metodologia di aggregazione degli indici relativi di vulnerabilità;
- Individuare la migliore metodologia di classificazione dei livelli di vulnerabilità al fine di procedere con la relativa rappresentazione cartografica;
- Verificare l'adeguatezza delle ipotesi progettuali e metodologiche adottando un caso studio in un determinato Contesto Territoriale regionale;
- Elaborazione di metodologie integrate multi-scala per la determinazione della mappa di pericolosità da frana, da alluvione e da incendio boschivo;

- Calcolo della mappa del rischio secondo i tre diversi scenari: incendio boschivo, frana e idraulico.

Le mappe relative e quelle aggregate di vulnerabilità, rappresentano un utile strumento della pianificazione strutturale e non strutturale, per individuare le zone critiche, programmare la distribuzione delle risorse ed aumentare la resilienza di un ambito territoriale.

Con la elaborazione delle mappe di rischio un altro obiettivo conseguito ha riguardato l'individuazione delle aree a minore sostenibilità del rischio, ovvero di quei territori, spesso densamente popolati, dove potrebbero manifestarsi fenomenologie critiche idrogeologiche, per lo più caratterizzate da elevato cinematiso e dove sussistono altresì condizioni di esposizione e vulnerabilità che potrebbero rendere difficile la tempestiva ed efficace attuazione di misure per la salvaguardia della pubblica e privata incolumità e dei beni. In tali aree potrebbero manifestarsi anche fenomeni tipicamente molto localizzati, intensi e di difficile prevedibilità, quali frane in alveo, rotture di opere idrauliche, incendi, ecc.

L'approccio metodologico utilizzato per individuare gli indici spaziali di vulnerabilità, si basa sui seguenti principi base:

- Replicabilità del lavoro (dati disponibili e strumenti di analisi *open source*);
- Disponibilità dei dati;
- Adeguatezza del set di dati;
- Consistenza e robustezza dei risultati;
- Modularità di analisi;
- Adattabilità alle caratteristiche socio-territoriali dell'area in esame;
- Semplicità nella rappresentazione dei risultati, utilizzando mappe con legende standard;
- Trasparenza nella procedura e semplicità di utilizzo del modello.

4.2 Schema generale delle attività svolte

Di seguito si fornisce uno schema generale delle attività di ricerca svolte, nonché dei risultati ottenuti. Le scelte metodologiche, riferite ai diversi passaggi procedurali raffigurati nello schema sottostante, sono riportate nei paragrafi successivi. In particolare per l'indice di vulnerabilità del Contesto Territoriale, sono descritti i metodi di analisi utilizzati per la valutazione delle tre componenti: $TCVI_{exposure}$ (componente riferita alla pressione esercitata dal clima, dal costruito e dalle criticità territoriali dovute agli eventi passati), $TCVI_{people}$ (componente sociale) e $TCVI_{emergency}$ (componente riferita al funzionamento delle infrastrutture stradali durante un evento calamitoso nel caso di scenario di incendio boschivo, frana o alluvione). Si forniscono inoltre dettagli in merito all'unità spaziale adottata ed alla modellazione della pericolosità dei fenomeni maggiormente frequenti.

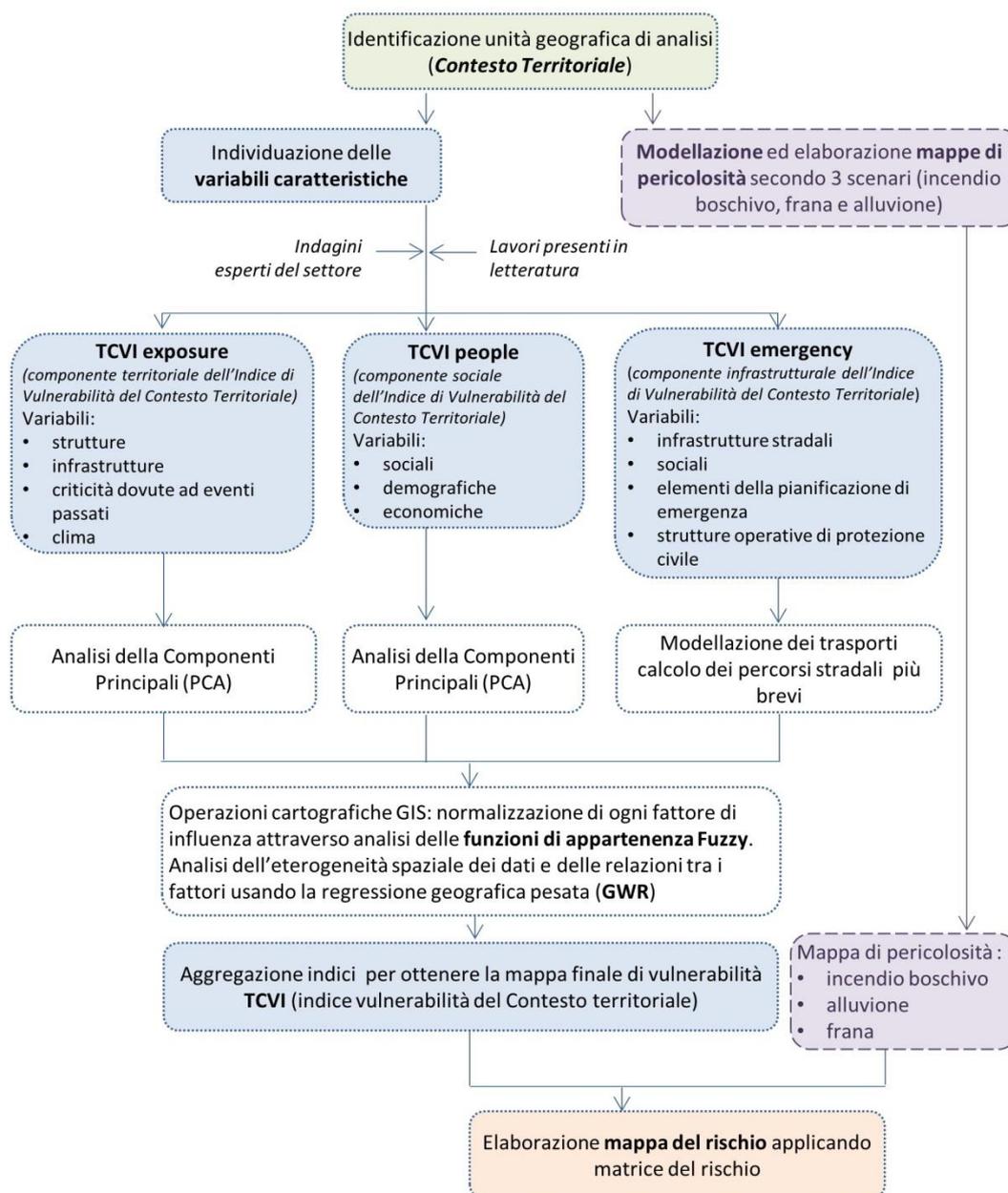


Figura 4-1. Schema generale dell'attività di ricerca

4.3 Dataset

Per la realizzazione dello studio di vulnerabilità e per il calcolo delle mappe di pericolosità sono stati considerati un importante numero di dati geospaziali, riferiti a caratteristiche multidisciplinari del territorio. Tutti i dati spaziali sono stati raccolti, archiviati ed elaborati attraverso tecniche di geoprocessing con opportuni Sistemi Informativi Geografici (GIS), secondo il sistema di riferimento UTM, WGS 84 fuso 33 N. Il database cartografico è costituito sia da dati raster che vettoriali, di tipo puntuale lineare ed areale. Tutte le informazioni alfanumeriche e cartografiche elaborate durante il lavoro di tesi possono ricondursi alle seguenti macrocategorie:

- Dati riferiti agli eventi estremi ed alle Ordinanze di Protezione Civile negli ultimi 10 anni;
- Dati topografici;
- Dati climatici;
- Dati censimento ISTAT 2011, riferiti alle caratteristiche sociali e demografiche delle zone censuarie ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica) e dati ISTAT 2001;
- Carta di Uso del Territorio (CUT) della Regione Calabria e carte tematiche della Corine Land Cover;
- Dati sulle infrastrutture stradali;
- Dati sulla pianificazione di emergenza;
- Dati specifici riferiti a tre diversi scenari di rischio: alluvione, frana e incendio boschivo.

Dati Ordinanze di Protezione Civile

Lo studio delle schede relative alle Ordinanze di Protezione Civile è stato fondamentale innanzitutto per individuare l'area di studio del Contesto Territoriale (CT) e per la valutazione degli effetti al suolo che gli eventi estremi hanno provocato sul territorio nell'ultimo decennio. In particolare sono state analizzate circa 10'000 schede compilate, riferite alle seguenti tipologie:

- schede tecniche riferite alle "somme urgenze"
 - scheda A: *Interventi volti a rimuovere situazioni di rischio;*
 - scheda B: *Attività poste in essere, anche in termini di somma urgenza, per la messa in sicurezza delle aree interessate dagli eventi*
 - scheda C: *Interventi urgenti volti ad evitare situazioni di pericolo o maggiori danni a persone o cose)*
- schede riferite alla ricognizione post evento e post ordinanza
 - scheda A: *Ricognizione del fabbisogno per il ripristino del patrimonio pubblico;*
 - scheda B: *Ricognizione del fabbisogno per il ripristino del patrimonio privato;*
 - scheda C: *Ricognizione dei danni subiti dalle attività economiche e produttive)*

Dati topografici

Sono stati utilizzati modelli digitali del terreno a diversa risoluzione: DTM a 20m acquisito dal portale dell'ISPRA SINAnet (<http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/download-mais/dem20/view>); DTM lidar a 1m ed a 2m acquisito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. Il DTM è stato elaborato tramite il software Quantum GIS (QGIS) per ottenere i diversi tematismi quali la pendenza e l'esposizione.

Dati climatici

Sono stati elaborati i dati climatici relativi alla temperatura e alle precipitazioni acquisiti dal portale del Centro Funzionale Multirischi dell'Arpacal (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente) riferiti all'ultimo decennio 2010-2019. I dati di tipo puntuale sono stati validati e spazializzati attraverso tecniche di interpolazione per poi essere elaborati.

Dati ISTAT

Per la ricostruzione del profilo sociale, demografico ed economico del Contesto Territoriale in esame, sono stati acquisiti i dati elaborati dall'ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica) riferiti al 14° e 15° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni. I dati sono di tipo vettoriale e si riferiscono all'unità spaziale delle zone censuarie ISTAT. Sono stati altresì considerati i dati del 9° censimento generale dell'industria e dei servizi, anno 2011.

Carta Uso del Territorio (CUT)

La Carta di Uso del Territorio (CUT) utilizzata è stata redatta dalla regione Calabria ed è ritenuta di congruo livello di dettaglio poiché realizzata attraverso la fotointerpretazione di ortofoto digitali di alta definizione. La CUT è classificata su vari livelli che rappresentano in modo univoco le tipologie d'uso del suolo, con codici standard analoghi alla Corine Land Cover. Sono stati acquisiti altresì le mappe tematiche dell'edificato e dei corpi idrici elaborate dalla regione Calabria e le mappe europee della Corine Land Cover.

Dati infrastrutture stradali

L'elaborazione della mappa della rete stradale ha richiesto l'uso congiunto di una serie di carte tematiche: Carta Tecnica Regionale (CTR), mappa stradale dell'Ente gestore ANAS, della regione Calabria e mappe acquisite dal portale Open Street Map. Tali mappe sono state integrate in un unico *shapefile* in modo da ottenere una informazione precisa ed aggiornata.

Dati pianificazione di emergenza

Per poter individuare gli elementi caratteristici della pianificazione d'emergenza sono stati acquisiti i singoli Piani di Emergenza dei 6 comuni facenti parte del Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica. Al momento infatti, non sono presenti Piani di emergenza a livello di Contesto Territoriale. Inoltre sono stati acquisiti presso l'U.O.A. Protezione Civile, i dati riferiti a tutte le strutture operative del Servizio della protezione civile (Forze armate, polizia, strutture del Servizio sanitario nazionale, Vigili del fuoco, Associazioni di volontariato, ecc.) ed i riferimenti degli edifici strategici secondo i documenti generali di pianificazione dei Contesti Territoriali della regione Calabria.

Dati scenari di rischio: incendio boschivo, alluvioni e frane

Per la modellazione dei tre scenari di incendio boschivo, alluvione e frana sono stati analizzati ulteriori dati di tipo cartografico e alfanumerico, descritti con maggiore dettaglio nei capitoli successivi.

4.4 Il Contesto Territoriale come unità geografica di analisi

Il Dipartimento Nazionale della Protezione Civile, nell'ambito del Programma Operativo Nazionale (PON) Governance e Capacità Istituzionale 2014-2020 ha fornito alle regioni Basilicata, Calabria, Campania, Puglia e Sicilia, strumenti di governance per garantire l'operatività delle componenti strutturali del sistema di emergenza in un contesto territoriale, a seguito di un evento calamitoso. Nel PON Governance 2014-2020 è definita la necessità di individuare i "Contesti Territoriali" (CT) al fine di ridurre il rischio sismico, vulcanico e idrogeologico ai fini di protezione civile. Inoltre è ulteriormente definita l'attività di predisposizione di linee guida e procedure che avviino il processo di "sostanziale omogeneità di gestione del rischio, inteso nelle sue fasi di previsione, prevenzione e mitigazione, nonché delle sue attività di tipo strutturale e non strutturale" per i Contesti Territoriali. Il primo step del percorso attuativo adottato dal Programma prevedeva proprio l'individuazione dei Contesti Territoriali, anche nell'ottica di attuare quanto indicato dal nuovo Codice di Protezione Civile (D.lgs 1/2018) in merito all'identificazione degli **ambiti territoriali ottimali** come nuova unità geografica per implementare nuovi piani di emergenza. La Figura 4-2 mostra la struttura logica di un contesto territoriale, rappresentato da una unione di comuni con determinate caratteristiche ed in cui sono individuati gli edifici strategici, le aree di emergenza e le infrastrutture principali. Mentre nella Figura 4-3 sono riportati i risultati di una analisi SWOT, in cui vengono analizzati i punti di forza, le debolezze, le opportunità e le minacce nell'adozione dei CT nella pianificazione di emergenza. La metodologia di individuazione dei CT prende in considerazione le Unioni di Comuni, le aree afferenti ai Centri Operativi Misti (COM) e i Sistemi Locali del Lavoro (Istat, 2011), analizzando le relazioni esistenti, sia in termini di perimetrazione che di Comuni "rilevanti", ed effettuando verifiche con il sistema dei limiti amministrativi delle province e delle aree metropolitane, con le zone di allertamento e con alcune mappe di pericolosità. Nel CT il comune identificato come realtà urbana rilevante per il contesto al quale appartiene e che assume un carattere prioritario ai fini della programmazione degli interventi prende il nome di Comune di Riferimento (CR).

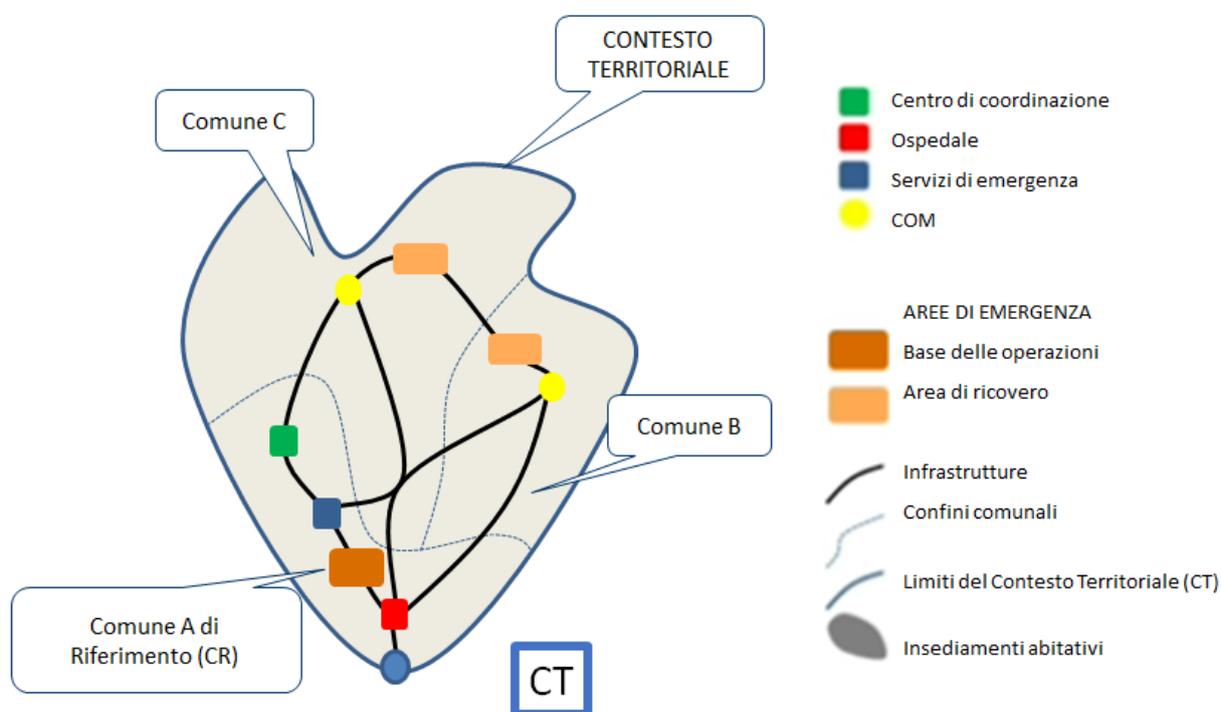


Figura 4-2. Logical Framework_ Unità geografica del Contesto territoriale (fonte: Protezione Civile Nazionale)



Figura 4-3. Analisi SWOT dei Contesti Territoriali (fonte: Protezione Civile nazionale)

La Regione Calabria ha approvato la nuova perimetrazione dei “**Contesti Territoriali**” con DGR 408/2016, con l’obiettivo di utilizzare tale perimetrazione, attraverso un percorso di condivisione con gli altri soggetti interessati, anche per la prevenzione e riduzione dei rischi ai fini di protezione civile e per la gestione delle emergenze. In Calabria su un totale di 404 comuni sono stati individuati n. 48 Contesti territoriali, di cui 38 caratterizzati da una popolazione compresa tra 10’000 e 50’000 abitanti e 10 con popolazione maggiore di 50’000 abitanti.

In questo lavoro di ricerca il dominio di analisi coincide con i limiti amministrati del Contesto Territoriale, mentre l’unità spaziale fa riferimento alle aree di censimento ISTAT.

4.5 Metodologia di calcolo della vulnerabilità

Al fine di rispondere alla domanda “*chi e cosa è vulnerabile?*” sono state individuate tre componenti importanti che contribuiscono a rendere vulnerabile un Contesto Territoriale. Pertanto **l’Indice di Vulnerabilità del Contesto Territoriale TCVI** (Territorial Context Vulnerability Index) **si compone di tre parti, fra loro modulabili e di uguale importanza. La prima componente TCVI_{exposure} si riferisce al territorio ed in particolare alla pressione antropica esercitata attraverso la costruzione di strutture ed infrastrutture, alle condizioni climatiche ed alle criticità registrate sul territorio a seguito di eventi estremi.** La scelta della denominazione “*exposure*” è per evidenziare come tale componente risulti fortemente dipendente dal luogo e si riferisce alla vulnerabilità dovuta non solo agli eventi estremi ma soprattutto a ciò che l’uomo ha costruito alterandone l’equilibrio ecosistemico. **La seconda componente TCVI_{people} si basa principalmente sulle caratteristiche sociali, culturali ed economiche.** La denominazione “*people*” è dovuta al fatto che vengono elaborati dati riferiti a diverse categorie di persone: residenti, lavoratori, turisti, stranieri. **Infine la componente TCVI_{emergency} si riferisce alla funzionalità delle infrastrutture stradali durante un evento.** Spesso infatti il verificarsi di un evento estremo causa l’interruzione di tratti di infrastrutture stradali con ripercussioni dirette nelle attività di gestione dell’emergenza. A tal fine la denominazione “*emergency*” si riferisce alle attività operative di gestione dell’emergenza durante un evento, da parte dei soccorritori, ed alle attività di spostamento verso luoghi sicuri da parte dei cittadini.

Nell'ottica di studio dei tre scenari di rischio più frequenti sul territorio (alluvione, incendio boschivo e frana) i primi due indici risultano indipendenti dalla tipologia di fenomeno considerato, mentre il terzo indice $TCVI_{emergency}$ è calcolato in funzione dello scenario di rischio che si va ad ipotizzare.

Il **TCVI** è caratterizzato da una determinata scala spaziale e temporale. L'unità spaziale adottata nell'implementazione del modello è quella della zona censuaria ISTAT, mentre a livello temporale ogni componente si riferisce ad uno specifico periodo. L'indice $TCVI_{exposure}$ si riferisce ad un tempo passato, molte variabili sono calcolate sulla base degli eventi estremi registrati nel periodo 2010-2019. L'indice $TCVI_{people}$ rappresenta un'istantanea delle condizioni socio-demografiche ed economiche dell'area oggetto di studio. Infine l'indice $TCVI_{emergency}$ rappresenta il livello di vulnerabilità delle infrastrutture stradali, durante uno specifico evento.

La Figura 4-4 mostra lo schema concettuale di calcolo del TCVI. Nella parte sinistra della figura sono riportati i tre indici di vulnerabilità riferiti alle componenti territoriali, sociali e di risposta dell'emergenza, calcolati sulla base di specifiche variabili caratteristiche e riferite a intervalli temporali differenti. La parte destra evidenzia come attraverso tecniche fuzzy si arrivi alla classificazione di tutti i fattori ed alla successiva aggregazione degli stessi. L'aggregazione dei tre indici di vulnerabilità, attraverso procedure di fuzzy overlay, consente di ricavare la mappa finale dell'indice cumulato di vulnerabilità TCVI. Le classi di vulnerabilità con cui vengono rappresentate a livello cartografico i diversi indici di vulnerabilità sono 5, da molto basso a molto alto.

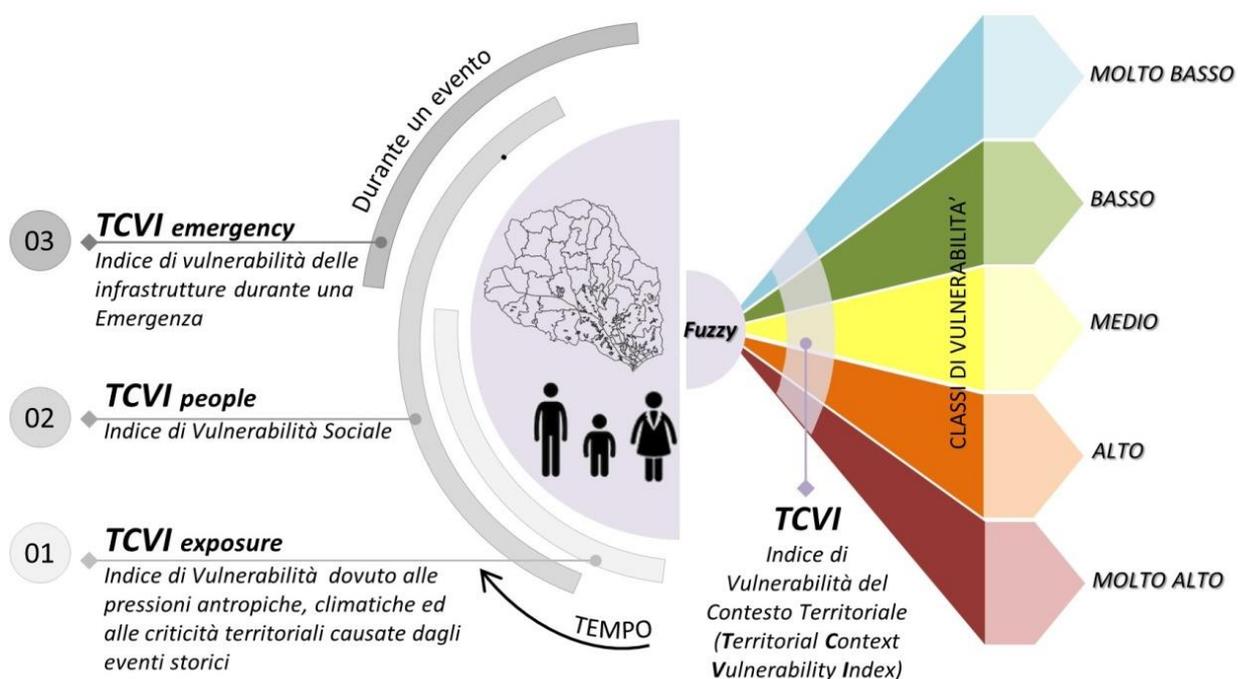


Figura 4-4. Schema concettuale dell'approccio di calcolo dell'Indice TCVI

La mappa dell'indice di vulnerabilità fornisce indicazioni sulle fragilità del Contesto Territoriale e sulla loro distribuzione spaziale, identificando le zone censuarie soggette ad alta densità abitativa, maggiore esposizione del territorio, maggiore presenza di infrastrutture e strutture e individuando problematiche riferite alla gestione operativa durante una emergenza.

Il metodo di calcolo delle due componenti $TCVI_{exposure}$ e $TCVI_{people}$ è di tipo induttivo e si basa sulla tecnica statistica multivariata delle Componenti Principali. In letteratura sono presenti diversi approcci di calcolo riferibili principalmente a tre diversi metodi: deduttivo, gerarchico e induttivo (Tate[98]). I modelli deduttivi contengono in genere meno di dieci indicatori che sono normalizzati e aggregati per ottenere l'indice finale (Figura 4-5a). Questo rappresenta la struttura più comunemente applicata (Wu *et al.*[71], Dwyer *et al.*[119], Lein and Abel[120]). Il metodo gerarchico impiega da dieci a venti indicatori separati in gruppi (sotto-indici) che condividono la stessa dimensione. I singoli sotto-indici sono poi aggregati per il calcolo dell'indice finale Figura 4-5b (Hebb and Mortsch[121], Flanagan *et al.*[122]). Gli approcci di calcolo induttivo iniziano con un'ampia serie di indicatori che sono ridotti a un insieme più piccolo di fattori latenti non correlati, utilizzando l'analisi delle Componenti Principali. I fattori vengono quindi aggregati per costruire l'indice finale (Figura 4-5c). I metodi induttivi sono nell'ultimo decennio quelli maggiormente utilizzati in letteratura e sono stati resi popolari dalla costruzione dell'Indice di Vulnerabilità Sociale (SoVI) (Borden *et al.*[15], Cutter[66], Burton *et al.*[63], Fekete[86], Fekete[123]).

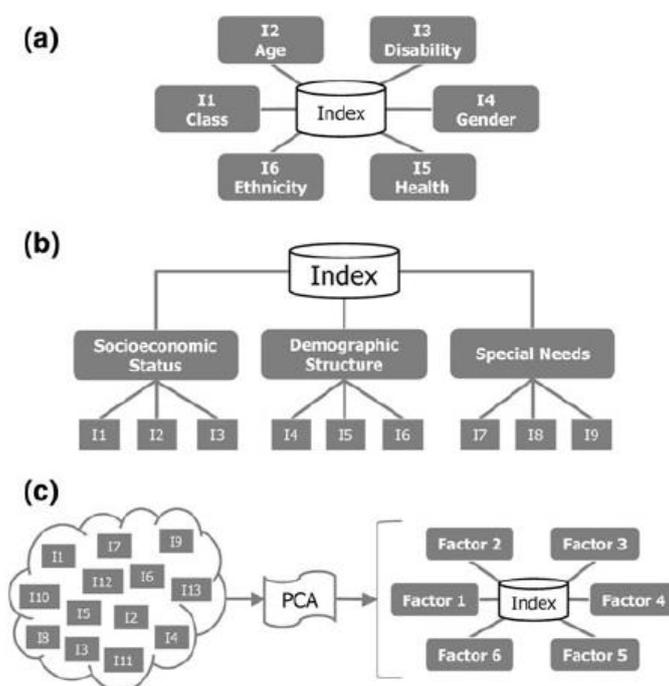


Figura 4-5. Schema generale delle diverse strutture di calcolo della vulnerabilità: a) approccio deduttivo; b) approccio gerarchico e c) approccio induttivo (fonte: Tate[98])

La metodologia di calcolo della componente $TCVI_{emergency}$ si basa su una modellazione dei trasporti con il calcolo specifico dei percorsi alternativi più brevi nel caso di eventi che comportano l'interruzione di tratti stradali.

Di seguito si riportano i dettagli degli approcci metodologici utilizzati per il calcolo dei tre indici modulari di vulnerabilità.

4.5.1 Analisi delle Componenti Principali -PCA

Questo lavoro propone l'uso del metodo statistico delle Componenti Principali PCA (*Principal Component Analysis*) per la creazione di due indici spaziali di vulnerabilità. Uno degli indici più conosciuti

ed utilizzati in letteratura che usa questo approccio metodologico è l'indice SoVI (*Social Vulnerability Index*) che quantifica la vulnerabilità sociale nell'ambito del modello concettuale HOP (Cutter *et al.*[25], Cutter[66], Cutter *et al.*[67]). Gli autori del SoVI hanno introdotto originariamente circa 250 variabili per la caratterizzazione degli aspetti sociali, ma a seguito degli opportuni test di multicollinearità ed analisi di qualità fra le variabili indipendenti ne sono state selezionate 42. L'indice si basa su una unità areale di base coincidente in generale con un'unità amministrativa territoriale come un distretto, una contea, una città, un comune. Esso utilizza variabili normalizzate e standardizzate che vengono definite punti z. Per un dato set di valori campionari x_i di una variabile x si calcola la media (μ) e la deviazione standard (σ), per poi normalizzarli mediante la trasformazione in punti zeta, che hanno media nulla e deviazione standard unitaria:

$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (4-1)$$

Si precisa che il metodo SoVI ottenuto attraverso PCA, non fornisce una completa caratterizzazione della vulnerabilità sociale, ma solamente una stima in base alle variabili che sono state reputate importanti relativamente alla zona di interesse. Inoltre, dal momento che l'indice è basato su variabili zeta normalizzate, non può rappresentare valori assoluti di vulnerabilità, ma è utile per confrontare la vulnerabilità sociale di diverse aree oggetto di studio. L'indice serve per identificare le caratteristiche spazialmente correlate e le zone dove c'è una maggiore concentrazione di popolazione più vulnerabile.

In questo studio il metodo delle Componenti Principali (PCA) è applicato su una base territoriale costituita dal Contesto Territoriale e dall'unità spaziale rappresentata dalla zona censuaria ISTAT. La PCA è una tecnica statistica multivariata per la semplificazione dei dati di origine, che converte un numero di variabili potenzialmente correlate in un numero inferiore di componenti principali non correlate che catturano la maggiore varianza dei dati iniziali. L'obiettivo della PCA consiste nell'individuare opportune trasformazioni lineari delle variabili osservate sintetizzando le informazioni raccolte. Un vantaggio della PCA è che può aiutare a mettere in evidenza le relazioni statistiche tra le variabili utilizzate nella valutazione spaziale della vulnerabilità. Il problema di ridurre la dimensionalità di un data-set fu proposto inizialmente da F. Galton (1869) con lo scopo di classificare un insieme di soggetti criminali in base a 12 misure di altrettante caratteristiche antropometriche fortemente correlate tra loro. Successivamente vennero forniti i primi argomenti a sostegno della massimizzazione delle varianze delle variabili trasformate, sia da un punto di vista teorico che applicativo. La versione attuale della teoria delle componenti principali è dovuta ad Hotelling[124].

Le variabili sono definite da una matrice \underline{X} , che in ogni colonna contiene dati rappresentativi scelti dall'utente, mentre le righe si riferiscono all'unità spaziale scelta come riferimento:

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} & \dots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & \dots & x_{2,n} \\ x_{3,1} & x_{3,2} & x_{3,3} & \dots & x_{3,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m,1} & x_{m,2} & x_{m,3} & & x_{m,n} \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

dove nel caso in esame (m,n) rappresentano rispettivamente gli indici riferiti al numero di zone censuarie ed alle variabili distribuite. Tale matrice, in coerenza con la metodologia GIS rappresenta la tabella degli attributi della mappa tematica georiferita degli elementi vettoriali delle aree censuarie

ISTAT. Data la matrice \underline{X} , contenente p variabili correlate tra loro, con la PCA si ottiene una matrice \underline{Y} composta da k variabili incorrelate tra loro, che risultano essere combinazione lineare delle prime. Le componenti principali vengono quindi determinate come combinazione lineare delle variabili originarie in modo tale da massimizzare il loro successivo contributo alla varianza totale dell'insieme. Di seguito vengono forniti alcuni dettagli matematici della procedura PCA.

Il primo step di analisi per eseguire la PCA è valutare l'idoneità dei dati (affidabilità e adeguatezza). Successivamente si procede con il calcolo della matrice di covarianza, che è una matrice simmetrica con varianze sulla sua diagonale e covarianze fuori diagonale. Una matrice di covarianza esprime la correlazione tra le diverse variabili nel set di dati. È essenziale identificare le variabili dipendenti perché contengono informazioni distorte e ridondanti, che riducono le prestazioni complessive del modello. La PCA richiede poi la valutazione degli autovettori e degli autovalori della matrice di covarianza. Per calcolare gli autovalori di una matrice \underline{C} è possibile risolvere la seguente equazione:

$$\det(\underline{C} - \lambda I) = 0 \quad (4-3)$$

dove λ è l'autovalore associato all'autovettore \underline{V} della matrice di covarianza \underline{C} . Riorganizzando l'equazione di cui sopra si ottiene $\underline{C}\underline{V} = \lambda\underline{V}$. La somma di tutti gli autovalori è uguale alla varianza totale nella matrice di dati originale \underline{X} . Ordinare gli autovettori diminuendo gli autovalori e scegliere k autovettori con l'autovalore più grande è un passaggio importante. L'autovettore con l'autovalore più alto è il più significativo e quindi costituisce la prima componente principale \underline{Y}_1 :

$$\underline{Y}_1 = \underline{V}_1 \underline{X} \quad (4-4)$$

Il vettore della componente principale indica essenzialmente una combinazione lineare delle variabili originali, basata sull'autovettore. L'ultimo passaggio nell'esecuzione della PCA consiste nel riorganizzare i dati originali con i componenti principali finali. Per sostituire l'asse dei dati originali con i componenti principali appena formati, è necessario moltiplicare la trasposizione del set di dati originali per la trasposizione del vettore di caratteristiche ottenuto. Quindi, in generale, il calcolo delle componenti principali si riduce alla soluzione di un problema di autovalore-autovettore per una matrice simmetrica semi-definita positiva. Tramite l'analisi degli autovalori, si selezionano i fattori che spiegano la maggior parte della varianza dei dati e analizzando le coordinate delle variabili si è in grado di determinare le variabili più rappresentate dai fattori selezionati. Le componenti principali devono soddisfare i seguenti requisiti e le seguenti proprietà:

- Non devono essere correlate;
- Devono essere ordinate in relazione alla quantità di variabilità complessiva che ciascuna di esse può sintetizzare, cioè in relazione a quanto è l'apporto di ciascuna componente alla variabilità complessiva;
- Le componenti principali non sono indipendenti dall'unità di misura delle variabili. Se si moltiplica una variabile osservata per un valore costante, la matrice di covarianza cambia determinando una corrispondente variazione delle componenti principali;
- Le componenti principali non variano per variabili standardizzate, mentre non è necessario standardizzare valori percentuali o rapporti tra grandezze che variano in intervalli limitati;
- Essendo \underline{C} una matrice simmetrica, gli autovalori λ associati sono reali, inoltre il rango della matrice \underline{C} coincide con il numero di autovalori λ non nulli.

Le componenti principali così determinate, non corrispondono a caratteristiche direttamente osservabili, e vanno di volta in volta interpretate. Si precisa che a seconda del rango della matrice \underline{C} si possono trovare fino a p componenti principali. Le informazioni principali possono di solito essere catturate in modo significativo da pochi componenti principali, in quanto più si considerano PC più diminuisce la varianza spiegata. I criteri adoperati per ridurre il numero delle componenti principali da p a k , con $p \geq k$ sono tre (criteri euristici):

1. Prendere solo quelle componenti che rappresentano l' 80-90% della variabilità complessiva, ovvero:

$$\frac{\lambda_1 + \dots + \lambda_K}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_K} \approx 80 - 90\% \quad (4-5)$$

dove il numeratore rappresenta la varianza delle prime k componenti principali, mentre il denominatore rappresenta la varianza di tutte le componenti principali.

2. Seguire la "Regola di Kaiser": prendere solo quelle componenti che hanno un autovalore maggiore o uguale ad uno, oppure, equivalentemente, le componenti che hanno varianza maggiore di quella media (ottenuta come media delle λ_i);
3. La scelta del numero di componenti (sufficienti a riprodurre con una buona approssimazione i dati di partenza) può essere fatta attraverso il grafico degli autovalori o "Screen Plot". All'interno del grafico si sceglie il numero di componenti corrispondente al punto di "gomito" della spezzata.

L'interpretazione delle componenti principali è una fase del metodo molto delicata, così come l'assegnazione della polarità (positiva o negativa) di ogni variabile rispetto alla vulnerabilità finale. Una variabile ha polarità positiva se un suo aumento provoca una crescita della vulnerabilità sociale, in caso contrario ha polarità negativa.

Si precisa che prima di applicare la tecnica della PCA le variabili d'origine sono state standardizzate. Infatti spesso accade che i dati d'origine, che si hanno a disposizione, siano caratterizzati da unità di misura non paragonabili tra loro oppure da ampiezze dei sotto-campioni molto diverse. In tali condizioni, non è possibile lavorare con il campione noto ma è necessario standardizzare le variabili aleatorie. A partire dal set di dati d'origine (equ.4.2) e nota la media μ e la deviazione standard σ delle popolazioni di appartenenza delle variabili x_i , il processo di standardizzazione è eseguito applicando la seguente espressione:

$$\left(\frac{x_1 - \mu_1}{\sigma_1}, \frac{x_2 - \mu_2}{\sigma_2}, \dots, \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right) \quad (4-6)$$

Ottenendo così un nuovo campione di variabili con media nulla e varianza unitaria. Per questo nuovo campione, si avrà che la matrice di covarianza coinciderà con la matrice di correlazione del campione di origine.

La PCA è stata applicata a delle variabili opportunamente selezionate, per il calcolo dell'indice di vulnerabilità $TCVI_{\text{people}}$ e $TCVI_{\text{exposure}}$. L'utilizzo di questa tecnica statistica di analisi multivariata, ha permesso quindi di valutare il grado di correlazione tra le variabili, la loro rilevanza, ridurre la dimensionalità dei dati di input e sintetizzare la loro descrizione.

4.5.2 Modellazione dei trasporti e calcolo del percorso stradale più breve

Durante il verificarsi di eventi naturali estremi, molte infrastrutture subiscono gravi danni con conseguenze dirette sulla popolazione locale. Danni registrati lungo le reti stradali infatti, possono indurre gravi disagi alla popolazione durante le operazioni di soccorso o di evacuazione. Spesso le

agenzie preposte alla gestione dell'emergenza si pongono come sfida dell' "ultimo miglio" quello relativo alla gestione della catena logistica: organizzare il trasporto nonostante i danni lungo le strade o i ponti e garantire soccorso quando, ad esempio, c'è scarsità di acqua, cibo e riparo, ecc... Il WorldRiskReport 2016, che ha affrontato questi temi, mette in luce come la logistica e l'infrastruttura giochi un ruolo cruciale nel determinare se un evento naturale estremo si trasforma o meno in un disastro (Garschagen *et al.*[20]).

Un numero sempre maggiore di scienziati e politici riconosce l'infrastruttura come un elemento importante nella valutazione del rischio (Gupta *et al.*[125]). La gestione delle infrastrutture critiche è molto importante soprattutto in regioni come la Calabria, dove eventi naturali o antropici provocano spesso danni alla rete stradale isolando frazioni interessate da insediamenti abitativi.

Per le ragioni di cui sopra il terzo indice di vulnerabilità $TCVI_{emergency}$ tiene conto del possibile disagio creato dall'interruzione delle strade durante un evento. Nelle ore successive al verificarsi di un evento calamitoso, la rete stradale può essere interessata da due componenti di traffico: flussi di spostamenti della popolazione che cerca di raggiungere luoghi sicuri; e flussi delle unità di soccorso verso le zone colpite. In Calabria in passato si è verificato con una certa frequenza che la chiusura di un ponte o di un tratto di strada danneggiati a causa di un evento, abbia provocato ingenti ripercussioni sulla circolazione e sulla connettività della rete stradale, fino all'impossibilità di soddisfare almeno temporaneamente parte della domanda di mobilità lasciando isolate alcune frazioni.

La letteratura in materia di analisi dell'importanza delle infrastrutture stradali, pone due diversi punti di vista: quella del singolo cittadino per la quale tutti i tratti di strada presentano uguale importanza; e quello sociale che considera i tratti stradali significativi in base al traffico e agli interessi economici e sociali (Jenelius *et al.*[108]).

In questo lavoro, si utilizza un approccio di calcolo dell'indice di vulnerabilità basato sui tempi di percorrenza, in un modello dei trasporti in cui avviene una interazione fra la domanda e l'offerta mediante modelli matematici. Il processo di simulazione è stato strutturato in quattro specifiche fasi:

1. Rappresentazione del modello di offerta;
2. Costruzione del modello di domanda;
3. Interazione tra domanda e offerta con modelli di assegnazione "All or Nothing";
4. Valutazione dei tempi di percorrenza in situazioni di normale funzionamento stradale e nel caso di tratti di strada interrotti.

Il **modello di offerta** è rappresentato dalla mappa vettoriale dell'infrastruttura stradale, contenente come attributi le caratteristiche principali riferite alla lunghezza, velocità, tempi e tipo di classificazione.

Per quanto riguarda la **domanda di trasporto**, essa è rappresentata dai punti di origine e destinazione degli utenti attraverso la definizione di una specifica matrice O/D (Origine/Destinazione). La matrice O-D si basa su una matrice quadrata bidimensionale di celle, in cui righe e colonne rappresentano ogni punto dell'area di studio. Come mostrato nella tabella successiva, le celle di ogni riga contengono i viaggi originati in quella zona che hanno come area di destinazione quella contenuta nelle colonne corrispondenti. Per semplificare questo processo di ricerca, nello studio proposto, Tij o Dij rappresentano il numero di viaggi tra l'origine *i* e la destinazione *j*, che includono rispettivamente residenti o occupanti temporanei (come i lavoratori) ed i soccorritori. Il numero di viaggi è stato ipotizzato in modo semplificativo sulla base delle informazioni ISTAT riferite ai lavoratori.

I punti di Origine O, coincidono con i centroidi delle zone censuarie ISTAT, mentre i punti di destinazione D sono rappresentati dagli elementi contenuti nella pianificazione di emergenza. In particolare sono

stati individuati gli elementi caratteristici dei piani di emergenza dei singoli comuni e quelli contenuti nelle linee guida riferite ai Contesti Territoriali come riportato di seguito:

- Aree di emergenza;
- Strutture operative del Servizio nazionale della protezione civile (Forze di polizia, Forze armate, Vigili del Fuoco, Associazioni di volontariato);
- Strutture strategiche (ospedali, Centro Operativo Misto, ecc.);
- Punti di accesso stradale esterno.

Zone	O_1	O_2	...	O_n	D_1	...	D_m
O_1	T_{11}	T_{12}	...	T_{1n}	T_{1D1}	...	T_{1Dm}
O_2	T_{21}	T_{22}	...	T_{2n}	T_{2D1}	...	T_{2Dm}
⋮
O_n	T_{n1}	T_{n2}	...	T_{nn}	T_{nD1}	...	T_{nDm}
D_1	D_{11}	D_{12}	...	D_{1n}	D_{11}	...	D_{1m}
⋮
D_m	D_{m1}	D_{m2}	...	D_{mn}	D_{m1}	...	D_{mm}

Tabella 4-1. Notazione della matrice O-D

Il **modello di trasporto** si compone di due parti essenziali individuate attraverso la componente fisica, rappresentata mediante un grafo di rete, e la componente funzionale, rappresentata invece da funzioni di costo che legano i costi di percorrenza con i flussi transitanti nel generico elemento. Il grafo di rete è formato dai seguenti insiemi:

- l'insieme dei nodi, rappresentanti punti particolari della rete (quali intersezioni) o punti in cui si ha una variazione di una o più caratteristiche fisiche e/o funzionali di un'infrastruttura (ad esempio una variazione dei limiti di velocità), o ancora punti iniziali e finali di un fenomeno di attesa;
- l'insieme degli archi (link), rappresentanti il collegamento tra una coppia di nodi;
- i centroidi, che rappresentano dei nodi fittizi che si inseriscono in corrispondenza dei punti di origine e destinazione;
- archi connettori che rappresentano elementi fittizi che si realizzano per collegare i nodi centroidi con i nodi fisici della rete stradale

Per quanto concerne la componente funzionale di un modello di offerta di trasporto, questa è formata dalla funzione di costo che lega flussi e costi d'uso sostenuti dall'utente. In questo caso la funzione di costo è rappresentata dal tempo di percorrenza e quindi legata alla lunghezza del tratto stesso ed alla velocità di percorrenza.

I **modelli di assegnazione** della domanda ad una rete di trasporto simulano l'interazione domanda offerta e consentono di determinare le caratteristiche del deflusso (ovvero degli adeguati indicatori di prestazione, quali i flussi di traffico sugli archi del modello di offerta, i tempi di percorrenza) in funzione del modello di scelta di percorso utilizzato, della tipologia delle funzioni di costo, della tipologia di utente e della dinamica periodale. Il modello di assegnazione utilizzato è quello semplificato "All or Nothing" in cui si ipotizza che gli utenti siano perfettamente informati, costi percepiti e costi oggettivi non si differenziano e quindi la scelta del percorso è di tipo deterministico. L'ipotesi di reti non congestionate inoltre corrisponde a funzioni di costo indipendenti dai flussi, quindi con costi di percorrenza fissi.

In questo lavoro in particolare, la vulnerabilità è valutata in termini di costo di viaggio sostenuto dall'utente. Esso è calcolato sulla base del tempo di viaggio ed è inteso come la misura della disutilità

complessiva legata allo spostamento. I costi di viaggio vengono stimati attraverso i modelli di interazione domanda/offerta e dipendono dalle caratteristiche della domanda e lo stato della rete. L'approccio di calcolo è simile a quello proposto da Taylor and D'Este[105]. Si assume che un evento calamitoso comporti la chiusura di tratti della rete stradale, con la conseguenza che i viaggiatori devono trovare una strada alternativa. I viaggiatori scelgono una strada che possa collegare i punti di origine con i punti di destinazione minimizzando i costi di viaggio. Questo significa che il costo del viaggio fra ogni origine e destinazione è definito in modo univoco. L'importanza dei tratti stradali all'interno della rete è valutata sulla base dell'incremento complessivo del tempo di viaggio a seguito della chiusura di un arco k danneggiato, utilizzando la seguente equazione:

$$\Delta c_{ij}^k = c_{ij}^k - c_{ij}^0 \quad (4-7)$$

Dove

- k è l'arco danneggiato di cui si calcola l'importanza;
- c_{ij}^k rappresenta il costo di trasporto da un nodo i a un nodo j con interruzione dell'arco;
- c_{ij}^0 rappresenta il costo di trasporto da un nodo i a un nodo j senza interruzione dell'arco;
- Δc_{ij}^k rappresenta la differenza di costo di viaggio tra le zone i e j con e senza interruzione dell'arco.

Si precisa che con l'aumento dei costi di viaggio si potrebbe verificare una grave conseguenza. Quando un elemento k è chiuso, la rete stradale si potrebbe dividere in più parti disconnesse. In questo caso i tempi di viaggio fra i nodi tendono all'infinito (Jenelius *et al.*[126]). Con l'obiettivo di fissare delle misure finite anche nelle situazioni più gravose di isolamento di alcuni punti, è introdotto il concetto di domanda insoddisfatta $u_{ij}^{(k)}$ definita come:

$$u_{ij}^k = \begin{cases} x_{ij} & \text{se } c_{ij}^k = \infty \\ 0 & \text{se } c_{ij}^k < \infty \end{cases} \quad (4-8)$$

In questo lavoro x_{ij} rappresenta un valore soglia introdotto nel caso di interruzione ed isolamento dei punti di origine con tempi di percorrenza tendenti all'infinito.

Tutta la parte di modellazione dei trasporti è stata fatta in ambiente GIS attraverso l'uso del *plugin* Aequilibrae (Camargo[127]). Il modello utilizza l'implementazione di Dijkstra con heap di Fibonacci per il calcolo dei percorsi più brevi. Assumendo una rete stradale caratterizzata da N nodi ed A archi, ad ogni arco (i,j) è attribuito un costo di viaggio c_{ij} . Il percorso più breve dai punti di origine ai punti di destinazione è calcolato sulla base dei tempi di percorrenza e quindi sui costi c_{ij} .

Utilizzando l'approccio metodologico sopra esposto, di seguito si sintetizzano gli step di calcolo utilizzati per la determinazione dell'indice di vulnerabilità $TCVI_{\text{emergency}}$:

- Si ipotizza uno scenario di rischio, inteso come la probabilità che una situazione di pericolo produca una emergenza;
- Si selezionano dalla mappa vettoriale della rete stradale, i tratti di strada interessati dal livello massimo di pericolosità e si ipotizza una loro chiusura;
- Attraverso l'iterazione domanda/offerta è avviata la modellazione e si valutano le differenze dei tempi di percorrenza nel caso della situazione della rete imperturbata e nel caso di interruzione dei tratti selezionati in precedenza;
- Nel caso non esistano percorsi alternativi, il tempo di percorrenza tende all'infinito e di conseguenza si assegna agli utenti dei centroidi interessati dal fenomeno di isolamento un valore soglia massimo;

- Si ricava una mappa vettoriale in cui ad ogni centroide delle zone censuarie ISTAT è assegnato un tempo di percorrenza, data dalla differenza di costo di viaggio Δc_{ij}^k .

4.5.3 Rappresentazione cartografica degli indici di vulnerabilità attraverso funzioni fuzzy

Per la classificazione delle mappe raster degli indici di vulnerabilità è stata utilizzata la logica fuzzy o teoria degli insiemi (Burrough[128]). Secondo la logica fuzzy, a ciascun elemento vengono attribuiti infiniti valori, compresi tra 0 e 1, che corrispondono ai gradi di appartenenza ad uno specifico insieme fuzzy (Zadeh[129]). La classe fuzzy è un insieme fuzzy, ossia un insieme di coppie ordinate costituite dal dato reale e dal grado di appartenenza:

$$A = \{x, \mu_a | x \in X\} \quad (4-9)$$

dove μ_a è la funzione di appartenenza, ossia quella funzione costituita da un intervallo di fuzzificazione variabile e che associa ad ogni valore reale un grado di appartenenza a quella particolare classe fuzzy. L'associazione della migliore funzione fuzzy, si basa sul giudizio ed esperienza del ricercatore. Le curve che vengono comunemente utilizzate per l'associazione delle funzioni di appartenenza sono quelle riportate nella figura successiva, di tipo lineare, triangolare, trapezoidale, gaussiana e sigmoidali (Figura 4-6).

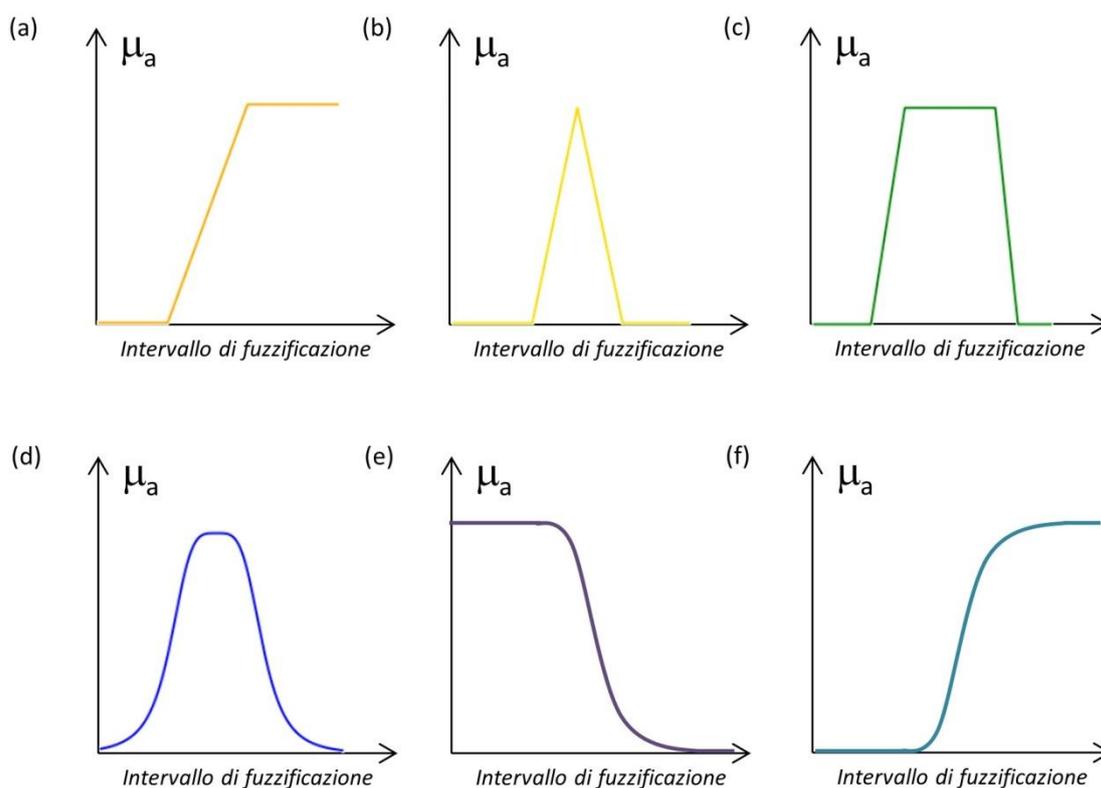


Figura 4-6. Funzione di appartenenza (μ_a): (a) lineare; (b) triangolare; (c) trapezoidale; (d) gaussiana; (e,f) sigmoidale

Il grado di appartenenza potrebbe facilmente indurre a confondersi con il concetto di probabilità, ma in realtà la differenza è sostanziale: la probabilità di un dato evento restituisce la frequenza relativa con cui possono presentarsi gli oggetti di un determinato insieme, mentre la funzione di appartenenza fornisce informazioni sulla somiglianza esistente tra un dato oggetto ed una proprietà definita in modo vago.

La logica fuzzy, rispetto la classica logica bivalente che si interessa solo di ciò che è completamente vero o falso, estende il suo interesse anche a ciò che non è completamente vero, a ciò che è verosimile od incerto. In pratica la logica fuzzy si basa su un approccio linguistico, in cui parole o frasi del linguaggio naturale vengono usate al posto dei numeri. Tale approccio, infatti, semplifica concetti e situazioni che potrebbero risultare complessi utilizzando la logica tradizionale. In particolare la logica fuzzy opera su entità matematiche che sono gli insiemi fuzzy. L'appartenenza ad un sottoinsieme, nella logica fuzzy, è associata ad un grado d'appartenenza (*degree of membership*). Il primo step di un modello fuzzy logic è la fuzzificazione del set di dati originali (*crisp set*), ossia la loro conversione in valori di appartenenza fuzzy (*fuzzy set*) compresi nell'intervallo [0,1], selezionando la funzione di appartenenza (*membership function*) più idonea a rappresentare il set di dati. Con l'operazione di fuzzificazione si normalizzano quindi tutti i dati nell'intervallo [0,1] consentendo la suddivisione in classi degli indici di vulnerabilità e quindi il successivo confronto fra gli stessi indici. In uno step successivo di analisi, sono applicate invece le regole di combinazione tra gli insiemi fuzzy (*fuzzy rules*) al fine di ottenere un risultato aggregato dell'indice di vulnerabilità. In letteratura sono molteplici le formulazioni linguistiche e le applicazioni di tali regole (Klir and Yuan[130]).

Questo studio include l'applicazione di tre funzioni di appartenenza, ritenute adatte a rappresentare i dati riferiti ai diversi indici di vulnerabilità: fuzzy linear, fuzzy large e fuzzy MS large.

Di seguito viene fornita una breve descrizione e l'espressione analitica della formula di queste funzioni (Raines *et al.*[131]):

- **Linear:** un'appartenenza lineare crescente o decrescente tra due valori di input da una forma sigmoidea linearizzata

$$\mu = 0 \text{ if } x < \min; \mu = 1 \text{ if } x > \max; \text{ otherwise } \mu = \frac{(x-\min)}{(\max-\min)} \quad (4-10)$$

Dove min e max sono dati di input inseriti dall'utente

- **Large:** l'appartenenza a tale funzione per grandi valori di input si riferisce ad una forma sigmoide

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{x-f_1}{f_2}} \quad (4-11)$$

dove f1 è lo *spread* e f2 è il punto medio (*midpoint*)

- **MSLarge:** forma sigmoidea definita dalla media e dalla deviazione standard dove grandi valori di input hanno grandi valori di appartenenza

$$\mu = 1 - \frac{bs}{x-am+bs} \text{ if } x > am; \text{ otherwise } \mu = 0 \quad (4-12)$$

Dove m=media, s= deviazione standard, b e a sono multipli inseriti dall'utente

Dopo la standardizzazione di tutte le mappe di vulnerabilità si è pervenuti ad un risultato finale aggregato utilizzando gli operatori fuzzy.

Le procedure di modellazione logica fuzzy sono state eseguite utilizzando alcune metriche statistiche. Per valutare infatti l'accuratezza delle funzioni di appartenenza sono state applicati i seguenti parametri: radice dell'errore quadratico medio (Root Mean Square Error -RMSE), errore medio assoluto (Mean Absolute Error -MAE), errore quadratico medio (Mean Squared Error -MSE) ed errore medio assoluto percentuale (Maximum Absolute Percentage Error -MAPE). Di seguito si riportano le espressioni analitiche di tali metriche di analisi:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (4-13)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (4-14)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4-15)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (4-16)$$

Dove y_i è il valore dell'indice di vulnerabilità \hat{y}_i è il valore della funzione di appartenenza ed n è il numero totale di osservazioni.

4.6 Metodologia di calcolo della pericolosità

Parallelamente all'attività di implementazione del metodo di calcolo della vulnerabilità a livello di Contesto Territoriale, è stata condotta una attività di ricerca che ha riguardato la modellazione dei fenomeni maggiormente frequenti sul territorio regionale: incendi boschivi, frane e alluvioni. In particolare con riferimento agli incendi boschivi è stata condotta una lunga fase di ricerca in collaborazione con l'UOA "Politiche della Montagna, Foreste Forestazione e Difesa del Suolo" della Regione Calabria mirata all'individuazione delle variabili che maggiormente influenzano la probabilità di innesco e propagazione degli incendi boschivi. Sono stati individuati i fattori predisponenti e determinanti ed è stato implementato un metodo di calcolo che ha consentito l'elaborazione della mappa di suscettibilità da incendio boschivo. La modellazione della pericolosità legata ai processi di frane superficiali è stata condotta attraverso l'uso di Shalstab, mentre la modellazione idraulica delle aree allagabili nella zona riferita all'ultimo tratto del corso d'acqua di interesse, caratterizzata da una maggiore densità abitativa, è stata condotta attraverso il programma HEC-RAS con modellazione bidimensionale.

I dettagli di tali analisi sono riportati nel capitolo successivo (Capitolo 7).

5 Caso studio: il Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica

Il Contesto Territoriale (CT) scelto come caso studio in tale lavoro di ricerca è quello di Marina di Gioiosa Ionica. Esso si compone dei seguenti comuni: Gioiosa Ionica; Grotteria; Mammola, Marina di Gioiosa Ionica, Martone e San Giovanni di Gerace (Figura 5-1). Il perimetro risulta interamente compreso nell'Unione dei Comuni Valle del Torbido, ed il Comune di Riferimento (CR) è quello di Gioiosa Ionica, in quanto sede COM e sede dell'Unione dei Comuni, con funzioni integrate di protezione civile.

La scelta di tale CT è stata fatta sulla base dell'analisi delle ordinanze di protezione civile in cui si è visto che negli ultimi 10 anni il territorio in esame ha registrato diversi eventi estremi di tipo idrogeologico con ingenti danni ed effetti al suolo. Nello stesso periodo il Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica ha subito ingenti danni, generati da incendi boschivi.

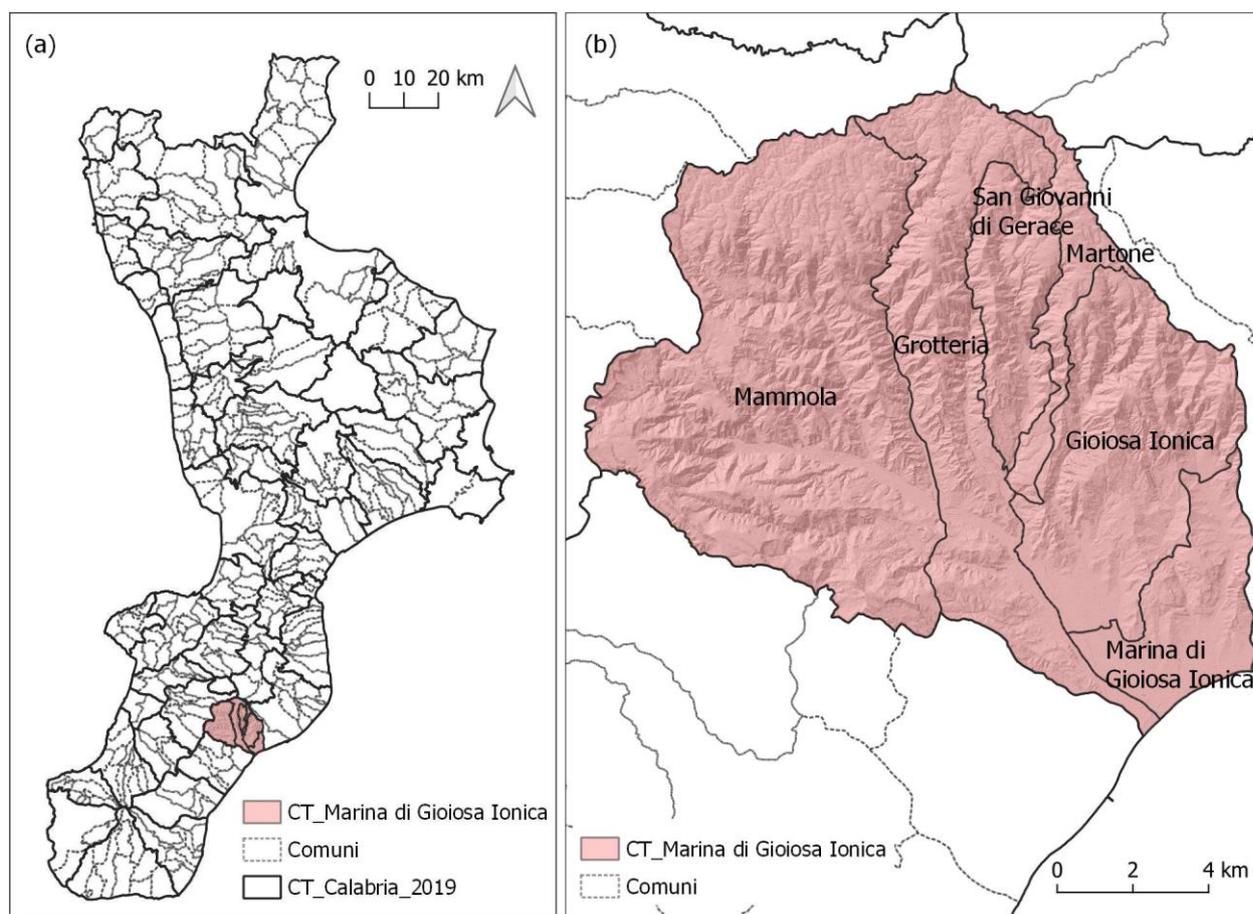


Figura 5-1. Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica: a) inquadramento generale su base regionale; b) limiti amministrati del Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica

Come mostra la Tabella 5-1, il CT è costituito da piccoli comuni con popolazione inferiore a 10'000 abitanti. La popolazione totale del CT al 1° gennaio 2020, secondo i dati ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica) risulta pari a 20'145 abitanti. Il numero totale di zone censuarie analizzate è pari a 195. La Figura 5-2 mostra la distribuzione spaziale della popolazione del CT.

COMUNE	AREA (kmq)	POPOLAZIONE ISTAT(2011)	POPOLAZIONE ISTAT (2020)	NUMERO ZONE ISTAT
Mammola	81.07	2971	2648	30
Martone	8	554	510	5
Grotteria	37.9	3272	3030	83
Marina di Gioiosa Ionica	15.9	6515	6477	22
Gioiosa Ionica	35	7014	7045	49
San Giovanni di Gerace	13.3	537	435	6
Totale	191.2	20'863	20'145	195

Tabella 5-1. Caratteristiche fisiche e demografiche del Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica

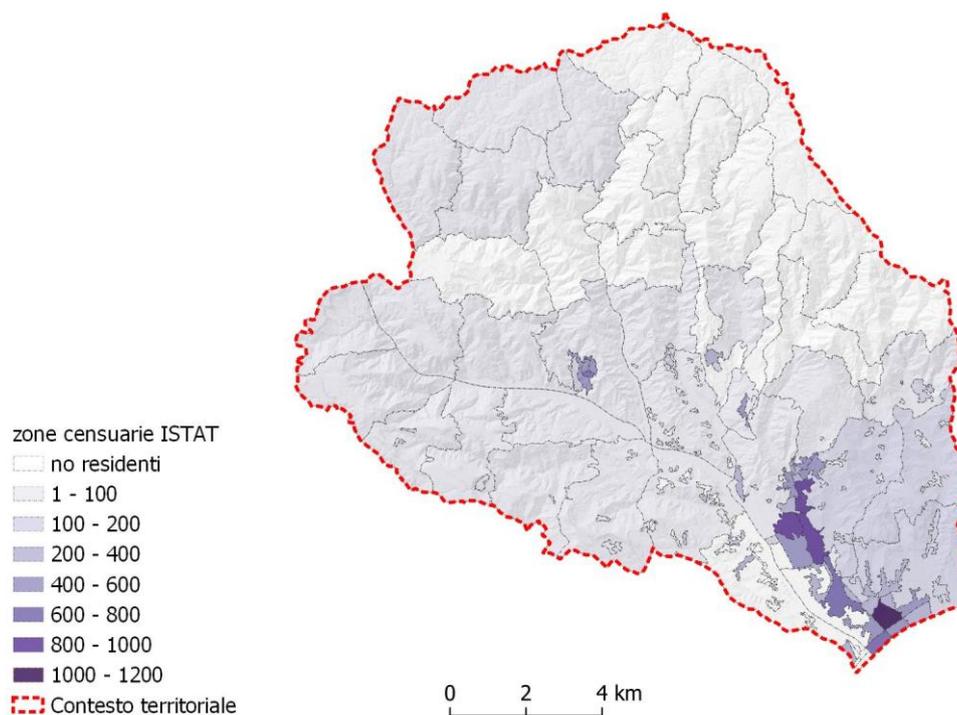


Figura 5-2. Distribuzione spaziale della popolazione nel Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica

5.1 Inquadramento territoriale

L'area di studio del Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica si trova nella provincia di Reggio Calabria, nella parte sud-est della Calabria. Si tratta di un territorio con una estensione pari a circa 191 km² (Figura 5-3). La quota massima risulta pari a circa 1'216 mq mentre la quota media è pari a 535 mq.

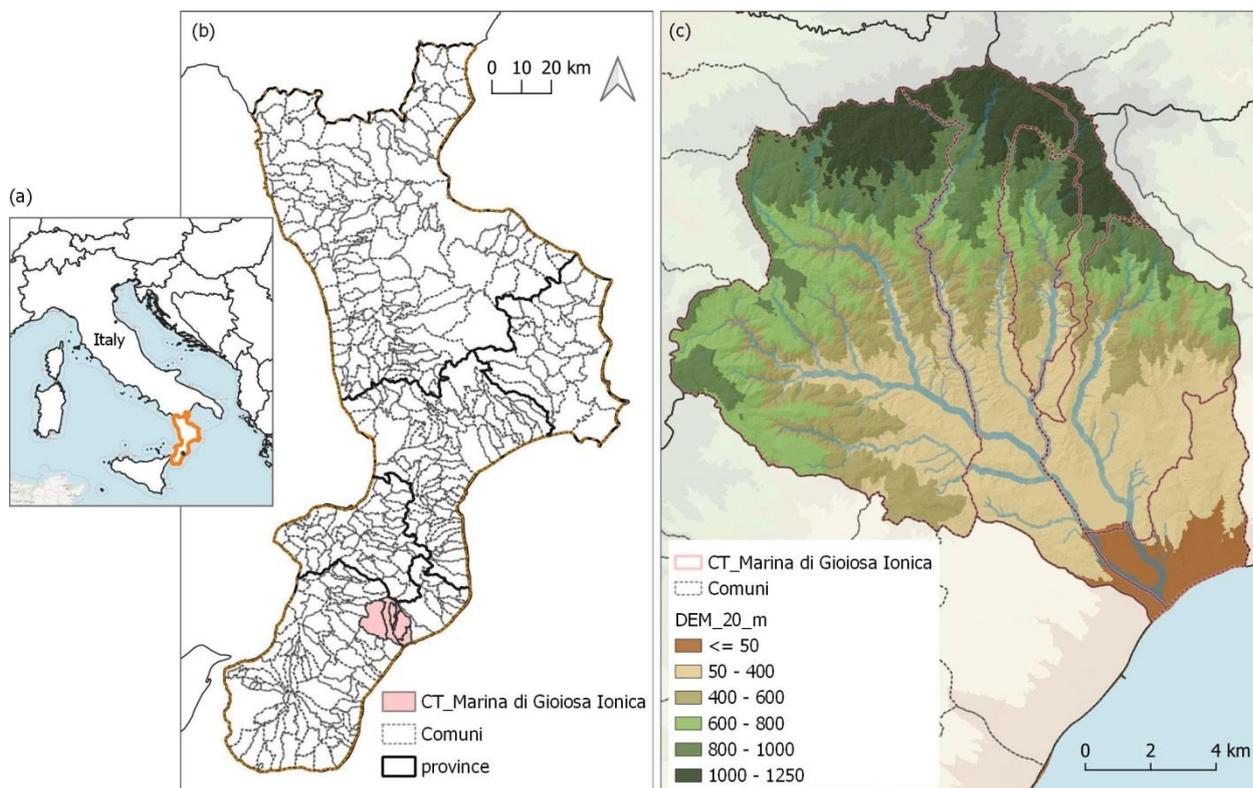


Figura 5-3. Inquadramento territoriale del Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica: (a) overview Europa; (b) inquadramento amministrativo regione Calabria; (c) modello digitale del terreno del Contesto Territoriale

L'assetto topografico del territorio è valutato attraverso due mappe quella della pendenza e quella dell'esposizione, ricavate attraverso tecniche di geoprocessing dal DTM con risoluzione a 1m (Figura 5-4). La pendenza dei versanti è un fattore molto importante in quanto maggiore è l'inclinazione di un pendio, maggiore è la tendenza al dissesto per effetto della gravità e dell'azione degli agenti atmosferici, in assenza soprattutto della protezione fornita dalla vegetazione. La pendenza è un fattore molto importante anche per il fenomeno degli incendi, in quanto influenza la velocità di propagazione del fuoco, soprattutto nelle fasi iniziali. L'esposizione influisce invece, sui processi di radiazione solare, in quanto i versanti esposti a nord sono quelli più freddi e umidi, mentre quelli esposti a sud hanno condizioni più miti.

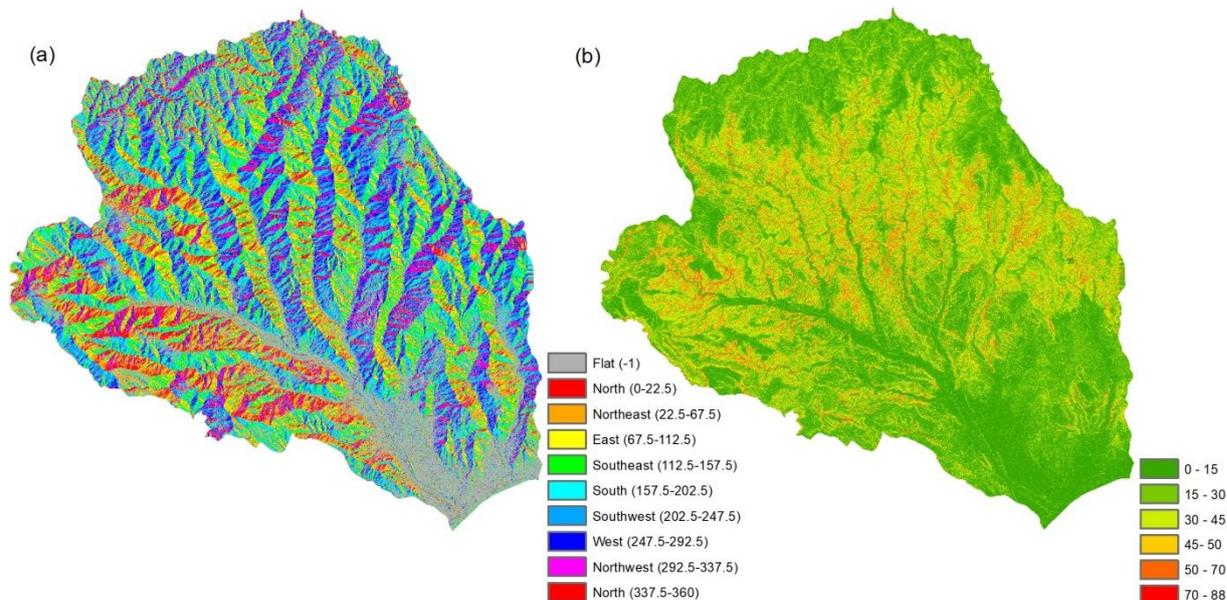


Figura 5-4. Inquadramento territoriale: (a) carta dell'esposizione; (b) carta della pendenza (gradi)

La Figura 5-5 mostra la Carta dell'Uso del Territorio (CUT), redatta dalla Regione Calabria e classificata su vari livelli sulla base di una serie di codici standard analoghi a quelli della Corine Land Cover. I codici stratificati per livelli rappresentano in modo univoco le tipologie d'uso del suolo. Secondo tale mappa, circa il 62 % del Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica è interessato da territori boscati ed altri ambienti seminaturali, circa il 29 % è caratterizzato da territori agricoli, una piccola percentuale pari al 6% è costituita da territori modellati artificialmente, mentre il restante 3% del territorio è classificato come corpo idrico.

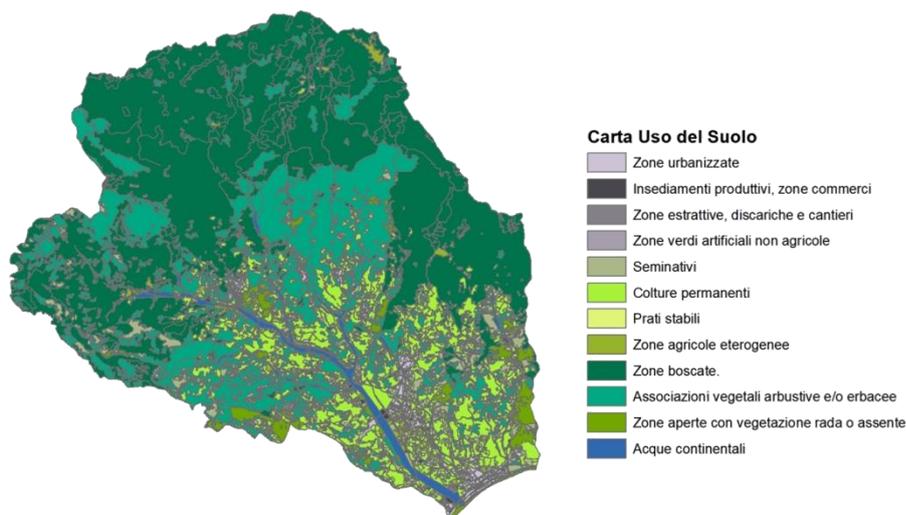


Figura 5-5. Carta dell'uso del suolo del CT di Marina di Gioiosa Ionica

5.2 Inquadramento urbanistico

La Figura 5-6 mostra la mappa dell'edificato presente nel Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica e delle infrastrutture stradali. Come si vede dalla carta degli edifici abitativi, la zona dove si concentra la maggior parte degli abitanti è quella relativa alla zona sud-est del CT. Poco abitata invece la zona dell'entroterra interessata anche dalla presenza di diverse strutture abbandonate o disabitate.

Il territorio presenta una importante rete infrastrutturale, molte le strade provinciali e statali. In particolare esso è attraversato: dalla strada statale 682 Jonio-Tirreno (SS 682), nota anche come strada di grande comunicazione trasversale Jonio-Tirreno (Gioiosa-Rosarno) che costeggia il torrente Torbido; dalla strada statale 106 Jonica (SS106); dall'ex strada statale 501 di Mongiana (SS 501), ora strada provinciale ed altre importanti reti di collegamento.

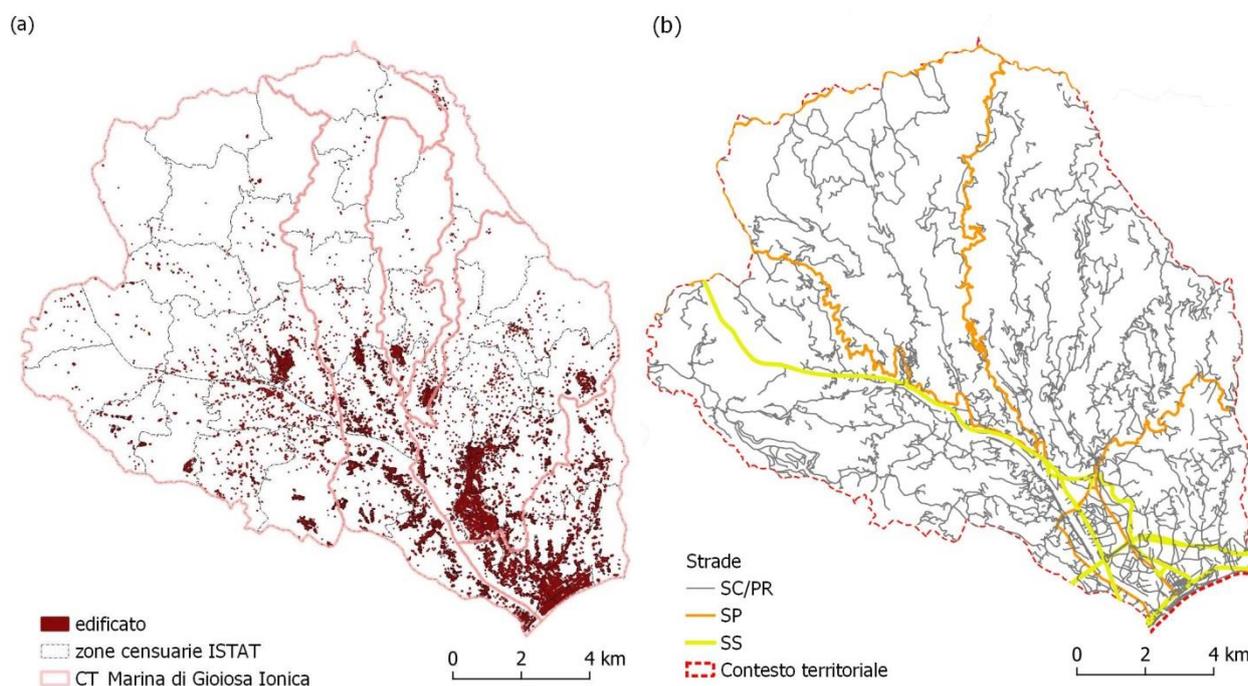


Figura 5-6. Inquadramento urbanistico: (a) limiti amministrativi delle zone censuarie ISTAT e distribuzione spaziale degli edifici presenti sul territorio; (b) rete stradale con indicazione della tipologia SS(strada statale), SP (strada provinciale, SC/PR (strada comunale e/o privata)

5.3 Inquadramento climatico

La conoscenza del clima, con riferimento soprattutto ai dati storici, permette di identificare l'assetto climatico della zona, nonché i cambiamenti climatici avvenuti e quelli in corso. Le serie temporali dei dati climatici sono elaborate utilizzando i dati del Centro Funzionale Multirischi dell'ARPACal. La variabilità climatica riguarda sia i valori medi delle variabili climatiche che le loro distribuzioni statistiche, basate su indicatori statistici rappresentativi (ISPRA[132]). L'Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) del "CCL/CLIVAR Working Group on Climate Change Detection" ha definito un insieme di 27 indici, idonei a descrivere gli estremi di temperatura e precipitazione in termini di frequenza, intensità e durata.

In questo lavoro sono stati presi come riferimento i seguenti indicatori:

- **RX1day**: valore massimo di precipitazione giornaliera;

- **RX5day**: valore massimo di precipitazione cumulata su 5 giorni;
- **TXn**: valore minimo delle temperature massime giornaliere;
- **TXx**: valore massimo delle temperature massime giornaliere;
- **TNx**: valore massimo delle temperature minime giornaliere;
- **TNn**: valore minimo delle temperature minime giornaliere;

Il territorio in esame ricade nella zona VAPI di tipo Ionica I3. La Figura 5-7 riporta la distribuzione spaziale delle stazioni meteo. Si precisa che sono state considerate solo quelle stazioni prossime al territorio in esame e con una disponibilità dei dati riferita al periodo 1990-2020.

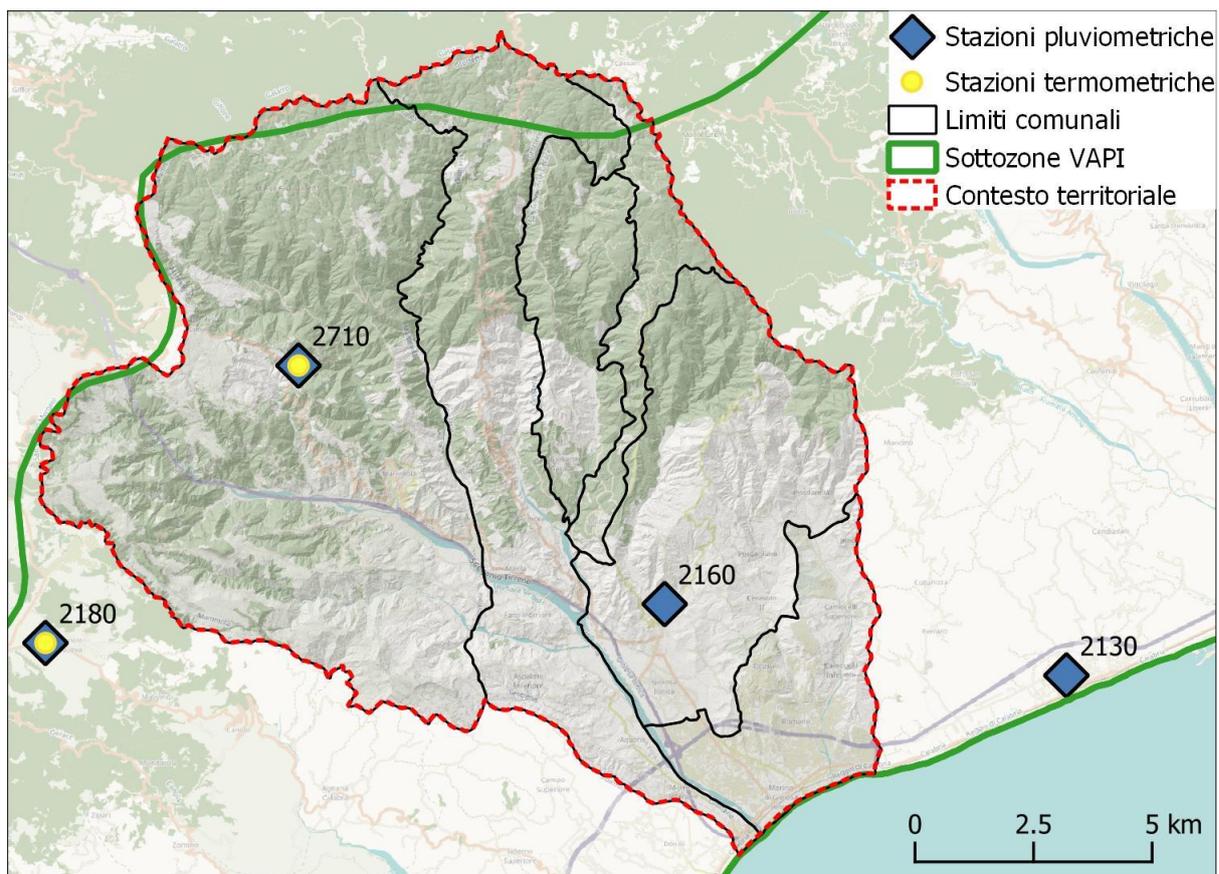


Figura 5-7. Localizzazione delle stazioni pluviometriche e termometriche

Di seguito si riportano le distribuzioni delle serie storiche di dati di precipitazione e temperatura riferite alle stazioni prossime o contenute nei limiti amministrativi del Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa. Alcuni dati annuali non sono stati processati a causa della incompletezza del dataset dei dati meteo, registrati dalle stazioni di monitoraggio.

Nelle figure successive sono riportate le serie storiche dei dati di pioggia dal 1990 al 2019 (Figura 5-8, Figura 5-10, Figura 5-12 e Figura 5-14). I dati si riferiscono ai massimi annuali RX1day e RX5day.

Le seguenti figure (Figura 5-9, Figura 5-11, Figura 5-13 e Figura 5-15) fanno riferimento alle anomalie annuali, calcolate come differenza fra i valori massimi giornalieri e il loro valore medio, nel periodo 1990-2019. Nelle stazioni di monitoraggio si evidenziano dei picchi significativi di pioggia negli anni 1990, 2000, 2015 e 2016.

Le immagini Figura 5-16/Figura 5-19 mostrano le serie storiche delle temperature minime e massime. La media delle temperature minime risulta pari a circa 10°C. Mentre la media delle temperature massime risulta pari a circa 16 °C.

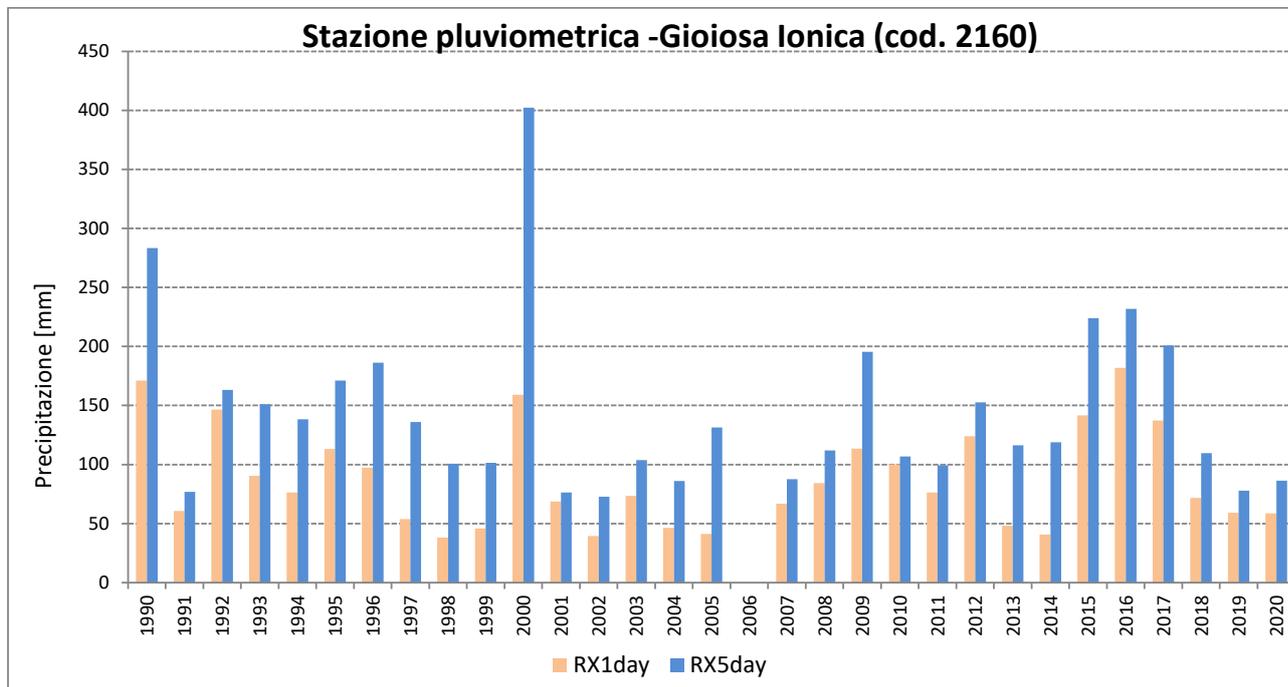


Figura 5-8. Distribuzione del valore massimo di precipitazione giornaliera registrato in 1 giorno (RX1day) (fonte: CFM ARPACal)

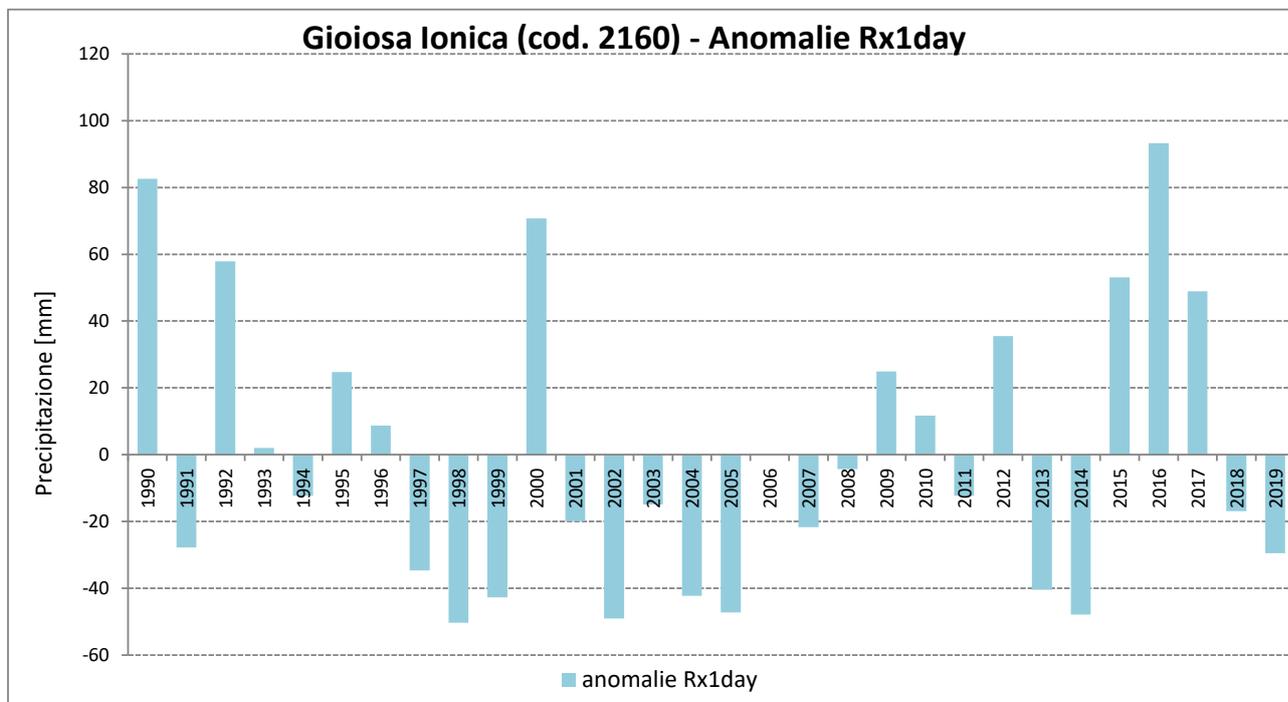


Figura 5-9. Serie delle anomalie medie annuali del massimo annuale di precipitazione giornaliera, RX1day, rispetto al valore medio 1990-2019

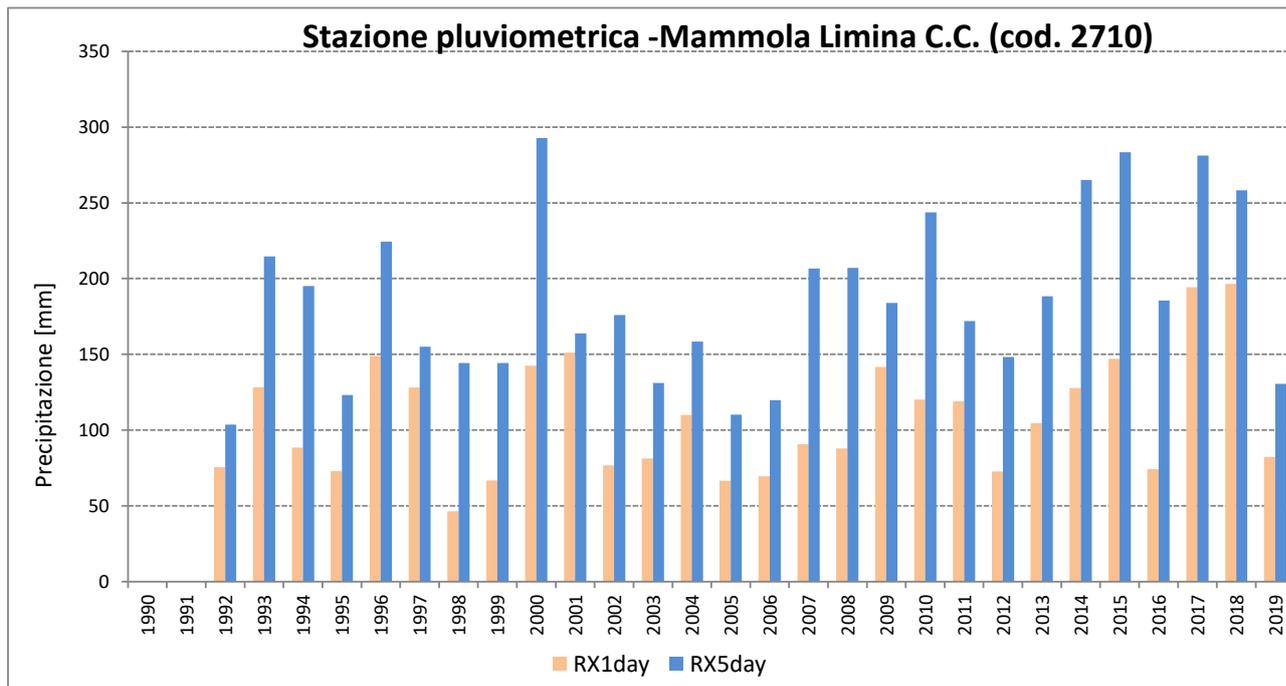


Figura 5-10. Distribuzione del valore massimo di precipitazione giornaliera registrato in 1 giorno (RX1day) (fonte: CFM ARPACal)

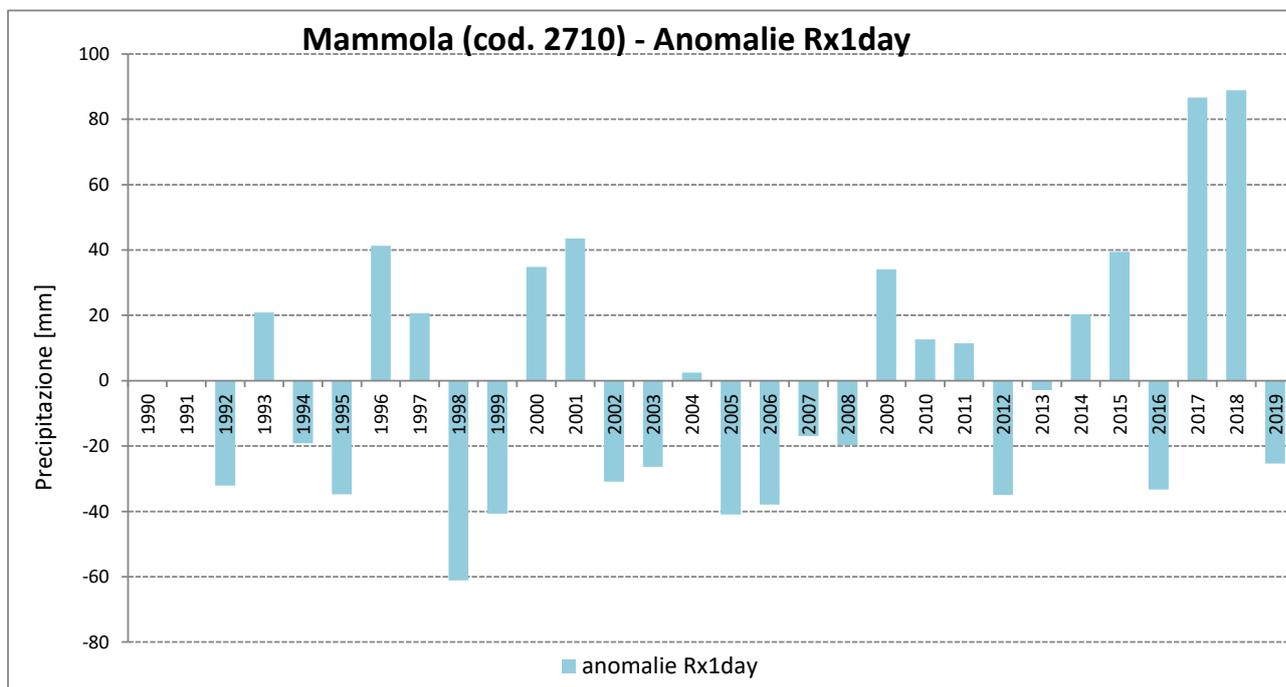


Figura 5-11. Serie delle anomalie medie annuali del massimo annuale di precipitazione giornaliera, RX1day, rispetto al valore medio 1990-2019

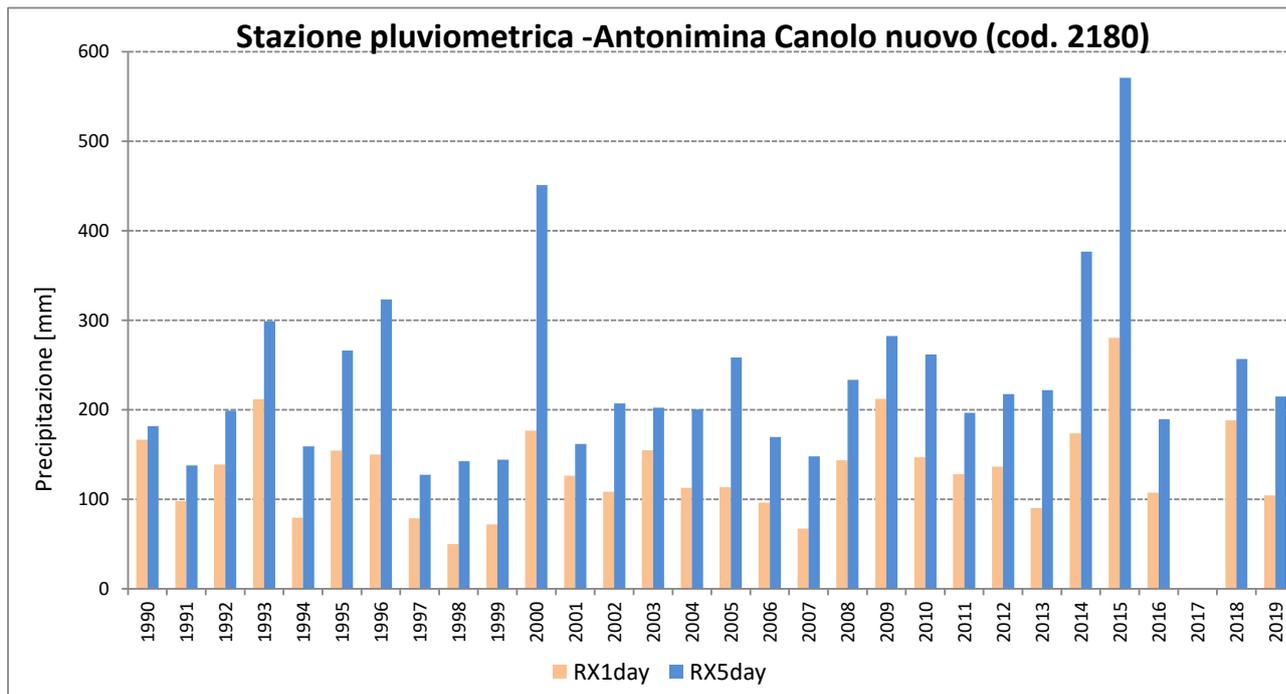


Figura 5-12. Distribuzione del valore massimo di precipitazione giornaliera registrato in 1 giorno (RX1day) (fonte: CFM ARPACal)

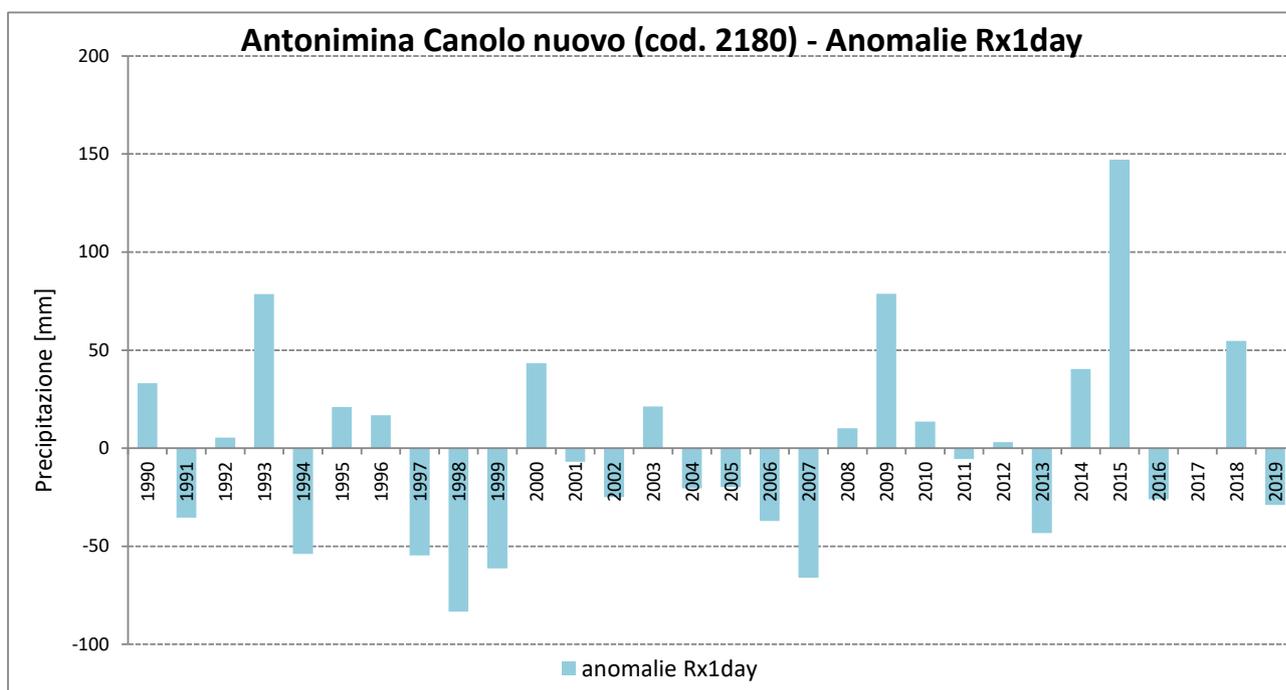


Figura 5-13. Serie delle anomalie medie annuali del massimo annuale di precipitazione giornaliera, RX1day, rispetto al valore medio 1990-2019

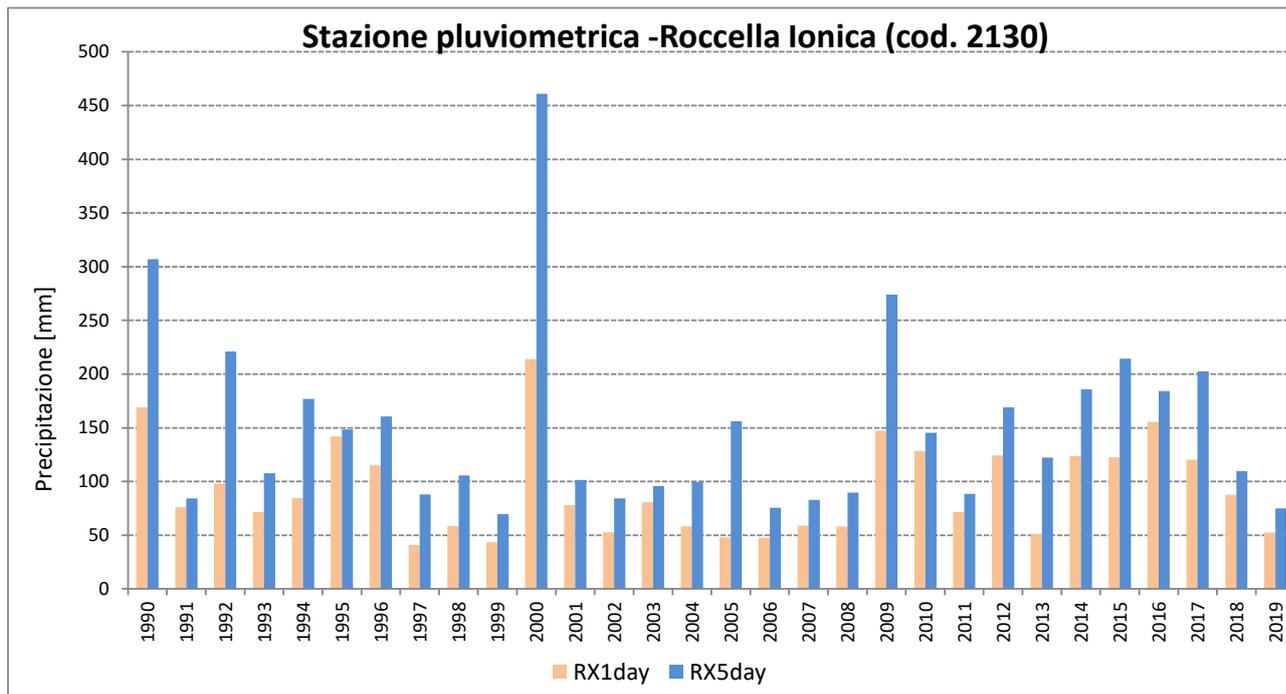


Figura 5-14. Distribuzione del valore massimo di precipitazione giornaliera registrato in 1 giorno (RX1day) (fonte: CFM ARPACal)

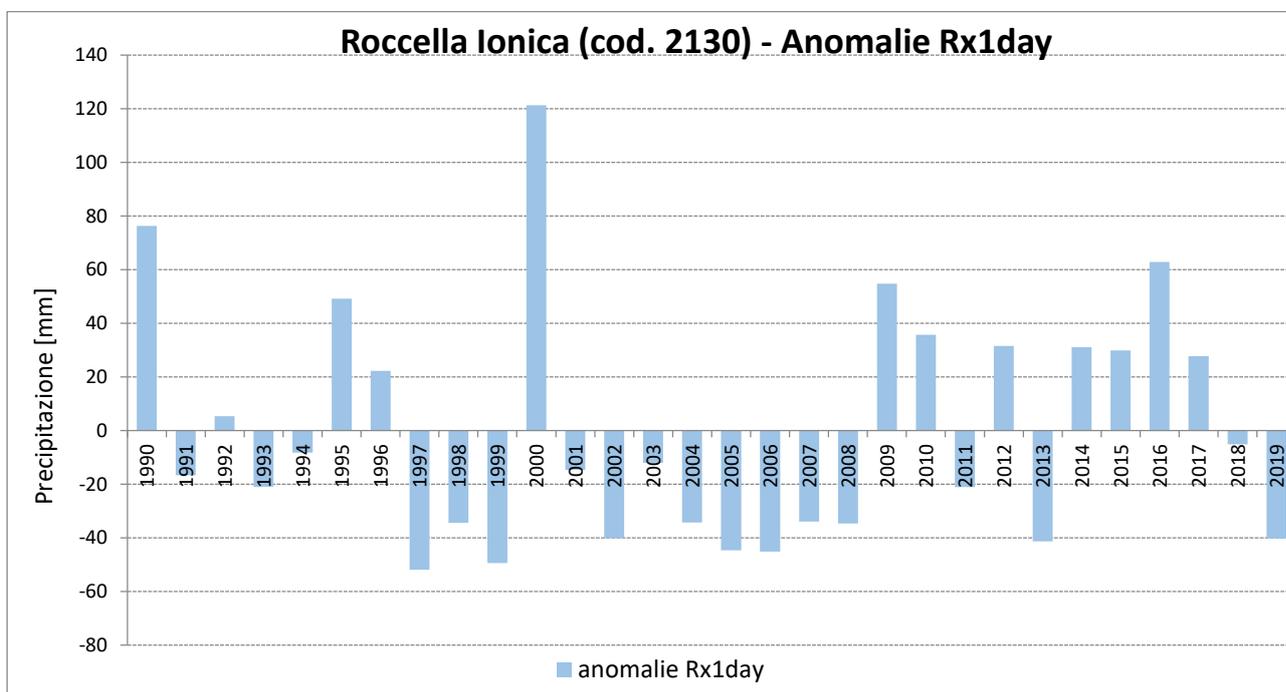


Figura 5-15. Serie delle anomalie medie annuali del massimo annuale di precipitazione giornaliera, RX1day, rispetto al valore medio 1990-2019

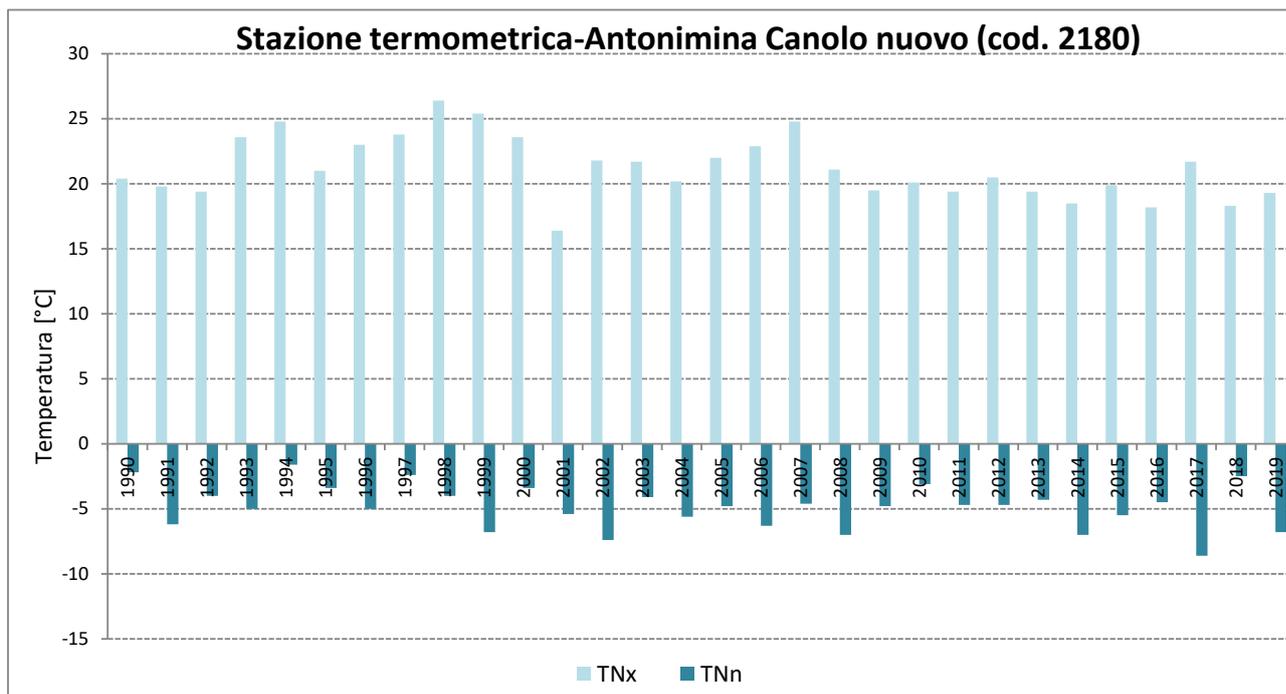


Figura 5-16. Distribuzione del massimo annuale delle temperature minime TNx e del minimo annuale delle temperature minime TNn (fonte: CFM ARPACal)

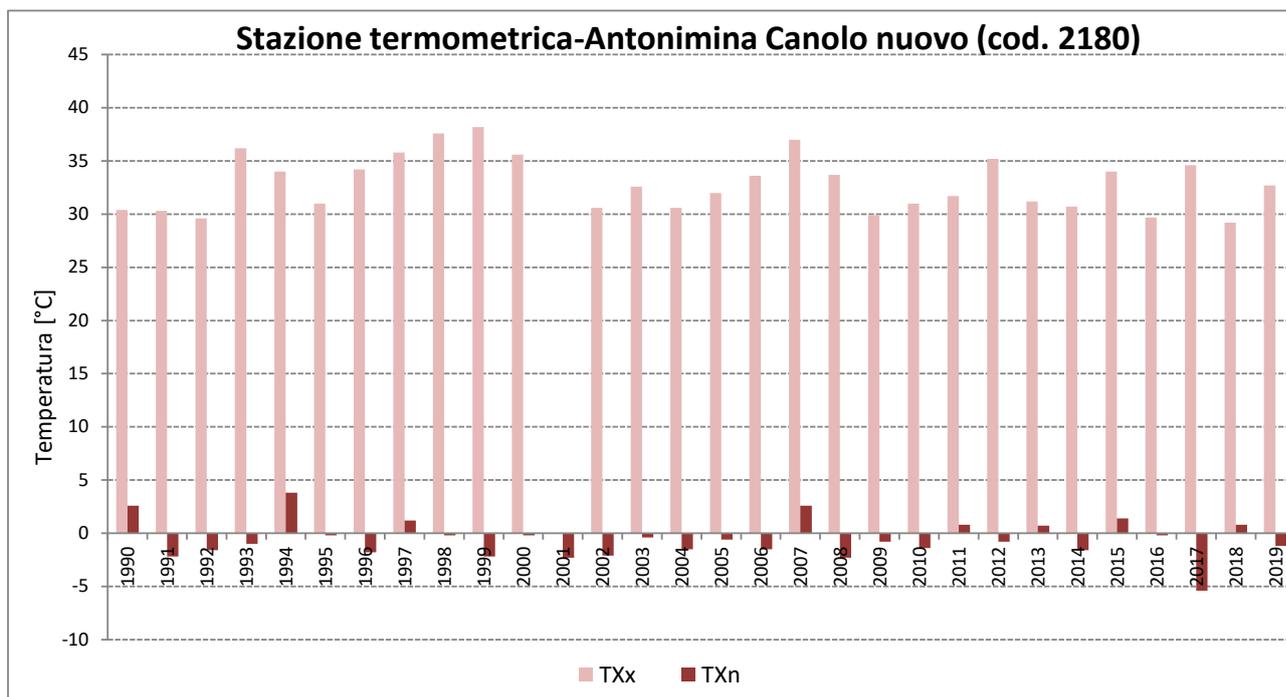


Figura 5-17. Distribuzione del massimo annuale delle temperature massime TXx e del minimo annuale delle temperature massime TXn (fonte: CFM ARPACal)

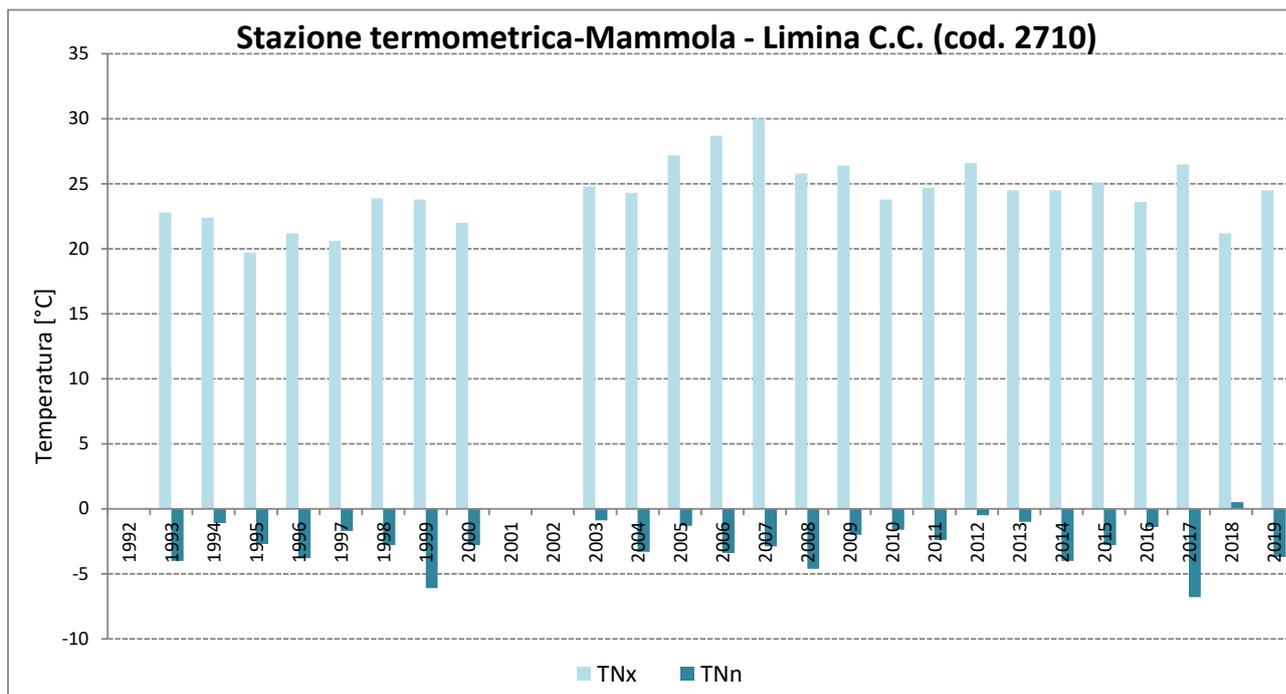


Figura 5-18. Distribuzione del massimo annuale delle temperature minime TNx e del minimo annuale delle temperature minime TNn (fonte: CFM ARPACal)

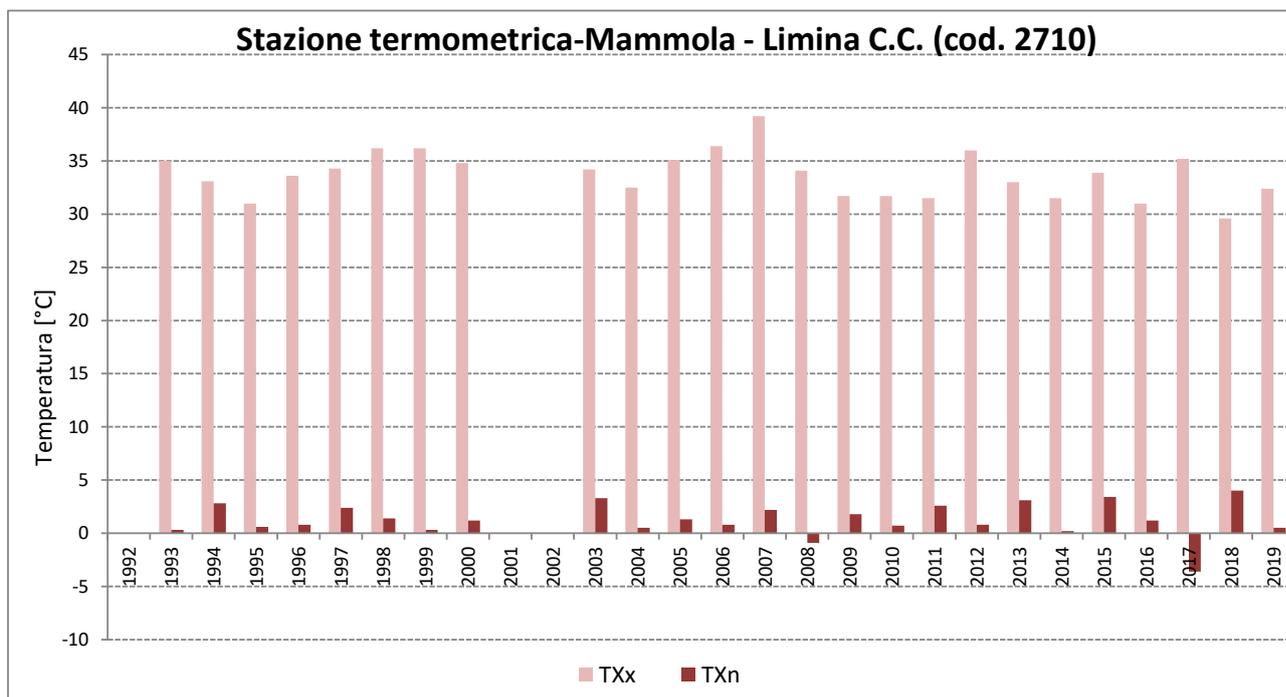


Figura 5-19. Distribuzione del massimo annuale delle temperature massime TXx e del minimo annuale delle temperature massime TXn (fonte: CFM ARPACal)

6 Modellazione e metodologie usate per la definizione delle mappe di pericolosità

In questo lavoro sono stati analizzati i tre scenari di rischio maggiormente frequenti sul territorio regionale: rischio frana, idraulico e incendi boschivi. Essi costituiscono un tema di grande rilevanza su scala locale ma anche globale, a causa degli impatti sulla popolazione, sulle infrastrutture lineari di comunicazione e sul tessuto economico e produttivo. Un livello di pianificazione spesso non adeguato, combinato con il fenomeno di forte urbanizzazione di alcune aree ha portato negli anni a un considerevole aumento degli elementi esposti nonché della vulnerabilità delle persone e delle strutture. L'abbandono delle aree rurali montane e collinari ed il declino delle attività pastorali ha causato un cambiamento del paesaggio e un aumento dei livelli di pericolo (Trigila *et al.*[21]).

Di seguito si riportano i metodi di calcolo implementati per l'elaborazione delle mappe di pericolosità da incendio boschivo, alluvione e frana. Le carte tematiche prodotte forniscono una importante indicazione sulle aree maggiormente interessate da alti livelli di suscettibilità.

6.1 Pericolosità incendio boschivo

La mappa di suscettibilità degli incendi boschivi è stata elaborata all'interno di un progetto di ricerca sviluppato in collaborazione con l'U.O.A. Politiche della Montagna, Foreste Forestazione e Difesa del Suolo della regione Calabria. Lo studio su base regionale, si basa sull'elaborazione non solo dei fattori predisponenti, quali aspetti fisici e climatici, ma anche sulla base dei fattori determinanti, legati al comportamento dell'uomo sia esso volontario o non. I fattori predisponenti sono stati calcolati sulla base delle caratteristiche topografiche, climatiche e di uso del suolo (elevazione, pendenze, esposizione, precipitazione, evapotraspirazione e usi del suolo). Con riferimento invece ai fattori determinanti uno degli obiettivi del lavoro è stato quello di elaborare una specifica mappa delle zone di probabile innesco. Quest'ultima è stata ricavata attraverso procedure di geoprocessing partendo dall'analisi di un consistente dataset riferito agli incendi che hanno interessato il territorio regionale in esame dal 2008 al 2019. La banca dati costituita da 9751 aree percorse da incendio e n. 7530 punti di innesco validati, è stata integrata da informazioni cartografiche quali infrastrutture viarie, insediamenti abitativi, aree agricole e forestali, al fine di determinare l'influenza della attività umana nel fenomeno dell'innesco degli incendi.

La Tabella 6-1 mostra i criteri e sotto criteri utilizzati nell'approccio metodologico.

Obiettivo	Criterio	Sotto-Criterio
Mappa della suscettibilità	F1 Pendenza	-
	F2 Esposizione	-
	F3 Uso del suolo	-
	F4 Indice climatico	-
	F5a	Distanza dalle strade
	F5b	Distanza dalle zone insediative
	F5c	Distanza dalle aree agricole

Tabella 6-1. Criteri e sotto criteri utilizzati nel calcolo della mappa di suscettibilità degli incendi boschivi

Di seguito si riportano alcune informazioni sui criteri utilizzati.

6.1.1 Dataset e approccio metodologico dei criteri di analisi

Dataset Incendi

Lo studio è stato reso possibile dalla disponibilità dei dati degli incendi boschivi registrati sul territorio regionale dal 2008 al 2019. Il dataset è stato utilizzato nella fase di processing per la definizione della carta delle zone di probabile innesco, utilizzando i punti di innesco riferiti al periodo 2008-2015, consistente nell'80% dell'intero dataset. Nella fase di validazione invece si è fatto riferimento al 20% dei dati areali disponibili 2016-2019, al fine di valutare l'accuratezza finale del modello.

F1, F2- Pendenza ed Esposizione

Il fattore topografico ha una grande influenza sul comportamento del fuoco ed è stato valutato in termini di pendenza (F1) ed esposizione (F2). L'impatto della pendenza e dell'esposizione è ampiamente riportato in letteratura (Chuvieco and Congalton[133]). La pendenza è un fattore molto importante che influenza la velocità di propagazione del fuoco, soprattutto nelle fasi iniziali. In una pendice che presenta un'inclinazione compresa tra 10° e 15°, la velocità di propagazione è doppia rispetto ad una superficie piana ed è quadrupla se l'inclinazione è di 25°(BLASI C. *et al.*[134]). L'esposizione di un terreno invece, influenza la quantità di radiazione solare che viene recepita localmente e quindi l'umidità e la temperatura del suolo e dell'aria.

F3 - Usi del suolo

I diversi tipi di uso del suolo (F3) influenzano direttamente il comportamento del fuoco e l'intensità del fronte di fiamma. Dalle caratteristiche della vegetazione dipendono sia la quantità sia le dimensioni del combustibile vegetale. Finora, molti studi hanno dimostrato la forte relazione spaziale tra gli incendi e l'uso del suolo (Cochrane and Laurance[135], Eskandari *et al.*[136], Pourtaghi *et al.*[137]). Per la copertura forestale si è fatto riferimento alla CUT, la quale presenta una classificazione elaborata nel rispetto della legenda Corine Land Cover (<https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/corine-land-cover-nomenclature-guidelines/html>). Le classi forestali presi in considerazione risultano: 311 (Boschi di latifoglie), 312 (Boschi di conifere), 313 (Boschi misti di conifere e latifoglie), 321 (Aree a pascolo naturale e praterie di alta quota), 322 (Cespuglieti e arbusteti), 323 (Aree a vegetazione sclerofilla), 324 (Aree a vegetazione arborea e arbustiva in evoluzione) e 333 (Aree con vegetazione rada).

La Carta di Uso del Territorio (CUT) utilizzata è stata redatta dalla regione Calabria e ritenuta di congruo livello di dettaglio poiché realizzata attraverso la fotointerpretazione di ortofoto digitali di alta definizione con scala 1:10.000.

F4 – Indice climatico

Il fattore climatico (F4) influisce direttamente sul tipo e sulla quantità di vegetazione coinvolta nell'incendio, in quanto agisce sull'umidità dell'aria e conseguentemente anche quella del combustibile. Il comportamento del fuoco nel corso di un incendio boschivo, ma anche la probabilità di innesco è strettamente rapportata all'umidità del combustibile. Come è noto infatti, le zone più colpite dagli incendi sono anche quelle caratterizzate da lunghi periodi di siccità. Il fattore climatico è calcolato in questo studio, sulla base dei principali fenomeni meteorologici che agiscono sugli incendi boschivi: precipitazioni ed evapotraspirazione. L'indice climatico è stato calcolato attraverso la formula di Thornthwaite Moisture Index, TMI (Mather[138]).

$$TMI = 100 \left(\frac{P}{PET} - 1 \right) \quad (6-1)$$

Dove P (mm) rappresenta la precipitazione media annua e PET (mm) la evapotraspirazione media annua. I dati di precipitazione e temperatura media mensile, che hanno consentito di determinare l'evapotraspirazione e l'indice climatico, sono stati acquisiti dal portale dell'Arpacal (Agenzia Regionale per la protezione dell'ambiente) per il periodo dal 1955 al 2019 (<https://www.cfd.calabria.it/index.php/dati-stazioni>). I dati di tipo puntuale sono stati spazializzati attraverso tecniche di interpolazione spline: si è adoperato tale tecnica in quanto consente di ottenere risultati che non si discostano rispetto a metodi più sofisticati quali ad esempio il metodo del kriging, in ragione dell'orografia del territorio in esame. I dati interpolati sono stati corretti successivamente attraverso un coefficiente di regressione riferito alle quote all'interno delle diverse zone omogenee individuate per il territorio di studio. L'evapotraspirazione è stata elaborata attraverso una procedura statistica di regionalizzazione sul territorio in esame, basata sull'equazione di Hargreaves and Smani, 1985 (Sun *et al.*[139], Senatore *et al.*[140]).

F5 – Zone di probabile innesco

La mappa delle zone di probabile innesco si basa sullo studio preliminare riferito ai punti di innesco registrati nel territorio oggetto di studio dal 2008 al 2019. Innanzitutto sono state effettuate delle elaborazioni preliminari al fine di compilare il dataset di analisi. In particolare sono state effettuati i seguenti controlli:

- Verifica alfanumerica del database dei punti di innesco;
- Rappresentazione vettoriale dei punti di innesco;
- Verifica dell'adeguatezza del Sistema di riferimento geografico e delle coordinate, adottando il sistema UTM WGS84 fuso 33 N;
- Sovrapposizione dei punti di innesco con le relative aree percorse da incendio, con eliminazione dei punti di innesco ricadenti all'esterno di tali aree al fine di verificare la corrispondenza tra il punto di innesco e la rispettiva area percorsa da incendio;

Tali passaggi hanno comportato l'eliminazione di circa il 23% dei punti di innesco, rispetto al numero totale di incendi registrati dal 2008 al 2019.

Validato il database spaziale, come sopra descritto, attraverso tecniche di geoprocessing sono stati individuati gli usi del suolo che interferivano con i predetti punti di innesco. In particolare è stata valutata l'incidenza dei punti di innesco su determinate categorie di uso del suolo a partire da quelle maggiormente trattate in letteratura (Chuvieco and Congalton[133], Martínez *et al.*[141], Vega-Garcia *et al.*[142], Yang *et al.*[143], Arndt *et al.*[144]).

Questa elaborazione ha consentito di individuare i tre sub-criteri ossia quelle categorie di uso del suolo che presentano la massima vicinanza con i punti di origine degli incendi. È stato riscontrato che la maggior parte dei punti di origine dell'incendio presenta una massima vicinanza dalla rete stradale, dai centri abitativi e dalle zone agricole.

Con riferimento alla rete stradale le elaborazioni sono state così condotte: si è proceduto ad una selezione dei soli tratti stradali prossimi alle zone boscate ed agli ambienti seminaturali (livello 3 della CUT) in quanto, al fine di poter originare un incendio è necessaria la presenza della vegetazione. Successivamente per evitare che le zone di innesco interessassero porzioni isolate del territorio, come piccoli cespuglieti adiacenti alla rete stradale, è stata effettuata una selezione spaziale, in ambiente GIS. In particolare sono state prese in considerazione solo le classi 321 (Aree a pascolo), 322 (Cespuglieti e

arbusteti) e 333 (Aree con vegetazione rada), confinanti con le classi forestali di maggiore estensione e valore 311, 312, 313 (boschi latifoglie, conifere e misti).

Per quanto riguarda gli insediamenti abitativi, sono stati selezionati a livello cartografico le zone di interfaccia a 200 m, rispetto i poligoni vettoriali afferenti alle zone abitative dei nuclei e centri abitati, seguendo le indicazioni fornite dalle linee guida del Dipartimento della Protezione Civile Nazionale. Successivamente sono state selezionate solo quelle zone ricadenti nelle aree boscate e negli ambienti seminaturali (livello 3 della CUT). Anche in questo caso per le classi 321,322 e 333 sono state selezionate a livello spaziale solo quelle confinanti con le classi dei boschi 311,312 e 313 della CUT.

Per le zone agricole sono state prese in considerazione tutte le zone appartenenti al livello 2 della CUT e confinanti con le zone boschive 311,312 e 313.

Le tre mappe di cui sopra, sono state successivamente rasterizzate ed elaborate in ambiente GIS al fine di ottenere una carta delle distanze progressive fra i punti di innesco degli incendi dal 2008 al 2016 e le zone di interesse (strade, insediamenti e aree agricole). Infine in base al diagramma delle distribuzioni dei punti di innesco in funzione delle distanze progressive dai predetti elementi, sono state individuate delle funzioni di appartenenza fuzzy. La teoria degli insiemi fuzzy, introdotta da Zadeh nel 1965 è ampiamente utilizzata come approccio di modellazione in diversi studi scientifici e discipline (Zadeh[129], Pradhan[145], Pourghasemi *et al.*[146], Feizizadeh *et al.*[147]). In base all'andamento dei dati relativi alla distribuzione di frequenza dei punti di innesco è stata scelta la funzione di appartenenza fuzzy che più si adatta al campione (Sigmoidal Membership Function). Tale funzione ha consentito di assegnare valori compresi tra 0 e 1, ad ogni pixel delle tre mappe delle distanze, sopra analizzate.

Infine tutti i sotto-criteri analizzati sono stati combinati mediante l'utilizzo di tecniche di analisi multicriteriale AHP (Analytic Hierarchy Process), finalizzate all'implementazione di un sistema GIS, spazialmente distribuito. Alcuni dettagli della tecnica AHP sono forniti nel paragrafo successivo.

La carta delle zone di probabile innesco è stata ottenuta tramite il seguente algoritmo additivo in cui i coefficienti di ciascun sub-criterio sono stati ottenuti attraverso la procedura AHP:

$$0.5396 * F5a + 0.2970 * F5b + 0.1634 * F5c \quad (6-2)$$

I sub-criteri considerati sono: F5a (distanza dalle strade), F5b (distanza dagli insediamenti abitativi) e F5c (distanza dalle zone agricole).

La mappa finale cumulativa delle zone di probabile innesco è stata ricavata applicando i pesi ottenuti dall'analisi multicriteriale (Figura 6-2d).

6.1.2 Elaborazione mappe cartografiche dei criteri

Di seguito si riporta uno schema con indicazione dei livelli di importanza con cui sono stati classificati i criteri in funzione del potenziale pericolo di incendio (Tabella 6-2). I valori pari a 1 sono associati alle classi che presentano una bassissima influenza sulla pericolosità di incendio boschivo, mentre al contrario valori pari a 5 alle classi che presentano un alto livello di importanza in quanto posseggono un'alta influenza sulla pericolosità da incendio boschivo. I valori riportati in ogni intervallo si riferiscono a studi presenti in letteratura con adattamenti alle caratteristiche territoriali dell'area oggetto di studio (Marchetti *et al.*[150], Ariapour and Shariff[151], Setiawan *et al.*[152], Jaiswal *et al.*[153]).

Importance level	Slope F1	Aspect F2	Land use F3	Climate F4	Fire ignition F5
Very low (1)	0-5°	N	-	Wet	0-20
Low (2)	5-15°	NE, NW	Broad-leaved forest (311) Mixed forest (313)	humid temperate	20-40
Moderate (3)	15-25°	E,W	Coniferous forest (312)	-	40-60
High (4)	25-35°	Flat,SE	Transitional woodland-shrub (324) Sparsely vegetated areas (333)	Warm temperate	60-80
Very high (5)	>35°	S,SW	Natural grasslands (321) Moors and heathland (322) Sclerophyllous vegetation (323)	Semi-arid	80-100

Tabella 6-2. Livelli di importanza dei cinque criteri utilizzati nel calcolo della mappa di suscettibilità

Le figure successive (Figura 6-1 e Figura 6-2) mostrano le distribuzioni spaziali dei criteri utilizzati in tale metodologia, realizzate utilizzando i livelli di importanza assegnati nella precedente tabella.

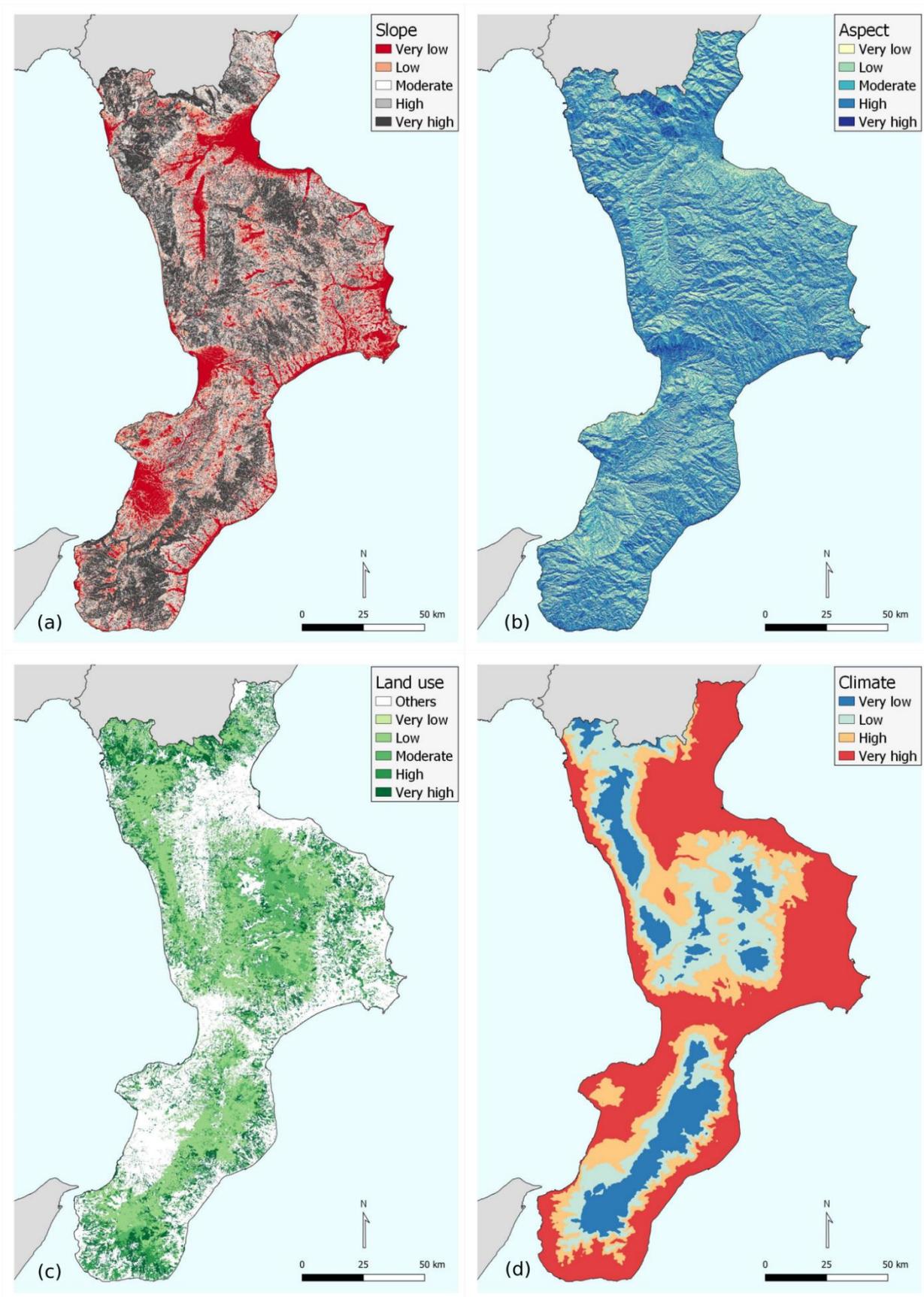


Figura 6-1. Distribuzione spaziale dei quattro criteri utilizzati: (a) pendenza; (b) esposizione; (c) usi del suolo e (d) indice climatico

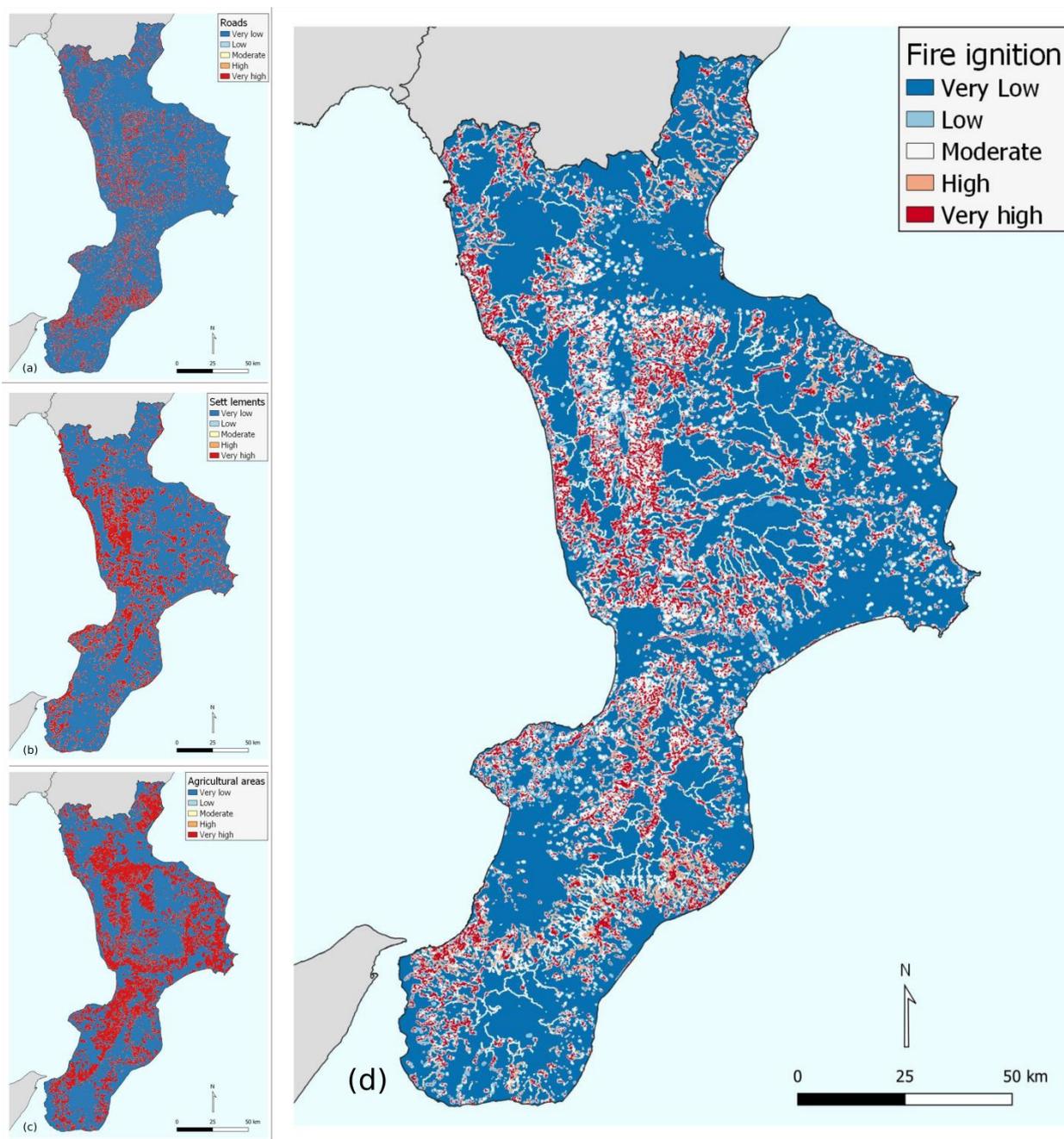


Figura 6-2. Distribuzione spaziale delle zone di probabile innesco: (a) distanza dalle strade; (b) distanza dagli insediamenti abitativi; (c) distanza dalle zone agricole e (d) mappa finale cumulativa delle zone di probabile innesco.

6.1.3 Analisi multicriteriale (AHP) e mappa finale di suscettibilità degli incendi boschivi

La mappa finale di suscettibilità degli incendi boschivi è stata ricavata sulla base dei pesi ottenuti dall'analisi multicriteriale (AHP). L'Analytic Hierarchy Process di Saaty, è una delle più flessibili tecniche di analisi multicriteriale (Saaty[148], Saaty[149]). Il metodo si basa su una serie di giudizi determinati in base ad una struttura gerarchica multilivello al fine di ottenere delle priorità da assegnare a ciascun criterio per il raggiungimento di un obiettivo specifico. L'applicazione del metodo ha consentito di ottenere la carta dei probabili inneschi e la carta della suscettibilità partendo dalla struttura gerarchica definita in Tabella 6-1. Nello specifico per ciascun raggruppamento della struttura gerarchica è stata eseguita una comparazione a coppie di ogni elemento del gruppo rispetto a tutti gli altri secondo la scala di valori di Saaty, esprimendo l'importanza relativa tra due fattori (Tabella 6-3).

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
estrema	molto forte	forte	moderata	equivalente	moderata	forte	molto forte	estrema
Meno importante			importante			molto importante		

Tabella 6-3. Scala di Saaty

La comparazione a coppie per ogni criterio della gerarchia consente di ottenere il peso relativo di ogni elemento di un livello rispetto agli altri. Tale fattore peso fornisce una misura dell'importanza relativa di ogni elemento per il decisore.

La consistenza del metodo AHP è stata definita utilizzando il rapporto $CR = \frac{CI}{RI}$, con $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$ dove CR indica il rapporto di consistenza, CI indica l'indice di consistenza, RI è un indice di generazione random, λ_{max} è il massimo autovalore della matrice e n il numero dei criteri. Un valore nullo di CI indica la perfetta consistenza della matrice; valori positivi crescenti indicano inconsistenze crescenti. Il valore unitario si ha per totale inconsistenza della matrice e indica la totale casualità delle preferenze attribuite ai criteri. Se il valore di CR risulta inferiore o uguale a 0.1, la matrice può essere considerata consistente e il vettore dei pesi è ben rappresentativo dell'insieme delle preferenze relative dei criteri. In tal caso, si suole affermare che l'incertezza nell'attribuzione dei pesi è eliminata dal consenso raggiunto. Se, invece, CR risulta maggiore di 0.1 è necessario procedere alla riattribuzione dei valori di importanza relativa.

In definitiva le fasi della metodologia dell'analisi multicriteriale AHP, possono così riassumersi:

- Individuazione dell'obiettivo specifico: ogni volta che si applica la procedura è fondamentale fissare chiaramente l'obiettivo specifico che si intende perseguire;
- Scelta dei criteri: ossia degli elementi su cui basare la decisione;
- Normalizzazione dei fattori: ciascun elemento considerato è espresso in unità di misura e valori diversi. È necessario, per poterli confrontare, procedere ad un processo di normalizzazione. Le mappe prodotte sono caratterizzate da valori contenuti nel range tra 0 e 100;
- Calcolo dei pesi (w) per l'aggregazione, basato sull'applicazione del metodo AHP. Per calcolare i pesi si usa la scala di valori di Saaty, basata su un confronto a coppie dei vari criteri;
- Calcolo del rapporto di consistenza, finalizzato a valutare l'entità delle inconsistenze che possono essere evidenziate nel processo di comparazione;

Nella tabella successiva (Tabella 6-4) è riportata la matrice dei pesi, ricavata attraverso procedura AHP, dove ogni riga contiene il valore di ogni attributo rispetto ad ogni alternativa.

	F1	F2	F3	F4	F5	w
(F1) pendenza	1	1	3	2	2	0.11
(F2) esposizione	1	1	3	2	2	0.11
(F3) usi del suolo	1/3	3	1	1	2	0.3207
(F4) indice climatico	1/2	1/2	1/2	1	2	0.2772
(F5) zone di probabile innesco	1/2	1/2	1/2	1/2	1	0.1821
CR= 0.01						

Tabella 6-4. Matrice dei pesi AHP

Con riferimento alla tabella, di cui sopra, è stata ricavata la carta di suscettibilità attraverso il seguente algoritmo additivo:

$$0.11 * F1 + 0.11 * F2 + 0.3207 * F3 + 0.2772 * F4 + 0.1821 * F5 \quad (6-3)$$

In cui i criteri considerati sono: F1 (pendenza), F2 (esposizione), F3 (usi del suolo), F4 (indice climatico) e F5 (aree di probabile innesco).

I risultati indicano che circa il 15% del territorio è interessato da livelli di suscettibilità molto alta e alta, mentre circa il 53% è interessato da livelli molto bassi e bassi, il restante territorio, circa il 32% presenta livelli medi di suscettibilità.

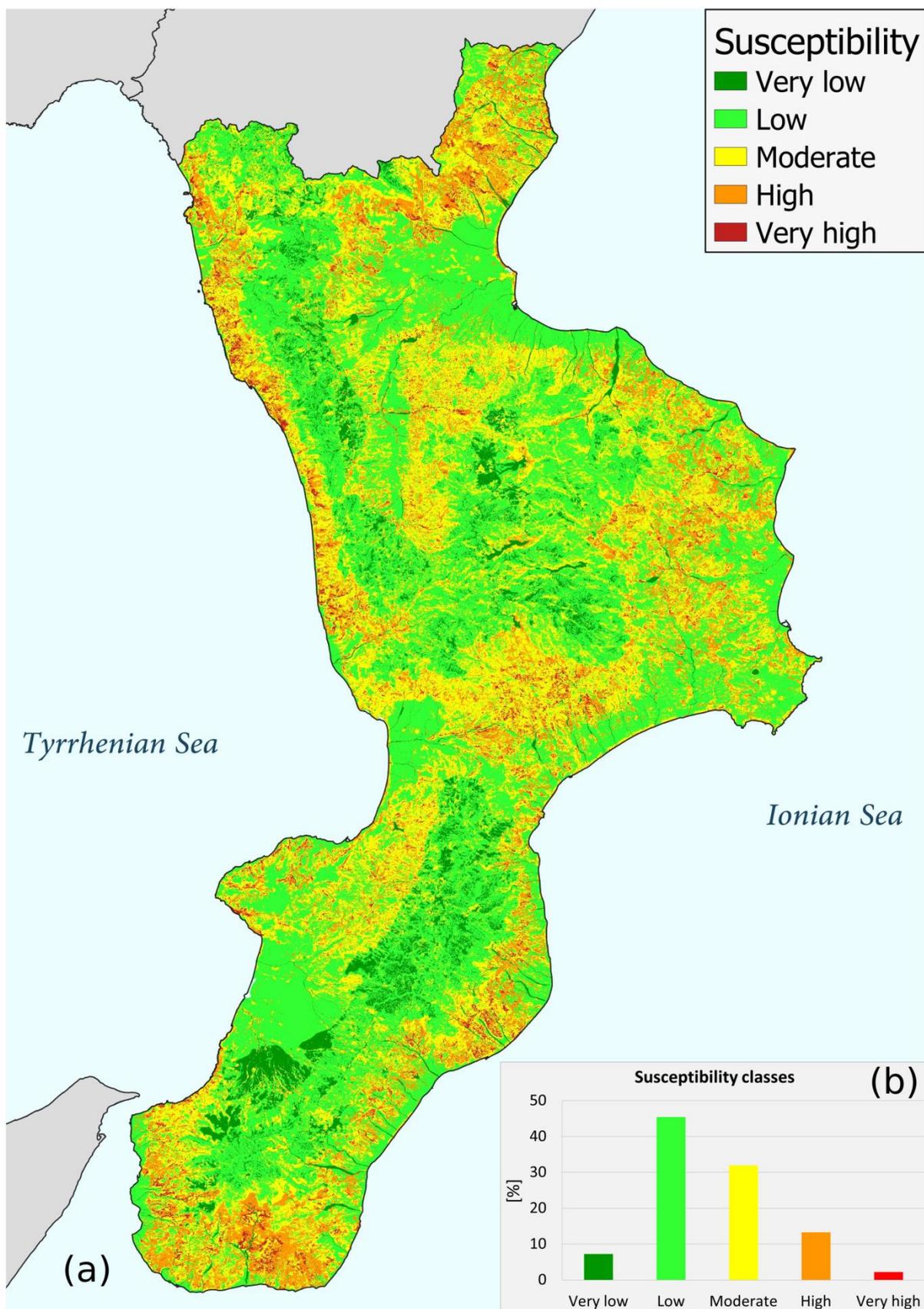


Figura 6-3. Distribuzione spaziale della mappa di suscettibilità degli incendi boschivi

6.1.4 Validazione dei risultati ottenuti

L'efficienza della mappa di suscettibilità è stata valutata utilizzando la curva ROC (Receiver Operating Characteristic) e calcolando il parametro AUC (Area under Curve). L'analisi della curva ROC è una metodologia sviluppata per la prima volta durante la seconda guerra mondiale per l'analisi delle immagini radar e lo studio del rapporto segnale/disturbo. Essa venne ben presto applicata in altri campi della tecnica e, a partire dagli anni '70 anche in campo medico (Lusted 1971) inizialmente allo scopo di quantificare l'attendibilità dei responsi di immagini radiografiche interpretate da operatori diversi. In tempi più recenti, tale tecnica è stata applicata per la valutazione non solo delle immagini, ma anche dei più svariati test sia nel settore medico, con particolare riguardo alla valutazione dei test clinici di laboratorio, che in altri settori multidisciplinari.

L'analisi ROC è effettuata attraverso lo studio della funzione che in un test quantitativo lega la probabilità in ambito medico di ottenere un risultato vero-positivo nella classe dei malati-veri (ossia la sensibilità) alla probabilità di ottenere un risultato falso-positivo nella classe dei non malati (ossia specificità). Lungo i due assi si possono rappresentare la sensibilità e la 1-specificità, rispettivamente rappresentati dalla frazione dei veri positivi rispetto a quella dei falsi positivi. Il tasso dei veri positivi è anche noto come sensibilità. La relazione tra i suddetti parametri può venire rappresentata attraverso una linea che si ottiene riportando in un sistema di assi cartesiani e per ogni possibile valore di *cut off*, la proporzione di veri positivi in ordinata e la proporzione di falsi positivi in ascissa. Se il risultato del test è riportato su scala continua, si possono calcolare i valori di sensibilità e specificità per ogni valore registrato. Un altro approccio, applicabile anche a dati ordinali, consiste nel suddividere l'intera gamma di valori restituiti dal test nelle due classi in una serie di k intervalli, per k variabile in rapporto al numero di dati disponibili (ampiezza del set di dati) e della risoluzione della curva che si desidera ottenere. L'unione dei punti ottenuti riportando nel piano cartesiano ciascuna coppia (Se) e ($1-Sp$) genera una curva spezzata con andamento a scaletta (ROC plot). Per interpolazione, è possibile eliminare la scalettatura (smoothing) ed ottenere una curva (ROC curve) che rappresenta una stima basata sui parametri del data set sperimentale.

La curva ROC in particolare in questo lavoro è costruita considerando tutti i possibili valori della modellazione e, per ognuno di questi, si è calcolata la proporzione di veri positivi e la proporzione di falsi positivi. L'area sottostante alla curva ROC (AUC, acronimo dei termini inglesi "Area Under the Curve") è una misura di accuratezza diagnostica. L'area sotto la curva può assumere valori compresi tra 0.5 e 1.0. Tanto maggiore è l'area sotto la curva (cioè tanto più la curva si avvicina al vertice del grafico) tanto maggiore è il potere discriminante del test. Per l'interpretazione dei valori dell'area sottostante la curva ROC è possibile riferirsi alla classificazione proposta da Swets[154]:

- 1) $AUC=0.5$ il test non è informativo;
- 2) $0.5 < AUC \leq 0.7$ il test è poco accurato;
- 3) $0.7 < AUC \leq 0.9$ il test è moderatamente accurato;
- 4) $0.9 < AUC < 1.0$ il test è altamente accurato;
- 5) $AUC=1$ test perfetto.

Nella fase di validazione, in questo studio, sono stati utilizzati il 20% dei dati disponibili delle aree percorse da incendio. Pertanto, escludendo l'anno 2017 in quanto anomalo per numero di incendi e frequenza degli stessi, sono stati presi come riferimento i dati afferenti agli anni 2018-2019. Sulla base delle tabelle di contingenza realizzate sono stati definiti l'*Hit Rate* (HR, sensibilità) e il *False Rate* (FR, 1-specificità), entrambi variabili fra 0 e 1. La validazione della mappa di suscettibilità da incendio boschivo ha condotto a valori di AUC pari a 0.8, confermando la validità della performance del modello adottato. I risultati finali dimostrano quindi l'accuratezza del modello proposto nel rappresentare

cartograficamente le zone potenzialmente soggette a incendi boschivi nella regione di studio del Mediterraneo.

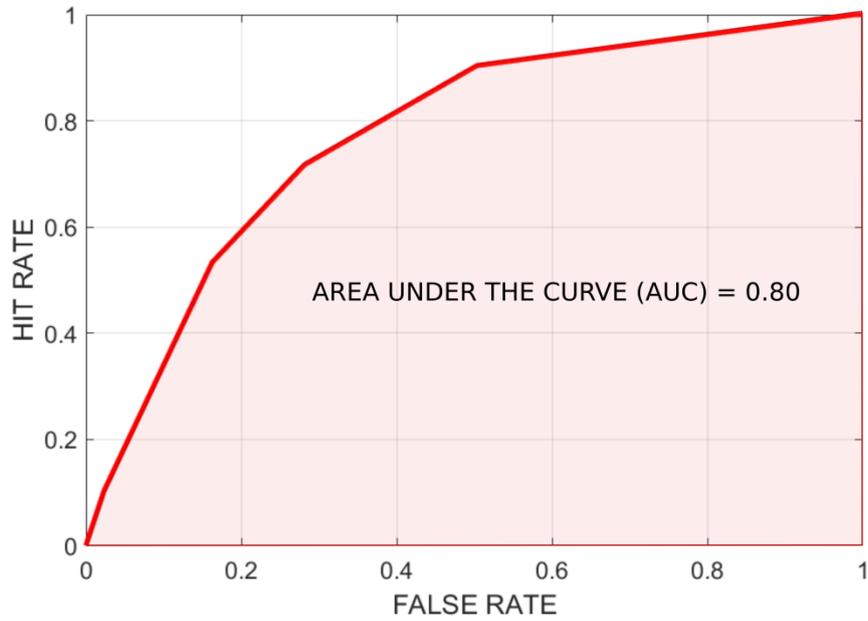


Figura 6-4. Curva ROC della mappa di suscettibilità da incendio boschivo

6.1.5 Mappa di suscettibilità di incendio boschivo del Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica

Di seguito si riporta la mappa di suscettibilità riferita ai limiti amministrativi del Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica. La distribuzione delle classi di appartenenza mostra come la maggior parte del territorio rientri nella classe bassa e molto bassa di suscettibilità da incendio boschivo, circa il 57%, mentre circa il 15% del territorio rientra nella classe alta e molto alta. Il restante 28 % del territorio risulta caratterizzato da livelli medi di suscettibilità.

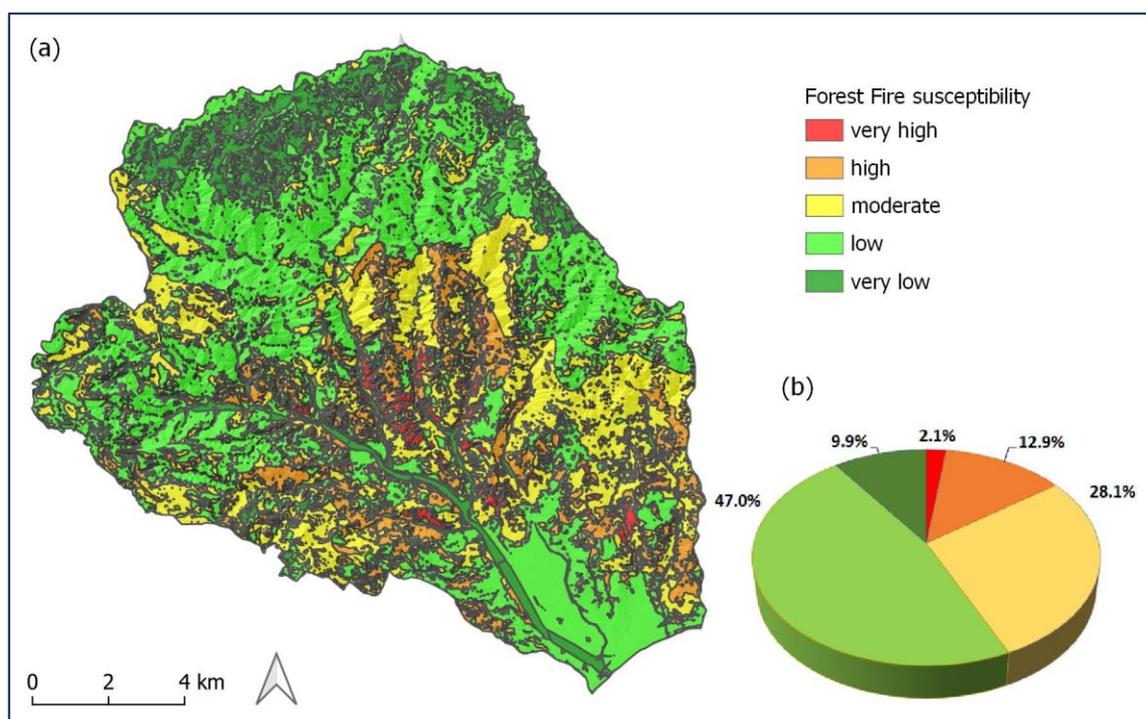


Figura 6-5. Mappa di suscettibilità da incendio boschivo del Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica, a)carta tematica, b) distribuzione percentuale delle classi di suscettibilità

6.2 Pericolosità idraulica

Le metodologie utilizzate nella modellazione idraulica, descritta di seguito, sono in pieno accordo con le indicazioni contenute nel Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) della regione Calabria. In particolare, per lo studio idrologico sono stati utilizzati sia dei metodi empirici sia un modello a parametri concentrati con l'ausilio del software HEC – HMS. Per la valutazione della propagazione delle piene lungo il tratto studiato del torrente Torbido è stato utilizzato un modello idrodinamico bidimensionale, con l'ausilio del software HEC-RAS.

Si precisa che lo studio idrologico è stato condotto esclusivamente sul territorio del bacino idrografico del torrente Torbido, mentre la modellazione bidimensionale idraulica è stata condotta nella zona meridionale del CT di Marina di Gioiosa Ionica, in corrispondenza delle zone censuarie con maggiore densità abitativa. Tale scelta è stata dettata dai limiti computazionali del programma.

6.2.1 Studio idrologico

Con riferimento all'ambito di studio, si fa presente che non sono disponibili le necessarie osservazioni pluviometriche, derivanti da pluviometri installati all'interno della rete del Centro Funzionale Multirischi ARPACal. Pertanto, la definizione delle caratteristiche dell'evento pluviometrico da utilizzare per lo studio di compatibilità idrologica è stata fatta sulla base dello studio di regionalizzazione delle piogge redatto nell'ambito del VaPi Calabria. Tutto il bacino idrografico del torrente Torbido ricade nella sottozona Ionica I3.

Ai fini della modellazione idrologica si è scelto di schematizzare il bacino idrografico del torrente Torbido come in Figura 6-6; in particolare il bacino è stato suddiviso in otto sottobacini al fine di migliorare la caratterizzazione del bacino idrografico in termini di risposta sotto forma di portate di piena.

Sono stati quindi ricavati i valori dei parametri "a" e "n" delle Curve di Possibilità Pluviometrica (CPP) per i tempi di ritorno di 50, 200 anni e 500 anni, vedi Tabella 6-6, Tabella 6-7 e Tabella 6-7. Le curve riferite all'intero bacino idrografico, ottenute per i diversi tempi di ritorno sono riportate in Figura 6-7.

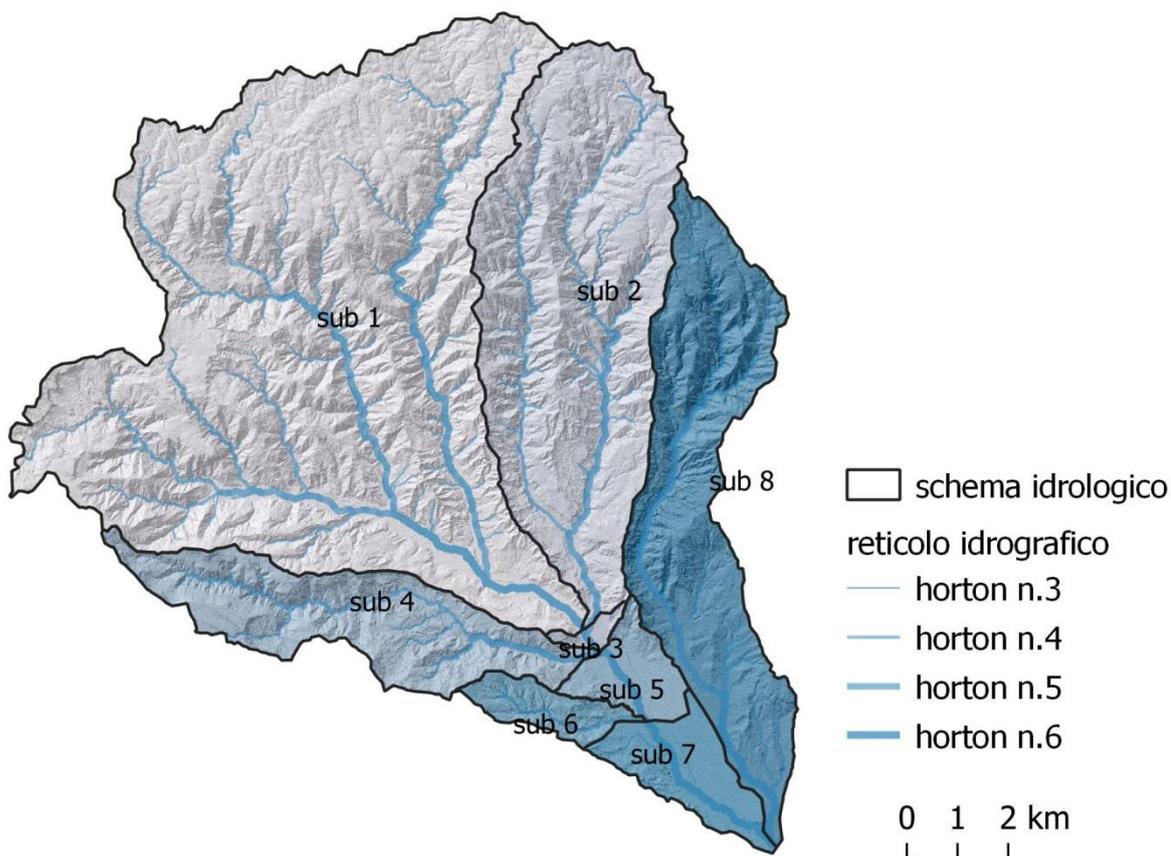


Figura 6-6. Schema idrologico

CPP T= 50	sub1	sub2	sub3	sub4	sub5	sub6	sub7	sub8
area (kmq)	78.8	34.0	0.6	13.4	3.2	2.5	4.7	21.6
a	93.6	94.2	79.6	86.4	78.4	81.1	77.1	86.5
n	0.424	0.425	0.34	0.385	0.339	0.356	0.329	0.39
t(h)	h(mm)							
0.083	32.6	32.8	34.2	33.2	33.8	33.5	34.0	32.8
0.250	52.0	52.3	49.7	50.7	49.0	49.5	48.9	50.4
1	93.6	94.2	79.6	86.4	78.4	81.1	77.1	86.5
2	125.6	126.5	100.8	112.8	99.2	103.8	96.8	113.3
3	149.1	150.3	115.6	131.9	113.8	119.9	110.7	132.8
6	200.1	201.7	146.4	172.2	143.9	153.5	139.0	174.0

Tabella 6-5. Parametri Curva Possibilità Pluviometrica con tempo di ritorno di 50 anni

CPP T=200	sub1	sub2	sub3	sub4	sub5	sub6	sub7	sub8
area (kmq)	78.8	34.0	0.6	13.4	3.2	2.5	4.7	21.6
a	122.3	123.1	110.7	114.5	104.5	106.9	104.5	114.8
n	0.424	0.425	0.34	0.385	0.339	0.356	0.329	0.39
t(h)	h(mm)							
0.083	42.4	43.0	49.4	44.5	44.6	44.6	46.6	44.5
0.250	67.8	68.5	70.5	67.6	65.0	65.6	66.6	67.7
1	122.3	123.1	110.7	114.5	104.5	106.9	104.5	114.8
2	164.3	165.0	138.7	149.0	132.5	136.4	130.9	149.5
3	195.3	195.9	158.2	173.8	152.3	157.4	149.3	174.5
6	262.4	262.7	198.2	226.2	193.2	200.9	187.1	227.2

Tabella 6-6. Parametri Curva Possibilità Pluviometrica con tempo di ritorno di 200 anni

CPP T= 500	sub1	sub2	sub3	sub4	sub5	sub6	sub7	sub8
area (kmq)	78.8	34.0	0.6	13.4	3.2	2.5	4.7	21.6
a	144	144	129.9	130.7	125.9	125.9	128.4	129.6
n	0.413	0.413	0.325	0.38	0.347	0.347	0.318	0.391
t(h)	h(mm)							
0.083	51.6	51.6	57.9	50.8	53.2	53.2	58.3	49.1
0.250	81.2	81.2	82.8	77.2	77.8	77.8	82.6	75.4
1	144.0	144.0	129.9	130.7	125.9	125.9	128.4	129.6
2	191.7	191.7	162.7	170.1	160.1	160.1	160.1	169.9
3	226.7	226.7	185.6	198.4	184.3	184.3	182.1	199.1
6	301.8	301.8	232.5	258.2	234.4	234.4	227.0	261.1

Tabella 6-7. Parametri Curva Possibilità Pluviometrica con tempo di ritorno di 500 anni

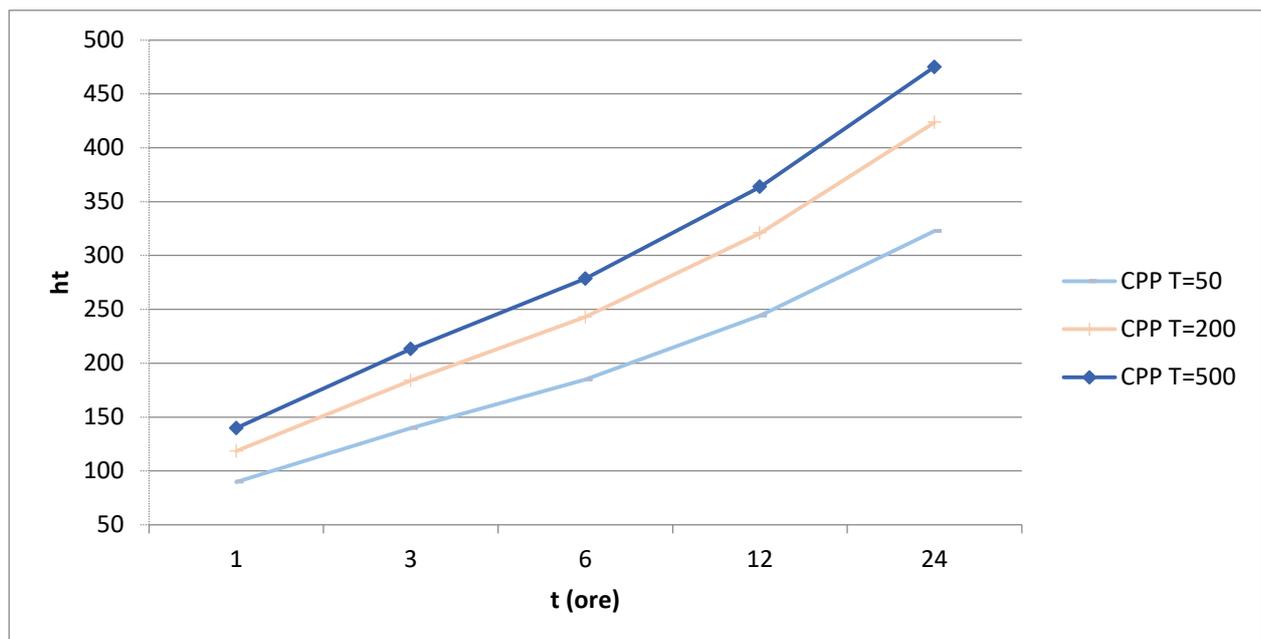


Figura 6-7. Curve di possibilità pluviometrica dell'intero bacino idrografico, con tempo di ritorno di 50,200 e 500 anni

Il calcolo della portata di piena è stato fatto attraverso il metodo concettuale implementato nel software Hec-Hms. Successivamente il risultato della portata di piena è stato confrontato con i valori ottenuti con l'applicazione di formule empiriche e con i valori disponibili presso la già Autorità di Bacino Regionale.

Hec-Hms analizza separatamente le varie fasi in cui il fenomeno di trasformazione afflussi-deflussi può essere scomposto e che sono:

- separazione delle piogge;
- formazione della piena;
- propagazione della piena;
- deflusso di base.

Per le varie fasi in cui è possibile schematizzare il fenomeno trasformazione afflussi-deflussi si è scelto di utilizzare i seguenti metodi:

- **I fase:** separazione della pioggia (calcolo della pioggia netta): metodo Curve Number (CN) del Soil Conservation Service (SCS);
- **II fase:** formazione della piena: metodo dell'Idrogramma Unitario Istantaneo (IUH) del Soil Conservation Service (SCS);
- **III fase:** propagazione della piena: metodo del tempo di ritardo (Lag time)

Il meccanismo che regola la produzione di deflusso efficace è governato da un bilancio del contenuto d'acqua che, in questa sede, verrà considerato alla scala del sottobacino. Tale bilancio, nella sua formulazione più completa, tiene conto dell'evoluzione temporale dell'intensità di precipitazione, della frazione di precipitazione intercettata dalla vegetazione e che quindi non raggiunge la superficie del terreno, della frazione d'acqua che viene allontanata dal terreno per evaporazione e traspirazione delle piante, della frazione d'acqua che defluisce superficialmente e che quindi costituisce la risposta rapida del bacino, ed infine del flusso che si infiltra nel terreno e che in parte può contribuire alla risposta idrologica in tempi più lunghi ed in parte viene considerato perso poiché rimane legato alle particelle di terreno o contribuisce alla ricarica della falda.

Con riferimento alla separazione delle piogge, in mancanza di dati specifici è stata ipotizzata una perdita del 20%. Nelle ipotesi del metodo quindi, il deflusso è inizialmente nullo, fino a che l'afflusso meteorico P non raggiunge un valore di soglia pari al 20% del volume immagazzinabile nel terreno S. Dopo tale fase, una parte dell'apporto meteorico si trasforma in pioggia efficace, in proporzione sempre crescente, man mano che l'evento procede. La definizione delle caratteristiche del Curve Number è stata fatta sulla base di una copertura cartografica del CN su base regionale (Tabella 6-8). Il parametro CN fornisce una indicazione della quantità d'acqua immagazzinabile nel terreno, la quale stabilisce in base alle ipotesi assunte dal modello SCS descritto, la relazione tra afflussi e deflussi in un bacino idrografico. Tale parametro contiene le informazioni relative alla capacità di infiltrazione del terreno, secondo quattro classi di permeabilità, le informazioni relative allo stato di imbibizione del terreno (classi AMC) e le informazioni relative alla copertura di suolo. I valori del parametro CN si riferiscono a tre diverse condizioni di umidità del terreno definite condizioni di umidità antecedente (Antecedent Moisture Condition, AMC) l'evento di pioggia. La categoria AMC-I caratterizza i suoli sufficientemente asciutti da permettere un'aratura o una coltivazione soddisfacente e che abbiano perciò un potenziale di scorrimento superficiale minimo; la categoria AMC-II rappresenta la condizione media di umidità del terreno e a tale situazione si fa riferimento

per l'attribuzione dei valori di CN. Infine la categoria AMC-III contempla la condizione in cui i terreni siano praticamente saturati dalle precedenti piogge e in tale situazione il potenziale di scorrimento superficiale risulta massimo. In questo lavoro sono state ipotizzate le condizioni medie AMC-II di umidità del suolo.

Dati Geomorfologici								
	sub1	sub2	sub3	sub4	sub5	sub6	sub7	sub8
Area (kmq)	78.8	34.0	0.6	13.4	3.2	2.5	4.7	21.6
Hmax (m)	1184	1230	284	887	333	454	176	1167
Hmin (m)	88	88	81	79	56	56	2	4
Hmed (m)	668.4	680.7	136	420.48	106	226.31	49.67	434.87
L_{asta} (km)	17	13	0.5	12.2	1.7	4.07	4.2	16.5
CN	76.99	77	76.193	75.963	75.07	74.6161	75.394	77.23

Tabella 6-8. Modello idrologico – caratteristiche sottobacini

Per la valutazione della durata di pioggia e del tempo di ritardo è stato fondamentale il calcolo del tempo di corrivazione. La Tabella 6-9 mostra le formule empiriche utilizzate nel calcolo del tempo di corrivazione, mentre nella Tabella 6-10 sono riportati i risultati ottenuti per ogni sottobacino.

Ventura(1905)	$Tc = 0.127 \sqrt{\frac{A}{p}}$	p = pendenza media dell'alveo
Pezzoli (1970)	$Tc = 0.055 \frac{L}{\sqrt{p}}$	p = pendenza media dell'alveo
Puglisi (1978)	$Tc = 6 * \frac{L^2}{(H_{max} - H_0)^{\frac{1}{3}}}$	Hmax= altitudine massima (m s.m.) Ho = altitudine della sezione di chiusura (m s.m.)
Viparelli	$Tc = \frac{L}{V}$	V = velocità fittizia dell'acqua (V = 5,4 km/h.); L = lunghezza asta principale in km;
Tournon	$Tc = 0.396 \frac{L}{\sqrt{i_a}} \left(\frac{A}{L^2} \frac{\sqrt{i_a}}{\sqrt{i_m}} \right)^{0.72}$	i _a = pendenza media asta i _m =pendenza media versante

Tabella 6-9. Tempi di Corrivazione: formule empiriche

T_c(h)Tempi di corrivazione [h]	sub1	sub2	sub3	sub4	sub5	sub6	sub7	sub8
Giandotti	3.2	2.2	0.6	2.2	1.7	1.2	2.7	2.6
Ventura	4.6	2.6	0.8	1.9	1.9	0.7	12.6	2.3
Pezzoli	3.8	2.5	0.2	2.7	0.8	0.8	10.6	3.5
Tournon	5.5	3.2	1.1	1.8	2.8	1.1	4.9	2.3
Puglisi	3.8	3.2	0.6	3.4	1.3	2.1	2.8	3.7
Viparelli	3.1	2.4	0.1	2.3	0.3	0.8	0.8	3.1
Valore medio T_c(h)	4.0	2.7	0.6	2.4	1.5	1.1	5.7	2.9

Tabella 6-10. Tempi di corrivazione

Il metodo del SCS Soil Conservation Service, si basa su un parametro dato dal tempo di ritardo in ore TLAG, tra il baricentro dello ietogramma della precipitazione netta ed il colmo dell'idrogramma unitario. Esso è stato posto empiricamente in relazione al tempo di corrivazione, secondo la seguente espressione: TLAG= 0.6÷ 0.7 Tc. Con il metodo del tempo di ritardo la stima dell'idrogramma di piena alla sezione di chiusura è fatta con una semplice composizione degli idrogrammi dei singoli sottobacini.

Sulla base quindi della schematizzazione del bacino idrografico adottata per il torrente Torbido, dei dati di pioggia ottenuti come specificato in precedenza e delle ipotesi procedurali assunte, si è proceduto alla simulazione idrologica degli eventi di pioggia con tempo di ritorno rispettivamente di 50, 200 e 500 anni e con durata di 6 ore. Di seguito si riportano i valori delle massime portate di progetto assunte per la successiva fase di modellazione idraulica.

Elemento Idrologico	Area	Qmax T50	Qmax T200	Qmax T500
	(kmq)	(mc/s)	(mc/s)	(mc/s)
sub1	78.8	451.5	684.5	851.8
sub2	34.0	276.3	412	508.6
sub3	0.6	10	16.2	20.2
sub4	13.4	109.5	164.9	198.4
sub5	3.2	31.9	48.9	63.3
sub6	2.5	26.7	41.8	53.3
sub7	4.7	16.9	25.9	33.9
sub8	21.6	157.1	235.2	281.7
foce	158.7	964.4	1450.5	1787.4

Tabella 6-11. Portate massime di progetto con tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni

L'applicazione del modello di trasformazione afflussi-deflussi mediante il software HEC-HMS ha permesso di ottenere gli idrogrammi unitari sintetici SCS riportati di seguito (Figura 6-8, Figura 6-9 e Figura 6-10).

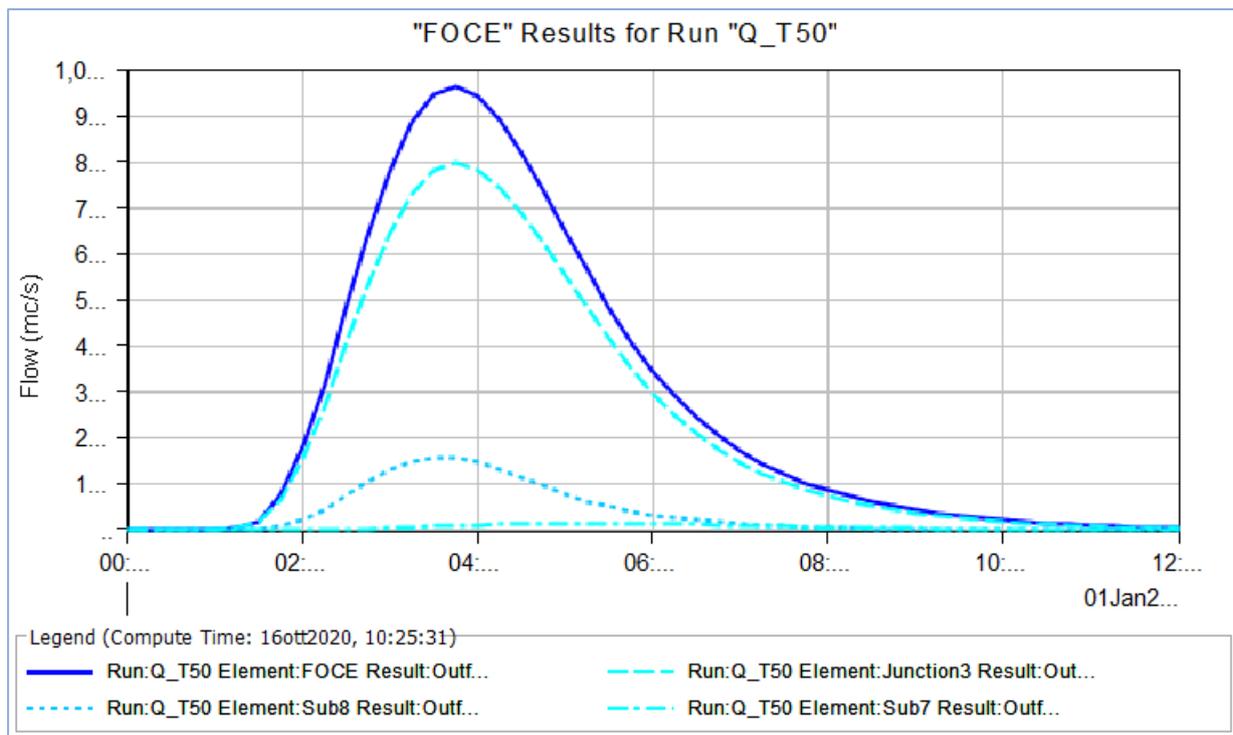


Figura 6-8. Idrogramma in corrispondenza della sezione di foce, tempo di ritorno 50 anni

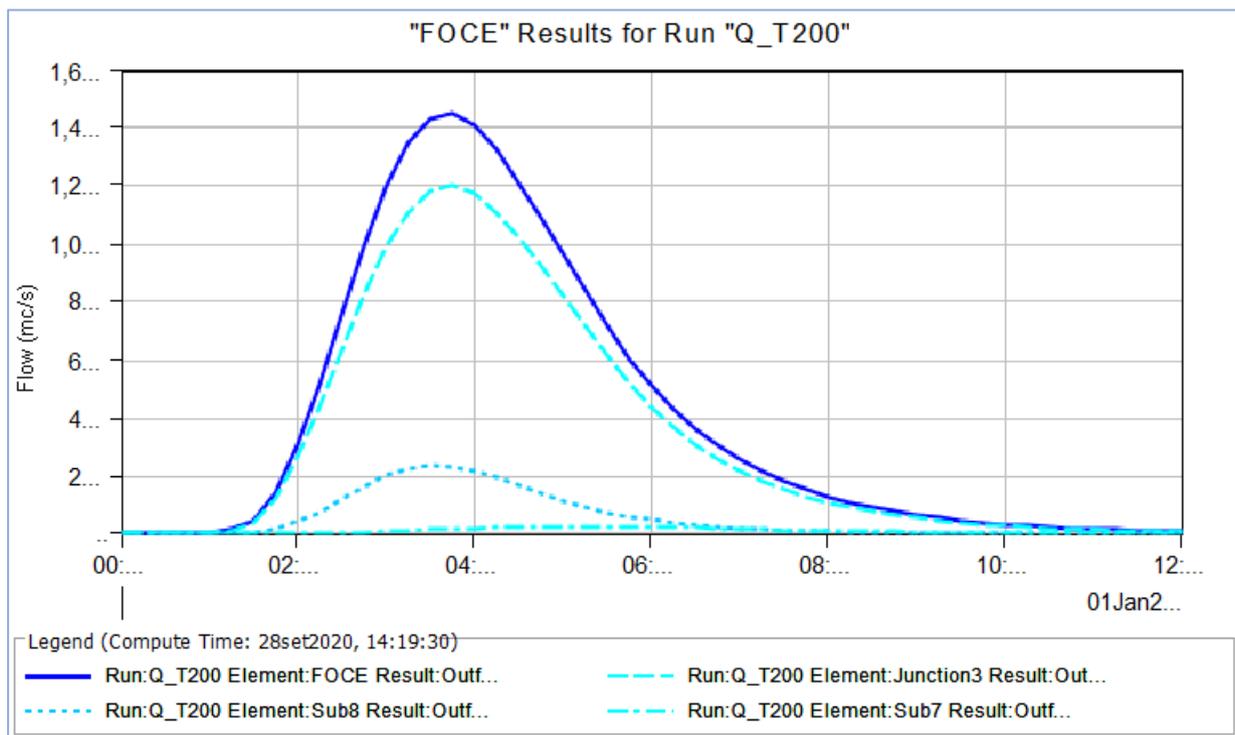


Figura 6-9. Idrogramma in corrispondenza della sezione di foce, tempo di ritorno 200 anni

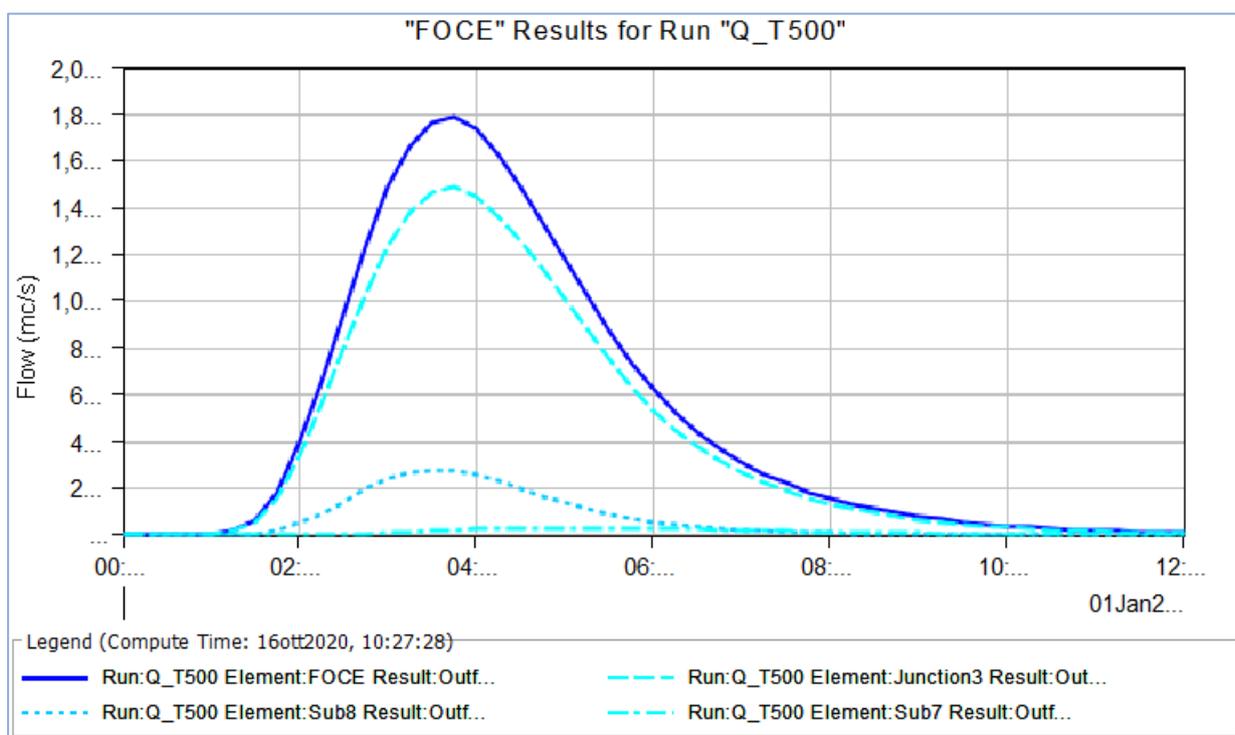


Figura 6-10. Idrogramma in corrispondenza della sezione di foce, tempo di ritorno 500 anni

6.2.2 Studio idraulico

Le verifiche idrauliche sono state condotte con un modello numerico bidimensionale sviluppato dal Centro di Ingegneria Idraulica del Corpo degli Ingegneri dell'Esercito degli Stati Uniti USACE-HEC (United States Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center) ed implementato nel programma per elaboratore elettronico HEC-RAS. La versione utilizzata è la HEC RAS 5.0.7.

Questo tipo di modello è utilizzato nel caso di aree inondabili ampie e in zone in cui la presenza degli edifici genera direzioni preferenziali di flusso.

Le equazioni utilizzate per l'analisi bidimensionale sono quelle del moto vario di De Saint Venant, generalmente risolte utilizzando metodi numerici alle differenze finite. Il dominio di integrazione è definito schematizzando la planimetria urbana come una griglia. Questo algoritmo è stato sviluppato per consentire l'uso di una mesh computazionale strutturata o non strutturata.

Le equazioni di De Saint Venant (DSV), dette anche shallow water equations (SWE), sono derivate a partire dalla formulazione completa di Navier Stokes. Queste equazioni si ottengono imponendo la conservazione della massa (equazione di continuità) e della quantità di moto nelle due direzioni principali x e y all'interno di un generico volume di controllo. Si otterrà quindi il seguente sistema di equazioni:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = sources - sinks \quad (6-4)$$

L'equazione 6-4 esprime la conservazione della massa, ovvero un aumento o diminuzione di un volume che deve essere bilanciato da una portata in entrata o in uscita. Il termine H indica il livello idrico fissato a una quota z di riferimento e i singoli termini indicano rispettivamente:

- $\frac{\partial H}{\partial t}$ indica la variazione del livello idrico nel volume di controllo considerato;
- $\frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y}$ indica la variazione spaziale della portata in entrata o in uscita, con u e v velocità media della corrente in direzione x e y;
- i termini sources e sinks determinano infine le portate localizzate in ingresso o in uscita.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (6-5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (6-6)$$

Le equazioni [6-5,6-6] esprimono la conservazione della quantità di moto, con i singoli termini che indicano per le direzioni principali x e y:

- $\frac{\partial u}{\partial t} + \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right)$ accelerazione locale e convettiva (termini fra parentesi);
- $g \frac{\partial H}{\partial x}$ gradiente della pressione idrostatica;
- $v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$ termini legati alla viscosità;

- $c_f u$ resistenza dell'alveo;
- $f v$ parametro di Coriolis.

La risoluzione prevede l'applicazione delle equazioni [6-4] e [6-5,6-6] per ogni cella in cui si è suddiviso il dominio urbano, utilizzando generalmente metodi numerici alle differenze finite o a volume finito. Al termine della procedura di calcolo, va verificata la convergenza e la stabilità della soluzione, riferendosi ad esempio al criterio di Courant. La complessità della trattazione porta all'introduzione di alcune semplificazioni alle equazioni DSV, che riconducono all'analisi del modello diffusivo, tralasciando i termini inerziali relativi alle accelerazioni locali e convettive. Da precedenti esperimenti, si è notato infatti come in molti casi i modelli a complessità ridotta conducano a risultati del tutto confrontabili con quelli più complessi, con il vantaggio di un minore onere computazionale e una maggiore stabilità della soluzione.

I termini dell'equazione DSV si modificano quindi nel modo seguente:

$$c_f u = g \frac{\partial H}{\partial x} \qquad c_f v = g \frac{\partial H}{\partial y} \qquad (6-7)$$

La nuova formulazione dell'equazione [6-7] esprime la variazione del pelo libero bilanciata unicamente dalla resistenza dell'alveo. In questo studio è stato utilizzato il modello diffusivo che garantisce risultati confrontabili con quelli ottenibili dalle equazioni DSV complete, con l'ulteriore vantaggio di un tempo computazionale molto inferiore. Per ulteriori approfondimenti si rimanda al manuale HEC-RAS (<https://www.hec.usace.army.mil/>).

In questo studio, la mesh computazionale è stata costruita a partire dal DTM con risoluzione di 20 m. Il software crea in automatico il reticolo includendo sia elementi rettangolari o quadrati (celle strutturate) di solito nelle parti centrali, sia elementi poligonali (celle non strutturate). In alcuni casi, come in presenza di ostacoli, degli argini dei corsi d'acqua, dei salti idraulici, degli affluenti minori e delle opere di attraversamento, è stata infittita la mesh iniziale, in modo da giungere a soluzioni numeriche più precise. A tal riguardo è stato utilizzato un DTM da 5 m, solo in alcuni casi limitati si è ricorsi al DTM Lidar con risoluzione a 1m. Si fa presente infatti che, il programma Hec-Ras lavora con celle caratterizzate da massimo 8 facce, per tale motivo il passaggio da celle di 20 m x 20 m a celle direttamente di 1 m x 1 m richiede l'utilizzo di un gran numero di celle intermedie. La procedura di calcolo del programma porta infatti alla segnalazione del problema geometrico quando si verifica che la cella ha un numero di lati maggiore di 8.

Il più grande vantaggio della modellazione bidimensionale in HEC-RAS riguarda la dimensione della *mesh* computazionale. Ogni cella è infatti pre-processata in modo da creare una serie di tabelle idrauliche, che mettono in relazione l'elevazione e il volume e, su ogni lato della cella, l'elevazione con il perimetro bagnato, l'area e la scabrezza. HEC-RAS ridisegna la cella facendo riferimento alla *Delaunay Triangulation*, massimizzando il minimo angolo interno dei triangoli; successivamente crea il diagramma di Voronoi, il quale costituisce la *mesh* finale, in modo del tutto analogo al metodo dei poligoni di Thiessen.

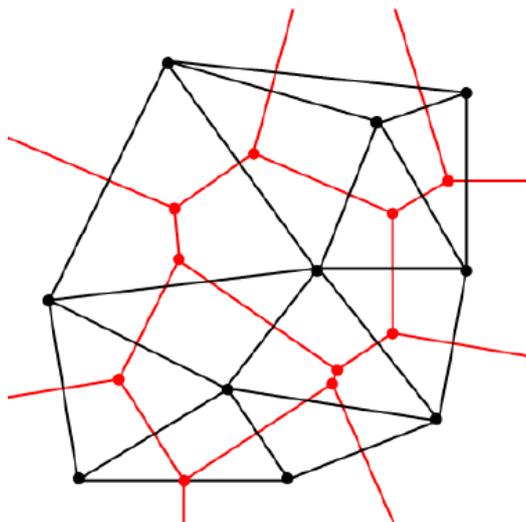


Figura 6-11 . Esempio di diagramma Delaunay – Voronoi

Si precisa che in alcuni tratti in cui erano presenti degli argini oltre ad aver infittito le *mesh*, sono state inserite delle Break line in corrispondenza degli stessi in modo da orientare il posizionamento delle celle e descrivere in modo più fedele l'andamento del terreno.

Le condizioni al contorno utilizzate direttamente sull'area 2D, nei punti di fuoriuscita di portata dall'area stessa, sono state quelle di moto uniforme (*Normal Depth*), quindi di pendenza percentuale del terreno. Le condizioni al contorno utilizzate per il corso d'acqua sono state quelle relative agli idrogrammi di piena, differenti per ogni affluente. Come condizione iniziale è stato inserito il valore dell'altezza idrica iniziale, impostando un tempo di ramp-up per permettere al programma, prima dell'inizio della simulazione di costruire le corrette condizioni iniziali di moto.

Il dominio di studio, rappresentato nell'immagine seguente (Figura 6-12) è stato caratterizzato idraulicamente da un unico valore di scabrezza di Manning di 0.05 s/m^{1/3}. L'inserimento degli edifici nel dominio di calcolo ha consentito di adottare un valore di scabrezza unico.

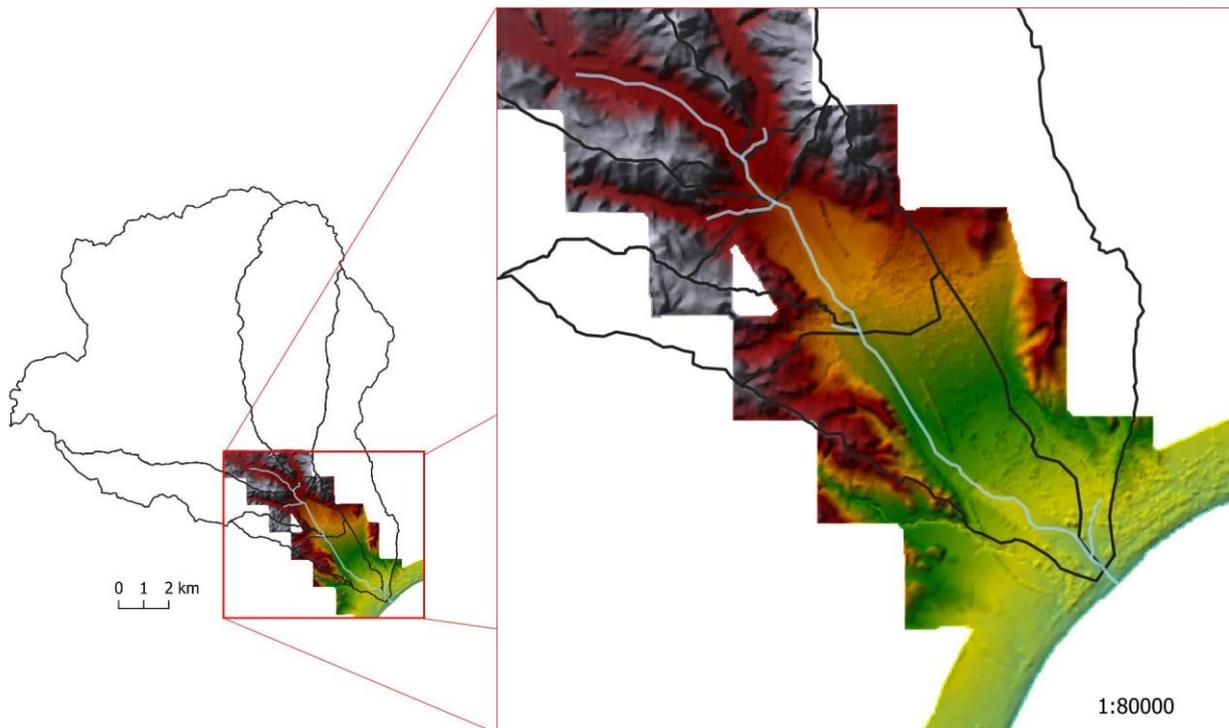


Figura 6-12 . Dominio di studio nella modellazione idraulica bidimensionale

La simulazione in moto vario è stata condotta quindi secondo un modello diffusivo con risoluzione al volume finito (o differenze finite).

In una simulazione di moto vario, un parametro molto significativo da considerare è l'intervallo computazionale ΔT , che deve essere scelto con accuratezza in modo da non influenzare negativamente l'esito delle analisi. Generalmente questo valore viene valutato basandosi sul criterio di Courant, esprimibile nella maniera seguente:

- Equazioni DSV:
$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X} \leq 1 \quad (\text{con un valore massimo } C=3) \quad (6-8)$$

- Modello diffusivo
$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X} \leq 2 \quad (\text{con un valore massimo } C=5) \quad (6-9)$$

Dove:

C= numero di Courant; V e ΔX sono rispettivamente la velocità massima dell'acqua e la dimensione media delle celle e ΔT è lo step computazionale. Si evidenzia che il software computa la velocità della corrente nei nodi della griglia, mentre il livello idrico è calcolato al centro della cella (*cell center*) della griglia stessa.

In questo studio è stato utilizzato un tempo di calcolo pari a 5 secondi con un passo di discretizzazione dei parametri e di propagazione in output pari a 1 ora. L'inserimento dei principali attraversamenti è avvenuto attraverso l'editor SA/2D Area Connection in corrispondenza di una *Break Line* e creando un collegamento all'interno della stessa area 2D di tipo *Weir and Culvert*. La figura successiva Figura 6-13, mostra tutti gli attraversamenti inseriti nell'area di studio. In corrispondenza degli attraversamenti è stato posto il sormonto *weir flow* pari a 0.

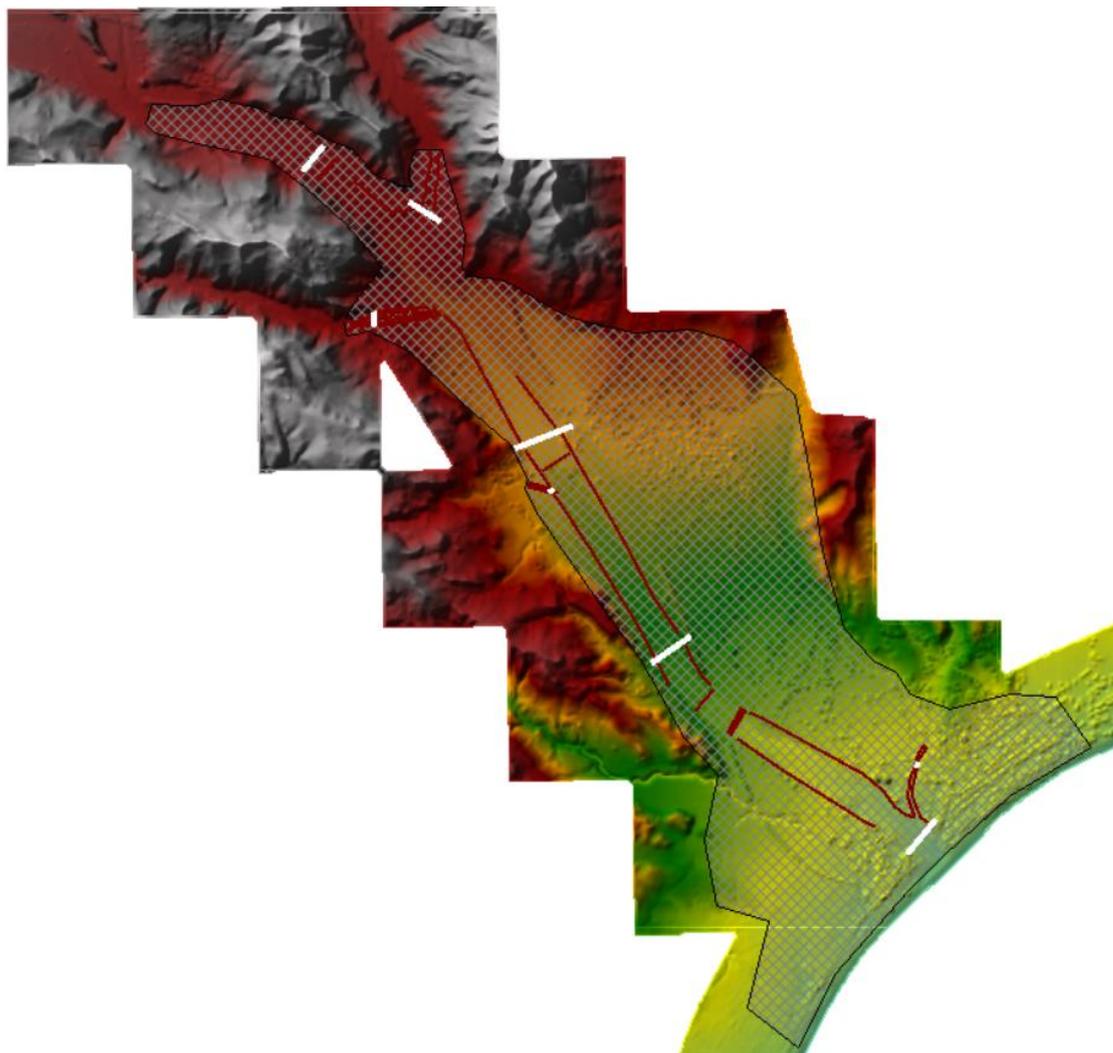


Figura 6-13. Dominio della modellazione bidimensionale con indicazione degli attraversamenti e delle opere di difesa idraulica

La Figura 6-14 fornisce un esempio della finestra di inserimento degli attraversamenti del programma.

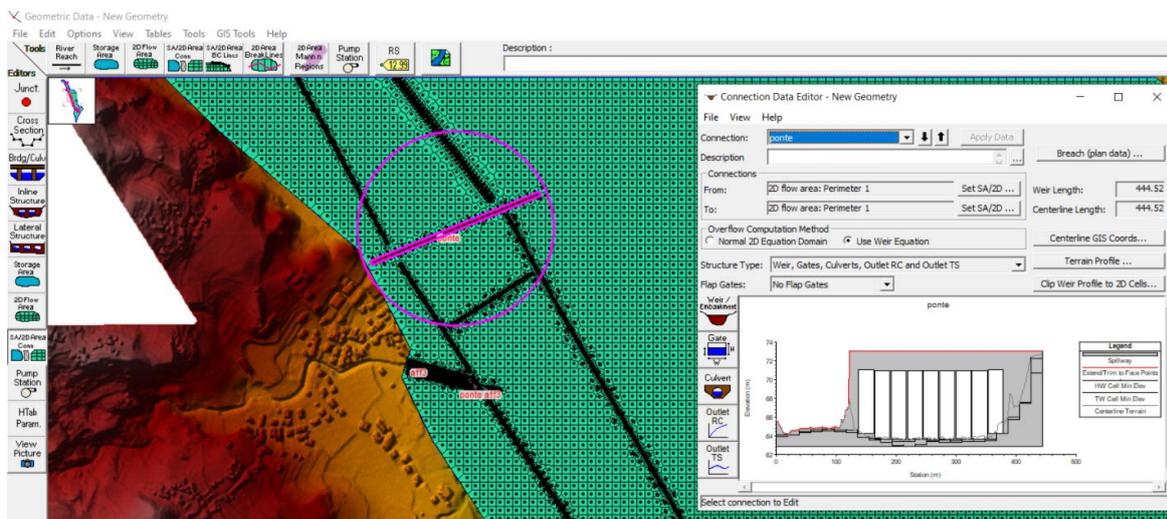


Figura 6-14 . Esempio di inserimento di un attraversamento

Di seguito si riportano le distribuzioni spaziali delle aree allagate, riferite alle simulazioni con tempo di ritorno 50 anni (Figura 6-15), 200 anni (Figura 6-16) e 500 anni (Figura 6-17).

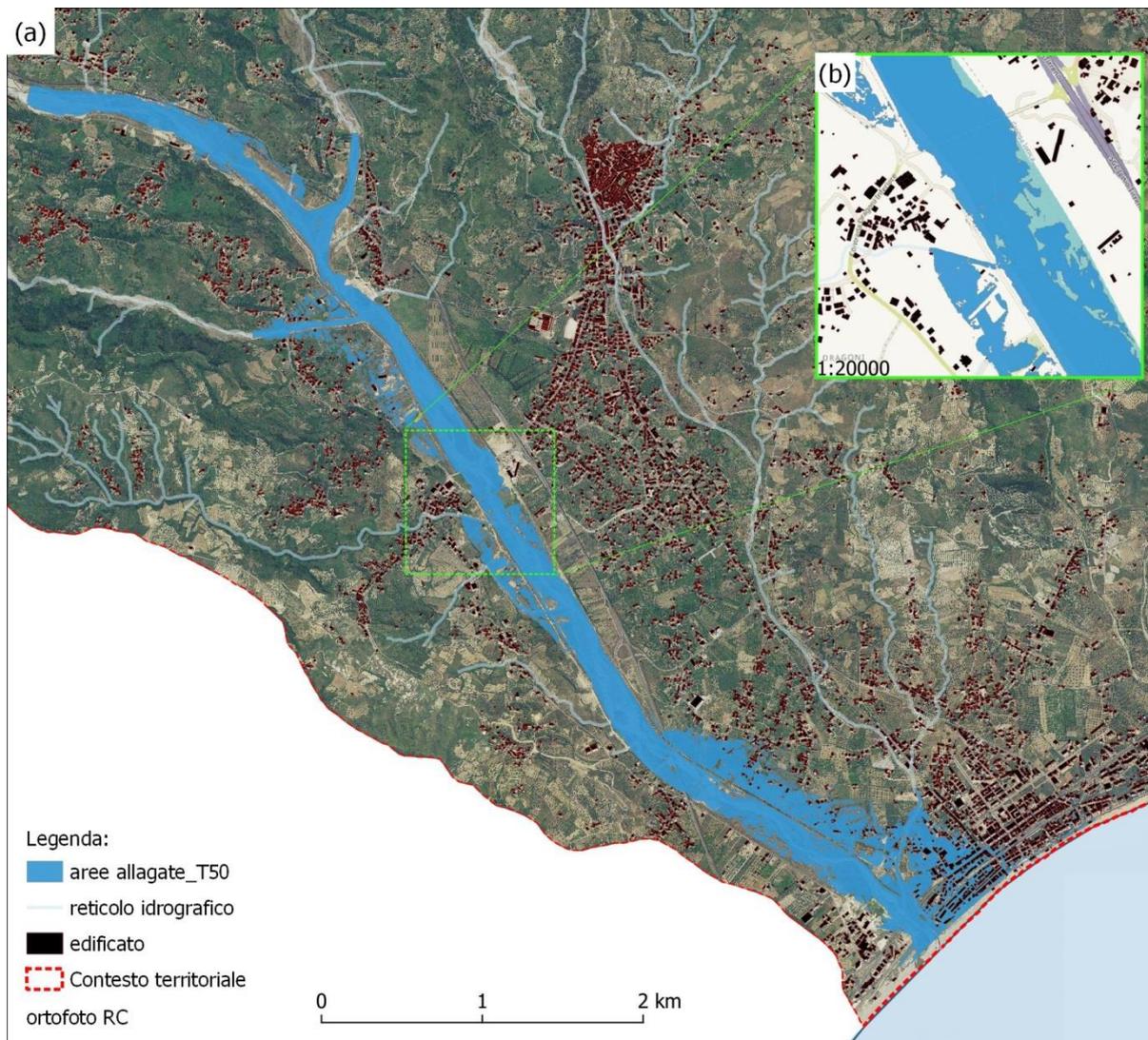


Figura 6-15. Distribuzione spaziale delle aree allagate: (a) dominio di analisi T50 anni; (b) dettaglio di una area

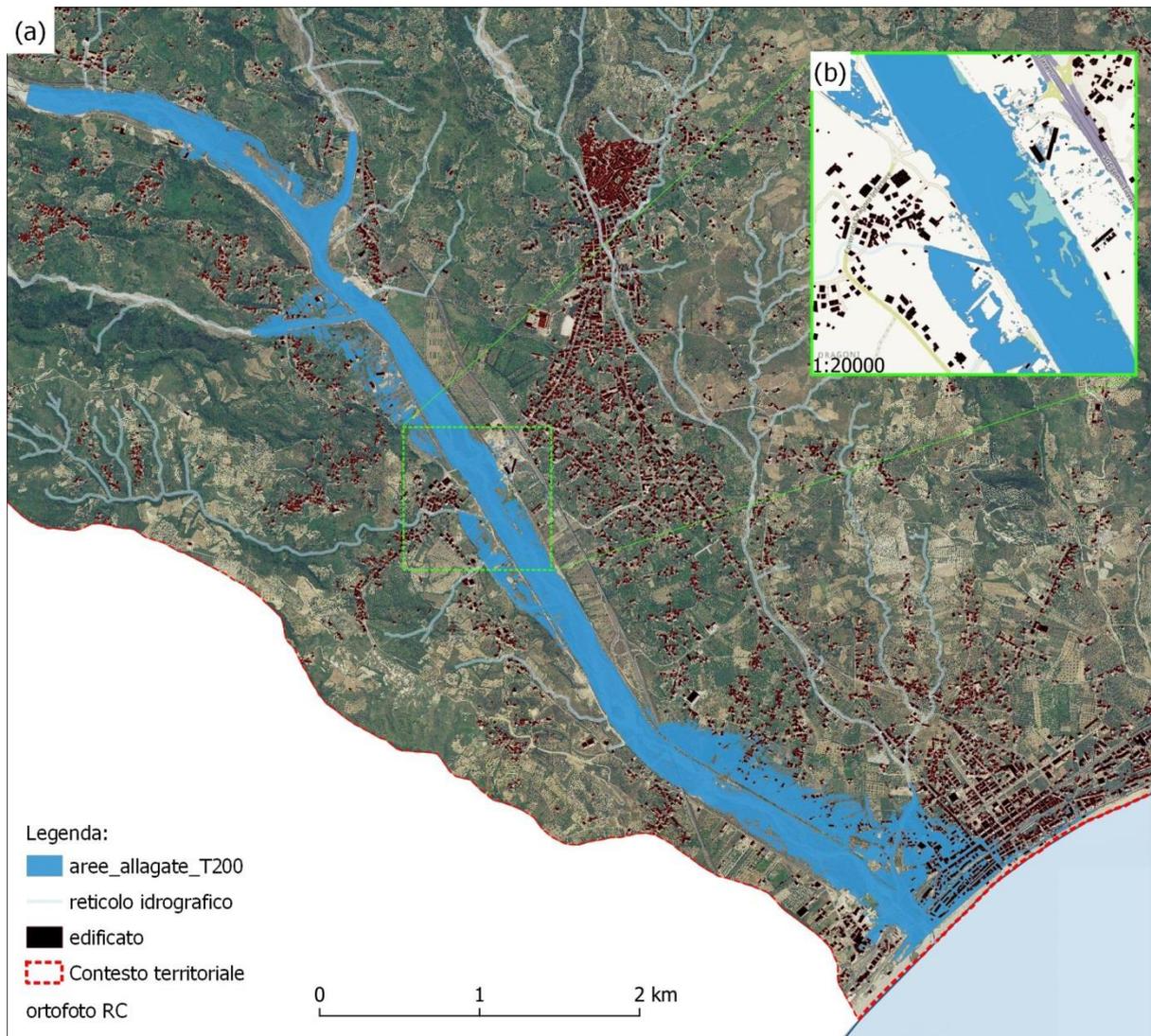


Figura 6-16. Distribuzione spaziale delle aree allagate: (a) dominio di analisi T200 anni; (b) dettaglio di una area

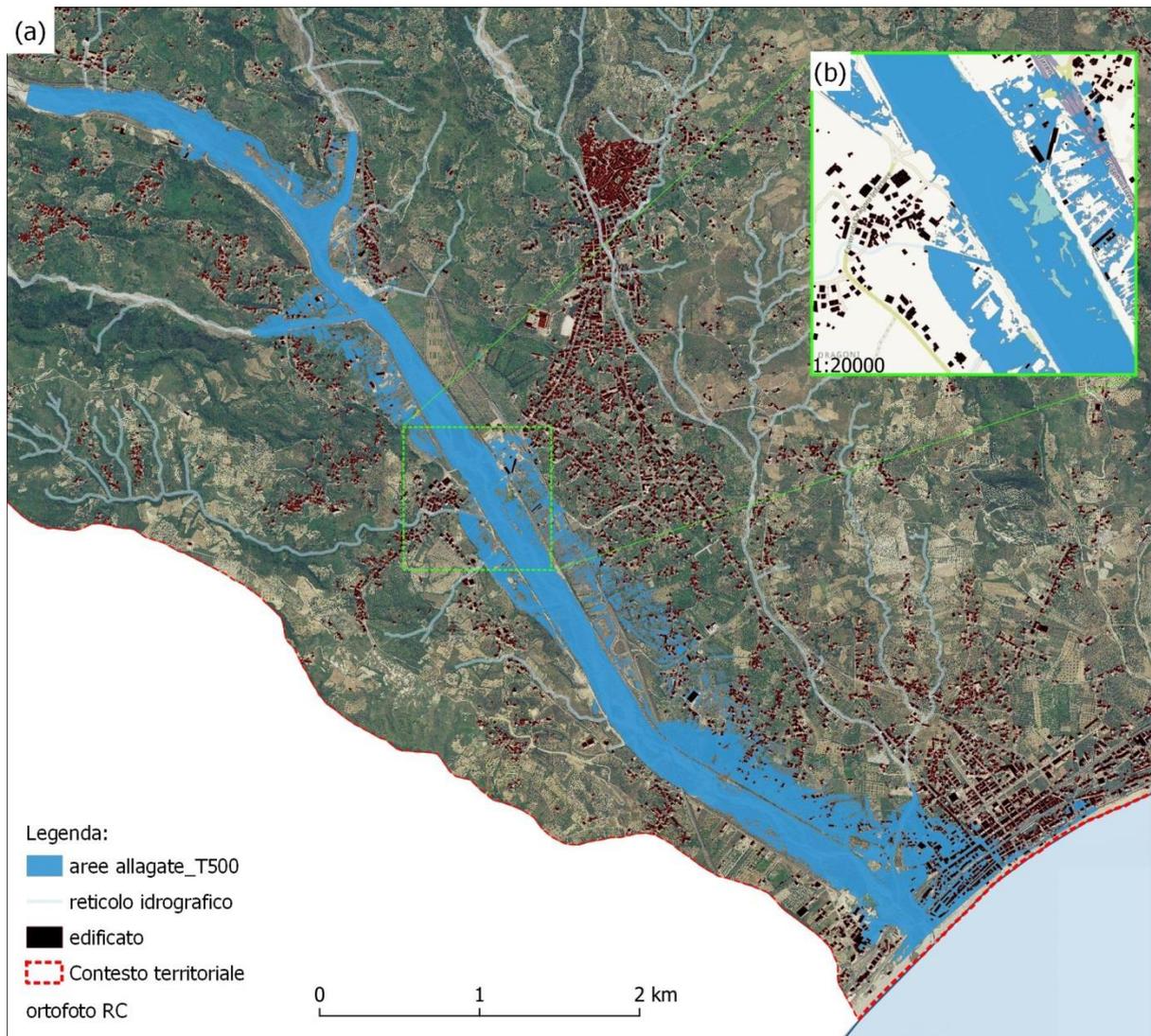


Figura 6-17. Distribuzione spaziale delle aree allagate: (a) dominio di analisi T500 anni; (b) dettaglio di una area

Nella fase di validazione dei risultati ottenuti dalla modellazione idraulica, le aree allagate sono state confrontate con quelle fornite dalla già Autorità di Bacino Regionale (ABR). La zona di interesse infatti è stata perimetrata dall'ABR in un primo momento come area di attenzione (PAI 2001), poi a seguito di studi avanzati (variazione PAI 2011) è rientrata nella fascia di pericolosità elevata P3, caratterizzata da elevata probabilità di accadimento con tempo di ritorno di 50 anni. Successivamente sono stati effettuati nella stessa zona importanti lavori riferiti alle infrastrutture stradali della strada statale 682 Jonio-Tirreno e della nuova variante della strada statale 106 (E90). Nel 2016 la Regione Calabria ha adottato un progetto di aggiornamento del PAI in cui alcune zone se pur in misura ridotta rimangono nella fascia di pericolosità P3. La rivisitazione del PAI 2016 nella zona di interesse, è stata attuata attraverso ripериметrazioni su base morfologica (considerando sia le curve di livello che i terrazzi naturali ed i rilevati artificiali in grado di confinare le aree esondate) e/o studi idrologici-idraulici speditivi, utilizzando basi cartografiche aggiornate e/o ortofoto con scala 1:5000. Tali analisi sono state definite dalla stessa ABR come analisi di livello intermedio.

Le figure successive mostrano le aree allagate con i diversi tempi di ritorno della zona prossima alla foce del torrente Torbido.

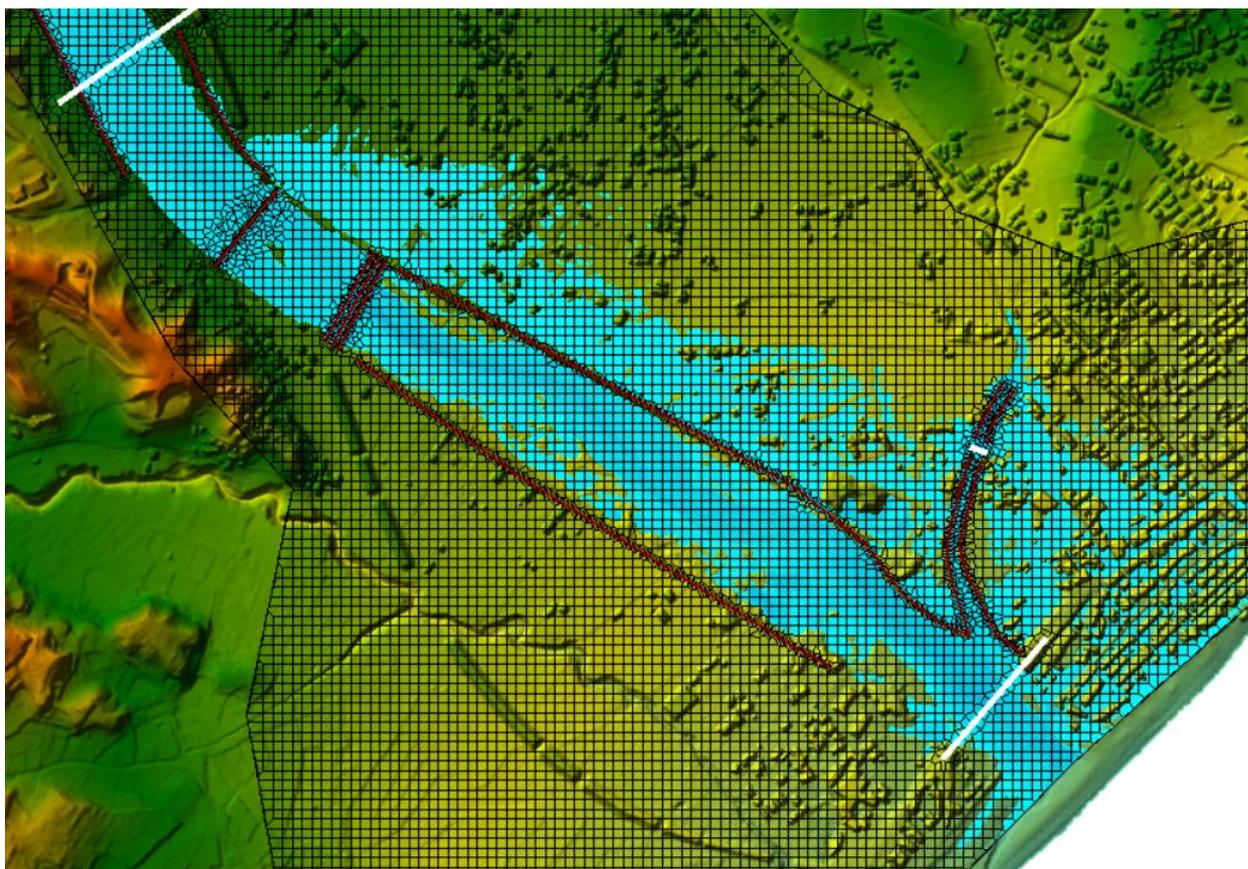


Figura 6-18 . Dettaglio dell'area allagata con la mesh di lavoro di Hec Ras, tempo di ritorno 50 anni

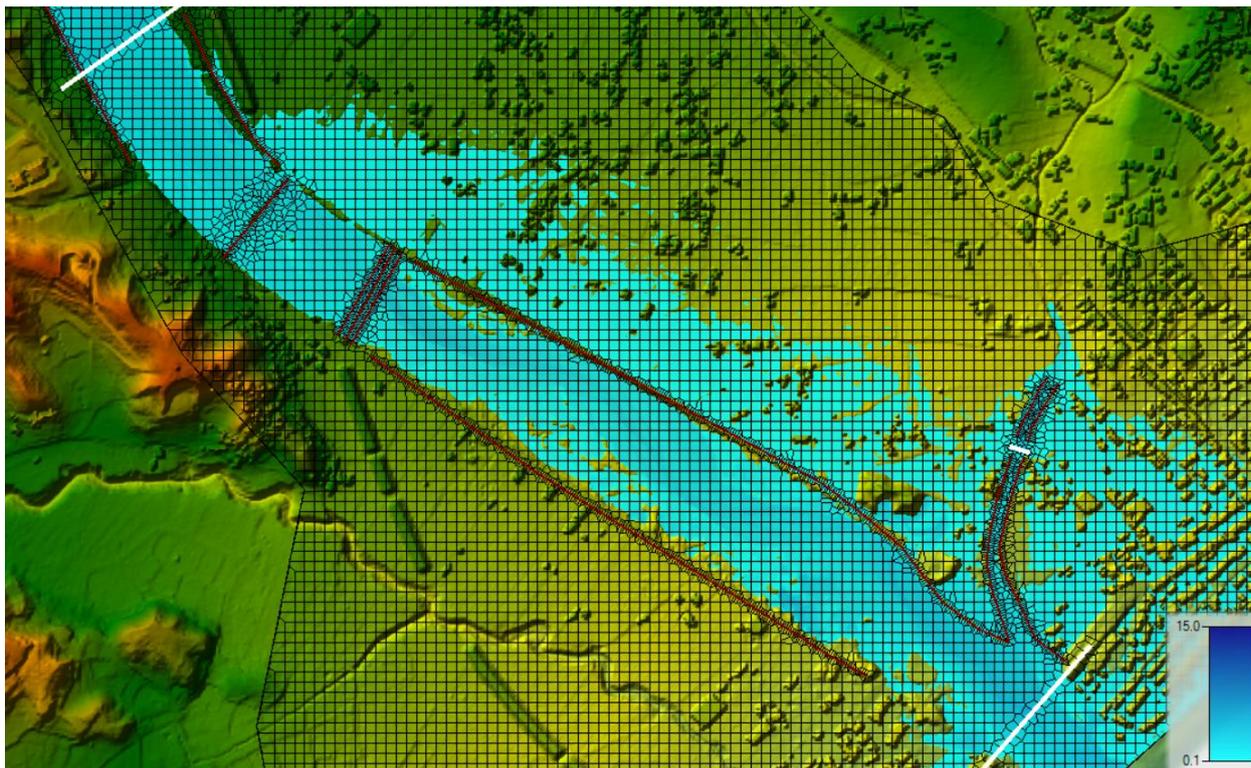


Figura 6-19 . Dettaglio dell'area allagata con la mesh di lavoro di Hec Ras, tempo di ritorno 200 anni

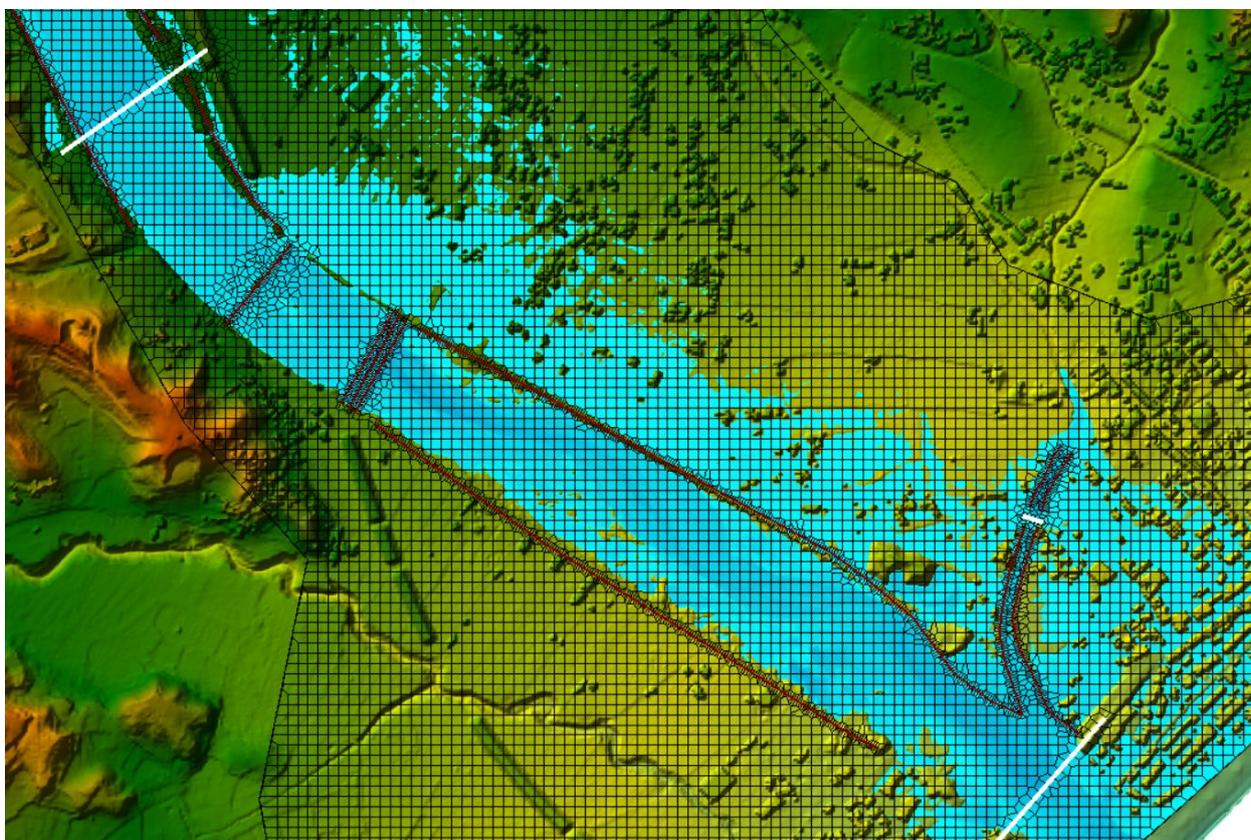


Figura 6-20. Dettaglio dell'area allagata con la mesh di lavoro di Hec Ras, tempo di ritorno 500 anni

Per una migliore comprensione del fenomeno idraulico sono state prodotte le mappe delle altezze idriche per i diversi tempi di ritorno, con le rispettive distribuzioni grafiche delle classi di appartenenza (Figura 6-21, Figura 6-22 e Figura 6-23).

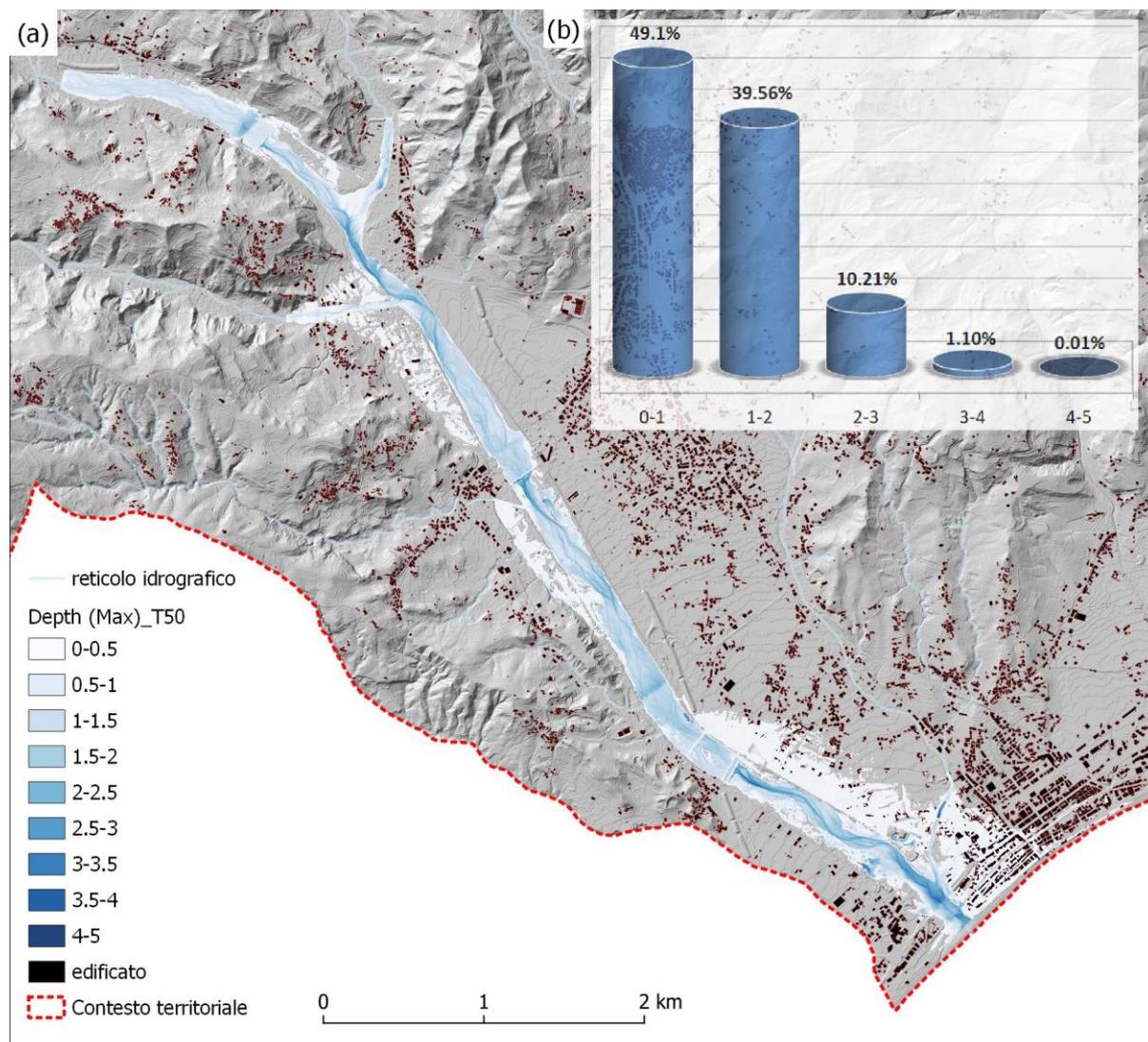


Figura 6-21. Distribuzione spaziale dei tiranti idrici: (a) dominio di analisi T 50 anni; (b) istogramma con le percentuali di pixel appartenenti ad ogni singola classe della mappa dei tiranti idrici

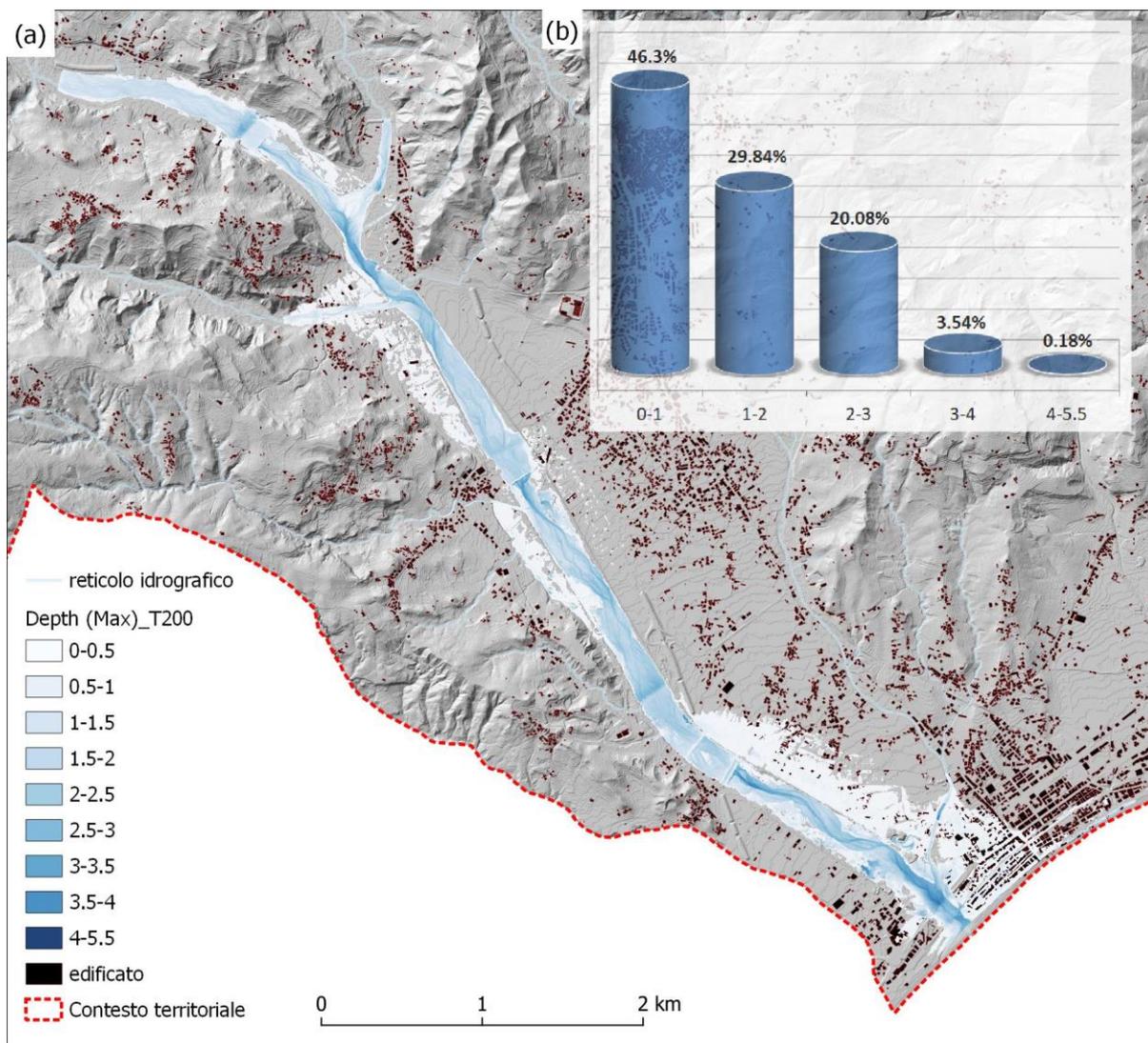


Figura 6-22. Distribuzione spaziale dei tiranti idrici: (a) dominio di analisi T 200 anni; (b) istogramma con le percentuali di pixel appartenenti ad ogni singola classe della mappa dei tiranti idrici

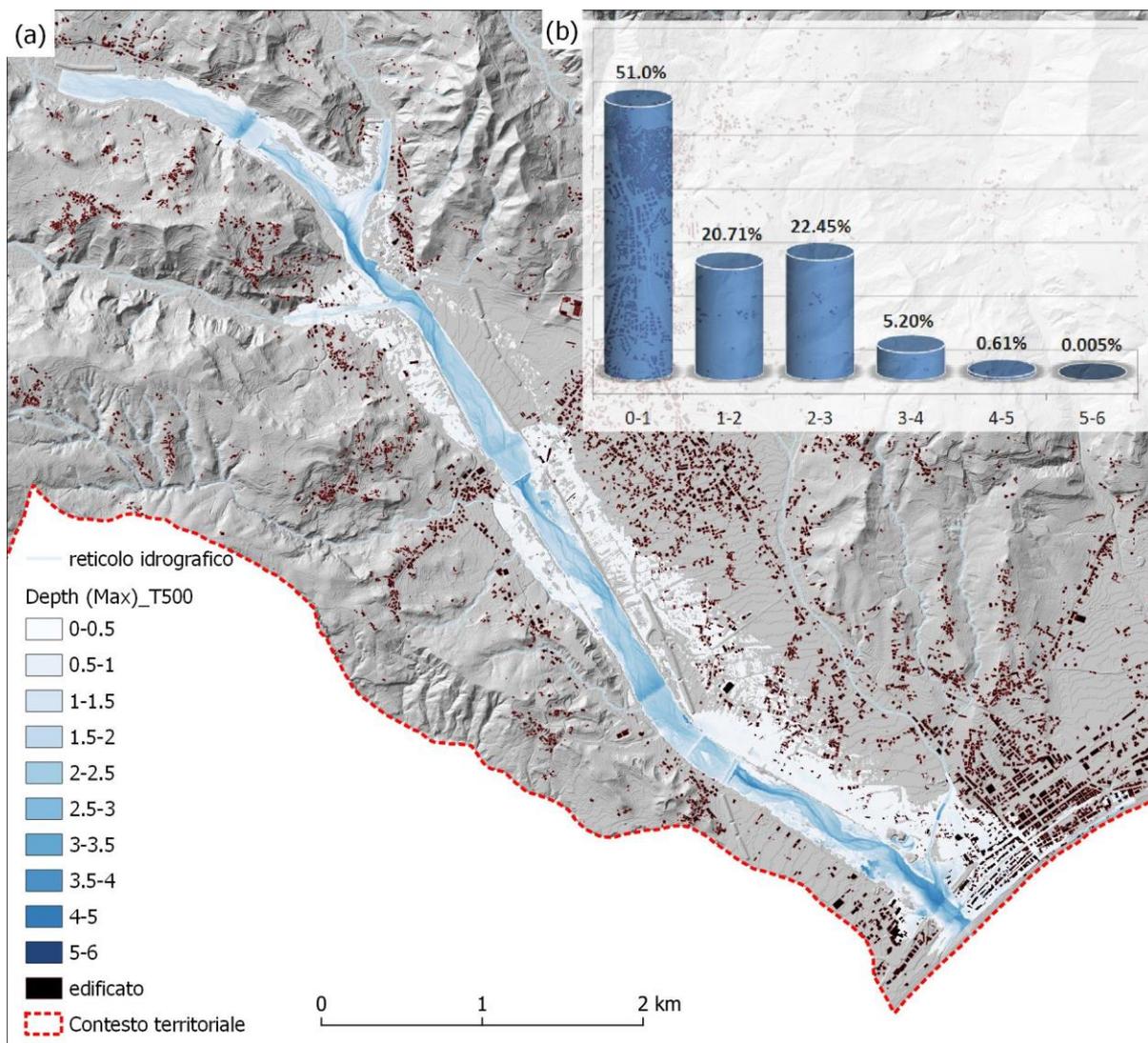


Figura 6-23. Distribuzione spaziale dei tiranti idrici: (a) dominio di analisi T 500 anni; (b) istogramma con le percentuali di pixel appartenenti ad ogni singola classe della mappa dei tiranti idrici

Di seguito si riportano delle immagini della zona prossima alla foce, con la distribuzione spaziale delle velocità con tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni.

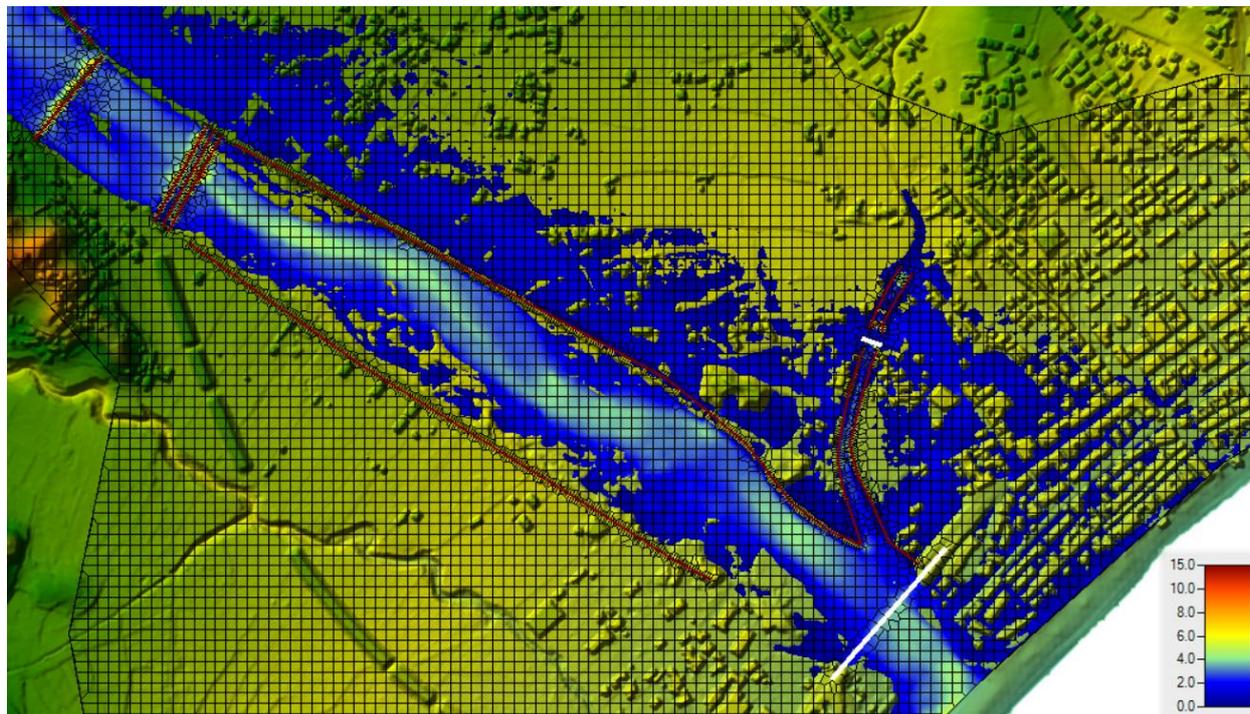


Figura 6-24. Dettaglio della velocità con la mesh di lavoro di Hec Ras, tempo di ritorno 50 anni

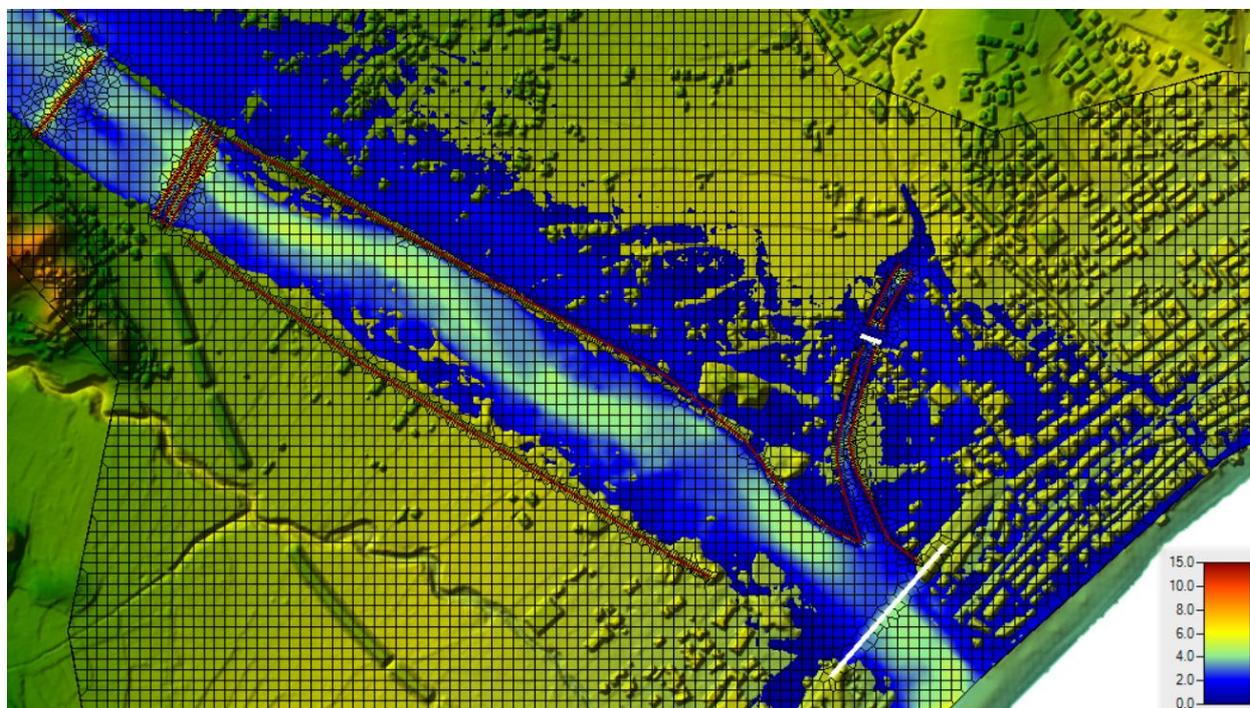


Figura 6-25. Dettaglio della velocità con la mesh di lavoro di Hec Ras, tempo di ritorno 200 anni

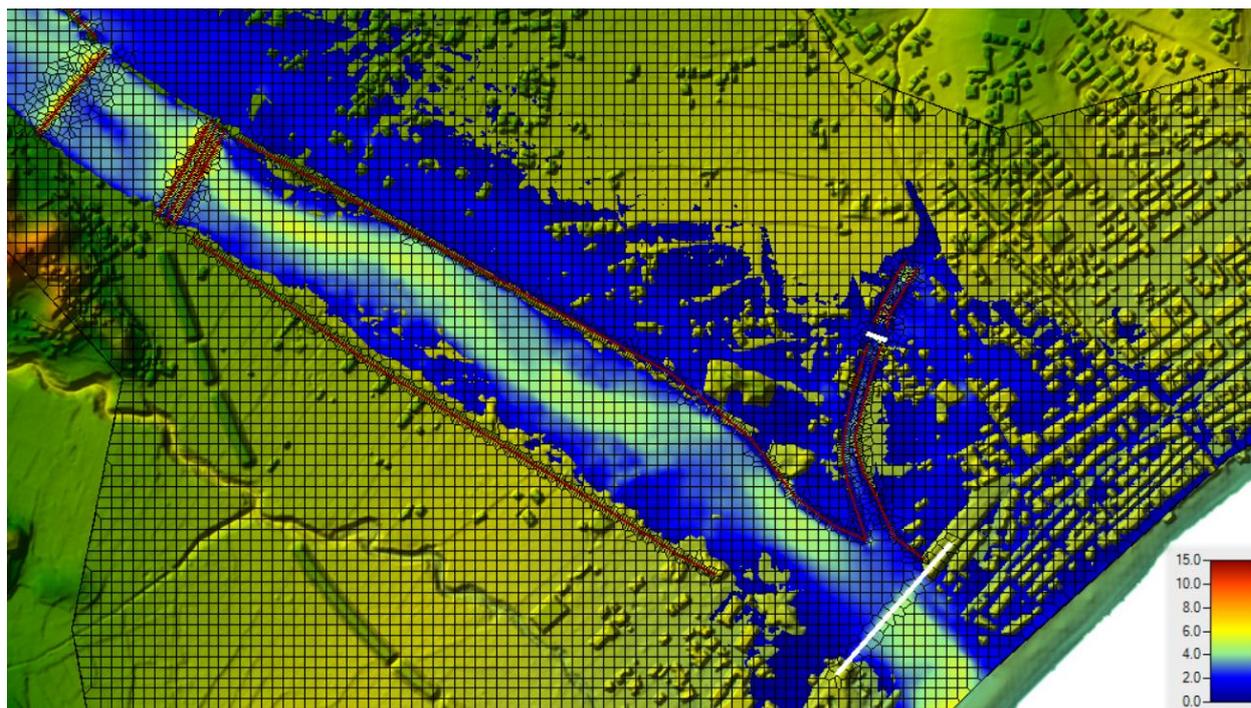


Figura 6-26. Dettaglio della velocità con la mesh di lavoro di Hec Ras, tempo di ritorno 500 anni

La modellazione numerica bidimensionale ha fornito l'involuppo delle aree allagabili, caratterizzate in funzione del tempo di ritorno, secondo le seguenti fasce:

- Aree inondabili da eventi con tempo di ritorno $TR=50$ anni (pericolosità idraulica molto elevata)
- Aree inondabili da eventi con tempo di ritorno $TR=200$ anni (pericolosità idraulica media)
- Aree inondabili da eventi con tempo di ritorno $TR=500$ anni (pericolosità idraulica bassa)

Si precisa che la reale superficie bagnata è stimata sulla base dei dettagli della morfologia del terreno sottostante e non sulla dimensione della cella di calcolo. Le celle infatti possono anche essere parzialmente bagnate/asciutte.

I maggiori problemi di esondazione si verificano in corrispondenza della sinistra idraulica. Tali zone nell'ultimo decennio sono state interessate da continui lavori riferiti alla realizzazione delle infrastrutture stradali che costeggiano il torrente Torbido. In alcuni tratti la rete stradale costituisce l'argine sinistro dello stesso corso d'acqua. Tuttavia si evidenzia la presenza di alcune sezioni in corrispondenza del tratto prossimo alla foce, caratterizzate da allagamenti diffusi. In tali zone, densamente abitate bisognerebbe approfondire il livello di indagine a partire da rilievi geometrici di dettaglio.

6.3 Pericolosità frana

La maggior parte dei fenomeni franosi, durante eventi calamitosi, sono dati da distacchi superficiali che interessano uno spessore limitato di 1-2m. L'innescò è generato generalmente da eventi pluviometrici intensi che tendono a ridurre la stabilità dei versanti con effetti al suolo pericolosi per l'uomo, le strutture e le infrastrutture.

Mediante l'applicazione del codice SHALSTAB (Shallow Slope Stability Model) si è determinato il livello di suscettibilità a franamenti superficiali del terreno. Il modello si compone di due parti: un modello idrologico, per la descrizione in condizioni di moto permanente del processo di filtrazione parallelo al pendio, ed un modello geotecnico basato sulla teoria dell'equilibrio limite di un pendio infinitamente esteso (Montgomery and Dietrich[155], Montgomery and Dietrich[156]).

Le ipotesi del modello sono:

- Pendio indefinito;
- Superficie di rottura piana e parallela;
- Flusso stazionario parallelo al pendio;
- Assenza di drenaggio profondo.

Le variabili considerate sono di tipo topografico (area drenata, larghezza delle celle del reticolo e pendenza del pendio), di tipo idrologico (intensità di pioggia) e legate alle caratteristiche del suolo (coesione, peso specifico, angolo di attrito interno e trasmissività).

6.3.1 Modello geotecnico

Il modello geotecnico utilizza la teoria del pendio indefinito. La stabilità del terreno è computata analizzando il bilancio tra la forza di coesione del terreno e la forza di taglio dovuta all'attrito

Il modello utilizza il *criterio di rottura di Mohr-Coulomb*, nel quale la componente tangenziale τ_s che si oppone allo slittamento di un volume di terra, è uguale alla forza di resistenza data dalla coesione del suolo (e/o delle radici), c , e dalla forza di attrito data dal peso normale al piano di slittamento.

$$\tau_s = c + (\sigma - u) \cdot \tan(\phi) \quad (6-10)$$

Dove:

σ = peso normale, u = pressione dei pori che si oppone e ϕ =angolo di attrito interno del suolo. Altre ipotesi importanti di questo modello sono l'assenza di falda, coesione nulla e resistenza al movimento lungo i bordi e l'estremità della frana non significativi.

La figura successiva mostra lo schema di un pendio infinitamente esteso, con superficie di scorrimento parallela al versante, in cui si ritiene valida l'applicazione della teoria dell'equilibrio limite.

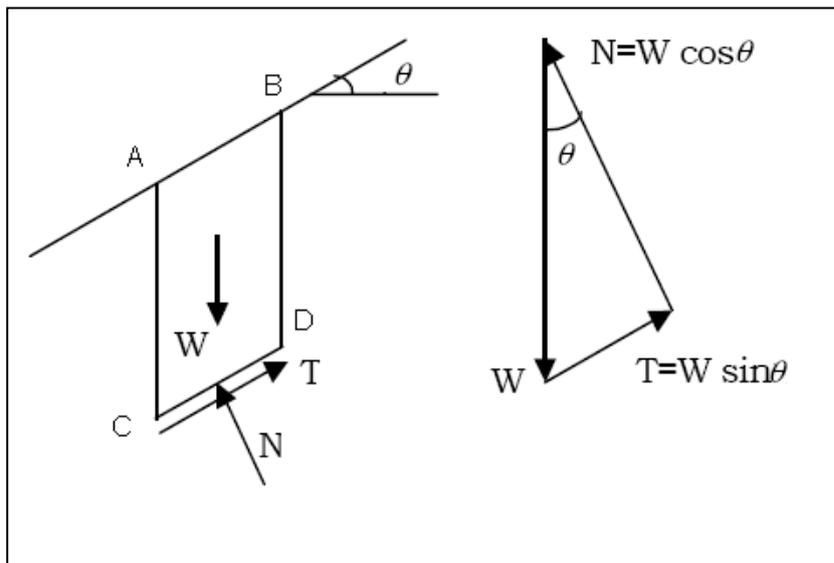


Figura 6-27. Schema delle forze agenti su un concio di terreno con superficie di scorrimento parallela al versante

La stabilità del terreno è computata analizzando il bilancio tra la forza di coesione del terreno e la forza di taglio dovuta all'attrito, attraverso il fattore di sicurezza F_s :

$$F_s = \frac{\tau_s}{\tau} \quad (6-11)$$

Con τ = tensione tangenziale e τ_s resistenza a taglio. Un pendio si definisce stabile quando $\tau < \tau_s$

Nel caso di un pendio indefinito con presenza della falda e coesione lo schema grafico da prendere in considerazione è il seguente:

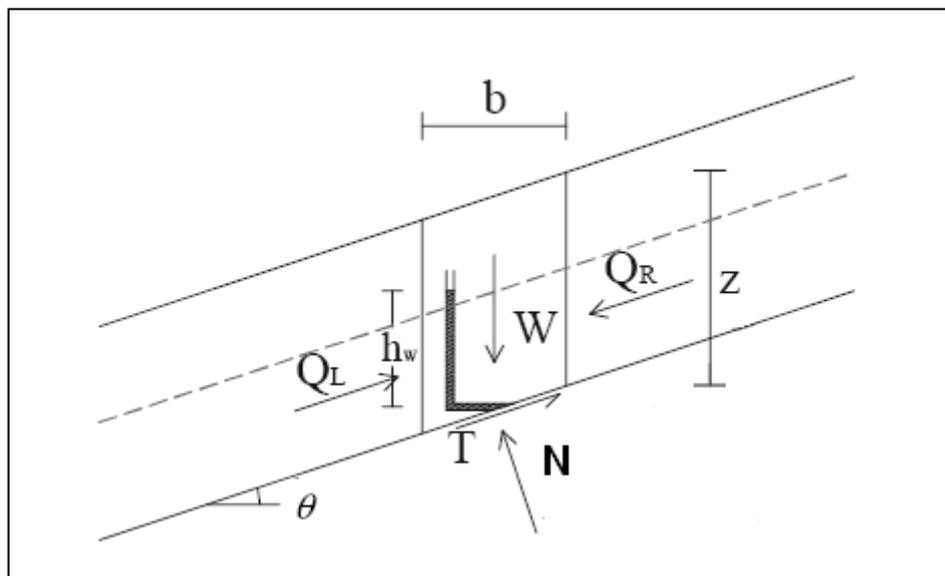


Figura 6-28. Schema delle forze agenti su un concio di terreno nel caso di pendio indefinito con presenza di falda e coesione terreno

La forza peso W , la risultante N delle tensioni normali totali σ e la risultante T delle tensioni tangenziali τ sono espresse nel seguente modo:

$$W = \gamma \cdot z \cdot b \cdot 1 \quad (6-12)$$

$$N = W \cdot \cos(\theta) = \gamma \cdot z \cdot b \cdot \cos(\theta) \quad (6-13)$$

$$T = W \cdot \sin(\theta) = \gamma \cdot z \cdot b \cdot \sin(\theta) \quad (6-14)$$

Mentre la base del concio di terreno risulta pari a:

$$L = b \cdot \cos(\theta) \quad (6-15)$$

Di seguito si definiscono le espressioni della tensione tangenziale τ agente sulla base dell'elemento e della resistenza a taglio del terreno τ_s :

$$\tau = \frac{T}{A} = \frac{W \cdot \sin(\theta)}{L \cdot 1} = \frac{W \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta)}{L \cdot 1 \cdot \cos(\theta)} = \frac{W \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta)}{b} = \gamma \cdot z \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \quad (6-16)$$

$$\tau_s = c + (\gamma \cdot z \cdot \cos^2(\theta) - u) \cdot \tan(\phi) \quad (6-17)$$

$$\text{Con } \sigma = \frac{N}{A} = \frac{W \cdot \cos(\theta)}{L \cdot 1} = \frac{W \cdot \cos^2(\theta)}{b} = \gamma \cdot z \cdot \cos^2(\theta) \quad (6-18)$$

Si ricava quindi il rapporto del fattore di sicurezza:

$$F_s = \frac{\tau_s}{\tau} = \frac{c + (\gamma \cdot z \cdot \cos^2(\theta) - u) \cdot \tan(\phi)}{\gamma \cdot z \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta)} \quad (6-19)$$

La pressione neutra u , agente sulla base del concio sarà data dalla seguente relazione:

$$u = \frac{\gamma_w \cdot h_w \cdot 1 \cdot b \cdot \cos(\theta)}{1 \cdot L} = \gamma_w \cdot h_w \cdot \cos^2(\theta) \quad (6-20)$$

Il fattore di sicurezza per un pendio indefinito per un materiale dotato di coesione ed in presenza di falda è il seguente:

$$F_s = \frac{\tau_s}{\tau} = \frac{c + z \cdot \gamma \cdot \cos^2(\theta) \cdot \left(1 - \frac{\gamma_w \cdot h_w}{\gamma \cdot z}\right) \cdot \tan(\phi)}{\gamma \cdot z \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta)} \quad (6-21)$$

dove:

c = coesione

γ = peso di volume del terreno

γ_w = peso di volume dell'acqua

z = profondità della superficie di rottura

h_w = altezza piezometrica in corrispondenza alla superficie di rottura

θ = pendenza del versante

ϕ = angolo di attrito sulla superficie di rottura

Il caso particolare è dato da assenza di coesione e falda: $c=0$; $h_w=0$ ed è composto da un fattore di sicurezza pari al rapporto delle due tangenti:

$$F_s = \frac{\tau_s}{\tau} = \frac{\tan(\phi)}{\tan(\theta)} \quad (6-22)$$

6.3.2 Modello idrologico

La modellazione idrologica è richiesta per determinare la quantità d'acqua presente nello strato superficiale del suolo per effetto delle precipitazioni.

L'assenza di drenaggio profondo, le condizioni stazionarie, implicano che l'aliquota di pioggia che si infila nel terreno q (ricarica) per l'area totale contribuente a monte della generica sezione di larghezza b , ovvero a , risulti uguale al deflusso che attraversa la sezione stessa. Pertanto, nel modello idrologico vale la seguente equazione di continuità:

$$q \cdot a = i \cdot b \quad (6-23)$$

Dove la portata i del moto di filtrazione parallelo al pendio (q) può essere calcolata attraverso l'equazione di Darcy:

$$i = k_s \cdot h_w \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \quad (6-24)$$

Con k_s pari alla conducibilità idraulica satura

L'equazione diventa:

$$q \cdot a = k_s \cdot h_w \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot b \quad (6-25)$$

A saturazione, il flusso sotterraneo è pari alla trasmissività:

$$T = k_s \cdot z \cdot \cos(\theta) \quad (6-26)$$

$$\frac{h_w}{z} = \frac{q}{T} \cdot \frac{a}{b \cdot \sin(\theta)} \quad (6-27)$$

Secondo l'equazione sopra h_w/z è determinato dal prodotto di un rapporto idrologico (q/T) moltiplicato per un rapporto topografico ($a/b \cdot \sin\theta$). Il rapporto idrologico (q/T) esprime l'intensità della precipitazione rispetto alla capacità del terreno di drenare acqua verso valle (trasmissività). Maggiore è q rispetto a T , più facilmente il suolo raggiungerà condizioni di saturazione. Il rapporto topografico $a/b \cdot \sin\theta$ esprime gli effetti della topografia nel concentrare i deflussi. Gli effetti della convergenza topografica sulla concentrazione del deflusso e sull'aumento delle pressioni interstiziali sono esplicitati nel rapporto a/b . Secondo questa relazione maggiore è l'area di drenaggio relativamente alla larghezza della cella, maggiore è il rapporto h_w/z . Aumentando la pendenza, il deflusso diventa più veloce, la capacità drenante aumenta e conseguentemente diminuisce il livello di saturazione definito dal rapporto h_w/z .

Nella Figura 6-29 è riportato uno schema del modello concettuale idrologico.

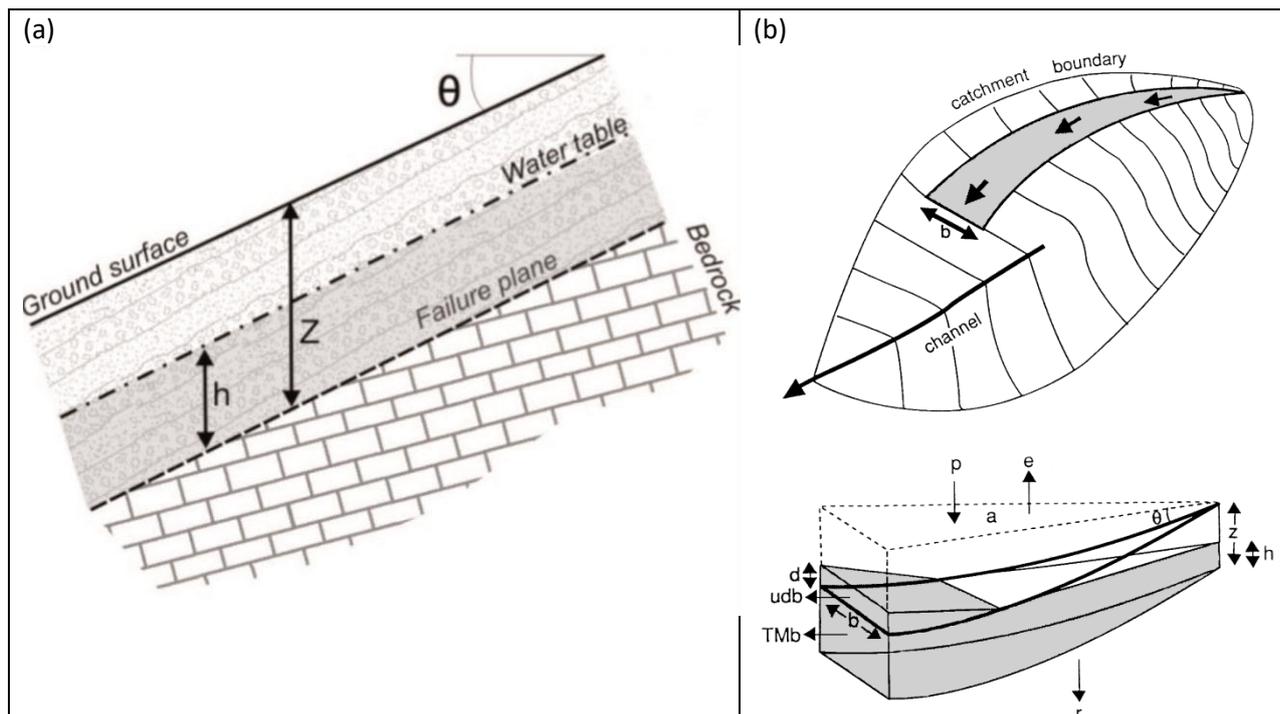


Figura 6-29. SHALSTAB modello concettuale secondo Montgomery and Dietrich, 1994). a) pendio infinito; b) modello idrologico (p, precipitazione; e, evapotraspirazione; r, drenaggio profondo; a, area drenata; h, altezza del livello dell'acqua; z, spessore del suolo; u, velocità del flusso subsuperficiale; hw, livello dell'acqua del flusso superficiale; ϑ , pendenza del versante; b, larghezza del canale di flusso). (Fonte: "Recommended procedure for validating landslide model 7th Framework Programme Safeland D2-8 2011")

6.3.3 Modello combinato

Sostituendo l'equazione del modello idrologico all'interno del modello geotecnico e ponendo il coefficiente di sicurezza $FS = 1$ si ottiene l'espressione dell'infiltrazione critica q_{cr} :

$$q_{cr} = \frac{K_{sat} \cdot b \cdot \tan(\theta)}{a \cdot \gamma_w} \cdot \left[\frac{c - \gamma_{sat} \cdot z \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta)}{\tan(\phi)} + \gamma_{sat} \cdot z \cdot \cos^2(\theta) \right] \quad (6-28)$$

Tale indice fornisce un'indicazione della propensione del pendio alla rottura (pioggia critica): ad un valore basso di q_{cr} corrisponde un'elevata suscettività al dissesto; ad un valore elevato di q_{cr} corrisponde una minore suscettività al dissesto.

Campo di stabilità	Condizione
Incondizionatamente stabile	$\tan(\theta) < \frac{c}{\gamma_{sat} \cdot z \cdot \cos^2(\theta)} + \tan(\phi) \cdot \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_{sat}}\right)$ $\tan(\theta) < \tan(\phi) \cdot \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_{sat}}\right)$
Incondizionatamente instabile	$\tan(\theta) \geq \frac{c}{\gamma_{sat} \cdot z \cdot \cos^2(\theta)} + \tan(\phi)$ $\tan(\theta) \geq \tan(\phi)$

Figura 6-30. Condizioni estreme di stabilità ed instabilità indipendenti dalla saturazione.

6.3.4 Dataset e mappa di suscettibilità da frana del Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica

L'applicazione del modello Shalstab ha richiesto i seguenti dati:

- **Dati topografici:** è stato utilizzato un DTM con risoluzione a 20 m. Dal DTM è stata ricavata la mappa delle pendenze, delle direzioni di flusso (*flow direction*) e dell'accumulo del flusso superficiale (*flow accumulation*);
- **Dati geotecnici:**
 - Coesione [Pa]: assegnata in relazione ai valori tabellari forniti in letteratura espressi sulla base degli usi del suolo. A tal riguardo è stata utilizzata la mappa degli usi del suolo della regione Calabria;
 - Angolo di attrito [°]: assegnato in relazione ai valori tabellari forniti in letteratura espressi sulla base della litologia. A tal riguardo è stata utilizzata la mappa litologica della regione Calabria;
 - Densità del suolo a saturazione [Kg/m^3]: la distribuzione del peso specifico del suolo saturo [pss] è stata ricavata mediante il peso specifico apparente (psa) e la porosità totale (pt) applicando la seguente espressione:
$$\text{pss} = \text{psa} + \gamma_w \text{pt} \quad (\text{con } \gamma_w = 1000 \text{ Kg/m}^3)$$

In questo caso sono state utilizzate delle mappe raster del peso specifico apparente e della porosità totale con risoluzione a 250 m;

- Spessore suolo [m]: assegnato in relazione ai valori tabellari forniti in letteratura espressi sulla base degli usi del suolo, ricavati dalla mappa pedologica della regione Calabria (ARSSA);
- Permeabilità a saturazione [m/giorno]: dimensionalmente è una velocità e può assumere diversi valori in funzione delle caratteristiche geotecniche del terreno e rappresenta la capacità di un terreno di opporsi al moto di filtrazione del fluido. Essa è stata ricavata sulla base di grafici riferiti alla variazione di specifici parametri idraulici del terreno in funzione delle percentuali di sabbia ed argilla (Mendicino[157]).

Dopo aver elaborato tutti i dati cartografici necessari come input del modello Shalstab, l'approccio metodologico è stato strutturato secondo 4 step di analisi:

1. Calcolo della mappa dell'infiltrazione critica q_{cr} secondo la formulazione dell'equazione 6-28;
2. Valutazione delle aree incondizionatamente stabili, che rispettano la seguente espressione $\tan(\theta) < \tan(\phi) \cdot (1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_{sat}})$. Le zone stabili (così come quelle instabili) sono calcolate a priori (indipendentemente dalle infiltrazioni) in funzione della pendenza e delle caratteristiche meccaniche;
3. Valutazione delle aree incondizionatamente instabili, che rispettano la seguente espressione $\tan(\theta) \geq \tan(\phi)$;
4. Analisi dei risultati dell'infiltrazione.

La definizione delle classi della mappa di suscettibilità è stata fatta utilizzando le categorie rappresentate nella Tabella 6-12.

Nella Figura 6-31 vengono mostrati i risultati ottenuti in termine di infiltrazione critica espressa in mm/giorno, necessaria per produrre instabilità. Con riferimento alle soglie di pioggia sono state considerate 5 classi: < 50 mm/gg; 50-100 mm/gg; 100-200 mm/gg; 200-400 mm/gg; e > 400 mm/gg; corrispondenti a pericolosità altissima, molto alta, media, bassa e molto bassa.

Incondizionatamente stabile
Incondizionatamente instabile
0 – 50 (mm/giorno)
50 – 100 (mm/giorno)
100 – 200 (mm/giorno)
200 – 400 (mm/giorno)
400 (mm/giorno)

Tabella 6-12. Definizione delle classi di pericolosità

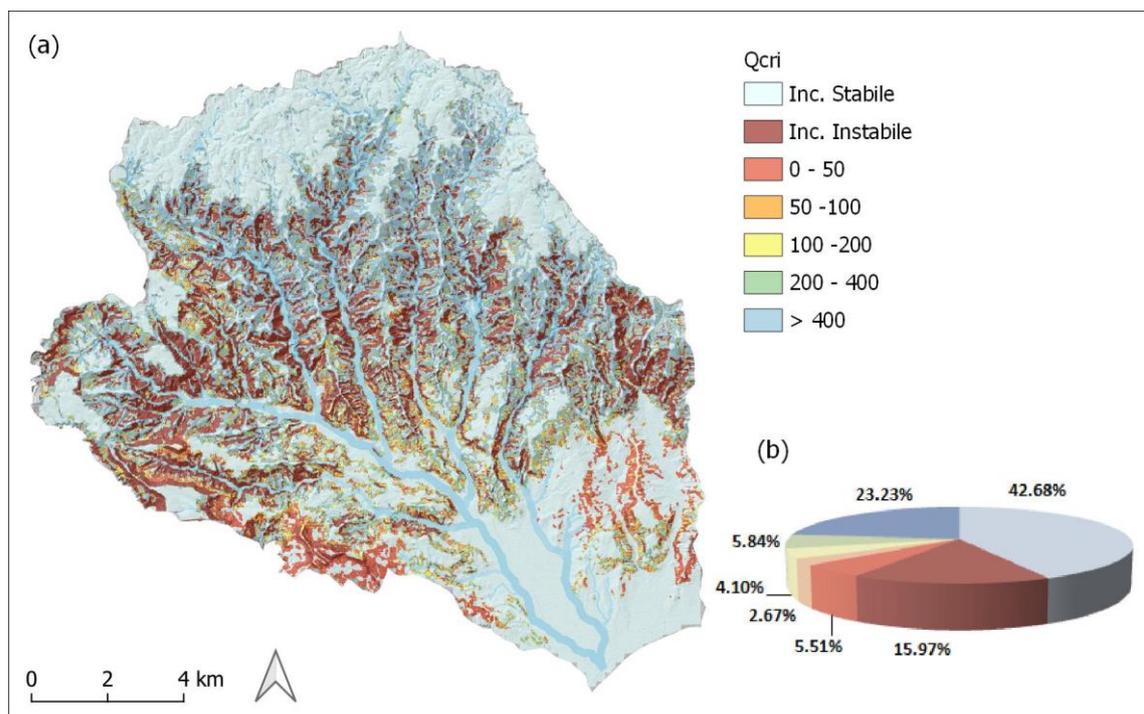


Figura 6-31. Mappa di suscettibilità da frana del Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica (a); diagramma delle classi di suscettibilità (b)

I risultati della modellazione attraverso modello Shalstab sono esplicitati nel diagramma seguente (Figura 6-32). Le distribuzioni in percentuale delle classi di suscettibilità da frana mostrano che circa il 66% del territorio risulta stabile, circa il 21% è instabile, mentre la restante porzione del 13% è mediamente stabile.

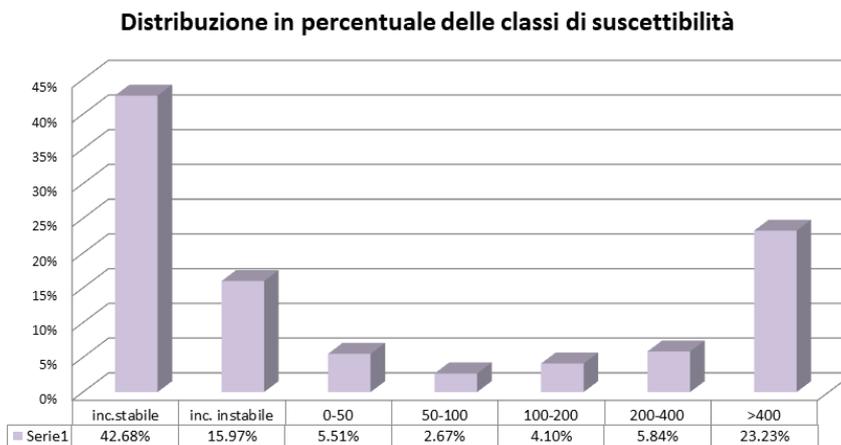


Figura 6-32. Distribuzione classi di suscettibilità da frana

6.3.5 Mappa della pericolosità da frana PAI

I risultati ottenuti dalla modellazione Shalstab sono stati sovrapposti a quelli PAI, redatti dalla già Autorità di Bacino della Regione Calabria al fine di valutare la modellazione stessa. Si precisa che tali mappe sono state approvate dal Comitato ABR nel 2016, ma attualmente non adottate dalla Autorità di Distretto dell'Appennino Meridionale. Il confronto non restituisce chiare indicazioni in merito all'attendibilità dei risultati ottenuti applicando il modello Shalstab in quanto le mappe PAI si riferiscono esclusivamente alle zone abitate. Infatti le mappe di pericolosità frana adottate nel 2001 ed attualmente vigenti, prevedevano in via prioritaria l'analisi dei centri urbani, delle loro frazioni e dei nuclei abitati (> 200 abitanti) nonché delle principali vie di accesso, rimandando l'estensione dell'analisi alle successive fasi di aggiornamento. Nel 2015/ 2016 a fronte di un'attività di acquisizione dati è stata redatta una nuova carta inventario dei fenomeni franosi e sono state riperimetro le aree a pericolosità frana su base CTR 1:5000.

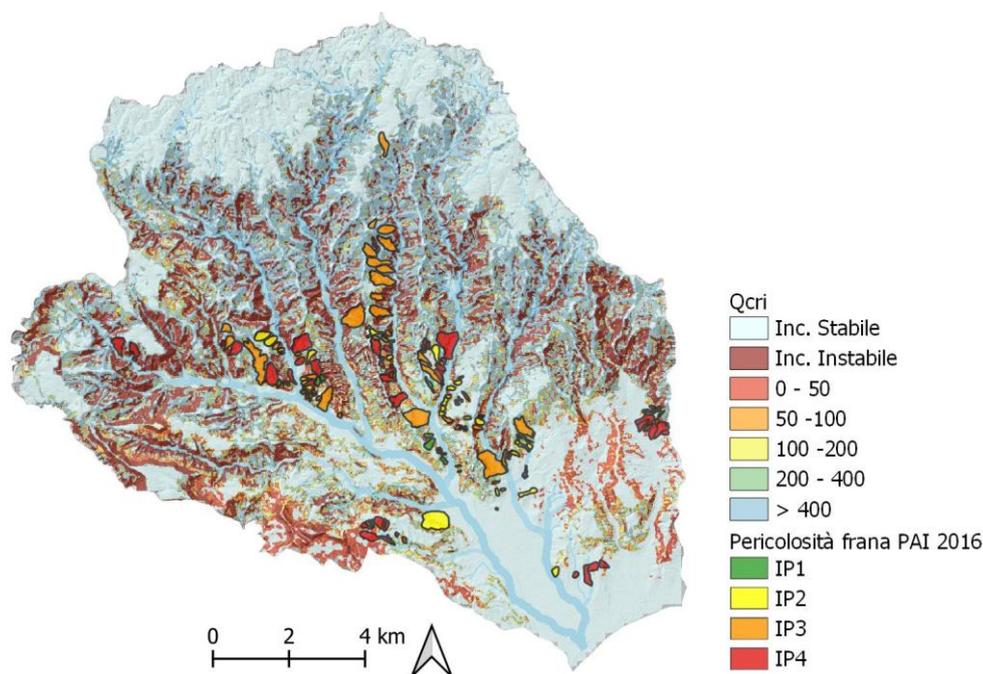


Figura 6-33. Mappa di suscettibilità da frana, ottenuta attraverso il programma Shalstab e mappe di pericolosità da frana PAI 2016

7 Approccio di calcolo modulare dell'Indice di Vulnerabilità del Contesto Territoriale

L'indice di vulnerabilità è calcolato secondo un approccio modulare, tenendo conto di tre componenti: l'indice di vulnerabilità sociale ($TCVI_{people}$); l'indice di vulnerabilità territoriale ($TCVI_{exposure}$) e l'indice di vulnerabilità delle infrastrutture stradali in situazioni di emergenza ($TCVI_{emergency}$). L'analisi è stata condotta prendendo come riferimento l'unità spaziale della zona censuaria ISTAT, a livello di Contesto Territoriale. La scelta delle variabili caratteristiche rappresenta un punto molto delicato del lavoro, in quanto dipende dalla disponibilità e qualità dei dati e influenza in modo diretto la significatività del lavoro stesso.

Di seguito si forniscono i dettagli riferiti ai dati ed all'approccio metodologico implementato per il calcolo dei diversi indici di vulnerabilità. Gli indici rappresentati attraverso delle mappe raster, sono di facile lettura e comprensione e tengono conto di aspetti multidisciplinari riferiti alla sfera socio-demografica, a quella territoriale, agli aspetti climatici, alla pianificazione di emergenza ed ai disagi legati al funzionamento delle infrastrutture stradali durante un evento calamitoso. Il metodo proposto ha il vantaggio di essere multi scalare in quanto facilmente riapplicabile in forma aggregata, a partire dalle aree censuarie di rilevamento ISTAT, ad unità spaziali di maggiore estensione.

7.1 $TCVI_{people}$

L'indice di vulnerabilità sociale è rappresentato dal $TCVI_{people}$. Per il calcolo di questo indice sono state utilizzate diverse variabili riferite al 15° Censimento della popolazione e delle abitazioni 2011 e al 9° Censimento generale dell'industria e dei servizi dell'anno 2011 eseguito dall'ISTAT. L'utilizzo di tecniche statistiche di analisi multivariata ha consentito di valutare il grado di correlazione tra le variabili di input, riducendone la loro dimensionalità. Durante l'elaborazione di questo indice sono state scelte circa una cinquantina di variabili con riferimenti agli studi presenti in letteratura ed alle caratteristiche del territorio oggetto di studio. Successivamente tali variabili sono state analizzate e selezionate in base anche ai test statistici. L'adeguatezza del campionamento è stata verificata tramite Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), mentre la forza della relazione tra le variabili è stata valutata mediante il test di sfericità di Barlett. Questi test sono condotti nell'analisi delle componenti principali per identificare se i dati sono appropriati per l'analisi fattoriale.

La Tabella 7-1 riporta il set di dati selezionato con le relative statistiche descrittive.

Il valore KMO calcolato sulla base delle 21 variabili finali è pari a 0,9 e mostra come il set di dati sia abbastanza adeguato. Il test di Bartlett risulta altresì altamente significativo (Sig. = 0.000), il che implica che i dati sono appropriati per l'analisi delle componenti. Per testare la coerenza interna del set di dati, è stato eseguito il test alpha di Cronbach. Il coefficiente di affidabilità alfa di Cronbach varia normalmente tra 0 e 1, più il coefficiente è vicino a 1.0, maggiore è la consistenza interna degli elementi (variabili) nella scala. I risultati mostrano un buon valore di affidabilità, pari a 0,96.

N.	Variabili	#	Mean	Max	Min	Std. Dev.
1	Percentuale di residenti con disabilità	195	0.00	0.01	0.00	0.00
2	Densità abitativa	195	2235.07	70135.77	0.00	5870.17
3	Percentuale del tasso di crescita 2001-2011	195	4.08	59.57	0.00	10.49
4	Percentuale di residenti - età < 5 anni	195	0.03	0.39	0.00	0.05
5	Percentuale di residenti - età 5-14 anni	195	0.05	0.58	0.00	0.10
6	Percentuale di residenti - età > 65 anni	195	0.10	0.86	0.00	0.16
7	Percentuale di residenti separati/divorziati	195	0.01	0.13	0.00	0.02
8	Percentuale di residenti vedovi/e	195	0.04	0.37	0.00	0.08
9	Percentuale di famiglie residenti con 6 o oltre componenti	195	0.02	0.21	0.00	0.03
10	Percentuale di famiglie in abitazioni in affitto	195	0.04	1.09	0.00	0.12
11	Percentuale popolazione -femmine	195	0.26	2.83	0.00	0.47
12	Percentuale di residenti con licenza media	195	0.16	1.41	0.00	0.28
13	Percentuale di residenti con licenza elementare	195	0.11	0.99	0.00	0.17
14	Percentuale di residenti analfabeti	195	0.02	0.18	0.00	0.03
15	Percentuale di residenti totale di 15 anni e più disoccupata in cerca di nuova occupazione	195	0.02	0.22	0.00	0.04
16	Percentuale di residenti totale di 15 anni e più casalinghi/e	195	0.05	0.74	0.00	0.10
17	Percentuale di stranieri e apolidi residenti in Italia - età 0 - 29 anni	195	0.00	0.08	0.00	0.01
18	Percentuale di stranieri e apolidi residenti in Italia - età > 54 anni	195	0.00	0.01	0.00	0.00
19	Percentuale di lavoratori dipendenti, altri lavoratori retribuiti e volontari	195	0.51	12.86	0.00	1.56
20	Percentuale di posti letto in strutture sanitarie pubbliche o private	195	0.51	100.00	0.00	7.16
21	Percentuale di posti letto in strutture ricettive	195	0.51	49.65	0.00	3.79

Tabella 7-1. Statistiche descrittive del dataset dell'indice TCVI_{people}

Attraverso l'analisi della PCA sono state individuate 4 Componenti Principali in grado di spiegare l'80.4% della varianza totale (Tabella 7-2). L'interpretazione della matrice delle componenti generata dalla PCA, ha permesso di attribuirne i seguenti nomi: socio-demografica (varianza pari a 56.4 %); strutture ricettive (varianza pari a 9.1%); strutture sanitarie (varianza pari a 7.7%), densità abitativa e crescita (varianza pari a 7.2%).

La Tabella 7-2 presenta i risultati della soluzione iniziale quando è selezionata anche l'opzione per la rotazione dei fattori.

Componente	Autovalori iniziali			Caricamenti somme dei quadrati di estrazione			Caricamento delle somme dei quadrati rotazione		
	Totale	% di varianza	% cumulativa	Totale	% di varianza	% cumulativa	Totale	% di varianza	% cumulativa
1	12.96	61.73	61.73	12.96	61.73	61.73	11.84	56.37	56.37
2	1.58	7.52	69.26	1.58	7.52	69.26	1.92	9.14	65.51
3	1.20	5.70	74.96	1.20	5.70	74.96	1.61	7.66	73.17
4	1.14	5.45	80.41	1.14	5.45	80.41	1.52	7.24	80.41
5	0.82	3.92	84.32						
6	0.65	3.10	87.42						
7	0.61	2.93	90.35						
8	0.52	2.49	92.84						
9	0.38	1.83	94.66						
10	0.30	1.45	96.11						
11	0.24	1.13	97.25						
12	0.16	0.77	98.02						
13	0.12	0.59	98.61						
14	0.09	0.44	99.05						
15	0.07	0.33	99.39						
16	0.06	0.27	99.66						
17	0.03	0.14	99.80						
18	0.02	0.08	99.88						
19	0.01	0.06	99.94						
20	0.01	0.05	99.99						
21	0.00	0.01	100.00						

Tabella 7-2. Autovalori della matrice completa e varianza spiegata delle componenti principali della $TCVI_{people}$

La Tabella 7-3 riporta i risultati ottenuti dalla PCA, applicata col metodo della rotazione. In particolare per ogni componente principale l'interpretazione della soluzione avviene a differenti livelli:

- *Comunalità*: indica l'ammontare di variabilità che una singola variabile condivide con tutte le altre variabili;
- *Factor loadings*: rappresentano le covarianze (correlazioni) tra i fattori e le variabili originali (standardizzate). Esse vengono definite saturazioni fattoriali e nella soluzione ruotata aiutano a dare un nome ai fattori che emergono nella soluzione. In questo lavoro sono state considerate inadeguate tutte le saturazioni sotto il livello soglia di 0.5;
- *Segno*: operatore aritmetico assegnato ad ogni componente in base al contributo positivo o negativo che fornisce nel calcolo della vulnerabilità.

Componente Principale	Variabile	Comunalità (estrazione)	Loading	Segno
1. Socio-demografica	Percentuale di residenti con disabilità	.494	.642	
	Percentuale di residenti - età < 5 anni	.901	.925	
	Percentuale di residenti - età 5-14 anni	.939	.931	
	Percentuale di residenti - età > 65 anni	.941	.833	
	Percentuale di residenti separati/divorziati	.858	.854	
	Percentuale di residenti vedovi/e	.933	.816	
	Percentuale di famiglie residenti con 6 o oltre componenti	.767	.867	
	Percentuale di famiglie in abitazioni in affitto	.805	.814	
	Percentuale popolazione -femmine	.984	.928	
	Percentuale di residenti con licenza media	.950	.923	
	Percentuale di residenti con licenza elementare	.937	.888	+
	Percentuale di residenti analfabeti	.754	.643	
	Percentuale di residenti totale di 15 anni e più disoccupata in cerca nuova occupazione	.829	.903	
	Percentuale di residenti totale di 15 anni e più casalinghi/e	.940	.926	
	Percentuale di stranieri e apolidi residenti in Italia - età 0 - 29 anni	.665	.799	
	Percentuale di stranieri e apolidi residenti in Italia - età > 54 anni	.583	.728	
	Percentuale di lavoratori dipendenti, altri lavoratori retribuiti e volontari	.773	.629	
2. strutture ricettive	Percentuale di posti letto in strutture ricettive	.829	.900	+
3. strutture sanitarie	Percentuale di posti letto in strutture sanitarie pubbliche o private	.641	.796	
4. Densità abitativa e crescita	Densità abitativa	.669	.789	
	Percentuale del tasso di crescita 2001-2011	.693	.811	+

Tabella 7-3. Risultati dell'analisi statistica della PCA con rotazione Varimax e criterio di selezione di Kaiser, per l'indice $TCVI_{people}$

I valori utilizzati per la rappresentazione cartografica dei livelli di vulnerabilità sono quelli dei *factor scores*, che rappresentano i punteggi compositi stimati per ogni unità con riferimento alle componenti estratte (stimati per ogni rispondente).

Per valorizzare infine il contributo di ciascuna componente sul calcolo finale dell'indice $TCVI_{people}$, l'indice è stato pesato moltiplicando gli *scores* ottenuti dalla PCA, per la corrispondente percentuale di varianza spiegata da ogni componente. Gli *scores* pesati sono stati addizionati o sottratti tra loro, in base al segno attribuito ad ogni singola componente.

La classificazione degli indici di vulnerabilità finalizzata alla rappresentazione cartografica delle mappe, è stata una fase molto delicata dello studio ed ha richiesto diverse simulazioni. Per poter scegliere il numero rappresentativo di classi di vulnerabilità e soprattutto al fine di poter definire gli intervalli di interruzione di ogni classe sono stati analizzati i seguenti metodi di classificazione:

- Intervallo uguale;
- Quantile;
- Deviazione standard;
- Normalizzazione;
- Fuzzy set.

In merito al numero di classi è stata scelta una suddivisione in 5 livelli di vulnerabilità. Infatti è stato sperimentato che con un numero di classi inferiore a 5, la forma della distribuzione dei dati risultava non chiara, mentre con un numero maggiore si creava confusione nella restituzione delle informazioni finali.

Con riferimento alla tipologia di classificazione, il metodo degli intervalli uguali si è rivelato subito quello meno adatto in quanto il *range* di variabilità degli indici relativi e di quelli aggregati risultava variabile, di conseguenza non era possibile definire una legenda univoca e comparabile per tutte le mappe. Tale tipo di classificazione si adatta meglio a distribuzioni uniformi, con dati continui, mentre risulta poco applicabile quando i dati sono raggruppati attorno a pochi valori.

Con la classificazione quantile le *feature* sono raggruppate in numeri uguali ad esempio 10 o 20 per classe. Si tratta di un tipo di classificazione adatta a dati con distribuzione lineare di tipo regolare. La classificazione quindi si ottiene ordinando le osservazioni territoriali sulla base della variabile da rappresentare e suddividendo la distribuzione in modo da ottenere il numero di classi prefissato. Anche in questo caso i risultati apparivano fuorvianti. Con tale tecnica infatti *feature* simili possono essere posizionate in classi adiacenti oppure *feature* con valori notevolmente diversi possono essere inserite nella stessa classe.

Il metodo della deviazione standard è quello usato per la rappresentazione dell'indice di vulnerabilità sociale SoVI (Cutter *et al.* [67]). La deviazione standard indica quanto il valore attribuito di una *feature* si discosta dalla media. Essa si basa sulle proprietà statistiche della distribuzione normale e presuppone che la distribuzione della variabile approssimi la distribuzione *gaussiana*. La media e la deviazione standard (StdDev) sono utilizzate come confini tra le classi. Le 5 classi di vulnerabilità sociale diffusamente utilizzate in letteratura sono individuate nel seguente modo: molto bassa (< -1.5 o -1 StdDev), bassa (-1.5 o $-1 < \text{StdDev} < -0.5$), media ($-0.5 < \text{StdDev} < 0.5$), alta ($0.5 < \text{StdDev} < 1.5$ o 1) e molto alta (> 1.5 o 1 StdDev). Tale tecnica non illustra i valori degli elementi ma solo la loro distanza dalla media. Le mappe di vulnerabilità delle componenti principali e la mappa aggregata $\text{TCVI}_{\text{people}}$ rappresentate attraverso la tecnica della deviazione standard, mettevano in luce le categorie ad alta vulnerabilità ma risultava completamente assente la categoria afferente al livello molto basso di vulnerabilità, pur avendo un importante numero di dati con valori molto bassi.

Per contro il metodo della normalizzazione, calcolato sulla base del numero più piccolo e di quello più grande, restituiva molte classi con livelli molto bassi di vulnerabilità a discapito degli altri livelli.

Una maggiore coerenza nella classificazione dei dati è stata riscontrata con la tecnica fuzzy, che ha consentito di inserire tutti i risultati all'interno di classi, evitando soluzioni sovrapponibili o rappresentazioni che potessero andare a sottostimare o sovrastimare eccessivamente i risultati finali. Per la classificazione degli *scores* e quindi la relativa rappresentazione cartografica delle mappe degli indici di vulnerabilità sono state quindi utilizzate le funzioni fuzzy tipo *Linear*, *MSlarge* e *Large*. Sono state condotte diverse simulazioni delle tre funzioni cambiando i parametri che ne caratterizzano le relative espressioni analitiche. La loro performance è stata valutata sulla base di alcune metriche statistiche e sulla base dello studio degli istogrammi di distribuzione dei dati.

Nelle seguenti tre tabelle, sono riportati i risultati delle simulazioni condotte, con riferimento ai parametri che hanno restituito i migliori risultati.

Indice	Parametri della funzione	MSE	RMSE	MAE	MAPE
PC1	max e min assoluti	0.71	0.84	0.57	143.11
PC2	max e min assoluti	0.88	0.94	0.41	718.49
PC3	max e min assoluti	0.88	0.94	0.47	365.99
PC4	max e min assoluti	0.82	0.90	0.58	165.33
TCVI people	max e min assoluti	0.36	0.60	0.41	189.89
PC1	max e min ridotti del 10%	0.69	0.83	0.56	141.49
PC2	max e min ridotti del 10%	0.87	0.93	0.41	717.87
PC3	max e min ridotti del 10%	0.88	0.94	0.47	365.38
PC4	max e min ridotti del 10%	0.80	0.90	0.58	164.30
TCVI people	max e min ridotti del 10%	0.35	0.59	0.41	188.59
PC1	max e min ridotti del 15%	0.68	0.82	0.55	140.82
PC2	max e min ridotti del 15%	0.87	0.93	0.41	717.50
PC3	max e min ridotti del 15%	0.87	0.93	0.46	365.02
PC4	max e min ridotti del 15%	0.80	0.89	0.57	163.71
TCVI people	max e min ridotti del 15%	0.34	0.58	0.40	187.93

Tabella 7-4. Metriche statistiche della $TCVI_{people}$ applicate alla funzione fuzzy "linear"

Indice	Parametri della funzione	MSE	RMSE	MAE	MAPE
PC1	f2=0.6 f1=5	0.46	0.68	0.31	53.58
PC2	f2=0.6 f1=5	3.71	1.93	0.52	135.16
PC3	f2=0.6 f1=5	1.03	1.01	0.39	97.61
PC4	f2=0.6 f1=5	1.31	0.61	0.38	68.66
TCVI people	f2=0.6 f1=5	0.21	0.46	0.29	75.85
PC1	f2=0.4 f1=4	1.16	1.08	0.88	177.05
PC2	f2=0.4 f1=4	0.99	0.99	0.35	109.49
PC3	f2=0.4 f1=4	1.02	1.01	0.43	113.31
PC4	f2=0.4 f1=4	1.15	0.88	0.77	159.46
TCVI people	f2=0.4 f1=4	0.48	0.69	0.54	146.58
PC1	f2=0.5 f1=6	0.87	0.94	0.72	140.12
PC2	f2=0.5 f1=6	0.98	0.99	0.34	105.53
PC3	f2=0.5 f1=6	0.99	1.00	0.41	102.58
PC4	f2=0.5 f1=6	0.94	0.81	0.65	130.36
TCVI people	f2=0.5 f1=6	0.30	0.55	0.40	107.24

Tabella 7-5. Metriche statistiche della $TCVI_{people}$ applicate alla funzione fuzzy "large"

Indice	Parametri della funzione	MSE	RMSE	MAE	MAPE
PC1	a=1 b=1 m=0 s=1	0.64	0.80	0.52	86.04
PC2	a=1 b=1 m=0 s=1	0.79	0.89	0.27	85.82
PC3	a=1 b=1 m=0 s=1	0.78	0.88	0.32	78.05
PC4	a=1 b=1 m=0 s=1	0.68	0.82	0.47	85.39
TCVI people	a=1 b=1 m=0.04 s=0.75	0.30	0.55	0.36	84.32

Tabella 7-6. Metriche statistiche della $TCVI_{people}$ applicate alla funzione fuzzy "MS large"

In base ai risultati prodotti nelle simulazioni effettuate utilizzando tre diverse funzioni, è stata scelta come funzione di appartenenza la MSLarge (Figura 7-1). Quest'ultima infatti non solo presenta dei parametri che ottimizzano le metriche statistiche adottate, ma la funzione restituisce a livello grafico anche un buon andamento dei valori stessi. L'espressione analitica di tale funzione di appartenenza consente di rappresentare bene l'intervallo dei valori alti e consente altresì di non avere problemi con i valori bassi delle diverse componenti, come succedeva con la funzione tipo large.

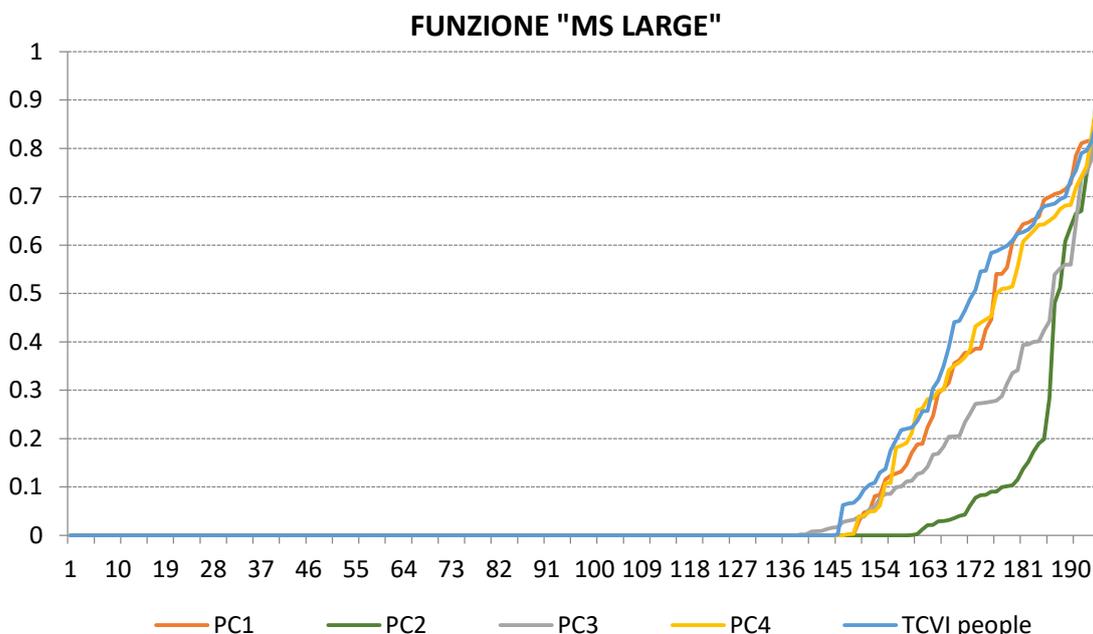
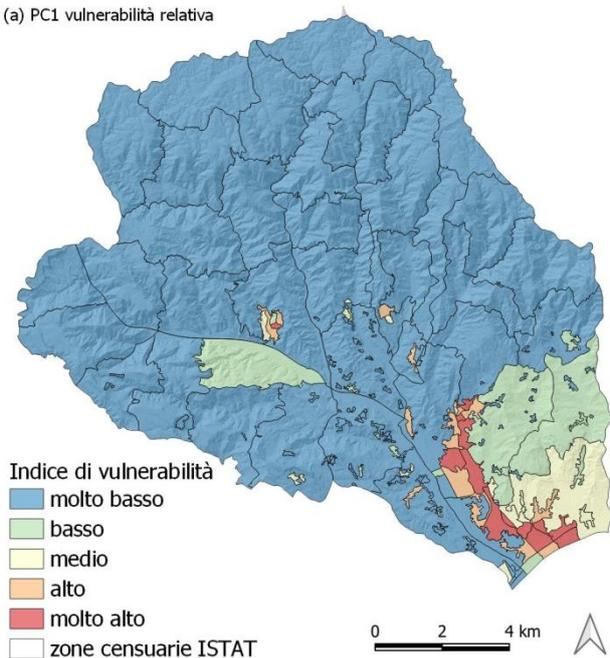


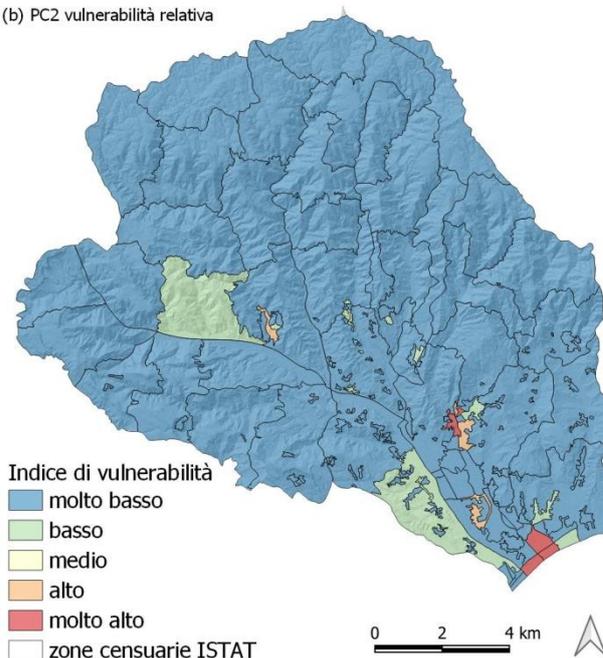
Figura 7-1. Diagramma della funzione di appartenenza MS large delle componenti di vulnerabilità $TCVI_{people}$

Una volta selezionata la funzione fuzzy di appartenenza sono state elaborate le mappe di vulnerabilità con valori variabili tra 0 e 1. Successivamente attraverso tecniche di geoprocessing è stata effettuata la riclassificazione di tutte le mappe in intervalli uguali. In particolare sono state ricavate 5 classi di vulnerabilità: molto bassa (0-0.2), bassa (0.2 – 0.4), media (0.4 – 0.6), alta (0.6 – 0.8) e molto alta (0.8 – 1). Le mappe riportate nella Figura 7-2, rappresentano la vulnerabilità relativa elaborata sulla base degli *scores* delle quattro componenti principali. La prima mappa della componente PC1 “socio-demografica” mostra livelli di vulnerabilità alti prevalentemente nella zona sud del CT, nelle zone censuarie con maggiore densità abitativa dei comuni di Gioiosa Ionica e Marina di Gioiosa Ionica. La seconda mappa fa riferimento alla componente PC2 “strutture ricettive” e presenta valori alti di vulnerabilità nelle zone censuarie in cui risultano presenti un maggior numero di strutture di diverso genere (hotel, b&b, case in affitto). La terza componente relativa alle strutture sanitarie risulta in questo caso poco significativa ai fini della valutazione della vulnerabilità in quanto sul territorio sono presenti poche strutture sanitarie private. Per la natura dei dati riferiti a tali strutture, l'indice PC3, potrebbe contribuire sia all'aumento che alla riduzione della vulnerabilità, per questo motivo nel contributo finale si assume per tale componente il segno del valore assoluto. Inoltre si ricorda che i punteggi fattoriali (*factor scores*) vengono calcolati per tutte le variabili, anche per quelle meno rappresentative, di conseguenza non è sempre possibile fornire una mappa con informazioni significative e chiare per tutte le componenti principali. L'ultima mappa riferita alla componente PC4 nominata “Densità abitativa e crescita” presenta valori di vulnerabilità alti nella zona nord, nord-ovest del CT, in corrispondenza di zone che hanno registrato una considerevole crescita demografica dal 2001 al 2011.

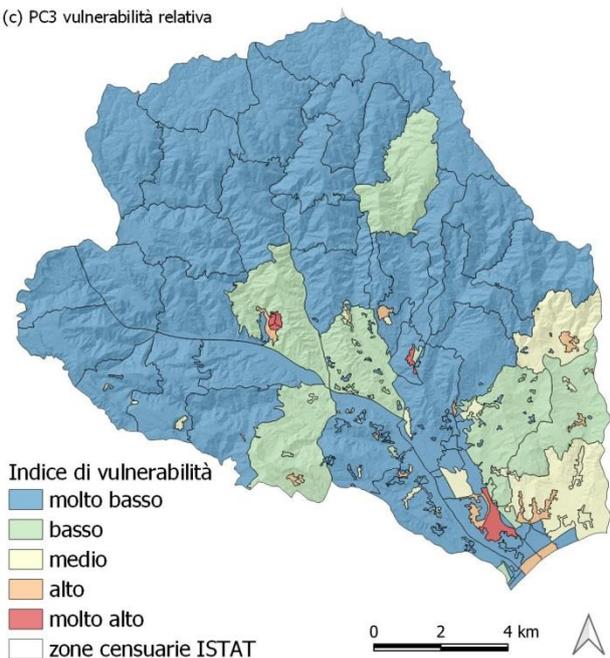
(a) PC1 vulnerabilità relativa



(b) PC2 vulnerabilità relativa



(c) PC3 vulnerabilità relativa



(d) PC4 vulnerabilità relativa

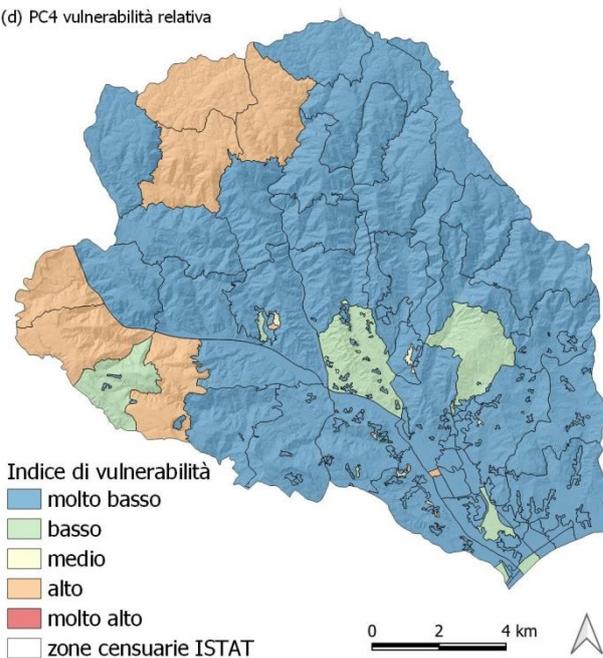


Figura 7-2. Distribuzione spaziale degli indici di vulnerabilità TCVI_{people}: a) indice relativo alla Componente Principali PC1; b) indice relativo alla Componente Principali PC2; c) indice relativo alla Componente Principali PC3; d) indice relativo alla Componente Principali PC4

La somma pesata sulla varianza dei punteggi fattoriali delle quattro componenti principali, classificata attraverso la funzione fuzzy di tipo MSLarge ha portato ai risultati rappresentati nella Figura 7-3. La mappa finale $TCVI_{people}$ fortemente influenzata dalla mappa della prima componente principale che ne esprime la maggiore varianza, mostra alti valori di vulnerabilità in corrispondenza della zona sud del CT nei comuni di Marina di Gioiosa Ionica e Gioiosa Ionica. In generale il 94.4 % del territorio presenta valori bassi e molto bassi di vulnerabilità, il 2.4 % valori medi, mentre il 3.2% presenta valori alti e molto alti di vulnerabilità. Considerando che la realtà industriale e commerciale del CT non risulta molto sviluppata l'indice di vulnerabilità risulta fortemente influenzato dalla densità abitativa, quindi risulta alto nelle zone in cui sono presenti variabili riferite a residenti particolarmente vulnerabili. La Figura 7-4 mostra come una delle variabili che contribuisce direttamente all'aumento dei livelli di vulnerabilità sia rappresentata dalla fascia di residenti anziani, con età maggiore di 65 anni. In ogni comune infatti del CT di analisi, tale fascia di età presenta valori percentuali compresi fra 16% e 26%.

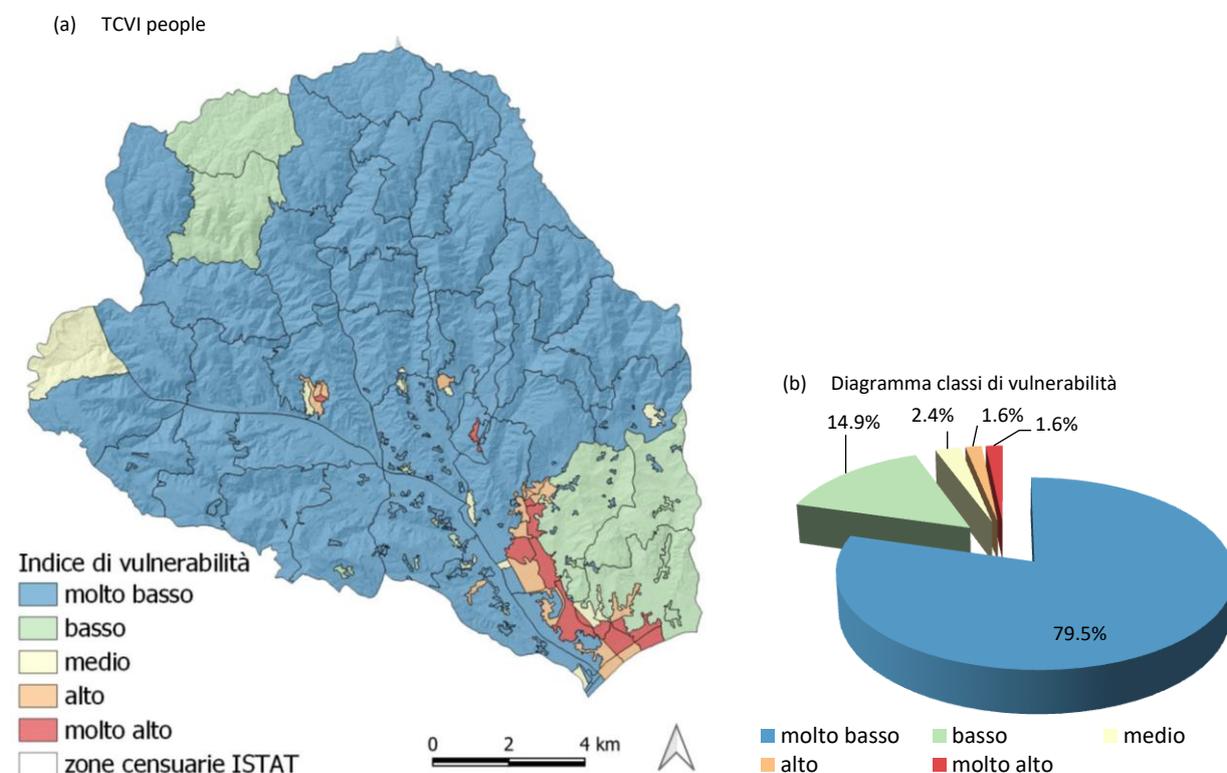


Figura 7-3. Distribuzione spaziale dell'indice di vulnerabilità $TCVI_{people}$: a) indice aggregato; b) diagramma sulla distribuzione percentuale delle 5 classi di vulnerabilità nel Contesto Territoriale

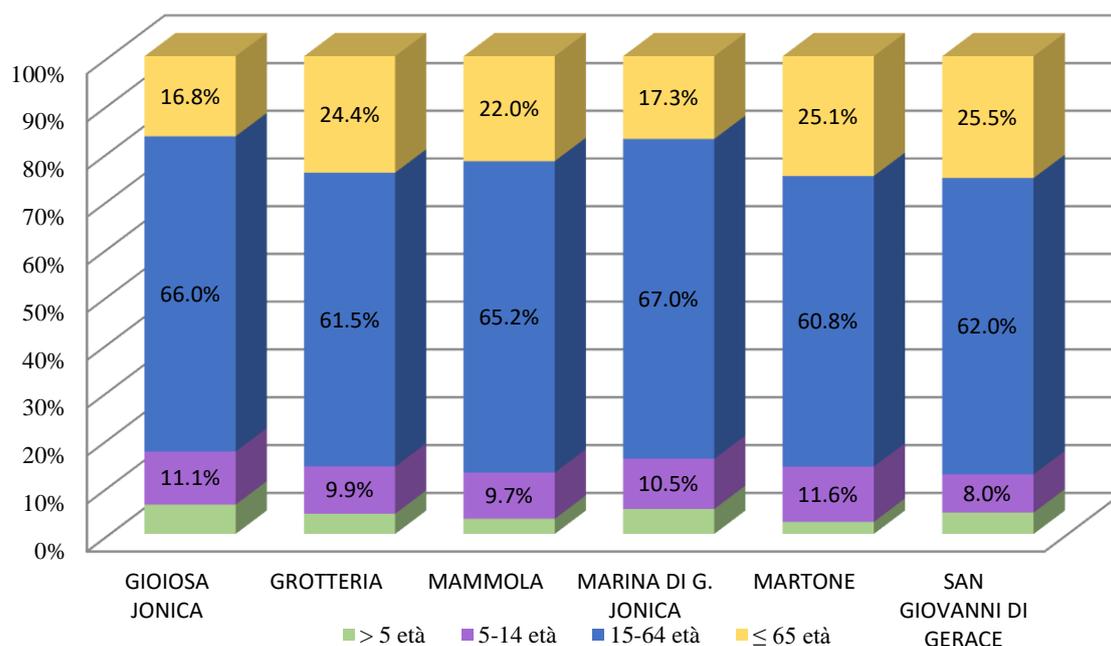


Figura 7-4. Distribuzione percentuale del numero di residenti in relazione alle diverse fasce di età, nei sei comuni del CT

7.1.1 Confronto con analisi di normalizzazione

Il metodo di calcolo basato sull'analisi statistica PCA è stato confrontato con altri metodi come quello basato sulla normalizzazione. In tale approccio, a causa di problemi legati ai diversi intervalli di variabilità, i valori per ogni strato informativo devono essere normalizzati (o trasformati) in una scala ordinale o senza unità coerente. Un esempio di questo approccio è stato sviluppato da Midgley *et al.*[158] per il Sud Africa. Questo metodo identifica i diversi livelli relativi di vulnerabilità aggregata, basandosi semplicemente sulla normalizzazione di tutte le variabili selezionate. Per ottenere l'indice finale si esegue successivamente una somma delle variabili normalizzate e la classificazione cartografica avviene attraverso una ulteriore normalizzazione dell'indice finale (Figura 7-5).

Come si può notare dal confronto fra le mappe cartografiche, gli indici basati sulla PCA mettono in evidenza sia le principali caratteristiche delle componenti sociali che rendono vulnerabile le zone censuarie, sia le differenze negli aspetti di vulnerabilità all'interno delle stesse zone censuarie. Mentre l'indice ottenuto con il procedimento di normalizzazione fornisce una distribuzione spaziale dei livelli di vulnerabilità molto semplificata e sottodimensionata.

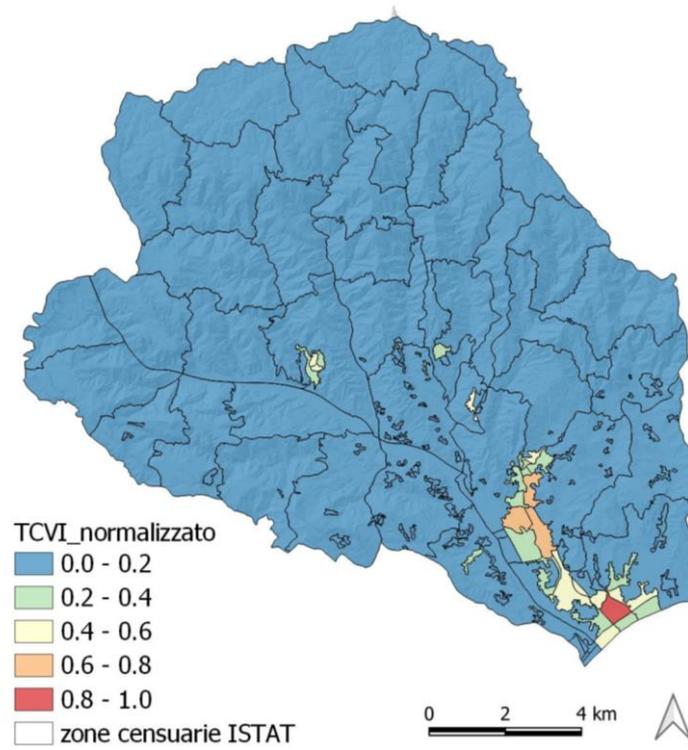


Figura 7-5. Distribuzione spaziale dell'indice di vulnerabilità $TCVI_{people}$ ricavato con il semplice metodo della normalizzazione delle variabili

7.2 TCVI exposure

L'indice di vulnerabilità legato alla pressione umana, climatica ed alle criticità presenti sul territorio è rappresentato dal $TCVI_{exposure}$. Per l'applicazione del metodo statistico PCA sono state selezionate 17 variabili e sono stati estratte le componenti significative per la costruzione dell'indice. L'adeguatezza del campionamento è stata verificata tramite Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), mentre la forza della relazione tra le variabili è stata valutata mediante il test di sfericità di Barlett. Questi test sono condotti nell'analisi delle componenti principali per valutare se i dati sono appropriati per l'analisi fattoriale. Il valore KMO calcolato è pari a 0,74 e mostra come il set di dati sia abbastanza adeguato. Il test di Bartlett risulta altresì altamente significativo (Sig. = 0.000), il che implica che i dati sono appropriati per l'analisi delle componenti. Per testare la coerenza interna del set di dati, è stato eseguito il test alpha di Cronbach. Il coefficiente di affidabilità alfa di Cronbach varia normalmente tra 0 e 1, più il coefficiente è vicino a 1.0, maggiore è la consistenza interna degli elementi (variabili) nella scala. I risultati mostrano un buon valore di affidabilità, pari a 0,73.

Nella Tabella 7-7 si riporta il set di dati e le relative statistiche descrittive.

N.	Variabili	#	Media	Max	Min	Deviazione Standard
1	Percentuale di posti affollati (scuole, centri sportivi, musei, ecc.)	195	0.5	8.7	0.0	1.3
2	Percentuale di edifici in muratura	195	0.2	2.2	0.0	0.4
3	Percentuale di edifici e complessi di edifici utilizzati	195	0.4	4.2	0.0	0.7
4	Percentuale di edifici e complessi di edifici non utilizzati	195	0.1	0.9	0.0	0.2
5	Percentuale di edifici e complessi di edifici (utilizzati) ad uso produttivo, commerciale, direzionale/terziario, turistico/ricettivo, servizi, altro	195	0.0	0.8	0.0	0.1
6	Percentuale di edifici ad uso residenziale costruiti prima del 1945	195	0.1	1.4	0.0	0.2
7	Lunghezza delle infrastrutture stradali e ferroviarie [km]	195	4.2	31.0	0.0	7.0
8	Lunghezza ostacoli (attraversamenti a guado, ponti, gallerie, sottopassi) [km]	195	0.2	4.8	0.0	0.6
9	Lunghezza lifelines (rete elettrica, acquedotti, metanodotti, ecc.) [km]	195	0.7	10.1	0.0	1.9
10	Percentuale di aree percorse da incendi boschivi (2010-2019)	195	0.1	0.9	0.0	0.2
11	Lunghezza aste fluviali [km]	195	2.4	20.5	0.0	5.0
12	Percentuale di aree in frana	195	0.0	0.5	0.0	0.1
13	Danni economici causati da eventi estremi (2010-2019) (euro per capita)	195	2728.6	113161.9	0.0	13305.1
14	Rx1day - media della massima precipitazione in 1-giorno (2010-2019)	195	104.5	156.9	98.0	15.0
15	Rx5day - media della massima precipitazione in 5-giorni (2010-2019)	195	160.3	279.0	143.8	36.9
16	Txx -- media della temperatura massima giornaliera annuale (2010-2019)	195	32.5	32.6	32.0	0.1
17	Media della temperatura calcolata sulla base della temperatura minima e di quella massima (2010-2019)	195	14.1	14.2	12.4	0.4

Tabella 7-7. Statistiche descrittive del dataset dell'indice $TCVI_{exposure}$

Attraverso l'analisi della PCA sono state individuate 3 Componenti Principali in grado di spiegare il 70% della varianza totale (Tabella 7-9). L'interpretazione della matrice delle componenti generata dalla PCA, ha permesso di attribuirne i seguenti nomi: lifelines e criticità del territorio (varianza pari a 25.6 %); edifici (varianza pari a 22.9%); indici climatici (varianza pari a 21.4%).

La Tabella 7-8 presenta i risultati della soluzione iniziale quando viene selezionata anche l'opzione per la rotazione dei fattori.

Comp.	Autovalori iniziali			Caricamenti somme dei quadrati di estrazione			Caricamento delle somme dei quadrati rotazione		
	Totale	% di varianza	% cumulativa	Totale	% di varianza	% cumulativa	Totale	% di varianza	% cumulativa
1	5.19	30.54	30.54	5.19	30.54	30.54	4.36	25.63	25.63
2	3.62	21.29	51.83	3.62	21.29	51.83	3.89	22.89	48.52
3	3.08	18.13	69.96	3.08	18.13	69.96	3.65	21.44	69.96
4	0.99	5.82	75.78						
5	0.80	4.70	80.48						
6	0.69	4.07	84.55						
7	0.57	3.34	87.89						
8	0.49	2.87	90.76						
9	0.44	2.56	93.32						
10	0.40	2.37	95.69						
11	0.29	1.69	97.38						
12	0.20	1.20	98.58						
13	0.13	0.76	99.34						
14	0.06	0.34	99.68						
15	0.05	0.31	99.99						
16	0.00	0.01	100.00						
17	0.00	0.00	100.00						

Tabella 7-8. Autovalori della matrice completa e varianza spiegata delle componenti principali della $TCVI_{\text{exposure}}$

Per valorizzare il contributo di ciascuna componente sul calcolo finale dell'indice $TCVI_{\text{exposure}}$, l'indice è stato pesato moltiplicando gli *scores* ottenuti dalla PCA, per la corrispondente percentuale di varianza spiegata da ogni componente. Gli *scores* pesati sono stati addizionati o sottratti tra loro, in base al segno dato ad ogni singola componente, per ottenere l'indice $TCVI_{\text{exposure}}$.

Componente Principale	Variabile	Comunalità (estrazione)	Loading	Segno
1. Lifelines e criticità del territorio	Lunghezza delle infrastrutture stradali e ferroviarie [km]	.775	.872	
	Lunghezza ostacoli (attraversamenti a guado, ponti, gallerie, sottopassi) [km]	.598	.766	
	Lunghezza lifelines (rete elettrica, acquedotti, metanodotti, ecc.) [km]	.788	.868	
	Percentuale di aree percorse da incendi boschivi (2010-2019)	.582	.736	+
	Lunghezza aste fluviali [km]	.738	.835	
	Percentuale di aree in frana	.626	.787	
	Danni economici causati da eventi estremi (2010-2019) (euro per capita)	.300	.533	
2. Edifici	Percentuale di posti affollati (scuole, centri sportivi, musei, ecc.)	.424	.648	
	Percentuale di edifici in muratura	.836	.912	
	Percentuale di edifici e complessi di edifici utilizzati	.882	.934	
	Percentuale di edifici e complessi di edifici non utilizzati	.598	.768	+
	Percentuale di edifici e complessi di edifici (utilizzati) ad uso produttivo, commerciale, direzionale/terziario, turistico/ricettivo, servizi, altro	.428	.644	
	Percentuale di edifici ad uso residenziale costruiti prima del 1945	.712	.838	
3. Indici climatici	Rx1day - media della massima precipitazione in 1-giorno (2010-2019)	.928	.943	
	Rx5day - media della massima precipitazione in 5-giorni (2010-2019)	.875	.907	
	TXx -- media della temperatura massima giornaliera annuale (2010-2019)	.903	-.946	
	Media della temperatura calcolata sulla base della temperatura minima e di quella massima (2010-2019)	.902	-.946	

Tabella 7-9. Risultati dell'analisi statistica della PCA con rotazione Varimax e criterio di selezione di Kaiser, per l'indice $TCVI_{\text{exposure}}$

Per la classificazione cartografica delle mappe degli indici di vulnerabilità relativa, costituite dalle singole componenti principali e della vulnerabilità aggregata $TCVI_{\text{exposure}}$, sono state utilizzate le funzioni fuzzy tipo *linear*, *MSlarge* e *large*. Anche in questo caso prima di applicare la teoria fuzzy, sono state elaborate ed analizzate le diverse tecniche di classificazione secondo quanto riportato nel paragrafo precedente. La performance delle funzioni di appartenenza fuzzy, è stata valutata sulla base degli istogrammi di distribuzione dei dati e delle metriche statistiche riportate nelle seguenti tre tabelle, in cui si fa riferimento ai parametri che hanno restituito i migliori risultati.

Indice	Parametri della funzione	MSE	RMSE	MAE	MAPE
PC1	max e min assoluti	0.75	0.86	0.62	109.17
PC2	max e min assoluti	0.67	0.82	0.63	183.68
PC3	max e min assoluti	0.69	0.83	0.59	130.74
$TCVI_{\text{exposure}}$	max e min assoluti	0.17	0.41	0.36	161.23
PC1	max e min ridotti del 10%	0.73	0.85	0.61	107.75
PC2	max e min ridotti del 10%	0.64	0.80	0.61	181.97
PC3	max e min ridotti del 10%	0.69	0.83	0.59	128.78
$TCVI_{\text{exposure}}$	max e min ridotti del 10%	0.15	0.39	0.35	158.76
PC1	max e min ridotti del 15%	0.71	0.84	0.60	106.92
PC2	max e min ridotti del 15%	0.63	0.79	0.61	181.09
PC3	max e min ridotti del 15%	0.68	0.83	0.58	127.64
$TCVI_{\text{exposure}}$	max e min ridotti del 15%	0.10	0.31	0.25	131.67

Tabella 7-10. Metriche statistiche della $TCVI_{\text{exposure}}$ applicate alla funzione fuzzy "linear"

Indice	Parametri della funzione	MSE	RMSE	MAE	MAPE
PC1	f2=0.6 f1=5	0.5	0.7	0.3	50.3
PC2	f2=0.6 f1=5	3082.7	55.5	7.4	1225.5
PC3	f2=0.6 f1=5	1.2	1.1	0.5	90.4
$TCVI_{\text{exposure}}$	f2=0.6 f1=5	0.1	0.2	0.2	51.6
PC1	f2=0.4 f1=4	1.2	1.1	0.9	175.5
PC2	f2=0.4 f1=4	1.3	1.1	1.0	172.8
PC3	f2=0.4 f1=4	0.9	1.0	0.7	167.9
$TCVI_{\text{exposure}}$	f2=0.4 f1=4	0.1	0.3	0.3	97.1
PC1	f2=0.5 f1=6	0.9	0.9	0.7	137.6
PC2	f2=0.5 f1=6	1.1	1.1	0.9	148.8
PC3	f2=0.5 f1=6	0.7	0.8	0.6	114.1
$TCVI_{\text{exposure}}$	f2=0.5 f1=6	0.07	0.27	0.21	79.6

Tabella 7-11. Metriche statistiche della $TCVI_{\text{exposure}}$ applicate alla funzione fuzzy "large"

Indice	Parametri della funzione	MSE	RMSE	MAE	MAPE
PC1	a=1 b=1 m=0 s=1	0.64	0.80	0.53	85.67
PC2	a=1 b=1 m=0 s=1	0.61	0.78	0.57	88.07
PC3	a=1 b=1 m=0 s=1	0.66	0.81	0.48	90.70
$TCVI_{\text{exposure}}$	a=1 b=1 m=0.17 s=0.55	0.10	0.32	0.24	78.48

Tabella 7-12. Metriche statistiche della $TCVI_{\text{exposure}}$ applicate alla funzione fuzzy "MS large"

In base ai risultati prodotti nelle diverse simulazioni è stata scelta come funzione di appartenenza la MSlarge (Figura 7-6). Quest'ultima infatti non solo presenta dei parametri che ottimizzano le metriche statistiche adottate ma la funzione restituisce a livello grafico anche un buon andamento dei valori stessi. L'espressione analitica di tale funzione di appartenenza consente di rappresentare bene l'intervallo dei valori alti e consente altresì di non avere problemi con i valori bassi delle diverse componenti, come succedeva con la funzione tipo *large*.

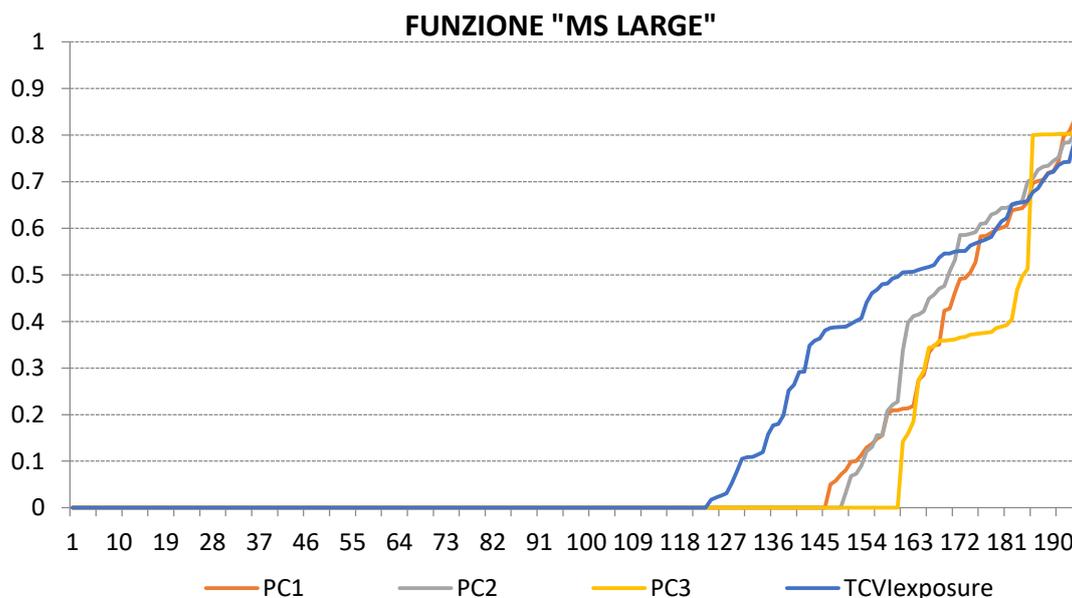
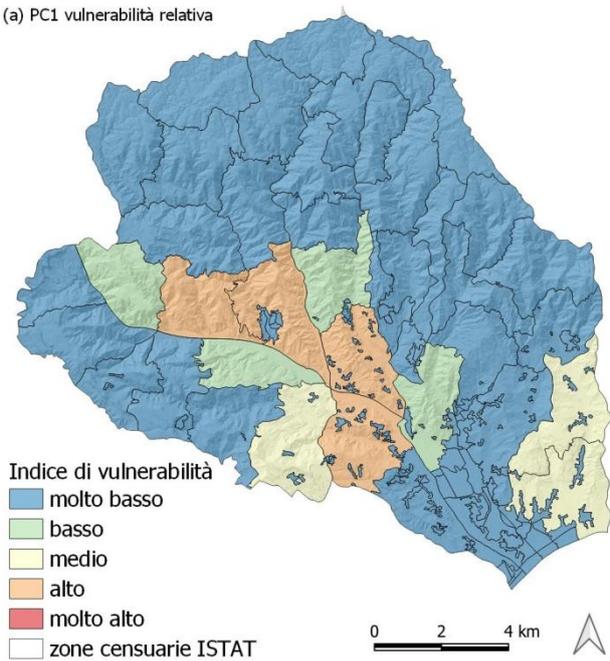


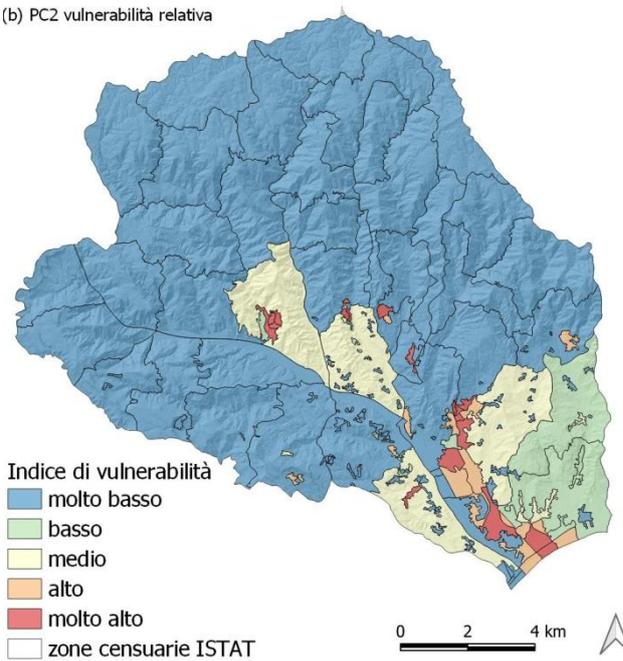
Figura 7-6. Diagramma della funzione di appartenenza MS large delle componenti di vulnerabilità $TCVI_{exposure}$

Una volta selezionata la funzione fuzzy di appartenenza sono state elaborate le mappe di vulnerabilità con valori variabili tra 0 e 1. Successivamente attraverso tecniche di geoprocessing è stata effettuata la riclassificazione di tutte le mappe in intervalli uguali. In particolare sono state ricavate 5 classi di vulnerabilità: molto bassa (0-0.2), bassa (0.2 – 0.4), media (0.4 – 0.6), alta (0.6 – 0.8) e molto alta (0.8 – 1). Le mappe riportate nella Figura 7-7, rappresentano la vulnerabilità relativa elaborata sulla base degli *scores* delle tre componenti principali. La prima mappa della componente PC1 “lifelines e criticità del territorio” mostra livelli di vulnerabilità alti e medi in corrispondenza delle aree censuarie con maggiore concentrazione di infrastrutture strategiche stradali. Le zone infatti che presentano un maggiore densità di infrastrutture con presenza di ostacoli, quali gallerie, ponti e attraversamenti a guado, è quella che costeggia il torrente Torbido nella zona sud-ovest del CT. La seconda mappa fa riferimento alla componente PC2 “edifici” e pertanto presenta valori alti di vulnerabilità nelle zone densamente popolate in cui si concentra la distribuzione degli edifici e complessi di edifici di tipo residenziale e commerciale. L'ultima mappa riferita alla componente PC3 nominata “indici climatici” presenta valori di vulnerabilità alti nella zona ovest del CT, in quanto direttamente influenzata dai dati della stazione meteorologica di Antonimina Canolo.

(a) PC1 vulnerabilità relativa



(b) PC2 vulnerabilità relativa



(c) PC3 vulnerabilità relativa

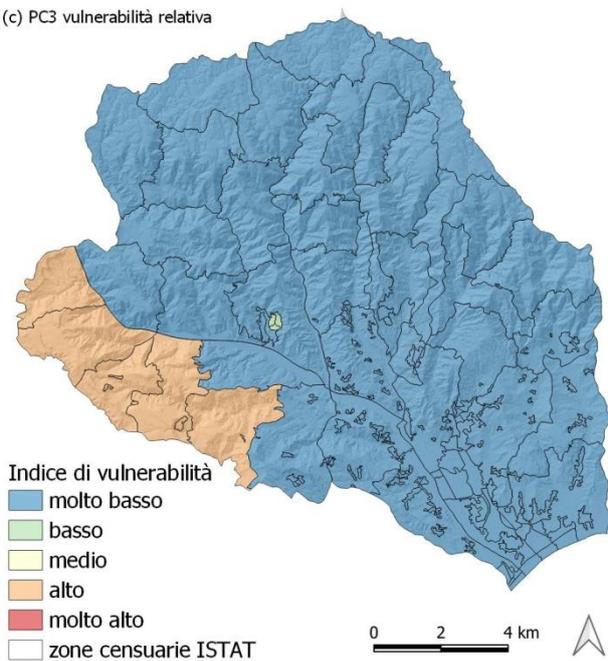
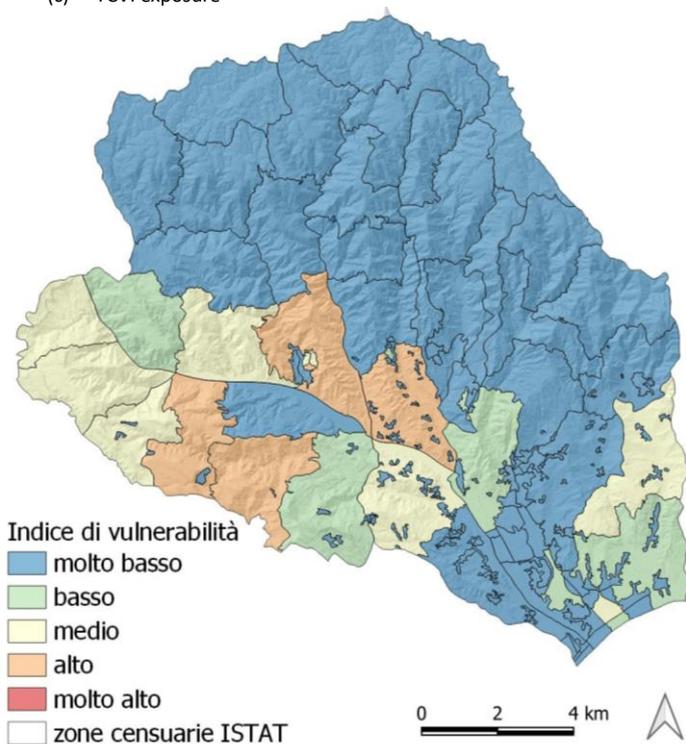


Figura 7-7. Distribuzione spaziale degli indici di vulnerabilità $TCVI_{exposure}$: a) indice relativo alla Componente Principali PC1; b) indice relativo alla Componente Principali PC2; c) indice relativo alla Componente Principali PC3

La somma pesata sulla varianza delle tre Componenti Principali, normalizzata attraverso la funzione fuzzy di tipo *MSlarge* ha portato ai risultati rappresentati nella Figura 7-8. La mappa finale $TCVI_{\text{exposure}}$ mostra alti valori di vulnerabilità in corrispondenza della zona ovest del CT. In generale circa il 65 % del territorio presenta valori molto bassi di vulnerabilità, il 13 % valori bassi, il 12 % valori medi ed infine circa il 10% presenta valori alti di vulnerabilità.

(c) $TCVI_{\text{exposure}}$



(d) Diagramma classi di vulnerabilità

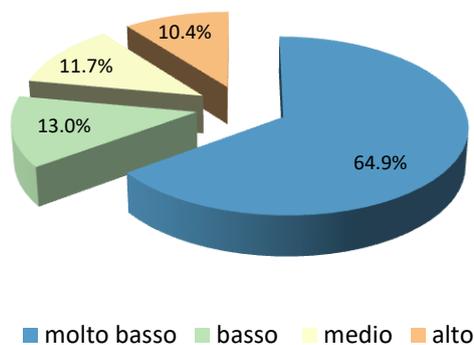


Figura 7-8. Distribuzione spaziale dell'indice di vulnerabilità $TCVI_{\text{exposure}}$: a) indice aggregato; b) diagramma sulla distribuzione percentuale delle 5 classi di vulnerabilità nel Contesto Territoriale

7.2.1 Confronto con analisi di normalizzazione

Prima di implementare e sviluppare l'approccio metodologico di calcolo dell'indice di vulnerabilità $TCVI_{\text{exposure}}$ sono stati analizzati tutti i metodi presenti in letteratura. Di seguito si riporta la mappa elaborata attraverso il semplice metodo di normalizzazione delle variabili per mettere in luce come i risultati risultino di difficile comprensione e come la distribuzione spaziale degli stessi valori di vulnerabilità non contribuisca alla interpretazione dei risultati stessi. La mappa presenta valori molto alti in una unica zona censuaria, mentre una variegata distribuzione spaziale degli altri livelli rende nel complesso la mappa poco definita e di difficile comprensione.

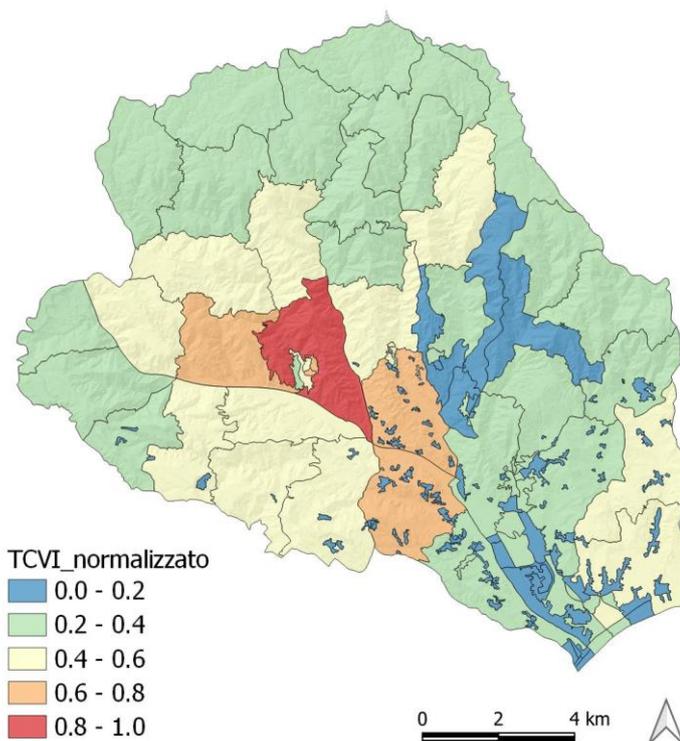


Figura 7-9. Distribuzione spaziale dell'indice di vulnerabilità TCVI ricavato con il semplice metodo della normalizzazione delle variabili

7.3 TCVI emergency

Questo indice misura la vulnerabilità delle infrastrutture stradali durante un evento calamitoso. Le analisi degli eventi registrati nel passato infatti, hanno dimostrato come le strade rappresentino la categoria che subisce maggiori danni, con ripercussione diretta sulle attività emergenziali e sulla popolazione.

Per elaborare l'indice $TCVI_{emergency}$ sono stati presi come riferimento gli elementi caratteristici dei piani di emergenza dei comuni appartenenti al Contesto Territoriale di Marina di Gioiosa Ionica. Un piano di emergenza è l'insieme delle procedure operative di intervento per gestire una qualsiasi calamità attesa in un determinato territorio. Esso recepisce il programma di previsione e prevenzione, ed è lo strumento che consente alle autorità preposte di predisporre e coordinare gli interventi di soccorso a tutela della popolazione e dei beni in un'area a rischio.

La modellazione dei flussi di trasporto è stata eseguita implementando il plug-in AequilibraE che lavora in ambiente QGIS (Camargo[127]). AequilibraE è un pacchetto *open-source* scritto in linguaggio di programmazione Python per la modellazione dei trasporti, organizzato nei seguenti sotto moduli: gestione della rete stradale; distribuzione del viaggio, calcolo del percorso, transito, matrice e parametri globali.

Per la modellazione sono stati elaborati un modello di offerta e di domanda. Il primo si riferisce alla elaborazione della mappa vettoriale del sistema stradale. Nel modello di domanda invece, sono stati considerati come punti di origine, i centroidi delle zone censuarie ISTAT, e come punti di destinazione gli elementi della pianificazione di emergenza (Figura 7-10, Figura 7-11).

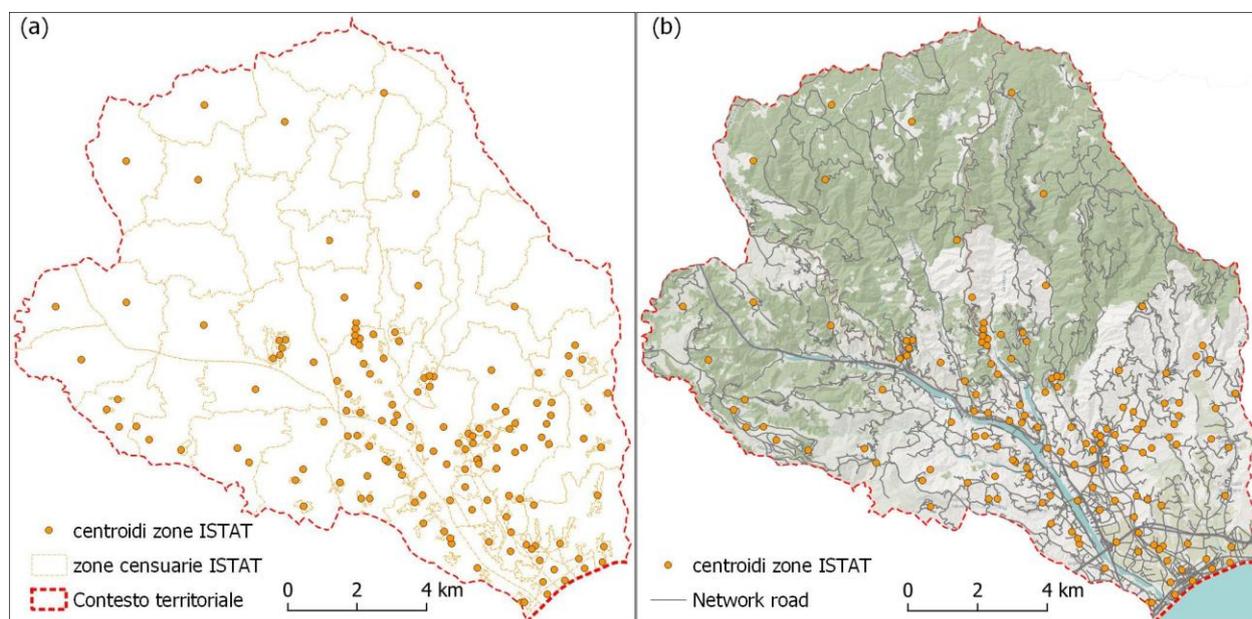


Figura 7-10. Mappe vettoriali: a) punti di origine riferiti ai centroidi delle zone censuarie ISTAT; b) centroidi e rete stradale

La Figura 7-11 mostra i primi risultati della simulazione con indicazione dei percorsi più brevi fra i punti di origine ed i punti di destinazione.

Mentre la Figura 7-12 mostra i maggiori flussi di traffico fra i punti di origine e quelli di destinazione, in condizioni di perfetto funzionamento dell'infrastruttura stradale.

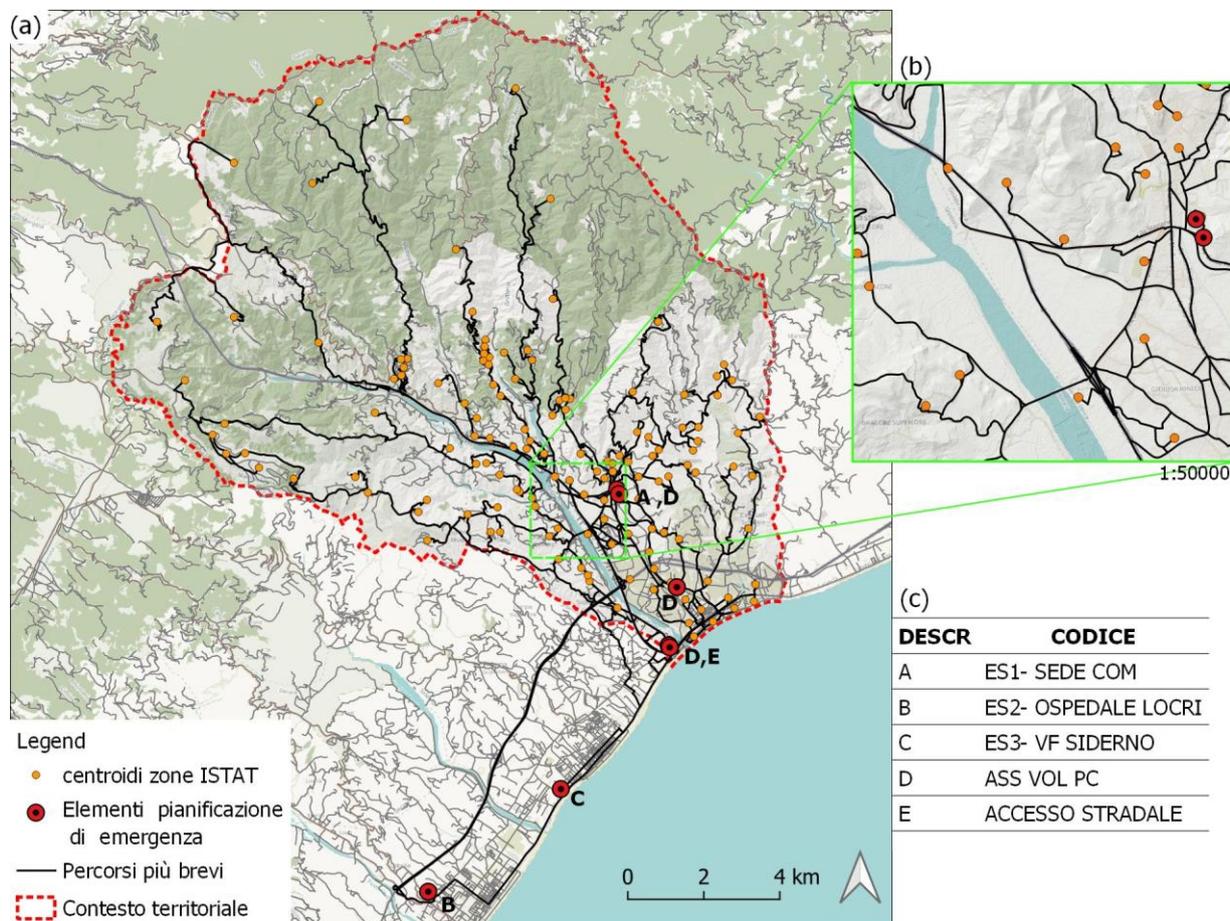


Figura 7-11. Mappe con i punti di origine(centroidi) ed i punti di destinazione (elementi della pianificazione di emergenza) con indicazione dei percorsi più brevi fra gli stessi (a); dettaglio cartografico (b); tabella con indicazione dei diversi punti di destinazione (c)

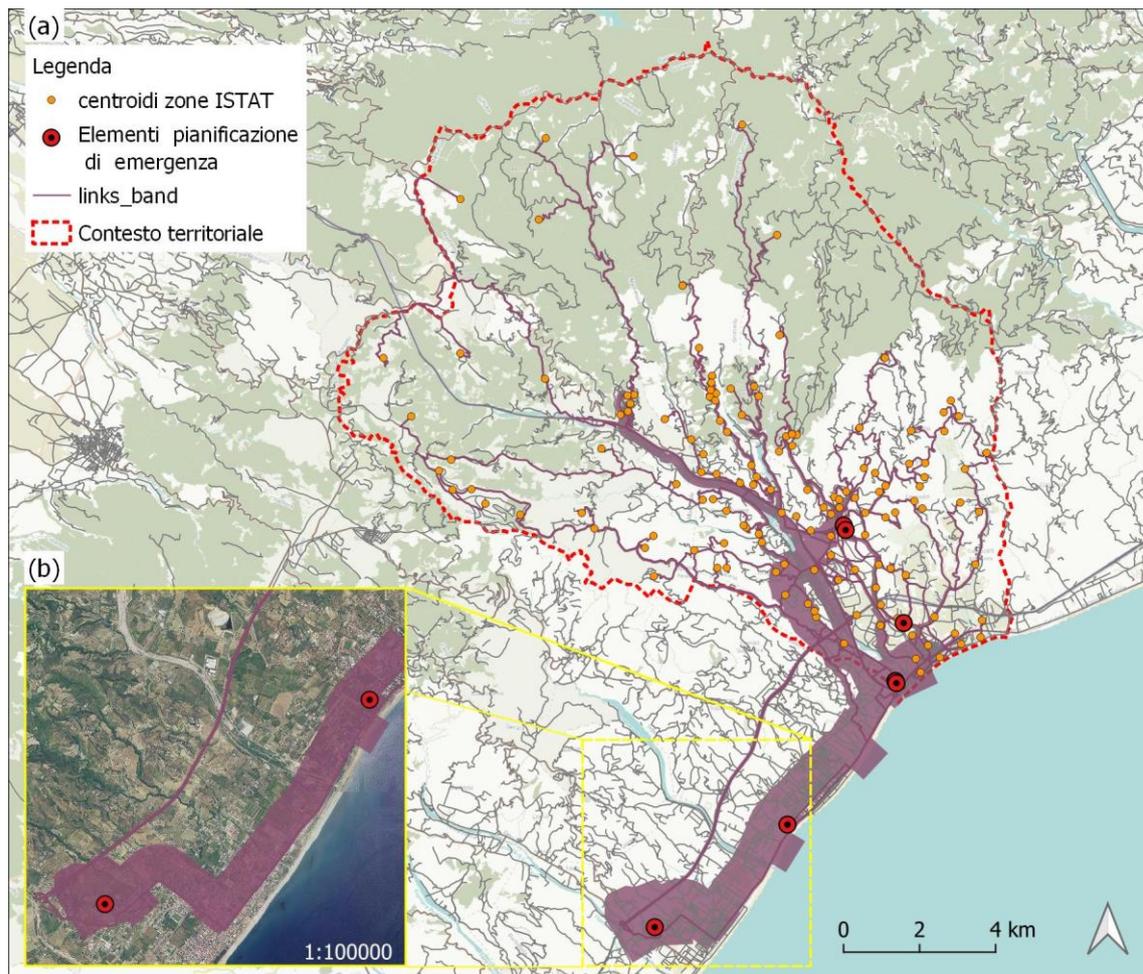
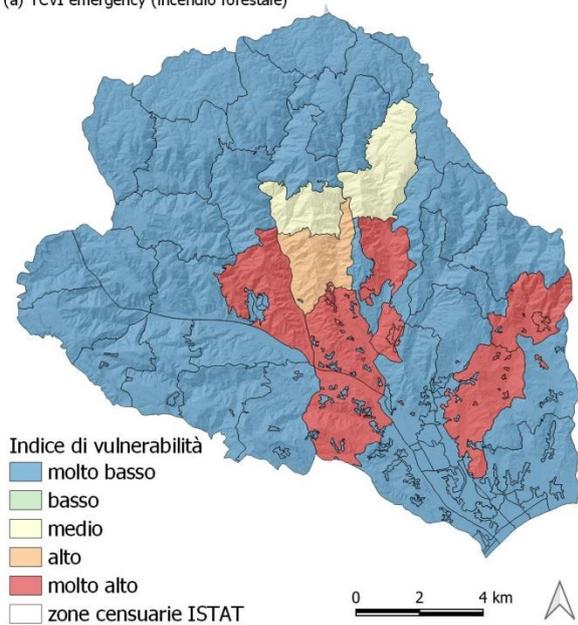


Figura 7-12. Simulazione traffico veicolare fra i punti di origine ed i punti di destinazione, rappresentazione delle bande di larghezza (bandwidth) dei flussi di traffico

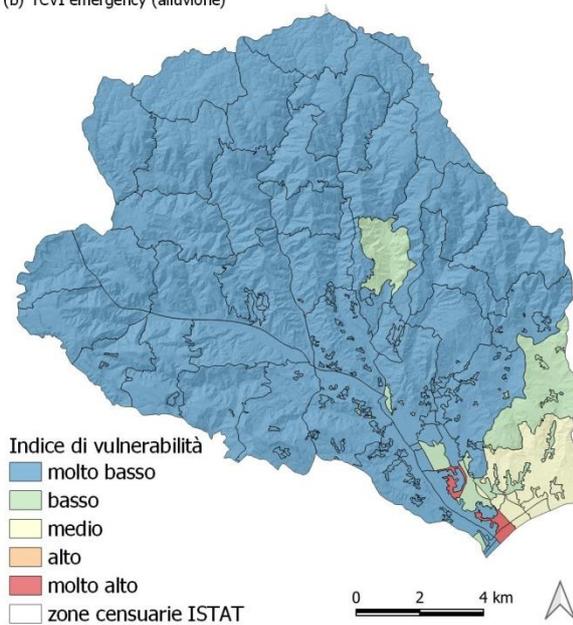
La vulnerabilità è stata calcolata come differenza fra i tempi di percorrenza fra i punti di origine ed i punti di destinazione, seguendo il percorso più breve. In particolare sono state eseguite due simulazioni: la prima in condizioni normali e la seconda ipotizzando l'interruzione di tratti di strada interessati da alti livelli di pericolosità. Sono stati considerati tre scenari di pericolosità: incendio boschivo e frana, sull'intero perimetro del Contesto Territoriale, mentre lo scenario alluvione ha riguardato solo la parte sud del CT, fino alla foce del torrente Torbido.

La classificazione delle mappe di vulnerabilità è avvenuta applicando la funzione di appartenenza fuzzy sigmoideale. Tale funzione ha consentito di assegnare valori compresi tra 0 e 1, ad ogni zona censuaria ISTAT, sopra analizzata. La Figura 7-13 mostra le mappe di vulnerabilità $TCVI_{emergency}$ secondo i tre scenari ipotizzati. Le zone caratterizzate da livelli molto alti di vulnerabilità forniscono in molte simulazioni importanti informazioni sulle infrastrutture strategiche e sulle zone censuarie che potrebbero rimanere isolate a causa di un mal funzionamento o chiusura di tratti stradali. Nello stesso tempo lo studio consente una classificazione dei livelli di importanza delle strade in base non solo al flusso di traffico ma anche in base alla presenza o meno di strade alternative in caso di interruzioni improvvise, dovute ad eventi calamitosi.

(a) TCVI emergency (incendio forestale)



(b) TCVI emergency (alluvione)



(c) TCVI emergency (frana)

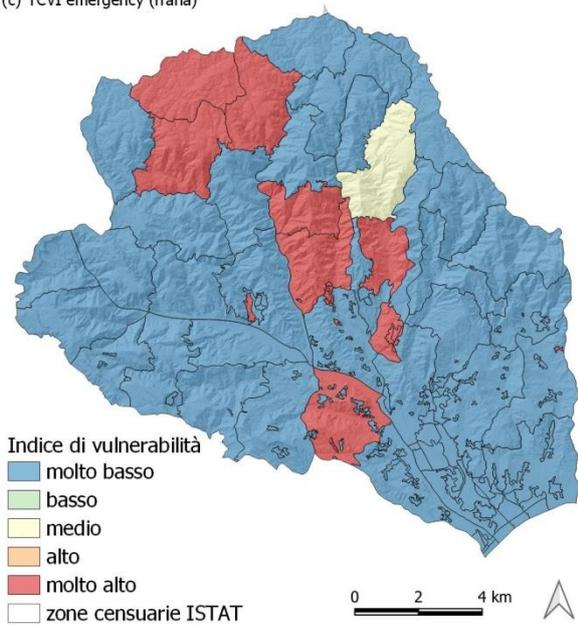


Figura 7-13. Mappa dell'indice di vulnerabilità $TCVI_{emergency}$: a) scenario di pericolosità da incendio boschivo; b) scenario di pericolosità da alluvione; c) scenario di pericolosità da frana

7.4 Mappa aggregata di vulnerabilità (TCVI)

Gli indici di vulnerabilità possono essere aggregati fra loro in relazione alla tipologia di scenario di rischio che si ipotizza ed in base alle caratteristiche di vulnerabilità che si vogliono evidenziare.

La Figura 7-14 mostra lo schema generale d'analisi utilizzato nella creazione dei tre indici di vulnerabilità nonché dell'indice aggregato finale.

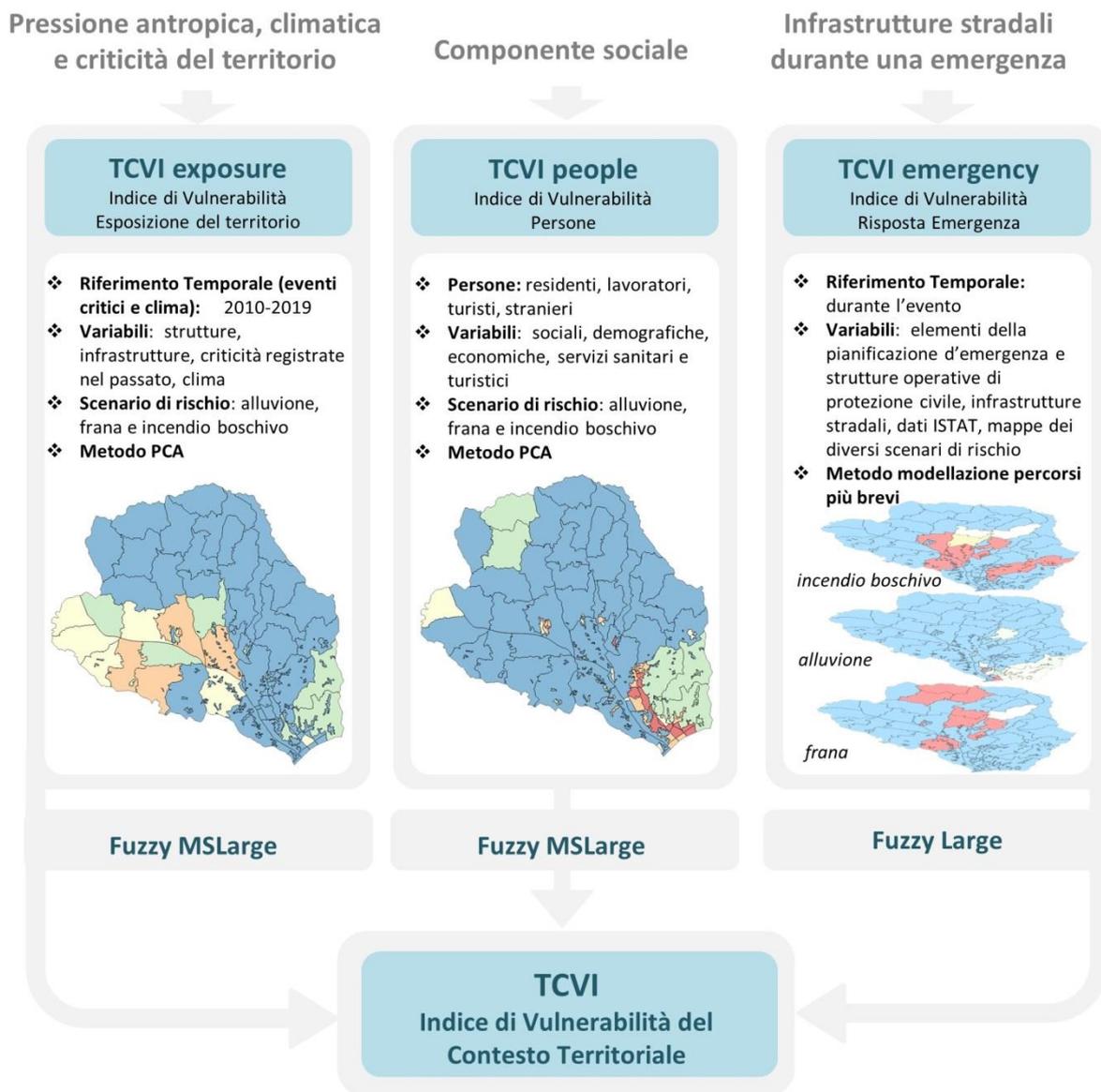


Figura 7-14. Schema generale di aggregazione modulare dell'indice TCVI

L'aggregazione dei tre indici è stata eseguita utilizzando l'operatore fuzzy "or" ed eseguendo un overlay delle mappe raster prodotte, allo scopo di massimizzare i risultati finali ed evidenziare tutte le zone censuarie con livelli di vulnerabilità alti.

7.5 TCVI nello scenario incendio boschivo

La Figura 7-15 mostra l'indice aggregato TCVI ricavato utilizzando la mappa $TCVI_{emergency}$ nello scenario di pericolosità da incendio boschivo. Come mostrato dallo stesso diagramma il numero di zone censuarie con livelli alti e molto alti di vulnerabilità riguarda i comuni di Grotteria e Gioiosa Ionica. Se si osservano i risultati ottenuti per ciò che concerne la distribuzione geografica dell'indice TCVI, è possibile evidenziare che le zone maggiormente vulnerabili risultano quelle caratterizzate da una alta densità abitativa e quelle che risentono maggiormente della eventuale chiusura dei tratti stradali a causa di eventi legati ad incendi boschivi ed alla mancanza di strade percorribili alternative, localizzate quindi in aree ad alta suscettibilità da incendio boschivo.

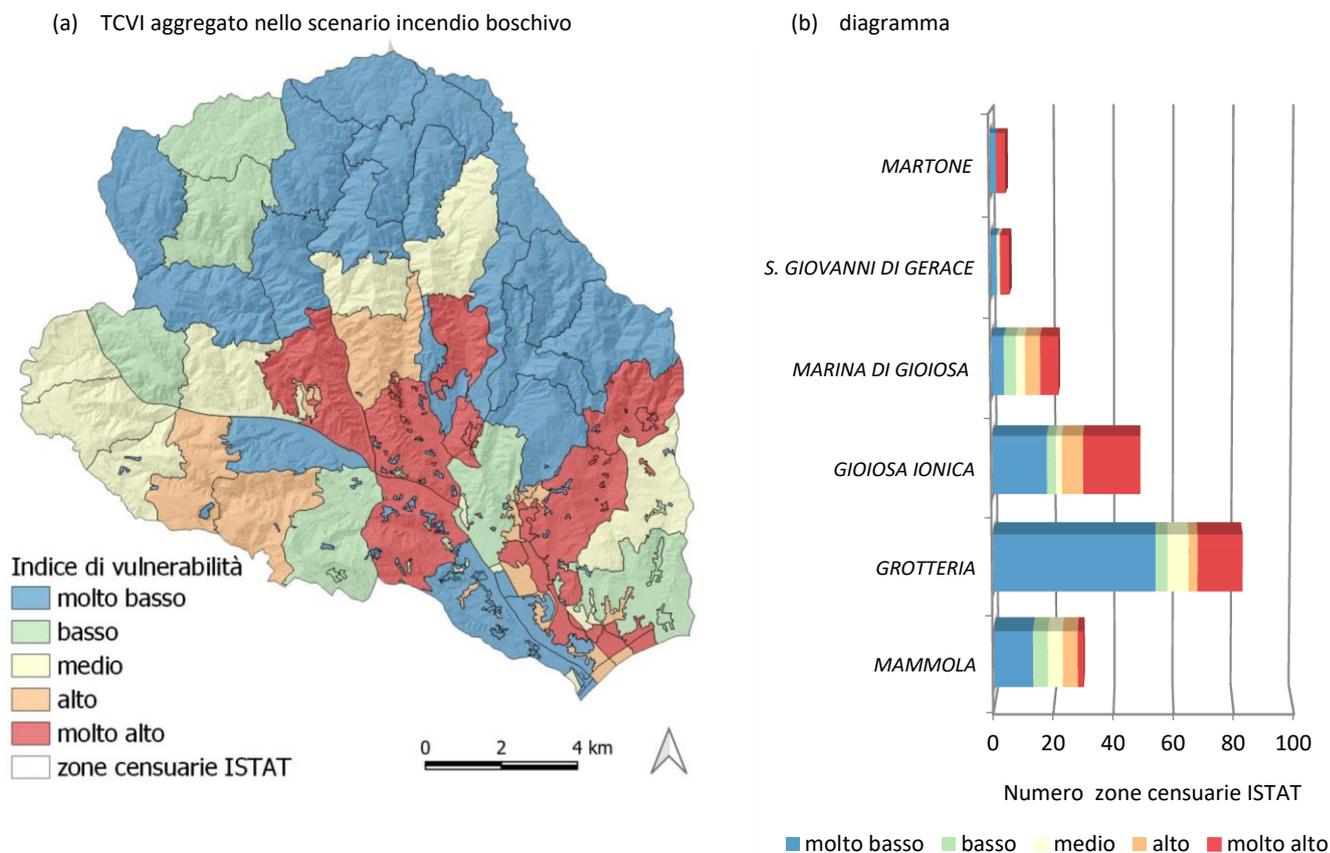


Figura 7-15. Distribuzione spaziale delle classi di vulnerabilità TCVI ipotizzando uno scenario di pericolosità da incendio boschivo; a) Mappa di vulnerabilità aggregata TCVI; b) diagramma di distribuzione delle classi di vulnerabilità in relazione al numero di zone censuarie, nei 6 comuni di appartenenza del CT

La Figura 7-16 mostra la distribuzione delle 5 categorie di vulnerabilità TCVI, all'interno dei 6 comuni del Contesto Territoriale. Il diagramma radar basato sui valori in kmq della superficie vulnerabile, evidenzia come il Comune di Mammola con la maggiore estensione areale presenti valori per lo più molto bassi e bassi di vulnerabilità. Mentre la maggiore superficie interessata da un livello molto alto di vulnerabilità, riguarda il Comune di Gioiosa Ionica ed a seguire quello di Grotteria.

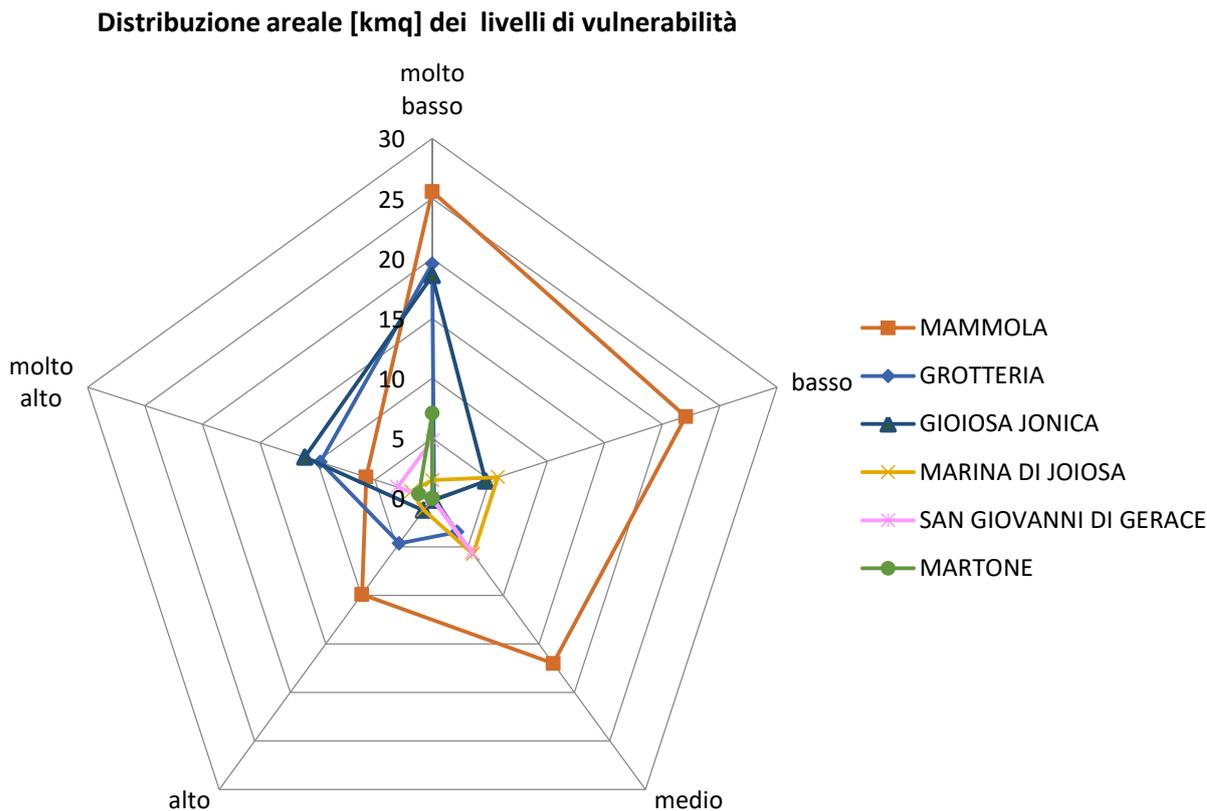


Figura 7-16. Distribuzione areale in kmq dei livelli di vulnerabilità TCVI, nei 6 comuni del CT, ipotizzando uno scenario di pericolosità da incendio boschivo

7.5.1 Modelli di regressione per validare l'indice proposto

Ad oggi si dispone di strumenti e metodologie per definire in maniera sempre più puntuale e precisa la pericolosità di un territorio. Inoltre, i dati a disposizione, riferiti ai principali fenomeni naturali e antropici, consentono di implementare nuove e affidabili tecniche di validazione dei risultati ottenuti.

Quando si analizza invece la vulnerabilità si riscontrano maggiori problemi, poiché non si hanno strumenti diretti per validare i risultati dello studio. In questo lavoro si propone una verifica dell'indice TCVI di Vulnerabilità del Contesto Territoriale attraverso le tecniche di regressione più conosciute e diffuse nella letteratura internazionale. I risultati in particolare riguardano lo scenario di pericolosità da incendio boschivo in quanto si è ritenuta maggiormente significativa la banca dati disponibile, riferita alle aree percorse da incendio. Si precisa infatti che non è stato possibile adottare i modelli regressivi per le altre due tipologie di rischio (alluvione e frana) dal momento che non è disponibile per esse un campione di dati rappresentativo, spazialmente distribuito. Infatti per il contesto territoriale di studio non sono presenti banche dati contenenti una perimetrazione delle aree allagate o delle zone che hanno subito frane durante gli eventi calamitosi dell'ultimo decennio.

Nel caso dello scenario da incendio boschivo quindi, sono stati applicati due metodi di regressione: la regressione geografica pesata, in inglese chiamata *Geographically Weighted Regression (GWR)*, e la regressione lineare, in inglese *Ordinary Least Squares OLS*. In particolare sono state calcolate la GWR e la

OLS per valutare la performance delle diverse componenti di vulnerabilità con i dati osservati degli incendi boschivi.

Il metodo dei minimi quadrati, in sigla OLS (Ordinary Least Squares) sceglie fra le infinite rette possibili, quella che minimizza la somma dei quadrati degli scarti. Nella sua forma più semplice ogni record (o evento) nel set di dati è costituito da un valore x , definito variabile indipendente e da un altro valore y che viene osservato (variabile dipendente). Il metodo OLS ipotizza che y sia approssimativamente correlato a x in un modo particolarmente semplice: $y = a + b x$, cioè esistono numeri 'a' e 'b' per i quali $a + bx$ è una buona stima di y per tutti i valori di x .

La regressione geograficamente pesata (GWR) introdotta da Brunson et. al. (1996), è una tecnica parametrica che fornisce un insieme separato di parametri per ogni osservazione, riflettendo l'eterogeneità del campione attraverso le differenti risposte marginali alle variabili esplicative nello spazio (Kumar et al. 2007). La regressione GWR è uno strumento molto utile per esplorare l'eterogeneità spaziale dei dati e la relazione tra le diverse variabili. Infatti, mentre il modello di regressione lineare OLS si basa sulla seguente formulazione:

$$y_i = \sum_i^j \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i$$

dove ε_i si stima attraverso la massima verosimiglianza, attraverso il modello GWR, l'eterogeneità spaziale del modello si ottiene con una formula del tipo:

$$y_i = \sum_i^j \beta_j (u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon_i$$

dove le costanti β_j sono caratterizzate dalle posizioni (u, v) .

La stima di questi parametri può fornire una valutazione della eterogeneità spaziale del dataset. In sintesi si esplora se la relazione tra le variabili indipendenti (componenti degli indici di vulnerabilità) e la variabile dipendente (incendi) cambia geograficamente.

Come variabile dipendente, a livello di zona censuaria, sono stati utilizzati i valori di incendio registrati dal 2010 al 2019 caratterizzati da una superficie bruciata di almeno 1 kmq. Come variabili indipendenti sono state utilizzate le componenti degli indici $TCVI_{people}$ e $TCVI_{exposure}$ e l'indice $TCVI_{emergency}$. Innanzitutto è stata analizzata la presenza o meno di collinearità attraverso il parametro dell'indice di tolleranza e del fattore VIF (Variance Inflation Factor) che rappresenta il reciproco della tolleranza. Valori bassi di VIF indicano bassa collinearità, valori alti elevata collinearità. Valori tra 5 e 10 sono indicativi di forte collinearità. I risultati mostrano una bassa collinearità con valori di VIF variabili fra 1 e 5. Questo primo test preliminare ha consentito di poter selezionare tutte le variabili per la successiva analisi di regressione. Come mostrato nella Tabella 7-13 il modello OLS spiega circa il 43 % ($adjusted R^2 = 0.43$) della variazione delle zone censuarie interessate da incendio boschivo. Nello stesso tempo il modello GWR ha mostrato miglioramenti nella distribuzione spaziale con valori di $adjusted R^2 = 0.53$. La misura del AIC pari a 80.8 mostra l'adattamento del modello con i dati osservati. Inoltre il valore di R^2 pari a 0.62 suggerisce anche una prestazione accettabile del modello. In generale i risultati mostrano un migliore potere esplicativo del modello spaziale locale (GWR) rispetto al modello OLS. Inoltre il livello di correlazione è tale da giustificare l'approccio di calcolo utilizzato per la determinazione delle componenti TCVI.

Variabile	Tolleranza	VIF	Ordinary Least Squares Regression (OLS)	Geographically Weighted Regression (GWR)
TCVpeople_PC1	.370	2.701	R=0.671	AIC= 80.8
TCVpeople_PC2	.858	1.166	R ² = 0.45	R ² = 0.62
TCVpeople_PC3	.572	1.750	R ² adjusted= 0.43	R ² adjusted= 0.53
TCVpeople_PC4	.930	1.075		
TCVexposure_PC1	.950	1.052		
TCVexposure_PC2	.278	3.596		
TCVexposure_PC3	.941	1.063		
TCVemergency	.908	1.101		

Tabella 7-13. Risultati del test di multicollinearità e della regressione OLS e GWR

7.6 TCVI nello scenario frana

La Figura 7-17 mostra l'indice aggregato TCVI ricavato utilizzando la mappa TCVI_{emergency} nello scenario di pericolosità da frana. Come mostrato dallo stesso diagramma il comune con un numero maggiore di zone censuarie con livelli alti e molto alti di vulnerabilità è quello di Grotteria. Si evidenzia però che la distribuzione spaziale delle frane nel CT e quindi del relativo disagio arrecato alle infrastrutture stradali durante un evento, comporta valori alti e molto alti di vulnerabilità anche negli altri comuni del CT.

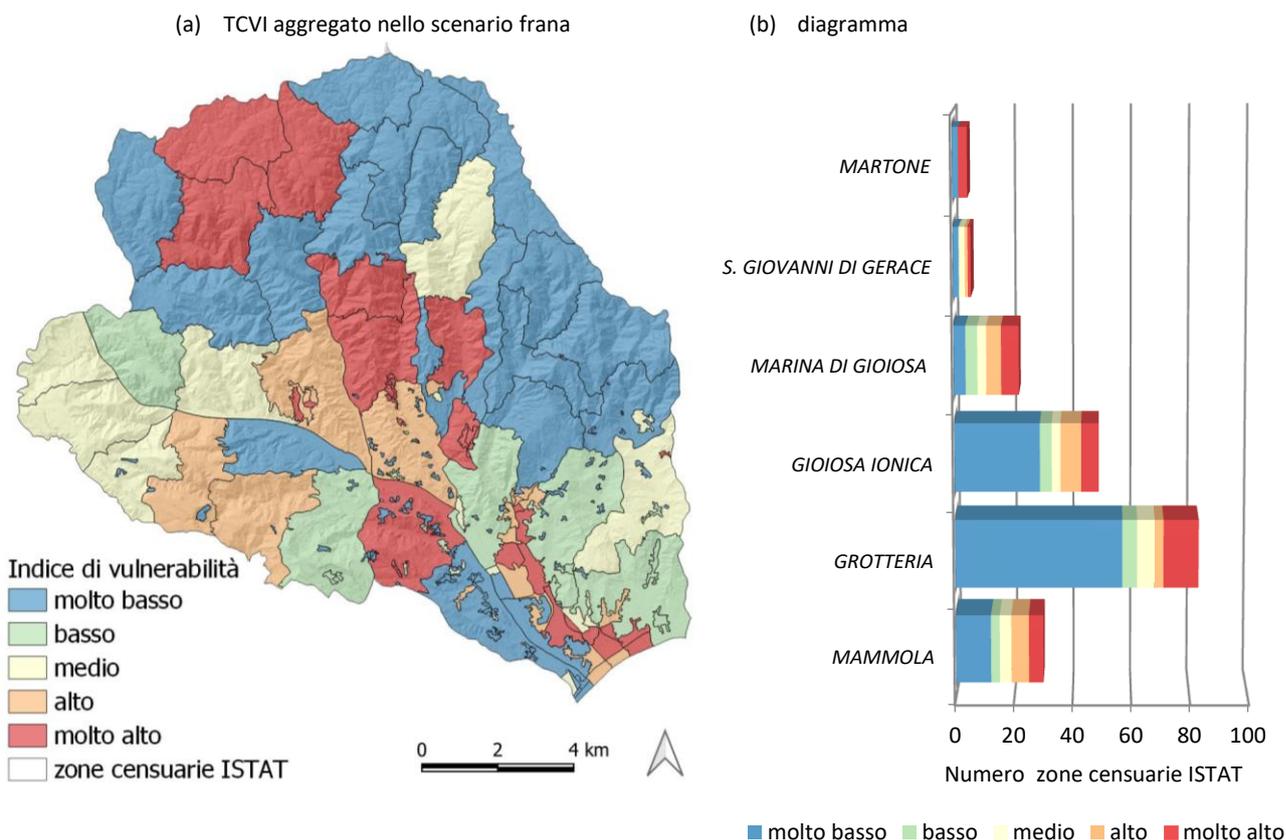


Figura 7-17. Distribuzione spaziale delle classi di vulnerabilità TCVI ipotizzando uno scenario di pericolosità da frana; a)Mappa di vulnerabilità aggregata TCVI; b) diagramma di distribuzione delle classi di vulnerabilità in relazione al numero di zone censuarie, nei 6 comuni di appartenenza del CT

La Figura 7-18 mostra la distribuzione spaziale delle 5 categorie di vulnerabilità TCVI, all'interno dei 6 comuni del Contesto Territoriale. Il diagramma radar basato sui valori in kmq della superficie vulnerabile, evidenzia come i comuni con superficie ricadente nei livelli molto alti e alti di vulnerabilità siano principalmente quelli di Mammola e Grotteria.

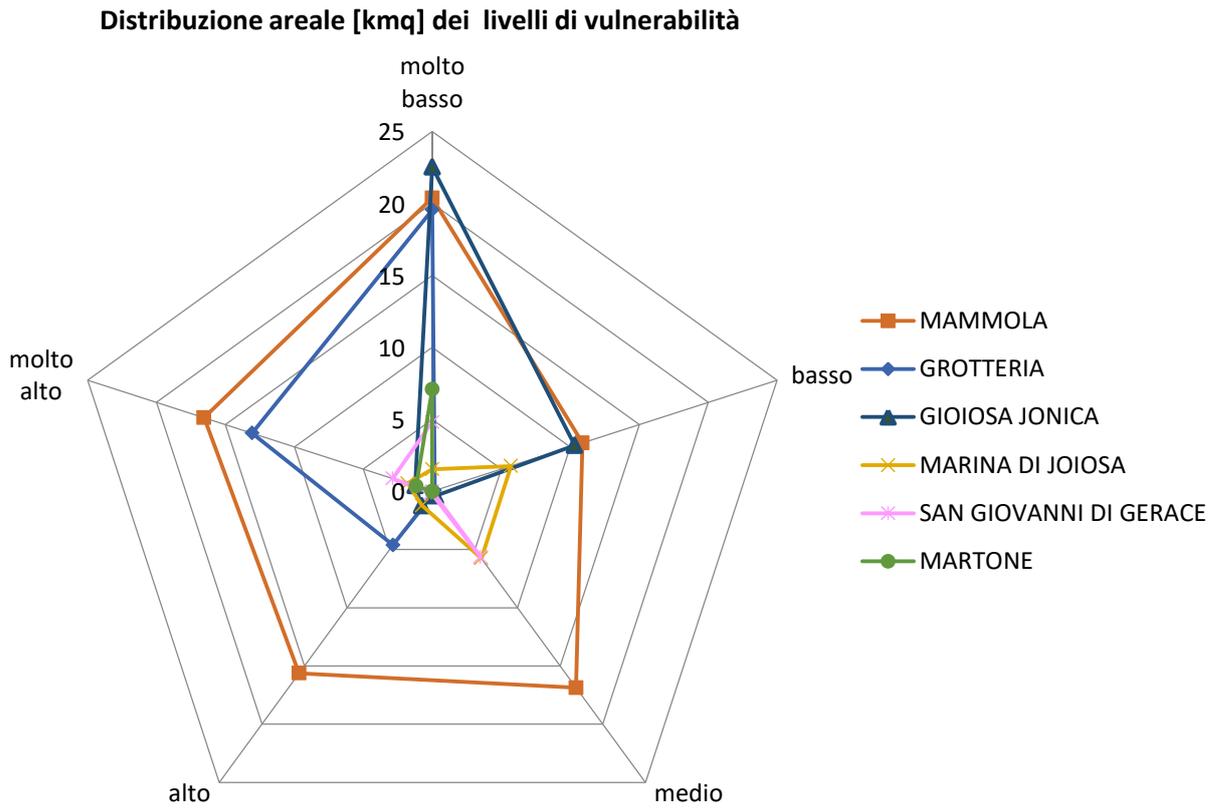


Figura 7-18. Distribuzione areale in kmq dei livelli di vulnerabilità TCVI, nei 6 comuni del CT, ipotizzando uno scenario di pericolosità da frana

7.7 TCVI nello scenario alluvione

La Figura 7-19 mostra l'indice aggregato TCVI ricavato utilizzando la mappa TCVI_{emergency} nello scenario di pericolosità da alluvione. In questo caso la mappa di vulnerabilità aggregata è stata ottenuta prendendo come riferimento il livello di pericolosità idraulica associato al tempo di ritorno di 200 anni. Si evidenzia che in questo caso, la modellazione idraulica ha riguardato solo il territorio perimetrato dal poligono in rosso nella figura sottostante, afferente al tratto finale del torrente Torbido. Pertanto la componente di vulnerabilità TCVI_{emergency} è stata calcolata sulla base dei soli tratti stradali interrotti nel dominio di analisi e soggetti ad alto pericolo di allagamento. In tal senso le zone maggiormente coinvolte sono quelle relative alla parte sud del CT ed in particolare i comuni di Marina di Gioiosa Ionica e Gioiosa Ionica.

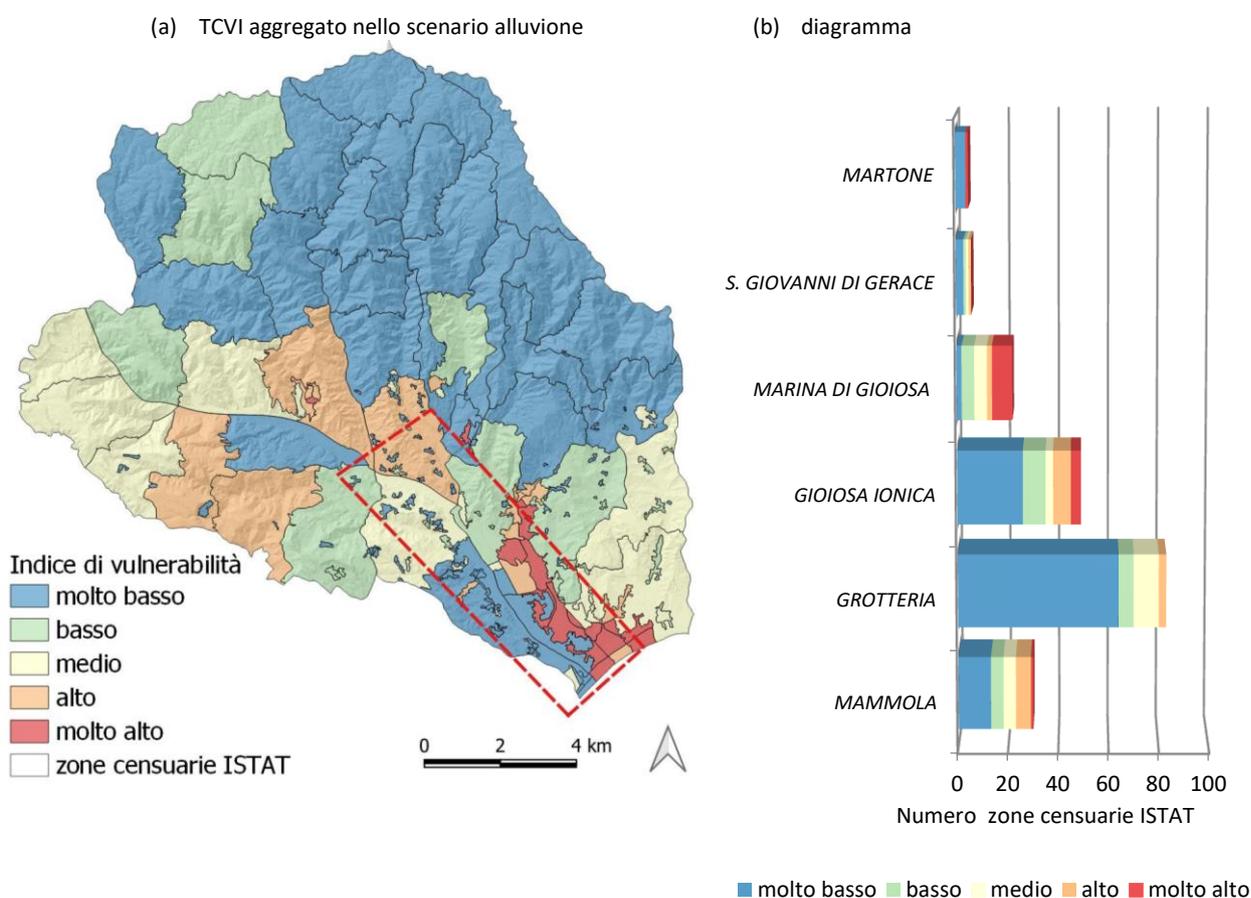


Figura 7-19. Distribuzione spaziale delle classi di vulnerabilità TCVI ipotizzando uno scenario di pericolosità da alluvione; a) Mappa di vulnerabilità aggregata TCVI, l'area in rosso indica il dominio di studio della modellazione idraulica; b) diagramma di distribuzione delle classi di vulnerabilità in relazione al numero di zone censuarie, nei 6 comuni di appartenenza del CT

8 Valutazione del rischio

Dopo aver elaborato le mappe di pericolosità e vulnerabilità negli scenari da incendio boschivo, frana e alluvione sono state ricavate le mappe del rischio secondo lo schema riprodotto nella Figura 8-1. Occorre evidenziare che mentre le mappe di pericolosità fanno riferimento ad una unità di analisi data dal pixel raster, con risoluzione pari a 20 m, quelle di vulnerabilità si riferiscono all'unità di analisi delle zone censuarie, che rappresentano l'unità di aggregazione più piccola fornita dall'ISTAT. Pertanto per poter combinare i due diversi strati informativi si è reso necessario un adeguamento nell'unità di analisi. Dal momento che tale lavoro si sviluppa con l'obiettivo di fornire un approccio metodologico della vulnerabilità su zona censuaria, si è ritenuto conveniente trasformare, attraverso operazioni di geoprocessing la mappa di pericolosità. Infatti, nonostante tale operazione comporti una perdita di informazioni e rappresenti in qualche modo una forzatura di calcolo, la procedura adottata consente di fornire un'indicazione generale sui diversi livelli di rischio nelle diverse zone censuarie. In particolare vengono individuate le aree dove potrebbero manifestarsi fenomenologie critiche idrogeologiche o di incendio boschivo, dove sussistono altresì condizioni di alta vulnerabilità che potrebbero rendere difficile la tempestiva ed efficace attuazione di azioni di intervento in condizioni di emergenza.

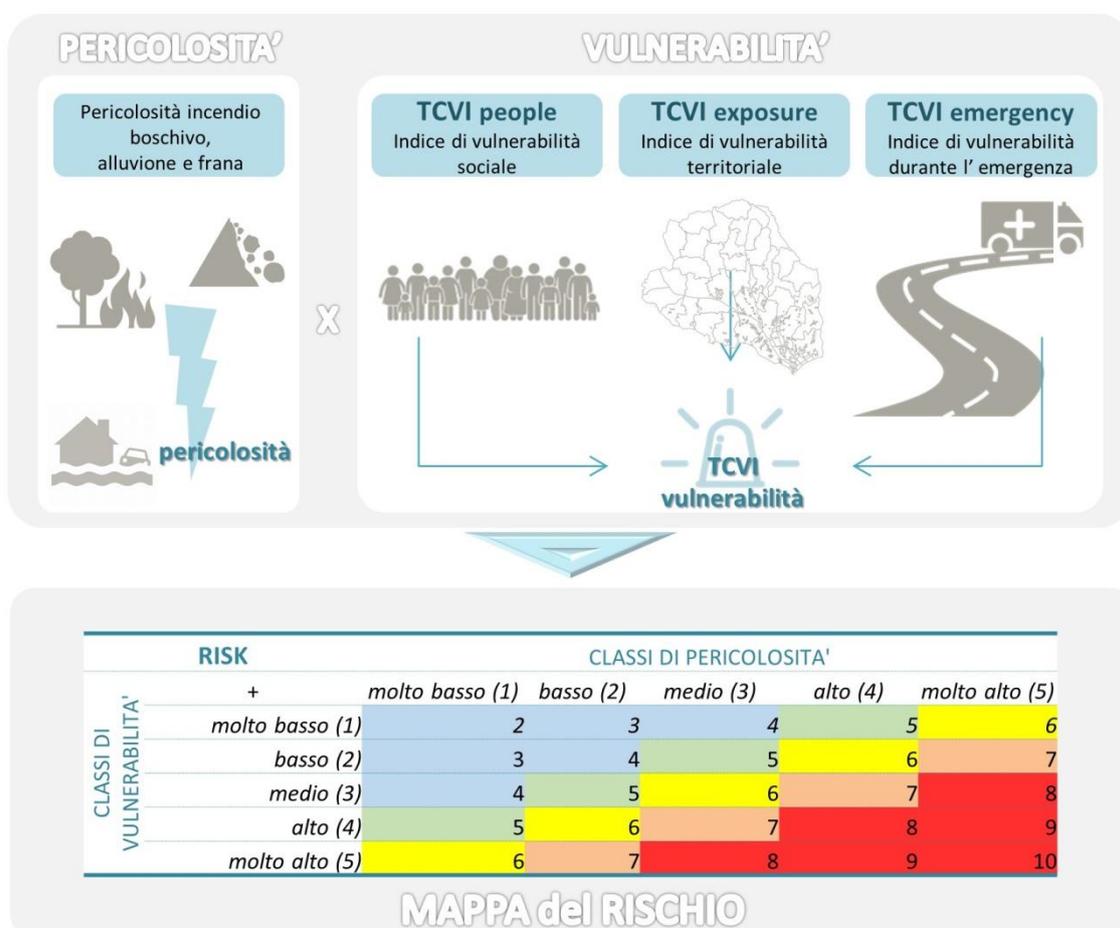


Figura 8-1. Schema concettuale dell'approccio di calcolo della mappa del rischio

La Figura 8-2 mostra la mappa del rischio da incendio boschivo. Le zone censuarie interessate da livelli di vulnerabilità molto alti ed alti, sono quelle della zona centrale e della zona sud-est del Contesto Territoriale. Si tratta di aree in alcuni casi, densamente popolate prossime a territori con alti livelli di pericolosità e di zone in cui il fenomeno degli incendi potrebbe causare problemi nell'accessibilità delle infrastrutture stradali.

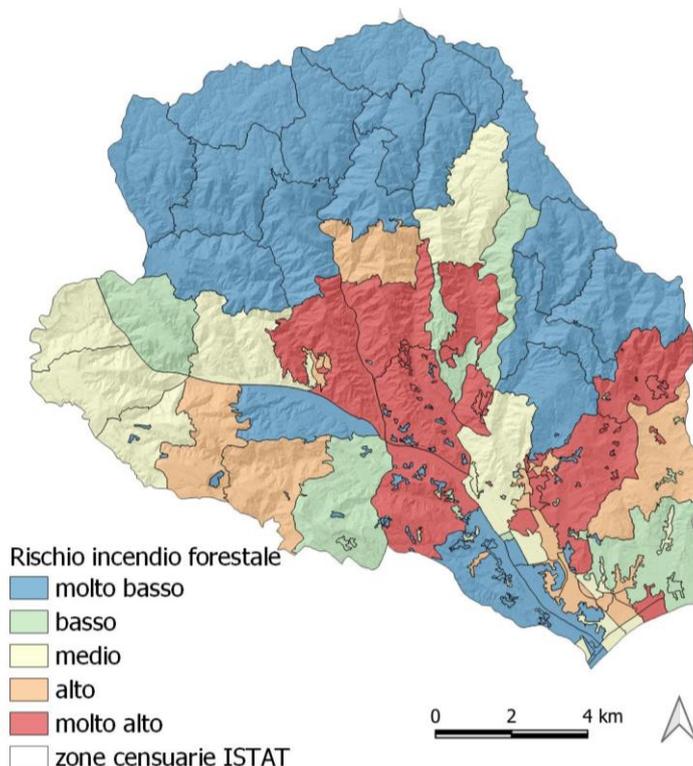


Figura 8-2. Mappa del rischio da incendio boschivo, a livello di zona censuaria

La Figura 8-3 mostra la mappa del rischio da frana, dove i livelli molto alti di rischio si concentrano nella zona centrale del CT, mentre livelli alti si distribuiscono nella zona nord e nord-ovest.

Con riferimento invece alla mappa del rischio alluvione (Figura 8-4), si precisa che l'analisi si è basata esclusivamente sulle zone censuarie prossime al dominio della modellazione idraulica, caratterizzate da una estensione dell'asta fluviale principale pari a circa 10 km. Si riscontrano livelli molto alti di rischio alluvione in corrispondenza del tratto finale del torrente Torbido e nelle zone a monte in corrispondenza della destra idraulica del corso d'acqua.

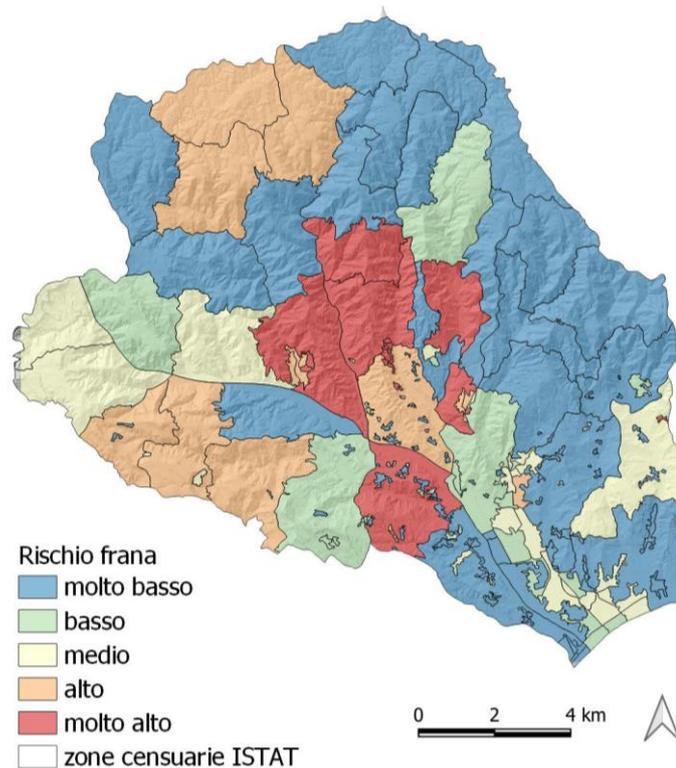


Figura 8-3. Mappa del rischio da frana, a livello di zona censuaria

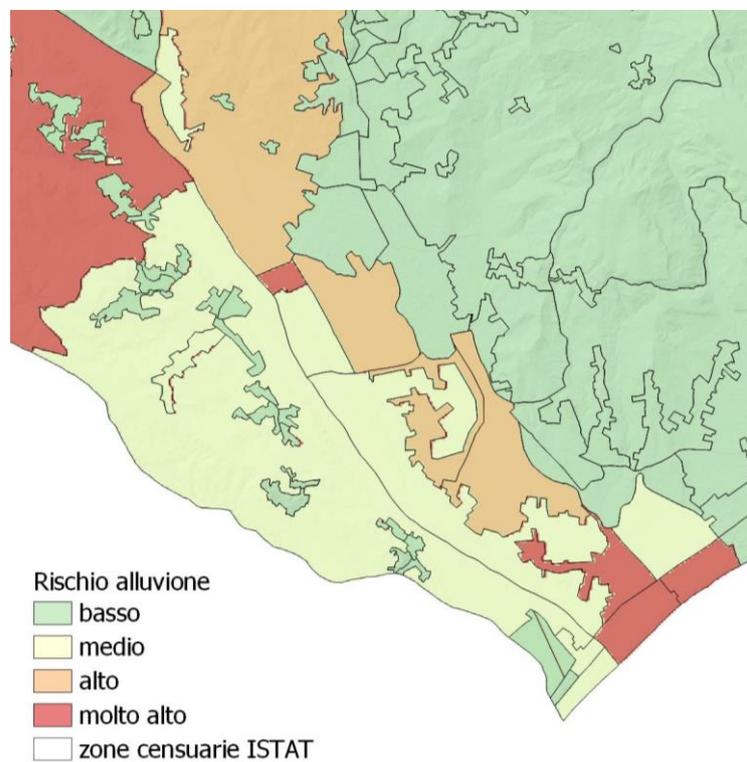


Figura 8-4. Mappa del rischio alluvione, a livello di zona censuaria

9 Conclusioni

Il presente lavoro di tesi si basa su un approccio metodologico di calcolo modulare della vulnerabilità. Nonostante il territorio regionale e più in generale il territorio nazionale sia estremamente esposto a fenomeni intensi naturali e antropici, come frane, alluvioni e terremoti, la comunità scientifica ha concentrato molto l'attenzione sulla pericolosità, trascurando il contributo della vulnerabilità. Ad oggi non esiste una definizione univoca del concetto di vulnerabilità in quanto essa è legata a molte variabili complesse e di natura multidisciplinare. In questo lavoro sono state esaminate tre importanti questioni relative ai rischi naturali e antropici: *Chi e che cosa è vulnerabile? Come calcolare la vulnerabilità? Come individuare i fattori caratteristici attraverso una adeguata distribuzione spaziale delle informazioni?*

Il primo periodo di studio ha avuto come obiettivo quello dell'approfondimento delle tematiche di ricerca, attraverso l'analisi dei diversi lavori presenti in letteratura relativi sia al tema della vulnerabilità che a quello della pericolosità. Inoltre una collaborazione iniziale con la Protezione Civile della regione Calabria ha favorito lo studio degli eventi calamitosi registrati nel passato ed il loro effetto al suolo, consentendo una migliore conoscenza degli strumenti della pianificazione d'emergenza e più in generale delle azioni di pianificazione, mitigazione e gestione dell'emergenza. In questa fase di ricerca, si è deciso di focalizzare l'attenzione su un nuovo ambito territoriale definito "Contesto Territoriale (CT)", costituito da un insieme di Comuni individuati a partire dalle caratteristiche geografiche e dall'analisi dei Sistemi Locali del Lavoro. Il CT può essere definito come un insieme di comuni che cooperano sul tema della pianificazione e riduzione del rischio e nelle quali le attività di protezione civile possono essere esercitate in modo unitario.

In una fase successiva di analisi sono state selezionate delle variabili e delle metodologie di calcolo degli indici di vulnerabilità. Sono state individuate le tre componenti modulari che concorrono alla valutazione della vulnerabilità (Territorial Context Vulnerability Index - TCVI). La prima è la componente sociale $TCVI_{people}$, poi quella territoriale dovuta alla pressione umana e climatica sul territorio ed alle criticità causate dagli eventi del passato $TCVI_{exposure}$, ed infine la componente legata al funzionamento ed all'importanza delle infrastrutture stradali, durante un evento $TCVI_{emergency}$. Quest'ultimo contributo risulta molto importante per gli insediamenti abitativi distribuiti sul territorio, che dipendono in modo totale dal complesso sistema della rete di infrastrutture, soprattutto durante un evento calamitoso. Spesso infatti un tratto di strada danneggiato o interrotto e la mancanza di strade alternative provocano il completo isolamento di frazioni abitative e possono in alcuni casi pregiudicare le azioni di soccorso ed evacuazione. $TCVI_{emergency}$ quindi, stima la vulnerabilità del sistema operativo di gestione dell'emergenza basato essenzialmente sulla possibilità di potersi spostare verso le aree sicure (per i cittadini), o spostarsi verso i centri di coordinamento e soccorso (per i soccorritori). Il dataset di analisi è stato costruito in ambiente GIS ed è costituito da informazioni di tipo alfanumeriche e cartografiche.

In questo lavoro inoltre, sono state implementate nuove metodologie per la modellazione dei fenomeni più frequenti: alluvione, frana e incendio boschivo. Le mappe di pericolosità prodotte in questa fase, sono state utilizzate nel calcolo della componente $TCVI_{emergency}$ e nella elaborazione ultima delle mappe del rischio.

Lo studio sulla vulnerabilità condotto in questo lavoro di tesi, fornisce diversi contributi, in termini scientifici ed operativi, alla letteratura del settore. Primo si propone un approccio metodologico modulare per quantificare e mappare la vulnerabilità, a livello di zone censuarie, tenendo conto degli scenari di pericolosità più frequenti (incendio boschivo, frana e alluvione). In secondo luogo, il lavoro indaga su come variabili legate all'uomo, all'ambiente, alle infrastrutture e alle emergenze contribuiscano a rendere più o meno vulnerabile un Contesto Territoriale.

In terzo luogo, si applicano nuovi criteri di classificazione delle mappe di vulnerabilità, utilizzando le teorie degli insiemi fuzzy. Generalmente infatti i criteri di classificazione riferiti alla vulnerabilità sociale prendono come riferimento il metodo della deviazione standard o della normalizzazione. In questo lavoro sono stati confrontati tutti i tradizionali metodi ed infine si è fatto ricorso ad alcune metriche statistiche per individuare la migliore funzione fuzzy di appartenenza. Infine aver considerato i Contesti Territoriali (CT) come limite amministrativo di analisi, rappresenta un elemento innovativo in quanto le attività di protezione civile sono orientate nella direzione della pianificazione di emergenza proprio su base CT, con lo scopo di condividere le risorse e gestire in modo ottimale le fasi di emergenza. Si tratta quindi del primo tentativo su scala nazionale di definizione della distribuzione spaziale della vulnerabilità in un Contesto Territoriale come strumento utile per la riduzione del rischio da disastri.

Alcuni aspetti invece che potrebbero migliorare l'approccio metodologico riguardano l'accuratezza e l'aggiornamento dei dati di origine. Molti dati infatti fanno riferimento al censimento ISTAT del 2011 ma per una migliore attività di pianificazione i dati dovrebbero essere aggiornati annualmente dai comuni rientranti nel CT. Inoltre, nell'area di studio ci sono poche stazioni di monitoraggio, questo ha influenzato direttamente l'accuratezza dei dati climatici, di conseguenza un migliore risultato degli aspetti legati alla pressione climatica esercitata sul territorio, si potrebbe ottenere con indicatori climatici maggiormente definiti nel tempo e nello spazio. Le carte tematiche inoltre presentano una grande quantità di informazioni in modo semplificato e visivamente di facile lettura ma nello stesso tempo si precisa che i punti di forza dell'approccio cartografico potrebbero costituire una debolezza là dove non venissero evidenziate bene le ipotesi analitiche dell'approccio metodologico o l'incertezza legata ad eventuali variabili. Pertanto tali elaborazioni richiedono sempre ricerche sul campo e consultazioni con gli Enti competenti nella pianificazione e gestione dell'emergenza.

Dai risultati del lavoro condotto anche attraverso la modellazione dei fenomeni naturali e antropici, sono state individuate le zone maggiormente suscettibili. Le mappe TCVI invece, hanno consentito di identificare le componenti guida che contribuiscono alla vulnerabilità complessiva e le relative zone censuarie interessate dai livelli molto alti di vulnerabilità e che quindi necessitano di assistenza o supporto per sviluppare la necessaria resilienza in occasione di eventi estremi. I risultati generali mostrano che il sud est e la zona centrale del CT sono interessati da elevati livelli di vulnerabilità nelle aree densamente popolate e nelle aree con la più alta incidenza di infrastrutture stradali strategiche.

Le mappe di pericolosità prodotte e le mappe di vulnerabilità forniscono utili informazioni territoriali che possono supportare i decisori politici nella attività di gestione dell'uso del suolo e pianificazione territoriale, aumentando e rafforzando la resilienza delle comunità e la capacità delle risorse umane. Nel contesto dei pericoli naturali e antropici, il TCVI potrebbe essere utilizzato per gestire la ripartizione delle risorse, per individuare le zone dove concentrare maggiormente gli sforzi di pianificazione e gestione socio-territoriale nonché orientare le politiche di Protezione Civile di previsione e prevenzione. Le mappe tematiche prodotte inoltre, rappresentano un utile strumento in grado di approfondire, rendere coerenti e standardizzare le procedure che portano alle decisioni di priorità degli interventi strutturali e non strutturali, su Contesti Territoriali diversi.

Bibliografia

1. Regione Emilia-Romagna and Arpa Emilia-Romagna, La percezione del rischio, Metodologia e casi di studio, Q.d.M. 2011, Editor.
2. Slovic, P., B. Fischhoff, and S. Lichtenstein, Facts and fears: Understanding perceived risk. 1980, In R. Schwing and W. A. Albers, Jr. (Eds.), *Societal Risk Assessment: How Safe is Safe Enough?* (pp. 181-214). New York: Plenum Press.
3. Douglas, M. and A. Wildavsky, *Risk and Culture: An essay on the selection of Technical and Environmental Dangers*. 1982: University of California Press, Berkeley.
4. UNDRP, *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*, in Report of Experts Group Meeting of 9-12 July 1979. 1980: UNDRP, Geneva, Switzerland.
5. Cardona, O., *Estudios de Vulnerabilidad y Evaluación del Riesgo Sísmico: Planificación Física y Urbana en Áreas Propensas*. Boletín Técnico De La Asociación Colombiana De Ingeniería Sísmica, 1986. 33: p. 32-65.
6. UNISDR, *Living With Risk*, in United Nations International Strategy for Disaster Reduction. 2004: Geneva, Switzerland.
7. Birkmann, J., *Indicators and criteria. Measuring vulnerability to natural hazards: Towards disaster resilient societies*. J. Birkmann, 2006: p. 55-77.
8. Alexander, D., *Confronting catastrophe : new perspectives on natural disasters*. 2000, Harpenden: Terra Publishing.
9. Quarantelli, E.L., *What is a Disaster? Natural Hazards*, 1998. 18(1): p. 87-88.
10. Marulanda, M., O. Cardona, and A. Barbat, *Revealing the socioeconomic impact of small disasters in Colombia using the DesInventar database*. *Disasters*, 2010. 34: p. 552-570.
11. Cardona, O.D., *Determinants of risk: exposure and vulnerability*. 2012. p. 65-108.
12. Lavell, A., *Local Level Risk Management: Concept and Practices*. 2003: CEPREDENAC-UNDP, Quito, Ecuador.
13. Thywissen, K., *Components of risk, a comparative glossary*. SOURCE-studies of the university: Research, counsel. Education, 2006.
14. Manyena, B., *The Concept of Resilience Revisited*. *Disasters*, 2006. 30: p. 434-450.
15. Borden, K., et al., *Vulnerability of U.S. Cities to Environmental Hazards*. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 2007. 4.
16. Holand, I., P. Lujala, and J.K. Rød, *Social vulnerability assessment for Norway: A quantitative approach*. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*, 2011. 65: p. 1-17.
17. Maharani, Y., et al., *Disaster risk reduction by measuring social vulnerability around the Merapi Volcano*. Vol. 2245. 2020. 020006.
18. Cutter, S., et al., *Social Vulnerability to Climate Variability Hazards: A Review of the Literature*. Final Report to Oxfam America, 2009: p. 1-44.
19. Roncancio, J., S. Cutter, and A. Nardocci, *Social vulnerability in Colombia*. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020. 50: p. 101872.
20. Garschagen, M., et al., *WorldRiskReport 2016 [English version]*. 2016: Bündnis Entwicklung Hilft and UNU-EHS:Berlin.

21. Trigila, A., et al., *Dissesto Idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio* - Edizione 2018. 2018.
22. Wallemacq, P., Unisdr, and Cred, *Economic Losses, Poverty and Disasters 1998-2017*. 2018.
23. FORZIERI, G., et al., *Resilience of large investments and critical infrastructures in Europe to climate change*. Luxembourg. 2015: Publications Office of the European Union.
24. Fekete, A., M. Damm, and J. Birkmann, *Scales as a challenge for vulnerability assessment*. *Natural Hazards*, 2010. 55: p. 729–747.
25. Cutter, S., B. Boruff, and W. Shirley, *Social Vulnerability to Environmental Hazards*. *Social Science Quarterly*, 2003. 84: p. 242-261.
26. Kasperson, R.E., J.X. Kasperson, and K. Dow, *Global environmental risk and society*. *Global Environmental Risk*, Tokyo, 2001: p. 1-48.
27. Lonetti, P. and R. Maletta, *Dynamic impact analysis of masonry buildings subjected to flood actions*. *Engineering Structures*. *ENGINEERING STRUCTURES*, 2018.
28. UNDHA, *Internationally agreed glossary of basic terms relating to disaster management*. 1992: UNDHA, Geneva, Switzerland.
29. White, G., *Natural hazards research **. 2019. p. 193-216.
30. Schröter, D., et al., *Assessing vulnerabilities to the effects of global change: an eight step approach*. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2005. 10.
31. Boko, M., et al., *imate change: impacts, adaptation and vulnerability*, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2020.
32. Change, I., *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*, 2014: p. 1-32.
33. Ehlers, E., et al., *Assessing Human Vulnerability to Global Climatic Change*. 2006.
34. Haines, A., et al., *Climate Change and Human Health: Impacts, Vulnerability and Public Health*. *Public health*, 2006. 120: p. 585-96.
35. Marchezini, V., et al., *Reduction of vulnerability to disasters: from knowledge to action ("Redução de vulnerabilidade a desastres: do conhecimento à ação")*. 2017.
36. Cutter, S., et al., *A Place-Based Model for Understanding Community Resilience to Natural Disasters*. *Global Environmental Change*, 2008. 18: p. 598-606.
37. Williams, S., et al., *Towards an Integrated Framework for Assessing the Vulnerability of Species to Climate Change*. *PLoS biology*, 2009. 6: p. 2621-6.
38. Birkmann, J. and N. Fernando, *Measuring revealed and emergent vulnerabilities of coastal communities to tsunami in Sri Lanka*. *Disasters*, 2008. 32: p. 82-105.
39. Rodrigues, V., et al., *Pandemic responses in vulnerable communities: a simulation-oriented approach*. *Revista de Administracao Publica*, 2020. 54.
40. Bankoff, G., *The historical geography of disaster: "Vulnerability" and "local knowledge" in western discourse*. *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*, 2004.
41. Presidenza del Consiglio dei Ministri, *Manuale operativo per la predisposizione di un piano comunale o intercomunale di protezione civile*. Dipartimento di Protezione Civile, Ottobre 2007.

42. Birkmann, J., Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: Conceptual frameworks and definitions. *Institute for Environment and Human Security Journal*, 2006. 5: p. 7-54.
43. Bohle, H.-G., Vulnerability and Criticality: Perspectives from Social Geography. *IHDP Update*, 2001. 2: p. 1-7.
44. Davidson, R.A. An urban earthquake disaster risk index. 1997.
45. Bollin, C., et al., Disaster Risk Management by Communities and Local Governments. 2003.
46. Turner II, B.L., et al., A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003. 100: p. 8074-9.
47. Wisner, B., et al., *At risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters*, ed. R. 2nd Edition, London. 2004.
48. Cardona, O., Environmental management and disaster prevention: Two related topics: A holistic risk assessment and management approach. *Natural Disaster Management*, 1999: p. 151-153.
49. Tibaduiza, M., O. Cardona, and A. Barbat, Urban Seismic Risk Evaluation: A Holistic Approach. *Natural Hazards*, 2007. 40: p. 137-172.
50. Cardona, O. and J. Hurtado, 'Holistic seismic risk estimation of a metropolitan center. 2020.
51. Carreño, M.L., O.D. Cardona, and A.H. Barbat, Metodología para la evaluación del desempeño de la gestión del riesgo. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), 2004.
52. Cardona, O.D., The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: A necessary review and criticism for effective risk management, in *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*. 2013. p. 37-51.
53. Bogardi, J. and J. Birkmann, Vulnerability assessment: the first step towards sustainable risk reduction. *Disaster and Society - From Hazard Assessment to Risk Reduction*, 2004: p. 75-82.
54. Cardona, O., Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. 2001.
55. Intergovernmental Panel on Climate, C., *Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects: Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report: Volume 1: Global and Sectoral Aspects*. Vol. 1. 2014, Cambridge: Cambridge University Press.
56. Adger, W.N., Vulnerability. *Global Environmental Change*, 2006. 16(3): p. 268-281.
57. PROVIA, Guidance on Assessing Vulnerability, Impacts and Adaptation to Climate Change. 2013: Consultation document. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme.
58. Borja-Vega, C. and A. Fuente, Municipal Vulnerability to Climate Change and Climate Related Events in Mexico. 2013.
59. Menezes, J., et al., Mapping human vulnerability to climate change in the Brazilian Amazon: The construction of a municipal vulnerability index. *PLOS ONE*, 2018. 13: p. e0190808.
60. Dessai, S. and M. Hulme, Does climate adaptation policy need probabilities? *Climate Policy*, 2003. 4.
61. Aalst, M., T. Cannon, and I. Burton, Community Level Adaptation to Climate Change: The Potential Role of Participatory Community Risk Assessment. *Global Environmental Change*, 2008. 18: p. 165-179.

62. O'Brien, K., et al., Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses. *Climate Policy*, 2007. 7: p. 73-88.
63. Burton, C., S. Rufat, and E. Tate, *Social Vulnerability: Conceptual Foundations and Geospatial Modeling*. 2018. p. 53-81.
64. White, G., *Natural Hazards Research. 1973: Directions in Geography*. R. J. Chorley. London, Methuen: 193-216.
65. Burton, I., R. Kates, and G. White, *The Environment as Hazard*. 1993.
66. Cutter, S., *Societal Vulnerability to Environmental Hazards*. *Progress in Human Geography - PROG HUM GEOGR*, 1996. 20: p. 529-539.
67. Cutter, S., J. Mitchell, and M. Scott, *Revealing the Vulnerability of People and Places: A Case Study of Georgetown County, South Carolina*. *Annals of The Association of American Geographers - ANN ASSN AMER GEOGR*, 2000. 90: p. 713-737.
68. Koks, E., B. Jongman, and T. Husby, *Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management*. *Environmental Science & Policy*, 2014. 47.
69. Schumann, L.A. and L.B.A. Moura, *Vulnerability synthetic indices: A literature integrative review*. *Ciencia e Saude Coletiva*, 2015. 20(7): p. 2105-2120.
70. Cutter, S.L., B.J. Boruff, and W.L. Shirley, *Social vulnerability to environmental hazards*. *Social Science Quarterly*, 2003. 84(2): p. 242-261.
71. Wu, S.Y., B. Yarnal, and A. Fisher, *Vulnerability of Coastal Communities to Sea-Level Rise: A Case Study of Cape May County, New Jersey, USA*. *Climate Research - CLIMATE RES*, 2002. 22: p. 255-270.
72. Boruff, B., C. Emrich, and S. Cutter, *Erosion Hazard Vulnerability of US Coastal Counties*. *Journal of Coastal Research - J COASTAL RES*, 2005. 21: p. 932-942.
73. Bjarnadottir, S., Y. Li, and M. Stewart, *Social vulnerability index for coastal communities at risk to hurricane hazard and a changing climate*. *Natural Hazards*, 2011. 59: p. 1055-1075.
74. Balica, S., N. Wright, and V. Meulen, *A Flood Vulnerability Index for Coastal Cities and Its Use in Assessing Climate Change Impacts*. *Natural Hazards*, 2012. 52.
75. Zanetti, V., W. Sousa Junior, and D. De Freitas, *A Climate Change Vulnerability Index and Case Study in a Brazilian Coastal City*. *Sustainability*, 2016. 8: p. 811.
76. Huang, G. and J. London, *Cumulative Environmental Vulnerability and Environmental Justice in California's San Joaquin Valley*. *International journal of environmental research and public health*, 2012. 9: p. 1593-608.
77. Zanella, M., et al., *Vulnerabilidade socioambiental do baixo curso da bacia hidrográfica do Rio Cocó, Fortaleza-CE*. *Sociedade & Natureza*, 2013. 25: p. 317-332.
78. Freitas, M.I.C. and L. Cunha, *Cartografia da vulnerabilidade socioambiental: convergências e divergências a partir de algumas experiências em Portugal e no Brasil*. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 2013. 5: p. 15-31.
79. Almeida, L., *POR UMA CIÊNCIA DOS RISCOS E VULNERABILIDADES NA GEOGRAFIA*. *Mercator - Revista de Geografia da UFC*, 2011. 10: p. 83-99.
80. Reid, C., et al., *Mapping Community Determinants of Heat Vulnerability*. *Environmental health perspectives*, 2009. 117: p. 1730-6.

81. Tibúrcio, L. and M. de Paula Correa, Análise da vulnerabilidade da microrregião de Itajubá por meio do IVG com vistas à mitigação dos impactos causados pelas mudanças climáticas. *Ambiente & Sociedade*, 2012. 15: p. 123-139.
82. Amendola, F., et al., Validade aparente de um índice de vulnerabilidade das famílias a incapacidade e dependência. *Revista da Escola de Enfermagem da USP*, 2011. 45: p. 1736-1742.
83. Barros, R., M. Carvalho, and S. Franco, O ÍNDICE DE DESENVOLVIMENTO DA FAMÍLIA (IDF). 2020.
84. Secretariat, C., *Global Youth Development Index and Report 2016*. 2016.
85. Geraghty, E., et al., *Index of Youth Vulnerability*. 2020.
86. Fekete, A., Validation of a Social Vulnerability Index in Context to River-floods in Germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009. 9.
87. Burg, J., Measuring populations' vulnerabilities for famine and food security interventions: The case of Ethiopia's Chronic Vulnerability Index. *Disasters*, 2008. 32: p. 609-30.
88. Abdul Hamid, A.I., et al., COASTAL VULNERABILITY INDEX DEVELOPMENT: A REVIEW. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019. XLII-4/W16: p. 229-235.
89. Reckien, D., What is in an index? Construction method, data metric, and weighting scheme determine the outcome of composite social vulnerability indices in New York City. *Regional Environmental Change*, 2018. 18.
90. Solangaarachchi, D., A. Griffin, and M. Doherty, Social vulnerability in the context of bushfire risk at the urban-bush interface in Sydney: A case study of the Blue Mountains and Ku-ring-gai local council areas. *Natural Hazards*, 2012. 64.
91. Spielman, S., et al., Evaluating social vulnerability indicators: criteria and their application to the Social Vulnerability Index. *Natural Hazards*, 2020. 100.
92. Mwale, F., A. Adeloje, and L. Beevers, Quantifying vulnerability of rural communities to flooding in SSA: A contemporary disaster management perspective applied to the Lower Shire Valley, Malawi. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2015. 12.
93. Török, I., Qualitative Assessment of Social Vulnerability to Flood Hazards in Romania. *Sustainability*, 2018. 10: p. 3780.
94. de Sherbinin, A. and G. Bardy, Social vulnerability to floods in two coastal megacities: New York City and Mumbai. *Vienna Yearbook of Population Research*, 2016. 1: p. 131-165.
95. Abson, D., A. Dougill, and L. Stringer, Using Principal Component Analysis for information-rich socio-ecological vulnerability mapping in Southern Africa. *Applied Geography*, 2012. 35: p. 515–524.
96. Tran, L., R. O'Neill, and E. Smith, Spatial pattern of environmental vulnerability in the Mid-Atlantic region, USA. *Applied Geography*, 2010. 30: p. 191-202.
97. Yoon, D.K., Assessment of social vulnerability to natural disasters: A comparative study. *Natural Hazards*, 2012. 63.
98. Tate, E., Social vulnerability indices: A comparative assessment using uncertainty and sensitivity analysis. *Natural Hazards*, 2012. 63.
99. Lissner, T., et al., Towards sectoral and standardised vulnerability assessments: the example of heatwave impacts on human health. *Climatic Change*, 2011. 112: p. 1-22.

100. Mullick, M.R., A. Tanim, and S.M.S. Islam, Coastal vulnerability analysis of Bangladesh coast using fuzzy logic based geospatial techniques. *Ocean & Coastal Management*, 2019. 174: p. 154-169.
101. Tran, L., et al., Fuzzy Decision Analysis for Integrated Environmental Vulnerability Assessment of the Mid-Atlantic Region 1. *Environmental management*, 2002. 29: p. 845-59.
102. Mattsson, L.-G. and E. Jenelius, Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015. 81.
103. Husdal, J., Reliability/vulnerability versus costs/benefits. 2004.
104. Berdica, K., An introduction to road vulnerability: What has been done, is done and should be done. *Transport Policy*, 2002. 9: p. 117-127.
105. Taylor, M. and G. D'Este, Transport Network Vulnerability: a Method for Diagnosis of Critical Locations in Transport Infrastructure Systems. 2007. p. 9-30.
106. D'Andrea, A., S. Cafiso, and A. Condorelli, Methodological Considerations for the Evaluation of Seismic Risk on Road Network. *Pure and Applied Geophysics*, 2005. 162: p. 767-782.
107. Jenelius, E. and L.-G. Mattsson, Developing a methodology for road network vulnerability analysis. 2006.
108. Jenelius, E., L.-G. Mattsson, and T. Petersen, Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2006. 40: p. 537-560.
109. Varnes J.E. and IAEG, Landslide Hazard Zonation- a review of principles and practice. UNESCO 1984, Paris 63 pp.
110. ABR Autorità di Bacino Regionale, Piano Stralcio per l'assetto idrogeologico Regione Calabria. Delibera Consiglio Regionale n. 115 del 28 dicembre 2001.
111. Regione Calabria, Linee Guida per la redazione del Piano di Protezione Civile Comunale. Università della Calabria - Centro di competenza CAMILAB, Consorzio Interuniversitario per l'Idrologia e Protezione Civile Regione Calabria, 2019.
112. Caloiero, T., R. Coscarelli, and E. Ferrari, Analysis of Monthly Rainfall Trend in Calabria (Southern Italy) through the Application of Statistical and Graphical Techniques. Vol. 2. 2018. 629.
113. Caloiero, T., et al., Analysis of Dry Spells in Southern Italy (Calabria). *Water*, 2015. 7(6): p. 3009-3023.
114. Arpacal, C.M. Meteo: l'Estate 2019 in Calabria dai dati del Centro Multirischi Arpacal. Available from: <http://www.arpacal.it/index.php/arpacal/attivita/comunicazione/eventi-e-convegni/2497-meteo-l-estate-2019-in-calabria-dai-dati-del-centro-multirischi-arpacal>.
115. Petrucci, O., et al., The Vulnerability of People to Damaging Hydrogeological Events in the Calabria Region (Southern Italy). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017. 15: p. 48.
116. Maletta, R. and G. Mendicino, A methodological approach to assess the territorial vulnerability in terms of people and road characteristics. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 2020: p. 1-14.
117. Füssel, H.-M., Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environmental Change*, 2007. 17: p. 155-167.
118. Hinkel, J., "Indicators of vulnerability and adaptive capacity": Towards a clarification of the science-policy interface. *Global Environmental Change*, 2011. 21: p. 198-208.

119. Dwyer, A., et al., Quantifying Social Vulnerability: A methodology for identifying those at risk to natural hazards. Vol. 14. 2004.
120. Lein, J. and L. Abel, Hazard vulnerability assessment: How well does nature follow our rules? *Environmental Hazards*, 2010. 9: p. 147-166.
121. Hebb, A. and L. Mortsch, Floods: Mapping Vulnerability in the Upper Thames Watershed under a Changing Climate. 2007.
122. Flanagan, B., et al., A Social Vulnerability Index for Disaster Management. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 2011. 8.
123. Fekete, A., Spatial disaster vulnerability and risk assessments: Challenges in their quality and acceptance. *Natural Hazards*, 2011. 61.
124. Hotelling, H., Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, 1933. 24(6): p. 417-441.
125. Gupta, A., et al., Critical infrastructures and disaster risk reduction (in the context of Natural Hazards). 2013.
126. Jenelius, E., T. Petersen, and L.-G. Mattsson, Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2006. 40(7): p. 537-560.
127. Camargo, P. *AequilibraE*. 2018; Available from: <http://aequilibrae.com/>
<https://plugins.qgis.org/plugins/AequilibraE/>.
128. Burrough, P.A., Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. *Journal of Soil Science*, 1989. 40(3): p. 477-492.
129. Zadeh, L., Fuzzy Sets. 1965: *Information Control*. 1965;8:338–353. Elsevier.
130. Klir, G.J. and B. Yuan, *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1995. 13.
131. Raines, G.L., D.L. Sawatzky, and G.F. Bonham-Carter, Incorporating expert knowledge: New fuzzy logic tools in ArcGIS 10. 2010.
132. ISPRA, *Variazioni e tendenze degli estremi di temperatura e precipitazione in Italia*. 2013, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.
133. Chuvieco, E. and R. Congalton, Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. *Remote Sensing of Environment*, 1989. 29: p. 147-159.
134. BLASI C., et al., *Incendi e complessità ecosistemica. Dalla pianificazione forestale al recupero ambientale*. 2004: Palombi Editore, Roma. .
135. Cochrane, M.A. and W.F. Laurance, Synergisms among Fire, Land Use, and Climate Change in the Amazon. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2008. 37(7): p. 522-527, 6.
136. Eskandari, S., H.R. Pourghasemi, and J.P. Tiefenbacher, Relations of land cover, topography, and climate to fire occurrence in natural regions of Iran: Applying new data mining techniques for modeling and mapping fire danger. *Forest Ecology and Management*, 2020. 473.
137. Pourtaghi, Z.S., et al., Investigation of general indicators influencing on forest fire and its susceptibility modeling using different data mining techniques. *Ecological Indicators*, 2016. 64: p. 72-84.
138. Mather, J.R., *Climatology: Fundamentals and Applications*. 1974: McGraw Hill, USA, p. 113-131.
139. Sun, X., J. Li, and A. Zhou, Evaluation and comparison of methods for calculating thornthwaite moisture index. *Australian Geomechanics Journal*, 2017. 52: p. 61-75.

140. Senatore, A., et al., Regional-Scale Modeling of Reference Evapotranspiration: Intercomparison of Two Simplified Temperature- and Radiation-Based Approaches. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2015. 141: p. 04015022.
141. Martínez, J., C. Vega-Garcia, and E. Chuvieco, Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of Environmental Management*, 2009. 90(2): p. 1241-1252.
142. Vega-Garcia, C., et al., A Logit Model for Predicting the Daily Occurrence of Human Caused Forest Fires. *International Journal of Wildland Fire*, 1995. 5: p. 101-111.
143. Yang, J., et al., Spatial Patterns of Modern Period Human-Caused Fire Occurrence in the Missouri Ozark Highlands. *Forest Science -Washington-*, 2007. 53.
144. Arndt, N., et al., Modeling human-caused forest fire ignition for assessing forest fire danger in Austria. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 2013. 6: p. 315-325.
145. Pradhan, B., Manifestation of an advanced fuzzy logic model coupled with Geo-information techniques to landslide susceptibility mapping and their comparison with logistic regression modelling. *Environmental and Ecological Statistics*, 2011. 18: p. 471-493.
146. Pourghasemi, H.R., M. Beheshtirad, and B. Pradhan, A comparative assessment of prediction capabilities of modified analytical hierarchy process (M-AHP) and Mamdani fuzzy logic models using Netcad-GIS for forest fire susceptibility mapping. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2016. 7(2): p. 861-885.
147. Feizizadeh, B., et al., A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. *Computers & geosciences*, 2014. 73: p. 208-221.
148. Saaty, T.L., *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, 287, 1980.
149. Saaty, T.L., *Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process*. *Management Science*, 1986. 32(7): p. 841-855.
150. Marchetti, M., R. Bertani, and I. Scatarzi, Zonizzazione del territorio italiano in funzione del rischio di incendio. *Incendi e complessità eco sistemica. Dalla pianificazione forestale al recupero ambientale*, 2007: p. 121-132.
151. Ariapour, A. and A.R.M. Shariff. *Rangeland Fire Risk Zonation using Remote Sensing and Geographical Information System Technologies in Boroujerd Rangelands, Lorestan Province, Iran*. 2014.
152. Setiawan, I., et al., GIS-grid-based and multi-criteria analysis for identifying and mapping peat swamp forest fire hazard in Pahang, Malaysia. *Disaster Prevention and Management*, 2004. 13: p. 379-386.
153. Jaiswal, R., et al., Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2002. 4: p. 1-10.
154. Swets, J.A., *Measuring the Accuracy of Diagnostic Systems*. Science (New York, N.Y.), 1988. 240: p. 1285-93.
155. Montgomery, D. and W. Dietrich, SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. 1998: National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement (NCASI), Technical Report, 29 p.
156. Montgomery, D. and W. Dietrich, A Physically Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding. *Water Resources Research - WATER RESOUR RES*, 1994. 30: p. 1153-1172.
157. Mendicino, G., *Idrologia delle perdite. Circolazione delle acque nel suolo: teoria e calcolo*. 1994: Pàtron.

158. Midgley, S., R.A.G. Davies, and S. Chesterman, Climate risk and vulnerability mapping in Southern Africa: status Quo (2008) and Future (2050). 2011.