



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI NAPOLI FEDERICO II

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI
DOTTORATO DI RICERCA XXIX CICLO
Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse

**CONTRIBUTO ALLO STUDIO DELLA
PERICOLOSITÀ ALLUVIONALE NEI BACINI
TORRENTIZI DELLA REGIONE CAMPANIA**

Carmela Vennari

Tutor: Prof.ssa Nicoletta Santangelo
Co-Tutors: Prof. Antonio Santo
Prof. Mario Parise
Dr. Brian McArdell

Sommario

RIASSUNTO.....	3
ABSTRACT.....	5
Capitolo 1 INTRODUZIONE.....	7
1.1 Inquadramento della problematica di studio	7
1.2 Obiettivi.....	9
1.3 Metodi.....	10
1.4 Area di studio	12
Capitolo 2 STATO DELL'ARTE	14
2.1 I flash floods	14
2.1.1 L'innesco dei fenomeni alluvionali.....	16
2.2 Processi di erosione e trasporto	18
2.3 I flash floods e le conoidi alluvionali	21
2.3 Modellazione dei fenomeni alluvionali torrentizi	24
Capitolo 3 IL DATABASE	26
3.1 Scopo del database	26
3.2 Database esistenti sui fenomeni alluvionali torrentizi.....	26
3.3 Fonti d'informazione utilizzate	29
3.3.1 Vantaggi e svantaggi dell'uso delle fonti storiche.....	30
3.4 Metodo di selezione degli eventi.....	31
3.5 Informazioni raccolte	32
3.5.1 Caratterizzazione geologica e geomorfologia dei bacini analizzati	35
Capitolo 4 ANALISI DEI DATI COLLEZIONATI	37
4.1 Distribuzione temporale dei fenomeni	37
4.2 Distribuzione spaziale dei fenomeni	39
4.3 Analisi dei dati pluviometrici.....	42
4.4 Analisi dei danni	45
Capitolo 5 MODELLAZIONE DEI FENOMENI ALLUVIONALI	48
Modellazione della deposizione nelle aree di conoide.....	48
5.2 Il modello RAMMS	49
5.3 Stima dei parametri per la simulazione	51
5.4 Inquadramento dei bacini selezionati.....	53
Capitolo 6 APPLICAZIONE DI RAMMS PER LA SIMULAZIONE DI SCENARI FUTURI	58
6.1 Casi di studi analizzati	58
6.1.1 Il Bacino di Quadrelle (AV)	58
6.1.1 I bacini di Castellammare di Stabia (NA): Cannetiello e San Pietro	60

Capitolo 7 VALIDAZIONE DEGLI EVENTI E SELEZIONE DEI BEST TEST	65
7.1 Metodi per la validazione dei test	65
7.2 Analisi quantitativa e di sensitività dei risultati ottenuti	67
7.2.1 Validazione area di deposizione.....	67
7.2.2 Validazione altezza dei depositi	68
7.3 Simulazione degli eventi nei bacini di Buccino (SA).....	69
7.3.1 Il bacino Matrura.....	71
7.3.2 Il bacino Vadursi.....	75
7.4 Simulazione degli eventi nei bacini di Paupisi (BN)	78
7.4.1 Paupisi_bacino 13_14	79
7.4.2 Paupisi_bacino 15	81
7.4.3 Paupisi_bacino 16	82
7.4.4 Confronto tra i best test ed dati di campagna	85
8. CONCLUSIONI.....	86
Bibliografia	90
Appendice	105

Questo progetto di Dottorato si è concentrato sui fenomeni di flash floods della Regione Campania e sullo studio della loro pericolosità. I fenomeni alluvionali torrentizi s’innescano in seguito a precipitazioni brevi ed intense, concentrate nello spazio, ed interessano bacini idrografici caratterizzati da dimensioni limitate da pochi km² a poche centinaia di km² (Borga et al., 2007), elevate pendenze, basso tempo di corrivazione e portate a regime stagionale (Merheb et al., 2016). I bacini con tali caratteristiche in Campania hanno recapito sia in aree pedemontane che direttamente in mare. Le aree di deposizione di questi bacini sono spesso densamente abitate, per cui la popolazione ivi residente è esposta ad un rischio elevato. Attraverso un’analisi critica della letteratura esistente è stato costruito un database dedicato ai flash floods che hanno interessato la regione. Sono stati censiti 474 eventi, dal 1540 al 2015. Per ogni evento sono note le informazioni di occorrenza spaziale e temporale ed i danni prodotti. Inoltre, è stata inserita una classe di accuratezza relativa alle informazioni temporali, che consente in maniera immediata di comprendere il grado di conoscenza sul fattore tempo. Sono stati collezionati anche i dati pluviometrici relativi all’evento innescante qualora disponibili. I bacini interessati dagli eventi sono stati suddivisi in 5 tipologie, al fine di distinguere la tipologia di materiale presente nel bacino, e di ipotizzare la tipologia di trasporto prevalente. La classificazione è stata fatta considerando il substrato del bacino (carbonatico o vulcanico), la presenza o meno di coperture detritiche e la tipologia delle aree di deposito (conoide alluvionale o delta costiero). Le 5 classi sono le seguenti: bacino carbonatico con copertura piroclastica, bacino carbonatico senza copertura piroclastica, bacino carbonatico con copertura piroclastica e recapito a mare, bacino vulcanico, bacino vulcanico con recapito a mare.

Sulla base delle dimensioni del bacino interessato dall’evento invece, sono state definite 3 classi: minori di 3 km²; comprese tra 3 km² e 10 km²; maggiori di 10 km² ma inferiori a 60 km². Il database ha consentito di eseguire un’analisi sul dove e quando gli eventi di flash floods si sono verificati in Campania, nonché una stima dei danni prodotti.

Sulla base dei dati a disposizione è stata inserita l’informazione relativa alla tipologia principale di flusso: *water flood* o *debris flow*. Tale distinzione è stata fatta principalmente su base morfometrica (Scorpio, 2011), nei rimanenti casi l’informazione è stata estratta dalla fonte d’informazione utilizzata solo nei casi in cui era chiara e precisa.

Tra i numerosi eventi censiti sono stati selezionati diversi bacini per l'applicazione del software RAMMS (RAPid Mass MovementS- Debris Flow runout model) che consente di simulare i deflussi nelle aree di conoide. Il software è stato utilizzato per simulare scenari d'evento nei bacini di Quadrelle (AV) e Castellammare di Stabia (NA), mentre per i bacini di Paupisi (BN) e Buccino (SA) è stata eseguita una back analysis perché si avevano a disposizione i dati di campo relativi all'estensione e all'altezza dei depositi messi in posto durante gli eventi occorsi in queste aree, rispettivamente nel 2015 e nel 2011. L'attenzione è stata concentrata sulla deposizione nelle aree di conoide urbanizzate. I risultati ottenuti sono stati analizzati in maniera oggettiva, attraverso l'applicazione dell'analisi quantitativa al fine di utilizzare i parametri corrispondenti ai test migliori a scopo previsionale in bacini con caratteristiche geomorfologiche simili.

ABSTRACT

The following PhD project concerns with flash floods in the Campania region and their hazard analysis. Flash floods generally occur during and after heavy rainstorms, concentrated in space and time. They occur in small catchments characterised by limited dimension of a few to a few hundred square kilometres (Borga et al., 2007) , with response times typically being a few hours or less, limited water resources, dry summers, and high-intensity rainfall events (Merheb et al., 2016).

As the outlet zones of these catchments (consisting mainly of alluvial fans or fan deltas) are highly urbanised in Campania, the population living in the delivery areas is exposed to high risk. By mean of a critical analysis of existing literature a database concerning flash floods events in Campania was built. It consists of 476 events from 1540 to 2015. Since this study is the first step of a longer project to perform an hazard analysis, information about time, site of occurrence and damage is known for all events. Five degrees of temporal accuracy were used to classify the different levels of knowledge for time occurrence of the events. When information of triggering rainfall event were available they were collected. In order to discern the available different bed and bank materials which the flow could entrap and transport down-valley, five catchment types were defined. The classification is based on the following parameters: bedrock of the catchment (carbonate/volcanic); presence/absence of detrital cover and, if present, its origin (weathered bedrock, soil, pyroclastic cover, etc.); type of outlet zone (alluvial fan or fan delta in coastal area). Thus the collected events were grouped into the following five classes: carbonate catchment with pyroclastic cover; carbonate catchment without pyroclastic cover; carbonate catchment with pyroclastic cover and outlet to the sea; volcanic catchment; volcanic catchment with outlet to the sea. On the base of catchment size three classes were defined: less than 3 km²; between 3 km² and 10 km²; between 10 km² and 60 km². The collected events allowed to analyse temporal and spatial distribution of flash floods events in Campania region, and damage intensity.

Several case studies have been selected from the database, aimed at applying RAMMS model (Rapid Mass MovementS- Debris Flow runout model) that deliver accurate prediction of flow heights, velocities and run out distance of debris flows in alluvial fan area.

The tool was applied to simulate future similar scenarios in different triggering conditions in Quadrelle (AV) and Castellammare di Stabia (NA) catchments. In Paupisi (BN) and Buccino (SA) catchments was used to back-analyse the documented events since field data concerning

deposition area and deposition height were available, they were collected during events occurred respectively in 2015 and 2011. The activities were to focus on urbanized alluvial fan areas. The obtained results were analysed in an objective way, by means of a quantitative analysis in order to use RAMMS applications on catchments with comparable geomorphological features, to evaluate future scenarios.

Capitolo 1 INTRODUZIONE

1.1 Inquadramento della problematica di studio

L'Italia è fortemente esposta a diversi rischi idrogeologici che causano ogni anno numerosi danni. Per rischio idrogeologico s'intende l'effetto al suolo dei fenomeni naturali in cui predomina l'elemento "acqua". L'articolo 54 del D.Lgs. 152/06 definisce il dissesto idrogeologico come *"la condizione che caratterizza aree ove processi naturali o antropici, relativi alla dinamica dei corpi idrici, del suolo o dei versanti, determinano condizioni di rischio sul territorio"*. I fenomeni di dissesto si manifestano quindi come frane, fenomeni alluvionali torrentizi ed esondazioni.

Frane ed alluvioni sono senza dubbio i fenomeni più frequenti in Italia, a causa della particolare conformazione orografica della penisola, caratterizzata in prevalenza da un territorio montuoso-collinare.

L'analisi della frequenza di frane e alluvioni, presenti all'interno di un catalogo storico, dal 1850 al 2008 (Salvati et al., 2010) ha evidenziato come il rischio da frane sia maggiore in Trentino e Campania, mentre quello da alluvione si concentri principalmente in Piemonte e Sicilia. L'analisi delle fonti storiche non sempre consente un'esatta ricostruzione della frequenza, poiché a causa di descrizioni sommarie o dell'uso di una terminologia non specifica (Guzzetti & Tonelli, 2004), non è facile distinguere i fenomeni tra loro, creando di conseguenza un'elevata incertezza nella ricostruzione degli eventi.

Questo lavoro di tesi si focalizza sui fenomeni alluvionali torrentizi.

I fenomeni alluvionali sono legati ad esondazioni di acque di fiumi o di torrenti che si verificano in concomitanza di eventi di pioggia molto intensi. I fenomeni alluvionali possono verificarsi nella pianura alluvionale o in bacini torrentizi, possono durare pochi minuti o alcuni giorni, in funzione delle dimensioni del bacino idrografico. Le alluvioni che si verificano in pianura hanno generalmente durate elevate, perché il tratto pianeggiante rappresenta la parte terminale del bacino. I bacini interessati sono di grosse dimensioni e nella maggior parte dei casi sono monitorati, per cui è possibile e stimare l'arrivo dell'evento di piena. Ciò consente di fronteggiare al meglio le operazioni di allertamento ed emergenza. Le alluvioni che si verificano in pianura interessano corsi d'acqua caratterizzati da basse pendenze, per cui la frazione solida che può essere trasportata fino al tratto in pianura è presente in basse percentuali. La popolazione che vive allo stesso livello del corso d'acqua è esposta a rischio inondazione. Si tratta di un rischio principalmente idraulico dovuto al superamento dei livelli idrometrici critici del corso d'acqua. I

fenomeni alluvionali che si verificano in pianura riscontrano un interesse maggiore rispetto a quelli che riguardano i bacini torrentizi, poiché interessano ampie aree ad uso abitativo o destinate all'agricoltura, e quindi provocano danni economicamente maggiori.

I fenomeni alluvionali, oltre ad interessare le zone di pianura, si concentrano in maniera significativa nei bacini idrografici a regime torrentizio che rappresentano una delle unità geomorfologiche più diffuse sul territorio nazionale. In ambito internazionale vengono identificati come *flash floods*, alluvioni causati da una pioggia di elevata intensità e breve durata, che interessano i bacini di estensione limitata (da pochi km² a poche centinaia di km²), (Borga et al., 2007). Trattandosi di bacini di estensione limitata il tempo di corrivazione è breve, per cui si genera un aumento della portata in un brevissimo lasso di tempo. Il materiale presente sulle sponde e nell'alveo può essere preso in carico dalla corrente e trasportato a fondo valle; in base alla proporzione di sedimenti ed acqua, pertanto, si determinano scenari di rischio differenti.

Sono eventi di elevata pericolosità perché veloci ed improvvisi, e che possono innescarsi con poco o nessun preavviso. A differenza delle alluvioni in pianura si ha deposizione di materiale detritico anche di notevoli dimensioni, in quanto quando il corso d'acqua sfocia nella zona pianeggiante si verifica la sedimentazione del carico solido preso in carico dalla corrente; ne consegue che la fascia pedemontana diviene l'ambiente a più elevato rischio.

I fenomeni alluvionali nei bacini torrentizi includono l'occorrenza di colate detritiche che nel tempo contribuiscono alla formazione di conoidi alluvionali. La maggior parte dei danni si verifica nella zone di deposizione caratterizzate da pendenze minori, ove i caratteri morfologici hanno favorito l'urbanizzazione nel corso dei secoli.

I *flash floods* sono molto frequenti in Europa (Montz & Gruntfest, 2002; Gaume et al., 2009, 2014; Marchi et al., 2010) ed anche in Italia, dove in particolare sono ben studiati nel settore alpino (Crosta & Frattini, 2004; Sosio et al., 2007; Carrara et al., 2008; Marchi et al., 2010, 2012; Simoni et al., 2011; Arattano et al., 2012, 2015; Berti et al. 2014; Blahut et al., 2014; Tiranti et al., 2014); nell'area appenninica, a causa della minore frequenza, essi sono stati oggetto di minore attenzione (Sorriso Valvo et al., 1998; Zanchetta et al., 2004a; Santo et al., 2002, 2012, 2015, 2017; Santangelo et al., 2006, 2011, 2012; Cascini et al., 2008; Alessio et al., 2013; Antronico et al., 2015a, b).

Il presente studio si concentra sui bacini torrentizi della regione Campania, nella quale negli anni ultimi si sono registrati numerosi danni a causa di eventi di *flash floods* (Santo et al., 2002, 2012, 2015; Calcaterra et al., 2000, 2003; Del Prete & Mele, 2006; Santangelo et al., 2006, 2011, 2012; Chirico et al., 2012; Alessio et al., 2013). Ultimi in ordine di tempo sono gli eventi che hanno

interessato il beneventano nell'Ottobre 2015, durante i quali si sono verificati non solo fenomeni di inondazione lungo le sponde del Fiume Calore, ma anche fenomeni alluvionali torrentizi che hanno interessato soprattutto i bacini idrografici localizzati tra gli abitati di Paupisi e Solopaca (BN) (Santo et al., 2017). Ciò ha evidenziato ancora una volta l'elevato rischio a cui è esposta la popolazione residente nelle aree di recapito dei bacini torrentizi.

Nel contesto dell'Appennino meridionale i bacini torrentizi hanno recapito in fasce pedemontane costituite da conoidi, spesso coalescenti. Queste aree, considerate sicure per la minore probabilità di essere interessate da fenomeni di inondazione rispetto alle zone vallive, sono state purtroppo intensamente urbanizzate negli ultimi anni. L'urbanizzazione è derivata, oltre che da motivi climatici, anche da scopi strategici, in quanto in passato tale localizzazione degli abitati forniva un maggiore controllo del territorio circostante, al fine di organizzare la difesa dai possibili attacchi nemici. In Campania esistono poi anche numerosi bacini torrentizi con recapito direttamente a mare, che sono estremamente suscettibili ad eventi di *flash floods* a causa delle elevate pendenze e dei ridotti tempi di corrivazione che li caratterizzano.

1.2 Obiettivi

L'obiettivo di questo studio è contribuire alla valutazione della pericolosità dei fenomeni alluvionali torrentizi nella regione Campania. La pericolosità si definisce come la probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo di determinata intensità, si verifichi in un dato tempo ed in una data area (Varnes, 1984).

Lo studio della pericolosità serve in fase progettuale, ma anche in fase di allerta. I sistemi di allertamento ed evacuazione dipenderanno molto da quanto il processo è conosciuto in termini di pericolosità. La definizione di pericolosità comprende i concetti di localizzazione, tempo e grandezza. Per effettuare un'analisi probabilistica della pericolosità si deve quindi prevedere "dove" il fenomeno si verificherà, "quando" o con quale frequenza e "quanto grande" sarà (Guzzetti et al., 2005).

È quindi necessario saper rispondere ai seguenti quesiti (Stoffel et al., 2013):

Che tipi di processi sono attesi? Quali saranno le loro dimensioni (magnitudo)? Quanto lontano potranno muoversi (zone colpite)? Con quale frequenza avverranno?

Le risposte possono essere date utilizzando differenti approcci (Zimmermann et al., 2013):

- Approccio storico: basato su testimonianze orali o scritte di eventi avvenuti in passato, ma in genere la memoria umana si ferma a pochi anni indietro;
- Approccio geomorfologico: basato sull'interpretazione delle forme del paesaggio, individuazione di forme relitte per poter classificare cronologicamente le strutture morfologiche. Si può inoltre fare un'analisi approfondita e specifica sul bacino per identificare la provenienza dei sedimenti ed i fattori d'innesco.
- Approccio modellistico: negli ultimi anni sono stati sviluppati numerosi modelli statistici (Rickenmann & Zimmermann, 1993) e modelli empirici analitici (es. FLOW2D o RAMMS).

Il contributo di questa tesi alla stima della pericolosità è dato dalla definizione del dove e quando gli eventi di *flash flood* si sono verificati. E' stato utilizzato principalmente un approccio storico-scientifico per la costruzione di un catalogo di eventi di *flash floods* che ha consentito di effettuare un'analisi spazio-temporale dei fenomeni censiti, nonché una stima della loro intensità attraverso l'analisi dei danni prodotti. Attraverso l'analisi dei dati contenuti nel database è possibile individuare le aree più suscettibili, il che potrà essere un utile strumento non solo nella pianificazione territoriale, per l'identificazione delle aree in cui adottare opere di mitigazione, ma anche in caso di allerta o emergenza nelle operazioni di protezione civile, per segnalare le aree da monitorare.

L'approccio modellistico, mediante l'utilizzo del software RAMMS, ha consentito poi di eseguire uno studio di dettaglio sulla propagazione dei flussi in aree di conoide urbanizzate.

La Campania è una delle regioni d'Italia a più alto rischio geo-idrologico ed il verificarsi con maggiore frequenza di fenomeni di *flash floods*, ci obbliga a definire la pericolosità di tali fenomeni per una corretta mitigazione del rischio e pianificazione territoriale.

1.3 Metodi

Per l'area di studio non esiste un catalogo dati dedicato agli eventi di *flash floods*, ma sono stati eseguiti soltanto studi di dettaglio a carattere regionale e sub-regionale (Santo et al., 2017, 2015, 2012; Violante et al., 2017; Alessio et al., 2013; Di Crescenzo et al., 2013; Porfido et al., 2013; Chirico et al., 2012; Santangelo et al., 2012, 2011; Scorpio, 2011; Del Prete & Mele, 2006; Esposito et al., 2004). Considerando come l'uomo facilmente dimentica gli insegnamenti del passato, è importante analizzare con quale frequenza, dove, e con quale intensità i fenomeni alluvionali si sono verificati nel passato. Dunque, partendo da queste considerazioni, la prima parte del lavoro ha riguardato la raccolta e selezione di informazioni al fine di creare un catalogo sui fenomeni

alluvionali torrentizi e le colate detritiche, avvenuti nella regione Campania e che hanno interessato aree di conoide urbanizzate.

Il database contiene circa 500 eventi di *flash flood* di cui è nota la localizzazione spaziale e temporale. Le informazioni raccolte hanno permesso di analizzare la distribuzione spaziale a livello regionale e nei centri abitati. Sono state consultate pubblicazioni su riviste scientifiche nazionali ed internazionali, atti di convegno, monografie e tesi di dottorato, fonti storiche nonché testate giornalistiche nazionali e regionali per i fenomeni più recenti.

Particolare attenzione è stata rivolta all'accuratezza temporale delle informazioni raccolte, nonché ai danni prodotti in termini di vittime e alle infrastrutture. I dati di pioggia orari o giornalieri sono stati esaminati quando disponibili.

Sulla base delle informazioni raccolte sono stati stimati, inoltre, i tempi medi di ricorrenza nei centri abitati maggiormente colpiti.

La seconda parte del lavoro ha riguardato l'applicazione di un modello per la previsione di aree potenzialmente inondabili da fenomeni alluvionali torrentizi, ai fini della valutazione della pericolosità. Si è scelto di utilizzare RAMMS (*RApid Mass MovementS*), un software sviluppato presso l'Istituto Federale di Ricerca (WSL) di Birmensdorf e l'Istituto Federale per lo Studio della Neve e delle Valanghe (SLF) di Davos (Svizzera) (WSL/SLF, 2010). Presso l'istituto Federale di Ricerca svizzera di Birmensdorf la scrivente ha trascorso un periodo di formazione di due mesi, per poter apprendere al meglio l'uso e le potenzialità del software.

Sulla base delle disponibilità dei dati di dettaglio, derivati da studi specifici su aree interessate da eventi di *flash floods*, sono state selezionate delle aree test per l'applicazione del software RAMMS che consente di simulare la propagazione dell'evento alluvionale. Ciò ha permesso di effettuare una back-analysis degli eventi selezionati; inoltre, la disponibilità dei dati di campo relativi al volume di deposizione e all'altezza dei depositi ha permesso di confrontare i dati reali con quelli simulati. Successivamente, sono stati calcolati diversi indici di accuratezza statistica derivanti dalla tabella di contingenza (Begueria, 2006), che consente in maniera oggettiva di valutare il risultato migliore.

Il software è stato utilizzato non solo per eseguire una back-analysis, ma anche a scopo previsionale, ipotizzando diverse portate di piena, per valutare l'applicabilità dello stesso al fine della redazione di carte di pericolosità.

1.4 Area di studio

La regione Campania è l'area d'interesse del presente lavoro di tesi, sede di numerosi eventi di *flash floods* che negli ultimi decenni hanno causato numerosi danni diretti (perdita di vite umane, distruzione di case, linee ferroviarie, campi agricoli, strade) ed indiretti (problemi alle vie di comunicazione ed alle infrastrutture a rete; Calcaterra et al., 2000, 2003; Santo et al., 2002, 2012, 2015, 2017; Del Prete & Mele, 2006; Santangelo et al., 2006, 2011, 2012; Chirico et al., 2012; Alessio et al., 2013).

Il sistema montuoso principale della regione si estende in direzione NW-SE per circa 200 km ed è costituito principalmente da rocce carbonatiche Mesozoiche (Ascione et al., 2008). Nel dettaglio, i principali rilievi montuosi sono: i Monti del Matese, i Monti del Taburno, i Monti di Caserta, i Monti Picentini e i Monti della Maddalena.

Il settore occidentale della Catena è delimitato a ovest da profondi graben originatisi nella fase tettonica estensionale Plio-Quaternaria, riempiti da successioni marine/transizionali, ed ora occupati da ampie pianure costiere (Ascione et al., 2008). L'attività vulcanica del tardo Quaternario nella pianura costiera ha originato i complessi vulcanici del Somma-Vesuvio e dei Campi Flegrei (Romano et al., 1994). Le eruzioni vulcaniche esplosive hanno prodotto ceneri e prodotti piroclastici che sono stati distribuiti, secondo le differenti orientazioni degli assi di dispersione, nell'area circostante (De Vita & Nappi, 2013).

Da un punto di vista strutturale, la Catena Appenninica, è un segmento del sistema alpino circum-mediterraneo, risultato della tettonica di compressione attiva dal Miocene al Pliocene inferiore (Mostardini & Merlini, 1986). Dall'Oligocene superiore fino al Miocene medio, l'evoluzione dell'Appennino è correlata alla convergenza tra la placca europea e quella africano-adriatica, mentre a partire dal Tortonian superiore fino al Quaternario la propagazione dei *thrusts* nella catena e l'apertura del bacino tirrenico sono stati controllati dal roll-back della litosfera dell'avampaese in subduzione (Bonardi et al., 2009).

L'idrografia della regione Campania è caratterizzata da pochi ma importanti corsi d'acqua: il Volturno, lungo 170 km che si colloca nel settore nord della regione, ed il Sele (65 km di lunghezza) che occupa la parte meridionale. Altri corsi d'acqua importanti sono il Tanagro ed il Calore Lucano, affluenti del Sele, il Sarno, l'Alento, il Busento, il Garigliano, il Mingardo, il Picentino, il Lambro, il Tammaro. Bacini idrografici di dimensioni ridotte caratterizzano i rilievi montuosi Campani: si tratta di bacini con estensione inferiore ai 10 km², caratterizzati da bassi tempi di corrivazione (Scorpio et al., 2016), fattori predisponenti al verificarsi di fenomeni di *flash floods*.

La regione ha un clima temperato, classe C della classificazione climatica di Köppen -Geiger, con la temperatura media del mese più freddo compresa tra 18°C e -3°C, senza copertura nevosa regolare (Peel et al., 2007). La maggior parte dei comuni ricade nella classe Csa della classificazione Köppen-Geiger (<https://en.climate-data.org/region/432/>), il che indica un clima mediterraneo con estati calde e secche, temperatura media del mese più caldo superiore a 22°C ed inverni miti e piovosi.

Nelle aree più interne il clima è invece temperato senza la stagione secca (classe Cf), tipico delle aree appenniniche, con inverni molto freddi ed estati calde; la precipitazione è distribuita uniformemente durante tutto l'anno e raggiunge il valore annuo massimo di 2000 mm (Longobardi et al., 2016).

Sulla base dei dati ISTAT la Campania è la regione con la più alta densità abitativa d'Italia con oltre 400 abitanti per Km² (http://noi-italia2015.istat.it/index.php?id=7&user_100ind_pi1%5Bid_pagina%5D=169&P=1); essa è inoltre meta di un flusso turistico importante e costante durante tutto l'anno grazie alla presenza di località d'importanza mondiale. Numerosi centri abitati si sono sviluppati nelle aree pedemontane perchè considerate più sicure delle zone vallive per la bassa probabilità di essere interessate da fenomeni di inondazione (Santangelo et al., 2012). Questi centri sorgono su conoidi attivi alimentati da corsi d'acqua a regime torrentizio, alle pendici di massicci calcareo-dolomitici di altezze variabili tra i 1000 e 2000 m s.l.m. In molti casi gli alvei naturali ivi presenti sono stati modificati oppure convertiti in alvei-strada, divenendo quindi aree altamente pericolose.

In Campania bisogna considerare, inoltre, che i numerosi turisti che giornalmente affollano le località costiere sono anch'essi esposti a questa tipologia di rischio, dato che numerosi bacini torrentizi con recapito a mare sono interessati da fenomeni alluvionali, a causa delle elevate pendenze e dei ridotti tempi di corrivazione che li caratterizzano.

Nella letteratura scientifica internazionale il termine flash flood sta ad indicare una piena improvvisa causata da una pioggia di elevata intensità e breve durata che interessa un bacino torrentizio con precise caratteristiche: estensione limitata, da pochi km² a poche centinaia di km² (Borga et al., 2007), elevate pendenze e basso tempo di corrivazione. A differenza delle alluvioni che avvengono in contesti di pianura, caratterizzate generalmente da fenomeni di esondazione, le alluvioni torrentizie spesso sono caratterizzate da un elevato trasporto solido a cui possono essere associati intensi fenomeni di erosione e trasporto, che si verificano sia nelle zone limitrofe all'alveo principale che nelle zone di recapito. Per tale motivo questi eventi possono causare ingenti danni all'uomo, anche in termini di perdite di vite umane.

I fenomeni alluvionali torrentizi si sviluppano in un intervallo spazio-temporale che i convenzionali sistemi di monitoraggio di pioggia, portata e carico dei sedimenti non riescono a cogliere. Di conseguenza i processi atmosferici, idrologici e geomorfologici che li controllano non sono completamente compresi, tanto da rendere difficile l'allertamento e la gestione del rischio (Borga et al., 2014). Da un punto di vista idrologico Merheb (2016) definisce i bacini in cui si verificano *small Mediterranean catchments* (SMCs) in quanto hanno limitate risorse idriche, estati siccitose e sono interessati da eventi pluviometrici di elevata intensità. In ambiente mediterraneo l'innescò di tali fenomeni è caratterizzato da un'elevata variabilità annuale delle precipitazioni, il clima ne influenza la stagionalità nonché le caratteristiche dell'evento pluviometrico innescante. Indirettamente dal clima dipendono la formazione e l'erosione dei suoli e dunque le caratteristiche geomorfologiche del bacino (Marchi et al., 2010). La fisiografia gioca anch'essa un ruolo rilevante sia per l'orografia che incrementa l'effetto delle precipitazioni, che per la topografia in quanto le elevate pendenze favoriscono il rapido sviluppo del flusso (Costa, 1987; O'Connor & Costa, 2004, Marchi et al., 2010). Dall'analisi dei dati idrologici di 60 bacini siti tra la Spagna ed il Mar Nero è stato verificato che il tempo di risposta del bacino è breve, in genere meno di 6 ore (Marchi et al., 2010).

Le evidenze legate all'incremento della temperatura globale, l'aumento di precipitazioni brevi e di elevata intensità a scala regionale e globale (Girogi et al., 2011, Trenberth, 2011) fanno presumere che nei prossimi anni vi sarà un aumento dei flash floods anche in termini di severità dei processi (Borga et al., 2014).

I flash floods si verificano in tutta Europa, Gaume et al. (2009) hanno costruito un database contenente informazioni su circa 500 eventi avvenuti tra il 1946 ed il 2007 nel continente europeo. In particolare sono state considerate sette regioni idrometeorologiche e l'analisi delle portate di picco ha evidenziato come nei bacini appartenenti all'area mediterranea (Italia, Francia e Spagna) si registrano portate maggiori rispetto alle regioni continentali (Romania, Austria e Slovacchia). In queste ultime zone la maggior parte degli eventi avviene in estate, mentre nell'area mediterranea si registra una maggiore frequenza in autunno. Il settore alpino dell'Italia si colloca in una posizione intermedia, con una proporzione dominante di eventi in autunno. Allo stesso modo, dallo studio condotto da Marchi et al. (2010) risulta che nell'area mediterranea ed alpina i fenomeni alluvionali torrentizi si verificano principalmente in autunno, mentre nelle aree interne (Austria, Romania e Slovacchia) per lo più in estate. Marchi et al. (2010) hanno, inoltre, evidenziato che l'energia del rilievo gioca un ruolo fondamentale in quanto l'effetto orografico promuove l'innescarsi di fenomeni temporaleschi e la topografia del rilievo favorisce la rapida concentrazione del flusso. Inoltre, è stata comprovata l'importanza delle condizioni di saturazione del suolo antecedenti l'evento sul coefficiente di *runoff*, parametro che potrebbe essere dunque utile ai fini della previsione dell'insorgere degli eventi. In Europa, tra il 1950 ed il 2005, i flash floods hanno causato numerose vittime, in media 52 per anno (Barredo, 2007) e dunque possono essere considerati tra le fenomenologie di maggiore rischio alluvionale. La maggior parte degli eventi censiti da Barredo (2007) sono avvenuti in Spagna, Francia e Italia.

Per quanto riguarda l'Italia i flash floods si concentrano soprattutto nell'arco alpino e lungo gli Appennini. Marchi & Borga (2012) hanno collezionato le informazioni idrometeorologiche e geografiche per un campione di 7 eventi di flash floods avvenuti nell'arco alpino tra il 1999 ed il 2006. L'analisi dei dati di pioggia, il bilancio idrico annuale unitamente alle condizioni climatiche hanno evidenziato come le caratteristiche dei bacini alpini si differenziano dagli altri bacini in Europa. Ulteriori e numerosi sono gli studi di dettaglio effettuati per l'ambiente alpino (Ana et al., 2015; Faccini et al., 2015; Nikolopoulos et al., 2015; D'agostino et al., 2010; Mao et al., 2009; Borga et al., 2007, Marchi & Pasuto, 1999).

Per la regione Campania sono stati eseguiti studi a carattere sub-regionale (Alessio et al., 2013, Porfido et al., 2013; Santangelo et al., 2012, Scorpio, 2011), e studi di dettaglio (Santo et al., 2017, 2015, 2012; Violante et al., 2017, Di Crescenzo et al., 2013; Chirico et al., 2012; Santangelo et al., 2011;; Del Prete & Mele, 2006, Esposito et al., 2004). In questa regione dell'Italia meridionale i bacini interessati da fenomeni alluvionali torrentizi presentano estensioni inferiori ai 10 km², un'elevata energia di rilievo, da centinaia di metri fino a 2000 m, acclività che generalmente

superano i 35°, e gradienti medi del canale principale superiori ai 15° (Alessio et al., 2013, Santangelo et al., 2012). Possono avere recapito a mare, ed in questo caso la zona di deposito sarà rappresentata da una conoide costiera, totalmente o in parte sommersa (Santo et al., 2012, Esposito et al., 2011) oppure in aree pedemontane. In questo ultimo caso la zona di deposito sarà generalmente rappresentata da una conoide ben definita (Santangelo et al., 2012).

2.1.1 L'innescò dei fenomeni alluvionali

L'elemento indispensabile che genera un fenomeno alluvionale torrentizio è una precipitazione di elevata intensità e breve durata. In ambiente Alpino il rapido scioglimento della neve, in contemporanea ad eventi pluviometrici rilevanti, aumenta l'effetto della precipitazione. Altri fattori piuttosto rari, come può essere la rottura di una diga, o effetti di *dam break* per frane che ostruiscono l'alveo, possono, indipendentemente dai fattori metereologici, provocare l'innescò dei fenomeni alluvionali (Kaitna et al., 2013).

L'alto potenziale di rischio dei flash floods è legato al breve intervallo di tempo che intercorre tra l'inizio della precipitazione efficace e l'inizio dei processi di presa in carico dei sedimenti ed il loro trasporto. Questo breve intervallo di tempo, conseguenza delle dimensioni limitate del bacino, non consente di allertare per tempo le popolazioni a rischio. L'intervallo di tempo che intercorre tra il baricentro della precipitazione e la portata di picco può essere calcolato in maniera empirica, dato il legame con le dimensioni del bacino, come proposto da Creutin (2013):

$$T_L = 0.08 A^{0.55} \text{ per } A \leq 350 \text{ km}^2; T_L = 0.0032 A^{1.10} \text{ per } A > 350 \text{ km}^2 \quad (2.1)$$

in cui T_L è l'intervallo di tempo in ore ed A l'area del bacino in km^2 .

Inoltre, i bacini interessati dagli eventi di flash floods sono caratterizzati da un tempo di corrivazione (T_c) basso. Il tempo di corrivazione è il tempo che impiega una goccia d'acqua a raggiungere la sezione di chiusura del bacino dal punto idraulicamente più lontano dello stesso (McCuen, 2009). Nel momento in cui la durata della precipitazione eguaglia o supera il tempo di corrivazione inizia l'evento di piena. È molto importante conoscere la risposta di un bacino ad un evento pluviometrico di una determinata intensità, ai fini progettuali ma anche in fase di allertamento e gestione delle emergenze. Il tempo di corrivazione dipende principalmente dalle caratteristiche morfologiche del bacino; minore sarà la sua estensione minore sarà il tempo di

corrivazione e maggiore la probabilità che la durata dell'evento pluviometrico lo superi. Esso assume rilevante importanza, inoltre, per la stima del tempo di ritorno di un evento (Grimaldi et al., 2010).

La stima del tempo di corrivazione è resa complessa dalla mancanza di dati diretti, gli studi eseguiti con i traccianti chimici e radioattivi sono limitati nello spazio e nel tempo (Grimaldi et al., 2010). Si ricorre dunque all'utilizzo di formule empiriche.

Tra i diversi metodi per la stima del tempo di corrivazione, i più diffusi in Italia sono (Grimaldi et al., 2010):

$$\text{Formula di Giandotti (per bacini con } A > 170 \text{ kmq)} \quad T_c = \frac{4\sqrt{A}+1.5 L}{0.8 \sqrt{H_m}} \quad (2.2)$$

$$\text{Formula di Tournon (per bacini con } 30 < A < 170 \text{ kmq)} \quad T_c = 0.396 \frac{L}{\sqrt{i}} \left(\frac{A}{L^2} \frac{\sqrt{i}}{\sqrt{Y}} \right)^{0.72} \quad (2.3)$$

$$\text{Formula di Pezzoli (per bacini di piccole dimensioni)} \quad T_c = 0.055 \frac{L}{\sqrt{i}} \quad (2.4)$$

$$\text{Ventura} \quad T_c = 0.1272 \frac{A}{\sqrt{i}} \quad (2.5)$$

$$\text{Puglisi} \quad T_c = 6 L^{\frac{2}{3}} (h_{max} - h_{min})^{-\frac{1}{3}} \quad (2.6)$$

$$\text{Pasini} \quad T_c = 0.108 \frac{(A*L)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{i}} \quad (2.7)$$

Con A area del bacino, L lunghezza dell'asta principale, H_m altezza media del bacino, i pendenza media asta principale, Y pendenza media del bacino, h_{max} quota massimo del bacino h_{min} quota alla sezione di chiusura.

Dall'analisi della letteratura risulta che per i bacini torrentizi campani, interessati da flash floods, il tempo di corrivazione varia tra 30 minuti ad alcune ore (Santo et al., 2002; Santangelo et al., 2012; Scorpio et al., 2016). In particolare per la maggior parte dei bacini che nell'Ottobre del 2015 sono stati interessati da fenomeni alluvionali torrentizi, tra gli abitati di Paupisi e Solopaca, il tempo di corrivazione stimato risulta inferiore ai 15 minuti (Santo et al., 2017).

Purtroppo però la disponibilità di dati pluviometrici per i bacini di piccole dimensioni è limitata dal fatto che questi non sono generalmente monitorati. I dati di pioggia unitamente alle informazioni relative al tempo di occorrenza dei fenomeni alluvionali torrentizi sono fondamentali ai fini della definizione di soglie pluviometriche d'innescio. I valori di soglia delle precipitazioni che generano colate detritiche vengono determinati analizzando statisticamente le condizioni pluviometriche degli eventi pregressi. Per le Alpi Svizzere è stata definita una soglia per le

precipitazioni correlate ai *debris flow* in funzione dell'intensità e della durata (Zimmermann et al., 1997). In Italia sono state definite soglie per l'innescò di frane e *debris flow* per le regioni Lombardia, Abruzzo e Calabria, sulla base delle condizioni pluviometriche che hanno caratterizzato gli eventi passati (Brunetti et al, 2015).si tratta di soglie empiriche di tipo I-D, intensità di pioggia, durata dell'evento pluviometrico, generalmente utilizzate per la previsione del verificarsi dei fenomeni franosi superficiali.

Norbiato et al. (2008) hanno definito propriamente per i flash floods delle soglie basate sul metodo FFG (*flash floods guidance*), che considera l'altezza di pioggia minima di una determinata durata necessaria a provocare un'alluvione nel bacino considerato. Quest'altezza di pioggia viene confrontata con i dati in tempo reale e le previsioni di pioggia, e se quest'ultimi risultano superiori allora vi è la probabilità che di verifichi un'alluvione. Il metodo è stato testato in 11 bacini del Nord Italia e della Francia, ed è risultato utile ai fini dell'applicabilità a diverse scale ed in diversi contesti.

2.2 Processi di erosione e trasporto

La tipologia di processo alluvionale che può attivarsi in un bacino torrentizio è strettamente legata ai materiali presenti nell'alveo e nel letto del torrente. La disponibilità di sedimenti dipende dai processi erosivi che sono notevolmente influenzati dall'uso del suolo e dallo spessore di quest'ultimo. In base a quest'ultima caratteristica l'azione dei processi erosionali potrà essere più o meno incisiva. L'azione silente e continuativa dei fenomeni erosivi produce risultati quantitativamente rilevanti ma non visivamente apprezzabili in quanto non impulsivi. Il quantitativo di materiale eroso può risultare nettamente superiore al materiale mobilizzato dalle frane di primo distacco in un bacino interessato da fenomeni alluvionali, come nel caso degli eventi verificatesi nel Messinese nel 2009 (Ferro, 2011). Naturalmente anche i fenomeni franosi, che possono innescarsi nel bacino contemporaneamente o precedentemente all'evento alluvionale, contribuiscono alla produzione di materiale detritico che può essere preso in carico dalla corrente.

La granulometria e il quantitativo di sedimenti che può essere trasportato dalla corrente, influenzerà la concentrazione della frazione solida nell'acqua e sulla base di ciò si innescheranno diversi tipi di flusso: *water flow*, *debris flow* ed *hyperconcentrated flow* (Pierson & Costa, 1987).

Pierson & Costa (1987) distinguono i diversi tipi di trasporto sulla base della reologia: nei *water flow* il carico di sedimenti è al massimo pari al 20% in volume e la densità è nel range 1,01-1,33

g/cm^3 . Negli *hyperconcentrated flow*, parallelamente alla percentuale in volume di sedimenti (20-47%), aumenta la densità ($1,3-1,8 \text{ g/cm}^3$), nei *debris flow* si raggiungono valori di $1,8-2,3 \text{ g/cm}^3$ di densità ed un percentuale di sedimenti può raggiungere anche il 90 % in peso (Costa, 1988), 47-77 % in volume. I *water flood* si comportano come fluidi newtoniani, con resistenza al taglio pari a zero, anche se nella realtà, per la seppur minima presenza di sedimenti la resistenza al taglio non è nulla, ma viene valutata minore di 10 N/m^2 (Costa, 1988)

Negli *hyperconcentrated flow* il flusso ha comportamento non-newtoniano, la resistenza al taglio aumenta, si raggiungono valori di $10-40 \text{ N/m}^2$ (Costa, 1988). Si parla di *hyperconcentrated flow* quando il quantitativo di sabbie supera limi ed argille (Pierson, 2005), essi possono generarsi a partire da un *water flow* per incremento di sedimenti (Pierson et al., 1996) o per perdita di sedimenti da parte di un *debris flow*.

I *debris flow* hanno comportamento viscoplastico, si comportano come una massa unica in cui acqua e sedimenti si muovono alla stessa velocità (Johnson, 1970), e la resistenza al taglio supera i 40 N/m^2 . La resistenza al flusso dei *debris flow* dipende da diversi parametri: viscosità, coesione tra particelle ed dal loro angolo d'attrito interno. I sedimenti vengono trasportati dalla coesione, dalle forze d'interazione tra i sedimenti e dalla forza di galleggiamento che riesce a sollevare e trasportare tra il 70% ed il 90% in peso dei sedimenti (Costa, 1988). In particolare, hanno la capacità di poter trasportare massi enormi perfino di 100 m^3 (Gravilovic & Matovic, 1991). Al fronte del flusso le parti solide risulteranno più o meno uniformemente distribuite nel fluido, man mano che ci si sposta dal fronte la miscela risulta sempre più diluita (Rickenmann, 1991).

Esistono ulteriori classificazioni per le diverse tipologie di trasporto solido che possono generarsi in un bacino torrentizio.

Hungr et al. (2001) definiscono i *debris flow* come una massa che si muove tipo fluido in maniera estremamente rapida, in un canale ben definito e molto ripido, coinvolgendo un mix di materiale granulare e materiale organico.

Slaymaker (1988) introduce il termine di *debris torrent* utilizzato in alcune regioni degli USA e nel Canada occidentale, ma ritenuto ambiguo da numerosi autori.

Coussot & Meunier (1996) propongono una classificazione basata su limiti concettuali e qualitativi, che possono variare sulla base delle condizioni al contorno e in base alle proprietà fisiche dei materiali. Ciò rende la classificazione di non facile utilizzo. La distinzione tra i diversi tipi di movimento è basata sull'incremento della frazione solida e decremento del contenuto d'acqua e viceversa. I *debris flow* vengono definiti dagli autori come fenomeni intermedi tra

hyperconcentrated flow (caratterizzati da intenso trasporto sul letto) e frane, con caratteristiche tali da poterli riconoscere sul campo (velocità, natura del deposito e tipo di flusso).

La classificazione di Pierson & Costa (1987) rimane la più diffusa ed utilizzata, seppur richiede la conoscenza di parametri non facilmente determinabili dall'analisi sul campo post-evento.

Per definire la tipologia principale di flusso è necessario stimare il volume di materiale solido che può essere trasportato dalla corrente e per far ciò si ricorre all'uso del sedimentogramma. Esso consente di eseguire una stima del volume di materiale solido che può essere trasportato da un evento con un determinato tempo di ritorno. Esso si costruisce discretizzando le portate liquide in intervalli di tempo nei quali si suppone che la portata rimanga costante. I valori di portata per ogni intervallo temporale derivano dall'idrogramma di piena e per stabilire la portata critica, che segna l'inizio del trasporto solido, si utilizza la formula di Schocktlisch (1962). Successivamente si calcola per ogni intervallo temporale il valore di portata solida corrispondente ed il volume solido trasportato attraverso le seguenti formule (Schocktlisch, 1962):

$$Q_C = 0,26 \frac{(\rho_S - \rho_W)^{\frac{5}{3}}}{\rho_W} \left(\frac{D_{40}^{\frac{3}{2}}}{S^{\frac{7}{6}}} \right) B \quad (2.8)$$

$$Q_S = 0,94(Q - Q_C) S^{1,5} \quad (2.9)$$

$$V = Q_S * \Delta t \quad (2.10)$$

Q_C : portata critica di inizio del trasporto (m^3/s);

ρ_S : densità dei sedimenti ($2600 - 2700 \text{ kg}/m^3$);

ρ_W : densità dell'acqua ($1000 \text{ kg}/m^3$)

D_{40} : diametro equivalente alla frazione di passante pari al 40%.

S : pendenza fondo (m/m)

B : larghezza del letto (m)

Q_S : portata solida (m^3/s);

Q : portata liquida (m^3/s);

V : volume solido trasportato (m^3)

Δt : intervallo di tempo (s)

Naturalmente le granulometrie e i volumi del carico solido dipenderanno dalle caratteristiche litologiche, dalla natura e dalle condizioni dei materiali presenti nel bacino.

2.3 I flash floods e le conoidi alluvionali

I fenomeni alluvionali coinvolgono il sistema bacino-conoide, in quanto il bacino rappresenta il luogo di produzione del detrito e del deflusso idrico, la conoide il luogo di deposito del materiale preso in carico. Il rischio che si ha nelle conoidi infatti è legato non solo ai processi di inondazione ma soprattutto ai fenomeni di trasporto e sedimentazione che si verificano durante l'evento stesso (National Research Council, 1996). Bull (1964) definisce le conoidi alluvionali come depositi torrentizi, con superficie a segmento di cono, che si irradia nel sottopendio dal punto in cui il corso d'acqua esce da un'area montuosa. Sono forme che si generano a causa della perdita di competenza da parte di un corso d'acqua che, dalle condizioni di confinamento, passa ad un ambiente aperto ove è possibile sconfinare e depositare il materiale in carico (North & Davidson, 2012). Viste in pianta le conoidi hanno la forma di un ventaglio (Bull, 1977), da ciò il termine anglosassone *alluvial fan*.

Le conoidi si evolvono per accrescimento o asporto di lobi (Hargitai & Kereszturi, 2015). Esse sono la manifestazione dello stato di attività di un torrente, in termini di processi di erosione trasporto e sedimentazione, ed attraverso il loro studio sedimentologico e morfologico è possibile ricostruirne l'evoluzione. Possono quindi essere considerate l'espressione della storia del bacino, in quanto sono state da esso create e rappresentano l'insieme dei processi idrologici, geomorfologici, climatici, biologici ed antropogenici dei versanti a monte della conoide stessa (Stoffel et al., 2013).

Le caratteristiche della conoide sono strettamente legate al bacino idrografico retrostante, che rappresenta il luogo di produzione erosione e trasporto del materiale detritico. Dunque dai parametri del bacino (dimensioni, lunghezza del bacino e del corso d'acqua, pendenza del bacino e del corso d'acqua) dipenderanno le caratteristiche della conoide in termini di quantità e tipologia di materiale detritico.

Il bacino idrografico e la conoide costituiscono perciò un unico sistema, ed il principale elemento di congiunzione è rappresentato dal canale principale. L'intersezione tra il profilo longitudinale del corso d'acqua e la conoide è data dall'apice idrografico, da questo punto in poi inizia la sedimentazione (Hooke, 1967).

All'interno di una conoide alluvionale possiamo distinguere diversi elementi morfologici, come rappresentato in figura 1.

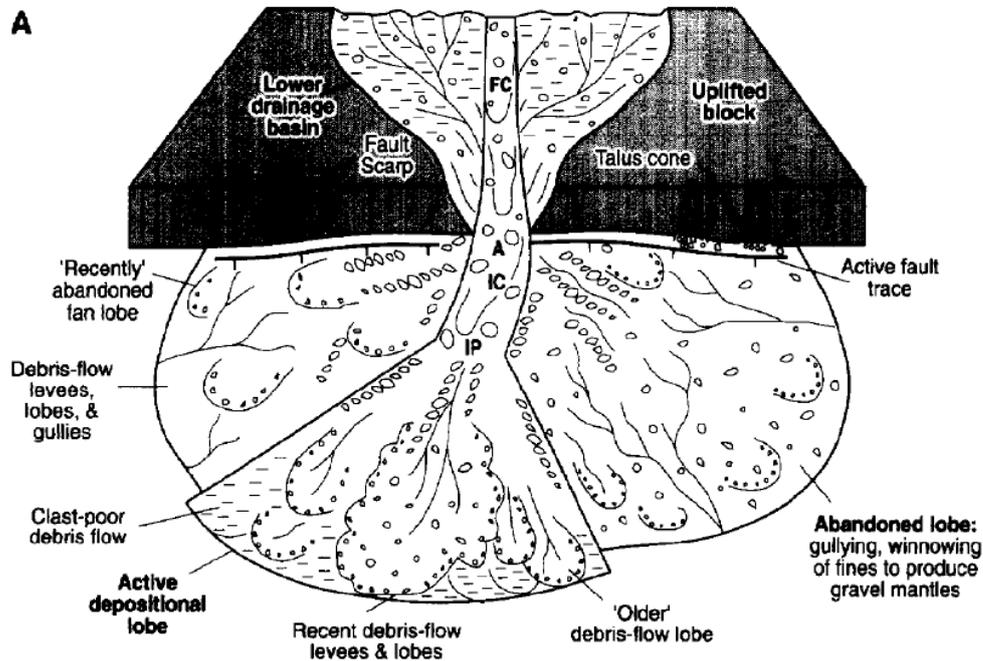


Figura 1: Elementi morfologici di una conoide alluvionale (da Blair & McPherson, 1994b).

I principali sono:

A (*apex*): Apice della conoide, punto topograficamente più elevato in cui il corso d'acqua non è più confinato (Lecce, 1990);

FC (*feeder channel*): Canale alimentatore, rappresenta il corso d'acqua di ordine maggiore nel bacino retrostante, è chiamato alimentatore perché è l'ultima condotta per il trasferimento dei sedimenti provenienti dai canali di ordine minore, del bacino idrografico interessato, all'area di deposizione (Blair & McPherson, 1994a, 1994b);

IP (*intersection point*): Punto d'intersezione, dove il canale inciso emerge nella conoide (non è sempre presente); in questo punto il profilo longitudinale del corso d'acqua incontra la conoide, la profondità del canale risulta pari a zero ed il flusso diviene non confinato (Hooke, 1967).;

IC (*Incised channel*): prolungamento a valle dell'apice della conoide del canale alimentatore nella conoide (non è sempre presente) (Hargitai & Kereszturi, 2015).

L'apice della conoide rappresenta il punto a partire dal quale inizia la sedimentazione e se l'apice della conoide e l'apice idrografico, punto d'intersezione tra il profilo longitudinale del corso d'acqua e quello della conoide, coincidono la conoide si accrescerà sempre su se stessa creando

corpi multipli (Scorpio et al. 2011). Nelle conoidi alluvionali la deposizione avviene a partire dall'apice in ogni possibile direzione, con una pendenza simile in ogni direzione che consente di formare la tipica forma a ventaglio, nei depositi fluviali si ha deposizione in una direzione uniforme (Blair & McPherson, 1994b). Il canale alimentatore nella conoide generalmente rimane inciso solo nel tratto più antico (*Incised channel*), nella maggior parte dei casi invece a partire dall'*intersection point* il flusso rimane sulla superficie della conoide e determina l'insorgere di eventi alluvionali perché non è più confinato. Il punto d'intersezione rappresenta la transizione tra il processo di trasporto ed il processo di sedimentazione (National Research Council, 1996).

Le caratteristiche morfologiche della conoide sono legate a quelle del bacino idrografico e numerosi autori le hanno messe in relazione. L'indice di Melton, un indice di acclività del bacino, unitamente alla pendenza della conoide sono tra gli indicatori più utilizzati per discriminare i bacini in grado di generare *debris flows* dalle conoidi fluviali. L'analisi di 620 bacini, localizzati in diversi contesti climatici, ha confermato come i due indici sono utili all'identificazione della tipologia di trasporto del sedimento dominante (Bertrand et al. 2013). La pendenza della conoide dunque, dipende non solo dalla granulometria dei sedimenti ma anche dalle dimensioni e dall'energia di rilievo del bacino retrostante.

Le conoidi generate da *debris flow* sono generalmente piccole, con pendenza compresa tra 8° e 20° e con profili longitudinali rettilinei e uniformi, mentre nelle conoidi generate da *water flow* le pendenze medie variano dai 2° a 8° (Scorpio, 2011). Nei *water flow* il trasporto di sedimenti in soluzione è limitato, di conseguenza, come è ben noto in letteratura, il potere distruttivo dei *debris flow* è notevolmente superiore. L'identificazione delle conoidi interessate da trasporto di tipo *debris flow* risulta fondamentale quindi ai fini della pianificazione territoriale considerando che questi possono raggiungere portate di picco 4-5 volte maggiori rispetto a quelle da *water flow* (Hungry et al., 2001; Wilford et al., 2004, Kellerhalls & Church, 1990).

Scorpio (2011) ha introdotto un'equazione di semplice utilizzo che consente di definire la tipologia prevalente di trasporto in un sistema bacino-conoide. Essa è valida in contesti geologicamente e geomorfologicamente simili a quelli dei massicci carbonatici dell'Appennino meridionale, caratterizzati da un clima umido (Santangelo et al., 2012).

L'equazione assume la seguente forma:

$$F(x) = -144.74 - 0.34 * Ipc + 14.24 * Lf \quad (2.11)$$

l_{pc} è la pendenza media del canale principale e L_f è la lunghezza della conoide. Sulla base del valore assunto, positivo o negativo, verrà attribuito rispettivamente un trasporto prevalente da *water flood* o *debris flow*. Il confronto con i dati delle analisi di campo e delle alluvioni storiche, nonché l'applicazione ai recenti eventi, ha fatto riscontrare una buona corrispondenza.

2.3 Modellazione dei fenomeni alluvionali torrentizi

La modellazione dei fenomeni naturali è oggetto di costante discussione nel mondo scientifico perchè, per quanto possano essere complesse le equazioni utilizzate e per quanto si possa ben conoscere l'evento da analizzare, non si potrà mai riprodurre la realtà in pieno. I fenomeni naturali sono complessi e difficili da modellare, perciò è necessario fare delle assunzioni che consentono di semplificare il fenomeno e ridurre i parametri in gioco. Inoltre, le equazioni utilizzate spesso derivano da modelli empirici oppure vengono usate relazioni empiriche per stimare i parametri più importanti. Tuttavia, negli ultimi anni il progresso in campo informatico ha consentito lo sviluppo di numerosi modelli per la simulazione dei fenomeni naturali, che consentono di risolvere velocemente equazioni complicate cella per cella.

I fenomeni alluvionali torrentizi sono molto complessi, per questo motivo numerosi modelli sono stati sviluppati per simulare il comportamento del flusso. L'impulsività del fenomeno, la variabilità composizionale e di contenuto d'acqua della massa complicano ulteriormente la situazione, perciò nella maggior parte dei casi la massa (acqua e sedimenti) viene trattata come una singola fase per semplificarne la modellazione (Rickenmann et al., 2006). L'attenzione si concentra nella definizione delle aree inondabili visto che in queste zone, spesso densamente abitate, si registrano i danni maggiori. La determinazione delle aree inondabili è di fondamentale importanza per produrre mappe di pericolosità (Hung et al., 1984, Petrascheck & Kienholz, 2003). Al fine di produrre una mappa di pericolosità o di progettare opere a protezione dei potenziali eventi, è necessario stimare: il volume potenziale, la velocità media del flusso, la portata di picco e la distanza di arresto (Rickenmann, 1999).

I modelli possono essere sostanzialmente suddivisi in due categorie: empirici-statistici e dinamici. I primi analizzano gli eventi avvenuti in passato utilizzando un approccio empirico, ma possono essere usati solo in condizioni simili a quelle in cui sono stati sviluppati; i secondi considerano la conservazione del momento o dell'energia del flusso (Rickenmann, 2005).

L'aggettivo dinamico è riferito a tutti quei metodi che assimilano una colata detritica ad un fluido monofase il cui comportamento è descrivibile attraverso l'uso di modelli reologici di

comportamento (Mammoliti, 2011). Essi considerano la conservazione dell'energia, del momento e della massa, alcuni considerano la colata un continuum altri come elementi distinti. Una delle difficoltà maggiori che si riscontra nello sviluppo dei modelli dinamici è la scelta dei parametri di frizione appropriati (Hungar, 1995, Iverson, 1997). Inoltre l'assenza di metodi consolidati che permettano di determinare i parametri reologici o altri parametri di input, può limitare l'uso dei modelli dinamici (Mammoliti, 2011). A tal proposito Rickenmann (1999) ha sviluppato relazioni empiriche che consentono di stimare i parametri principali.

Di fondamentale importanza è la qualità dei dati di input; una base topografica di elevata risoluzione garantirà una qualità migliore dei risultati della simulazione (McArdell et al., 2007).

Tra i modelli dinamici 2D più utilizzati ritroviamo FLO-2D e RAMMS. Il primo è un codice commerciale di diffuso utilizzo basato su una legge reologica quadratica (O'Brien et al., 1993; Cesca & D'Agostino, 2008). RAMMS è stato sviluppato dall'Istituto Federale Svizzero WSL di Birmensdorf (Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research) e SLF di Davos (Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research) ed utilizza un approccio monofasico basato sulla reologia di Voellmy (1955).

Il Centro Universitario per la Difesa idrogeologica dell'Ambiente Montano (CUDAM), dell'Università di Trento ha sviluppato TRENT2D, un modello numerico usato per simulare *debris flows* ed in particolare ha introdotto nell'ultima versione un termine di diffusione che riproduce le proprietà fisiche, incrementando l'accuratezza dei risultati ma anche i costi di calcolo (Rosatti e Begnudelli, 2013). Un innovativo strumento di calcolo open source è rappresentato da r.avaflow che simula movimenti di massa rapidi, utilizzando un approccio bifasico per cui è importante conoscere il contenuto solido della massa per ottenere risultati plausibili (Mergili et al., 2017).

In questo lavoro di tesi si è scelto di utilizzare il modello RAMMS per la simulazione di fenomeni alluvionali torrentizi, avvenuti nell'Appennino Campano.

Capitolo 3 IL DATABASE

3.1 Scopo del database

Ricostruire la storia di un fenomeno è il primo passo per la definizione della pericolosità del fenomeno stesso. La raccolta di informazioni su eventi avvenuti in passato può fornire informazioni sugli eventi futuri in termini di danni previsti e di occorrenza spaziale e temporale.

Più accurate e dettagliate saranno le informazioni raccolte, maggiori saranno gli elementi che consentiranno di studiare nel dettaglio la storia locale del fenomeno. Ciò che conta quindi non è solo la quantità ma soprattutto la qualità dei dati raccolti.

Il database sui fenomeni alluvionali torrentizi avvenuti nella regione Campania nasce allo scopo di dare un contributo alla definizione della pericolosità di tali fenomeni. Nonostante i *flash floods* siano fenomeni che si verificano spesso, essi risultano poco documentati (Gaume et al., 2009; Ruiz-Villanueva et al., 2010), o di frequente vengono trattati insieme alle frane o alle inondazioni in pianura, non rendendo facile la distinzione delle diverse tipologie. Questo avviene soprattutto quando si esaminano eventi avvenuti in passato, i cui danni generalmente sono attribuiti alle frane (Vennari et al., 2016).

È fondamentale quindi un'analisi critica e dettagliata delle fonti utilizzate, al fine di costruire un accurato ed affidabile catalogo dati, dedicato ai fenomeni alluvionali torrentizi.

Attraverso l'analisi dei dati contenuti nel database sui fenomeni alluvionali torrentizi avvenuti in Campania, è possibile individuare le aree già colpite in passato, e ciò potrà essere un utile strumento non solo nella pianificazione territoriale, per l'identificazione delle aree in cui adottare opere di mitigazione, ma anche in caso di allerta o emergenza nelle operazioni di protezione civile, per individuare le aree da monitorare.

3.2 Database esistenti sui fenomeni alluvionali torrentizi

In ogni analisi di pericolosità e rischio il primo passo consiste nel raccogliere informazioni sugli eventi passati, partendo dal concetto che questi possono fornire informazioni sugli eventi futuri, in termini di occorrenza spaziale e temporale. Inoltre, considerando che spesso la memoria storica è breve (in pratica, l'uomo tende a dimenticare rapidamente quanto avvenuto in passato, nell'illusione che ciò che si è verificato non possa più ripetersi), è importante raggiungere un grado di conoscenza ottimale su luogo, intensità e frequenza con cui gli eventi si sono verificati.

Le fonti d'informazione che si possono consultare sono molteplici; un'elevata percentuale di dati generalmente deriva dalle fonti storiche che, se accuratamente analizzate e sottoposte ad analisi critica, possono fornire informazioni preziose.

Il problema principale nella raccolta di informazioni su *flash floods* in Italia è legato al fatto che questa tipologia di fenomeno è generalmente trattata insieme a frane ed inondazioni. In molti casi i database esistenti si riferiscono a frane o ad inondazioni, o trattano contemporaneamente eventi differenti (frane, *flash floods* in bacini torrentizi, inondazioni in pianure alluvionali) (Vennari et al., 2017)

Ad esempio l'IRPI CNR (Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica del Consiglio Nazionale delle Ricerche) di Torino ha costruito un database sulle frane, le colate detritiche e le inondazioni che si sono verificate nel Nord Italia negli ultimi 500 anni; le centinaia di migliaia di informazioni raccolte provengono dalle consultazioni di documenti pubblicati e inediti, e da fonti storiche (Tropeano & Turconi, 2004). Questo lavoro evidenzia l'importanza dell'analisi delle fonti storiche nella valutazione dei rischi naturali, così come evidenziato da altri autori in diverse parti d'Italia (Calcaterra & Parise, 2001; Gringeri Pantano et al., 2002; Calcaterra et al., 2003).

Con il progetto AVI (Aree Vulnerate in Italia), commissionato dalla Protezione Civile al Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), è stato compilato un catalogo contenente informazioni sulle aree storicamente affette da frane ed inondazioni in Italia, dal 1918 al 1990 (Guzzetti et al., 1994).

Sempre in Italia, Brunetti et al. (2015) hanno analizzato gli eventi di pioggia innescanti frane e *debris flows* allo scopo di definire una soglia pluviometrica nazionale per il possibile innesco di tali fenomeni.

Per quanto riguarda la Campania, numerosi studi sono stati compiuti al fine di raccogliere informazioni storiche sugli eventi idrogeologici avvenuti in passato. Nella maggior parte dei casi i cataloghi si riferiscono a frane ed alluvioni, o trattano contemporaneamente differenti tipologie d'evento. Un database specifico sugli eventi alluvionali torrentizi risulta pertanto inesistente.

L'area di Sarno, Quindici e Bracigliano (SA) è stata oggetto di studi particolareggiati a causa della severità dell'evento del 5 maggio del 1998; in seguito a numerosi *debris flow* e *soil slip* 160 persone persero la vita (Crosta & Dal Negro, 2003). Mazzarella & Diodato (2002), sulla base di documenti storici, hanno raccolto informazioni sugli eventi che dal 1794 hanno interessato la cittadina di Sarno, includendo anche le informazioni sugli eventi di pioggia per mezzo di un indice d'intensità. Calcaterra et al. (2003) hanno analizzato i fenomeni di instabilità che nel passato hanno interessato Quindici, attraverso l'uso di dati storici e geologici allo scopo di definirne la

pericolosità. Gli autori hanno eseguito un attento scrutinio delle informazioni storiche utilizzate, al fine di fornire una valutazione critica delle fonti in termini di affidabilità. Calcaterra et al. (2003) sottolineano l'importanza della combinazione delle informazioni storiche e geologiche, in quanto solo con un'analisi incrociata tra ricerca storica e geologica, e per mezzo di un approccio geomorfologico e geo-idrologico si può raggiungere un buon grado di conoscenza nella localizzazione spaziale e temporale degli eventi.

Altri autori hanno effettuato studi a carattere sub-regionale o regionale sulle frane e le inondazioni in Campania (Migale & Milone 1998; Esposito et al., 2003, Di Crescenzo & Santo, 2005).

Relativamente ai fenomeni alluvionali torrentizi nella regione Campania, Alessio et al. (2013) hanno costruito un database sui fenomeni verificatisi sul Somma-Vesuvio; sulla base di dati storici e geomorfologici sono state raccolte le informazioni spazio-temporali di 87 eventi, corredati da numero di vittime registrate, valori pluviometrici, parametri geomorfologici e planimetrici dei bacini interessati. Altri lavori si focalizzano invece sui danni osservati o documentati (Porfido et al., 2013) o sui parametri morfologici e morfometrici ai fini della valutazione della suscettibilità (Santangelo et al., 2012). Scorpio (2011) ha analizzato dal punto di vista morfologico e morfometrico 102 sistemi bacino-conoide, definendone la tipologia di trasporto prevalente (da *debris flow* o da *water flood*) ai fini della definizione della suscettibilità della fascia pedemontana dei massicci carbonatici dell'Appennino Campano. Lo studio ha permesso di ricavare un'equazione di semplice applicazione basata sull'uso di due parametri, uno rappresentativo delle caratteristiche del bacino ed uno del conoide, che consente di classificare la tipologia di trasporto per un sistema bacino-conoide (equazione 2.11).

Numerosi sono gli studi che si concentrano su specifiche aree, come il bacino del Teglià (Santo et al., 2015), l'abitato di Sala Consilina e i Monti della Maddalena (Santangelo et al., 2011), Santa Maria a Vico e Arienzo nei Monti di Caserta (Di Crescenzo et al., 2013).

Dopo gli eventi del 10 Novembre del 2009 che hanno interessato l'area settentrionale dell'isola di Ischia, Santo et al. (2012) hanno eseguito un'analisi della pericolosità combinando informazioni storiche, con analisi geomorfologiche e dati pluviometrici. Di recente, a seguito dei *flash floods* che hanno interessato gli abitati di Paupisi e Solopaca nel Novembre del 2015, è stata prodotta una mappa degli effetti al suolo, in termini di processi gravitativi, erosivi e gravitazionali verificatisi (Santo et al., 2017).

Come precedentemente affermato, non esiste per la regione Campania un catalogo dati che tratti in maniera specifica le alluvioni torrentizie.

Per la costruzione del database sui flash floods sono stati consultati: archivi e cataloghi sugli eventi idrogeologici, letteratura scientifica, tesi, report di eventi, fonti storiche e fonti cronachistiche.

Il catalogo AVI (Aree Vulnerate in Italia) è stato il primo archivio esaminato al fine di estrarre informazioni sui *flash floods* che hanno interessato i bacini di piccole dimensioni, comprese tra pochi km² e poche centinaia di km², della regione Campania.

In riferimento alla letteratura scientifica, è stata eseguita un'analisi critica dei lavori nazionali, regionali e sub-regionali esistenti. In molti casi si tratta di lavori su specifici casi di studio. Generalmente maggiore è l'estensione dell'area interessata dall'evento, maggiori saranno le informazioni disponibili. Il livello di qualità delle informazioni dipenderà anche dall'entità dei danni che si sono verificati e dall'epoca in cui è avvenuto l'evento. Perciò i dati morfologici e geomorfologici, così come i dati di pioggia non sono disponibili in tutti i casi. Allo stesso tempo, va evidenziato che, in mancanza di un'analisi critica sulla fonte, gli articoli scientifici possono contenere informazioni fuorvianti, che sono spesso all'origine della propagazione degli errori (Calcaterra & Parise, 2001). È fondamentale, quando possibile, incrociare tutte le informazioni disponibili. Un semplice errore di trascrizione può far attribuire un evento ad un tempo o in un luogo diverso da quello reale. Può accadere in alcuni casi che la fonte riporti il vecchio nome di una località, o il nome di una strada non più esistente.

La maggior parte delle informazioni storiche contenute nelle pubblicazioni scientifiche derivano dagli archivi o da documenti storici. Questi ultimi, nonostante si basino su descrizioni fatte da persone comuni e non addetti ai lavori, ma che sono stati testimoni diretti o indiretti dell'evento, contengono informazioni preziose sui danni registrati. Raramente però essi contengono informazioni specifiche, relative a tipologia dei processi, volume dei sedimenti, informazioni idrologiche (Stoffel et al., 2013). Nonostante questa pecca, archivi e documenti storici rappresentano una fonte d'informazione inestimabile.

3.3.1 Vantaggi e svantaggi dell'uso delle fonti storiche

La disponibilità di documenti storici e la possibilità di esaminarli è strettamente legata alla storia del paese e alle sue condizioni socio-economiche. Come afferma D'Agostino (2013), durante un periodo di guerra o un'epidemia, un evento idrogeologico non rappresenta di certo la priorità, ragion per cui le analisi storiche su eventi simili possono essere affette da una sensibilità differente in diversi momenti storici. Naturalmente, in una nazione dalla lunga storia si avranno maggiori possibilità di ritrovare utili informazioni storiche. Anche l'urbanizzazione influenza indirettamente l'informazione: in un'area di recente antropizzazione si possono avere informazioni solo sugli eventi recenti perchè prima essa era inabitata e dunque pressochè priva di testimoni. La qualità delle informazioni storiche è legata anche alla severità dall'evento e alla sua estensione. Se un evento ha interessato un'area ristretta è più probabile che si avranno precise informazioni spaziali e temporali, mentre se l'estensione dell'area aumenta l'informazione può diventare più generica. D'Agostino (2013) afferma che la tipologia di ricerca storica da eseguire dipende congiuntamente dall'intervallo di tempo che si vuole investigare e dall'estensione dell'area di interesse. Se si tratta di uno specifico evento, di cui si hanno informazioni spazio-temporali certe, la ricerca sarà a scala specifica; si parla invece di ricerca storica estesa quando si fa un'indagine su tutti gli eventi che hanno interessato una macro area.

Relativamente ai danni alle persone, nella maggior parte dei casi vengono riportate informazioni generiche, come "alcune vittime" o in altri casi la fonte d'informazione riporta il numero totale di vittime per evento o non per le singole municipalità. Stimare quindi il numero esatto di vittime, feriti o dispersi non è affatto semplice. Può accadere che il dato differisca da una fonte all'altra e ciò può essere legato al fatto che in molti casi il numero preciso è disponibile solo quando si sono concluse le operazioni di ricerca, dopo alcuni giorni o settimane dall'evento. Durante questo intervallo di tempo i giornali o le relazioni d'evento possono fornire dati ben diversi (Salvati et al., 2010).

In passato gli eventi venivano documentati soprattutto quando si verificavano danni alle infrastrutture, o all'uomo in termini di feriti e vittime o dispersi. Negli ultimi decenni, con l'intensificarsi dell'antropizzazione e dell'uso del suolo vi è una maggiore disponibilità di dati su eventi di minore entità (Stoffel et al., 2013), il che rappresenta un aspetto molto positivo ai fini di una valutazione della pericolosità di maggior dettaglio.

3.4 Metodo di selezione degli eventi

Come affermato nelle precedenti sezioni non è sempre facile distinguere i fenomeni alluvionali torrentizi da frane ed alluvioni. Per questo motivo nasce, nella fase di ricerca bibliografica su tali fenomeni, l'esigenza di definire un criterio per la loro distinzione nei casi in cui la descrizione del fenomeno fosse ambigua.

Il criterio scelto per distinguere i *flash floods* dagli altri eventi idrogeologici è quello geografico (Vennari et al., 2016). Considerando la localizzazione del fenomeno, le caratteristiche morfologiche dell'area colpita, e sulla base degli eventi ivi avvenuti in passato, gli eventi sono stati distinti secondo le seguenti tipologie:

- Inondazioni in pianure alluvionali;
- *Flash floods* in bacini torrentizi;
- Frane;
- Fenomeni misti o casi dubbi.

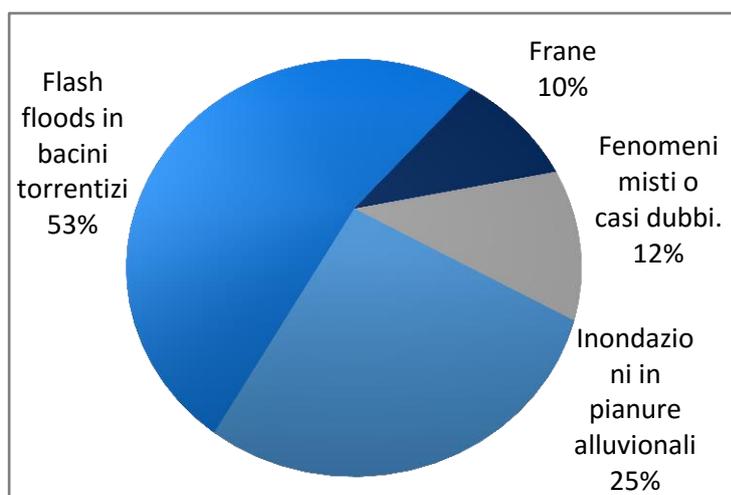


Figura 2: tipologia di eventi.

Nei casi in cui la descrizione era chiara, l'evento è stato incluso nel catalogo dati nella relativa classe di appartenenza. Per i fenomeni ricadenti nella quarta classe, misti o dubbi, è stata eseguita una seconda analisi e sono state ricercate ulteriori fonti d'informazione al fine di inserire l'evento in una delle prime tre classi o di escluderlo completamente dal catalogo.

Successivamente, l'attenzione è stata focalizzata sulla classe *flash floods* che rappresenta la tipologia d'evento d'interesse del database. I *flash floods* costituiscono il 53 % dei dati raccolti (fig. 2). In questo modo è stato ottenuto un database contenente informazioni su circa 500 fenomeni

alluvionali torrentizi, *flash floods*, che hanno interessato la regione Campania (Vennari et al., 2016).

3.5 Informazioni raccolte

La conoscenza del tempo e del luogo in cui si è verificato un *flash flood* è stata definita condizione vincolante per inserire l'evento nel database. In caso contrario l'evento è stato scartato perché il catalogo dati ha il fine ultimo di dare un contributo alla pericolosità connessa ai *flash floods*, e pertanto necessita della conoscenza del dato temporale di occorrenza. Nella raccolta delle informazioni sui vari eventi, inoltre, particolare attenzione è stata rivolta anche ai danni causati sia all'uomo che all'infrastrutture.

A seguire verranno illustrati i singoli campi presenti nel database.

Ogni evento registrato è identificato da un ID, rappresentato da numero progressivo. Seguono le informazioni sul tempo di occorrenza, che sono suddivise in quattro campi: ora, giorno, mese ed anno. Nel campo dell'ora si riporta l'orario in cui si è verificato l'evento, oppure l'ora desunta se la fonte fa riferimento ad una fascia oraria: per convenzione, l'informazione "nella notte" diventerà alle 5, "in mattinata" corrisponderà alle 11, "nel pomeriggio" alle 17, e, infine, "in serata" alle 21. Nel campo giorno viene riportato in formato numerico il giorno del mese in cui si è verificato l'evento; se la fonte riporta un intervallo di tempo in questo campo verrà inserito il primo giorno dell'intervallo in questione. Nella colonna mese si inserisce il mese in formato numerico. Anche in questo caso se la fonte cita un intervallo di tempo, oppure una stagione, verrà indicato il primo mese dell'intervallo indicato. Ugualmente per l'anno, nel campo corrispondente, verrà indicato il primo anno dell'intervallo citato qualora la fonte riporti un intervallo di anni. Tutte le informazioni aggiuntive, a corredo di quelle inserite in formato numerico, sono riportate nel campo note.

Nella costruzione del database sui fenomeni alluvionali torrentizi è stato dato particolare interesse all'occorrenza spaziale e temporale degli eventi. Per valutare il grado di conoscenza di questi parametri è stato introdotto ed utilizzato il concetto di accuratezza. In ambito scientifico l'accuratezza di una misura è il grado di vicinanza della misura al valore reale della stessa (Chapra & Raymond, 2010).

Il campo accuratezza data fornisce un dato immediato circa il grado di conoscenza del tempo di occorrenza. Se sono note l'ora, il giorno il mese e l'anno di occorrenza l'accuratezza della data sarà

alta. Man mano che le informazioni diminuiscono, diminuisce anche l'accuratezza. Per ulteriori dettagli si veda la tabella 1

Tabella 1: Classi di accuratezza temporale

INFORMAZIONI DISPONIBILI	ACCURATEZZA DATA
Ora-Giorno-Mese-Anno	Alta
Giorno-Mese-Anno	Medio-alta
Intervallo di giorni-Mese-Anno	Media
Mese-anno	Medio-bassa
Anno	Bassa

Alle informazioni temporali seguono le colonne relative alle informazioni spaziali: località, Comune e Provincia. La località fa riferimento al luogo colpito dall'evento o al bacino interessato. Relativamente al bacino interessato, per ogni evento è stata definita la tipologia (tabella 2); sulla base delle caratteristiche geologiche e morfologiche sono state definite 5 classi che verranno illustrate nel dettaglio nella sezione 3.5.1.

Tabella 2: Classi di tipologia del bacino

CLASSI	TIPOLOGIA BACINO
1	Bacino carbonatico con copertura piroclastica
2	Bacino carbonatico senza copertura piroclastica
3	Bacino carbonatico con copertura piroclastica e recapito a mare
4	Bacino vulcanico
5	Bacino vulcanico con recapito a mare

Nella colonna dimensioni bacino viene invece inserita la classe di appartenenza: 1 se le dimensioni sono minori di 3 km²; 2 se le dimensioni sono comprese tra 3 km² e 10 km²; 3 se il bacino ha un'estensione maggiore di 10 km² ma inferiore di 60 km².

Ogni singolo evento è stato georeferenziato attraverso Google Earth; nei campi Latitudine e Longitudine del database sono quindi state inserite le coordinate in gradi decimali (secondo il sistema di riferimento geografico Datum WGS84).

Al fine di analizzare, quando possibile, la pluviometria associata all'evento di *flash flood*, all'interno del catalogo è stato inserito il campo pluviometro con associato il relativo codice. I dati

pluviometrici orari sono stati estratti dalla rete del Centro funzionale della Regione Campania (CFDC). Nelle colonne relative ai parametri pluviometrici orari (intensità, durata e cumulata) sono stati inseriti i valori corrispondenti all'evento pluviometrico innescente, ricostruito utilizzando il metodo proposto da Brunetti et al. (2010). In merito agli eventi meno recenti sono stati consultati gli Annali Idrologici del Compartimento di Napoli del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN). Di conseguenza, sulla base dei dati disponibili, sono stati riempiti i campi corrispondenti: cumulata giornaliera_annali, cumulata giornaliera_bibliografia.

I fenomeni alluvionali torrentizi hanno generato nel corso degli anni, in Campania, numerosi danni ai beni comuni e privati, ed anche alle persone. Nel costruire il catalogo è stata riservata particolare attenzione ai danni provocati alle cose ed all'uomo. Questo dato è rilevante ai fini della stima dell'entità dell'evento. Nella colonna danni si trovano le informazioni circa i beni colpiti suddivise in classi: 1) orti e giardini; 2) beni storici ed architettonici; 3) industrie; 4) abitazioni private; 5) strade; 6) sottoservizi. In riferimento ai danni alle persone, sono stati creati i campi numerici : vittime, feriti, senza tetto ed evacuati. Spesso però le fonti riportano informazioni molto generiche, come "alcune vittime", "molti feriti" non rendendone possibile la quantificazione. Allo scopo di non perdere nessuna informazione utile è stata inserita anche una colonna testuale che riporta l'informazione disponibile relativa ai danni all'uomo.

La colonna tipologia fenomeno riporta l'informazione relativa alla tipologia principale di flusso: *water flood* o *debris flow*. Sulla base dei dati a disposizione, per i bacini carbonatici tale distinzione è stata fatta su base morfometrica (Scorpio, 2011); negli altri casi l'informazione è stata estratta dalla letteratura o dalla fonte cronachistica, esclusivamente per i casi in cui il dato era inequivocabile. Naturalmente il distinguo tra *water flood* e *debris flow* diviene problematico per gli eventi avvenuti in epoche antiche.

La penultima colonna del database è riservata alla fonte d'informazione consultata per reperire le informazioni sul singolo evento. Naturalmente nel caso in cui siano state analizzate più fonti, queste vengono riportate tutte in questo campo.

Il catalogo termina con il campo note che contiene informazioni aggiuntive, o a corredo dei dati già inseriti, che non sia stato possibile includere nei campi precedenti.

Attraverso l'analisi dei dati contenuti nel database è possibile individuare le aree più suscettibili, e ciò potrà essere un utile strumento non solo nella pianificazione territoriale, per l'identificazione delle aree in cui adottare opere di mitigazione, ma anche in caso di allerta o emergenza nelle operazioni di protezione civile, per individuare le aree da monitorare.

Il database contenente le informazioni principali per ogni evento è allegato in appendice alla presente tesi.

3.5.1 Caratterizzazione geologica e geomorfologia dei bacini analizzati

Al fine di distinguere la tipologia di materiale presente nel bacino, e di ipotizzare il trasporto prevalente al suo interno, sono state definite diverse classi di bacino (tabella 2). Per la loro distinzione sono stati inoltre considerati il substrato del bacino (carbonatico o vulcanico), la presenza o meno di coperture detritiche e la loro natura, nonché la tipologia delle aree di deposito (conoide alluvionale o delta costiero).

Si è scelto di distinguere i bacini anche sulla base della sezione di chiusura (recapito a mare o in area pedemontana) perché i bacini costieri nella regione Campania talvolta hanno la conoide sommersa totalmente o in parte. Ciò rende difficile la mappatura delle aree inondabili, dunque la definizione delle aree pericolose.

I bacini carbonatici con copertura piroclastica sono costituiti da calcari e dolomie del Triassico e Giurassico, ricoperti da depositi piroclastici appartenenti al complesso vulcanico del Somma Vesuvio, con versanti con un gradiente elevato (pendenze maggiori di 30°). Relativamente all'uso del suolo i terreni sono principalmente boscati o coltivati, ma non mancano le aree allo stato semi-naturale. Lo spessore dei suoli e delle coperture piroclastiche varia da 0,2 a 2 m. Le aree dei bacini sono di dimensioni limitate, tra 0,1 e 2 km², il gradiente del corso d'acqua principale varia tra 15° e 30°. Un esempio di bacino carbonatico con copertura piroclastica è rappresentato da Santa Maria a Vico (CE), mentre un bacino carbonatico con copertura piroclastica e recapito a mare è quello di Atrani (SA).

I bacini carbonatici senza copertura piroclastica sono costituiti da calcari e dolomie del Triassico e Giurassico, con versanti a gradienti da medio ad alti (maggiori di 30°). I terreni sono per lo più ad uso boschivo o allo stato semi-naturale, ed i suoli raggiungono spessori massimi di 50 cm. I bacini torrentizi hanno estensioni maggiori rispetto a quelli presenti nelle aree con copertura piroclastica, e possono raggiungere i 7 km², i corsi d'acqua hanno pendenze che vanno da 10° a 33°. Un bacino di questa tipologia è presente a Sala Consilina (SA).

I bacini vulcanici sono costituiti dal complesso vulcanico del Somma-Vesuvio (lave, piroclastiti, ignimbriti). I versanti hanno pendenze da medio ad alte, sempre maggiori di 30° ed il suolo è

principalmente boscato o allo stato semi-naturale, con spessori che raggiungono al massimo 1 metro. Le pendenze del corso d'acqua principale vanno da 1,5° a 7° ed i bacini hanno un'estensione che può arrivare agli 8 km².

4.1 Distribuzione temporale dei fenomeni

Il database contiene 474 eventi di flash floods, e per ogni evento si hanno informazioni sul tempo di accadimento. In figura 3 è rappresentata la distribuzione temporale degli eventi sul territorio. L'evento più antico censito è avvenuto l'8 ottobre 1540 ad Amalfi (SA). Dall'istogramma in basso a sinistra appare chiaro come la maggior parte degli eventi è avvenuta negli ultimi sessant'anni (1956-2015), più del 50 % degli eventi collezionati. In realtà ciò è principalmente legato ad una maggiore disponibilità di pubblicazioni scientifiche sugli eventi recenti, ma soprattutto ad un numero maggiore di fonti d'informazione consultabili. Con lo sviluppo di internet sono nate numerose testate giornalistiche online, che ci informano in tempo reale su ciò che accade in ogni parte del mondo. Oltretutto la diffusione dei nuovi mezzi di comunicazione e dei social consentono di visualizzare in *real time* ciò che accade, ma soprattutto di diffonderlo sulla rete e di renderlo consultabile da tutti in qualsiasi posto ci si trovi. Per questo motivo per gli eventi recenti si hanno anche informazioni relative all'ora.

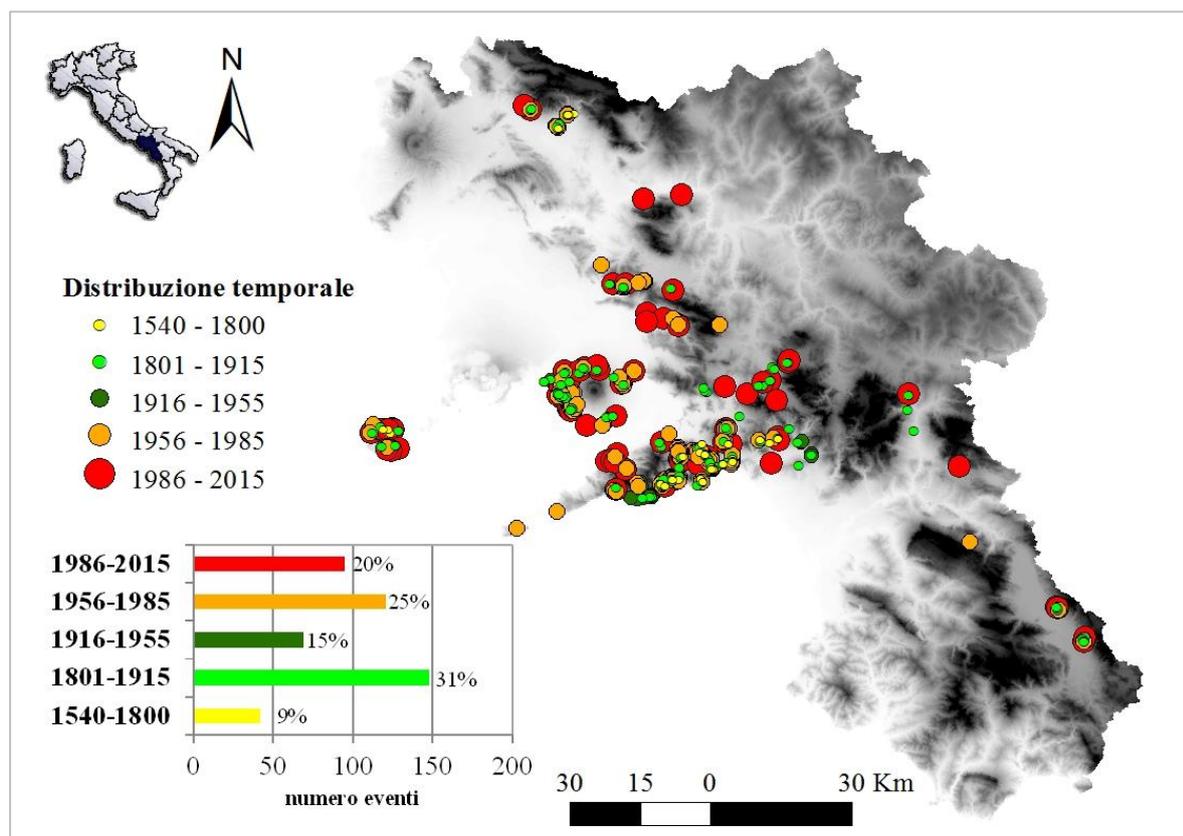


Figura 3: distribuzione temporale degli eventi di flash floods nella regione Campania.

Dall'analisi della figura 3 si evince come molti dei siti colpiti da fenomeni alluvionali torrentizi lo sono stati più volte nel corso dell'arco di tempo coperto dal database.

Per quanto riguarda la distribuzione degli eventi durante il corso dell'anno, i mesi in cui si registra una maggiore frequenza sono quelli autunnali; in particolare, il picco si raggiunge nel mese di Ottobre in cui si concentrano il 30% degli eventi collezionati. Dopo la stagione estiva, quindi secca, forti precipitazioni possono generare piene improvvise ed i sedimenti che si sono accumulati nei mesi, a seguito dei processi erosivi possono essere facilmente trasportati a valle. Inoltre, l'aumento può essere correlato al verificarsi di incendi nella stagione estiva, che indebolendo il terreno favoriscono i processi erosivi (Calcaterra & Santo, 2004)

Naturalmente le informazioni temporali collezionate non sono omogenee, in quanto per gli eventi meno recenti si hanno informazioni meno precise. Considerando che l'informazione legata al tempo di occorrenza dell'evento è di primaria importanza ai fini della stima della pericolosità, per classificare il grado di conoscenza connesso a questo dato sono state introdotte cinque classi di accuratezza, presentate in sezione 3.5 (tabella 1). L'80% degli eventi collezionati ha un'accuratezza temporale medio-alta, ciò significa che si conoscono con precisione giorno, mese ed anno di occorrenza dell'evento. Solo per il 4% degli eventi si conosce l'ora, ciò è legato al fatto che questa informazione è di difficile ottenimento ed è disponibile solo per gli eventi più recenti. Appartengono alle classi di accuratezza temporale media, medio-bassa e bassa rispettivamente il 6%, 3%, e 7 % del totale degli eventi. La distribuzione sul territorio dell'accuratezza temporale degli eventi collezionati in Campania è rappresentata in figura 4. Nell'istogramma in basso a sinistra è rappresentata la distribuzione dell'accuratezza nel intervallo di tempo coperto dal database. Appare evidente come gli eventi che ricadono nelle classi di accuratezza medio-bassa e bassa, diminuiscono procedendo verso i giorni nostri, riducendosi a zero nell'intervallo di tempo che va dal 1985 al 2015.

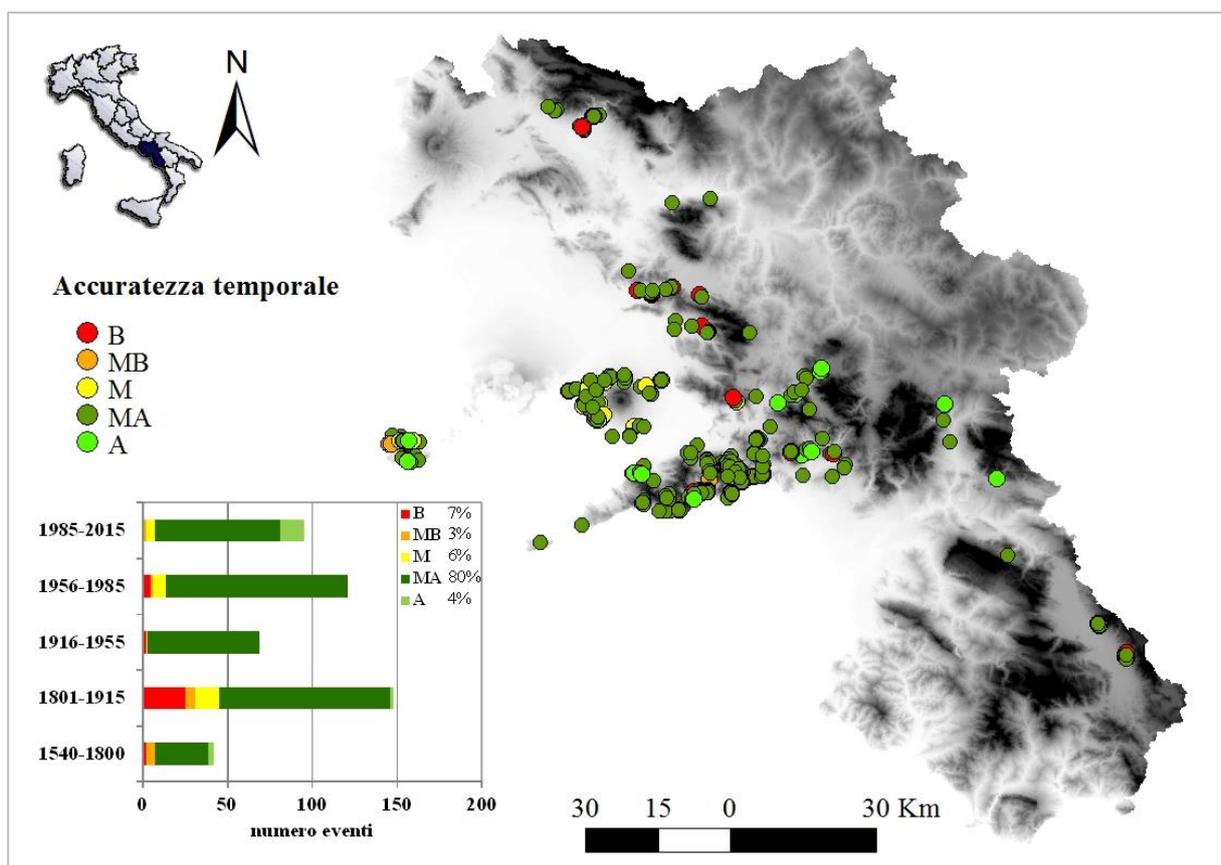


Figura 4: Distribuzione dell' accuratezza temporale degli eventi campani. L'istogramma illustra la distribuzione dell'accuratezza nel tempo in base alle cinque classi: (B) bassa, (BM) medio-bassa, (M) media, (MA) medio-alta, (A) alta.

4.2 Distribuzione spaziale dei fenomeni

Conoscere dove un evento si è verificato è imprescindibile se si vuole eseguire uno studio della pericolosità. Se un sito è stato interessato da un flash flood in passato, vi è una probabilità che lo sarà nuovamente in futuro. Per questo motivo, la distribuzione spaziale degli eventi ci permette di rispondere alla domanda "dove" si verificherà con maggiore probabilità un evento. Il database, che contiene un numero consistente di eventi, ci permette di analizzare la ripetitività dei fenomeni nello spazio ed individuare quindi le località esposte più suscettibili. Il 60% degli eventi si è verificato nella provincia di Salerno, ove si trovano i bacini carbonatici anche con recapito a mare. Nella provincia di Napoli, e quindi nei bacini vulcanici, si sono verificati il 27 % degli eventi. I comuni interessati da eventi di flash floods sono 83 e nel grafico in figura 5 è stata rappresentata la ripetitività per municipalità.

Vi sono comuni che nell'arco di tempo coperto da database, e sulla base delle informazioni in nostro possesso, sono stati interessati più di 20 volte da eventi di flash floods: Cava dei Tirreni, Minori, Salerno, Vietri sul Mare, Tramonti e Torre del Greco.

I municipi interessati più di 10 volte da eventi di flash flood sono 16 in totale, la maggior parte dei quali interessano i bacini carbonatici con recapito a mare della Penisola Sorrentina e Monti Lattari. Per queste località è stato calcolato l'intervallo medio di ricorrenza degli eventi, che va da 4 anni per Torre del Greco a 39 anni per Piedimonte Matese, in media è pari a 17 anni .

L'elevata ripetitività degli eventi in questi comuni evidenzia come le opere atte a mitigare il rischio, se eseguite, non sono state sufficienti perché nella maggior parte dei casi si continuano a registrare danni. Oltretutto appare chiaro come si continui a vivere ma soprattutto si costruisca in aree pericolose.

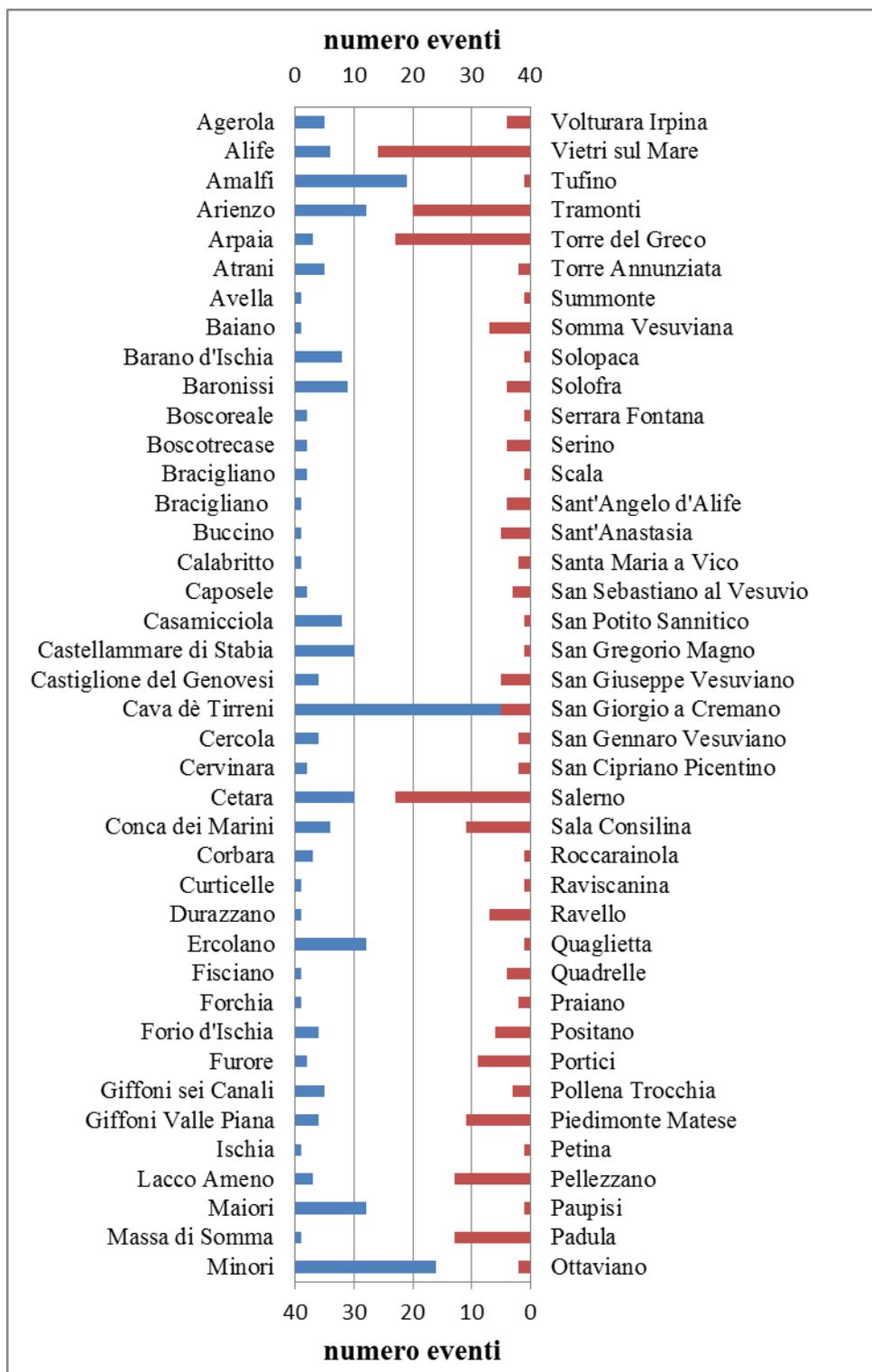


Figura 5: numerosità degli eventi per Comune.

La disponibilità delle informazioni sulla tipologia di bacino interessato dall'evento, ha consentito di esaminare non solo la distribuzione degli eventi nella regione, ma soprattutto la loro ripartizione nelle diverse tipologie di bacino definite (tabella 2). Individuare i bacini maggiormente propensi a questo tipo di dissesto, nonché la tipologia principale di materiale trasportato, fine o grossolano, consente di definire una minore o maggiore pericolosità. Come si può notare nel

diagramma a torta in figura 6, la maggior parte degli eventi censiti si sono verificati nei bacini carbonatici con copertura piroclastica, sia con recapito in area pedemontana che con recapito a mare. In queste tipologie di bacino vi è materiale grossolano rappresentato dalle ghiaie medie e grossolane carbonatiche, più una buona percentuale di matrice fine. Le formazioni carbonatiche sono largamente diffuse nella regione, si ritrovano in aree fortemente urbanizzate e questo potrebbe influenzare in parte l'informazione, perché dove vi è una maggiore urbanizzazione vi è maggiore disponibilità di dati.

Il 23 % degli eventi interessa i bacini vulcanici, soprattutto delle aree interne. In questi bacini vi è un'elevata disponibilità di argille e limi, data la forte erodibilità dei materiali.

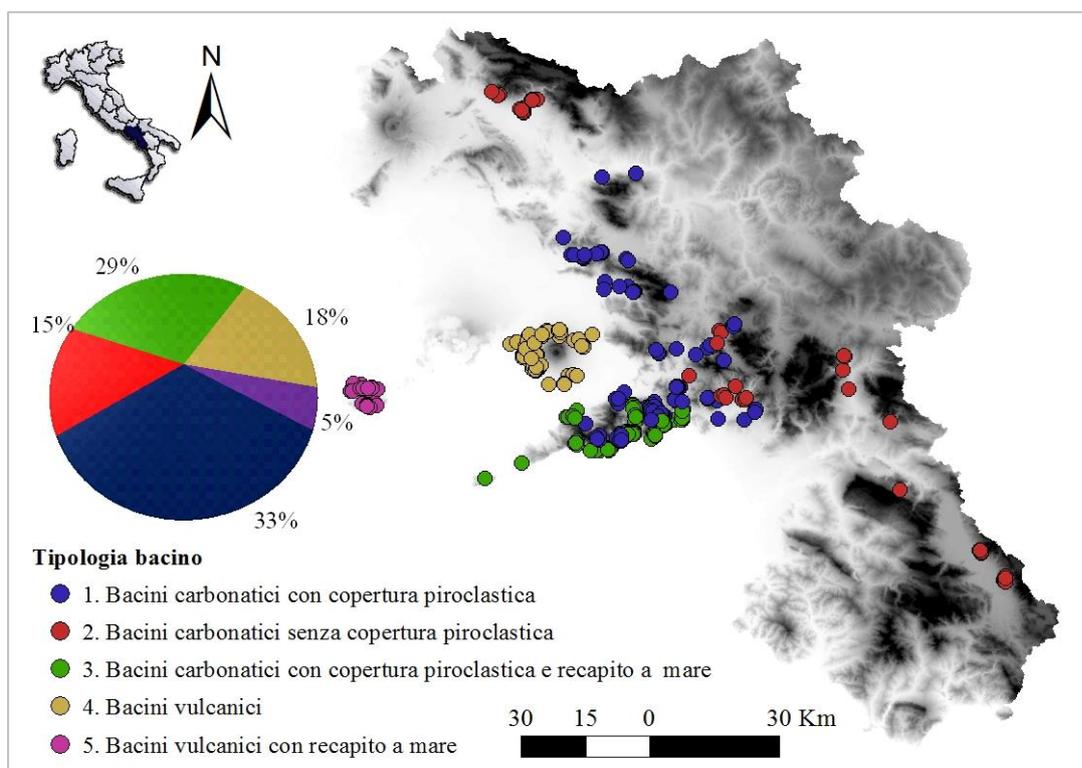


Figura 6: distribuzione degli eventi per tipologia di bacino.

4.3 Analisi dei dati pluviometrici

Oltre alle informazioni sul luogo ed il tempo di occorrenza degli eventi, quando disponibili sono state inserite nel database le informazioni relative ai dati pluviometrici dell'evento innescante. Ciò al fine di caratterizzare quanto più possibile l'evento e la sua severità. Purtroppo i dati pluviometrici non sono presenti per tutti gli eventi, per mancanza di dati registrati o mal funzionamento dei pluviometri, oppure a causa dell'assenza di strumenti in un raggio utile da poter essere considerato rappresentativo dell'evento.

In primis, ad ogni evento è stato associato un pluviometro, la cui scelta è stata finalizzata alla maggiore rappresentatività dell'evento pluviometrico che ha innescato il flash flood. Per selezionare il pluviometro più rappresentativo sono stati adottati diversi criteri: la distanza geografica tra il luogo dell'evento ed il pluviometro che non deve eccedere i 12 km, la reciproca altitudine e la condizioni fisiografiche generali dei due siti (Vennari et al., 2014)

Successivamente sono stati consultati i dati disponibili, per gli eventi meno recenti sono stati utilizzati i dati pluviometrici giornalieri degli annali resi disponibili dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN), quando possibile sono stati usati i dati pluviometrici orari estratti dalla rete pluviometrica del Centro funzionale della Regione Campania (CFDC).

All'interno del catalogo il valore di cumulata giornaliera è disponibile per il 26% degli eventi totali. Nel dettaglio, nel 54 % dei casi i valori di cumulata giornaliera derivano dalla consultazione degli annali, per i restanti eventi il valore di pioggia giornaliera è stato estratto dalla letteratura.

In figura 7a sono diagrammati i valori di cumulata massima giornaliera per gli eventi i cui dati pluviometrici sono stati estratti dagli annali del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN). Si tratta di 52 eventi che hanno interessato 68 municipalità. In media il valore di cumulata giornaliera è pari ad 82 mm. Questi valori sono generalmente associati a fenomeni di elevata intensità (Santo et al., 2012, 2015) che nei bacini torrentizi di piccole dimensioni possono essere ritenuti responsabili dell'innescò dei flash floods.

Molto spesso nella letteratura scientifica esaminata sono stati rinvenuti i valori di pioggia oraria massima ed al fine di collezionare tutte le informazioni utili anche questo dato è stato inserito nel database. Nel dettaglio si tratta di 11 eventi che hanno interessato 28 municipalità (fig. 7b). Il valore medio è di 30 mm, il valore massimo riportato corrisponde ad 82.4 mm registrato dal pluviometro di Ercolano in occasione dell'evento del 16 novembre 1985, che ha interessato Portici, San Giorgio a Cremano e Torre del Greco (NA).

Per quanto concerne i dati pluviometrici orari, quando disponibili, sono stati estratti dalla rete pluviometrica del Centro funzionale della Regione Campania (CFDC), al fine di ricostruire l'evento pluviometrico responsabile dell'innescò del flash flood. I criteri utilizzati per la ricostruzione dell'evento innescante sono quelli adottati in letteratura per la definizione delle soglie pluviometriche d'innescò delle frane (Brunetti et al., 2010, Peruccacci et al., 2012, Vennari et al., 2014, Gariano et al., 2015), in cui si stabilisce un tempo d'inizio e di fine dell'evento pluviometrico.

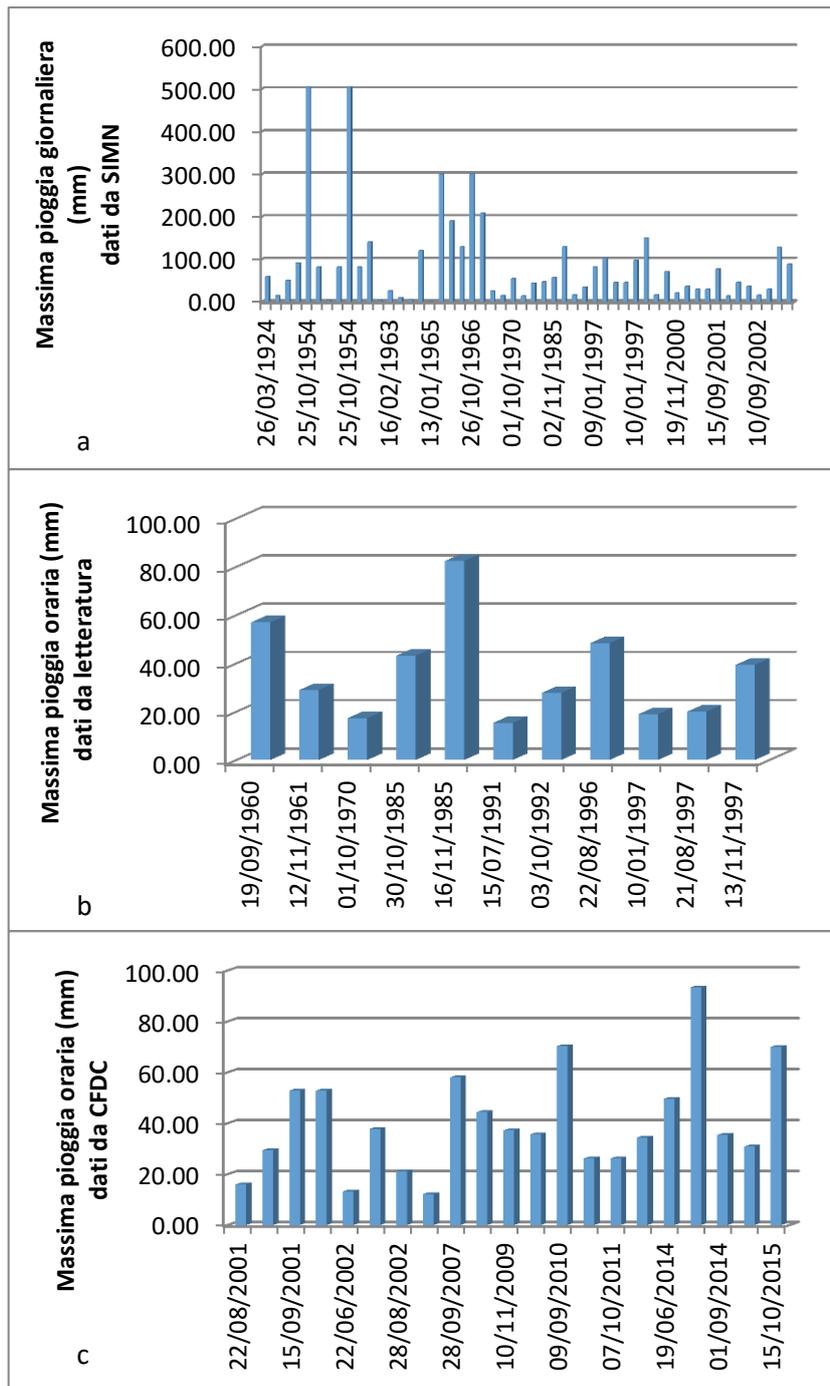


Figura 7: Dati pluviometrici associati agli eventi di flash floods a) massima cumulata giornaliera (dati da SIMN); b) massima pioggia oraria (dati da bibliografia); c) massima pioggia oraria (dati da CFDC).

Con i dati a disposizione è stato possibile ricostruire soltanto 22 eventi pluviometrici, quantitativo statisticamente insufficiente per poter definire delle soglie d’innesco.

Per ogni evento di pioggia ricostruito sono stati inseriti all’interno del database anche i valori di massima precipitazione oraria. Dal diagramma in figura 7c si evince come questo valore è in media pari a 40 mm, ma vi sono molti casi in cui la precipitazione ha una durata inferiore all’ora,

trattandosi appunto di eventi particolarmente intensi, localizzati, improvvisi e di breve durata che vengono definiti dai mass media “bombe d’acqua”. Ad esempio, durante gli eventi di flash floods del Novembre 2014, che hanno interessato gli abitati di Solofra e Volturara Irpina (AV), sono stati registrati 93,4 mm in 40 minuti dal pluviometro di Solofra (Santo et al., 2017).

4.4 Analisi dei danni

Tra le informazioni collezionate all’interno del database, particolare attenzione è stata rivolta ai danni provocati da questi eventi. I danni provocati possono aiutarci a comprendere l’intensità dell’evento e la sua severità. L’entità del danno dipende dalla presenza di elementi a rischio, è naturale quindi che le informazioni collezionate sono state influenzate dal grado di urbanizzazione dell’area all’epoca in cui si è verificato l’evento.

Sono state inserite nel database le informazioni relative ai danni causati ai beni ed all’uomo.

Per i danni causati alle cose le informazioni sono state catalogate in classi: 1) orti e giardini; 2) beni storici ed architettonici; 3) industrie; 4) abitazioni private; 5) strade; 6) sottoservizi.

Si conoscono i danni causati dal 24 % degli eventi collezionati, nella maggior parte dei casi si tratta di strade ed abitazioni private (figura 8). Tra i centri abitati più volte danneggiati ritroviamo Padula e Sala Consilina. Sono stati interessati maggiormente i bacini carbonatici senza copertura piroclastica, conseguenza del fatto che la granulometria del materiale carbonatico, che può essere preso in carico dalla corrente, provoca naturalmente danni maggiori delle granulometrie fini dei bacini vulcanici.

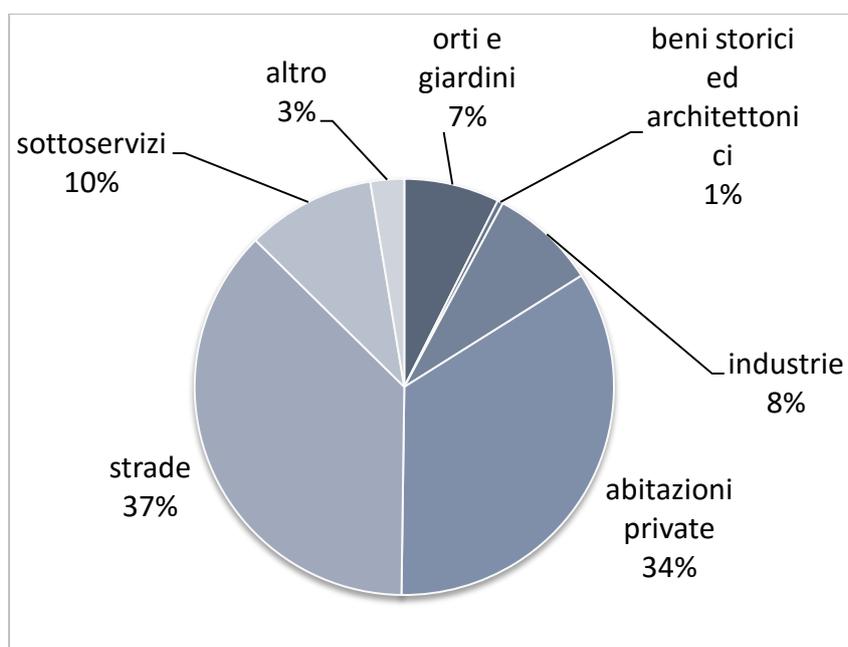


Figura 8: categorie danneggiate.

Per quanto concerne i danni alle persone, sono stati inseriti nel database il numero di vittime, feriti, senzatetto e dispersi. In molti casi, purtroppo, l'informazione risulta essere generica, del tipo "alcune vittime" per questo motivo è stato inserito anche il dato alfa-numeric. In altri casi la fonte riporta il numero totale delle vittime per evento e non per i singoli comuni, come ad esempio per gli eventi del 1581 (700-1000 vittime), 1899 (circa 100 vittime), 1924 (circa 100 vittime), 1910 (oltre 100 vittime).

Il 17 % degli eventi raccolti ha causato danni all'uomo, nella maggior parte dei casi si tratta di vittime purtroppo (fig. 9). È importante sottolineare come si hanno eventi, di inizio secolo scorso, per cui le fonti consultate riportano danni all'uomo ma non ai beni. Questo è difficile da credere, ma può essere legato innanzitutto ad una minore urbanizzazione, ed al fatto che quando vi erano vittime, feriti o dispersi, i danni ai beni divenivano di secondaria importanza e quindi non venivano sempre riportati.

Così come per i danni ai beni, anche in questo caso si registra un numero maggiore di danni all'uomo nei bacini carbonatici rispetto ai bacini vulcanici.

Per gli eventi che hanno causato più di 100 vittime, trattandosi di eventi di estrema severità, si presume che il numero di vittime sia dovuto contemporaneamente a flash floods, frane ed inondazioni, ma nei bacini di piccole dimensioni non è facile valutare il numero di vittime causate solo dai flash floods.

Tutti gli eventi che hanno causato più di 100 vittime si sono verificati in Ottobre, mese particolarmente piovoso alle nostre latitudini. Per questi eventi il tempo di ricorrenza medio è pari

a 62 anni, mentre per tutti gli altri eventi è uguale a 3 anni. A causare il maggior numero di danni alle persone sono gli eventi che si verificano nei bacini di piccole dimensioni, appartenenti alla prima classe: estensione minore di 3 km². Ciò è dovuto al basso tempo di corrivazione che li caratterizza, il bacino risponde il maniera immediata e repentina ad eventi pluviometrici di elevata intensità e breve durata, il preavviso perciò è poco o nessuno.

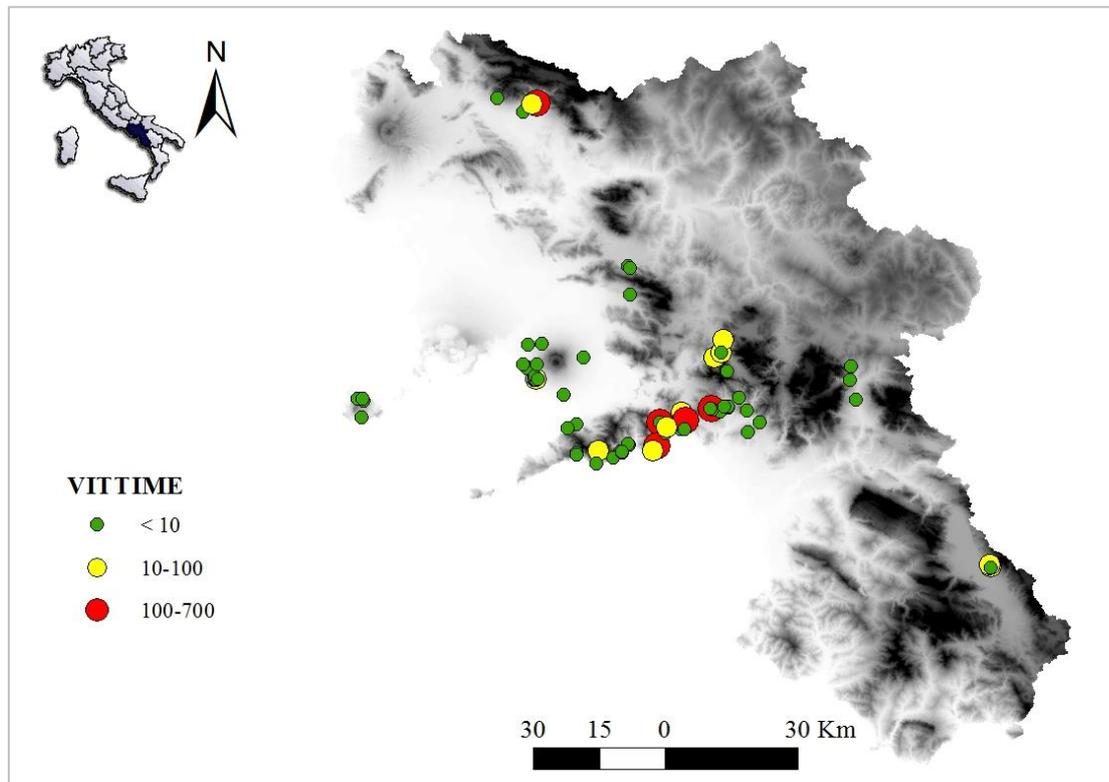


Figura 9: distribuzione delle vittime causate da flash floods sul territorio.

Relativamente ai feriti, dispersi e senzatetto il loro numero è particolarmente basso considerando il numero totale di eventi nel database, a maggior ragione se lo si confronta con il numero di eventi che hanno causato vittime. Questo indica che le fonti utilizzate sottovalutano questo tipo di danni

La modellazione ha avuto progressi sostanziali negli ultimi decenni (Rickenmann, 1999, Hussin et al., 2012) e grazie alla crescente diffusione di tecnologie sempre più avanzate, sono stati sviluppati numerosi modelli che consentono di simulare un'alluvione torrentizia.

La modellazione della deposizione in aree di conoide è utile ai fini della redazione di carte di pericolosità perché consente di ipotizzare diversi scenari e pianificare le emergenze, costituisce inoltre un vantaggioso strumento nella fase di progettazione di opere di difesa. In aggiunta rappresenta un prezioso mezzo per validare i dati di campo.

Le potenzialità delle nuove tecnologie informatiche consentono di risolvere equazioni molto complicate in breve tempo; la complessità è rappresentata dalla presenza di numerosi parametri utili per cercare di avvicinarsi sempre più alla realtà, cercando, nel caso dei *debris flow*, di modellare una miscela bifasica solido-liquido in percentuali variabili.

I fenomeni di flash floods sono contraddistinti da una cronica mancanza di dati, sia per quanto riguarda le intensità della pluviometria, sia per quanto attiene le portate dei corsi d'acqua ed il volume dei sedimenti trasportati (Cavalli et al., 2007). Come più volte ricordato, interessano bacini di piccole dimensione che nella maggior parte dei casi non sono monitorati. Per questo i rilievi di campo post-evento e le ricostruzioni idrologiche, sono elementi preziosi per l'approfondimento e lo studio di questi pericolosi fenomeni che sono sempre più frequenti (Hicks et al., 2005; Vivoni et al., 2006).

Bisogna tener ben presente, però, che qualsiasi modello si utilizzi non riuscirà a riprodurre fedelmente la realtà, per cui bisognerebbe prima di tutto ridurre l'incertezza dei dati di input e poi, solo in un secondo momento, eventualmente modificando le equazioni del modello, aggiungere complessità per avvicinarsi ai processi reali (Sangati, 2009).

I metodi utilizzati per predire la deposizione delle aree di conoide posso essere sostanzialmente divisi in: metodi empirico-statistici (Hsu, 1978; Corominas, 1996; Rickenmann, 1999), analitici (Sassa, 1988; Hungr, 1995; Hurlimann et al., 2007) e metodi numerici (Denlinger & Iverson, 2004; Crosta et al., 2009; Hungr & McDougall, 2009).

Tra i metodi empirici ritroviamo il metodo sviluppato da Iverson et al. (1998) per la definizione delle aree inondate dai *lahar*; le relazioni empiriche derivate sono state applicate anche in Italia da Crosta (2003) e Berti e Simoni (2007) per la modellazione dei *debris flows*.

I metodi numerici utilizzano modelli dinamici per la meccanica dei fluidi applicando le equazioni di conservazione della massa, del momento e dell'energia (Hussin et al., 2012). Possono essere 1D se il flusso si muove in una sola dimensione (in piano), o 2D se il flusso si muove in piano ed trasversalmente alla topografia. Nei modelli dinamici, la reologia utilizzata consente di simulare il comportamento della miscela solido-liquido. Le reologie più comunemente utilizzate nei modelli dinamici sono: resistenza frizionale o di Coulomb (Hungri & McDougall, 2009); la resistenza frizionale e turbolenta di "Voellmy" (Voellmy, 1955); quella visco-plastica di "Bingham" (Coussot, 1997; Malet et al., 2004) e la resistenza "Quadratica" (O'Brien et al., 1993). I modelli che usano la reologia di Voellmy sono tra i più diffusi perché hanno ottenuto buoni risultati nella simulazione dei *debris flows* e perché necessitano di soli due parametri per calibrare la modellazione (Ayotte & Hungri, 2000; Hurlimann et al., 2003; Rickenmann et al., 2006; Pirulli & Sorbino, 2008; Hungri & McDougall, 2009, Hussin et al., 2012).

In questo lavoro di tesi si è utilizzato un modello numerico 2D dinamico che si basa sulla reologia di Voellmy: RAMMS (RAPID Mass Movements Simulation) (Christen et al., 2010). La scelta è ricaduta su questo modello perché è stato utilizzato per numerosi eventi di *debris flows* in diversi contesti geologici delle Alpi (Mammoliti 2011, Hussin et al., 2012), e sono stati ottenuti buoni risultati in termini di velocità e deposizione nelle aree di conoide. In aggiunta è stato possibile trascorrere due mesi presso l'Istituto Federale di Ricerca Svizzero (WSL) dove il software è stato sviluppato, ciò ha consentito di apprendere al meglio l'uso e le potenzialità del modello che è stato applicato ai contesti calcarei dell'Appennino Campano.

5.2 Il modello RAMMS

RAMMS (Rapid Mass Movements Simulation), sviluppato dall'Istituto Federale di Ricerca (WSL) di Birmensdorf e l'Istituto Federale per lo Studio della Neve e delle Valanghe (SLF) di Davos (Svizzera) (WSL/SLF, 2010), è nato per simulare le valanghe, al fine di redigere carte di rischio e per applicazioni pratiche per gli ingegneri ambientali. Attualmente comprende tre moduli: *avalanche*, *debris flows* e *rockfall* consentendo quindi di modellare frane, crolli, valanghe e *debris flows* (Schramlet et al., 2015, Christen et al., 2008, 2010, 2012, Graf & McArdell 2008, 2011, Hussin et al., 2012, Sardar et al., 2017, Cesca & D'agostino, 2008).

Nelle Alpi svizzere è stato testato e soprattutto validato in siti campione come Vallée de la Sionne (per le valanghe), Illgraben (per i *debris flows*), Veltheim (per le frane superficiali). Di

recente, il modulo relativo ai *debris flow* è stato integrato con una nuova versione che tiene conto dell'erosione e restituisce i valori di massima profondità di erosione (Frank et al., 2015).

Le principali applicazioni di RAMMS sono: redazioni di carte di rischio e zonazione, valutazioni di rischio per edifici civili e vie di comunicazione, programmazione e valutazione di misure di protezione (<http://ramms.slf.ch/ramms/index.php>).

Il modulo relativo ai *debris flows* è stato sviluppato per simulare flussi detritici (Graf &McArdell 2008; 2011), è stato utilizzato in Svizzera ed altrove per l'analisi del rischio connesso ai *debris flows* ed anche come strumento di supporto nella definizione di opere di mitigazione.

Il modello risolve le equazioni 2D del moto dell'acqua per flussi granulari, utilizzando la reologia di Voellmy. Esso divide la resistenza al flusso della massa in un coefficiente di attrito di tipo Coulombiano (μ) ed uno di tipo turbolento (ξ).

La resistenza alla frizione è rappresentata da :

$$S = \mu\rho Hg\cos(\varnothing) + \frac{\rho g U^2}{\xi} \quad (5.1)$$

In cui μ è l'attrito, ρ densità del flusso, \varnothing l'inclinazione versante, H altezza flusso, U velocità flusso; ξ l'attrito viscoso turbolento.

Per calibrare il modello di Voellmy, l'utente simula in primis eventi storici ben documentati, in modo da determinare i parametri migliori ed utilizzarli nelle analisi successive (Christen et al, 2012).

RAMMS usa la riduzione del volume totale (*total variation diminishing TVD*) col metodo degli elementi finiti (Christen et al., 2008; Graf & McArdell, 2008). In questo modo discretizza la topografia in celle ed il valore di ogni singola cella viene calcolato tenendo conto dei valori sui bordi delle celle vicine (Shraml et al., 2015). Il software necessita di pochi input: topografia, idrogramma di piena, parametri di frizione.

Il software è dotato di numerose funzionalità che consentono di simulare scenari differenti: è possibile includere i depositi di un evento precedente modificando ad esempio la topografia o aggiungendo uno *shapefile*, simulare la presenza di vie preferenziali di flusso (ad esempio una strada) modificando i parametri di frizione, aggiungere o escludere opere di mitigazione.

Di seguito verranno illustrati le operazioni principali da eseguire per simulare un *debris flow*.

Il primo passo necessario riguarda la topografia dell'area di studio, che viene caricata nel software sottoforma di modello digitale del terreno (DEM) in formato ASCII. I risultati della simulazione saranno strettamente legati alla risoluzione ed accuratezza della topografia. A questa è possibile sovrapporre un'ortofoto o delle immagini come *shapefile*. Successivamente si disegna

direttamente in RAMMS, o si carica come *shapefile*, il dominio di calcolo (*domain area*) l'area presunta di deposizione, quella che sarà interessata dal *debris flows* e l'area di rilascio (*release area*) che corrisponde al punto in cui si colloca l'idrogramma di piena.

Successivamente si seleziona la risoluzione del grid che si vuole utilizzare, la durata della simulazione e l'intervallo di calcolo, la densità ρ (kg/m^3) ed il coefficiente di spinta λ .

Nella sezione relativa ai parametri di frizione si inserisce il valore di μ (coefficiente di attrito cinetico) e ξ (coefficiente di attrito turbolento).

I criteri che stabiliscono la fine della simulazione sono legati alla quantità di moto, difficoltà che si incontra a fermare un corpo, dal cui valore dipendono la propagazione o l'arresto della massa fluente. Si inseriscono quindi, come ultimo passo, i criteri per il termine della simulazione: si sceglie un valore percentuale che è uguale ad un valore soglia, ovvero se si imposta il 10%, la simulazione si ferma quando il 90 % della massa si è arrestata.

Il programma restituisce la distribuzione delle altezze dei depositi, la velocità del flusso, la pressione e la quantità di moto della massa. Tutti questi parametri sono visualizzabili anche nei loro valori massimi. È possibile produrre mappe 2D e 3D nonché animazioni esportabili in formato GIF. Tutti i risultati ottenuti possono essere esportati anche come *shapefile* utilizzabili in GIS.

5.3 Stima dei parametri per la simulazione

Per bacini di piccole dimensioni è raro avere a disposizione i parametri idraulici ed ancor di più difficile conoscere i parametri di frizione, per questo motivo in molti casi si ricorre all'uso di relazioni empiriche.

La difficoltà maggiore che si riscontra nella simulazione dei *debris flow* è la varietà di composizione della miscela liquido-solido che ha una forte influenza nella scelta dei parametri di frizione. Il modulo RAMMS *debris flow* utilizza un modello monofasico, non permette di distinguere la parte solida dall'acqua. Per questo motivo è necessaria un'accurata ed attenta scelta e calibrazione dei parametri di frizione

L'approccio reologico di Voellmy, utilizzato da RAMMS, richiede il coefficiente di attrito cinetico μ ed il coefficiente di attrito turbolento ξ e per stimare i coefficienti più appropriati è stata utilizzata la seguente procedura di calibrazione (http://ramms.slf.ch/ramms/downloads/RAMMS_DBF_Manual.pdf):

μ , come primo tentativo, si setta pari alla tangente di α , dove α è l'angolo della zona di deposizione. Varia tra 0,05 e 0,4, ma nella pratica è stato riscontrato che nei water flow varia tra 0

e 0,05, nei *debris flows* tra 0,05 ed 0,1. Durante la simulazione μ si mantiene costante, a differenza di quanto avviene nella realtà in cui al fronte del flusso assume i valori massimi e non è costante in tutta la massa.

ξ , coefficiente di scabrezza, è collegato alla formula di Chezy (utilizzata nell'approccio Voellmy) ed è più difficile da calibrare. Il manuale d'uso suggerisce di impostarlo pari a 200 m/s^2 . Nei flussi in cui domina la componente solida (*debris flow*) varia tra 100 e 200 m/s^2 , nei water flow tra 200 - 1000 m/s^2 .

Per i casi di studio esaminati in cui non si avevano a disposizione i parametri idrologici, necessari per la costruzione dell'idrogramma di piena, sono state utilizzate delle relazioni empiriche.

Il volume di un *debris flow* è uno dei parametri più importanti da conoscere se si vuole fare una valutazione della pericolosità, inoltre è stato più volte dimostrato che il volume del *debris flow* è correlabile alla portata di picco per mezzo di relazioni empiriche (Hungry et al., 1984; Mizuyama et al., 1992; Takahashi et al., 1994). D'Agostino (1996) ha proposto alcune espressioni in grado di correlare i volumi di sedimento mobilizzati con le principali variabili che influenzano l'entità del fenomeno: superficie del bacino, pendenza del collettore, forma di trasporto, litologia, pendenza della conoide. Un buon livello di accuratezza è stato ottenuto dalla combinazione simultanea di quattro variabili (D'Agostino, 1996):

$$G_s = 39 A i^{0,5} IG(IT)^{-0,3} \quad (5.2)$$

in cui G_s è il volume del *debris flow*, A l'area del bacino, i la pendenza media del torrente, IG indice geologico (nel contesto campano è uguale a 1 per le rocce calcaree, 2 per le rocce vulcaniche), IT indice di trasporto (Aulitzky, 1982) uguale ad 1 per i *debris flow*.

Ottenuto il volume è necessario stimare la portata massima.

Rickenmann (1999) propone la seguente relazione ricavata dall'utilizzo di circa 150 eventi:

$$Q = 0.1 M^{0,833} \quad (5.3)$$

in cui Q è la portata di picco, M il volume del *debris flow*.

La relazione fornisce la portata massima per il bacino analizzato, naturalmente bisogna sempre considerare il contesto locale e se possibile le caratteristiche degli eventi pregressi.

5.4 Inquadramento dei bacini selezionati

I fenomeni di flash floods analizzati hanno interessato le seguenti municipalità della regione Campania:

Buccino (SA) Castellammare (NA) ,Paupisi (BN) e Quadrelle (AV). La loro localizzazione è riportata in figura 10.



Figura 10: localizzazione geografica bacini analizzati.

Per l'abitato di Buccino sono stati modellati eventi in due bacini: Matrura e Vadursi che si trovano nella frazione di Teglia. L'area è stata oggetto di uno studio di dettaglio in seguito agli eventi di flash floods che si sono verificati nell'Ottobre del 2011 (Santo et al., 2015). I due bacini si collocano nel settore meridionale della Piana di Buccino, una depressione tettonico-carsica del Monte Marzano. Nella piana si ritrovano limi e argille cui si alternano strati piroclastici che lateralmente lasciano il posto a depositi ghiaiosi e sabbiosi. I versanti carbonatici sono fortemente esposti al *weathering* atmosferico, per cui rappresentano la fonte principale di detrito. Uno stralcio di carta geologica, in scala 1:100.000, estratta da ISPRA, è riportata in figura 11.

Carta Geologica d'Italia 1:100000-foglio 198-EBOLI-ISPRA

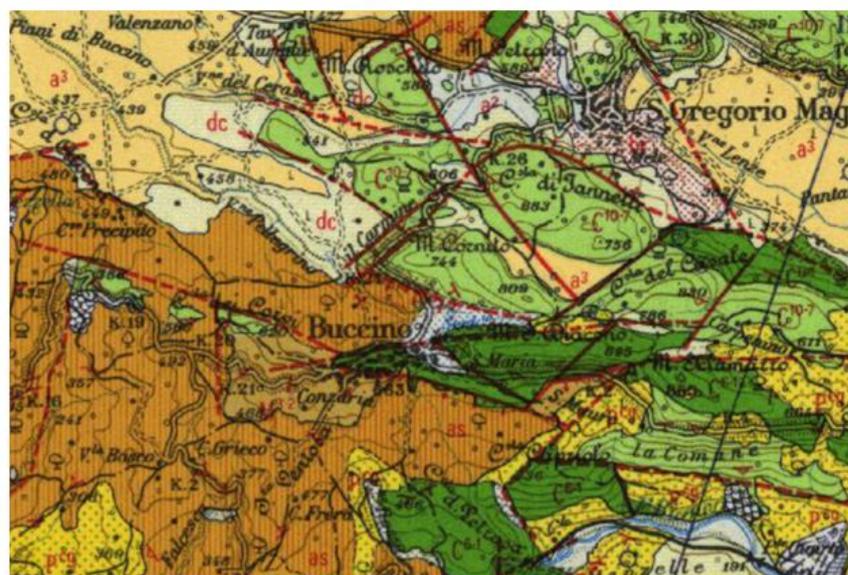


Figura 11: Carte Geologica dell'area di Buccino (SA).

I due bacini Matrura e Vadursi, hanno rispettivamente un'estensione pari a 5,4 km² e 9,7 km².

L'area alle pendici del Monte Camposauro, ed in particolare gli abitati di Paupisi e Solopaca, è stata colpita da un evento pluviometrico di elevata intensità nell'Ottobre del 2015, che ha innescato fenomeni di flash floods facendo registrare numerosi danni economici ai terreni agricoli ed alle abitazioni. Il massiccio carbonatico del Camposauro è costituito da calcari e calcari dolomitici di piattaforma carbonatica giurassici e cretacici delimitati verso nord dall'importante linea tettonica della valle del Fiume Calore, che con andamento ovest-est, mette a contatto i carbonati con potenti successioni clastiche di conoide e, più in profondità con i flysch miocenici. Nella piana alluvionale è possibile individuare diversi ordini di terrazzi fluviali (figura 12).

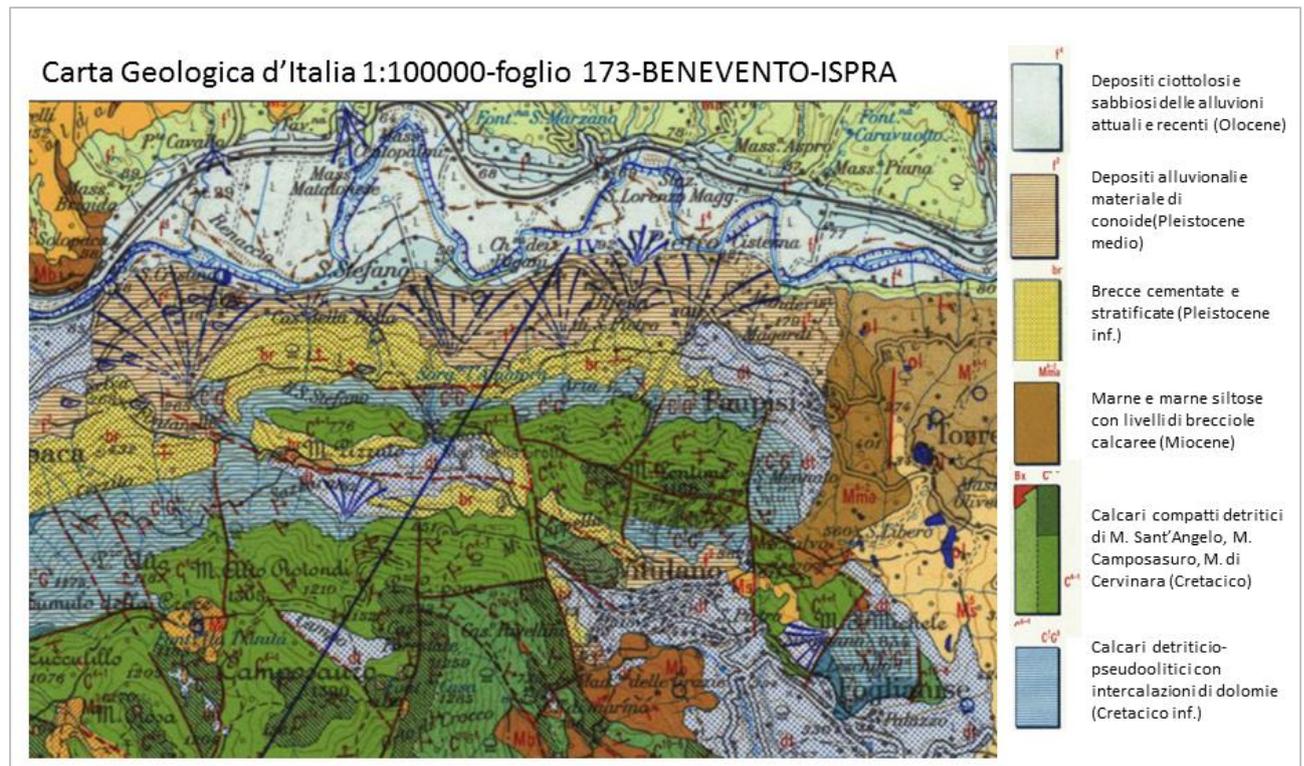


Figura 12: Carte geologica dell'area di Paupisi (BN).

I bacini analizzati si collocano tra le località San Pietro e Santo Stefano, corrispondono ai bacini numero 14, 15 e 16 della mappa post-evento di Santo (2017). Essi s'impongono sulla formazione carbonatica ed hanno un'estensione rispettivamente di 0,16 km², 0,41 km² e 0,39 km². La principale fonte di detrito è rappresentata da ghiaie e calcari; in occasione dell'evento dell'Ottobre 2015 sono stati trasportate ghiaie e blocchi del diametro compreso tra 40 cm ed pochi metri (eccezionalmente 1-2 m), (Santo et al., 2017).

Castellammare sorge alle pendici del Monte Faito e si affaccia direttamente sul Golfo di Napoli. Il versante settentrionale del M Faito è caratterizzato dalla presenza di calcari e calcari dolomitici di età cretacea, sui quali poggiano depositi piroclastici pomicei e cineritici attribuibili prevalentemente all'eruzione del Somma-Vesuvio del 79 D.C. (Bonardi et al., 1988). Nella zona pedemontana sono presenti potenti successioni clastiche di conoidi alluvionali che, in prossimità della costa, passano in eteropia a depositi alluvionali e marini. La carta geologica dell'area di Castellammare è riportata in figura 13.

I bacini analizzati in questo contesto hanno recapito diretto a mare e sono il bacino Cannetiello con un'estensione di 5 km² e San Pietro che ha un'area di 3,5 km².

Carta Geologica d'Italia 1:100000-foglio 185-SALERNO-ISPRA

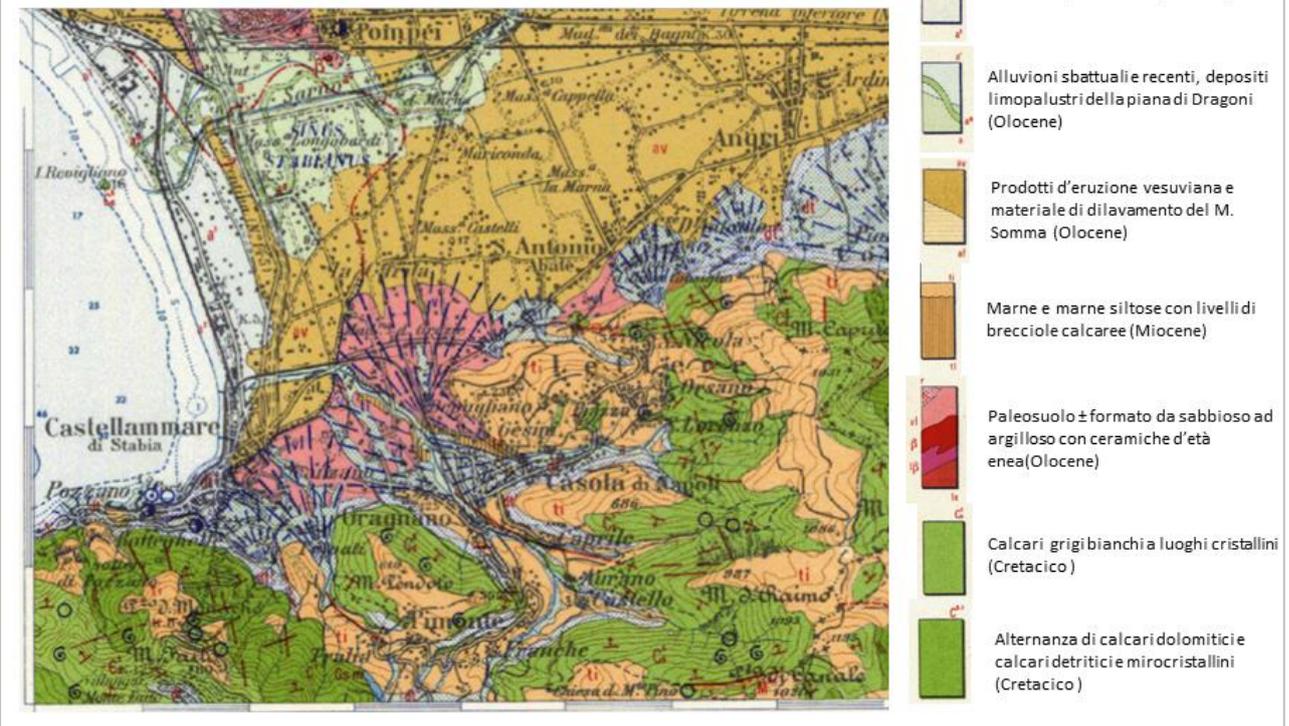


Figura 13: carta geologica dell'area di Castellammare di Stabia (NA).

L'abitato di Quadrelle si trova alle pendici della dorsale dei Monti di Avella, una monoclinale calcarea allungata in senso appenninico costituita da calcari giurassici e cretaci di piattaforma carbonatica. Alla base del rilievo si conservano depositi terrazzati di breccie cementate e diversi corpi di conoidi alluvionali ai quali si intercalano, nella parte più alta stratigraficamente, depositi piroclastici olocenici (CARG, 2010). In figura 14 è riportata la carta geologica in scala 1:100000, estratta da ISPRA, dell'area di Quadrelle.

Il bacino in cui è stata simulato un flash flood si trova alle spalle del centro abitato, in località Vallone Acquaserta, ed ha un'estensione di 9 km².

Carta Geologica d'Italia 1:100000-foglio 185-SALERNO-ISPRA

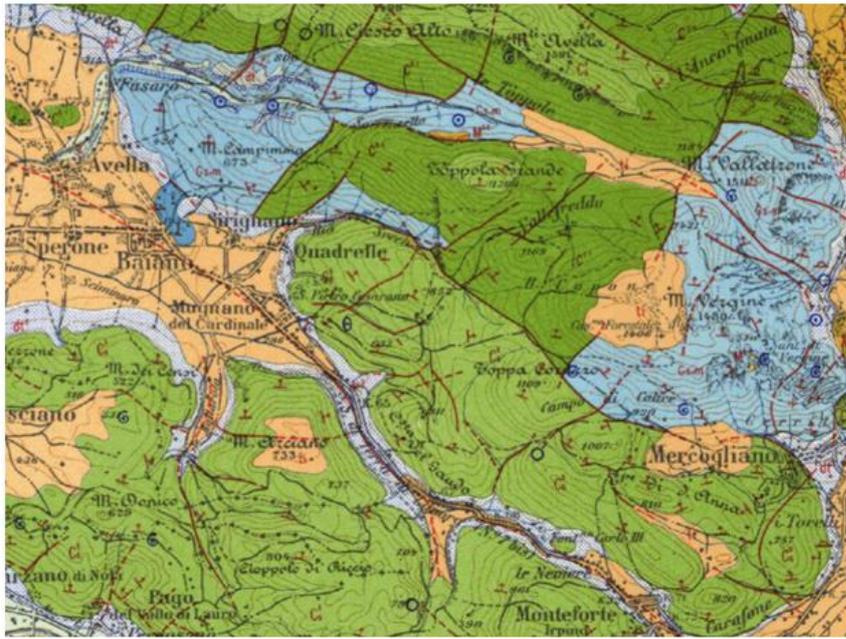


Figura 14: carta geologica dell'area di Quadrelle (AV).

Capitolo 6 APPLICAZIONE DI RAMMS PER LA SIMULAZIONE DI SCENARI FUTURI

6.1 Casi di studi analizzati

Nei test effettuati per i bacini di Castellammare e Quadrelle sono state utilizzate le relazioni empiriche presentate in sezione 5.3 per la stima della portata di picco (equazioni 5.2, 5.3).

Non si hanno a disposizione dati di campo relativi ai volumi depositati negli eventi pregressi, dunque la simulazione è stata fatta a scopo preventivo, per ipotizzare scenari futuri d'evento in diverse condizioni.

6.1.1 Il Bacino di Quadrelle (AV)

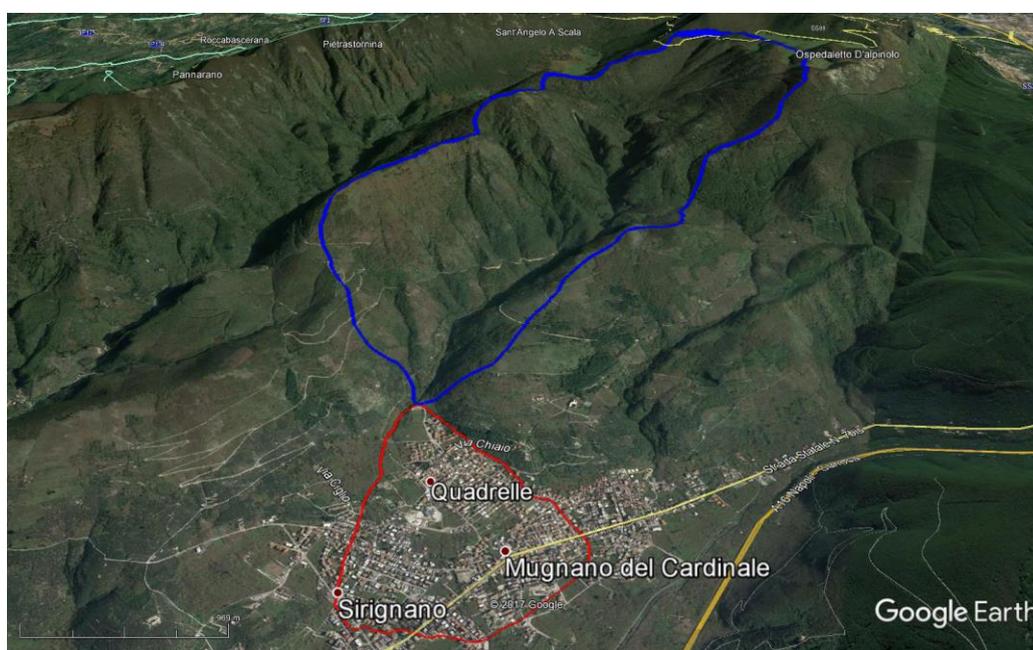


Figura 15: Bacino analizzato dell'abitato di Quadrelle.

La municipalità di Quadrelle, nell'arco temporale coperto dal database, è stata interessata 4 volte da eventi di flash floods. L'evento più recente è del 13 novembre 1997, fortunatamente non risultano danni causati dagli eventi pregressi. In tabella 3 sono riportati i principali parametri morfometrici del bacino di Quadrelle.

Tabella 3: principali parametri morfometrici dei sistemi bacino –conoide di Quadrelle

	area (km ²)	Pendenza media (°)	H_min (m s.l.m.)	H_max (m s.l.m.)	H_media (m)	lunghezza_asta_principale (km)	Indice di Melton
Bacino	9,05	29	328,89	1401,82	944,35	6,27	0,36
Conoide	1,34	7	230,9	342,89	269,96		

Quadrelle rappresenta il primo caso di studio analizzato, per cui i test eseguiti sono serviti a comprendere meglio il significato del coefficiente d'attrito μ e la sua influenza nella simulazione.

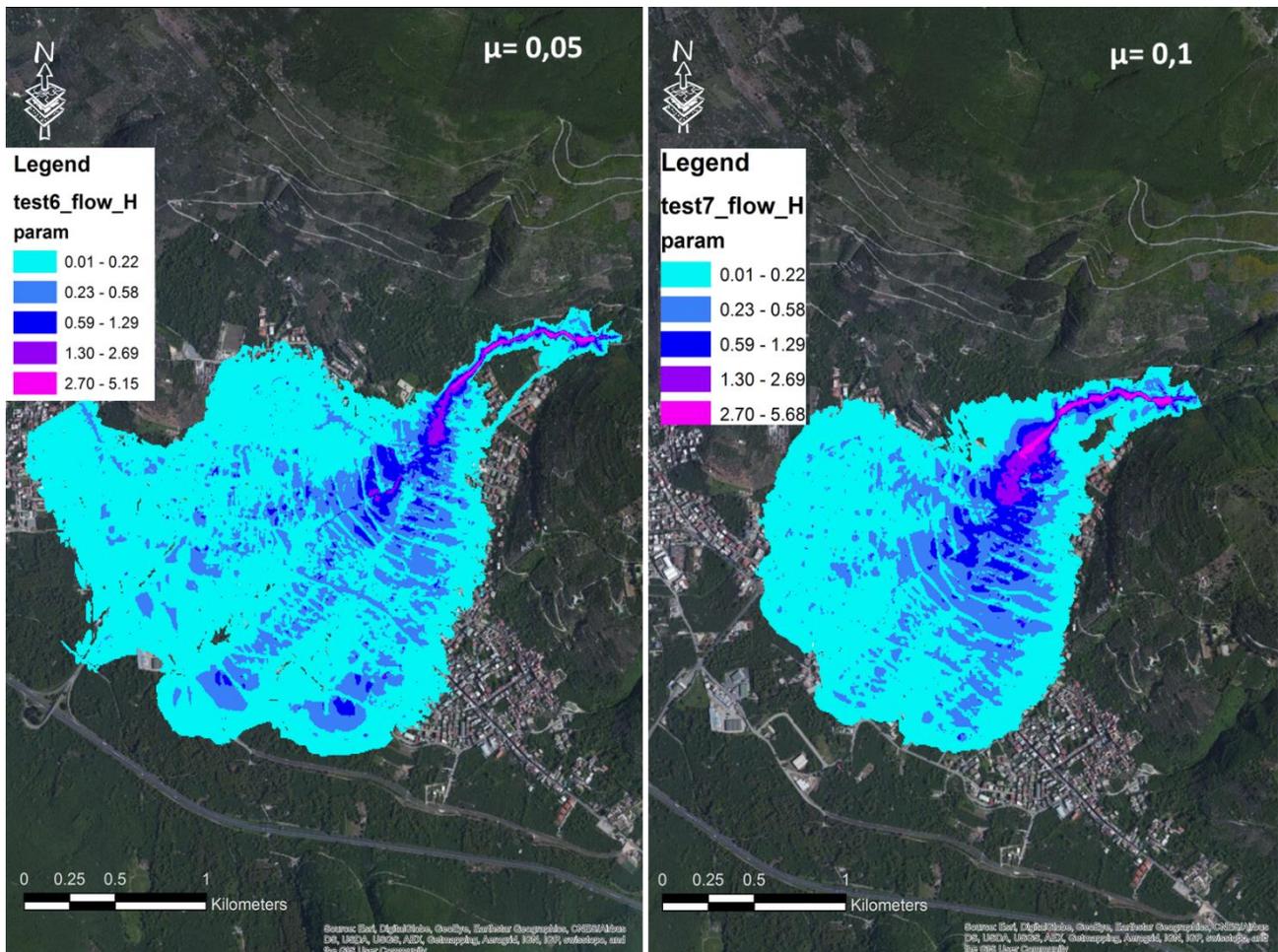


Figura 16: influenza del coefficiente d'attrito Coulombiano nella simulazione.

In figura 16 sono riportati due test che si differenziano solo per i valori del coefficiente d'attrito cinetico μ utilizzato (0,05 e 0,1). Nel test eseguito con μ pari a 0,05 il flusso si espande su un'area maggiore essendo minore la resistenza del flusso, di conseguenza diminuisce anche l'altezza dei depositi, perché minore è la componente solida considerata. Come precedentemente affermato per i fenomeni di water flow il coefficiente d'attrito cinetico tende allo 0, mentre per i fenomeni di debris flow tende al valore di 0,1.

Grazie ai dati lidar forniti dal Ministero dell'Ambiente, sono state effettuate varie simulazioni impostando diverse risoluzioni del grid, per comprendere al meglio l'influenza e l'importanza della topografia.

Il software consente di impostare la risoluzione della topografia da utilizzare, essa influenza anche il tempo della simulazione. RAMMS lavora cella per cella, per cui le differenze che si hanno con grid differenti sono apprezzabili, nel test eseguito con il grid a 10 m il flusso si dirama, deviando a destra in un'area topograficamente più elevata (fig.17).

È consigliato sempre verificare i risultati ottenuti con un'attenta analisi della topografia ed un controllo sul campo in modo da evitare paradossi.

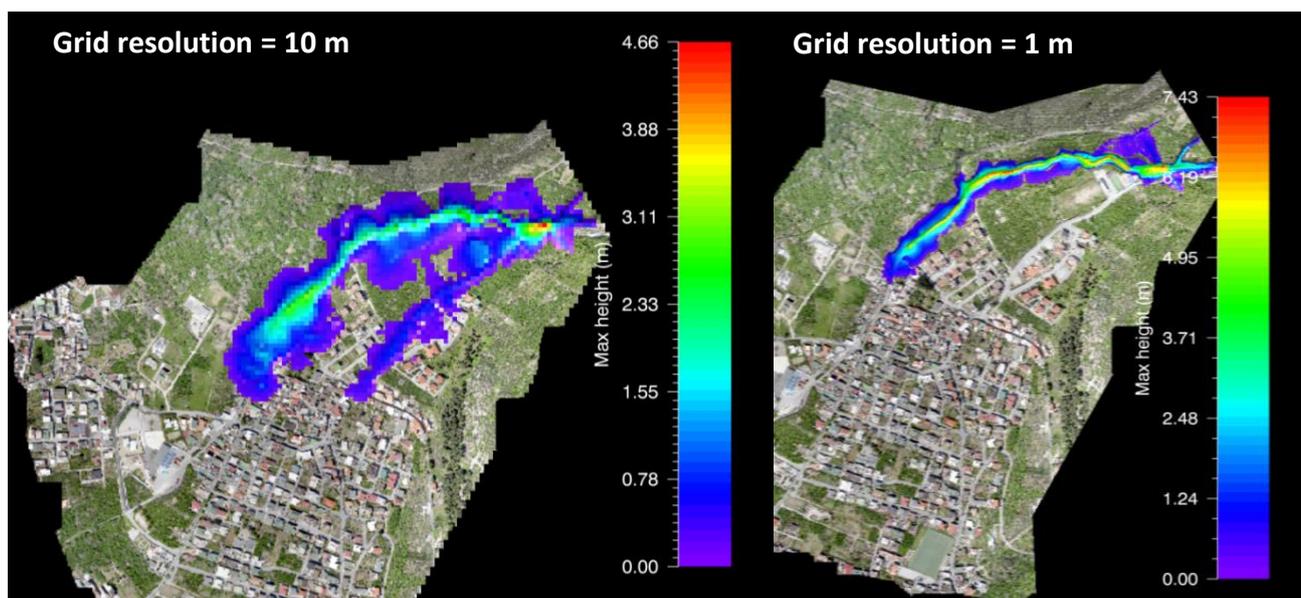


Figura 17: differenza tra test eseguiti con grid a risoluzione diversa.

6.1.1 I bacini di Castellammare di Stabia (NA): Cannetiello e San Pietro

I due bacini di Castellammare per cui sono state eseguite le simulazioni con RAMMS sono denominati Cannetiello e San Pietro (fig.18), appartengono alla classe dei bacini carbonatici con copertura piroclastica e recapito a mare.

All'interno del database sono presenti 10 eventi di flash floods che hanno interessato l'area, il più antico censito risale al 1931. Tali eventi hanno fatto registrare numerosi danni soprattutto agli edifici civili ed alle abitazioni. Gli ultimi eventi alluvionali torrentizi risalgono al 9 novembre 1987 e all'8 ottobre del 2000 (Santo et al., 2000).



Figura 18: bacini San Pietro e Cannitiello in cui sono stati simulati gli eventi di flash floods.

Nella tabella 4 sono riportati i principali parametri morfometrici del bacino Cannitiello e San Pietro, ricavati in ambiente GIS con il DEM 1mx1m.

Tabella 4: principali parametri morfometrici dei sistemi bacino –conoide Cannitiello e San Pietro.

	area (km ²)	Pendenza media (°)	H_min (m)	H_max (m)	H_media (m)	lunghezza_asta_principale (km)	Indice di Melton
Bacino_Cannitiello	5,00	28	17,47	1276,55	525,19	4,40	0,56
Conoide_Cannitiello	0,28	3	3,8	20,41	6,24		
Bacino_San Pietro	3,49	34	17,79	1200,79	525,19	3,27	0,64
Conoide_San_Pietro	0,11	4	1,2	17,73	6,24		

Nell'area affiorano rocce calcaree su cui poggiano depositi piroclastici, dunque per la stima del volume del *debris flow* sono stati utilizzati diversi Indici Geologici compresi tra 1 e 2: D'Agostino (1996) suggerisce 1 per le rocce calcaree e 2 per le rocce laviche degradate, tufi basaltici, breccie. Seppur ricavata per un contesto geologicamente differente, la formula di D'Agostino risulta di facile utilizzo, ed è stata più volte utilizzata, in contesti diversificati, dai ricercatori del WSL per arrivare a ricavare le portate di picco fondamentali per la simulazione con RAMMS. Sono state inoltre utilizzate diverse portate di picco, in quanto la formula empirica di Ricknemann (1999) restituisce il valore massimo per cui sono stati considerati anche valori inferiori per simulare eventi di diversa entità

Per il bacino San Pietro sono stati eseguiti 10 test al fine di stimare i parametri di frizione più appropriati.

I risultati migliori sono stati ottenuti con μ pari a 0,1, quindi fenomeni di *debris flow*, così come si è ricavato dall'applicazione della formula di Scorpio (2016) che definisce la tipologia prevalente di trasporto e confermato dagli eventi pregressi. ξ è stato mantenuto uguale a 200.

Il centro abitato di Castellammare sorge su detriti alluvionali, in particolare l'area della conoide San Pietro è attraversata dalla linea ferroviaria Napoli-Sorrento, ed è limitrofa all'area portuale. In figura 19 si riporta il risultato dell'elaborazione n°10: la zona in cui si avrebbero le altezze maggiori di deposito è l'area orientale della conoide, in cui è sita anche la casa comunale di Castellammare di Stabia. Si evidenzia inoltre un'area di ristagno nella parte centro-orientale del bacino, ove vi è una depressione a ridosso della strada panoramica SS145.

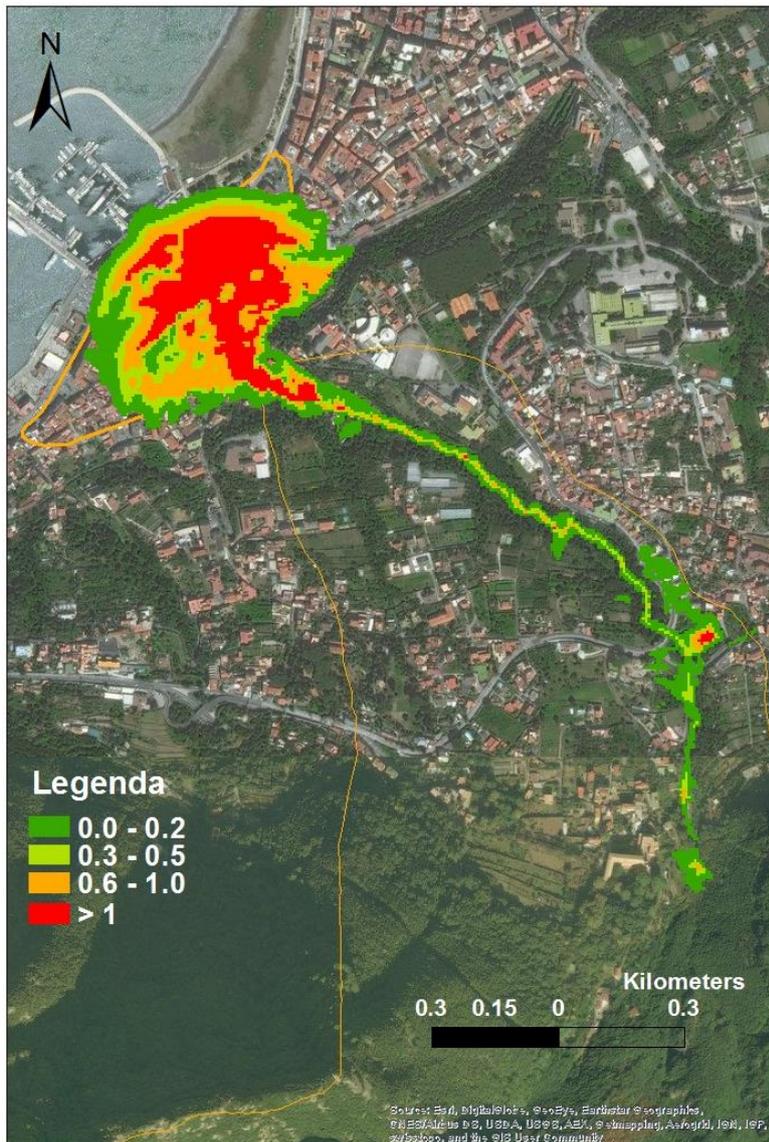


Figura 19: simulazione nel sistema bacino-conoide San Pietro.

Per il bacino di Cannetiello, dopo aver stabilito i parametri di frizione migliori, sono state sfruttate le potenzialità del software per simulare l'effetto delle strade sul deflusso del *debris flow*. È stato inserito nella simulazione uno *shapefile*, corrispondente alle strade che da Viale Europa, alveo-strada che arriva nell'area di conoide, si diramano nella conoide in direzioni differenti. In figura 20 vengono confrontati 2 test identici per i parametri di frizione e dell'idrogramma utilizzati, si differenziano per la presenza delle strade inserite nel test 10 e rappresentate in rosso nell'immagine (da sinistra verso destra: viale Regina Margherita, via Luigi Denza, viale Guglielmo Marconi ed un tratto della SS145). Alle strade è stato assegnato un coefficiente d'attrito μ minore di quello assegnato al *debris flow* per simulare la minore resistenza che incontra il flusso. I risultati dimostrano che si raggiungono velocità maggiori, e che di conseguenza l'altezza dei depositi con valori massimi aumenta sensibilmente. In particolare, nella conoide Cannetiello, a cause delle

naturali pendenze, si ha una maggiore deposizione nella parte occidentale in entrambe le simulazioni. Nel test 10, in cui sono comprese le strade, l'altezza dei depositi aumenta maggiormente nella parte occidentale, ed in particolare viale Regina Margherita e viale Marconi costituiscono vie preferenziali di flusso.

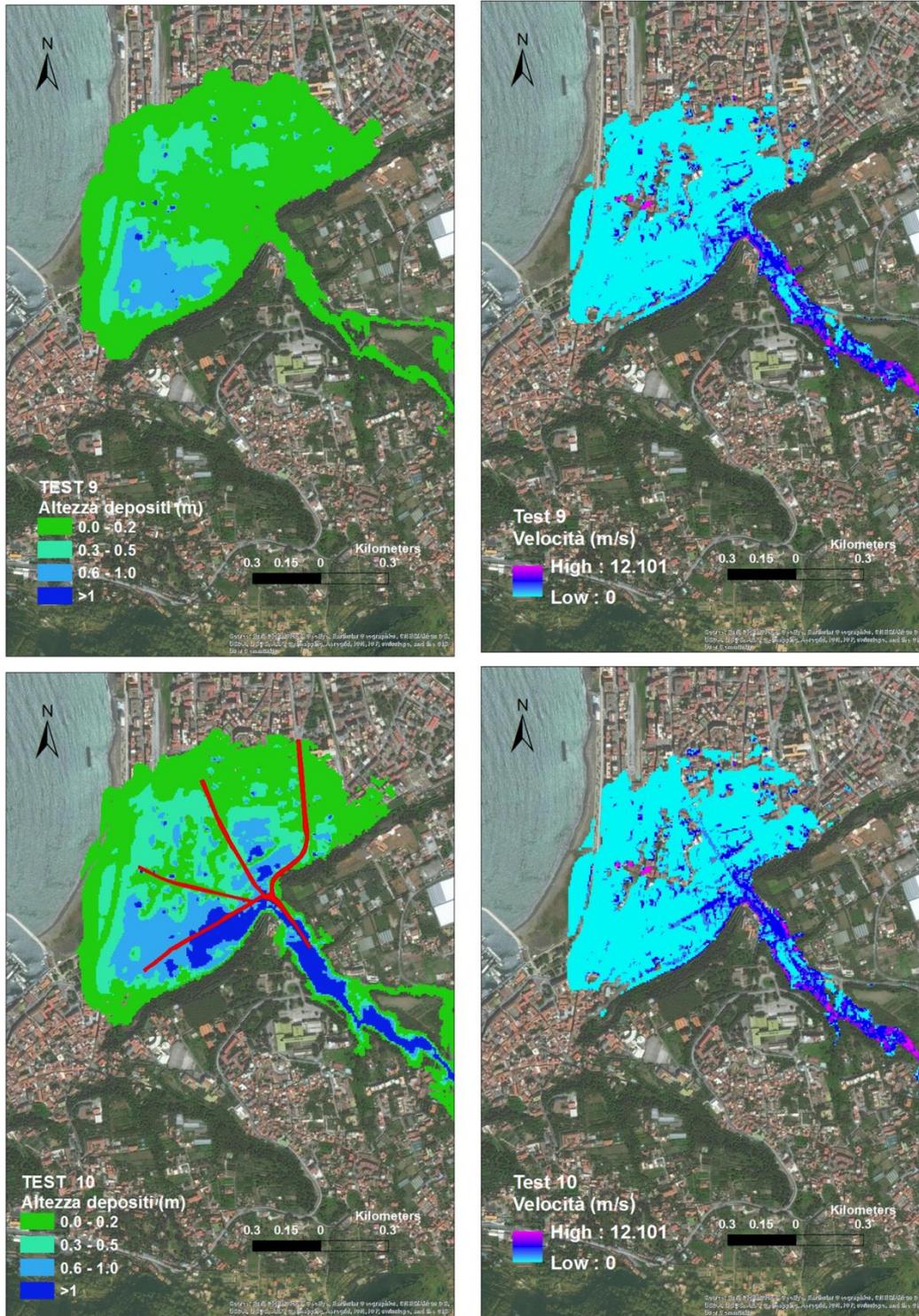


Figura 20: confronto per il bacino Cannetello tra le altezze dei depositi e la velocità per il test 9 ed il test 10 in cui sono state inserite le strade (in rosso).

7.1 Metodi per la validazione dei test

Validare i risultati ottenuti da una modellazione significa confrontare il modello di previsione adottato con i dati reali per valutarne l'accuratezza ed il potere predittivo (Begueria, 2006)

La *confusion matrix* è una tabella a doppia entrata che consente di confrontare i dati simulati con i dati misurati in maniera oggettiva. Essa mostra il numero di osservazioni predette in modo corretto e non corretto, sia per i casi osservati positivi che negativi (Begueria, 2006).

Tabella 5: *Confusion matrix*

	Predetti positivi	Predetti negativi
Osservati positivi	VP (num.di Veri Positivi)	FN (num. di Falsi Negativi)
Osservati negativi	FP (num. di Falsi positivi)	VN (num. di Veri Negativi)

Gli acronimi VP, FN, FP, VP nella *confusion matrix* indicano:

VP, veri positivi, numero di casi osservati positivi predetti come positivi;

FN, falsi negativi, numero di casi osservati positivi predetti come negativi;

FP, falsi positivi, numero di casi osservati negativi predetti come positivi;

VN, vero negativo, numero di casi osservati negativi predetti come negativi.

Dalla combinazione dei parametri della *confusion matrix* derivano indici statistici, comunemente usati nella valutazione dei modelli di previsione (Bekkar et al.,2013).

Gli indici statistici di accuratezza principali sono riportati in tabella 6.

Tabella 6: *indici statistici di valutazione derivati dall'analisi della confusion matrix*

Accuratezza (<i>Accuracy</i>)	$\frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN}$	Proporzione di osservazioni correttamente classificate
Tasso di errore (<i>Error rate</i>)	$\frac{FP + FN}{VP + VN + FP + FN}$	Proporzione di osservazioni non correttamente classificate
PPP-Potere predittivo positivo (<i>Positive Predictive Power</i>)	$\frac{VP}{VP + FP}$	Proporzione di veri positivi sul totale dei predetti positivi

NPP-Potere predittivo negativo (<i>Negative Predictive Power</i>)	$\frac{VN}{VN + FN}$	Proporzione dei veri negativi sul totale dei predetti negativi
POD- Probabilità di previsione (<i>Probability Of Detection o Sensitivity</i>)	$\frac{VP}{VP + FN}$	Proporzione dei casi positivi correttamente predetti
POFD-Probabilità di previsione falsa (<i>Probability of False detection</i>)	$\frac{FP}{FP + VN}$	Proporzione di predetti positivi sul totale degli osservati negativi
POFA –Probabilità di falsi allarmi (<i>Probability of False Alarm</i>)	$\frac{FP}{FP + VP}$	Proporzione tra falsi positivi sul totale delle previsioni

L'accuratezza, nota anche come efficienza, è uno degli indici maggiormente diffusi in letteratura, e può essere considerata equivalente all' R^2 (coefficiente di regressione lineare) in statistica. Il tasso di errore è l'opposto dell'accuratezza (Begueria , 2006).

Il potere predittivo positivo (PPP) di un test risponde alla domanda: “quanti dati simulati positivi sono realmente positivi?”; al contrario il potere predittivo negativo (NPP) risponde alla domanda: “quanti dati predetti negativi sono realmente negativi?” (Drobatz, 2009).

La Probabilità di previsione (POD) è la proporzione di casi positivi correttamente predetti e nel test ottimale è uguale a 1, al contrario la probabilità di previsione falsa (POFD) è la proporzione di casi predetti positivi rispetto agli osservati negativi e nel caso ottimale è uguale a 0.

Gli indici POD e POFD sono stati utilizzati per la costruzione della ROC (*Receiver Operating Characteristic*) analisi che consente di valutare la capacità predittiva del test eseguito, di visualizzare, organizzare e selezionare i test sulla base delle loro performance (Fawcett, 2006).

Il grafico della ROC è un grafico bidimensionale in cui sull'asse x compare la POFD, sull'asse y la POD. Nella ROC ogni punto corrisponde ad una simulazione, in un caso ideale il test perfetto avrà POD uguale a 1 e POFD uguale a 0, per cui il test migliore sarà quello più vicino all'angolo in alto a sinistra della ROC.

Gli indici in tabella 6 dipendono dalla proporzione dei casi positivi e negativi, per cui nei casi in cui vi è una bassa proporzione di casi predetti positivi (o negativi) i parametri non sono confrontabili (Begueria, 2006). In questo caso si ricorre all'uso di ulteriori indici statistici indipendenti dalla proporzione di casi positivi e negativi considerati: sensibilità e specificità.

Tabella 7: indici statistici di valutazione indipendenti dalla proporzionalità del campione

Sensitività (<i>Sensitivity</i>)	$\frac{VP}{VP + FN}$	Proporzione dei casi positivi correttamente predetti
Specificità (<i>Specificity</i>)	$\frac{VN}{VN + FP}$	Proporzione dei casi negativi correttamente predetti

La sensitività e la specificità testano la robustezza dei risultati ottenuti dalla modellazione. Un risultato è considerato positivo se ha un'alta sensitività (basso numero di falsi negativi), ed una bassa specificità. Sono i test più comunemente utilizzati quando il risultato dell'elaborazione è dicotomico (Drobatz, 2009).

La sensitività e la specificità sono inversamente proporzionali, se la sensitività cresce la specificità diminuisce e viceversa, sono caratteristiche del test ed il campione non influenza i risultati (Parikh et al., 2008).

La disponibilità dei dati di campagna, per i bacini di Buccino (SA) e Paupisi (BN), relativi all'area di deposizione ha permesso di eseguire un'analisi quantitativa e di sensitività per definire in maniera oggettiva il test migliore.

7.2 Analisi quantitativa e di sensitività dei risultati ottenuti

I risultati dei test effettuati con RAMMS sui bacini di Buccino e Paupisi sono stati validati grazie alla disponibilità dei dati di campo. Per gli eventi che hanno interessato questi bacini, grazie ai rilievi post evento, sono disponibili i dati relativi all'estensione all'area di deposizione ed i dati dell'altezza dei depositi (Santo et al., 2015, Santo et al., 2017).

7.2.1 Validazione area di deposizione

Per valutare la bontà dei test relativamente alla predizione dell'area di deposizione è stata effettuata un'analisi quantitativa dei risultati ottenuti, non esistono degli standard per la valutazione della performance di un modello, ma approcci oggettivi (Heiser et al., 2017).

L'analisi quantitativa di similarità tra area di deposizione simulata e area di deposizione predetta prevede la definizione dei seguenti parametri (Heiser et al., 2017):

- A. estensione dell'area di deposizione predetta (RAMMS);
- B. estensione dell'area di deposizione misurata (dati di campo);

C. estensione dell'area di intersezione tra A e B.

Le elaborazioni sono state eseguite in ambiente GIS: sono state calcolate le estensione dell'area di deposizione predetta da RAMMS (A), l'estensione dell'area di deposizione relativa ai dati di campo (B) e la loro intersezione (C). Quest'ultima corrisponderà ai casi veri positivi della *confusion matrix*, in quanto in quell'area c'è stata realmente deposizione ed è stata predetta da RAMMS.

Calcolando tutti termini della tabella di contingenza (veri positivi, falsi negativi, veri negativi e falsi positivi) sono stati derivati i diversi indici statistici (tabella 6 e 7) che consentono di valutare la bontà della simulazione. Per ogni bacino è stata costruita la ROC, e tra i vari test eseguiti sono stati considerati *best test* quelli con un valore di POD prossimo ad 1 e contemporaneamente un valore di POFD prossimo a 0. Si tratta dunque dei punti che nel grafico ROC si collocano in prossimità del test ideale, in alto a sinistra.

7.2.2 Validazione altezza dei depositi

Per valutare la bontà dei test relativamente alla predizione dell'altezza dei deposizione, non è stato possibile effettuare un'analisi quantitativa perché i dati misurati sono puntuali, quelli predetti areali. È stato quindi adottato un metodo alternativo che consente di arrivare alla stima della sensibilità, in modo da poter definire anche per il parametro altezza depositi il test migliore.

In ambiente GIS i valori puntuali di deposizione misurati in campagna sono stati classificati secondo le classi in tabella 8a. Lo *shape* relativo all'altezza dei depositi estratto da RAMMS è stato trasformato in grid, e poi riclassificato secondo le stesse classi di deposizione utilizzate per i punti misurati. Successivamente, ad ogni punto misurato in campagna è stato associato il valore predetto da RAMMS in quel punto (*extract value to point*) ed infine ne è stata calcolata la frequenza per ogni classe (tabella 8b).

Tabella 8: a) classi di deposizione utilizzate per riclassificare i depositi misurati e predetti; b) esempio della procedura adottata per confrontare dati misurati e predetti e stima della frequenza per classi di deposizione

Classi Deposizione	Di	Altezza dei depositi (m)
0		< 0,1
1		0,1-0,49
2		0,49-0,96
3		0,96-1,72
4		1,72-3,69
5		>3,69

Classe di deposizione OSSERVATI	Classe di deposizione PREDETTI	FREQUENZA
1	nullo	20
1	0	27
1	1	28
1	2	3
2	nullo	1
2	0	34
2	1	30
2	2	5
3	nullo	2
3	0	29
3	1	1
4	0	27
5	0	1

A titolo di esempio si riporta la tabella 8b per comprendere al meglio la procedura adottata che consente di arrivare alla stima della sensitività. In questo caso il numero di FN (falsi negativi) è uguale al numero di casi osservati positivi ma predetti negativi, 23 in totale: 20 per la classe 1, 1 per la classe 2, 2 per la classe 3.

Il numero di VP (veri positivi) sarà uguale al numero di casi osservati e predetti nella stessa classe di deposizione, 33 in totale: 28 per la classe 1, 5 per la classe 2.

Ricordando che la sensitività è pari al rapporto tra VP e VP più FN, per scegliere il test migliore per la predizione dell'altezza dei depositi, tra le varie simulazioni eseguite per ogni bacino, è stata scelta quella con la sensitività più alta.

7.3 Simulazione degli eventi nei bacini di Buccino (SA)

I sistemi bacino-conoide dell'abitato di Buccino sono stati interessati, nell'Ottobre del 2011, da fenomeni di flash floods in occasione di un evento pluviometrico rilevante che ha riattivato le conoidi che si trovano allo sbocco di due bacini montani: Matrura e Vadursi, nella frazione di Teglia (figura 21).

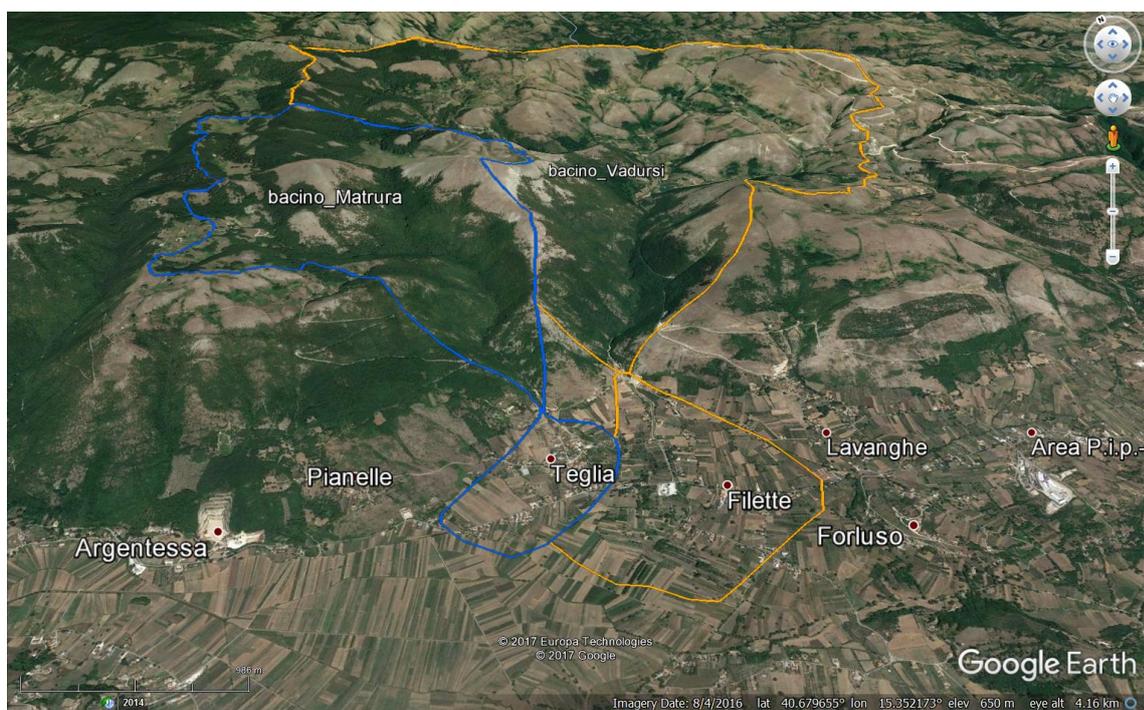


Figura 21: i sistemi bacino-conoide Matrura e Vadursi di Buccino.

Immediatamente dopo l'evento sono stati eseguiti dettagliati rilievi geologici e geomorfologici sul campo, che hanno consentito di ricostruire i volumi di materiale eroso e depositato (Santo et al., 2015).

Nella tabella 9 sono indicati i principali parametri morfometrici dei due sistemi bacino-conoide.

Tabella 9: principali parametri morfometrici dei sistemi bacino –conoide Matrura eVadursi

	area (km ²)	Pendenza media (°)	H_min (m)	H_max (m)	H_media (m)	lunghezza_asta_principale (km)	Indice di Melton
Bacino_Matrura	5,46	23,63	546,44	1359,83	953,13	2,98	0,35
Conoide_Matrura	0,62	6,58	434,47	555,01	494,74		
Bacino_Vadursi	12,96	25,16	534,55	1439,84	905,29	2,43	0,64
Conoide_Vadursi	1,47	3,76	439,69	554,02	6,24		

Il volume del *debris flow* è stato stimato attraverso l'interpolazione dei punti osservati in campagna (136 per Vadursi, 101 per Matrura), con l'applicazione dei metodi *Natural Neighbour* e *Natural Break* in ambiente GIS. Ciò ha permesso di ottenere la carta dei depositi ed il volume del *debris flow*: 36800 m³ per il sistema bacino-conoide Matrura e 29000 m³ per Vadursi (Santo et al., 2015).

L'evento pluviometrico innescante è stato improvviso e concentrato, caratterizzato da due picchi; ha avuto una durata di circa 4 ore ed una cumulata di 130 mm, il tempo di ritorno è stato stimato pari a 100 anni.

I volumi calcolati sono stati utilizzati come dati di input nelle simulazioni fatte con RAMMS.

7.3.1 Il bacino Matrura

Nella simulazione del *debris flow* che ha interessato il bacino Matrura è stato utilizzato il volume del *debris flow* derivato dall'elaborazione dei dati di campagna per calcolare la portata di picco. Inoltre si è tenuto conto delle caratteristiche dell'evento pluviometrico nella costruzione dell'idrogramma di piena.

L'analisi dell'evento fatta da Santo et al., 2015 ha evidenziato come la deposizione sia avvenuta in due momenti distinti, corrispondenti ai due picchi di precipitazione. Per tener conto di ciò nelle elaborazioni l'evento è stato suddiviso in due parti: prima parte corrispondente alla prima deposizione, seconda parte corrispondente alla seconda deposizione sul deposito preesistente (risultato della prima parte). Inoltre dopo le prime simulazioni, confrontando i risultati con i depositi reali è stato notato come il flusso è stato chiaramente condizionato dalla presenza di strutture (edifici, muri etc..) ed infrastrutture (strade, cortili etc..). Questi due elementi sono stati quindi inseriti nella simulazione come *shapefile*.

La disponibilità dei dati di campagna relativi all'area di deposizione e all'altezza dei depositi ha permesso di eseguire un'analisi quantitativa e di sensitività per definire in maniera oggettiva il *best test*.

Per l'area di deposizione è stata effettuata un'analisi quantitativa dei risultati ottenuti. Nel calcolo dei parametri della *confusion matrix* per l'area di deposizione i veri positivi saranno uguali all'estensione dell'area di intersezione tra gli osservati positivi e predetti positivi; i falsi negativi saranno pari agli osservati positivi meno l'estensione dell'intersezione; i falsi positivi pari ai predetti positivi meno l'estensione dell'intersezione; i veri negativi saranno uguale all'area totale di calcolo meno gli osservati positivi più i predetti positivi.

Le simulazioni eseguite, i cui parametri statistici derivati sono riportati in tabella 10, differiscono tra loro per i valori di μ e ξ , per la durata della simulazione ed i criteri che stabiliscono la fine della simulazione. Inoltre nei test 12,13 14, 15, 16 sono state inseriti un edificio e un giardino per simulare la loro influenza sul flusso.

In tabella 10 sono riportati i parametri della *confusion matrix* e gli indici statistici ottenuti per i test effettuati nel bacino Matrura.

Tabella 10: parametri della confusion matrix ed indici statistici derivati per i test eseguiti nel bacino Matrura. VP, veri positivi; FN, falsi negativi; FP, falsi positivi; VN, veri negativi; N, area totale di calcolo uguale alla domain area; PPP, potere predittivo positivo; NPP, potere predittivo negativo; POD, probabilità di previsione positiva; POFD, probabilità di previsione falsa; POFA probabilità di falsi allarmi.

		test8	test9	test11	test12	test13	test14	test15	test16
AREA	VP	51504,63	50202,24	47610,46	28775,74	53226,08	54444,91	54384,65	54802,25
	FN	1740010	1740010	203114,5	28841,54	4391,204	3172,37	3232,63	2815,03
	FP	272544,6	255295,5	207228,6	148963,7	220474,9	256919	259116,1	263410
	VN	57617,28	57617,28	1282056	1533429	1461918	1425474	1423277	1418983
	N	1740010	1740010	1740010	1740010	1740010	1740010	1740010	1740010
	Accuratezza	0,06	0,06	0,76	0,90	0,87	0,85	0,85	0,85
	Tasso di errore	1,16	1,15	0,24	0,10	0,13	0,15	0,15	0,15
	PPP	0,15	0,16	0,19	0,16	0,19	0,17	0,17	0,17
	NPP	0,03	0,03	0,86	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99
	POD	0,03	0,03	0,19	0,50	0,92	0,94	0,94	0,95
	POFD	0,83	0,82	0,14	0,09	0,13	0,15	0,15	0,16
	POFA	0,84	0,84	0,81	0,84	0,81	0,83	0,83	0,83
H_DEPOS		test8	test9	test11	test12	test13	test14	test15	test16
	VP	25	19	25	29	26	36	33	32
	FN	21	36	35	29	27	23	23	22
	Sensitività	0,54	0,35	0,42	0,50	0,49	0,61	0,59	0,59

In figura 22 la ROC delle simulazioni fatte per il bacino Matrura; i best-test sono quelli che si posizionano in alto a sinistra nel grafico e che presentano quindi un alto valore di POD e basso POFD: i test 16, 15 e 14 (tabella 10) in cui ciò che varia è essenzialmente il valore di attrito associato al giardino e all'edificio. Il valore del POFA risulta più basso nei test 11 e 13.

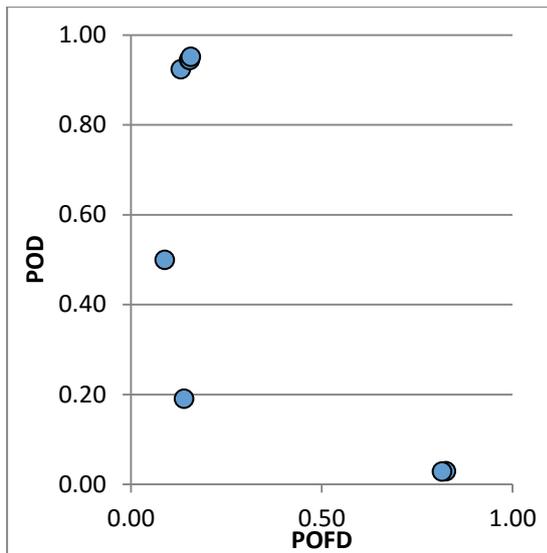


Figura 22: ROC analisi delle simulazioni del bacino Matrura.

In particolare, nel test numero 16 l'evento è stato suddiviso in 2 parti, nella prima parte è stato inserito un edificio come elemento antropico che ha deviato il flusso, a cui è stato associato un coefficiente d'attrito pari a 0,4. Il risultato della prima parte è stato inserito come area di deposizione preesistente nella seconda simulazione, nella quale come elemento antropico è stato introdotto un giardino a cui è stato associato un coefficiente d'attrito pari a 0,2. Il volume dell'idrogramma di piena utilizzato è pari a 20000 m³. In figura 23 è riportato il confronto tra i dati misurati in campagna e quelli derivati dal test numero 16. L'area di deposizione prevista dal software ha un'estensione maggiore per questo motivo il valore del POFA risulta elevato. I depositi hanno in media un'altezza inferiore, in particolare le aree in cui nella realtà non si è verificata deposizione appartengono alla prima classe di altezza dei depositi, inferiore a 0,49 m e nel dettaglio sono inferiori a 0,10 m.

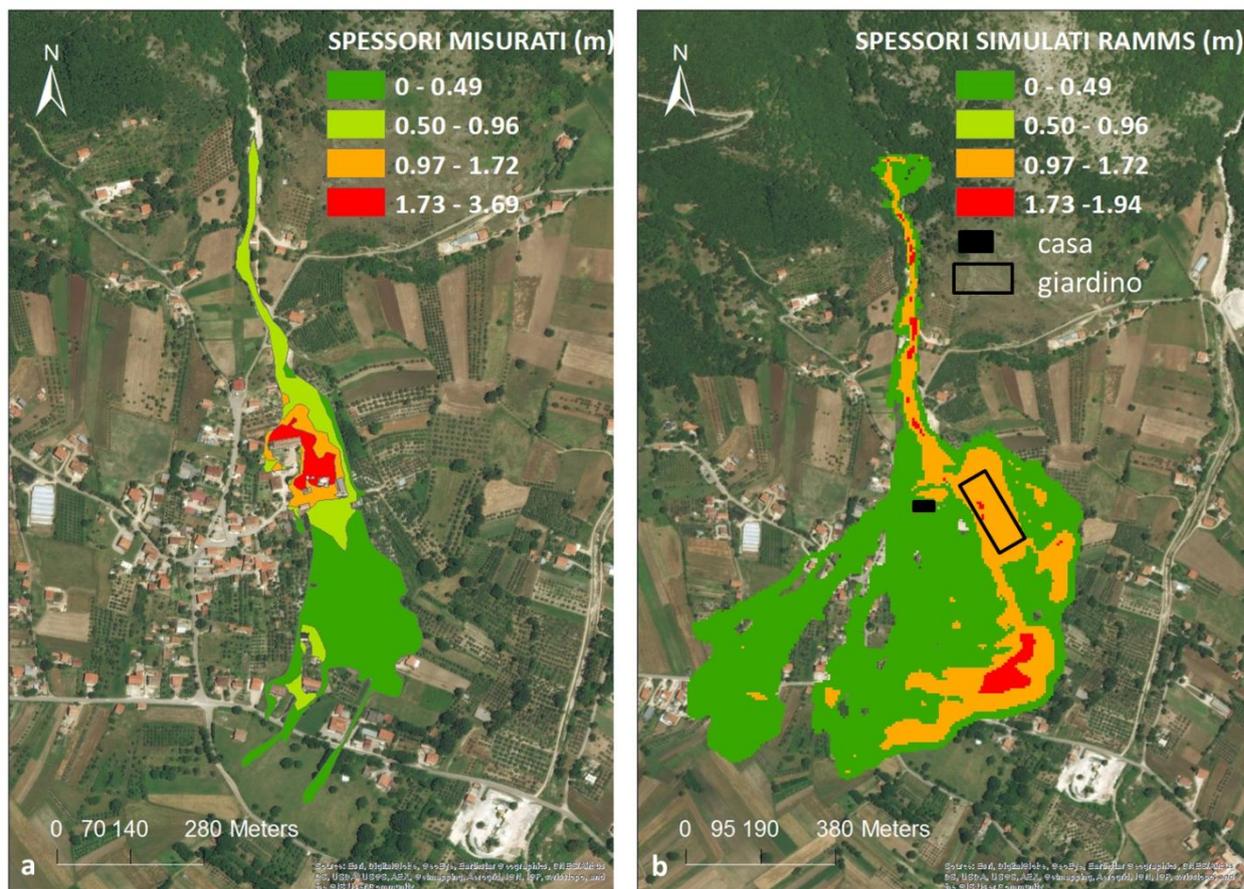


Figura 23: confronto l'area di deposizione misurata (a) e simulata (b) nel test 16 per il bacino di Matrura in Buccino (SA).

Per ogni test eseguito, relativamente all'altezza dei depositi sono stati analizzati i risultati errati considerando la loro prossimità alla classe di deposizione corretta. Come precedentemente illustrato, per confrontare l'altezza dei depositi misurati in campagna e predetti da RAMMS sono state definite 5 classi di deposizione (tabella 8.a). Per valutare la grandezza dell'errore è stata stimata la differenza tra classe di deposizione stimata e predetta (ΔCD) attraverso l'utilizzo dei dati relativi alla frequenza per classi di deposizione. Dalla simulazione risulta che, ad esempio per il test 8 (tabella 11) l'11.2 % dei dati è stato simulato nella classe di deposizione corretta, il 39 % dei dati è stato stimato in una classe errata rispetto a quello misurata, ma immediatamente prossima alla corretta. Il 20 % differisce di 2 classi, il 17 % di 3 classi, l'11 % di 4 classi ed l'1% di 5 classi di deposizione. Nella maggior parte dei casi la percentuale maggiore di dati errati si colloca nella classe immediatamente prossima a quella esatta, ΔCD uguale a -1.

Nella tabella 11 sono riportati i risultati per ogni test eseguito nel bacino Matrura.

Tabella 11: differenza di classe di deposizione tra dati predetti e misurati (ΔCD) per i test nel bacino Matrura

H_DEPOSITI	ΔCD	test8	test9	test11	test12	test13	test14	test15	test16
	0	11,2%	11,0%	14,5%	14,6%	16,1%	19,5%	17,8%	17,2%
-1	39%	36%	31,8%	22,9%	32,8%	32,4%	32,4%	33,3%	
-2	20%	23%	24,3%	23,6%	20,6%	17,3%	18,9%	19,4%	
-3	17%	18%	19,1%	21,5%	15,0%	15,7%	15,7%	15,1%	
-4	11%	12%	9,8%	16,7%	15,0%	14,6%	14,6%	14,5%	
-5	1%	1%	0,0%	0,0%	0,6%	0,5%	0,5%	0,5%	

7.3.2 Il bacino Vadursi

Nella simulazione del *debris flow* che ha interessato il bacino Vadursi è stato utilizzato il volume del *debris flow* stimato nel lavoro di Santo et al., 2015 per calcolare la portata di picco. Nonostante abbia dimensioni maggiori del bacino Matrura il volume del *debris flow* risulta inferiore. Per la costruzione dell'idrogramma di piena si è tenuto conto delle caratteristiche dell'evento pluviometrico.

I diversi test effettuati differiscono tra loro per i valori di μ e ξ , per la durata della simulazione ed i criteri che stabiliscono la fine della simulazione. In tabella 12 sono riportati i parametri e gli indici derivati dalla *confusion matrix*.

Tabella 12: parametri della *confusion matrix* ed indici statistici derivati per i test eseguiti nel bacino Vadursi. VP, veri positivi; FN, falsi negativi; FP, falsi positivi; VN, veri negativi; N, area totale di calcolo uguale alla domain area, PPP, potere predittivo positivo; NPP, potere predittivo negativo, POD, probabilità di previsione positiva, POFD, probabilità di previsione falsa, POFA probabilità di falsi allarmi.

		test8	test9	test10	test11	test12	test13
AREA	VP	10323,76	10288,32	10376,86	10340,53	13064	23725,62
	FN	40290,31	40325,75	40237,21	40273,54	4391,204	26888,45
	FP	158820,6	158407,2	164532,1	172121,8	220474,9	263567,7
	VN	1731985	1732399	1726274	1718684	1461918	1627238
	N	1941420	1941420	1941420	1941420	1941420	1941420
	Accuratezza	0,90	0,90	0,89	0,89	0,76	0,85
	Tasso di errore	0,10	0,10	0,11	0,11	0,13	0,15
	PPP	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,08
	NPP	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	POD	0,20	0,20	0,21	0,20	0,75	0,47
	POFD	0,08	0,08	0,09	0,09	0,13	0,14
	POFA	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,92

H_DEPOSITI		test8	test9	test10	test11	test12	test13
	VP	10	10	10	9	7	7
	FN	88	88	88	88	71	70
	Sensitivity	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09

La ROC analisi eseguita per i test fatti nel bacino Vadursi è presentata in figura 24. In questo caso il test migliore si differenzia nettamente dagli altri; si tratta del test 12 che presenta una POD pari a 0.75 ed una POFD uguale a 0.13 (tabella 12).

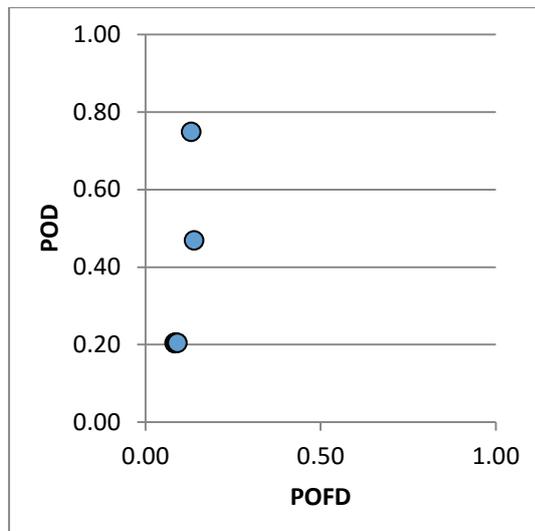


Figura 24: ROC analisi per le simulazioni del bacino Vadursi.

Così come per le simulazioni nel bacino Matrura, anche in questo caso, i fenomeni di *outflow* fanno sì che l'area di deposizione predetta sia nettamente superiore a quella misurata. Nonostante l'evento sia stato suddiviso in due parti, sia stato utilizzato un volume corrispondente a quello misurato (29000 m³) ed un coefficiente d'attrito di 0,04 il flusso nella simulazione si arresta prima rispetto a quanto verificato in campagna (fig. 25). La soglia impostata per la fine della simulazione è uguale al 10%, ciò indica che il flusso si arresta quando il 90 % della massa si è arrestata.

Questo è dovuto probabilmente alla risoluzione della topografia che influenza notevolmente i risultati, in quanto è stato utilizzato un DEM con 5 m di risoluzione. A differenza degli altri test il valore dell'accuratezza per il test numero 12 è più basso, ma esso risulta il migliore nella ROC, quindi sulla base di POD e POFD. RAMMS non riesce anche in questa simulazione a prevedere l'altezza dei depositi massima misurata, e gli spessori in generale sono più bassi di quelli misurati.

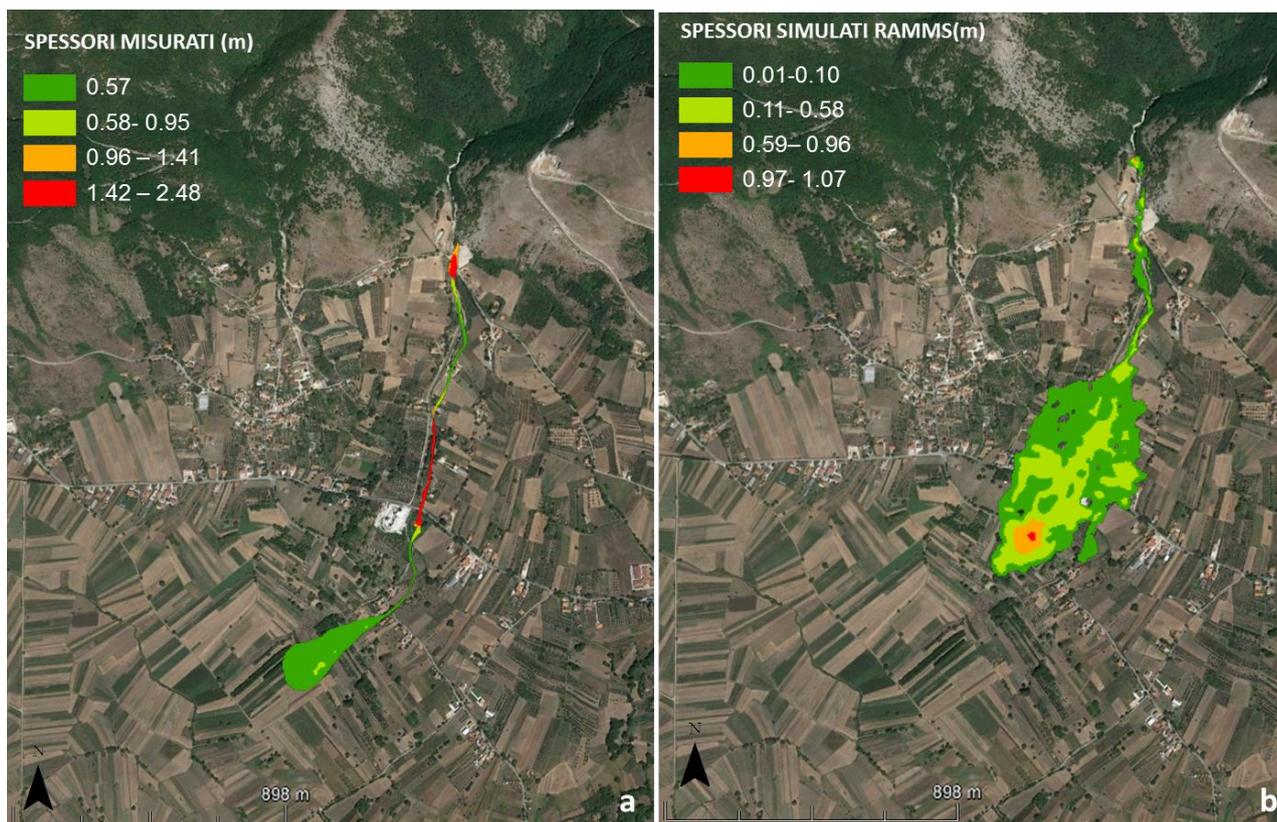


Figura 25: confronto l'area di deposizione misurata (a) e simulata (b) nel test 16 per il bacino di Vadursi in Buccino (SA).

Anche per i risultati relativi all'altezza dei depositi nel bacino Vadursi è stata valutata la prossimità dei risultati alla classe di deposizione corretta, cioè quella misurata in campagna. In questo caso solo per il test 13 la maggior parte dei punti di deposizione si collocano nella classe immediatamente successiva a quella corretta (tabella 13).

Tabella 13: differenza di classe di deposizione tra dati predetti e misurati (ΔCD) per i test nel bacino Vadursi

H_DEPOSITI	ΔCD	test8	test9	test10	test11	test12	test13
	0	22,2%	22,2%	15,6%	20%	11,3%	21,2%
-1	16%	16%	16%	17,8%	26%	48%	
-2	16%	16%	29%	13%	10%	12%	
-3	29%	29%	18%	29%	15%	9%	
-4	18%	18%	22,2%	20%	39%	9%	

7.4 Simulazione degli eventi nei bacini di Paupisi (BN)

Nella notte tra il 14 ed 15 ottobre del 2015 un evento di elevata intensità ha interessato il beneventano, causando numerosi danni ai centri abitati in un'area di circa 200 km². L'evento ha avuto una durata di circa 7 ore, con un massimo di 140 mm di pioggia in due ore (De Falco et al., 2016). Si sono verificate esondazioni, intensi fenomeni di erosione e flash floods che hanno interessato i bacini siti tra Paupisi e Solopaca in cui si sono riattivate le conoidi esistenti (Santo et al., 2017).

Il rilevamento geologico e geomorfologico post-evento ha consentito di ricostruire i volumi dei *debris flows*, l'altezza dei depositi, i volumi erosi ed una mappa in scala 1:5000 che riporta gli effetti registrati al suolo dai flash floods (Santo et al., 2017). In figura 24 è riportato un estratto della mappa generata in cui sono rappresentati in dettaglio i quattro bacini in cui sono stati simulati gli eventi con RAMMS: 13-14, 15, 16. Sono stati scelti questi sistemi bacino-conoide perché le aree di recapito corrispondono alle zone abitate (fig. 26).

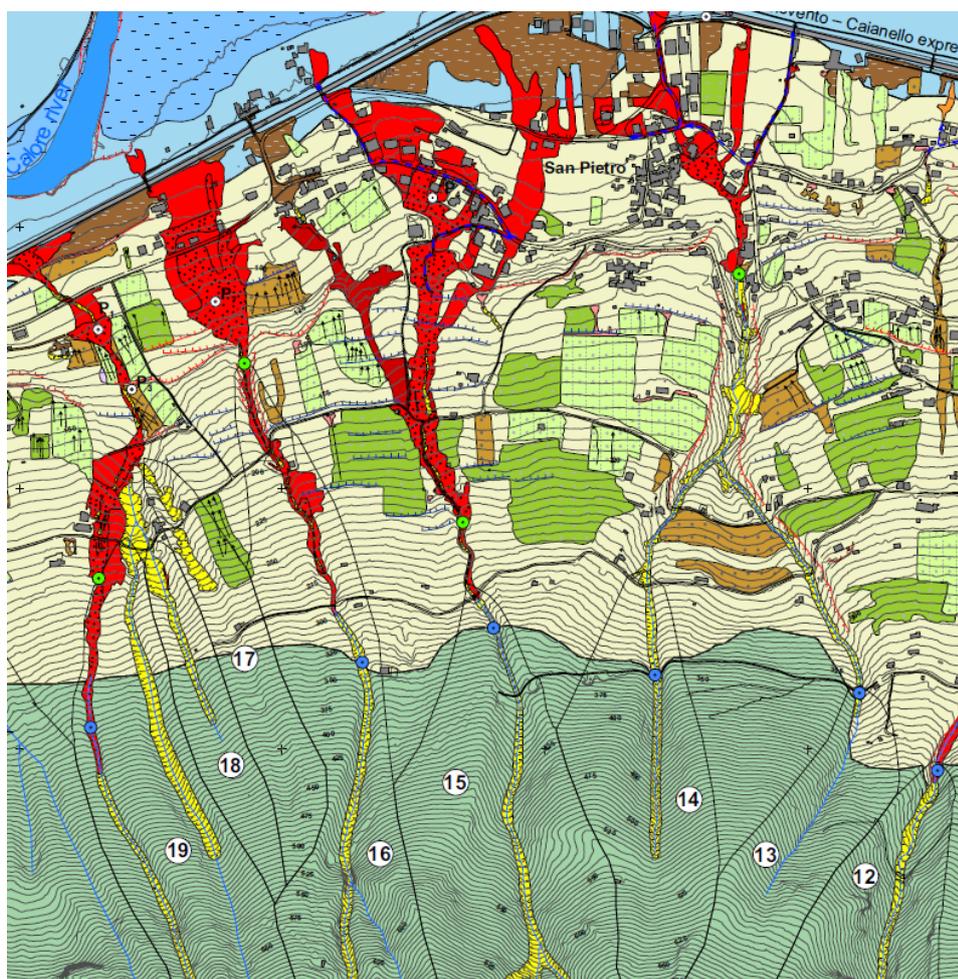


Figura 26: numerazione dei bacini selezionati per la simulazione con RAMMS, da Santo et al., 2017.

7.4.1 Paupisi_bacino 13_14

Questo caso di studio riguarda due bacini confinanti i cui canali alimentatori confluiscono nel tratto terminale in un unico canale. L'area di deposizione coincide in parte con la zona abitata di San Pietro. I rilievi post evento hanno evidenziato la presenza nella parte apicale della conoide di depositi grossolani e blocchi dal diametro compreso tra alcuni metri e 40 cm. Nella parte più distale ghiaie ed a seguire limi e argille. Il flusso limo-argilloso è arrivato a lambire la strada statale 372. Il volume stimato per questo evento è pari a 19000 m³. Nelle simulazioni è stata considerata la presenza della strada provinciale 44, in particolare nei test 6, 7, 8 che, considerando l'accuratezza, risultano fra le simulazioni migliori.

In figura 27 è riportata la ROC analisi da cui si evince come la maggior parte dei test sono raggruppati in un'area prossima all'area in alto a sinistra che definisce il test perfetto. Infatti i valori di POD dei test sono simili tra loro, il valore più elevato di POD è da attribuire al test 12 in cui è stato utilizzato un volume del *debris flow* di 15000 m³ a differenza delle altre simulazioni in cui il volume è stato tenuto pari a 19000 m³. La POFA assume il valore più basso nel test numero 3, mentre l'accuratezza si mantiene sempre uguale o al di sopra di 0,91 in ogni simulazione (tabella 14).

Tabella 14: parametri della confusion matrix ed indici statistici derivati per i test eseguiti nel bacino di Paupisi n13-14. VP, veri positivi; FN, falsi negativi; FP, falsi positivi; VN, veri negativi; N, area totale di calcolo uguale alla domain area, PPP, potere predittivo positivo; NPP, potere predittivo negativo, POD, probabilità di previsione positiva, POFD, probabilità di previsione falsa, POFA probabilità di falsi allarmi.

		Test_2	Test_3	Test_4	Test_5	Test_6	Test_7	Test_8	Test_9	Test_10	Test_11	Test_12	
AREA	VP	23312,2	26282,3	26220,9	26164,1	26272,	26179,0	25510,9	25455,7	25290,7	25646,9	26629,4	
	FN	6549,71	3579,61	3640,94	3697,81	3589,6	3682,89	4350,98	4406,19	4571,13	4215,01	3232,43	
	FP	75487,7	72517,6	93629,0	107685	109502	110620	101539	99619,2	82734,2	92703,0	107370	
	VN	1158106	1161076	1139965	1125908	1124091	1122973	1132055	1133975	1150860	1140891	1126224	
	N	1263456	1263456	1263456	1263456	1263456	1263456	1263456	1263456	1263456	1263456	1263456	
	Accuratezza	0,94	0,94	0,92	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,92	0,93	0,92	0,91
	Tasso di errore	0,06	0,06	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,07	0,08	0,09
	PPP	0,24	0,27	0,22	0,20	0,19	0,19	0,19	0,20	0,23	0,22	0,20	
	NPP	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	POD	0,78	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,85	0,85	0,86	0,89
	POFD	0,06	0,06	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,07	0,08	0,09
POFA	0,76	0,73	0,78	0,80	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,77	0,78	0,80	

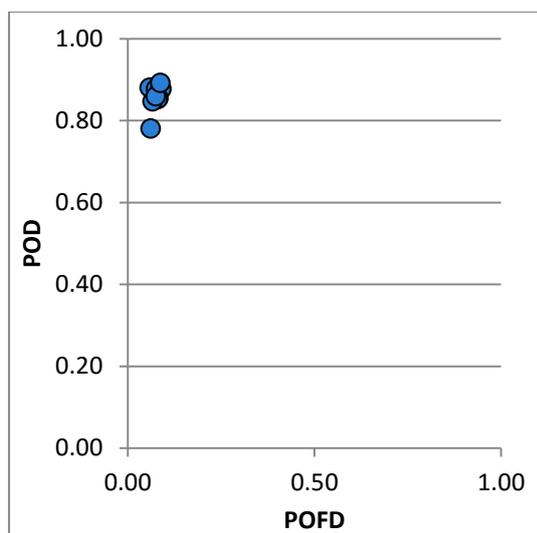


Figura 27: ROC analisi per la simulazioni del bacino 13-14 di Paupisi.

Per confrontare l'altezza dei depositi misurata e simulata sono state definite 5 classi che esprimono la differenza numerica tra l'altezza dei depositi misurata e quella simulata da RAMMS. Esse corrispondono alla distanza quantitativa del risultato della simulazione dal valore reale misurato in campagna: $\pm 0,25$; $\pm 0,5$; ± 1 ; $\pm 1,5$.

Per tutti i test la maggior parte dei dati si colloca nella seconda classe, ciò indica che la differenza massima di spessore, tra misurato e simulato, per il gran numero dei casi è compresa tra 0,25 e 0,50 m (tabella 15). Ciò rende anche i risultati non propriamente corretti confrontabili con i dati reali.

Sulla base della sensibilità il test migliore risulta il numero 12, con un valore di 0,89. In questo test, come detto in precedenza, è stato utilizzato un valore dell'idrogramma di piena di 15000 m³.

Tabella 15: differenza di spessore tra dati di altezza dei depositi predetti e misurati per i test nel bacino Paupisi 13-14.

H_DEPOSITI	Test_2	Test_3	Test_4	Test_5	Test_6	Test_7	Test_8	Test_9	Test_10	Test_11	Test_12
Sensibilità	0,78	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,85	0,85	0,85	0,86	0,89
Δ spessori (m)	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\pm 0,25$	27,6	17,8	20,6	15,5	15,1	14,6	11,2	12,3	18,8	16,4	16,3
$> \pm 0,25 < \pm 0,5$	50,6	51,8	48,1	56,6	56,8	57,6	60,9	59,4	49,5	53,3	54,6
$> \pm 0,5 < \pm 1$	21,7	30,5	31,2	27,9	28,1	27,8	28,0	28,3	31,6	30,3	29,1
$> \pm 1 < \pm 1,5$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
tot	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

7.4.2 Paupisi_bacino 15

L'evento di flash flood che ha riguardato il bacino numero 15 ha interessato anch'esso l'area abitata della zona di San Pietro. Il flusso si è diviso essenzialmente in due parti superata l'area pedemontana, nella parte sinistra vi è verificata la deposizione di materiale grossolano e ghiaie, nella destra si sono depositati materiali dalla granulometria nettamente superiore (da 40 cm a pochi metri). Questa differenza è stata ben simulata da RAMMS. Il volume complessivo del *debris flow* è pari a 94000 m³, ma dopo le prime simulazioni in cui si aveva un alto valore di *outflow* (flusso al di fuori dell'area di calcolo) si è proceduto utilizzando valori compresi tra 50000 m³ e 60000 m³. Nella tabella 16 sono riportati i parametri della *confusion matrix* e gli indici derivati, nella figura 28 la ROC analisi derivata. I punti, che corrispondono ad ogni singolo test, si posizionano tutti nella stessa zona. Dalla tabella, infatti, si evidenzia come il valore della POD e POFD sia simile per i test eseguiti. Sulla base dell'accuratezza il test migliore risulta il numero 10 in cui si è utilizzato un volume di 50000 m³ per costruire l'idrogramma di piena. Per questo test si raggiunge il valore più basso di POFA e del tasso di errore. In questo caso si può affermare che il test numero 10 è in assoluto il migliore tra le simulazioni effettuate per questo bacino.

Tabella 16: parametri della confusion matrix ed indici statistici derivati per i test eseguiti nel bacino di Paupisi n 15. VP, veri positivi; FN, falsi negativi; FP, falsi positivi; VN, veri negativi; N, area totale di calcolo uguale alla domain area, PPP, potere predittivo positivo; NPP, potere predittivo negativo, POD, probabilità di previsione positiva, POFD, probabilità di previsione falsa, POFA probabilità di falsi allarmi.

		Test_10	Test_11	Test_12	Test_12b	Test_13	Test_14
AREA	VP	119377,4	121752,62	116830,78	122946,78	118586,72	118586,72
	FN	50225,3	47850,031	52771,875	46655,870	51015,934	51015,9305
	FP	198822,6	213597,38	219819,22	222128,22	239063,28	239063,28
	VN	579752,21	564977,45	558755,60	556446,60	539511,54	539511,54
	N	948177,5	948177,5	948177,5	948177,5	948177,5	948177,5
	Accuratezza	0,74	0,72	0,71	0,72	0,69	0,69
	Tasso di errore	0,26	0,28	0,29	0,28	0,31	0,31
	PPP	0,38	0,36	0,35	0,36	0,33	0,33
	NPP	0,92	0,92	0,91	0,92	0,91	0,91
	POD	0,70	0,72	0,69	0,72	0,70	0,70
	POFD	0,26	0,27	0,28	0,29	0,31	0,31
	POFA	0,62	0,64	0,65	0,64	0,67	0,67

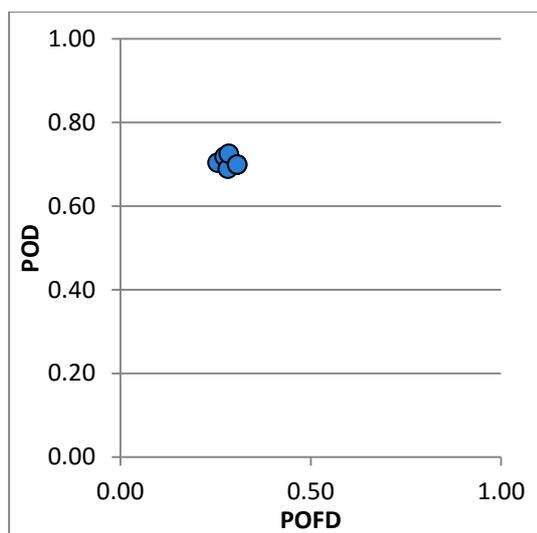


Figura 28:ROC analisi delle simulazioni del bacino 15.

Dall'analisi del valore di sensibilità, per quanto riguarda l'altezza dei depositi simulata, i valori più elevati si raggiungono nei test 11 e 12b (tabella 17). In queste simulazioni si è utilizzato un valore dell'idrogramma di piena di 50000 m³, una portata al picco di 120 m³/s, nel test 11 μ è uguale a 0,1, nel test 12b a 0,08. Relativamente all'analisi delle differenze di spessore, si evidenzia come nella maggior parte dei casi lo spessore predetto differisce di 0,5 m da quello misurato, per tutti i test si tratta di valori superiori al 60% . In particolare i valori migliori si raggiungono per il test 10 (67% dei casi).

Tabella 17: differenza di spessore tra dati di altezza dei depositi predetti e misurati per i test nel bacino Paupisi 15.

H_DEPOSITI	Test_10	Test_11	Test_12	Test_12b	Test_13	Test_14
Sensibilità	0,70	0,72	0,69	0,72	0,70	0,70
Δ spessori (m)	%	%	%	%	%	
$\pm 0,25$	25,04	26,50	28,57	25,87	29,90	29,90
$> \pm 0,25 < \pm 0,5$	42,24	38,62	32,24	37,81	32,39	32,39
$> \pm 0,5 < \pm 1$	14,91	15,20	18,12	16,28	17,49	17,49
$> \pm 1 < \pm 1,5$	17,81	19,67	21,07	20,04	20,22	20,22
tot	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

7.4.3 Paupisi_bacino 16

Il volume del *debris flow* che ha interessato questo bacino è pari a 50000 m³. In questo caso sono state necessarie poche simulazioni per ottenere un risultato da considerarsi buono sulla base degli indici statistici derivati. Il volume utilizzato per costruire l'idrogramma è stato variato tra

30000 m³ e 47000 m³, è stato diminuito per l'eccessivo *outflow* che si verificava anche in questo caso. Sulla base dell'analisi della ROC (figura 29) e degli indici statistici POD e POFD (tabella 18), i test migliori sono quelli in cui il volume utilizzato per costruire l'idrogramma di piena è stato di 30000 m³, ovvero i test 2, 5 e 6. I tre test differiscono per i valori di μ : 0,1 per i test 2 e 5, 0,08 per il test 6 nonché per i valori di portata di picco 150 m³/s per test 2, 120 m³/s per il test 5 ed il 6. Per i test 2, 5 e 6 il valore del tasso di errore è basso, anche se al test numero 3 corrisponde un valore leggermente inferiore. Inoltre per i test 2 e 5 il POFA assume il valore più basso tra le diverse simulazioni.

Tabella 18: parametri della confusion matrix ed indici statistici derivati per i test eseguiti nel bacino di Paupisi n 16. VP, veri positivi; FN, falsi negativi; FP, falsi positivi; VN, veri negativi; N, area totale di calcolo uguale alla domain area, PPP, potere predittivo positivo; NPP, potere predittivo negativo, POD, probabilità di previsione positiva, POFD, probabilità di previsione falsa, POFA probabilità di falsi allarmi.

		test_2	test_3	test_4	test_5	test_6
AREA	VP	56789,01	41809,19	60723,6	56835,21	57651,69
	FN	8745,7	23725,51	4811,101	8699,491	7883,011
	FP	134736	109640,8	180101,4	135689,8	141873,3
	VN	715418,3	740513,5	670052,9	714464,5	708281
	N	915689,0	915689,0	915689,0	915689,0	915689,0
	Accuratezza	0,84	0,85	0,80	0,84	0,84
	Tasso di errore	0,16	0,15	0,20	0,16	0,16
	PPP	0,30	0,28	0,25	0,30	0,29
	NPP	0,99	0,97	0,99	0,99	0,99
	POD	0,87	0,64	0,93	0,87	0,88
	POFD	0,16	0,13	0,21	0,16	0,17
	POFA	0,70	0,72	0,75	0,70	0,71

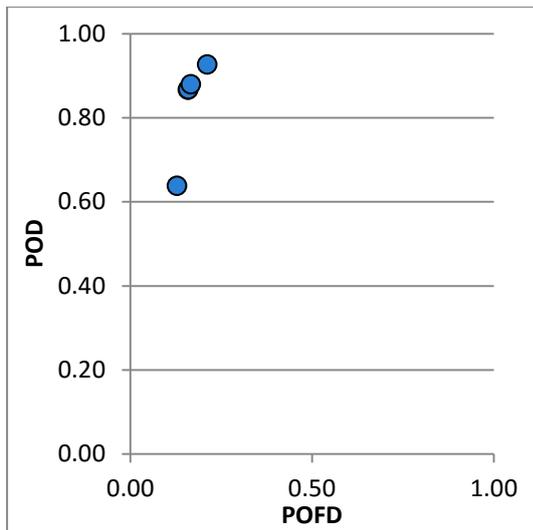


Figura 29: ROC analisi delle simulazioni del bacino 16.

Il valore più elevato di sensitività, per quanto riguarda l'altezza dei depositi, appartiene al test 4. In questa simulazione è stato utilizzato un volume dell'idrogramma di piena di 47000 m³, una portata al picco di 150 m³/s ed un μ di 0,1. In questo bacino, per quanto riguarda l'altezza dei depositi, si ottengono risultati migliori con un valore dell'idrogramma di piena superiore rispetto a quello che restituisce i valori più elevati di sensitività per l'area di deposizione.

Nel confronto tra altezza dei depositi misurata in campagna e predetta da RAMMS nei test 2, 5 e 6 più del 50% dei dati fa registrare uno spessore che differisce al massimo di 50 cm (tabella 19). Da ciò si evince che il software riesce a simulare meglio l'evento con un volume minore di quello derivato dall'elaborazione dei dati di campagna. Come affermato in precedenza, al contrario di quanto avviene nella realtà, RAMMS lavora con una μ costante e questo condiziona molto lo spessore dei depositi.

Tabella 19: differenza di spessore tra dati di altezza dei depositi predetti e misurati per i test nel bacino Paupisi 13-14.

H_DEPOSITI	Test_2	Test_3	Test_4	Test_5	Test_6
Sensitività	0,87	0,64	0,93	0,87	0,88
Δ spessori	%	%	%	%	%
$\pm 0,25$	17,75	17,43	13,84	22,73	18,45
$> \pm 0,25 < \pm 0,5$	38,99	29,64	35,22	35,84	36,86
$> \pm 0,5 < \pm 1$	21,15	26,20	25,03	19,93	22,74
$> \pm 1 < \pm 1,5$	22,11	26,74	25,91	21,49	21,95
tot	100	100	100	100	100

7.4.4 Confronto tra i best test ed dati di campagna

Il confronto grafico tra i best test ed i dati misurati, per i bacini analizzati di Paupisi (SA), è riportato in figura 30.

In ordine da sinistra verso destra vi sono il bacino 13-14, 15 e 16; i test visualizzati sono rispettivamente il numero 12, 10 e 5 che risultano i migliori nella ROC analisi.

Nonostante sia stato utilizzato un DEM con risoluzione di 5 m, il software per il bacino numero 15 riesce a simulare la diramazione che la massa ha realmente subito. Il valore del coefficiente d'attrito per i bacini 15 e 16 è pari a 0,1, mentre per il bacino 13-14 il risultato migliore è stato ottenuto con un μ di 0,04. Questo è dovuto con buona probabilità alla maggiore pendenza che si ha in quest'area di deposizione rispetto alle altre due. In tutti i tre test il volume dell'idrogramma di piena utilizzato è inferiore a quello misurato in campagna, ma nonostante ciò sono rilevanti i fenomeni di *outflow* e quindi la probabilità di falsi allarmi risulta elevata, compresa tra il 60 e l'80%. L'area di deposizione simulata ricopre quasi completamente quella misurata, motivo per il quale l'accuratezza è elevata.

L'altezza dei depositi è sempre inferiore a quella misurata in campagna.

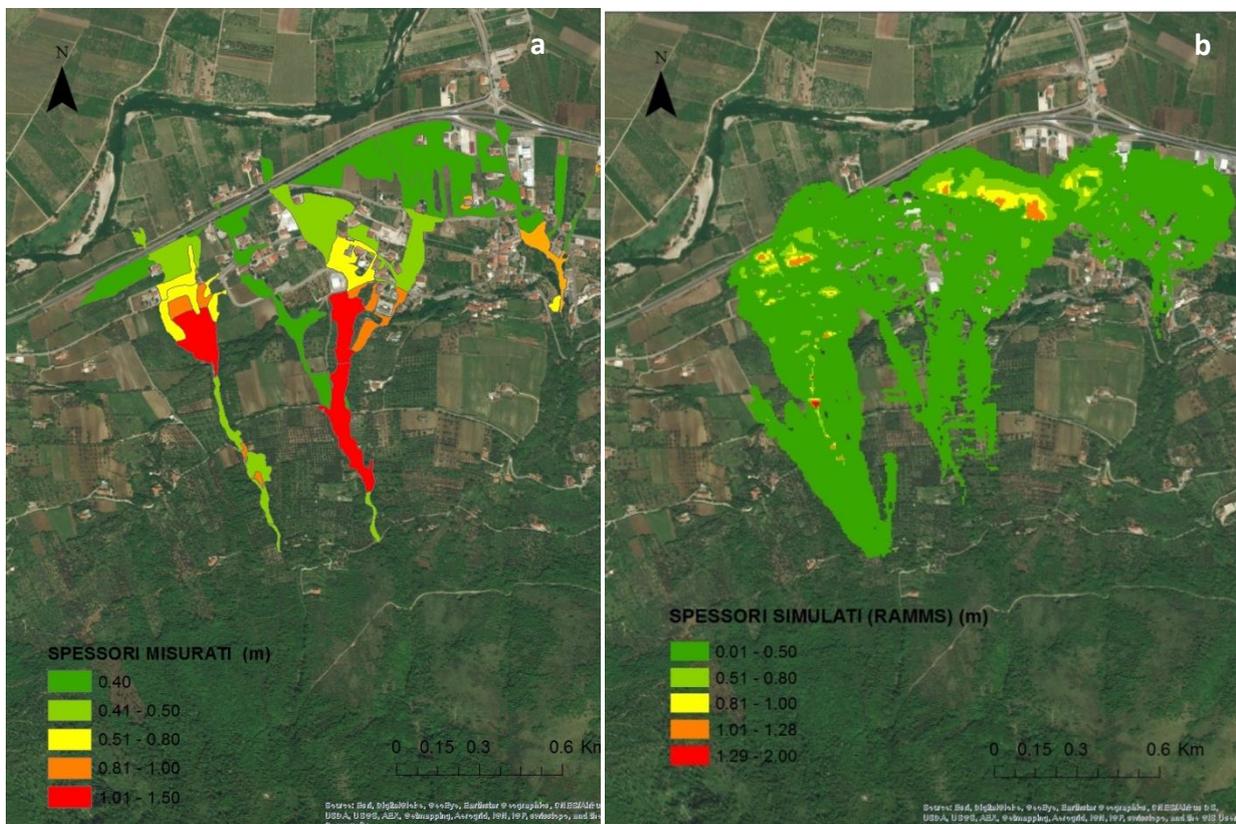


Figura 30: confronto l'area di deposizione misurata (a) e simulata (b) nei test per i bacini di Paupisi (BN).

8. CONCLUSIONI

L'obiettivo di questo progetto di dottorato è stato quello di fornire un contributo allo studio della pericolosità alluvionale nei bacini torrentizi della regione Campania in cui si verificano fenomeni di flash floods.

Ciò è stato raggiunto mediante la realizzazione di un database, il primo dedicato esclusivamente ai fenomeni di flash floods per la Regione Campania. Esso contiene 474 eventi di cui sono note le informazioni spazio temporali, fornendo un importante contributo allo studio del "dove" e "quando" si sono verificati i flash floods.

È stata eseguita un'analisi critica della letteratura esistente, selezionando solamente gli eventi per cui erano note le informazioni spazio temporali di occorrenza ed escludendo gli eventi ritenuti dubbiosi o incerti per la tipologia di fenomeno. Il 15 % dei comuni campani è stato oggetto di fenomeni alluvionali torrentizi. Il 20% dei flash floods censiti sono avvenuti negli ultimi 30 anni a causa della maggiore disponibilità di dati relativi agli ultimi decenni. Negli ultimi 2 anni (2014-2015) le municipalità più colpite sono state 8: Arienzo, Tufino, Solofra, Volturara Irpina, Castellammare di Stabia, Barano d'Ischia (in cui si registra una vittima) Solopaca e Paupisi. Sono numerosi i centri abitati che più volte sono stati interessati da eventi di flash floods nell'arco temporale ricoperto dal database, (1540-2015) (fig. 3); Cava dei Tirreni ad esempio è tra i siti più suscettibili infatti sono stati censiti ben 36 eventi. I centri abitati che sono stati interessati più di 10 volte da eventi di flash floods, nell'arco temporale coperto dal database, sono 16 e per questi sono stati stimati i tempi di ricorrenza medi. I valori risultano compresi tra 4 e 39 anni, il tempo di ricorrenza medio è pari a 16 anni, ma se si considerano solo gli eventi più dannosi il valore sale a 50 anni.

L'importanza data al fattore tempo nella costruzione del catalogo dati è dimostrata dal fatto che per l'80% degli eventi censiti l'accuratezza dell'informazione temporale è medio-alta in quanto si conosce il giorno, il mese e l'anno di occorrenza (fig. 4).

Nella regione Campania gli eventi alluvionali torrentizi si verificano principalmente nella stagione autunnale, mentre i mesi in cui si ha una minore frequenza sono quelli primaverili. Nonostante le diverse caratteristiche geomorfologiche e litologiche, nonché le differenti condizioni climatiche, i risultati concordano con quanto affermato da Gaume et al., (2009) per i bacini appartenenti all'area mediterranea e con quanto avviene nel settore alpino (Marchi et al., 2010). Ciò perché le precipitazioni di maggiore intensità e breve durata si concentrano principalmente in questa stagione. Inoltre, il fatto che dopo la stagione secca i processi erosivi sono più incisivi fa sì

che si registri una maggiore frequenza di eventi alluvionali torrentizi in autunno. Nelle regioni meridionali il processo è accentuato dai frequenti incendi che caratterizzano la stagione estiva e che rendono ancor più efficaci e rapidi fenomeni di erosione superficiale.

La classificazione dei bacini interessati da flash floods in 5 classi, basata sulle caratteristiche litologiche del bedrock, assenza o presenza di suolo, e zona di recapito (direttamente a mare o nella zona pedemontana), consente di distinguere i differenti materiali disponibili nel bacino che possono essere presi in carico dalla corrente e trasportati fino alla conoide. Questo è di fondamentale importanza ai fini dello studio della pericolosità, dato il maggiore potere distruttivo dei *debris flow* rispetto ai *water flow*. Più del 60% degli eventi censiti si è verificata nei bacini carbonatici con copertura piroclastica, sia con recapito in area pedemontana che recapito a mare (fig. 6). I rilievi carbonatici sono molto diffusi nella regione ed alla loro base sono presenti aree molto urbanizzate, per cui questo potrebbe avere influenzato in parte l'informazione. Nei bacini vulcanici con recapito a mare si registra la minore frequenza di eventi; bisogna però considerare che gli eventi censiti che ricadono in questa tipologia sono principalmente quelli che hanno interessato l'isola di Ischia, cioè un'area dall'estensione limitata se comparata a quella delle altre tipologie. Indipendentemente dalla tipologia di bacino considerata il picco massimo di eventi si registra in Ottobre, per cui la distribuzione mensile degli eventi sembra non essere influenzata dalle caratteristiche geolitologiche dei materiali presenti, ma prevale il ruolo della precipitazione.

Il 91% dei bacini interessati da flash floods hanno dimensioni minori di 10 km², nel dettaglio il 65% ha estensione minore di 3 km². Ciò mette in risalto i bassi tempi di corrivazione che caratterizzano questi eventi nel contesto considerato. Infatti i bacini di Paupisi e Solopaca (BN), che presentano dimensioni inferiori al km², negli eventi del 2015 hanno fatto registrare un tempo di corrivazione inferiore ai 15 minuti. Purtroppo i dati idrologici e pluviometrici per i bacini di piccole dimensioni sono scarsi e ciò non ha consentito di eseguire uno studio di dettaglio in merito.

Gli eventi alluvionali torrentizi nella regione Campania interessano numerosi centri abitati che sorgono nelle aree di conoide ed i danni arrecati alle popolazioni sono stati innumerevoli, sia in termini di beni colpiti che di danni diretti all'uomo (vittime, feriti, sfollati e senzatetto).

La maggior parte degli eventi con vittime ha interessato bacini con estensione minore di 3 km². Per quanto riguarda invece i danni ai beni pubblici e privati questi si sono verificati maggiormente nei bacini carbonatici, ed in particolare in quelli senza copertura piroclastica (56%), a causa della maggiore granulometria dei materiali coinvolti. Dunque, relativamente all'intensità degli eventi in

termini di danni, i bacini carbonatici con dimensioni inferiori ai 10 km², caratterizzati da elevate energie di rilievo e pendenze elevate, risultano essere i più pericolosi.

L'analisi del dove si verificano gli eventi è stata corredata dalla modellazione dei deflussi nelle aree di conoide attraverso l'applicazione del software RAMMS, a scopo previsionale e come back analysis.. La back analysis è stata eseguita al fine di valutare il potere predittivo del modello per i *debris flow*. Cesca & D'Agostino (2008) hanno confrontato i dati misurati in campagna con i dati ricavati dall'applicazione di RAMMS e FLOW2D, al fine di confrontare i due software.

I siti sono stati selezionati sulla base dei dati disponibili: topografia di dettaglio e dati di campagna relativi ai volumi degli eventi per le *back analysis*. L'attenzione è stata concentrata nella definizione delle aree inondabili visto che queste zone sono abitate, e ciò è di fondamentale importanza per produrre mappe di pericolosità. Questo è stato ulteriore motivo di selezione dei bacini.

I primi casi analizzati sono relativi a 3 bacini siti negli abitati di Quadrelle (AV) e Castellammare di Stabia (NA), questi sono serviti a comprendere meglio le funzionalità e le potenzialità del software. In media sono stati effettuati 10 test per ogni evento. In questi casi non è stato possibile eseguire una stima oggettiva del test migliore, ma qualitativamente le simulazioni migliori sono state ottenute in tutti i casi con un coefficiente d'attrito di 0,1. Questo valore corrisponde a fenomeni di *debris flow*. I test eseguiti per il bacino di Quadrelle, con DEM a differente risoluzione, da 10 m ad 1 m, hanno messo in risalto l'elevata influenza che ha la risoluzione della topografia (fig. 17). Nella simulazione dell'evento per il bacino Cannetiello, in Castellammare, sono state inserite le strade, a cui è stato assegnato un coefficienti d'attrito pari a 0,03, per simulare la minore resistenza al flusso del *debris flow* (fig. 20). Dai risultati emerge come vi sia un sostanziale incremento sia nella velocità del flusso che nell'altezza dei depositi. Per il caso specifico è stato evidenziato come viale Regina Margherita e viale Marconi costituiscono vie preferenziali di flusso.

Nelle back analysis eseguite in 5 bacini siti negli abitati di Buccino (SA) e Paupisi (BN) i risultati ottenuti dal software sono stati confrontati con i dati misurati in campagna (figure 23, 25, 30), al fine di validare i test ed attraverso l'analisi quantitativa è stato possibile scegliere in maniera oggettiva la simulazione migliore mediante indici statistici. Ad oggi non vi sono in letteratura lavori relativi all'applicazione dell'analisi quantitativa ai risultati forniti da RAMMS.

Il software è in grado di prevedere la presenza di depositi nella gran parte dell'area in cui è effettivamente avvenuta deposizione, per questo motivo l'accuratezza associata è alta. Nei *best test* selezionati, il valore dell'accuratezza nella maggior parte dei casi si attiene intorno a 0,9, ma

allo stesso tempo la POFA (Probabilità di Falsi Allarmi) è alta in ogni test, tra il 60-80%. Una fonte di imprecisione rilevante è dovuta ai fenomeni di *out-flow*, deposizione al di fuori dell'area di misurata in campagna, che fanno sì che l'area di deposizione predetta sia nettamente superiore a quella misurata. Ciò è causato dalla forte influenza esercitata dalla topografia e dalla precisione del modello digitale del terreno. Di fondamentale importanza dunque nell'utilizzo del software è la qualità dei dati di input, una base topografica di elevata risoluzione garantirà una qualità migliore dei risultati della simulazione (McArdell et al., 2007).

Il software non riesce a riprodurre esattamente lo spessore dei depositi misurati, ma la differenza tra l'altezza dei depositi simulata e misurata risulta, nella maggioranza dei casi, pari a $\pm 0,50$ m. Ciò è legato al coefficiente d'attrito che nella realtà è maggiore al fronte del flusso e diminuisce andando verso monte, mentre nel software si mantiene costante. Per lo stesso motivo i risultati migliori sono stati ottenuti utilizzando un volume d'evento minore di quello misurato in campagna., è stato quindi constatato che la mobilità del flusso è principalmente legata al parametro d'attrito μ . Tale differenza rende comunque confrontabili tra loro valori non propriamente coincidenti.

La back analysis degli eventi e la validazione dei test è stata eseguita anche al fine di utilizzare i parametri afferenti ai test migliori a scopo previsionale, nei bacini ricadenti nella stessa area che non hanno dato luogo ad alcun fenomeno, o in bacini siti in aree differenti ma con caratteristiche geomorfologiche simili. La possibilità di poter inserire nella simulazione elementi antropici che condizionano il deflusso, rende il software adatto alla simulazione dei flash floods nelle aree di conoide urbanizzate. I risultati ottenuti in termini di accuratezza dei test dimostrano l'applicabilità del software a livello previsionale, e per la redazione di piani d'allertamento di protezione civile. RAMMS è in grado di stimare il volume potenziale, la velocità media del flusso, la portata di picco e la distanza di arresto, il che lo rende idoneo all'uso per la produzione di mappe di pericolosità. Lo sviluppo di un modello più affinato, che richiederebbe però la conoscenza di un maggior numero di parametri, potrebbe essere utile per definire in maniera più precisa possibili scenari di rischio e le relative azioni da intraprendere per la progettazione di opere di mitigazione.

- Alessio G., De Falco M., Di Crescenzo G., Nappi, R., Santo, A.: Flood hazard of the Somma-Vesuvius region based on historical (19-20th century) and geomorphological data, *Annals Of Geophysics, Special Issue: Vesuvius monitoring and knowledge* 56, 4, S0434, doi:10.4401/ag-6440, 2013.
- Ana L., Francesco C., Marco B., Marco C., Lorenzo M.: Large Wood Recruitment and Transport During a Severe Flash Flood in North-Western Italy. In: Lollino G., Arattano M., Rinaldi M., Giustolisi O., Marechal JC., Grant G. (eds) *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 3*. Springer, Cham, 2015.
- Antronico, L., Allasia, P., Baldo, M., Greco, R., Robustelli, G., Sorriso-Valvo, M.: The use of airborne LiDAR data in basin-fan system monitoring: An example from southern Calabria (Italy), in: *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2: Landslide Processes*, 441-444, 2015a.
- Antronico, L., Greco, R., Sorriso-Valvo M.: Recent alluvial fans in Calabria (southern Italy), *Journal of Maps*, 1-12, doi:10.1080/17445647.2015.1047905, 2015b.
- Arattano, M., Cavalli, M., Comiti, F., Coviello, V., Macconi, P., and Marchi, L.: Standardization of methods and procedures for debris flow seismic monitoring, in: *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 3*, Springer International Publishing, 63-67, 2015.
- Arattano, M., Marchi, L., and Cavalli, M.: Analysis of debris-flow recordings in an instrumented basin: confirmations and new findings, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 679-686, doi:10.5194/nhess-12-679-2012, 2012.
- Ascione, A., Cinque, A., Miccadei, E., Villani, F., Berti, C.: The Plio-Quaternary uplift of the Apennine chain: new data from the analysis of topography and river valleys in Central Italy, *Geomorphology*, 102(1), 105-118, 2008.
- Aulitzky, H.: Preliminary two-fold classification of torrents, *Mitteil. der Forst. Bundesversuchsanstalt, Wien, Heft 144*, 243-256, 1982.
- Ayotte, D. & Hungr, O.: Calibration of a runout prediction model for debris-flows and avalanches, in: *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment: Proceedings of the Second International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, edited by: Wieczorek, G. F. & Naeser, N. D., Taipei, Taiwan, 16–18 August 2000, 505–514, 2000.
- Barredo, J.I.: Major flood disasters in Europe: 1950–2005. *Nat. Hazards* 42 (1), 125–148. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-006-9065-2>, 2007.

- Beguería, S.: Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. *Natural Hazards*, 37(3), 315-329, 2006.
- Bekkar, M., Djemaa, H. K., & Alitouche, T. A.: Evaluation measures for models assessment over imbalanced data sets. *Journal Of Information Engineering and Applications*, 3(10), 2013.
- Berti, M. & Simoni, A.: Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships, *Geomorphology*, 90, 144-161, 2007.
- Berti, M. & Simoni, A.: DFLOWZ: A free program to evaluate the area potentially inundated by a debris flow, *Computers Geosciences*, 67, 14-23, 2014.
- Blahut, J., Glade, T., Sterlacchini, S.: Debris flows risk analysis and direct loss estimation: the case study of Valtellina di Tirano, Italy, *Journal of Mountain Science*, 11(2), 288-307, 2014.
- Blair T.C. & McPherson JG.: Alluvial fan processes and forms. In: Abrahams A.T.,Parsons A.J. (eds), *Geomorphology of desert environments*. Chapman and Hall: London; 354-402, 1994a.
- Blair T.C. & McPherson JG.: Alluvial fans and their natural distinction from riversbased on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes, and facies assemblages. *Journal of Sedimentary Research*, A64, 3, 450-489, 1994b.
- Bonardi, G., Ciarcia, S., Di Nocera, S., Matano, F., Sgrosso, I., Torre, M.: Carta delle principali unità cinematiche dell'Appennino meridionale. Nota illustrativa. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 128(1), 47-60, 2009.
- Bonardi, G., D'Argenio, B., Perrone, V.: Carta geologica dell'Appennino Meridionale in scala 1: 250.000. *Mem. Soc. Geol. It.*, 41, 1988.
- Borga, M., Boscolo, P., Zanon, F., Sangati, M.: Hydrometeorological analysis of the 29 August 2003 flash flood in the Eastern Italian Alps. *Journal of Hydrometeorology*, 8(5), 1049-1067, 2007.
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., Jakob, M.: Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518, 194-205, 2014.
- Brunetti, M. T., Peruccacci, S., Rossi, M., Luciani, S., Valigi, D., Guzzetti, F.: Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 447–458, doi:10.5194/nhess-10-447-2010, 2010.
- Brunetti, M.T., Peruccacci, S., Antronico, L.,Bartolini, D., Deganutti, A.M., Gariano, S.L., Iovine, G., Luciani, S., Luino, F., Melillo, M., Palladino, M.R., Parise, M., Rossi, M., Turconi, L., Vennari, C., Vessia, G., Viero, A., Guzzetti, F.: Catalogue of rainfall events with shallow landslides and new rainfall thresholds in Italy, in: Lollino G., Giordan D., Crosta G.B., Corominas J.,Azzam R.,Wasowski J.,Sciarra N.(Eds.), *Springer Special Series: Engineering Geology for Society and*

- Territory. Volume 2: Landslide Processes, 1575–1579. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_280, 2015.
- Bull, W.B.: Geomorphology of segmented alluvial fans in western Fresno County, US Government Printing Office, 1964.
- Bull, W.B.: The alluvial fan environment. *Progress in Physical Geography* 1, 222–270, 1977.
- Calcaterra, D. & Parise, M.: The contribution of historical information in the assessment of landslide hazard, in: Glade T., Albini P., Frances F. (Eds.) “The Use of Historical Data in Natural Hazard Assessments”, *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 17, Kluwer Academic Publishers, 201-217, 2001.
- Calcaterra, D. & Santo, A.: The January 10, 1997 Pozzano landslide, Sorrento Peninsula, Italy. *Engineering Geology*, 75(2), 181-200, 2004.
- Calcaterra, D., Parise, M., Palma, B., Pelella, L.: Multiple debris flows in volcanoclastic materials mantling carbonate slopes, in: Wieczorek, G.F. and Naeser, N.D. (Eds.), *Proceedings 2nd International Conference on “Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment”*, Taiwan, 99-107, 2000.
- Calcaterra, D., Parise, M., Palma, B.: Combining historical and geological data for the assessment of the landslide hazard: a case study from Campania, Italy, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3 (1/2), 3-16, 2003.
- Carrara, A., Crosta, G., and Frattini, P.: Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment, *Geomorphology*, 94, 353–378, 2008.
- CARG: Note illustrative della carta geologica d’Italia alla scala 1:50000, Foglio Sorrento no. 466, pp. 204, 2010.
- Cascini, L., Cuomo, S., Guida, D.: Typical source areas of May 1998 flow-like mass movements in the Campania region, Southern Italy, *Engineering Geology*, 96 (3-4), 107-125, 2008.
- Cavalli, M., Marchi, L., Sangati, M., Zanon, F., Borga, M. : Erosione e trasporto dei sedimenti durante una piena improvvisa: l’evento del Rio Cucco, 29 agosto 2003. *Ricerche ed Esperienze di Sistemazioni Idraulico Forestali*, Bischetti GB. Quaderni di Idronomia Montana, Nuova BIOS, Cosenza, 231-245, 2007.
- Cesca, M., & D’Agostino, V.: Comparison between FLO-2D and RAMMS in debris-flow modelling: a case study in the Dolomites. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 60, 197-206, 2008.
- Chapra, S.C., & Raymond, P., C.: *Numerical Methods for Engineers*, sixth edition, Mc Graw Hill Higher Education. ISBN 9780073401065, 2010.

- Chirico, G.B., Di Crescenzo, G., Santangelo, N., Santo, A., Scorpio V.: Alluvial fan flooding hazard: the study case of Teglia (San Gregorio Magno, Salerno), *Rend. Online Soc. Geol. It.*, 2, 456-458, 2012.
- Christen, M., Bartelt, P., Kowalski, J., Stoffel, L.: Calculation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain with the numerical simulation program RAMMS. In *Proceedings Whistler 2008 International Snow Science Workshop September 21-27, 2008*
- Christen, M., Bühler, Y., Bartelt, P., Leine, R., Glover, J., Schweizer, A., Graf, C., McArdell, B., Gerber, W., Deudelbeiss, Y., Feistl, T.: Integral hazard management using a unified software environment. In *12th Congress Interpraevent (pp. 77-86)*, 2012.
- Christen, M., Kowalski, J., Bartelt, P.: RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 63, 1–14, 2010.
- Corominas, J.: The angle of reach as a mobility index for small and large landslides, *Can. Geotech. J.*, 33, 260–271, 1996.
- Costa, J.E.: Hydraulics and basin morphometry of the largest flash floods in the conterminous United States. *Journal of Hydrology* 93 (3–4), 313–338, 1987.
- Costa, J.E.: Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows. In: Baker V.R, Kochel R.C., Patton P.C., (eds.), *Flood Geomorphology*: New York, Wiley, 113-122, 1988.
- Coussot, P., & Meunier, M.: Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40(3), 209-227, 1996.
- Creutin, J.D., Borga, M., Gruntfest, E., Lutoff, C., Zocatelli, D., Ruin, I.: A space and time framework for analyzing human anticipation of flash floods. *J. Hydrol.* 482, 14–24, 2013.
- Crosta, G. B., Imposimato, S., Roddeman, D.: Numerical modelling of entrainment-deposition in rock and debris-avalanches, *Eng. Geol.*, 109, 135–145, 2009.
- Crosta, G.B., Cucchiario, S., Frattini, P.: Validation of semiempirical relationships for the definition of debris-flow behavior in granular materials, in *Debris Flows Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, ed. D. Rickenmann and C. Chen, Millpress, Rotterdam, pp. 821-831, 2003.
- Crosta, G.B. & Frattini, P.: Controls on modern Alluvial fan processes in the Central Alps, Northern Italy, *Earth Surf. Proc. Land.*, 29, 267–293, 2004.
- Crosta, G. B. & Dal Negro, P.: Observations and modelling of soil slip-debris flow initiation processes in pyroclastic deposits: the Sarno 1998 event. *Natural Hazards and Earth System Science*, 3(1/2), 53-69, 2003.

- D'Agostino, V.: Analisi quantitative e qualitative del trasporto solido torrentizio nei bacini montani del Trentino Orientale. *Associazione Italiana di ingegneria Agraria*, 1, 1996.
- D'Agostino, V., Cesca, M., Marchi, L.: Field and laboratory investigations of runout distances of debris flows in the Dolomites (Eastern Italian Alps). *Geomorphology*, 115(3-4), 294-304 doi: 10.1016/j.geomorph.2009.06.032, 2010.
- D'Agostino, V.: Assessment of past torrential events through historical sources. In *Dating torrential processes on fans and cones*, 131-146, Springer Netherlands, 2013.
- De Falco, M., Forte, G., Santangelo, N., Santo, A. : Flash floods in torrential basins: the event of October 14th-15th 2015 in the surroundings of Benevento (Southern Italy). *Rendiconti Online Societa Geologica Italiana*, 41, 131-134, 2016.
- De Vita, P., & Nappi, M. :Regional distribution of ash-fall pyroclastic deposits in Campania (southern Italy) for landslide susceptibility assessment. In: Margottini C, Canuti P Sassa K (ed) *Landslide science and practice. 3, Spatial analysis and modelling*, Springer-Verlang, pp 103–110, ISBN 978-3-642-31310-3, 2013.
- Del Prete, S., & Mele, R.: Il contributo delle informazioni storiche per la valutazione della propensione al dissesto nell'Isola d'Ischia (Campania), *Rend. Online Soc. Geol. It.*, 2, 29-47, 2006.
- Denlinger, R. P. & Iverson, R. M.: Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 1. theory and computation, *J. Geophys. Res.*, 109, 14 pp., 2004.
- Di Crescenzo, G. & Santo, A.: Debris slides-rapid earth flows in the carbonate massifs of the Campania region 390 (Southern Italy): Morphological and morphometric data for evaluating triggering susceptibility, *Geomorphology*, 66 (1-4), 255-276, 2005.
- Di Crescenzo, G., Liuzza, V., Santangelo, N., Santo, A., Scorpio, V.: Flood susceptibility assessment in urbanized areas:cases study in Campanian Appennines, *Mem. Descr. Carta Geol. d'It. XCIII*, 203-218, 2013.
- Drobatz, K. J.: Measures of accuracy and performance of diagnostic tests. *Journal of Veterinary Cardiology*, 11, S33-S40, 2009.
- Esposito, E., Porfido, S., Violante, C., Molisso, F., Sacchi, M., Santoro, G., and Spiga, E.: Flood risk estimation through document sources analysis: the case of the Amalfi rocky coast, *DTA*, 2011.
- Esposito E, Porfido S, Violante C, Biscarin C, Alaia F, Esposito G.: Water events and historical flood recurrences in the Vietri sul Mare coastal area (Costiera Amalfitana, southern Italy). In:

- Rodda JC, Ubertini L (eds) *The basis of civilization—water science?* vol 286. IAHS Publications, IAHS Press, Wallingford, UK, pp 95–106, 2004.
- Esposito, E., Porfido, S., Violante, C., Alaia, F.: Disaster induced by historical floods in a selected coastal area 395 (Southern Italy), in: *Proceedings of the Workshop PHEFRA (Palaeofloods, Historical Data and Climatic Variability)*, edited by: Thorndycraft, V. R., Benito, G., Barriendos, M., and Llasat, M. C., *Application in Flood Risk Assessment*, Barcelona, Spain, October 2002, 143–148, 2003.
- Faccini F., Luino F., Sacchini A., Turconi L.: Flash Flood Events and Urban Development in Genoa (Italy): Lost in Translation. In: Lollino G., Manconi A., Guzzetti F., Culshaw M., Bobrowsky P., Luino F. (eds) *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5*. Springer, Cham, 2015.
- Fawcett, T.: An introduction to ROC analysis. *Pattern Recogn. Lett.* 27, 861–874, 2006.
- Ferro, V.: *Nuovi e antichi paradigmi nello studio dei processi erosivi*. Convegno AIIA di medio termine, 2011
- Frank, F., McArdell, B., Huggel, C., & Vieli, A.: The importance of erosion for debris flow runout modelling from applications to the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 3, 2379-2417, 2015.
- Gariano, S.,L., Brunetti, M., T., Iovine, G., Melillo, M., PEruccacci, S., Terranova, O., Vennari, C., Guzzetti, F. : Calibration and validation of rainfall thresholds for shallow landslide forecasting in Sicily, southern Italy, *Geomorphology*, 228, 653–665, 2015.
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaškovičová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., Sempere-Torres, D., Stancalie, G., Szolgay, J., Ioannis Tsanis, I., Velasco, D., Viglione, D.: A compilation of data on European flash floods, *Journal of Hydrology*, 367(1), 70-78, 2009.
- Gaume, E., Grunfest, E., Naulin, J.-P., Payrastre, O., and Vannier, O.: Social and hydrological responses to extrem precipitations : an interdisciplinary strategy for postflood investigation, *Weather Climate Soc.*, 6, 135–153, 2014.
- Gavrilovic, Z., & Zivorad M. : Review of disastrous torrent flood on the vlasina river on June 26, 1988—Including analysis of flood and the obtained results. *Fluvial Hydraulics of Mountain Regions*. Springer Berlin Heidelberg, 235-250, 1991.
- Girogi, F., Im, E.S., Coppola, E., Diffenbaugh, N.S., Gao, X.J., Mariotti, L., Shi, Y.: Higher hydroclimatic intensity with global warming. *J. Clim.* 24,5309–5324, 2011.

- Graf C. & McArdell B.: Simulation of debris flow runout before and after construction of mitigation measures: an example from the Swiss Alps. *Proceedings of the International Conference on DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection*. Pyatigorsk, Russia, 22-29 September 2008, 233-236, 2008.
- Graf C. & McArdell B.W.: Debris-flow monitoring and debris-flow runout modelling before and after construction of mitigation measures: an example from an instable zone in the Southern Swiss Alps. In: Lambiel C.; Reynard E.; Scapozza, C. (eds) *La géomorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte*. Actes du colloque de la Société Suisse de Géomorphologie, 3-5 septembre 2009, Olivone. *Géovisions* no 36. Lausanne, Université de Lausanne Institut de Géographie. 245-258, 2011.
- Grimaldi, S., Petroselli, A., Nardi, F., Tauro, F.: Analisi critica dei metodi di stima del tempo di corrivazione. *IDRA 2010: 32° Convegno nazionale di idraulica e costruzioni idrauliche* (Palermo, 14-17 settembre 2010). Palermo, Farina, 2010.
- Gringeri Pantano, F., Nicoletti, P., Parise, M.: Historical and geological evidence for the seismic origin of newly 405 recognized landslides in south-eastern Sicily, and its significance in terms of hazard, *Environmental Management*, 29 (1), 116-131, 2002.
- Guzzetti, F. & Tonelli, G.: Information system on hydrological and geomorphological catastrophes in Italy (SICI): a tool for managing landslide and flood hazards, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 213-232, 2004.
- Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P.: The AVI Project: a bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy, *Environmental Management*, 18, 623–633, 1994.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone F.: Probabilist landslide hazard assessment at the basin scale, *Geomorphology*, 72, 272-299, 2005.
- Hargitai, H., & Kereszturi, Á. (Eds.). :Alluvial Fan in :*Encyclopedia of Planetary Landforms*. Springer, 53-64, 2015.
- Heiser, M., Scheidl, C., & Kaitna, R.: Evaluation concepts to compare observed and simulated deposition areas of mass movements. *Computational Geosciences*, 21(3), 335-343, 2017.
- Hicks, N.S., Smith, J.A., Nelson, P.A.: Catastrophic flooding from an orographic thunderstorm in the central Appalachians. *Water Resources Research*, 41, W12428, doi: 10.1029/2005WR004129, 2005.
- Hooke, R.L. :Processes on arid-region alluvial fans. *J Geol* 75(4):438, 1967.

- Hsu, K. J.: Albert Heim: observations on landslides and relevance to modern interpretations, in: *Rockslides and Avalanches*, edited by: Voight, B., Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 71–93, 1978.
- Hungr, O. & McDougall, S.: Two numerical models for landslide dynamic analysis, *Comput. Geosci.*, 35, 978–992, 2009.
- Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M., and Hutchinson, J. N.: Review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, VII, 221–238, 2001.
- Hungr, O., Morgan, G., Kellerhals, R. : Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal* 21: 663–677, 1984.
- Hungr, O.: A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 32, 610-623, 1995.
- Hungr, O.: A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches, *Can. Geotech. J.*, 32, 610–623, 1995.
- Hurlimann, M., Medina, V., Bateman, A., Copons, R., Altimir, J.: Comparison of different techniques to analyse the mobility of debris flows during hazard assessment-Case study in La Comella catchment, Andorra, in: *Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, edited by: Chen, C.-L. and Major, J. J., Millpress, Netherlands, 411–422, 2007.
- Hurlimann, M., Rickenmann, D., Graf, C.: Field and monitoring data of debris- flow events in the Swiss Alps, *Can. Geotech. J.*, 40, 161–175, 2003.
- Hussin, H. Y., Quan Luna, B., Van Westen, C. J., Christen, M., Malet, J. P., van Asch, T. W.: Parameterization of a numerical 2-D debris flow model with entrainment: a case study of the Faucon catchment, Southern French Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(10), 3075-3090, 2012.
- Iverson, R.M., Schilling, S.P., Vallance, J.W.: Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 110, 972-984, 1998.
- Iverson, R.M.: The physics of debris flows. *Review of Geophysics* 35, 245-296, 1997.
- Johnson A.M. : *Physical Processes in Geology*. Freeman & Cooper, San Francisco, California, 677, 1970.
- Kaitna, R., Schneuwly-Bollschweiler, M., Sausgruber, T., Moser, M., Stoffel, M., Rudolf-Miklau, F.: Susceptibility and triggers for debris flows: emergence, loading, release and entrainment. In *Dating torrential processes on fans and cones (33-49)*. Springer Netherlands, 2013.

- Kellerhals, R., & Church, M.: Hazard management on fans, with examples from British Columbia. In: Rachochi A.H., Chuurch M. (eds), *Alluvial Fans: a field approach*. New York,Wiley, 335-354, 1990.
- Lecce, S.A.:The alluvial fan problem. In: Rachocki AH, Church M (eds) *Alluvial fans: a field approach*. Wiley, Hoboken, pp 3–24, 1990.
- Longobardi, A, Buttafuoco, G., Caloiero, T., Coscarelli, R.: Spatial and temporal distribution of precipitation in a Mediterranean area (southern Italy). *Environ Earth Sci* 75(189). doi:10.1007/s12665-015-5045-8, 2016.
- Malet, J.,P., Remaître, A., Maquaire, O.: Runout modeling and extension of the threatened area associated with muddy debris flows, *Geomorphologie*, 3, 1950–1210, 2004.
- Mammoliti, M.: Studio dei metodi di valutazione della pericolosità associata ai " debris flow" in ambiente alpino, PhD Thesis, Università di Bologna, 2011.
- Mao, M., Cavalli, M., Comiti, F., Marchi, L., Lenzi M.A., Arattano, M.: Sediment transfer processes in two Alpine catchments of contrasting morphological settings. *Journal of Hydrology*, 364 (1-2), 88-98, 2009.
- Marchi L., & Pasuto A.: A debris flow in the Dolomites, Northeastern Italy, *Landslide News*, 12, 9-12, 1999.
- Marchi, L., & Borga, M.: Flash Floods in Alpine Basins. *Management of Mountain Watersheds*, 83, 2012.
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., Gaume, E.: Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management, *Journal of Hydrology*, 394 (1–2), 118–133, 2010.
- Mazzarella, A. & Diodato, N.: The alluvial events in the last two centuries at Sarno, southern Italy: their classification and power-law time-occurrence, *Theoretical and applied climatology*, 72(1-2), 75-84, 2002.
- McArdell, B.W., Cesca, M., Huggel, C., Scheuner, Y., Graf, C., Christen, M.: Numerical Modeling of debris flow run-out in the Swiss Alps. *Geological Society of America Abstracts with Programs* 39, 438 Compact Disk, 2007.
- McCuen R.H.: Uncertainty analyses of watershed time parameters. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(5): pp. 490-498, 2009.
- Mergili, M., Jan-Thomas, F., Krenn, J., Pudasaini, S. P.: r. avaflow v1, an advanced open-source computational framework for the propagation and interaction of two-phase mass flows. *Geoscientific Model Development*,10(2), 553, 2017.

- Merheb, M., Moussa, R., Abdallah, C., Colin, F., Perrin, C., & Baghdadi, N. : Hydrological response characteristics of 380 Mediterranean catchments at different time scales: a meta-analysis. *Hydrological Sciences Journal*, doi 10.1080/02626667.2016.114017, 2016.
- Migale, L.S. & Milone, A.: Mud flows in pyroclastic deposits of the Campania, First data from historical research, *Rassegna Storica Salernitana*, 30, 15 (2), 235-271, 1998.
- Mizuyama, T., Kobashi, S., Ou, G.: Prediction of debris flow peak discharge, *Proc. Int. Symp. Interpraevent*, Bern, Switzerland, Bd. 4, 99-108, 1992.
- Montz, B. E., & Grunfest E.: Flash flood mitigation: Recommendations for research and applications. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 4(1), pp.15-22, 2002.
- Mostardini, F., & Merlini, S.: Appennino Cnetor Meridionale. Sezioni geologiche e proposta di modello strutturale. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 35, 177-202, 1986.
- National Research Council: Alluvial fan flooding. National Academies Press, 1996.
- Nikolopoulos, E. I., Borga, M., Marra, F., Crema, S., Marchi, L. :Debris flows in the eastern Italian Alps: seasonality and atmospheric circulation patterns. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(3), 647-656, 2015.
- Norbiato, D., Borga, M., Degli Esposti, S., Gaume, E., Anquetin, S.: Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins. *Journal of Hydrology*, 362(3), 274-290, 2008.
- North, C.P., & Davidson, S.K. : Unconfined alluvial flow processes: recognition and interpretation of their deposits, and the significance for palaeogeographic reconstruction. *Earth Sci Rev* 111:199–223, 2012.
- O'Brien, J. S., Julien, P. Y., Fullerton, W. T.: Two-dimensional water flood and mudflow simulation, *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(2), pp. 244–261, 1993.
- O'Connor, J.E., Costa, J.E.: Spatial distribution of the largest rainfall-runoff floods from basins between 2.6 and 26,000 km² in the United States and Puerto Rico. *Water Resources Research* 40 (1), W01107. doi:10.1029/ 2003WR002247, 2004.
- Parikh, R., Mathai, A., Parikh, S., Chandra Sekhar, G., Thomas, R.: Understanding and using sensitivity, specificity and predictive values. *Indian Journal of Ophthalmology*, 56(1), 45–50, 2008.
- Peel M. C., Finlayson B. L., McMahon T. A.: Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644, 2007.

- Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Luciani, S., Vennari, C., Guzzetti, F.: Lithological and seasonal control of rainfall thresholds for the possible initiation of landslides in central Italy, *Geomorphology*, 139–140, 79–90, 2012.
- Petrascheck, A., Kienholz, H.: Hazard assessment and mapping of mountain risk in Switzerland. In Rickenmann, D., Chen, C.L., (eds), *Debris flow hazard mitigation: mechanics, prediction, and assessment*, 10-12 September 2003, Davos, Switzerland: 25-38. Millpress, Rotterdam, Netherlands, 2003.
- Pierson T.C. & Costa, J.E.: A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, 7, 1-12, 1987.
- Pierson, T. C., Daag, A. S., Reyes, P. J. D., Regalado, M. T. M., Solidum, R. U., Tubianosa, B. S.: Philippines Flow and deposition of post eruption hot lahars on the east side of Mount Pinatubo, July–October 1991, in: Newhall C. G., Punongbayan R. S. (eds.), *Fire and Mud, Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo* (Washington University Press, Seattle), 921-950, 1996.
- Pierson, T.C. : Hyperconcentrated flow - transitional process between water flow and debris flow. In: Jakob M., Hungr O. (eds.), *Debris-flow hazards and related phenomena*. Springer, Berlin, 159-202, 2005.
- Pirulli, M. & Sorbino, G.: Assessing potential debris flow runout: a comparison of two simulation models, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 961–971, doi:10.5194/nhess-8-961-2008, 2008.
- Porfido, S., Esposito, E., Molisso, F., Sacchi, M., Violante, C.: Flood Historical Data for Flood Risk Estimation in Coastal Areas, Eastern Tyrrhenian Sea, Italy, in: C. Margottini et al. (eds.), *Landslide Science and Practice*, 5, 435 Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, doi:10.1007/978-3-642-31427-8_13, 2013.
- Rickenmann, D.: Empirical relationship for debris flows. *Natural Hazards* 19, 47-77, 1999
- Rickenmann, D.: Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. *Journal of hydraulic engineering*, 117(11), 1419-1439, 1991.
- Rickenmann, R., & Zimmermann, M.: The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. *Geomorphology* 8:175–189, 1993.
- Rickenmann, D., Laigle, D., McArdeell, B.W., Hübl, J.: Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. *Computational Geosciences* 10: 241–264. DOI. 10.1007/s10596-005-9021-3, 2006.

- Romano, P., Santo, A., and Voltaggio, M.: L'evoluzione geomorfologica della pianura del F. Volturno (Campania) durante il tardo Quaternario (Pleistocene medio-superiore - Olocene), *Il Quaternario*, 7 (1), 41-56, 1994.
- Rosatti, G., & Begnudelli, L.: Two-dimensional simulation of debris flows over mobile bed: enhancing the TRENT2D model by using a well-balanced generalized roe-type solver. *Computers & Fluids*, 71, 179-195, 2013.
- Ruiz-Villanueva, V., Díez-Herrero, A., Stoffel, M., Bollschweiler, M., Bodoque, J. M., Ballesteros, J. A.: Dendrogeomorphic analysis of flash floods in a small ungauged mountain catchment (Central Spain), *Geomorphology*, 118, 383–392, 2010.
- Salvati, P., Bianchi, C., Rossi, M., Guzzetti, F.: Societal landslide and flood risk in Italy, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10 (3), 465-483, 2010.
- Sangati, M.: Flash flood analysis and modelling in mountain regions, PhD Thesis, University of Padova, 2009.
- Santangelo, N., Daunis-i-Estadella, J., Di Crescenzo, G., Di Donato, V., Faillace, P., Martín-Fernández, J.A., Romano, P., Santo, A., Scorpio, V.: Topographic predictors of susceptibility to alluvial fan flooding, Southern Apennines, *Earth Surf. Proc. Landf.*, 37, 803–817, doi:10.1002/esp.3197, 2012.
- Santangelo, N., Santo, A., Di Crescenzo, G., Foscari, G., Liuzza, V., Sciarrotta, S., Scorpio, V.: Flood susceptibility assessment in a highly urbanized alluvial fan: the case study of Sala Consilina (southern Italy), *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2765–2780, 2011.
- Santangelo, N., Santo, A., Faillace, P.: Valutazione della pericolosità alluvionale delle conoidi del Vallo di Diano (Salerno, Italia meridionale), *Il Quaternario*, 19, 3-17, 2006.
- Santo, A., Di Crescenzo, G., Del Prete, S., Di Iorio, L.: The Ischia island flash flood of November 2009 (Italy): Phenomenon analysis and flood hazard, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 49, 3-17, 2012.
- Santo, A., Santangelo, N., Benedice, A., Iovane F.: Pericolosità connessa a processi alluvionali in aree pedemontane: il caso di Castellamare di Stabia in Penisola Sorrentina, *Il Quaternario*, 15 (1), 23-37, 2002.
- Santo, A., Santangelo, N., Di Crescenzo, G., Scorpio, V., De Falco, M., Chirico, G.B.: Flash flood occurrence and magnitude assessment in an alluvial fan context: the October 2011 event in the Southern Apennines, *Natural Hazards*, 78 (1), 417-442, 2015.

- Santo, A., Santangelo, N., Forte, G., De Falco, M.: Post flash flood survey: the 14th and 15th October 2015 event in the Paupisi-Solopaca area (Southern Italy), *Journal of Maps*, 13:2, 19-25, DOI: 10.1080/17445647.2016.1249034, 2017.
- Sardar, T., Xu, A., & Raziq, A.: Snow Avalanche Susceptibility Based Assessment of Release Zones over Complex Terrain of Siachen Glacier Applying Ramms and Dsr as Active Macroclimatic Factor. *Procedia Computer Science*, 107, 427-435, 2017.
- Sassa, K.: Geotechnical model for the motion of landslides, in: *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, 10– 15 July, Lausanne, Switzerland, 37–55, 1988.
- Schoklitsch A.: *Handbuch des Wasserbaues*, 3rd edn. Springer, Vienna, 1-475, 1962.
- Schraml, K., Thomschitz, B., McArdeell, B. W., Graf, C., Kaitna, R.: Modeling debris-flow runout patterns on two alpine fans with different dynamic simulation models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(7), 1483, 2015.
- Scorpio, V.: *Analisi Geomorfologica dei sistemi bacino-conoide dell'Appennino campano: scenari di suscettibilità alluvionale*, PhD Thesis, University of Napoli Federico II, 2011.
- Scorpio, V., Santangelo, N. & Santo A. : Multiscale map analysis in alluvial fan flood-prone areas. *Journal of Maps*, 12 (2), 382 – 393, 2016.
- Simoni, A., Mammoliti, M., Berti, M.: Uncertainty of debris flow mobility relationships and its influence on the prediction of inundated areas, *Geomorphology*, 132 (3-4), 249-259, 2011.
- Slaymaker, O.: The distinctive attributes of debris torrents. *Hydrological Sciences Journal*, 33(6), 567-573, 1988.
- SorrisoValvo, M., Antronico, L., La Pera, E.: Controls on fan morphology in Calabria, southern Italy, *Geomorphology*, 24, 169–187, 1998.
- Sosio, R., Crosta, G.B., Frattini, P.: Field observations, rheological testing and numerical modelling of a debris-flow event, *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 2, 290-306, 2007.
- Stoffel, M., Schneuwly-Bollschweiler, M., Rudolf-Miklau, F.: Dating Past Events on Fans and Cones– An Introduction, in: M. Schneuwly-Bollschweiler et al. (eds.), *Dating Torrential Processes on Fans and Cones*, *Advances in Global Change Research* 47, 1-11, doi:10.1007/978-94-007-4336-6 20, 2013.
- Takahashi, T., Sawada, T., Suwa, H., Mizuyama, T., Mizuyama, K., Wu, J., Tang, B., Kang, Z., Zhou, B. : Japan-China joint research on the prevention from debris flow hazards, *Research Report*, Japanese Ministry of Education, Science and Culture, Int. Scientific Research Program No. 03044085, 1994.

- Tiranti, D., Cremonini, R., Marco, F., Gaeta, A. R., Barbero, S.: The DEFENSE (debris flows triggered by storms—nowcasting system): An early warning system for torrential processes by radar storm tracking using a Geographic Information System (GIS), *Computers & Geosciences*, 70, 96-109, 2014.
- Trenberth, K. E.: Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1/2), 123-138, 2011.
- Tropeano, D., & Turconi, L.: Using historical documents for landslide, debris flow and stream flood prevention. 475 Applications in Northern Italy, *Natural Hazards*, 31 (3), 663-679, 2004.
- Varnes, D. J. : Landslide hazard zonation: a review of principles and practice, 3, 1984.
- Vennari, C., Gariano, S. L., Antronico, L., Brunetti, M. T., Iovine, G., Peruccacci, S., Terranova, O., Guzzetti F.: Rainfall thresholds for shallow landslides occurrence in Calabria, southern Italy, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 317-330, 2014.
- Vennari, C., Parise, M., Santangelo, N., Santo, A. : A database on flash floods events in Campania, southern Italy, with an evaluation of their spatial and temporal distribution. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16, 2485–2500, 2016 .
- Violante C., Esposito E., Tranfaglia G., Braca G.: Heavy Rains and Flash Floods at Rocky Coast. The Costiera Amalfitana (Southern Italy). In: Mikoš M., Casagli N., Yin Y., Sassa K. (eds) *Advancing Culture of Living with Landslides*. WLF 2017. Springer, Cham, 2017.
- Vivoni, E.R., Bowman, R.S., Wyckoff, R.L., Jakubowski, R.T., Richards, K.E.: Analysis of a monsoon flood event in an ephemeral tributary and its downstream hydrologic effects. *Water Resources Research*, 42, W03404, doi: 10.1029/2005WR004036, 2006.
- Voellmy, A.: Ueber die Zerstoerungskraft von Lawinen Schweizerische Bauzeitung. English version “On the destructive force of avalanches” translated by Tate R.E. (1964), ed. US Department of Agriculture Forest Service, 1955.
- Wilford D.J., Sakals M.E., Innes J.L., Sidle R.C., Bergerud W.A. : Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, 1, 61-66, 2004.
- WSL/SLF (2010) - Rapid Mass Movements (RAMMS) - A modelling system for natural hazards research and practice. <http://www.wsl.ch/hazards/ramms/> (website access: 20.01.2010).
- Zanchetta, G., Sulpizio, R., and Di Vito, M.A.: The role of volcanic activity and climate in alluvial fan growth at volcanic areas: an example from Southern Campania (Italy), *Sed. Geol.*, 168, 249–280, 2004.
- Zimmermann, M., Mani, P., Romang, H.: Magnitude-frequency aspects of alpine debris flows, *Eclogae Geol. Helv.*, 90, 415-420, 1997.

Zimmermann, M.: Hazard Assessment in: M. Schneuwly-Bollschweiler et al. (eds.), Dating
Torrential Processes on Fans and Cones, *Advances in Global Change Research* 47, 343-353,
doi:10.1007/978-94-007-4336-6 20, 2013.

Appendice

Database

ID	Data	AT	Località	Comune	PR	TB	DB	D	V	F	TP
1	08/10/1540	MA		Amalfi	SA	1	1			1	
2	29/03/1904	B	Cava La Pera (Ervaniello)	Casamicciola	NA	5	1	6		11	<i>Wf</i>
3	30/9/1581	MA		Cava dè Tirreni	SA	1	1			3	<i>Wf</i>
4	30/9/1581	MA		Vietri sul Mare	SA	3	2			3	<i>Wf</i>
5	30/9/1581	MA		Salerno	SA	3	1			3	<i>Wf</i>
6	1/10/1581	A		Castiglione del Genovesi	SA	1	1	4; 3	700- 1000*	8	<i>Wf</i>
7	1/10/1581	A		San Cipriano Picense	SA	1	1	4; 3	700- 1000*	8	
8	1/10/1581	A		Giffoni sei Canali	SA	2	2	4; 3	700- 1000*	3; 8	<i>Wf</i>
9	1/10/1581	MA		Piedimonte Matese	CE	2	3	4; 5	400*	6	<i>Wf</i>
10	31/8/1588	MA		Atrani	SA	1	2			3	<i>Wf</i>
11	13/06/1904	B	Fusandola	Salerno	SA	3	1	4		1	
12	06/1643	MB	Piazza Bagni	Casamicciola	NA	5	1	6		11	<i>Wf</i>
13	06/1643	MB	Piazza La Rita	Casamicciola	NA	5	1	6		11	<i>Wf</i>
14	20/12/1683	MA	Regina Major	Maiori	SA	3	3			1	
15	15/10/1696	MA	Regina Minor	Minori	SA	3	2			1; 2	
16	26/9/1728	MA	quartiere Vallata	Piedimonte Matese	CE	2	3	4; 5		6	<i>Wf</i>
17	25/1/1736	MA	bacino Bonea	Vietri sul Mare	SA	3	2			2	<i>Wf</i>
18	26/9/1736	MA	bacino Bonea	Vietri sul Mare	SA	3	2			2	<i>Wf</i>
19	11/1738	MB	bacino Bonea	Vietri sul Mare	SA	3	2			2	<i>Wf</i>
20	3/11/1750	MA		Vietri sul Mare	SA	3	2			3	<i>Wf</i>
21	3/11/1750	MA	bacino dell'Irno	Salerno	SA	3	3			3	<i>Wf</i>
22	10/10/1751	MA	bacino del Canneto (attualmente Grevone)	Amalfi	SA	1	1			2	
23	1/9/1753	MA	località Chiorito	Amalfi	SA	1	1			1	
24	23/1/1757	MA	bacino del Canneto (attualmente Grevone)	Amalfi	SA	1	1			2	
25	23/1/1757	MA	bacino Bonea	Vietri sul Mare	SA	3	2			2	<i>Wf</i>
26	9/10/1757	MA	bacino del Canneto (attualmente Grevone)	Amalfi	SA	1	1			2	
27	25/5/1762	MA	bacino del Cetus	Cetara	SA	3	1			2	
28	19/1/1764	MA		Salerno	SA	3	3			3	<i>Wf</i>
29	11/1770	MB	Irno e bacini effimeri	Salerno	SA	3	3			2	
30	11/11/1773	MA	Passiano	Cava dè Tirreni	SA	1	1	4		1	<i>Wf</i>
31	11/11/1773	MA		Cava dè Tirreni	SA	1	1		400*	3	<i>Wf</i>
32	11/11/1773	MA		Cetara	SA	3	1			3	<i>Wf</i>
33	11/11/1773	MA	Coperchia	Pellezzano	SA	1	1			3	<i>Wf</i>
34	11/11/1773	MA		Tramonti	SA	3	1			3	<i>Wf</i>
35	11/11/1773	MA		Vietri sul Mare	SA	3	2			3	<i>Wf</i>

ID	Data	AT	Località	Comune	PR	TB	DB	D	V	F	TP
36	11/11/1773	MA	frazione di Coperchia	Salerno	SA	1	1	5	16	3; 1	Wf
37	20/11/1778	MA		Alife	CE	2	2	4		6	Wf
38	20/11/1778	MA	quartiere Vallata	Piedimonte Matese	CE	2	3	5		9	Wf
39	2/1780	MB	Bacino del Dragone	Atrani	SA	1	2			2	
40	25/12/1796	MA	bacino Cavaiola	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
41	25/12/1796	MA	bacino Bonea	Vietri sul Mare	SA	3	2			2	Wf
42	25/12/1796	MA	Irno e bacini effimeri	Salerno	SA	3	3			2	
43	10/1803	MB	quartiere Vallata	Piedimonte Matese	CE	2	3			6	Wf
44	21/01/1805	A	rioni di Caposolofra	Solofra	AV	1	2	5	37	15	Wf
45	22/1/1805	MA	Ribottoli	Serino	AV	2	1		67	6	
46	9/6/1806	MA	Via De Petrinisi	Sala Consilina	SA	2	2	4; 5	30	10	Df
47	10/1810	MB	quartiere Vallata	Piedimonte Matese	CE	2	3			9	Wf
48	15/12/1904	B		Arienzo	CE	1	1	5		6	Df
49	15/12/1904	B		Santa Maria a Vico	CE	1	1	5		6	Df
50	21/12/1812	MA	monte Parlati	Positano	SA	3	1		3	1	
51	30_31/7/1814	M		Bracigliano	SA	1	1			1	
52	4 -19/12/1814	M	via Vairo, Marroncelli, Poerio	Sala Consilina	SA	2	1	5		10	Df
53	18/12/1904	B		Piedimonte Matese	CE	2	3			6	Wf
54	12/11/1817	MA	bacino Cavaiola	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
55	12/11/1817	MA	bacino Bonea	Vietri sul Mare	SA	3	2			2	Wf
56	12/11/1817	MA	bacino Irno e torrenti effimeri	Salerno	SA	3	3			2	
57	22/12/1904	B	Costiera Amalfitana	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
58	23/12/1904	B	Costiera Amalfitana	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
59	24/12/1904	B	Costiera Amalfitana	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
60	25/12/1904	B	bacino dell'Irno	Salerno	SA	3	3			2	
61	6/6/1822	MA	Piazza Monteoliveto e la tenuta De Petrinis	Sala Consilina	SA	2	2	4; 3		10	Df
62	27/10/1822	MA	"pubblico vallone"	Corbara	SA	1	1			1	
63	8/11/1822	MA	strada per Vietri	Salerno	SA	3	3			1	
64	24/1/1823	MA		Amalfi	SA	1	1			3	Wf
65	24/1/1823	MA		Bracigliano	SA	1	1			3	Wf
66	24/1/1823	MA		Cava dè Tirreni	SA	1	1			3	Wf
67	24/1/1823	MA		Vietri sul Mare	SA	3	2			3	Wf
68	8/10/1823	MA	piazza principale	Corbara	SA	1	1			1	
69	3/10/1824	MA	fraz. Torre	Minori	SA	3	2			1	
70	29/12/1904	B	Costiera Amalfitana	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
71	18/6/1827	MA		Sala Consilina	SA	2	2	4; 5		6	Df
72	11/7/1829	MA		Arienzo	CE	1	1	5		6	Df

ID	Data	AT	Località	Comune	PR	TB	DB	D	V	F	TP
73	19/10/1830	MA		Arienzo	CE	1	1	5; 1		6	Df
74	16/7/1833	MA		Arienzo	CE	1	1			6	Df
75	13/9/1834	MA	bacino del Cetus	Cetara	SA	3	1			2	
76	18/7/1835	MA	bacino Cavaiola	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
77	18/7/1835	MA		Conca dei Marini	SA	3	1			2	
78	18/7/1835	MA	bacino Irno	Salerno	SA	3	3			2	
79	27/9/1837	MA	bacino Bonea	Vietri sul Mare	SA	3	2			2	Wf
80	27/9/1837	MA	bacino Irno	Salerno	SA	3	3			2	
81	27/10/1839	MA		Padula	SA	2	2	5		6	Wf
82	1/6/1841	MA		Arienzo	CE	1	1			6	Df
83	20/9/1841	MA	quartiere Vallata	Piedimonte Matese	CE	2	3	4; 5	7	6. 9	Wf
84	20/9/1841	MA		San Potito Sannitico	CE	2	1	4; 5		6. 9	Wf
85	7/11/1842	MA	S.Rocco, S.Lucia	Serino	AV	2	1		19	6	Df
86	26/10/1843	MA	bacino del Cetus	Cetara	SA	3	1			2	
87	26/10/1843	MA	bacino Regina Major	Maiori	SA	3	3			2	
88	26/10/1843	MA	loc. Molina	Vietri sul Mare	SA	3	2			1	
89	26/10/1843	MA	bacino Irno	Salerno	SA	3	3			2	
90	18/3/1845	MA	bacino di Regina Major	Maiori	SA	3	3			2	
91	18/3/1845	MA	bacino di Bonea	Vietri sul Mare	SA	3	2			2	Wf
92	1/10/1846	MA	bacino del Canneto (attualmente Grevone)	Amalfi	SA	1	1			2	
93	1/10/1846	MA	bacino Irno	Baronissi	SA	1	1			2	
94	1/10/1846	MA	bacino del Cetus	Cetara	SA	3	1			2	
95	1/10/1846	MA	bacini: Canneto, Regina Major, Bonea, Irno e torrenti effimeri	Fisciano	SA	2	2			2	
96	1/10/1846	MA	bacino Regina Major	Maiori	SA	3	3			2	
97	1/10/1846	MA	bacino Irno	Pellezzano	SA	1	1			2	
98	31/12/1847	MA		Amalfi	SA	1	1			2	
99	13/9/1851	MA		Alife	CE	2	2			6	Wf
100	13/9/1851	MA		Piedimonte Matese	CE	2	3			6	Wf
101	13/9/1851	MA		Sant'Angelo d'Alife	CE	2	2			6	Wf
102	21/11/1851	MA	S.Lucia, Troiani	Serino	AV	2	1	4		6	Df
103	24/01/1905	B		Volturara Irpina	SA	1	2	5		6	Df
104	24/01/1905	B		Padula	SA	2	2	5		6	Wf
105	28/10/1852	MA		Solofra	AV	1	2	5; 6; 4		15	Wf
106	5/1/1853	MA	bacino del Bonea	Vietri sul Mare	SA	3	2			2	Wf
107	20/3/1853	MA		Volturara Irpina	AV	1	2			6; 9	Df
108	13/9/1857	MA	quartiere Vallata	Piedimonte Matese	CE	2	3	4; 5	90*	6; 9	Wf
109	13/9/1857	MA	vallone S. Bartolomeo e Valle S. Maria	Sant'Angelo d'Alife	CE	2	2	4; 5	90*	6; 9	Wf
110	30/01/1905	B		Padula	SA	2	2	5		6	Wf

ID	Data	AT	Località	Comune	PR	TB	DB	D	V	F	TP
111	13/6/1858	MA	via Indipendenza, Vairo, A. Da Brescia, U. Bossi, C.. Battista	Sala Consilina	SA	2	2	4; 1; 5	22	10; 6	Df
112	01/02/1905	B		Padula	SA	2	2	4; 5		6	Wf
113	8/1866	MB	loc. Cetraro, strada per Tramonti, bacino Regina Major	Maiori	SA	3	1			1;2	
114	11/11/1866	MA	bacino Bonea	Vietri sul Mare	SA	3	2			2	Wf
115	16/3/1867	MA	bacino Bonea	Vietri sul Mare	SA	3	2			2	Wf
116	10/10/1867	MA		Padula	SA	2	2	4; 5		6	Wf
117	1/4/1875	MA	bacino dell'Irno e torrenti effimeri	Conca dei Marini	SA	3	1			2	
118	18/02/1905	B		Padula	SA	2	2	4; 5		6	Wf
119	1/2/1878	MA	bacino Irno e torrenti effimeri	Salerno	SA	3	3			2	
120	1/2/1878	MA	torrenti effimeri	Conca dei Marini	SA	3	1			2	
121	17/11/1880	MA		Arienzo	CE	1	1			9	Df
122	23/02/1905	B		Padula	SA	2	2	4; 5		6	Wf
123	25/02/1905	B		Padula	SA	2	2	4; 5		6	Wf
124	5/2/1885	MA	bacino del Canneto (attualmente Grevone)	Amalfi	SA	1	1			2	
125	05/03/1905	B	Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	
126	10/03/1905	B	bacino Irno e torrenti effimeri	Salerno	SA	3	3			2	
127	10/03/1905	B	bacino Irno	Baronissi	SA	1	1			2	
128	10/03/1905	B	Picentino, Fuorni, Irno e torrenti effimeri	Bracigliano	SA	1	1			2	
129	10/03/1905	B	bacino Picentino	Castiglione del Genovesi	SA	1	1			2	Wf
130	10/03/1905	B	Picentino, Fuorni, Irno e torrenti effimeri	Conca dei Marini	SA	3	1			2	Wf
131	7/10/1899	MA		Castiglione del Genovesi	SA	1	1	4; 1; 5; 6	100*	3; 12	Wf
132	7/10/1899	MA		Cava dè Tirreni	SA	1	1	4; 1; 5; 6	100*	3; 12	Wf
133	7/10/1899	MA		Montecorvino Pugliano	SA	1	1	4; 1; 5; 6	100*	3; 12	Wf
134	7/10/1899	MA		Montecorvino Rovella	SA	1	1	4; 1; 5; 6	100*	3; 12	Wf
135	7/10/1899	MA		Calabritto	SA	2	1	4; 1; 5; 6	100*	3; 12	Wf
136	7/10/1899	MA		Caposele	SA	2	1	4; 1; 5; 6	100*	3; 12	Wf
137	7/10/1899	MA		Curticelle	SA	2	1	4; 1; 5; 6	100*	3; 12	Wf
138	7/10/1899	MA		Giffoni sei Canali	SA	2	2	4; 1; 5; 6	100*	3; 12	Wf
139	7/10/1899	MA	Rio Secco e corso Colauro	Giffoni Valle Piana	SA	2	3	4; 1; 5; 6	3	3; 12; 1	Wf

ID	Data	AT	Località	Comune	PR	TB	DB	D	V	F	TP
140	7/10/1899	MA		Quaglietta	AV	2	1	4; 1; 5; 6	100*	3; 12	Wf
141	7/10/1899	MA	Molina di Vietri	Vietri sul Mare	SA	3	2	4; 1; 5; 6	5	3; 12; 2;	Wf
142	7/10/1899	MA	bacino dell'Irno e torrente Rafastia	Salerno	SA	3	3	4; 1; 5; 6	100*	3; 12; 1	Wf
143	14/03/1905	B		Padula	SA	2	2	4; 5		6	Wf
144	_02/1903	MB	bacino del Bonea	Vietri sul Mare	SA	3	2			2	Wf
145	17/03/1905	B		Cervinara	AV	1	2			1	
146	07/10/1904	MA	Bacino del Dragone	Ravello	SA	1	1			2	
147	17- 18/05/1906	M		Ercolano	NA	4	1		2	4	
148	01/06/1906	MA		Sant'Anastasia	NA	4	1			4	
149	01/06/1906	MB		Cercola	NA	4	1			4	
150	01/06/1906	MB		Pollena Trocchia	NA	4	1			4	
151	20/03/1905	B	via Cavallerizzi, via XX Settembre, via Purgatorio, Piazza del Popolo	Torre del Greco	NA	4	1		26	4	
152	04/01/1907	MA		Ercolano	NA	4	1			4	
153	24- 25/10/1908	M		Portici	NA	4	1			4	
154	24- 25/10/1908	M		San Giorgio a Cremano	NA	4	1			4	
155	24- 25/10/1908	M		Ercolano	NA	4	1		2	4	
156	24- 25/10/1908	M		Torre del Greco	NA	4	1			4	
157	04/10/1909	MA		Boscotrecase	NA	4	1			4	
158	23/10/1910	A	bacino del Cetus, abitato di Cetara e loc. Utrio e loc. Cappetta, corso Federic	Cetara	SA	3	1	5; 4	150*	18; 3; 1; 2; 13	Wf
159	24/10/1910	MA	torrente Fusandola	Salerno	SA	3	1	5		3; 1; 2	Wf
160	24/10/1910	MA		Amalfi	SA	1	1	5		3; 1	Wf
161	24/10/1910	MA		Ravello	SA	1	1	5; 1		3; 1	Wf
162	24/10/1910	MA	loc. Acquabona	Scala	SA	1	1	5; 4		3; 1	Wf
163	24/10/1910	MA	via Giordano	Portici	NA	4	1			4; 2	
164	24/10/1910	MA		Furore	SA	3	1	5		3	Wf
165	24/10/1910	MA	fraz. Erchie, valloni S.Nicola e Sovarano	Maiori	SA	3	3	5; 4	24	3; 18; 1	Wf
166	24/10/1910	MA		Minori	SA	3	2	5	4	3; 1	Wf
167	24/10/1910	MA	loc. Molina	Vietri sul Mare	SA	3	2	5	1	3; 1	Wf
168	24/10/1910	MA	loc. Casabona	Barano d'Ischia	NA	5	1	4; 5		11; 2	Wf
169	24/10/1910	MA	Monterone	Forio d'Ischia	NA	5	1	4; 5		11; 2	Wf
170	24/10/1910	MA		Ischia	SA	5	1	5		3; 2	Wf
171	24/10/1910	MA		Lacco Ameno	NA	5	1	4; 5		11; 2	Wf

ID	Data	AT	Località	Comune	PR	TB	DB	D	V	F	TP
172	24/10/1910	MA		Serrara Fontana	NA	5	1	4; 5		11	Wf
173	24/10/1910	MA		Casamicciola	NA	5	1	4; 5	6	11; 2	Wf
174	24- 25/10/1910	M		Boscotrecase	NA	4	1			4; 2	
175	24- 25/10/1910	M		Cercola	NA	4	1			4; 2	
176	24- 25/10/1910	M	Resina	Ercolano	NA	4	1			4; 2	
177	24- 25/10/1910	M		Pollena Trocchia	NA	4	1			4	
178	24- 25/10/1910	M		San Sebastiano al Vesuvio	NA	4	1			4; 2	
179	24- 25/10/1910	M		Sant'Anastasia	NA	4	1			4	
180	24- 25/10/1910	M		Somma Vesuviana	NA	4	1			4	
181	02/01/1911	MA	bacino del Cetus	Cetara	SA	3	1			2	
182	02/01/1911	MA	bacino del Bonea	Vietri sul Mare	SA	3	2			2	Wf
183	21/09/1911	MA		Boscoreale	NA	4	2			4	
184	21/09/1911	MA		Ottaviano	NA	4	1			4	
185	21/09/1911	MA		Portici	NA	4	1			4	
186	21/09/1911	MA		San Giuseppe Vesuviano	NA	4	1			5	
187	21/09/1911	MA	via XX Settembre, via Nazionale, vico Fiorillo, via Umberto	Torre del Greco	NA	4	1		6	4	
188	21/09/1911	MA	Resina (via Pugliano, via Mare, via Cortile, via Trentola)	Ercolano	NA	4	1		10	4	
189	03/01/1915	MA	bacino Regina minor	Minori	SA	3	2			2	
190	29/03/1905	B		Alife	CE	2	2			6	Wf
191	06/11/1916	MA	bacino Bonea	Vietri sul Mare	SA	3	2			2	Wf
192	21/09/1921	MA		San Giuseppe Vesuviano	NA	4	1			4	
193	25/10/1921	MA		Ercolano	NA	4	1			4	
194	25/10/1921	MA		Portici	NA	4	1			4	
195	25/10/1921	MA		San Giorgio a Cremano	NA	4	1			4	
196	25/10/1921	MA		Torre del Greco	NA	4	1			4	
197	13/11/1921	MA		Furore	SA	3	1			2	
198	26/03/1924	MA	fraz. Vettica Minore, loc. Baglio	Amalfi	SA	1	1	4	60*	3; 8	Wf
199	26/03/1924	MA		Agerola	NA	1	1		100*	3; 8	Wf
200	26/03/1924	MA		Atrani	SA	1	2		100*	3; 8	Wf
201	26/03/1924	MA		Cetara	SA	3	1			1	Wf
202	26/03/1924	MA		Minori	SA	3	2		100*	3; 8	Wf
203	26/03/1924	MA		Positano	SA	3	1		100*	3; 8	Wf

ID	Data	AT	Località	Comune	PR	TB	DB	D	V	F	TP
204	26/03/1924	MA	bacini torrenti Bonea e Regina Major	Vietri sul Mare	SA	3	2	4	100*	5;3; 8	Wf
205	26/03/1924	MA	Marina di Praiano	Praiano	SA	3	1		22	3; 8; 1; 2	Wf
206	01/10/1927	MA		Sala Consilina	SA	2	2	4; 5		6	Df
207	01/11/1927	M	Piazza Umberto I	Sala Consilina	SA	2	2	4; 5		10	Df
208	21/09/1929	MA	bacino Picentino	Giffoni Valle Piana	SA	2	3			2	
209	21/09/1929	MA		Montecorvino Rovella	SA	1	1			2	
210	21/09/1929	MA	bacino Bonea	Vietri sul Mare	SA	3	2			2	Wf
211	31/08/1931	MA		Castellammare di Stabia	NA	3	1		2	1	Df
212	01/03/1935	MA	bacini Cavaiola, e torrenti effimeri	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
213	01/03/1935	MA		Conca dei Marini	SA	3	1			2	
214	01/03/1935	MA	bacino Regina minor	Minori	SA	3	2			2	
215	01/03/1935	MA	bacino Dragone	Ravello	SA	1	1			2	
216	01/03/1935	MA	bacini Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	
217	21/08/1935	MA		Castellammare di Stabia	NA	3	1			1	Df
218	18/04/1905	B		Giffoni Valle Piana	SA	2	3			1	
219	14/09/1939	MA	bacino del Canneto (attualmente Grevone)	Amalfi	SA	1	1			2	
220	14/09/1939	MA	bacini di : Canneto, Regina Major, Irno, Picentino e torrenti effimeri	Conca dei Marini	SA	3	1			2	
221	14/09/1939	MA	bacini di Regina Major	Maiori	SA	3	3			2	
222	01/06/1941	MA		Arienzo	CE	1	1			9	Df
223	19/09/1943	MA	Loc. Mugnano-Quadrelle	Quadrelle	AV	1	2			18	Df
224	18/06/1944	MA	Regina minor	Minori	SA	3	2			2	
225	02/10/1945	MA	Regina minor	Minori	SA	3	2			2	
226	02/03/1947	MA	Regina minor	Minori	SA	3	2			2	
227	30/06/1947	MA	Piazza Umberto I	Sala Consilina	SA	2	2	4; 5	1	9; 10	Df
228	25/10/1947	MA	Regina minor	Minori	SA	3	2			2	
229	23/05/1948	MA	Regina minor	Minori	SA	3	2			2	
230	26/07/1948	MA		Somma Vesuviana	NA	4	1	4		4	
231	05/09/1948	MA	Regina minor	Minori	SA	3	2			2	
232	02/10/1948	MA	S.Michele	Alife	CE	2	2	5		6	Wf
233	28/10/1948	MA	Regina minor	Minorii	SA	3	2			2	
234	01/10/1949	MA	bacino Bonea	Vietri sul Mare	SA	3	2			2	Wf
235	14/08/1950	MA		Somma Vesuviana	NA	4	1			4	
236	02/09/1950	MA		Somma Vesuviana	NA	4	1			4	
237	25/12/1950	MA	Pozzano	Castellammare di Stabia	NA	3	1			1	Wf
238	21/01/1951	MA	Regina Minor	Minori	SA	3	2			2	

ID	Data	AT	Località	Comune	PR	TB	DB	D	V	F	TP
239	09/03/1951	MA	Pozzano	Castellammare di Stabia	NA	3	1			1	<i>Wf</i>
240	09/11/1951	MA	bacino Picentino	Giffoni Valle Piana	SA	2	3			2	
241	09/11/1951	MA		Montecorvino Rovella	SA	1	1			2	
242	11/09/1953	MA		Agerola	NA	1	1			2	
243	11/09/1953	MA	bacino Dragone	Ravello	SA	1	1			2	
244	06/05/1905	B	versante orientale del monte Colonna	Ravello	SA	1	1			1	
245	25/10/1954	MA	Fratte, zona E e alta della città, quartiere Canalone	Salerno	SA	1	3	6; 4; 5	106*	3;5;18	<i>Wf</i>
246	25/10/1954	MA	frazione di Alessia, Marinie Castagneto	Cava dè Tirreni	SA	1	1		31	3; 1;18	<i>Wf</i>
247	25/10/1954	MA	bacino del Canneto (attualmente Grevone)	Amalfi	SA	1	1			3	<i>Wf</i>
248	25/10/1954	MA		Atrani	SA	1	2			3	<i>Wf</i>
249	25/10/1954	MA		Maiori	SA	3	3		34	3; 1; 18	<i>Wf</i>
250	25/10/1954	MA		Positano	SA	3	1			3	<i>Wf</i>
251	25/10/1954	MA	Vettica Maggiore	Praiano	SA	3	1			3	<i>Wf</i>
252	25/10/1954	MA	fraz. Di Molina e Marina	Vietri sul Mare	SA	3	2		117*	3; 18	<i>Wf</i>
253	25/10/1954	MA		Minori	SA	3	2	2	3	3; 1; 18	<i>Wf</i>
254	25/10/1954	MA		Tramonti	SA	3	1		35	3; 8; 2;18	<i>Wf</i>
255	05/11/1954	MA		Ercolano	NA	4	1			4	
256	04/02/1955	MA		San Sebastiano al Vesuvio	NA	4	1			5	
257	11/09/1955	MA		Agerola	NA	1	1			2	
258	11/09/1955	MA	bacino Irno	Pellezzano	SA	1	1			2	
259	11/09/1955	MA	bacino di Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	
260	10/01/1956	MA		San Giuseppe Vesuviano	NA	4	1		3	4	
261	18/11/1956	MA		Arpaia	BN	1	1			6	Df
262	21/01/1957	MA		Sant'Anastasia	NA	4	1			5	
263	22/10/1957	MA		Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
264	22/10/1957	MA	bacino di Regina Minor	Minori	SA	3	2			2	
265	22/10/1957	MA	bacino di Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	
266	30/12/1957	MA		Cercola	NA	4	1		2	4	
267	19/09/1960	MA		Portici	NA	4	1			4	
268	19/09/1960	MA		Ercolano	NA	4	1		1	4	
269	07/07/1961	MA		Torre del Greco	NA	4	1		1	4	
270	12/11/1961	MA		Torre del Greco	NA	4	1		2	4	

ID	Data	AT	Località	Comune	PR	TB	DB	D	V	F	TP
271	27/06/1962	MA		San Giuseppe Vesuviano	NA	4	1			5	
272	16/02/1963	MA		Sala Consilina	SA	2	2	4; 5		6	Df
273	16/02/1963	MA	bacino Cavaiola	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
274	16/02/1963	MA	bacino Irno	Pellezzano	SA	1	1			2	
275	16/02/1963	MA		Petina	SA	2	1			2	
276	16/02/1963	MA		Positano	SA	3	1			2	
277	16/02/1963	MA	bacino di Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	
278	18/02/1963	MA		Padula	SA	2	2	4; 5		6	Wf
279	21/02/1963	MA	loc. Trara Genoio	Positano	SA	3	1			1	
280	13/05/1963	MA		Sant'Anastasia	NA	4	1			4	
281	30/05/1963	MA		Torre del Greco	NA	4	1			5	
282	25/09/1963	MA		Agerola	NA	1	1			2	
283	25/09/1963	MA		Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
284	25/09/1963	MA	bacino del Cetus	Cetara	SA	3	1			2	
285	25/09/1963	MA		Minori	SA	3	2			2	
286	25/09/1963	MA	bacino Irno	Pellezzano	SA	1	1			2	
287	07/10/1963	MA		Salerno	SA	3	3			1	
288	07/10/1963	MA	bacino del Canneto (attualmente Grevone)	Amalfi	SA	1	1			2	
289	07/10/1963	MA	bacino del Cetus	Cetara	SA	3	1			2	
290	07/10/1963	MA	bacino Regina Major	Maiori	SA	3	3			2	
291	07/10/1963	MA	bacino Regina minor	Minori	SA	3	2			2	
292	16/12/1963	MA	bacino Irno	Pellezzano	SA	1	1			2	
293	16/12/1963	MA	bacino di Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	
294	13/01/1965	MA		Torre del Greco	NA	4	1			5	
295	06/04/1966	MA		Torre Annunziata	NA	4	1			5	
296	25/10/1966	MA		Castiglione del Genovesi	SA	1	1		1	3; 8	
297	25/10/1966	MA	Monte Monna	Giffoni sei Canali	SA	2	2		2	18; 1	Wf
298	26/10/1966	MA		Salerno	SA	3	3			3	Wf
299	26/10/1966	MA		Alife	CE	2	2			6	Wf
300	26/10/1966	MA		Baronissi	SA	1	1			3	Wf
301	26/10/1966	MA		Cava dè Tirreni	SA	1	1			3	Wf
302	26/10/1966	MA	quartiere Vallata	Piedimonte Matese	CE	2	3			6	Wf
303	19/05/1905	B		Ravello	SA	1	1			1	
304	09/01/1968	MA		Salerno	SA	3	3			5	
305	17/12/1968	MA		Padula	SA	2	2	4; 5		6	Wf
306	19/12/1968	MA	bacino del Canneto (attualmente Grevone)	Amalfi	SA	1	1			2	
307	19/12/1968	MA	bacino di Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	

ID	Data	AT	Località	Comune	PR	TB	DB	D	V	F	TP
308	21/05/1905	B		Alife	CE	2	2			6	Wf
309	15/03/1969	MA		Agerola	NA	1	1			1	
310	15/03/1969	MA	bacini: Cavaiola, e torrenti effiemri	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
311	17/09/1969	MA	bacini: Cavaiola	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
312	22/09/1969	MA		San Giorgio a Cremano	NA	4	1			4	
313	22/05/1905	B		Arpaia	BN	1	1			5	Df
314	08/04/1970	MA		Salerno	SA	3	3		2	1	
315	01/10/1970	MA		Torre del Greco	NA	4	1			4	
316	01/10/1970	MA		Portici	NA	4	1		1	4	
317	01/10/1970	MA		Torre Annunziata	NA	4	1		1	4	
318	02/10/1970	MA	bacino del Canneto (attualmente Grevone)	Amalfi	SA	1	1			2	
319	02/10/1970	MA	bacino Irno	Baronissi	SA	1	1			2	
320	02/10/1970	MA		Minori	SA	3	2			2	
321	02/10/1970	MA	bacino Irno	Pellezzano	SA	1	1			2	
322	09/12/1970	MA	SS, loc. Montevergine	Forio d'Ischia	NA	5	1			1	
323	25/12/1970	MA	bacino del Canneto (attualmente Grevone)	Amalfi	SA	1	1			2	
324	25/12/1970	MA	bacino Irno	Baronissi	SA	1	1			2	
325	25/12/1970	MA	bacino Regina Minor	Minori	SA	3	2			2	
326	25/12/1970	MA	bacino Irno	Pellezzano	SA	1	1			2	
327	23/05/1905	B		Arienzo	CE	1	1			6	Df
328	19/01/1971	MA		Torre del Greco	NA	4	1			5	
329	21/02/1971	MA		Castellammare di Stabia	NA	3	1	5		1	Df
330	15/10/1971	MA	bacini: Cavaiola	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
331	15/10/1971	MA	bacino di Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	
332	23/11/1971	MA	bacino del Canneto (attualmente Grevone)	Amalfi	SA	1	1			2	
333	23/11/1971	MA	bacino Regina Minor	Minori	SA	3	2			2	
334	06/03/1972	MA	bacini: Cavaiola	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
335	06/03/1972	MA	bacino di Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	
336	27/07/1972	MA	quartiere Vallata	Piedimonte Matese	CE	2	3	4		6	Wf
337	21/10/1972	MA	bacini: Cavaiola	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
338	21/10/1972	MA	bacino di Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	
339	21/11/1972	MA	bacino Irno	Baronissi	SA	1	1			2	
340	21/11/1972	MA	bacini: Cavaiola	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
341	21/11/1972	MA	bacino Irno	Pellezzano	SA	1	1			2	

ID	Data	AT	Località	Comune	PR	TB	DB	D	V	F	TP
342	02/01/1973	MA	bacino del Canneto (attualmente Grevone)	Amalfi	SA	1	1			2	
343	02/01/1973	MA	bacini: Cavaiola	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
344	02/01/1973	MA	bacino Regina Major	Maiori	SA	3	3			2	
345	02/01/1973	MA	bacino Regina Minor	Minori	SA	3	2			2	
346	02/01/1973	MA	bacino di Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	
347	09/09/1973	MA	Loc. Mugnano-Quadrelle	Quadrelle	AV	1	2			18	Df
348	19/09/1973	MA		Torre del Greco	NA	4	1		2	4	
349	26/05/1905	B	Lagno di Trulo	Baiano	AV	1	1			1; 18	
350	25/09/1974	MA		Arienzo	CE	1	1	4		6	Df
351	25/09/1974	MA		Arpaia	BN	1	1	4		6	Df
352	25/09/1974	MA		Forchia	BN	1	1	4		6	Df
353	03/10/1974	MA		Arienzo	CE	1	1			6	Df
354	03/10/1974	MA		Sant'Angelo d'Alife	CE	2	2			6	Wf
355	05/10/1974	MA		Arienzo	CE	1	1			6	Df
356	28/06/1976	MA	bacino Irno	Salerno	SA	3	3			1	
357	13/10/1976	MA		Torre del Greco	NA	4	1		1	4	
358	29/10/1979	MA	via Cavallo	Torre del Greco	NA	4	1		2	4	
359	12/10/1980	MA	bacini: Cavaiola	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
360	12/10/1980	MA	bacino Regina Major	Maiori	SA	3	3			2	
361	12/10/1980	MA	bacino Regina Minor	Minori	SA	3	2			2	
362	12/10/1980	MA	bacino di Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	
363	15/10/1980	MA	bacini: Cavaiola	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
364	01/06/1981	MB	ristorante Paola Poli	Forio d'Ischia	NA	5	1	4		5	
365	19/12/1982	MA	via Cavallo	Torre del Greco	NA	4	1		2	4	
366	15/08/1983	MA	Cava Scura e Cava Olmitello	Barano d'Ischia	NA	5	1			15	
367	30-31/10/1985	M	Cimitero	Ottaviano	NA	4	1			4	
368	30-31/10/1985	M	ferrovia	Portici	NA	4	1			4	
369	30-31/10/1985	M		San Gennaro Vesuviano	NA	4	1			4	
370	30-31/10/1985	M	via Cavallo	Torre del Greco	NA	4	1			4	
371	30-31/10/1985	M	via Palmieri	Ercolano	NA	4	1		1	4	
372	02/11/1985	MA	via Palmieri	Ercolano	NA	4	1			4	
373	16-17/11/1985	M		Portici	NA	4	1			4	
374	16-17/11/1985	M	ViaTufarelli	San Giorgio a Cremano	NA	4	1			4	

ID	Data	AT	Località	Comune	PR	TB	DB	D	V	F	TP
375	16- 17/11/1985	M	via Cavallo, via Novesca, via Sant'Elena	Torre del Greco	NA	4	1			4	
376	17/11/1985	MA		Summonte	AV	1	1	6; 4		1	
377	17/11/1985	MA	bacini: Cavaiola	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
378	17/11/1985	MA	monte Longano	Durazzano	BN	1	1	5; 6		1	
379	17/11/1985	MA	bacino Regina Major	Maiori	SA	3	3			2	
380	17/11/1985	MA	bacino di Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	
381	01/02/1986	MB		Forio d'Ischia	NA	5	1			5	
382	01/02/1986	MB	Castello Aragonese	Castellammare di Stabia	NA	3	1			5	<i>Df</i>
383	13/03/1986	MA	località Molina tra Cava dei Tirreni e Vietri	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
384	13/03/1986	MA	bacino Irno	Pellezzano	SA	1	1			2	
385	20/07/1986	MA		Roccarainola	NA	1	1			5	
386	24/11/1986	MA	Bacino Cavaiola	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
387	24/11/1986	MA	bacino di Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	
388	22/02/1987	MA		Barano d'Ischia	NA	5	1			5	
389	16/10/1987	MA	bacino Irno	Baronissi	SA	1	1			2	
390	16/10/1987	MA	bacino Irno	Pellezzano	SA	1	1			2	
391	10/11/1987	MA	bacino Regina Minor	Minori	SA	3	2			2	
392	10/11/1987	MA		Positano	SA	3	1			2	
393	10/11/1987	MA		Ravello	SA	1	1			2	
394	10/11/1987	MA	bacino di Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	
395	15/09/1988	MA	bacino Irno	Baronissi	SA	1	1			2	
396	15/09/1988	MA	bacino Irno	Pellezzano	SA	1	1			2	
397	15/09/1988	MA	bacino di Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	
398	15/07/1991	MA	Piazza Santa Croce	Torre del Greco	NA	4	1			4	
399	26/03/1992	MA	porto	Torre del Greco	NA	4	1			4	
400	18/04/1992	MA		Portici	NA	4	1			4	
401	24/06/1992	MA	loc.Cologna	Pellezzano	SA	1	1			1	
402	05/08/1992	MA		Torre del Greco	NA	4	1			4	
403	25/09/1992	MA	Bacino Cavaiola	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
404	25/09/1992	MA	bacino di Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	
405	3-4/10/1992	M	Piazza Palomba	Torre del Greco	NA	4	1			4	
406	04/10/1992	MA	bacino Irno	Baronissi	SA	1	1			2	
407	04/10/1992	MA	Bacino Cavaiola	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
408	20/08/1993	MA	vallone Puzillo	Solofra	AV	1	2	3	1	18; 5; 1	<i>Df</i>
409	20/08/1993	MA	Ribottoli, vallone Puzillo	Serino	AV	2	1		1	6	<i>Df</i>
410	08/12/1993	MA	località Rotolo	Cava dè Tirreni	SA	1	1			1	

ID	Data	AT	Località	Comune	PR	TB	DB	D	V	F	TP
411	20/12/1993	MA		Padula	SA	2	2	4; 5		9	Wf
412	26/12/1993	MA		Sala Consilina	SA	2	2	4; 5		6	Df
413	22/08/1996	MA	Porto, via XX Settembre	Torre del Greco	NA	4	1			4	
414	22/08/1996	MA	via Paparo	Massa di Somma	NA	4	1			4	
415	22/08/1996	MA		San Gennaro Vesuviano	NA	4	1			4	
416	22/08/1996	MA	via Matteotti 46	San Giorgio a Cremano	NA	4	1			4	
417	20/09/1996	MA	Bacino Cavaiola	Cava dè Tirreni	SA	1	1			2	
418	20/09/1996	MA	bacino Picentino	Giffoni sei Canali	SA	2	3			2	
419	20/09/1996	MA	bacino di Regina Major	Tramonti	SA	3	1			2	
420	26/11/1996	MA		Padula	SA	2	2	5		6	Wf
421	26/11/1996	MA		Sala Consilina	SA	2	2	5		6	Df
422	09/01/1997	MA	Interruzione valico di Chiunzi	Corbara	SA	1	1			5	
423	9-10/01/1997	MA	loc. Montagnone, Cantoni, Cava Ervaniello; Campomanno; La Pera; Cava Puzzillo, Tresta, Cognola, monte Tabor, Molarà	Casamicciola	NA	5	1			11	Wf
424	9-10/01/1997	M	Monte Cito	Lacco Ameno	NA	5	1			11	
425	10/01/1997	MA	via Cinque.SS18; Avvocatella	Cava dè Tirreni	SA	1	1	5		1	
426	10/01/1997	MA	frazione di Campigliano	San Cipriano Picentino	SA	1	1			1	
427	10/01/1997	MA		San Giuseppe Vesuviano	NA	4	1			4	
428	10/01/1997	MA	loc.Guarno e Tresaro	Vietri sul Mare	SA	3	2			1	
429	09/11/1987	MA	Vie Santa Caterina e Bonito	Castellammare di Stabia	NA	3	1	4; 5		14	
430	20/08/1997	MA	Loc. Mugnano-Quadrelle	Quadrelle	AV	1	2			18	Wf
431	21/08/1997	MA		Sant'Anastasia	NA	4	1			4	Df
432	21/08/1997	MA		Somma Vesuviana	NA	4	1			4	
433	13/11/1997	MA		Ercolano	NA	4	1			4	
434	13/11/1997	MA	via Beneduce	Torre del Greco	NA	4	1			4	
435	13/11/1997	MA	via Diaz	Boscoreale	NA	4	1			4	
436	13/11/1997	MA		Cercola	NA	4	1			4	
437	13/11/1997	MA		San Sebastiano al Vesuvio	NA	4	1			4	
438	13/11/1997	MA		Somma Vesuviana	NA	4	1			4	
439	13/11/1997	MA	Loc. Mugnano-Quadrelle	Quadrelle	AV	1	2			18	Df
440	05/05/1998	MA		Avella	AV	1	3			7	
441	05/05/1998	MA	monti della cittadina, Montoro Inferiore	Montoro	AV	1	1			1	

ID	Data	AT	Località	Comune	PR	TB	DB	D	V	F	TP
442	24-25/7/1999	M	loc. Montagnone, Cantoni	Casamicciola	NA	5	1	5		11; 15	
443	24-25/7/1999	M	Cava Ervaniello, La Rita	Lacco Ameno	NA	5	1	5		15	
444	15/12/1999	MA		Cervinara	AV	1	2		5	5; 7	
445	19/11/2000	MA	Santa Maria La Bruna	Torre del Greco	NA	4	1			4	
446	27/12/2000	MA	via Caprile	Ercolano	NA	4	1			4	
447	22/08/2001	MA		Sant'Angelo d'Alife	CE	2	2	4; 5; 6		16	Wf
448	22/08/2001	MA		Santa Maria a Vico	CE	1	1			6	Df
449	15/09/2001	MA	Cava Olmitello	Barano d'Ischia	NA	5	1	6		15	
450	15/09/2001	MA	loc. La Rita	Casamicciola	NA	5	1	4	2	11	Wf
451	22/06/2002	MA		Raviscanina	CE	2	1	1		9;6	Df
452	26/07/2002	A		Caposele	AV	2	1	6; 4		18	Wf
453	28/08/2002	MA	Cava Scura	Barano d'Ischia	NA	5	1			15	
454	10/09/2002	MA	Cava Scura e Cava Petrella	Barano d'Ischia	NA	5	1			15	
455	23- 24/09/2002	M	Cava Olmitello	Barano d'Ischia	NA	5	1	6; 4		15	
456	09/09/2003	MA	all'altezza del Castello	Castellammare di Stabia	NA	3	1			18	Df
457	20/04/2004	MA	zone di Badia e Sant'Arcangelo	Cava dè Tirreni	SA	1	1	6; 4		18	Wf
458	28/09/2007	A	Vallone Frazione Chiusa, Aterrana di Montoro Superiore	Montoro	AV	1	1	5; 4		18	
459	28/09/2007	A	rione Candragone	Volturara Irpina	AV	1	2	4; 3		18; 6	Df
460	10/11/2009	A	Piazza Bagni	Casamicciola	NA	5	1	4; 5	1	11	Wf
461	30/07/2010	MA		Somma Vesuviana	NA	4	1			4	
462	31/07/2010	A	torrente Prepezzano; località "Madonna del Carmine"	Giffoni sei Canali	SA	2	3	5		8	
463	09/09/2010	A		Atrani	SA	1	2	5; 4	1	18	Wf
464	07/10/2011	A	vallone Teglia , + altro vallone	Buccino	SA	2	2	5;4		17; 18	Df
465	07/10/2011	A	Vallone Matruro, Teglia	San Gregorio Magno	SA	2	3	5		18	Df
466	21/10/2011	MA		Pollena Trocchia	NA	4	1		1	4	
467	19/06/2014	MA	via Pinazzola	Arienzo	CE	1	1	5; 4; 3		18	Df
468	19/06/2014	MA	dal rione Icap al centro fino a via Turati, frazione Vignola e Rione Ferone	Tufino	NA	1	1	4		18	Wf
469	01/09/2014	MA	Madonna della Neve, Rione Santa Lucia	Solofra	AV	1	2	4; 5		18	Df
470	01/09/2014	A	via della Rimembranza	Volturara Irpina	AV	1	2	4; 5		18	Df
471	11/09/2014	A	zona Quisisana	Castellammare di Stabia	NA	3	1	5		18	Df

ID	Data	AT	Località	Comune	PR	TB	DB	D	V	F	TP
472	25/02/2015	A	Vallone Olmitello	Barano d'Ischia	NA	5	1		1	18	
473	15/10/2015	A	San Pietro	Solopaca	BN	1	1	4; 5; 1		19	Df
474	15/10/2015	A	Manderisi	Paupisi	BN	1	1	4; 5; 1		19	Df

ID= numero progressivo evento; Data; AT= accuratezza temporale, classi: A=alta, MA=medio-alta, M= media, MB=medio-bassa, B=bassa; località; Comune; PR=Provincia; TB= tipologia bacino, classi: 1) Bacini carbonatici con copertura piroclastica; 2) Bacini carbonatici senza copertura piroclastica; 3) Bacini carbonatici con copertura piroclastica e recapito a mare; 4) Bacini vulcanici; 5) Bacini vulcanici con recapito a mare; DB= dimensioni bacino, classi: 1) <3 km², 2) >3 km² e <10 km²; 3) >10 km² and <60 km²; D= danni, classi: 1) orti e giardini, 2) beni architettonici, 3) industrie, 4)edifici civili, 5)strade, 6)sottoservizi; V= vittime (*=numero totale di vittime per eventi nella stessa data); F=fonte d'informazione: 1) Migale and Milone, 1998, 2) Porfido et al., 2013, 3) Esposito et al., 2011, 4) Alessio et al., 2013, 5) Vallario, 2001, 6) Santangelo et al., 2012, 7) Di Crescenzo and Santo, 2005, 8) Esposito and Galli, 2011, 9) Scorpio, 2011, 10) Santangelo et al., 2011, 11) Santo et al., 2012, 12) Esposito et al., 2013, 13)ISPRA-Servizio Geologico d'Italia, 2006, 14)Santo et al., 2002, 15) Del Prete and Mele, 2006, 16) Di Crescenzo et al., 2013, 17) Chirico et al., 2012, 18) fonti cronachistiche, 19) Santo et al., 2017;. TP= tipologia processo: Df debris flow Wf water flood su base morfometrica (Scorpio, 2011), termini in grassetto-corsivo=dato estratto dalla letteratura o dalla fonte cronachistica.

RINGRAZIAMENTI

Al termine di questo percorso, vorrei ringraziare sinceramente la Professoressa Santangelo per gli insegnamenti, i buoni consigli e la comprensione materna.

Grazie al Professor Santo per il tempo dedicatomi, per gli insegnamenti, la positività e l'entusiasmo.

Un grazie particolare al Professor Mario Parise perché mi ha incoraggiata ad intraprendere questo percorso e mi ha sostenuto per tutta la sua durata, per la grinta e la voglia di lavorare che riesce a trasmettere.

Alla Dottoressa Melania De Falco grazie per il tempo che mi ha dedicato.

Grazie al Dottor Brian McArdell per la bellissima esperienza avuta al WSL, in Svizzera, fondamentale per la mia tesi.

Grazie ai miei colleghi Valerio, Carmela, Tina, Francesca, Francesco e Maurizio per il supporto pratico e per le belle giornate trascorse insieme.

Grazie ai miei genitori, su cui sempre posso contare.

Il mio ringraziamento speciale va a mio marito Bruno senza il quale nulla sarebbe stato possibile, grazie per avermi assecondato ed incoraggiato in ogni scelta, per la sopportazione e la pazienza. A te e Francesco, il regalo più prezioso ricevuto in questo ultimo anno, dedico questo lavoro.