



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI AGRONOMIA, ANIMALI, ALIMENTI,
RISORSE NATURALI E AMBIENTE

Corso di laurea magistrale in Scienze e Tecnologie Agrarie
Curriculum Produzione Vegetale

DEFLUSSO SUPERFICIALE LUNGO LE STRADE RURALI:
ANALISI E SOLUZIONI DI MITIGAZIONE MEDIANTE
IMPIEGO DI DRONI

Relatore:
Prof. Paolo Tarolli

Correlatore:
Dott. Luca Mauri

Laureando:
Antonio Nardone
Matricola n. 2014632

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Sommario

Indice delle figure.....	1
Indice delle tabelle	3
Abstract	4
Riassunto	5
1. Introduzione	7
1.1 L'agricoltura	7
1.2 Degrado del suolo in agricoltura	9
1.3 Agricoltura e strade rurali.....	11
1.4 Sistemi di drenaggio e strade rurali	12
1.5 Modelli idrologici.....	14
1.6 GIS e telerilevamento	15
1.7 Obiettivi della tesi.....	17
2. Area di studio	18
3. Materiali e metodi	22
3.1 Analisi dell'area di studio.....	23
3.1.1 Direzioni di deflusso	23
3.1.2 Analisi delle caratteristiche geomorfologiche dell'area di studio.....	24
3.1.3 Localizzazione sistemi di drenaggio	25
3.2 Editing del DEM.....	26
3.3 Modello SIMWE	27
3.3.1 Acquisizione dei dati di input	27
3.4 Analisi statistica.....	30
4. Risultati e discussione	32
4.1 Analisi delle mappe derivate dall'elaborazione del DEM.....	32
4.1.1 Mappa delle direzioni di deflusso	32
4.1.2 Mappatura delle caratteristiche geomorfologiche dell'area di studio	33

4.2 Risultati delle operazioni di editing del DEM	35
4.3 Risultati del modello SIMWE	37
4.4 Risultati dell'analisi statistica	39
4.5 Discussione	44
5. Prospettive future	46
6. Conclusioni.....	47
Bibliografia.....	49
Ringraziamenti	49

Indice delle figure

Figura 1.1 Terrazzamenti per la coltivazione di vite in ambiente Mediterraneo (Tarolli, 2018)	10
Figura 2.1 Esempio di terrazzamenti per la coltivazione di vite presso Riva del Garda (TN) (De Luna, 2022)	18
Figura 2.2 Uso del suolo della provincia di Trento.....	19
Figura 2.3 Panoramica dell'area studio (a) e focus sulla frana (b). L'ortofoto in figura 2a è stata elaborata mediante un precedente rilievo fotogrammetrico con drone.....	20
Figura 2.4 Veduta aerea della parte superiore dell'area di studio, soggetta all'attivazione di frane superficiali (foto di Luca Mauri).....	21
Figura 3.1 Rappresentazione schematica delle fasi operative seguite nella presente tesi.....	22
Figura 4.1 Panoramica dell'area di studio (a) e focus sulla mappa delle direzioni di deflusso simulate lungo la sezione della strada in prossimità della frana superficiale presa in esame nella presente tesi (b).....	32
Figura 4.2 Dettaglio delle elaborazioni della mappa delle ombre (<i>hillshade</i> ; a), della pendenza (b) e dell'indice RPII (c) presso la strada e la sottostante zona franata oggetto di studio	34
Figura 4.3 Hillshade elaborato per ogni scenario ipotizzando una diversa localizzazione dei sistemi di drenaggio (segmenti in rosso) lungo la strada	35
Figura 4.4 Simulazione delle direzioni di deflusso elaborate per i nove con differente posizionamento dei sistemi di drenaggio. In corrispondenza delle frecce si può osservare una marcata deviazione dei deflussi da parte delle canalette.....	36
Figura 4.5 Dettaglio dell'elaborazione della altezza cumulata di runoff mediante il modello SIMWE (b) in prossimità della strada e della sottostante frana superficiale oggetto di studio	37
Figura 4.6 Mappe di <i>water depth</i> elaborate mediante il modello SIMWE per ogni scenario caratterizzato da una diversa localizzazione dei sistemi di drenaggio (a-i)	38
Figura 4.7 Localizzazione dei punti di controllo posizionati lungo la sezione della strada sovrastante la frana superficiale per le analisi statistiche delle simulazioni ottenute con il modello SIMWE	39
Figura 4.8 Boxplot dei valori di <i>water depth</i> estratti da ognuno dei punti di controllo localizzati lungo la sezione di strada situata al di sopra della frana, in riferimento allo scenario iniziale (assenza di sistemi di drenaggio – <i>No Canalette</i> –) e ai rispettivi scenari caratterizzati da una diversa localizzazione dei sistemi di drenaggio (<i>Sì Canalette</i>)	40

Figura 4.9 *Cross section* dei valori di *water depth* estratti per ogni punto di controllo lungo la sezione di strada in corrispondenza della frana superficiale presa in esame per la presente tesi, in riferimento allo scenario iniziale (assenza di sistemi di drenaggio –*No Canalette*–) e ai rispettivi scenari caratterizzati da una diversa localizzazione dei sistemi di drenaggio (*Si Canalette*)..... 42

Indice delle tabelle

Tabella 3.1 Panoramica dei dati di input utilizzati per il modello SIMWE. In particolare, la tabella mostra i valori di Manning, la conducibilità idraulica satura e il parametro <i>Excess rate</i> per ogni tipologia di terreno, ovvero vigneto (V), terreno inerbito (I), suolo nudo (Sn), sezione di strada cementata (S _C), sezione di strada sterrata (S _S) e canalette (C)	28
Tabella 4.1 Panoramica dei valori massimi, minimi e medi di <i>water depth</i> estratti per ogni punto di controllo, per lo scenario originale e per ogni scenario con simulazione della presenza di canalette.....	41
Tabella 4.2 Panoramica dei parametri statistici derivati dal test t e dal calcolo del p-value per i valori di <i>water depth</i> estratti dai punti di controllo posizionati lungo la sezione di strada sovrastante la frana.....	43

Abstract

In the last decades the growing anthropization of agricultural areas has led to a growing development of road networks. The presence of roads in fact has many advantages, favouring movement between areas that are difficult to reach, faster transport of products and more efficient agronomic operations. At the same time the presence of roads can contribute to the activation of soil degradation phenomena (erosion, surface landslides) during intense weather events, especially where there is an ineffective water management through adequate drainage systems, as well as a result of an inadequate planning and maintenance of the road networks themselves. The development of digital photogrammetric techniques (for example the “*Structure from Motion*” technique), combined with the use of remote piloted systems (drones) has progressively encouraged the possibility of performing high resolution topographic analysis repeated over time and at low cost, allowing the processing of digital terrain elevation models (*DEMs*) with centimeter detail. Furthermore, the possibility of integrating the use of specific hydrological models with such photogrammetric techniques represents a further useful tool for carrying out hydro-geomorphological analysis at a field scale. This thesis therefore has the objective to analyze how the presence of drainage systems along a rural road located in a terraced vineyard affects the surface water dynamics. The study area under consideration is steep slope terraced vineyard located in the province of Trento (Italy), characterized by the presence of a rural road without adequate water management systems and by the repeated activation of surface landslides. The hydrological dynamics under examination were analyzed by simulating the presence of specific surface drainage systems (longitudinal and cross ditches), by means of specific editing operations in the GIS environment of the DEM obtained from the drone. The SIMWE hydrological model (SIMulated Water Erosion model) was then used starting from the real absence of drainage systems and hypothesizing various scenarios with different positioning of the ditches along the road. It was thus possible to carry out a quantitative analysis of the surface runoff along the road for each scenario. The results suggest how the presence of drainage systems along rural roads influence the dynamics of surface water runoff over time, highlighting the importance of effective water management along agricultural road networks, especially in steep slope areas subject to soil degradation phenomena. This work also highlights how the integrated use of drones and hydrological models represents a particularly useful tool for better planning of road networks in agriculture, in order to prevent and mitigate the occurrence of agricultural land degradation.

Riassunto

Negli ultimi decenni la crescente antropizzazione delle aree agricole ha portato ad un crescente sviluppo delle reti viarie. La presenza di strade infatti presenta numerosi vantaggi, favorendo lo spostamento tra zone di difficile raggiungimento, un trasporto più rapido dei prodotti e operazioni agronomiche più efficienti. Allo stesso tempo la presenza di strade può contribuire all'attivazione di fenomeni di degrado del suolo (erosione del terreno, frane superficiali) durante eventi meteo intensi, soprattutto laddove vi è un'inefficace gestione dell'acqua mediante adeguati sistemi di drenaggio, così come in seguito ad una non ottimale pianificazione e manutenzione delle reti viarie stesse. Lo sviluppo delle tecniche fotogrammetriche digitali (per esempio la tecnica "*Structure from Motion*"), combinate con l'utilizzo di sistemi a pilotaggio remoto (droni) ha progressivamente incentivato la possibilità di realizzare analisi topografiche ad alta risoluzione ripetute nel tempo e a basso costo, consentendo l'elaborazione di modelli digitali di elevazione del terreno (*DEMs*) a dettaglio centimetrico. Inoltre, la possibilità di integrare l'utilizzo di specifici modelli idrologici con tali tecniche fotogrammetriche rappresenta un ulteriore strumento utile ad effettuare analisi idrogeomorfologiche a scala di campo. La presente tesi ha pertanto l'obiettivo di analizzare come la presenza di sistemi di drenaggio lungo una strada rurale situata in un vigneto terrazzato influenzi le dinamiche idriche superficiali. L'area studio presa in esame è un vigneto terrazzato ad elevata pendenza situato in provincia di Trento (Italia), caratterizzato dalla presenza di una strada rurale sprovvista di adeguati sistemi di regimazione idrica e dalla ripetuta attivazione di frane superficiali. I processi idrologici in esame sono stati analizzati simulando la presenza di sistemi di drenaggio superficiale (canalette longitudinali e trasversali), mediante specifiche operazioni di *editing* in ambiente GIS del DEM ricavato da drone. Il modello idrologico SIMWE (*SIMulated Water Erosion model*) è stato quindi utilizzato a partire dalla reale assenza di sistemi di drenaggio e ipotizzando vari scenari con diversi posizionamenti delle canalette lungo la strada. È stato così possibile effettuare una analisi quantitativa del deflusso superficiale lungo la strada per ogni scenario. I risultati suggeriscono come la presenza di sistemi di drenaggio lungo le strade rurali influenzi le dinamiche del deflusso superficiale dell'acqua nel tempo, evidenziando l'importanza di una efficace gestione dell'acqua lungo le reti viarie agricole, soprattutto in aree a forte pendenza soggette a fenomeni di degrado del suolo. Il presente lavoro evidenzia inoltre come l'utilizzo integrato di droni e modelli idrologici rappresenti uno strumento particolarmente utile per una

migliore pianificazione delle reti stradali in agricoltura, al fine di prevenire e mitigare il verificarsi di fenomeni di degrado del suolo agricolo.

1. Introduzione

1.1 L'agricoltura

Secondo recenti stime della FAO, la popolazione mondiale è destinata a raggiungere i 9,7 miliardi di individui entro il 2050 (FAO, 2022), con un conseguente aumento della domanda di cibo pari a circa il 50% in più rispetto al 2013 (FAO, 2017). Sebbene le innovazioni tecnologiche abbiano aumentato la produttività delle aree agricole, un approccio volto all'intensificazione dell'agricoltura non risulta sostenibile da un punto di vista ambientale. Infatti, almeno il 33% della superficie agricola mondiale è sottoposto a fenomeni di degrado causati dall'agricoltura e si stima che, entro il 2050, il 90% del suolo agricolo sarà coinvolto in tali fenomeni (FAO, 2015). L'agricoltura ha da sempre svolto un ruolo di fondamentale importanza nella storia dell'uomo. A partire dal periodo del Neolitico in Mesopotamia, l'affermarsi delle prime pratiche agricole diede progressivamente vita ad attività quali il commercio e l'artigianato, fondamentali per lo sviluppo delle prime forme di organizzazione sociale. Successivamente, il progressivo sviluppo tecnologico portò al miglioramento di strumenti quali l'aratro e la zappa e all'introduzione di nuove tecniche produttive. Nei secoli successivi, l'agricoltura andò incontro ad un'ulteriore fase di crescita, dovuta prevalentemente al contemporaneo aumento demografico, con la conseguente necessità di coltivare anche terreni meno accessibili come le zone collinari e montane mediante nuove soluzioni agronomiche (Pinhasi et al., 2005). Con l'avvento dell'Età Moderna vi fu quindi un crescente impiego di macchine agricole, che si tradusse in una crescente meccanizzazione delle aree coltivate. Al contempo, lo sviluppo di reti viarie consentì il trasporto ed il commercio dei prodotti agricoli su larga scala e in tempi più rapidi. L'impiego di fertilizzanti, fitofarmaci e varietà vegetali geneticamente selezionate consentì, a partire dagli anni Quaranta e Settanta, un notevole incremento produttivo delle aree agricole. Nel tempo si sono quindi sviluppate diverse tipologie di agricoltura tra cui è bene ricordare l'agricoltura intensiva, che ha come obiettivo la massimizzazione della produzione attraverso un sistema di intensificazione della produzione e una forte meccanizzazione; l'agricoltura estensiva, la quale prevede un ridotto impatto sull'ambiente; l'agricoltura di sussistenza, che prevede la produzione di colture al solo scopo di sostenere il nucleo familiare e infine l'agricoltura di mercato, che alloca la sua intera produzione al commercio internazionale. È bene inoltre citare l'agricoltura di piantagione, basata prevalentemente sulla monocoltura di specifiche colture e infine

l'agricoltura biologica, un tipo di agricoltura che sfrutta la naturale fertilità del suolo, favorendola con interventi non invasivi e impedendo l'utilizzo di prodotti chimici.

1.2 Degrado del suolo in agricoltura

Il degrado del suolo in agricoltura è una problematica molto attuale che coinvolge le aree agricole a livello mondiale (Kopittke et al., 2019). L'erosione del suolo agricolo è dovuta a numerosi fattori, tra cui l'erosione dovuta all'acqua (van Pelt et al., 2017) e al vento (Lal, 2001), la diffusione di specie animali invasive (Torresani et al., 2019), l'attivazione di frane (Chalise et al., 2019) e la crescente meccanizzazione delle aree rurali (Nawaz et al., 2012).

Come anticipato, l'erosione del suolo è strettamente correlata all'acqua e al vento (Marzen et al., 2019) che rappresentano le principali cause di degrado del suolo a livello mondiale (Wild, 2003). Secondo gli ultimi report della FAO, l'erosione idrica causa la perdita di oltre 20 milioni di tonnellate di suolo all'anno, determinando la riduzione della resa delle colture e alterando le proprietà dei suoli agricoli (FAO, 2015). A tal proposito, l'azione erosiva dell'acqua, correlata ad altri fattori quali le caratteristiche geomorfologiche e la copertura del suolo, può essere considerata la principale causa dell'attivazione di frane (Lanni et al., 2012). Per quanto riguarda l'erosione dovuta al vento, è stato stimato che ogni anno circa 430 milioni di ettari della superficie terrestre sono soggetti a conseguenti dinamiche erosive e di degrado superficiale (FAO, 2015). Tali processi erosivi sono influenzati da fattori quali le caratteristiche pedologiche (struttura e tessitura) e geomorfologiche (pendenza, rugosità) del terreno, la permeabilità e la copertura del suolo (Bryan, 2000; Lal, 2001; Brandolini et al., 2018; Gao & Wang, 2019).

Fenomeni di degrado del suolo possono verificarsi in aree terrazzate. Tali sistemazioni sono diffuse soprattutto nelle aree dove è necessario sfruttare superfici a forte pendenza (Figura 1.1), il che comporta allo stesso tempo numerose problematiche, specialmente in termini di degrado del suolo (Dorren & Rey, 2004) se non opportunamente gestite. I terrazzamenti forniscono però diversi vantaggi, tra cui una favorevole alterazione del profilo longitudinale dei versanti (Tarolli et al., 2014), un aumento della produttività delle aree a forte pendenza (Gravagnuolo & Varotto, 2021), una potenziale prevenzione dei fenomeni di dissesto (Arnáez et al., 2015) e una maggiore accessibilità ad aree impervie (Wei et al., 2016; Tarolli et al., 2021). Nonostante i vantaggi, fattori quali una progettazione inadeguata ed una scarsa manutenzione (Lesschen et al., 2009), fenomeni di dissesto del suolo (Stanchi et al., 2012; Wen, Kasielke, et al., 2021) e il conseguente abbandono delle aree terrazzate sono tra i principali problemi in aree dove sono presenti queste sistemazioni agrarie (Tarolli, 2018).



Figura 1.1 Terrazzamenti per la coltivazione di vite in ambiente Mediterraneo (Tarolli, 2018)

Le aree agricole sono inoltre soggette a forme di degrado e deterioramento dovute alla presenza di specie animali invasive (Tsoraeva et al., 2021). Specie come il cinghiale (*Sus scrofa*) e la nutria (*Myocastor coypus*) risultano tra le più dannose in termini di degrado del suolo e conseguente attivazione di fenomeni erosivi superficiali (Sofia et al., 2017; Mauri et al., 2019). La presenza di tali specie animali invasive può comportare problematiche di carattere ambientale, economico e sociale (Amici et al., 2012; Mauri et al., 2020). Infine, fattori antropici quali la costruzione di strade rurali (López-Vicente et al., 2017; Bordoni et al., 2019), rappresentano una problematica molto attuale, strettamente connessa all'attivazione di fenomeni erosivi e franosi che interessano specialmente le aree coltivate su forte pendenza (Mauri et al., 2021). A tal proposito, la crescente meccanizzazione incoraggia ulteriormente il verificarsi di tali fenomeni (Baumhardt et al., 2015), a causa peraltro del conseguente compattamento dei suoli agricoli (Soane & van Ouwerkerk, 1994) e altre problematiche come il ristagno idrico superficiale (Pijl et al., 2019).

1.3 Agricoltura e strade rurali

La presenza di strade risulta fondamentale per il collegamento delle aree agricole ai centri urbani o alle strade principali e, di conseguenza, per lo sviluppo dell'agricoltura (Gollin & Rogerson, 2010; Sidle & Ziegler, 2012). Infatti, la presenza di reti viarie permette una migliore efficienza e produttività delle aree coltivate, oltre che trasporti delle merci più rapidi, un più facile spostamento verso aree di difficile raggiungimento e una semplificazione delle pratiche agronomiche (Nair & Kumar A, 2006; Adamopoulos, 2011; Shamdasani, 2021; Zhou et al., 2021). Sebbene la presenza di strade comporti numerosi vantaggi, è bene ricordare come fattori quali un'errata progettazione delle reti viarie (Minotti et al., 2018), una inefficiente gestione e manutenzione delle infrastrutture (Picuno, 2002), eventi meteorologici intensi (Collins & Znidarcic, 2004), specifiche caratteristiche geomorfologiche delle aree in cui le strade vengono costruite (Sidle et al., 2006) e l'assenza di sistemi di drenaggio (Pijl et al., 2019) incentivano potenzialmente il verificarsi di fenomeni di degrado del suolo. Infatti, la costruzione di una strada, soprattutto in una situazione di elevata pendenza del terreno, comporta una alterazione dello scorrimento superficiale dell'acqua (runoff), al netto del tasso di infiltrazione (Persichillo et al., 2018). La strada infatti è responsabile dell'intercettazione e della conseguente deviazione dei deflussi idrici superficiali, il che può successivamente incoraggiare l'indebolimento strutturale dei versanti a valle della strada, con ripercussioni negative in termini di stabilità del suolo anche più a valle (Borga et al., 2004; Mauri et al., 2022). Risulta di conseguenza evidente come l'assenza di un efficace controllo dell'acqua mediante, per esempio, la progettazione di adeguati sistemi di drenaggio possa comportare un aumento del rischio di fenomeni di dissesto. Oltre alla corretta progettazione delle infrastrutture, è infine importante garantire una pianificazione delle operazioni di manutenzione che interesseranno la strada. Infatti, una corretta e periodica manutenzione permette ripercussioni rilevanti quali il cedimento e l'inagibilità delle infrastrutture (Birmingham & Stankevich, 2005).

1.4 Sistemi di drenaggio e strade rurali

Come anticipato in precedenza, la presenza di sistemi di drenaggio lungo le strade rurali rappresenta un elemento di particolare importanza per una efficace gestione dell'acqua, al fine di ridurre la probabilità di conseguenti fenomeni di degrado del suolo. Tra i principali sistemi di drenaggio, le tipologie maggiormente utilizzate in ambito agricolo sono le cunette (Needelman et al., 2007), i drenaggi sottosuperficiali (Kalcic et al., 2018), i tombini (Strock et al., 2007), le canalette trasversali (Tarolli et al., 2013). La scelta del sistema di drenaggio adeguato deve tenere in considerazione fattori quali le caratteristiche pedologiche del suolo, la pendenza del terreno, la copertura del suolo, la robustezza dei materiali e le caratteristiche geometriche dei manufatti. Inoltre, è importante valutare la possibilità di usufruire delle materie prime disponibili nel territorio, con lo scopo di realizzare sistemi che siano sostenibili da un punto di vista economico ed ambientale. Nel caso di strade rurali costruite in prossimità di pendii con elevate pendenze è previsto per lo più l'impiego di opere trasversali come le canalette, in grado di ridurre la lunghezza del percorso del deflusso superficiale e di diminuire il conseguente rischio di attivazione di fenomeni erosivi (Streeter & Schilling, 2020). Sono disponibili numerose tipologie di canalette trasversali, ognuna con caratteristiche differenti: in particolare, è necessario menzionare le canalette in metallo, facili da reperire e con una buona capacità di smaltire le acque; sono però caratterizzate da dimensioni standard e inoltre presentano dei costi elevati (Gonzales, 1998); canalette in tronchetti, ideali per strade rurali poco trafficate, sono realizzate tramite materiali reperiti in loco e quindi economiche; canalette in calcestruzzo prefabbricate, poco suscettibili alle rotture causate dal passaggio di mezzi, presentano delle griglie asportabili che ne facilitano la manutenzione; per via del loro elevato costo però solitamente non vengono realizzate su reti viarie agro-silvo-pastorali (Gonzales, 1998); canalette in legname e fondo cementizio, ottenute assemblando due tavole in legno di larice o pino su di un cassonetto di sottofondo in malta cementizia; tale soluzione risulta robusta, flessibile, economica e di semplice realizzazione in loco (Bischetti, 2005). In alternativa alle canalette trasversali vengono realizzate opere longitudinali, ideali per smaltire l'acqua dove la scarpata di monte intercetta una consistente quota di deflusso sottosuperficiale (Bischetti, 2005): le più diffuse sono le cunette, ovvero canalette a cielo aperto in grado di raccogliere il deflusso superficiale prodotto sul piano stradale. Tra le tipologie di cunette più diffuse sono comprese le cunette non rivestite, economiche ma suscettibili ad erosione; cunette semicircolari in acciaio zincato, leggere ed economiche ma difficili da installare su terreni irregolari; cunette in cemento, facili da installare ed efficienti, ma poco adatte agli

ambienti rurali; cunette in legname, caratterizzate da una buona resistenza all'erosione, sono facilmente realizzabili con materiali presenti in loco. Le opere di drenaggio vengono realizzate seguendo apposite linee guida progettuali, così da garantire la massima efficienza del sistema (Pijl et al., 2019). Tra i principali elementi progettuali da considerare, vanno presi in considerazione la spaziatura tra le canalette, la lunghezza, l'orientamento e la pendenza trasversale rispetto al piano stradale. Infine, è necessaria una adeguata manutenzione delle opere di drenaggio, così da evitarne l'occlusione dovuta allo spostamento di sedimento dovuto ad eventi meteorologici anche intensi (Tarolli et al., 2019).

1.5 Modelli idrologici

Il recente sviluppo tecnologico ha visto, negli ultimi decenni, lo sviluppo di modelli matematici, algoritmi e software in grado di analizzare i processi idrologici sia superficiali che sotto-superficiali a scala di campo e di bacino idrico (Fenicia et al., 2014; Turner et al., 2017). Esistono diverse tipologie di modelli idrologici, tra i quali i modelli fisicamente basati (Devia et al., 2015), i modelli concettuali (Enemark et al., 2019) e i modelli empirici (Abdulkareem et al., 2018). Nello specifico, i modelli fisicamente basati permettono di riprodurre realisticamente i singoli processi idrologici, tenendo conto della reale distribuzione spaziale e temporale dei fenomeni meteorologici e delle caratteristiche del territorio (Moges et al., 2020); i modelli concettuali invece utilizzano equazioni matematiche di facile applicazione e parametri fisici per descrivere i principali processi idrologici (Aghakouchak et al., 2010); infine, i modelli empirici sono costituiti da funzioni algebriche prive di fondamento fisico, in grado di restituire degli output che rappresentano una versione semplificata dei fenomeni reali (Guo et al., 2014). In particolare, nella presente tesi è stato applicato il modello idrologico fisicamente basato e spazialmente distribuito SIMulated Water Erosion (SIMWE) (Mitas & Mitasova, 1998), che consente di effettuare una analisi spaziale dei deflussi in funzione delle caratteristiche territoriali a partire da un input di pioggia. I vantaggi principali dell'utilizzo di SIMWE sono la minimizzazione nell'utilizzo di fattori empirici; può supportare le risoluzioni spaziali più alte tramite metodi numerici robusti; permette di valutare l'influenza della variabilità spaziale in termini di pioggia, terreno, copertura e tipologia di suolo (Cencetti et al., 2005). Tale modello è diviso in due componenti denominate *r.sim.water* e *r.sim.sediment*: la prima permette la modellizzazione del deflusso idrico superficiale, mentre la seconda è utilizzata per la modellizzazione del trasporto di sedimenti (Mitasova et al., 2013; Fernandes et al., 2017). Ai fini della presente tesi, la quale si focalizza sull'influenza dei sistemi di drenaggio nei confronti delle dinamiche idriche superficiali, è stata presa in considerazione solamente la prima componente. Per il corretto funzionamento del modello SIMWE è necessario l'inserimento di diversi dati di input, tra i quali il modello digitale di elevazione del terreno (DEM), il coefficiente di Manning e la conducibilità idraulica satura (K_{sat}) (Hofierka & Knutová, 2015). Tramite l'applicazione di tale modello, è possibile ottenere due output fondamentali per la descrizione delle dinamiche idrologiche del territorio preso in esame, ovvero la water depth (profondità del deflusso) e la water discharge (portata).

1.6 GIS e telerilevamento

Il progresso tecnologico degli ultimi decenni ha permesso lo sviluppo di tecniche di analisi territoriale attraverso l'utilizzo di metodi innovativi, tra cui l'impiego di droni in ambito agricolo (Tripicchio et al., 2015). La possibilità di effettuare rilievi tramite tali sistemi a pilotaggio remoto permette la loro applicazione in numerosi campi dell'agricoltura (Manfredonia et al., 2015). Parallelamente allo sviluppo di sistemi informativi geografici (GIS), l'utilizzo dei droni in agricoltura ha pertanto contribuito all'affermazione di una agricoltura detta "di precisione". A tal proposito, il GIS è un sistema composto da banche dati, hardware e software che gestisce, elabora ed integra informazioni su base spaziale o geografica. Esso è composto da diversi software necessari all'analisi e alla visualizzazione delle informazioni territoriali georeferenziate. Sono disponibili numerosi software a licenza commerciale e a licenza gratuita: tra i software GIS a licenza commerciale è bene ricordare ArcGIS, AutoCAD Map 3D e ArcGIS Field-Map, mentre alcuni software con licenza gratuita sono QGIS e GRASS GIS. L'applicazione dei software GIS garantisce la possibilità di effettuare indagini territoriali in numerosi campi di studio, tra cui l'analisi di frane e valanghe, dinamiche morfologiche fluviali, processi idrologici e vulcanici oltre che lo studio dell'impatto umano sul territorio (Zhang & Lin, 2017; Ahmad, 2018; Saleem et al., 2019). Ciò permette di esaminare le dinamiche evolutive superficiali del territorio in uno scenario multi-temporale, per esempio, o processare modelli digitali del terreno (DTM) a scala centimetrica necessari, per esempio, alla valutazione di aree potenzialmente soggette a fenomeni di dissesto o a rischio idro-geologico (Sharma et al., 2018). Tali informazioni territoriali possono essere rilevate mediante diverse tecniche di telerilevamento (*remote sensing*), le quali permettono di rilevare e monitorare le caratteristiche fisiche di un'area o di un oggetto da remoto mediante specifici sensori (Read & Torrado, 2009). Tali sensori possono essere di tipo passivo se la radiazione elettromagnetica misurata è emessa da sorgenti esterne come il sole o altre superfici riflettenti (Woodhouse, 2017), mentre sono attivi nel momento in cui la superficie di interesse è illuminata dalla radiazione elettromagnetica emessa dallo stesso sensore, il quale in seguito cattura la radiazione di ritorno. Il Radar e il LIDAR fanno parte delle tecniche di *remote sensing* basate sull'utilizzo di sensori attivi, mentre le macchine fotografiche e i radiometri, per esempio, sono strumenti aventi sensori di tipo passivo.

Il LIDAR (*Light Detection and Ranging*) in particolare è una tecnica di telerilevamento di tipo attivo che emette un impulso laser per determinare la distanza dell'oggetto di studio. Esso consente pertanto di ottenere una nuvola di punti dell'area sorvolata, dalla quale è possibile elaborare i modelli digitali del terreno ad elevata risoluzione (Lucieer et al., 2011). Sebbene le tecniche di telerilevamento siano molto valide ed efficienti, necessitano allo stesso tempo di investimenti significativi da un punto di vista economico in quanto richiedono l'utilizzo di software spesso costosi e di un personale addetto alle analisi adeguatamente formato. Negli ultimi decenni è stata quindi sviluppata la tecnica fotogrammetrica denominata *Structure from Motion* (SfM), la quale garantisce elaborazioni ad alta risoluzione con costi contenuti e con la possibilità di effettuare analisi più immediate (Westoby et al., 2012; Iglhaut et al., 2019). Mediante tale tecnica fotogrammetrica è possibile ottenere DEM ad alta risoluzione che, attraverso i software GIS, possono essere analizzati con il fine di studiare il territorio (Guth et al., 2021).

1.7 Obiettivi della tesi

La crescente antropizzazione delle aree agricole ha comportato un parallelo incremento e sviluppo di reti viarie, la cui presenza è spesso correlata al verificarsi di numerose problematiche di carattere ambientale ed economico. In particolare, fattori quali l'assenza di adeguati sistemi di drenaggio o una loro errata progettazione, così come una inefficace manutenzione della rete stradale, sono strettamente connessi alla conseguente attivazione di fenomeni di degrado del suolo quali processi erosivi e frane. La presente tesi si pone quindi l'obiettivo di analizzare il ruolo svolto da sistemi di drenaggio superficiali nel favorire una efficace gestione dell'acqua lungo una strada rurale localizzata in un vigneto terrazzato. Vista l'assenza di sistemi di drenaggio lungo la strada presente all'interno dell'area di studio e a partire da rilievi fotogrammetrici effettuati in precedenza, è stata simulata la presenza di canalette lungo la strada mediante elaborazioni su base GIS. È stata poi analizzata l'influenza dei sistemi di drenaggio sulle dinamiche idrologiche superficiali all'interno del vigneto mediante l'applicazione del modello idrologico SIMulated Water Erosion (SIMWE): tramite l'analisi statistica dei risultati ottenuti è stato possibile sottolineare come la presenza di canalette possa influenzare le dinamiche del deflusso superficiale.

Con questo lavoro si intende quindi evidenziare come l'utilizzo integrato di modelli digitali ad alta risoluzione e di modelli idrologici possa rappresentare uno strumento molto utile per migliorare la pianificazione delle reti stradali in agricoltura, al fine di prevenire e mitigare il verificarsi di fenomeni di degrado del suolo agricolo nel futuro. Inoltre, altro fine del lavoro è proporre una metodologia di indagine a scala di campo che permetta una efficace pianificazione di sistemi di drenaggio lungo le strade rurali, in modo da evitare il verificarsi di fenomeni di degrado del suolo in futuro, così come ridurre le perdite produttive conseguenti al verificarsi di tali fenomeni, diminuire i costi di manutenzione delle aree agricole e limitare il pericolo di incidenti durante le operazioni agronomiche. Infine, si vuole sottolineare l'importanza di una corretta pianificazione delle strade rurali, soprattutto per quanto riguarda la presenza e la manutenzione di sistemi di drenaggio.

2. Area di studio

L'area di studio presa in esame in questa tesi è un vigneto terrazzato localizzato in Trentino-Alto Adige, in provincia di Trento (nord-est Italia). La mancanza di pianure, la presenza di catene montuose, laghi e boschi, rende il Trentino-Alto Adige una regione in cui la pratica dell'attività agricola risulta essere difficilmente attuabile e colture come la vite vengono coltivate prevalentemente mediante la realizzazione di sistemi terrazzati (de Luna, 2022) (Figura 2.1).



Figura 2.1 Esempio di terrazzamenti per la coltivazione di vite presso Riva del Garda (TN) (De Luna, 2022)

In Figura 2.2 sono indicati i vari utilizzi del suolo della provincia di Trento: l'elevata diffusione di terrazzamenti garantisce l'opportunità di coltivare soprattutto vite ed altre piante da frutto. Infatti, secondo i dati riportati dall'ISTAT, sono circa 9600 gli ettari riservati alla coltivazione di vite e 10000 quelli destinati ad altre piante da frutto, mentre circa 400 ettari sono destinati alle colture a seminativi (ISTAT, 2020).

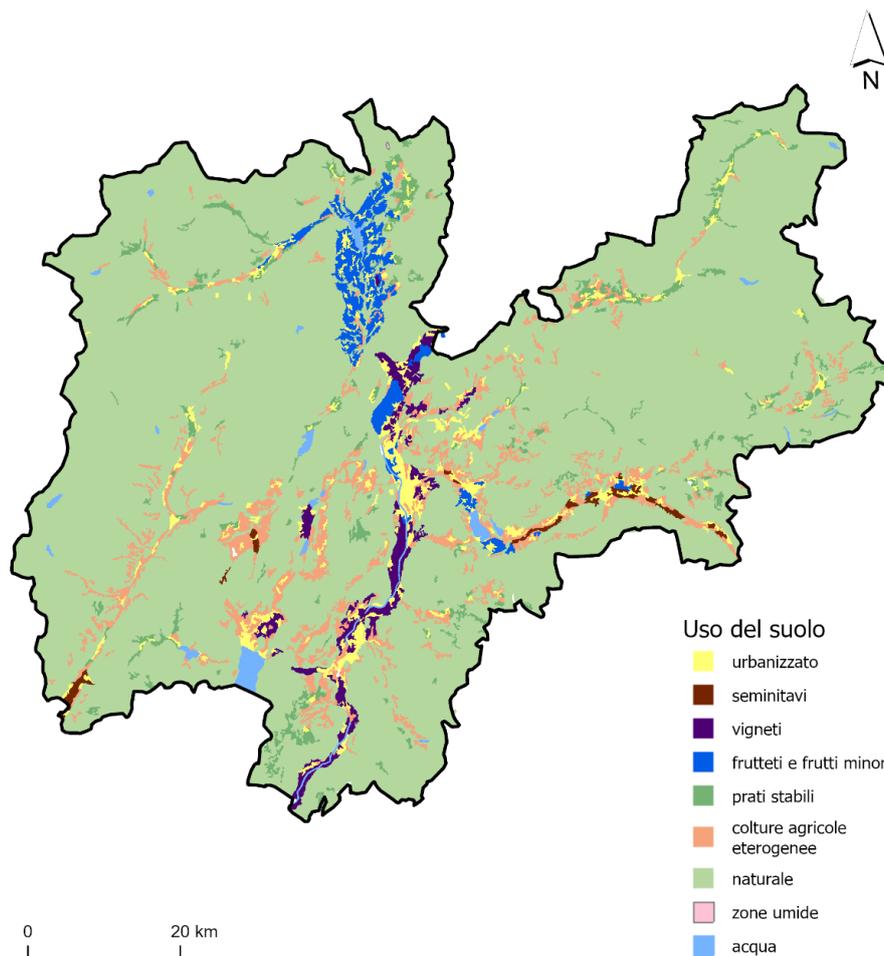


Figura 2.2 Uso del suolo della provincia di Trento

L'area di studio (Figura 2.3a) ha un'estensione di circa 2,2 ettari, con una pendenza media pari a $27,6^\circ$ ed una quota che varia da un minimo di 266 m.s.l.m. ad un massimo di 320 m.s.l.m. All'interno del terrazzamento è presente una strada, costruita per permettere il raggiungimento delle zone più alte del vigneto (Figura 2.4). La strada, lunga circa 600 metri, ha un fondo realizzato in parte in cemento e in parte sterrato, con una pendenza media del $15,7^\circ$; inoltre, è caratterizzata dall'assenza di sistemi di drenaggio. A circa 1 km di distanza in linea d'aria dall'area di studio, precisamente nel comune di Tenno, è situata una stazione meteorologica la cui presenza ha permesso di valutare i picchi di pioggia registrati, necessari all'applicazione del modello SIMWE.

Il vigneto preso in esame vede la presenza di diverse aree soggette a smottamenti (Figura 2.5), tra cui la porzione più a monte che risulta essere interessata dall'attivazione di una frana superficiale, attivatasi in corrispondenza di una sezione asfaltata della rete stradale (Figura 2.3 b). La lunghezza della strada a monte è di circa 11 m, mentre la frana si estende su di una superficie di circa 100 m^2 , con un perimetro di circa 45 m e una pendenza media pari a circa

38°. La frana, come riportato in un recente studio (Mauri et al., 2021), ha smosso un volume di terra pari a circa 20 m^3 .



Figura 2.3 Panoramica dell'area studio (a) e focus sulla frana (b). L'ortofoto in figura 2a è stata elaborata mediante un precedente rilievo fotogrammetrico con drone



Figura 2.4 Veduta aerea della parte superiore dell'area di studio, soggetta all'attivazione di frane superficiali (foto di Luca Mauri)



Figura 2.5 Frana superficiale rilevata al di sotto di una sezione della strada, in prossimità della parte superiore dell'area di studio (foto di Luca Mauri)

3. Materiali e metodi

Alla luce degli obiettivi di questa tesi, l'analisi delle dinamiche idrologiche superficiali lungo la strada localizzata all'interno dell'area di studio è stata effettuata mediante specifiche fasi operative (figura 3.1). A partire dallo scenario iniziale (assenza di sistemi di drenaggio) sono stati effettuati nove scenari alternativi ipotizzando vari posizionamenti dei sistemi di drenaggio in prossimità della strada in esame. In particolare, è stata presa in considerazione la sezione della strada localizzata superiormente alla frana superficiale che coinvolge la zona più a monte del vigneto terrazzato oggetto di studio.

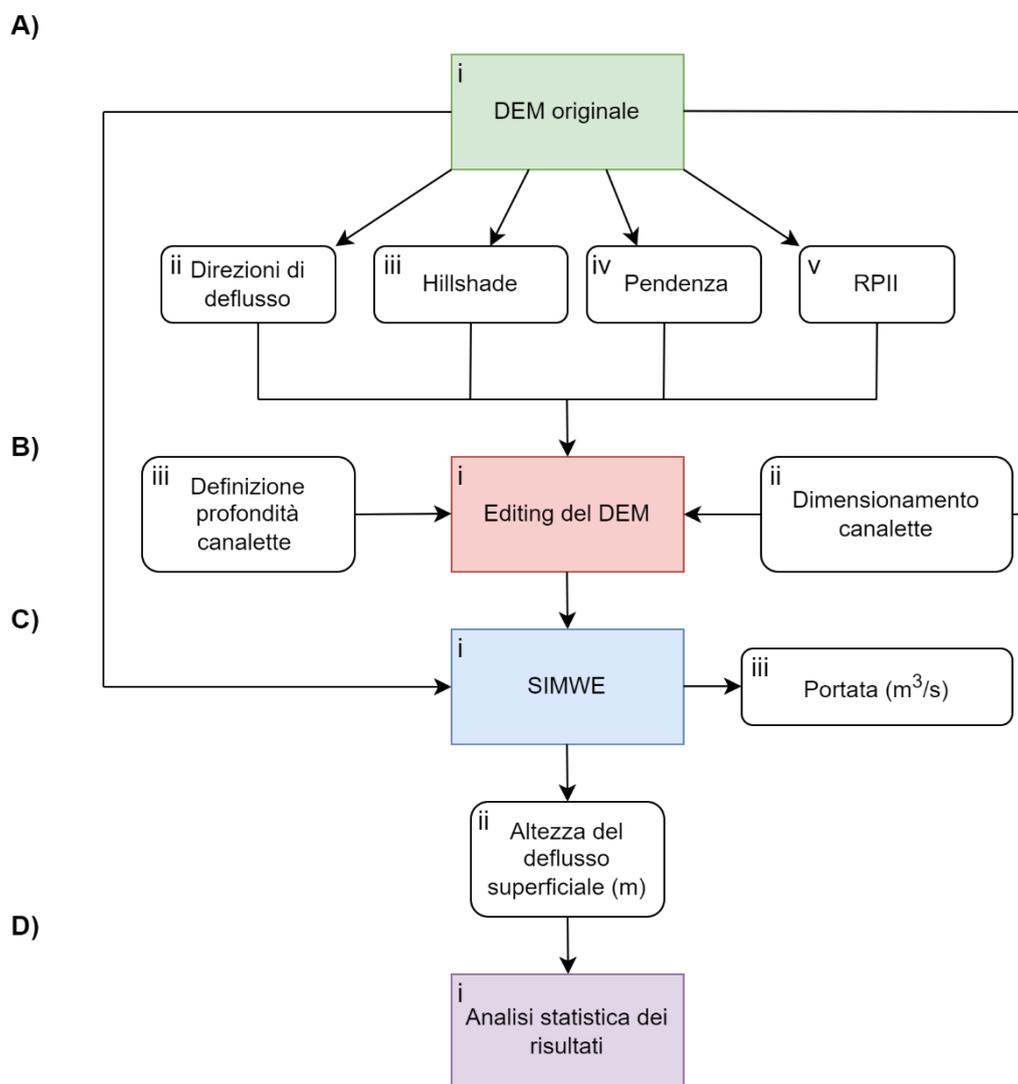


Figura 3.1 Rappresentazione schematica delle fasi operative seguite nella presente tesi

3.1 Analisi dell'area di studio

3.1.1 Direzioni di deflusso

A partire dal modello digitale di elevazione del terreno ad una risoluzione di 15cm (DEM originale, Fig. 3.1Ai), acquisito precedentemente mediante rilievo fotogrammetrico con drone (Mauri et al., 2021), è stata innanzitutto effettuata l'analisi delle direzioni di deflusso, considerando pertanto l'assenza di sistemi di drenaggio lungo la sezione della strada in esame. Il DEM è stato quindi processato mediante la *toolbox* di ArcMap "Tau DEM" (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*), che permette di *depittare* il DEM, ovvero di procedere con la rimozione di imperfezioni derivanti dal processo di elaborazione del modello di elevazione del terreno. Questa operazione è utile in quanto consente di rimuovere le celle con una quota minore rispetto alle otto celle limitrofe: la loro presenza può pregiudicare le analisi idrologiche; pertanto, eliminare tali depressioni locali garantisce dei risultati accurati (Survila et al., 2016). In seguito, è stato elaborato il raster delle direzioni di deflusso all'interno dell'area di studio, con particolare attenzione alla sezione della strada in prossimità della frana (Fig. 3.1Aii). Tale operazione può essere effettuata attraverso due differenti algoritmi, il *D8* e il *D-infinito*: l'algoritmo del *D8* è quello di più semplice applicazione e permette di tracciare il deflusso a partire da ogni cella in direzione di una delle sue otto celle vicine (O'Callaghan & Mark, 1984); l'algoritmo del *D-infinito* risulta più accurato in quanto permette di calcolare le direzioni di deflusso in funzione della pendenza presente nella zona in esame (Tarboton, 1997). Per il presente lavoro è stato utilizzato l'algoritmo del *D-8*. Infine, è stata determinata la mappa dell'area drenata (*Flow accumulation*) per l'area di studio in esame mediante l'utilizzo della funzione "*D-8 Contributing Area*": per ogni cella l'area drenata è calcolata come somma delle otto celle che direzionano il deflusso attraverso tale cella (Moore et al., 1991; Schäuble et al., 2008). Il raster dell'area drenata è stato infine elaborato calcolandone il logaritmo naturale, in modo da poter procedere con una miglior tematizzazione in ambiente GIS.

3.1.2 Analisi delle caratteristiche geomorfologiche dell'area di studio

A partire dallo scenario iniziale, caratterizzato dall'assenza di sistemi di drenaggio, è stata eseguita una analisi delle caratteristiche geomorfologiche dell'area di studio. A tal proposito, in riferimento agli obiettivi di questo lavoro, tali elaborazioni risultano essere di particolare importanza per un corretto posizionamento dei sistemi di drenaggio lungo la strada. Questa analisi è stata condotta tramite il software ArcGIS pro, in quanto permette un maggior numero di opzioni di tematizzazione dei layer rispetto agli altri software GIS. In primo luogo, è stata utilizzata la funzione *Hillshade* (Fig. 3.1Aiii) mediante la *Toolbox "Spatial Analyst Tool"*, in modo da apprezzare con maggiore efficacia le caratteristiche geomorfologiche del vigneto, in particolare in prossimità della frana superficiale. Tale elaborazione risulta essere particolarmente utile nella successiva localizzazione dei sistemi di drenaggio, al fine di ipotizzarne un corretto posizionamento sulla strada stessa. Successivamente, si è proceduto con l'analisi della pendenza del terreno dell'area di studio, mediante la funzione *slope* disponibile in ArcGis Pro (Fig. 3.1 Aiv). In questo modo è stato possibile ipotizzare diversi posizionamenti dei sistemi di drenaggio lungo la sezione della strada in esame, in riferimento alle linee guida progettuali di opere di regimazione dell'acqua su strade rurali (Bischetti, 2005; Bassani et al., 2016). Utilizzando come riferimento la mappa della pendenza del terreno si è proceduto orientando adeguatamente le canalette presso la strada. Infine, è stato impiegato l'indice morfometrico *RPII (Relative Path Impact Index)* (Fig. 3.1 Av), al fine di analizzare l'influenza di elementi antropici come strade, sentieri, edifici e strutture nella deviazione dei deflussi idrici superficiali a scala di campo (Tarolli et al., 2013). Tale indice è matematicamente definito dalla seguente formula:

$$RPII = \ln\left(\frac{A_r - A_{sm}}{A_{sm}}\right) \quad (1)$$

dove A_r indica l'area di drenaggio considerata in presenza della rete stradale, mentre A_{sm} rappresenta l'area di drenaggio elaborata in assenza di strade attraverso uno specifico processo di modifica del DEM. I valori dell'indice RPII sono direttamente proporzionali all'alterazione dei percorsi dell'acqua potenzialmente dovuti dalla presenza di elementi antropici; pertanto, le aree caratterizzate da un valore di RPII elevato indicano una potenziale maggiore criticità. In riferimento alla sezione della strada localizzata sopra la frana, è stato possibile individuare le zone coinvolte in una maggiore alterazione del deflusso superficiale

in direzione della sponda sottostante, così da posizionare i sistemi di drenaggio per i diversi scenari cercando il più possibile di intercettare la direzione del deflusso superficiale.

3.1.3 Localizzazione sistemi di drenaggio

In seguito all'analisi delle caratteristiche geomorfologiche e delle direzioni di deflusso, è stato possibile procedere con il posizionamento dei sistemi di drenaggio; in particolare, sono state prese in esame canalette trasversali e longitudinali, ideali per lo smaltimento delle acque nell'ambito della viabilità nelle aree rurali (Marchi et al., 2013). Specialmente per quanto riguarda strade situate in aree ad elevata pendenza, l'utilizzo delle canalette trasversali e longitudinali permette di ridurre il potenziale erosivo dei deflussi superficiali (Bassani et al., 2016). Nella successiva fase di simulazione delle opere di drenaggio in ambiente GIS, è stato necessario porre attenzione ad un corretto dimensionamento delle canalette. Ai fini del presente lavoro, sono state prese in considerazione canalette in legname con fondo in calcestruzzo, particolarmente adeguato a limitarne l'usura nel tempo (Kia et al., 2017). In riferimento alle linee guida per la progettazione di sistemi di drenaggio per le strade rurali (Bischetti, 2005), è stato ipotizzato il posizionamento di canalette con una lunghezza variabile in funzione della larghezza della strada ed una larghezza e profondità pari a 15 cm.

3.2 Editing del DEM

Le operazioni di editing del DEM (Fig. 3.1 Bi) hanno consentito di valutare, per ogni scenario, l'influenza del diverso posizionamento delle canalette rispetto alla situazione osservata in campo (scenario iniziale senza sistemi di drenaggio). La localizzazione dei sistemi di drenaggio per i differenti scenari è stata simulata tramite diversi strumenti di editing disponibili in *ArcGIS* Pro. Mediante la funzione “*Edit*” sono stati delineati dei segmenti corrispondenti alla lunghezza delle canalette per i vari scenari (Fig. 3.1Bii), ponendo particolare attenzione a garantire l'intercettazione dei deflussi superficiali elaborati precedentemente. Inoltre, le canalette sono state realizzate in modo tale che potessero superare di circa 10 cm il piano stradale così da intercettare adeguatamente l'acqua e garantirne un efficace smaltimento (Bischetti, 2005). In seguito, le canalette sono state posizionate con un orientamento di circa 30° rispetto alla perpendicolare dell'asse stradale, così da conferire una pendenza trasversale tale da garantire un adeguato smaltimento del deflusso (Bischetti, 2005). Le canalette longitudinali sono state realizzate lungo i lati della strada, nel rispetto delle indicazioni progettuali disponibili in letteratura. A partire dai segmenti rappresentanti l'orientamento e il posizionamento delle canalette per i vari scenari, la funzione *Buffer* di ArcGis Pro ha consentito di dimensionare le canalette con una larghezza pari a 15cm, nel rispetto delle linee guida progettuali disponibili in letteratura. Infine, la profondità delle canalette è stata determinata mediante la funzione di editing dei raster “*Serval*” (Fors, 2022), disponibile in QGIS (Fig. 3.1Biii). A partire dal DEM originale si è proceduto riducendone le quote di 15 cm in prossimità delle canalette precedentemente disegnate. Tale operazione è stata effettuata mediante la funzione “*Apply Expression Value To Selection*” del tool *Serval*. In seguito alle operazioni di editing del DEM sono stati elaborati le mappe di ombreggiatura (*Hillshade*) dei nove scenari, al fine di verificare il corretto posizionamento dei sistemi di drenaggio.

3.3 Modello SIMWE

L'utilizzo del modello idrologico *SIMulated Water Erosion model* (SIMWE; Fig. 3.1Ci) ha consentito di analizzare e quantificare il deflusso superficiale dell'acqua sia in riferimento allo scenario originale, sia alla luce degli scenari alternativi elaborati successivamente. Tale modello consente di effettuare una analisi spaziale dei deflussi in funzione delle caratteristiche territoriali a partire da uno specifico input di pioggia, ed è suddiviso in due componenti: *r.sim.water* e *r.sim.sediment* (Mitas & Mitasova, 1998). Ai fini della presente tesi, è stato implementato il modulo *r.sim.water*. In particolare, tale modulo del modello SIMWE simula il deflusso idrico superficiale attraverso un sistema di equazioni differenziali, ottenute combinando l'equazione di conservazione della massa con la relazione di Manning. Gli output del modello sono l'altezza cumulata del deflusso idrico superficiale (m) e la rispettiva portata per unità di tempo (m^3/s); (Fig. 3.1 Cii, iii). Il corretto funzionamento del modello SIMWE prevede l'inserimento di specifici input, ovvero il DEM e le sue derivate parziali dx e dy, la conducibilità idrica satura, il parametro *Excess rate* e il coefficiente *n* di Manning (Mitas & Mitasova, 1998). L'influenza dei sistemi di drenaggio sulle direzioni di deflusso dell'acqua lungo la sezione della strada in esame è stata pertanto valutata confrontando i risultati del modello ottenuti per lo scenario iniziale (assenza di sistemi di drenaggio) con le rispettive mappe di altezza del runoff (*water depth*, m) elaborate in riferimento alle diverse opzioni di posizionamento delle canalette.

3.3.1 Acquisizione dei dati di input

In tabella 3.1 sono riportati gli input richiesti dal modello SIMWE. Innanzitutto, il parametro *Rainfall Excess rate* (mmh^{-1}) indica il quantitativo di pioggia che contribuisce ai fenomeni di deflusso superficiale, in condizioni di saturazione del terreno. La determinazione di tale parametro, fondamentale per una accurata elaborazione dei deflussi idrici superficiali presso l'area di studio, è stato preso in considerazione il picco di pioggia pari a 33.6 mmh^{-1} , rilevato dalla stazione meteo localizzata in prossimità del vigneto in esame (Mauri et al., 2022). Il parametro *rainfall excess rate* è stato quindi calcolato come differenza tra il picco di pioggia registrato e la conducibilità idraulica satura (K_{sat}), ovvero il tasso di infiltrazione verticale dell'acqua nel suolo in condizioni di saturazione del terreno (Diamond & Shanley, 2010). Alla luce del fatto che ogni tipologia di suolo ha un proprio tasso d'infiltrazione (Chapuis,

2012) sono stati presi in considerazione i valori riportati in un recente studio effettuato nella medesima area (Mauri et al., 2022), equivalenti a 37.5 mmh^{-1} per il vigneto, 12.7 mmh^{-1} per i terreni inerbiti, 12.7 mmh^{-1} per il suolo nudo (frana e alcune aree localizzate nel vigneto), 9.8 mmh^{-1} per le sezioni di strada sterrata e 0.0 mmh^{-1} per le sezioni di strada in cemento. Infine, si è ipotizzata la localizzazione di canalette con fondo cementizio (Bischetti, 2005), con un rispettivo valore di conducibilità pari a 0.0 mmh^{-1} . Il secondo dato di input necessario per una corretta applicazione del modello SIMWE è il coefficiente n di Manning: esso permette di descrivere le caratteristiche di rugosità di una determinata superficie, definendone la propensione a resistere al moto dell'acqua (Kamali et al., 2018). Tale coefficiente può assumere valori che variano da 0 a 1 e la scabrezza della superficie è direttamente proporzionale al valore del coefficiente. I valori utilizzati per il presente lavoro sono stati ricercati in bibliografia (Bunya et al., 2010; Fernandes et al., 2017; Pijl et al., 2020) e risultano pari a 0.030 per i vigneti, 0.035 per i terreni inerbiti, 0.030 per i suoli nudi, 0.120 per le sezioni di strada cementata, 0.035 per le sezioni di strada sterrata e 0.015 per le canalette con fondo cementizio.

Tabella 3.1 Panoramica dei dati di input utilizzati per il modello SIMWE. In particolare, la tabella mostra i valori di Manning, la conducibilità idraulica satura e il parametro *Excess rate* per ogni tipologia di terreno, ovvero vigneto (V), terreno inerbito (I), suolo nudo (Sn), sezione di strada cementata (Sc), sezione di strada sterrata (Ss) e canalette (C)

SIMWE Sim	Uso suolo	Manning (n)	K_{sat} (mmh^{-1})	Excess rate (mmh^{-1})
33.6 mmh^{-1}	V	0.030	37.5	0.0
	I	0.035	12.7	20.9
	Sn	0.030	12.7	20.9
	Sc	0.120	0.0	33.6
	Ss	0.035	9.8	23.8
	C	0.015	0.0	33.6

Infine, la presenza di sistemi di drenaggio lungo la sezione della strada in esame è stata simulata in SIMWE mediante il parametro “*flow control*”, che permette di valutare la presenza di elementi come le canalette che possono ostacolare i deflussi, con lo scopo di definire in che direzione l'acqua debba defluire in presenza di essi. Il modello SIMWE prevede inoltre la possibilità di impostare un *coefficiente di diffusione* che consente al

deflusso di superare tali elementi nel momento in cui l'altezza del runoff (parametro *water depth*) rispetto alla strada è maggiore di un valore soglia (*hmax*). Attraverso il parametro flow control viene stabilita la permeabilità degli elementi che ostacolano i deflussi tramite un valore (*p*) variabile da 0 a 1. Pertanto, ai sistemi di drenaggio è stato ipotizzato un coefficiente di permeabilità pari a 0.1.

3.4 Analisi statistica

In seguito all'applicazione del modello SIMWE, è stata effettuata un'analisi statistica dei risultati derivati dalle simulazioni delle dinamiche idrologiche nei nove scenari (Analisi statistica dei risultati, Fig. 3.1 Di). A tal proposito, sono stati presi in considerazione i valori di altezza del deflusso superficiale degli scenari ipotizzati, al fine di effettuare un confronto statistico rispetto ai valori derivati dallo scenario originale ed evidenziare come la presenza dei sistemi di drenaggio possa influenzare le dinamiche idriche. Pertanto, si è proceduto con una quantificazione dei valori di altezza del deflusso superficiale nei diversi scenari: a tal proposito, tramite il software ArcGIS Pro sono stati posizionati 25 punti di controllo posti ad una equidistanza pari a 40 cm lungo un segmento che attraversa il tratto di strada al di sopra della frana in tutti gli scenari, al fine di ottenere un totale di 250 campioni. In seguito, tramite la funzione *“Extract values to points”*, sono stati estratti i valori di altezza del deflusso superficiale corrispondenti ad ogni punto posizionato; in questo modo, è stato possibile quantificare il ruolo svolto dai sistemi di drenaggio nella regimazione dei deflussi idrici superficiali, focalizzando l'attenzione in prossimità della frana. L'analisi statistica dei valori di altezza del deflusso superficiale è stata realizzata mediante l'applicazione dei test di verifica dell'ipotesi statistica, nello specifico tramite il calcolo del test della normalità e del test-t a due code; in particolare, è stato utilizzato il test-t a due code in quanto consente di valutare le differenze statistiche tra due gruppi di campioni, che nel caso della presente tesi sono rispettivamente rappresentati dallo scenario originale e dagli scenari che assumono la presenza di sistemi di drenaggio lungo la strada. La normalità della distribuzione dei valori di altezza del deflusso superficiale è stata verificata attraverso il test di Shapiro-Wilk (Mohd Razali & Bee Wah, 2011), assumendo un livello di significatività di alfa pari a 0.05. Successivamente, l'analisi relativa alle differenze statistiche tra lo scenario originale e gli scenari ipotizzati è stata effettuata considerando i valori di altezza del deflusso superficiale precedentemente estratti: in questo modo, è stato possibile focalizzare l'indagine statistica sugli eventuali effetti mitiganti delle canalette nei confronti delle dinamiche idrologiche che si verificano in prossimità della zona di dissesto considerata. In primo luogo, sono state identificate l'ipotesi nulla H_0 e l'ipotesi alternativa H_1 : H_0 assume che la presenza dei sistemi di drenaggio non influenzi le dinamiche idrologiche superficiali in termine di altezza del deflusso superficiale lungo la strada, mentre H_1 considera il ruolo effettivo svolto dai sistemi di drenaggio nell'influencare le direzioni di deflusso dell'acqua e di incoraggiare, pertanto, una diminuzione dei valori di altezza del deflusso superficiale lungo la strada. Infine, è stato

effettuato un confronto tra i valori di altezza del deflusso superficiale estratti per ogni punto da ciascuno scenario mediante la cross section. In questo modo, è stato dimostrato come il posizionamento dei sistemi di drenaggio lungo la strada abbia diminuito i valori di altezza del pelo dell'acqua rispetto allo scenario originale. Pertanto, sono stati realizzati nove differenti grafici, rappresentanti sull'asse delle ordinate i 25 valori di altezza del deflusso superficiale estratti e sull'asse delle ascisse i corrispondenti punti di controllo posizionati lungo il segmento. Attraverso il confronto dei valori di altezza del deflusso superficiale relativi agli scenari che assumono la presenza di sistemi di drenaggio e di quelli relativi allo scenario originale, è stato valutato il ruolo svolto dalle canalette nel regimare i deflussi idrici superficiali.

4. Risultati e discussione

4.1 Analisi delle mappe derivate dall'elaborazione del DEM

4.1.1 Mappa delle direzioni di deflusso

In Figura 4.1a è rappresentata una panoramica dell'area di studio, mentre in figura 4.1b è possibile osservare un focus sulle direzioni di deflusso elaborate in prossimità della strada oggetto della presente tesi. Nello specifico, è possibile osservare come parte del deflusso superficiale venga indirizzato verso la sezione sinistra della strada, non coinvolgendo direttamente la zona franata sottostante. Allo stesso tempo, parte del deflusso superficiale defluisce verso la sponda franata: tale porzione di deflusso ha probabilmente contribuito ad incrementare l'instabilità del pendio. A tal proposito, le simulazioni del posizionamento delle canalette sono state effettuate con lo scopo di limitare il deflusso superficiale indirizzato verso la zona franata, in un'ottica di mitigazione del rischio di attivazione di ulteriori dinamiche di dissesto in prossimità della strada.

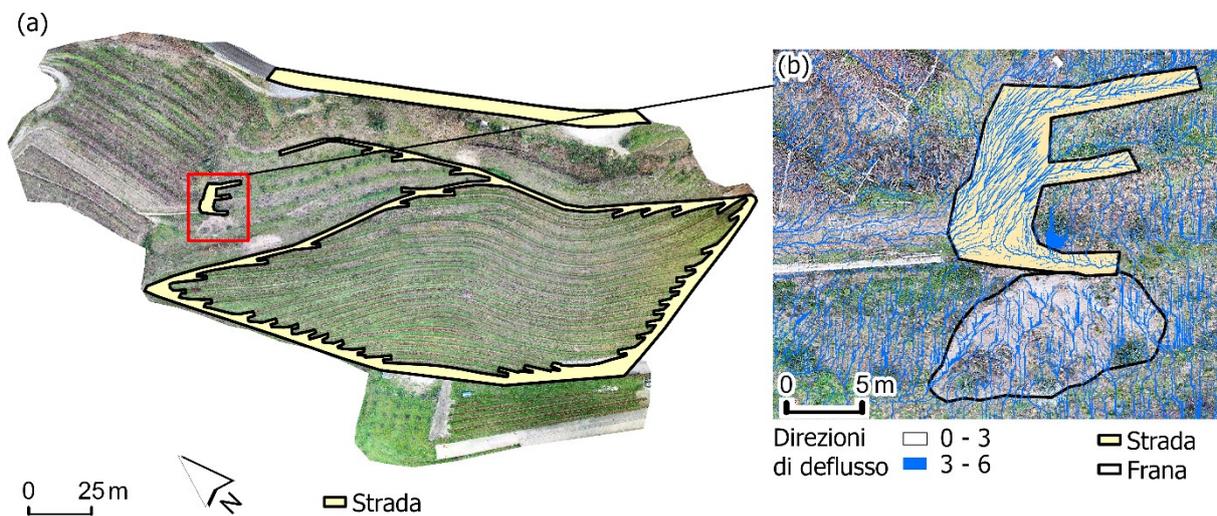


Figura 4.1 Panoramica dell'area di studio (a) e focus sulla mappa delle direzioni di deflusso simulate lungo la sezione della strada in prossimità della frana superficiale presa in esame nella presente tesi (b)

4.1.2 Mappatura delle caratteristiche geomorfologiche dell'area di studio

In Figura 4.2a è rappresentata l'ortofoto dell'area di studio, con un focus sull'hillshade della strada oggetto della presente tesi (Figura 4.2b). In Figura 4.2c si può invece osservare la mappa della pendenza, la cui analisi è risultata necessaria per poter posizionare le canalette in aree caratterizzate da pendenza costante, piuttosto che in prossimità di depressioni della strada e zone in contro-pendenza che avrebbero potuto interferire con il corretto smaltimento dell'acqua da parte dei sistemi di drenaggio. Tale mappa mette in risalto la corona della frana, contraddistinta da un colore rosso che indica una pendenza anche maggiore di 75° . Attraverso l'analisi della pendenza, si è proceduto quindi orientando adeguatamente le canalette lungo la sezione della strada in esame: nello specifico, le canalette sono state posizionate con un orientamento di 30° rispetto alla perpendicolare dell'asse stradale, al fine di favorire il deflusso dell'acqua lungo le opere di drenaggio (Bischetti, 2005). Infine, la Figura 4.2d mostra la mappa dell'RPII: attraverso l'analisi dell'RPII è stato possibile stabilire in che misura la strada presente nell'area di studio influenzi le dinamiche idrologiche. In particolare, è stata osservata un'evidente alterazione dei deflussi superficiali nella zona localizzata alla sinistra della frana, oltre che nella sezione di strada presente al di sopra della frana stessa. Poiché l'alterazione dei deflussi idrici è correlata ad una potenziale attivazione dei fenomeni di dissesto, l'RPII è stato preso in considerazione durante la fase di creazione degli scenari al fine di simulare la presenza delle opere di drenaggio in corrispondenza delle zone in cui vi fosse una maggiore alterazione dei deflussi.

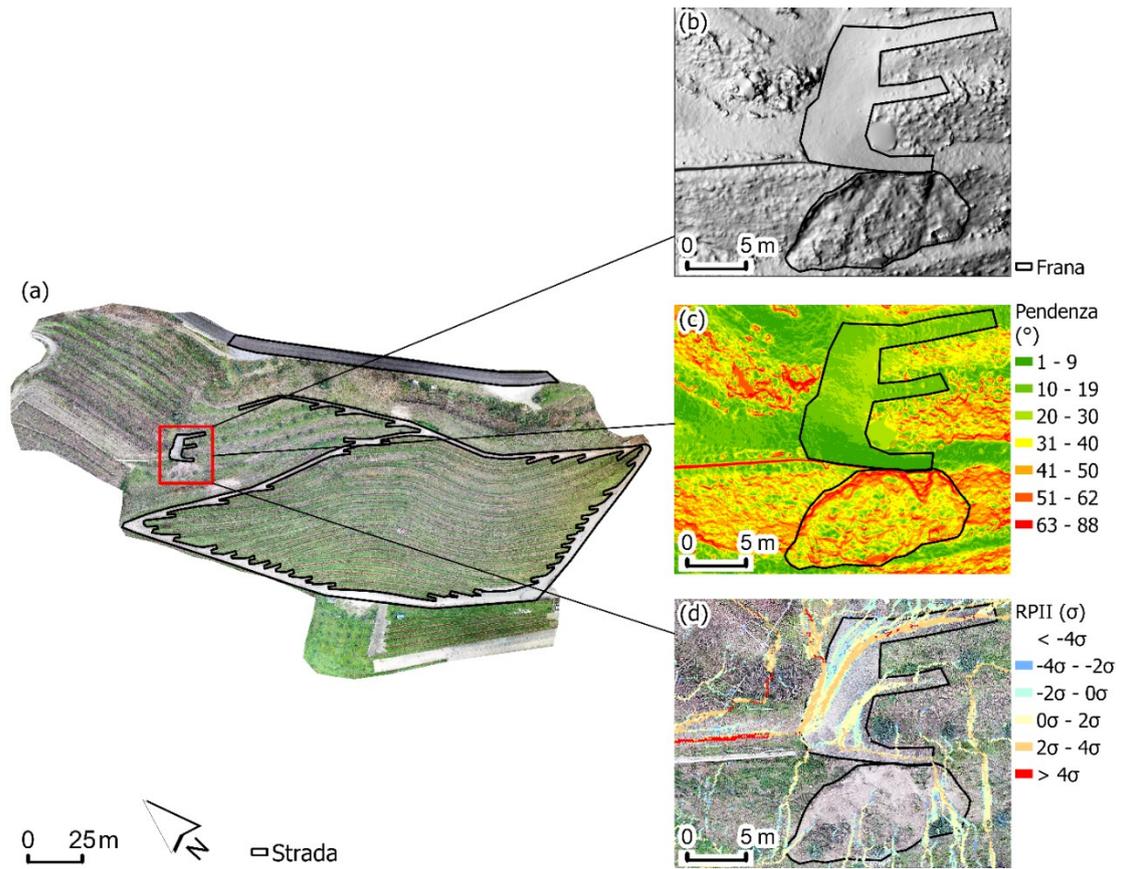


Figura 4.2 Dettaglio delle elaborazioni della mappa delle ombre (*hillshade*; a), della pendenza (b) e dell'indice RPII (c) presso la strada e la sottostante zona franata oggetto di studio

4.2 Risultati delle operazioni di editing del DEM

Le operazioni di editing del DEM hanno portato alla realizzazione di nove differenti scenari, caratterizzati dalla presenza di canalette longitudinali e trasversali collocate in numero e posizione differente per ognuno di essi. La Figura 4.3 mostra l'hillshade della strada per ogni scenario: quattro degli scenari realizzati sono caratterizzati dalla presenza di una singola canaletta trasversale (Figura 4.3a, b, c, f), mentre in tre scenari è stata simulata la presenza di più sistemi di drenaggio trasversali (Figura 4.3d, e, g). Infine, sono stati realizzati due scenari caratterizzati dalla presenza di una canaletta longitudinale: nello scenario *h* la canaletta è stata posizionata lungo il lato sinistro della strada, mentre nello scenario *i* l'opera longitudinale è stata posizionata lungo la sezione più alta della strada, insieme ad una canaletta trasversale (Figura 4.3h, i).

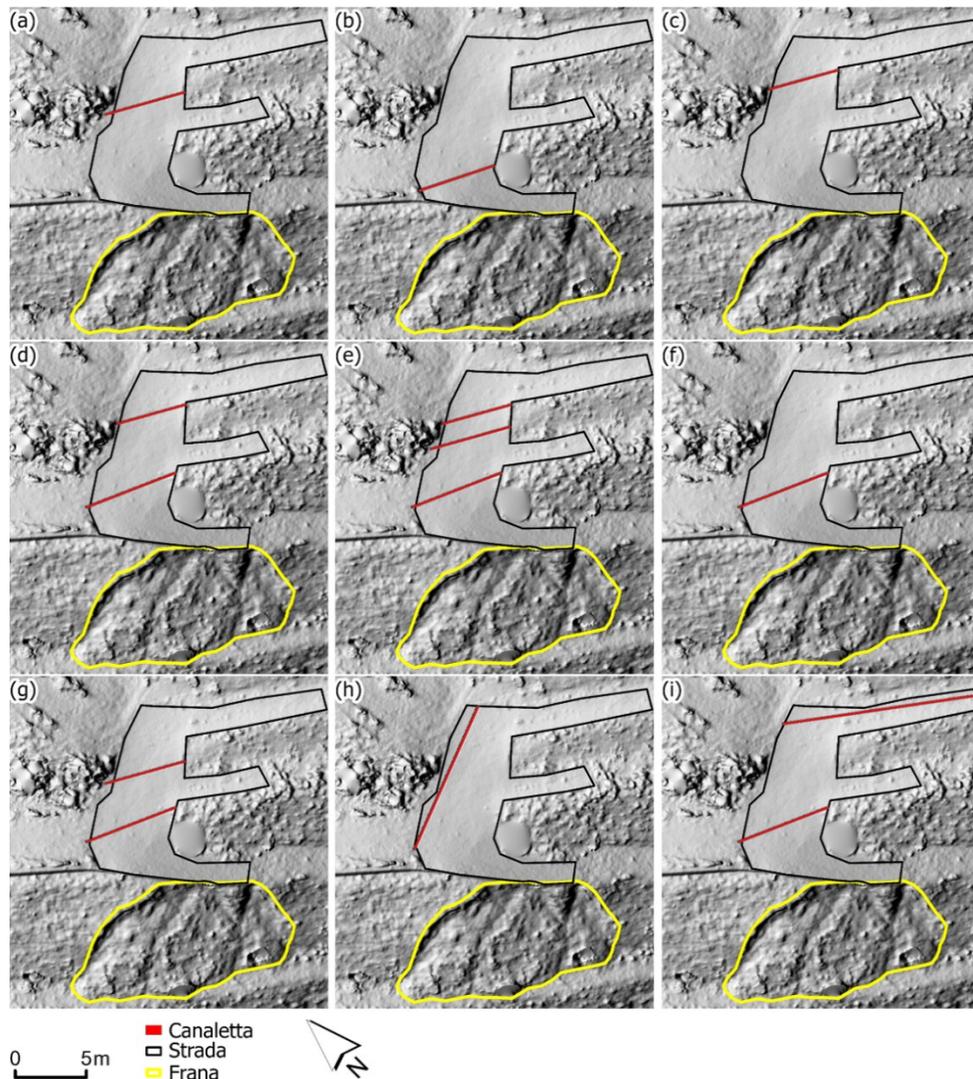


Figura 4.3 Hillshade elaborato per ogni scenario ipotizzando una diversa localizzazione dei sistemi di drenaggio (segmenti in rosso) lungo la strada

In seguito, è stata effettuata l'analisi delle direzioni di deflusso per ogni scenario, in modo da verificare l'eventuale alterazione delle direzioni di deflusso per ogni opzione progettuale dei sistemi di drenaggio lungo la strada (Figura 4.4). Confrontando le mappe delle direzioni di deflusso elaborate in seguito alla modifica del DEM con l'originale (Figura 4.1b), si osserva in corrispondenza delle frecce come i sistemi di drenaggio abbiano effettivamente deviato il deflusso superficiale, soprattutto negli scenari d, e, f, g, i, nei quali è possibile apprezzare il ruolo di tali opere nella redistribuzione delle linee di deflusso lungo il tratto di strada al di sopra della frana.

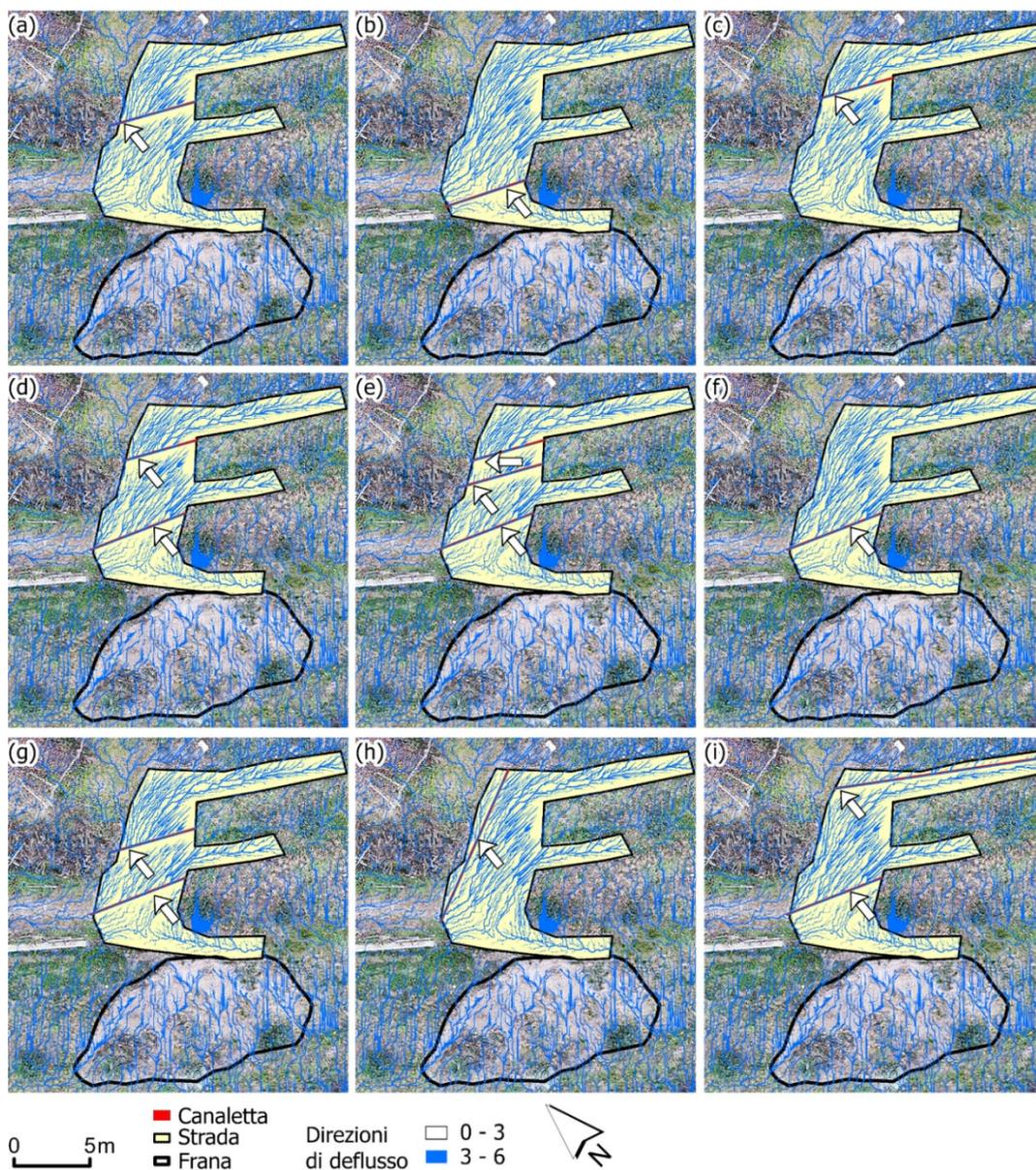


Figura 4.4 Simulazione delle direzioni di deflusso elaborate per i nove con differente posizionamento dei sistemi di drenaggio. In corrispondenza delle frecce si può osservare una marcata deviazione dei deflussi da parte delle canalette

4.3 Risultati del modello SIMWE

A partire dal DEM originale dell'area di studio, tramite il modello SIMWE sono state simulate i processi idrologici che caratterizzano la strada in termini di altezza cumulata del deflusso superficiale e della rispettiva portata (Figura 4.5b). In questo modo, è stato effettuato un confronto tra le dinamiche idrologiche che si verificano in assenza di sistemi di drenaggio e quelle che si verificano negli scenari che ne assumono la presenza.

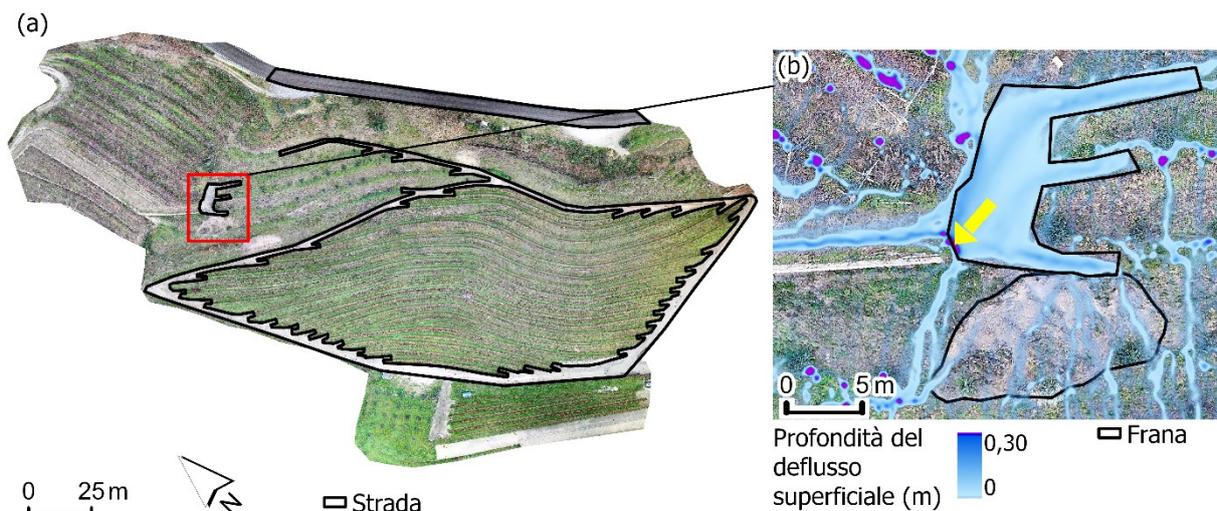


Figura 4.5 Dettaglio dell'elaborazione della altezza cumulata di runoff mediante il modello SIMWE (b) in prossimità della strada e della sottostante frana superficiale oggetto di studio

In figura 4.6 è rappresentata l'altezza del deflusso superficiale elaborata assumendo la presenza di sistemi di drenaggio lungo la sezione della strada in esame. Osservando le mappe ottenute in SIMWE si può notare come l'acqua, proveniente dalle zone più alte del vigneto, intercetti la strada defluendo in parte verso sinistra in direzione di una strada sterrata in discesa, e in parte lungo il sottostante pendio. Le simulazioni in SIMWE evidenziano come la presenza di sistemi di drenaggio comporti una riduzione dell'altezza cumulata dei deflussi; nello specifico, è possibile osservare come, specialmente negli scenari d, e, f, g, i le canalette vadano ad influenzare l'altezza del deflusso superficiale lungo il tratto di strada al di sopra della frana, garantendo dei valori inferiori rispetto agli altri scenari e soprattutto allo scenario originale. La strada è responsabile della deviazione del deflusso superficiale e implica un'altezza massima e minima variabile nei vari scenari, in funzione del numero di canalette e del loro posizionamento: in particolare, in figura 4.6 le frecce gialle indicano i punti in cui è stata misurata l'altezza del deflusso superficiale minima, mentre le rosse quella massima.

Soprattutto negli scenari f, g e i si ha un'altezza massima pari rispettivamente a 0,00818 m, 0,00805 m e 0,00810 m; mentre l'altezza minima è pari a 0,00142 m, 0,00130 m e 0,00128 m. Ulteriori indagini riguardanti il ruolo svolto dalla strada nella deviazione dei deflussi nella medesima area studio sono state effettuate in Mauri et al., 2022.

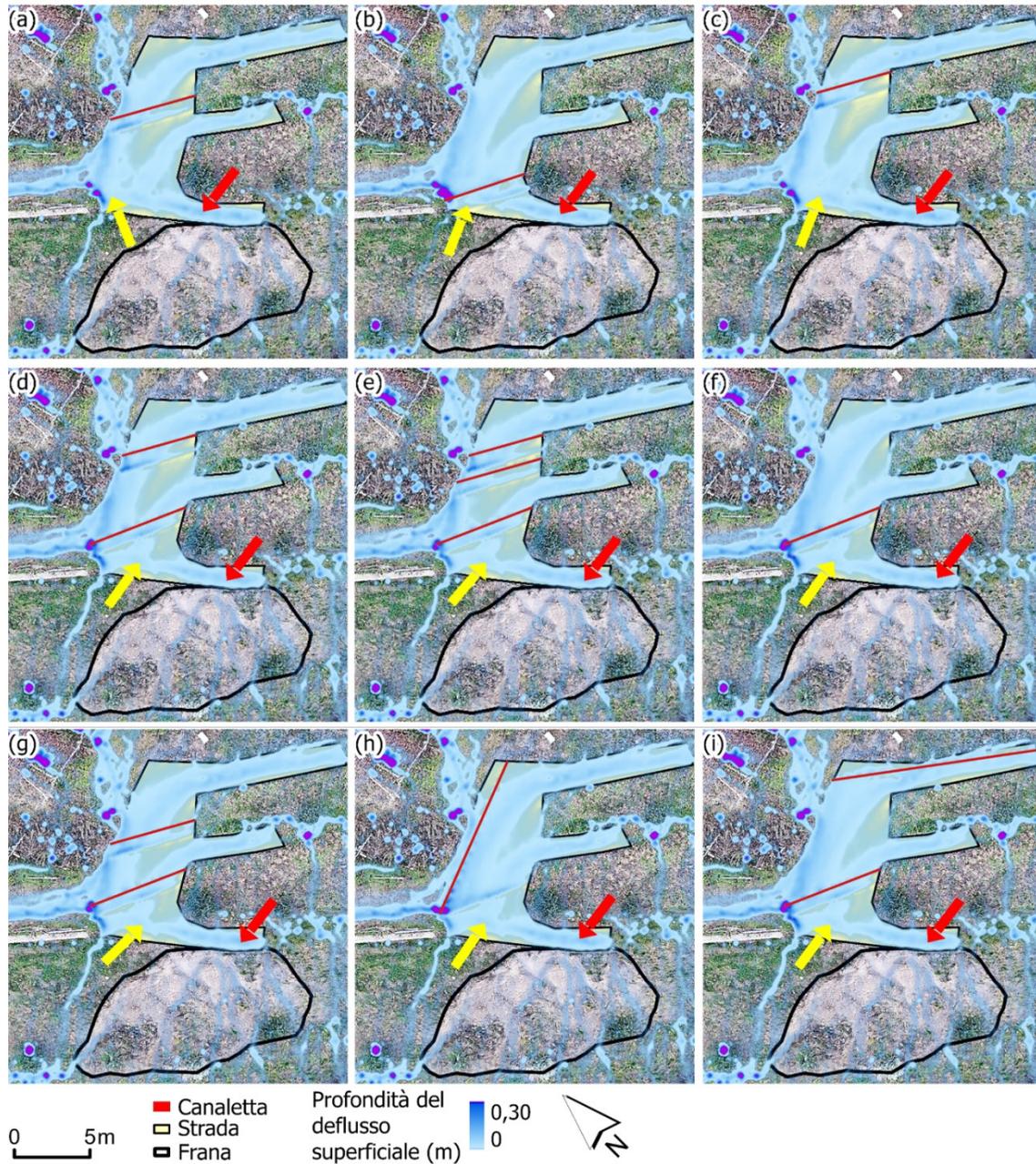


Figura 4.6 Mappe di *water depth* elaborate mediante il modello SIMWE per ogni scenario caratterizzato da una diversa localizzazione dei sistemi di drenaggio (a-i)

4.4 Risultati dell'analisi statistica

In figura 4.7 è mostrata la localizzazione dei punti di controllo utili al confronto dell'altezza del deflusso superficiale lungo la sezione della strada sopra la frana per i vari scenari, rispetto alla rispettiva simulazione in assenza di sistemi di drenaggio. I boxplot rappresentati in figura 4.8 invece mostrano i valori di altezza del deflusso superficiale estratti per ognuno dei suddetti punti di controllo. In particolare, in ogni grafico viene effettuato un confronto tra i valori di altezza del deflusso superficiale estratti dallo scenario originale rispetto a quelli misurati in ognuno dei nove scenari realizzati. Osservando i grafici, è possibile constatare come i boxplot rappresentanti gli scenari simulati presentino dei valori inferiori rispetto a quelli appartenenti allo scenario originale; ciò evidenzia il ruolo esercitato dalle canalette nell'intercettare i deflussi lungo la strada.

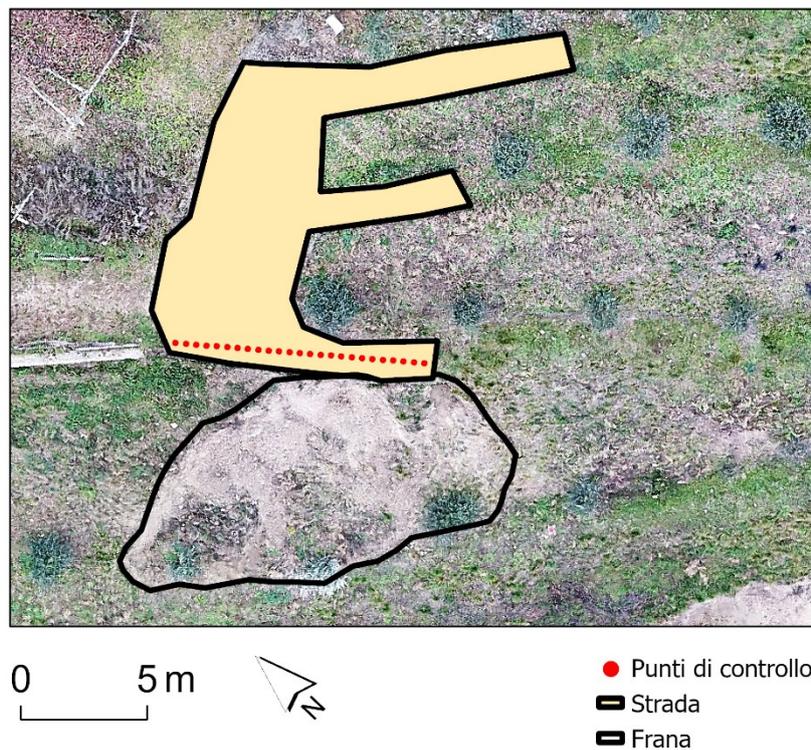


Figura 4.7 Localizzazione dei punti di controllo posizionati lungo la sezione della strada sovrastante la frana superficiale per le analisi statistiche delle simulazioni ottenute con il modello SIMWE

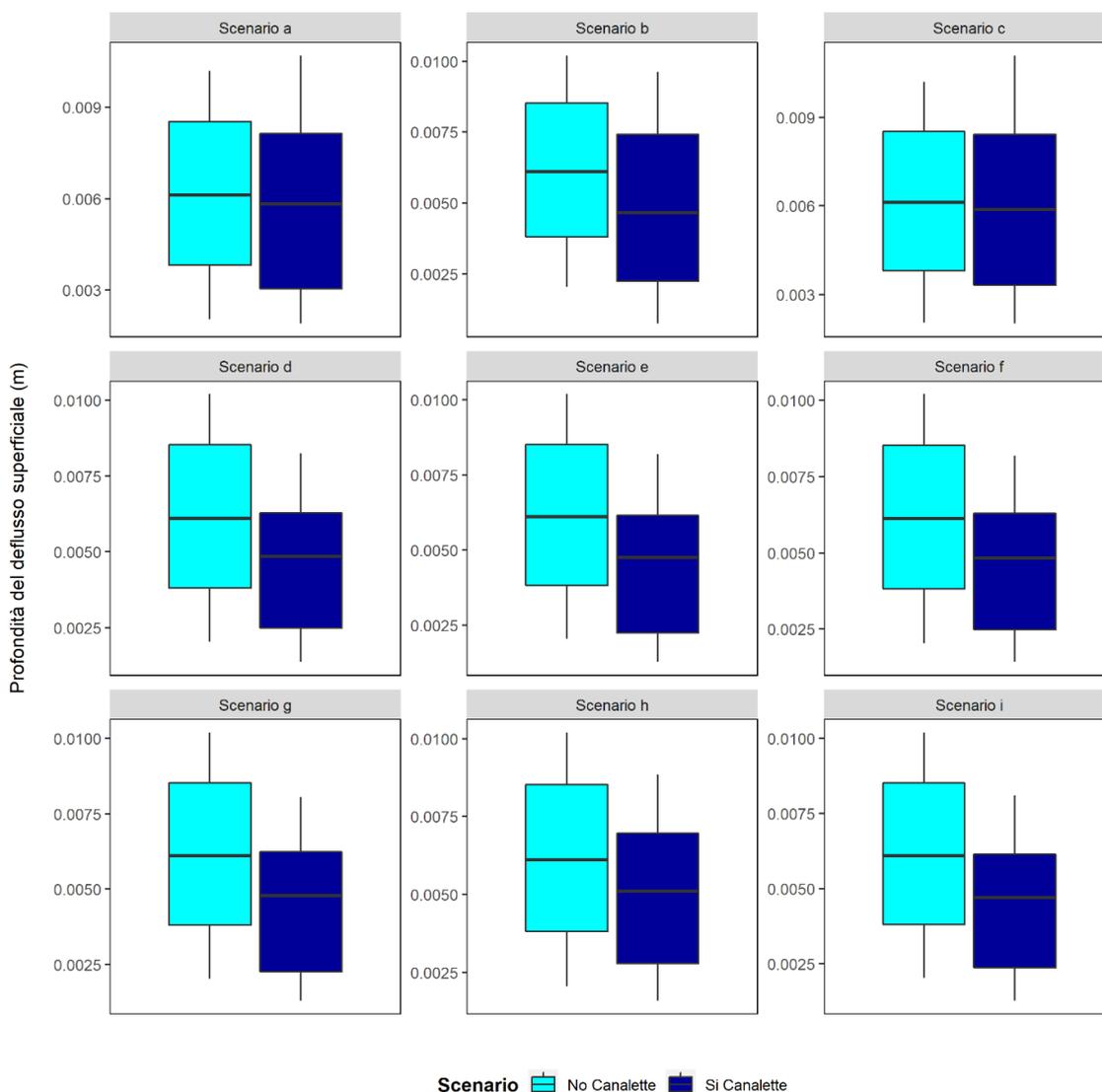


Figura 4.8 Boxplot dei valori di profondità del deflusso superficiale estratti da ognuno dei punti di controllo localizzati lungo la sezione di strada situata al di sopra della frana, in riferimento allo scenario iniziale (assenza di sistemi di drenaggio –*No Canalette*–) e ai rispettivi scenari caratterizzati da una diversa localizzazione dei sistemi di drenaggio (*Si Canalette*)

In tabella 4.1 è riportato un prospetto dei valori di profondità del deflusso superficiale estratti per ogni scenario, con il quale si evidenzia un miglioramento complessivo rispetto alla situazione di partenza, dimostrato anche dai valori medi che risultano inferiori rispetto all'originale: tale analisi permette anche di individuare gli scenari che hanno riportato i risultati migliori (scenari d, e, f, g, i).

Tabella 4.1 Panoramica dei valori massimi, minimi e medi di *water depth* estratti per ogni punto di controllo, per lo scenario originale e per ogni scenario con simulazione della presenza di canalette

Scenario	Max water depth (m)	Min water depth (m)	Media water depth (m)
Originale	0,0101	0,0020	0,0060
a	0,0106	0,0018	0,0057
b	0,0096	0,0007	0,0048
c	0,0110	0,0020	0,0059
d	0,0082	0,0013	0,0043
e	0,0081	0,0012	0,0042
f	0,0081	0,0014	0,0043
g	0,0080	0,0013	0,0042
h	0,0088	0,0015	0,0047
i	0,0081	0,0012	0,0042

In seguito, il ruolo svolto dalle canalette è stato ulteriormente evidenziato per mezzo dello studio statistico della cross section dei valori di altezza del deflusso superficiale estratti nei vari scenari. Tali valori sono stati estratti lungo un segmento tracciato lungo sezione di strada al di sopra della frana oggetto di studio, in modo da focalizzare le indagini nel tratto sovrastante la frana stessa. In figura 4.9 sono raffigurati i grafici della cross section elaborata per i differenti scenari: nello specifico, ogni grafico illustra il confronto tra i valori di profondità del deflusso superficiale estratti per lo scenario originale e per i nove scenari alternativi, in corrispondenza di ciascun punto lungo la sezione della strada in esame.

Il confronto dei valori di altezza del deflusso superficiale ha sottolineato ciò che poi è stato dimostrato attraverso l'analisi statistica: la presenza di sistemi di drenaggio ha influenzato le dinamiche idriche superficiali, specialmente negli scenari d, e, f, g, i, dove si osserva una diminuzione dei valori di altezza del deflusso superficiale lungo la strada rispetto allo scenario originale.

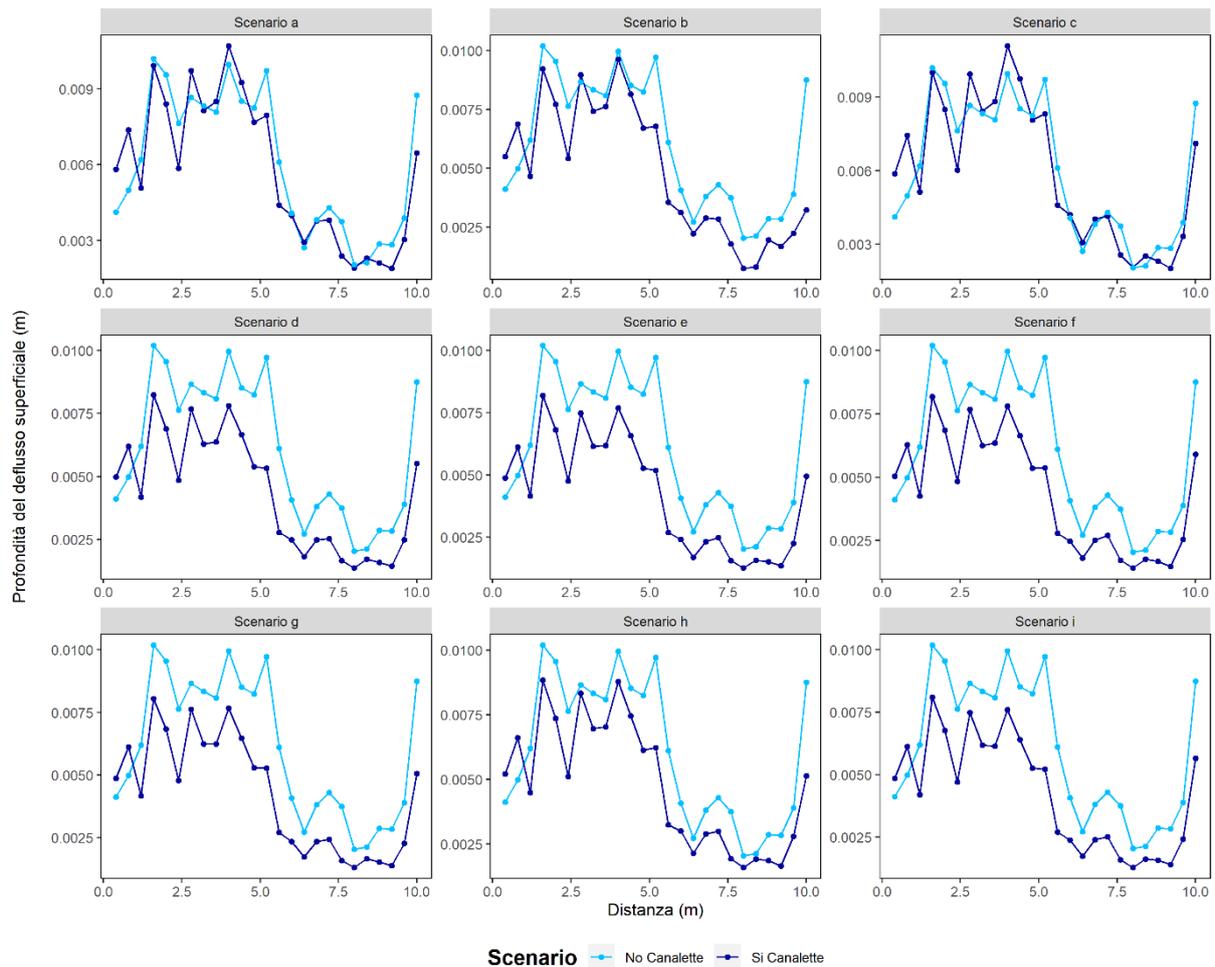


Figura 4.9 *Cross section* dei valori di profondità del deflusso superficiale estratti per ogni punto di controllo lungo la sezione di strada in corrispondenza della frana superficiale presa in esame per la presente tesi, in riferimento allo scenario iniziale (assenza di sistemi di drenaggio –*No Canalette*–) e ai rispettivi scenari caratterizzati da una diversa localizzazione dei sistemi di drenaggio (*Si Canalette*)

L’analisi statistica dei risultati ottenuti mediante le simulazioni è avvenuta attraverso specifici codici implementati nel software R. In particolare, la normalità della distribuzione dei dati estratti è stata verificata tramite la funzione “*shapiro.test*”. A tal proposito, poiché i valori di p derivati dal test di Shapiro-Wilk risultano maggiori del livello di significatività considerato ($\alpha = 0.05$), i valori di profondità del deflusso superficiale estratti sono stati assunti come normalmente distribuiti.

La Tabella 4.2 mostra i risultati dell’analisi statistica relativa ai valori di altezza del deflusso superficiale estratti per ogni punto di controllo lungo la sezione di strada in esame. Tale analisi è stata effettuata mediante la funzione “*t.test*” a due code. Poiché negli scenari d, e, f, g, i sono stati ottenuti valori t maggiori rispetto al valore di riferimento t -*statistic*, l’ipotesi nulla H_0 è stata rifiutata in favore dell’ipotesi alternativa H_1 . Ciò è ulteriormente confermato

dal calcolo dei valori p , i quali risultano minori del livello di significatività considerato ($\alpha = 0.05$), supportando quindi l'ipotesi alternativa.

Tabella 4.2 Panoramica dei parametri statistici derivati dal test t e dal calcolo del p-value per i valori di profondità del deflusso superficiale estratti dai punti di controllo posizionati lungo la sezione di strada sovrastante la frana

Scenario	p-value	t-value	t-statistic
a	0.68	0.40	2.06
b	0.14	1.49	
c	0.91	0.10	
d	0.02	2.36	
e	0.01	2.54	
f	0.02	2.32	
g	0.01	2.52	
h	0.09	1.71	
i	0.01	2.51	

4.5 Discussione

Questo lavoro propone un'analisi dell'influenza dei sistemi di drenaggio sui deflussi idrici superficiali che si verificano in una strada localizzata all'interno di un vigneto terrazzato, caratterizzato dalla presenza di frane superficiali. A tal proposito, è stata effettuata un'analisi idrologica mediante il modello SIMWE al fine di simulare le dinamiche idriche all'interno dell'area studio, ipotizzando la presenza di canalette longitudinali e trasversali mediante specifiche operazioni di editing del DEM. L'utilizzo del DEM ad una risoluzione di 15cm ha permesso di effettuare un'analisi idrologica su scala centimetrica, focalizzando l'attenzione su di una precisa area situata all'interno di un vigneto, a differenza di lavori simili condotti, ad esempio, su scala regionale o più ampia (Manfreda & Samela, 2019; Saleem et al., 2019; Zhao et al., 2019).

Sono stati effettuati numerosi studi circa l'influenza delle dinamiche idrologiche sull'attivazione di fenomeni franosi in terrazzamenti: essi evidenziano il ruolo svolto dalle strade rurali nell'alterazione dei deflussi idrici (Jiao et al., 2019; Mauri et al., 2022), l'influenza delle piogge nell'attivazione di fenomeni di dissesto (Agnolotti et al., 2019; Wen, Gao, et al., 2021) e l'importanza della presenza di sistemi di drenaggio al fine di mitigare i fenomeni di degrado (Peng et al., 2019; Pijl et al., 2020).

Il presente lavoro si differenzia dagli altri disponibili, poiché offre un'analisi su scala centimetrica della variazione delle dinamiche idriche in seguito alla simulazione della presenza di sistemi di drenaggio tramite operazioni di editing del DEM. Il confronto delle simulazioni derivate dagli scenari ipotizzati con lo scenario originale ha permesso di verificare l'influenza dei sistemi di drenaggio sulle dinamiche dei deflussi superficiali. Nello specifico, si evidenzia l'importanza del ruolo svolto dalle canalette in cinque degli scenari proposti, osservabile grazie alle simulazioni svolte tramite il modello SIMWE, nel mitigare le dinamiche di deflusso superficiale. A differenza delle comuni applicazioni del modello SIMWE (Cencetti et al., 2005; Mitsova et al., 2013; Fernandes et al., 2017), questo lavoro si distingue in quanto tale modello viene applicato su un DEM precedentemente editato in ambiente GIS.

Inoltre, un'altra caratteristica che contraddistingue la presente tesi è la possibilità di effettuare delle analisi idrologiche utilizzando un DEM elaborato tramite tecniche fotogrammetriche a basso costo. Ciò evidenzia come l'utilizzo integrato di droni e modelli idrologici rappresenti uno strumento particolarmente utile per una migliore pianificazione delle reti stradali in agricoltura, al fine di prevenire e mitigare il verificarsi di fenomeni di degrado del suolo

agricolo, oltre che ridurre le perdite produttive conseguenti al verificarsi di tali fenomeni, diminuire i costi di manutenzione delle aree agricole e limitare il pericolo di incidenti durante le operazioni agronomiche.

5. Prospettive future

L'applicazione di modelli idrologici che utilizzano come input Modelli di Elevazione Digitale del terreno, ottenuti tramite tecniche fotogrammetriche a basso costo, rappresenta un utile strumento di indagine per lo studio delle dinamiche idrologiche superficiali a scala di campo. Contemporaneamente, il progresso tecnologico degli ultimi decenni consente di effettuare numerose operazioni di *editing* e analisi a partire da rilievi fotogrammetrici ad elevata risoluzione per lo studio di specifiche problematiche di carattere idrologico e geomorfologico. A tal proposito, la metodologia proposta in questo lavoro può essere utile per effettuare simili analisi in aree agricole soggette a fenomeni di degrado del suolo, con lo scopo di proporre efficienti ed economici interventi progettuali e gestionali delle aree coltivate coinvolte in tali problematiche. Tramite simili operazioni di processamento dei modelli di elevazione del terreno a scala centimetrica si potrebbe potenzialmente analizzare l'efficienza di differenti sistemi di drenaggio lungo le strade rurali, in un'ottica di mitigazione del rischio idrogeologico connesso ad una inefficace gestione dei deflussi idrici superficiali da parte di questi ultimi. In aggiunta, la presente tesi può essere considerata come riferimento per l'applicazione di modelli idrologici e geomorfologici utili per una mappatura delle zone soggette all'attivazione di potenziali fenomeni di degrado del suolo, al fine di pianificare efficienti interventi di stabilizzazione dei pendii (come terrazzamenti e aree ripide coltivate). Infine, ulteriori analisi potrebbero essere condotte per quanto riguarda il rischio sociale correlato alle problematiche prese in considerazione nel presente lavoro.

6. Conclusioni

Questo lavoro propone un'analisi delle processi idrologici che si verificano lungo una strada presente all'interno di un vigneto terrazzato situato in provincia di Trento. Le indagini sono state effettuate tramite l'elaborazione di un DEM, ottenuto attraverso precedenti rilievi effettuati mediante l'utilizzo di un drone. Le operazioni di editing sul DEM eseguite in ambiente GIS hanno condotto alla simulazione di nove differenti scenari, caratterizzati dalla presenza di sistemi di drenaggio posti lungo la strada presa in considerazione, al fine di valutare successivamente la loro influenza sulle dinamiche dei deflussi idrici superficiali tramite l'impiego del modello idrologico SIMWE. È stata poi effettuata un'analisi statistica dei risultati che ha visto il confronto dello scenario originale con i nove scenari ideati, con lo scopo di verificare l'efficacia delle opere di drenaggio nel deviare i deflussi idrici. In particolare, in riferimento ai risultati ottenuti dall'analisi statistica, è stato osservato che in numerose soluzioni progettuali proposte, la presenza di canalette influenza la dinamica del deflusso superficiale lungo la strada. Pertanto, le analisi presentate in questo studio possono essere uno strumento di riferimento per la simulazione di sistemi di drenaggio in altri contesti agricoli. Alla luce di quanto emerso, il presente lavoro permette di sottolineare l'importanza di un'efficace gestione dell'acqua lungo le reti stradali agricole, soprattutto in contesti caratterizzati da aree a forte pendenza soggette a fenomeni di degrado del suolo. A tal proposito, l'impiego di modelli idrologici può essere considerato come uno strumento utile per l'identificazione di zone che potrebbero essere potenzialmente coinvolte nell'attivazione di futuri processi di degrado del suolo. Queste informazioni, di fondamentale importanza per gli agricoltori, possono essere rilevanti specialmente in aree nelle quali la presenza di infrastrutture come le strade è indispensabile ai fini della gestione dei terreni agricoli e in termini di produttività, ma dove allo stesso tempo possono rappresentare una delle principali cause di fenomeni di degrado del suolo. Inoltre, l'applicazione di tecniche fotogrammetriche come la *Structure from Motion*, combinate con l'impiego di droni per effettuare i rilievi, risultano essere fondamentali per effettuare analisi topografiche ad alta risoluzione con bassi costi. Infatti, nella presente tesi, l'elaborazione del DEM relativo all'area di studio in ambiente GIS ha permesso di valutare le informazioni geomorfologiche del terreno, oltre che di simulare il posizionamento dei sistemi di drenaggio e delle dinamiche idriche che si verificano in loro presenza.

Con il presente lavoro si è voluto effettuare un'indagine al fine di mitigare i fenomeni di degrado del suolo che si verificano soprattutto in aree agricole a forte pendenza, dove la presenza di infrastrutture gestite in modo non ottimale può causare l'attivazione di dissesti.

Si evince come le dinamiche dei deflussi idrici possano essere influenzate tramite l'installazione di sistemi di drenaggio lungo le strade rurali. Le operazioni di editing del DEM in ambiente GIS hanno consentito di simulare la presenza di canalette, permettendo di effettuare una analisi quantitativa del deflusso superficiale lungo la strada per ogni scenario. Questa tesi rappresenta uno dei primi lavori nei quali vengono utilizzati il DEM e un modello idrologico al fine di verificare l'efficacia di sistemi di drenaggio. Lo scopo è stato quello di dimostrare che l'utilizzo integrato di mezzi tecnologici e di modelli idrologici possano garantire una soluzione a basso costo al fine di mitigare i fenomeni di degrado che possono caratterizzare le aree rurali e allo stesso tempo di evidenziare come la gestione dei deflussi idrici sia di fondamentale importanza soprattutto in aree a forte pendenza.

Bibliografia

- Abdulkareem, J. H., Pradhan, B., Sulaiman, W. N. A., & Jamil, N. R. (2018). Review of studies on hydrological modelling in Malaysia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(4), 1577–1605. <https://doi.org/10.1007/S40808-018-0509-Y/TABLES/2>
- Adamopoulos, T. (2011). Transportation costs, agricultural productivity and cross-country income differences. *International Economic Review*, 52(2), 489–521. <https://doi.org/10.1111/J.1468-2354.2011.00636.X>
- Aghakouchak, A., Habib, A., Aghakouchak, A., & Habib, E. (2010). Application of a conceptual hydrologic model in teaching hydrologic processes. *Journal International Journal of Engineering Education*, 26(4). <https://escholarship.org/uc/item/3sv066q5>
- Agnoletti, M., Errico, A., Santoro, A., Dani, A., & Preti, F. (2019). Terraced landscapes and hydrogeological risk. Effects of land abandonment in Cinque Terre (Italy) during severe rainfall events. *Sustainability 2019, Vol. 11, Page 235, 11(1)*, 235. <https://doi.org/10.3390/SU11010235>
- Ahmad, I. (2018). Digital elevation model (DEM) coupled with geographic information system (GIS): an approach towards erosion modeling of Gumara watershed, Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(10), 1–11. <https://doi.org/10.1007/S10661-018-6888-8/TABLES/9>
- Amici, A., Serrani, F., Rossi, C. M., & Primi, R. (2012). Increase in crop damage caused by wild boar (*Sus scrofa* L.): The “refuge effect.” *Agronomy for Sustainable Development*, 32(3), 683–692. <https://doi.org/10.1007/S13593-011-0057-6/TABLES/4>
- Arnáez, J., Lana-Renault, N., Lasanta, T., Ruiz-Flaño, P., & Castroviejo, J. (2015). Effects of farming terraces on hydrological and geomorphological processes. A review. *CATENA*, 128, 122–134. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2015.01.021>
- Bassani, M., Baglieri, O., Catani, L., Chiappinelli, G., & Tefa, L. (2016). Linee guida per la progettazione e la costruzione di piste e strade in ambito forestale.

- Baumhardt, R. L., Stewart, B. A., & Sainju, U. M. (2015). North American soil degradation: Processes, practices, and mitigating strategies. *Sustainability* 2015, Vol. 7, Pages 2936-2960, 7(3), 2936–2960. <https://doi.org/10.3390/SU7032936>
- Bischetti, G. B. (2005). Linee guida per la progettazione della viabilità agro-silvo-pastorale in Lombardia-Criteri generali.
- Bordoni, M., Vercesi, A., Maerker, M., Ganimede, C., Reguzzi, M. C., Capelli, E., Wei, X., Mazzoni, E., Simoni, S., Gagnarli, E., & Meisina, C. (2019). Effects of vineyard soil management on the characteristics of soils and roots in the lower Oltrepò Apennines (Lombardy, Italy). *Science of The Total Environment*, 693, 133390. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.07.196>
- Borga, M., Tonelli, F., & Salleroni, J. (2004). A physically based model of the effects of forest roads on slope stability. *Water Resources Research*, 40(12), 1–9. <https://doi.org/10.1029/2004WR003238>
- Brandolini, P., Cevasco, A., Capolongo, D., Pepe, G., Lovergine, F., & del Monte, M. (2018). Response of terraced slopes to a very intense rainfall event and relationships with land abandonment: A case study from Cinque Terre (Italy). *Land Degradation & Development*, 29(3), 630–642. <https://doi.org/10.1002/LDR.2672>
- Bryan, R. B. (2000). Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 32(3–4), 385–415. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00105-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00105-1)
- Bunya, S., Dietrich, J. C., Westerink, J. J., Ebersole, B. A., Smith, J. M., Atkinson, J. H., Jensen, R., Resio, D. T., Luettich, R. A., Dawson, C., Cardone, V. J., Cox, A. T., Powell, M. D., Westerink, H. J., & Roberts, H. J. (2010). A high-resolution coupled riverine flow, tide, wind, wind wave, and storm surge model for southern Louisiana and Mississippi. Part I: Model development and validation. *Monthly Weather Review*, 138(2), 345–377. <https://doi.org/10.1175/2009MWR2906.1>
- Burningham, S., & Stankevich, N. (2005). Why Road Maintenance is Important and How to Get it Done. *Transport Notes Series; No. TRN 4. World Bank, Washington, DC.* © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/11779>

- Cencetti, C., de Rosa, P., Fredduzzi, A., & Marchesini, I. (2005). Erosione dei suoli: Applicazioni tramite il software GRASS GIS. *Giornale Di Geologia Applicata*, 2, 196–202.
- Chalise, D., Kumar, L., & Kristiansen, P. (2019). Land degradation by soil erosion in Nepal: A review. *Soil Systems 2019*, Vol. 3, Page 12, 3(1), 12. <https://doi.org/10.3390/SOILSYSTEMS3010012>
- Chapuis, R. P. (2012). Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. *Bull Eng Geol Environ*, 71, 401–434. <https://doi.org/10.1007/s10064-012-0418-7>
- Collins, B. D., & Znidarcic, D. (2004). Stability analyses of rainfall induced landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(4), 362–372. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:4\(362\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:4(362))
- de Luna, L. (2022, May 26). Il vino? Invecchia sul fondo del lago ma anche a caduta libera. *La Repubblica*.
- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/J.AQPRO.2015.02.126>
- Diamond, J., & Shanley, T. (2010). Infiltration rate assessment of some major soils. *Irish Geography*, 36(1), 32–46. <https://doi.org/10.1080/00750770309555810>
- Dorren, L., & Rey, F. (2004). A review of the effect of terracing on erosion. *Soil Conservation And Protection for Europe*. www.scape.org
- Enemark, T., Peeters, L. J. M., Mallants, D., & Batelaan, O. (2019). Hydrogeological conceptual model building and testing: A review. *Journal of Hydrology*, 569, 310–329. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2018.12.007>
- FAO. (2015). Status of the world's soil resources. <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>
- FAO. (2017). The future of food and agriculture: Trends and challenges. <https://doi.org/10.4060/CB4402EN>
- FAO. (2022). The state of food security and nutrition in the world 2022. <https://doi.org/10.4060/CC0639EN>

- Fenicia, F., Kavetski, D., Savenije, H. H. G., Clark, M. P., Schoups, G., Pfister, L., & Freer, J. (2014). Catchment properties, function, and conceptual model representation: is there a correspondence? *Hydrological Processes*, 28(4), 2451–2467. <https://doi.org/10.1002/HYP.9726>
- Fernandes, J., Bateira, C., Soares, L., Faria, A., Oliveira, A., Hermenegildo, C., Moura, R., & Gonçalves, J. (2017a). SIMWE model application on susceptibility analysis to bank gully erosion in Alto Douro Wine Region agricultural terraces. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.034>
- Fernandes, J., Bateira, C., Soares, L., Faria, A., Oliveira, A., Hermenegildo, C., Moura, R., & Gonçalves, J. (2017b). SIMWE model application on susceptibility analysis to bank gully erosion in Alto Douro Wine Region agricultural terraces. *CATENA*, 153, 39–49. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2017.01.034>
- Fors, A. (2022). Improved understanding of water balance in the Malwathu Oya river basin using SWAT and remote sensing. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-479246>
- Gao, J., & Wang, H. (2019). Temporal analysis on quantitative attribution of karst soil erosion: A case study of a peak-cluster depression basin in Southwest China. *CATENA*, 172, 369–377. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2018.08.035>
- Gollin, D., & Rogerson, R. (2010). Agriculture, roads and economic development in Uganda. <https://doi.org/10.3386/W15863>
- Gonzales, R. (1998). Cross drain update. *Stream Systems Technology Center*.
- Gravagnuolo, A., & Varotto, M. (2021). Terraced landscapes regeneration in the perspective of the circular economy. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 4347*, 13(8), 4347. <https://doi.org/10.3390/SU13084347>
- Guo, J., Zhou, J., Lu, J., Zou, Q., Zhang, H., & Bi, S. (2014). Multi-objective optimization of empirical hydrological model for streamflow prediction. *Journal of Hydrology*, 511, 242–253. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2014.01.047>
- Guth, P. L., van Niekerk, A., Grohmann, C. H., Muller, J. P., Hawker, L., Florinsky, I. v., Gesch, D., Reuter, H. I., Herrera-Cruz, V., Riazanoff, S., López-Vázquez, C., Carabajal, C. C., Albinet, C., & Strobl, P. (2021). Digital Elevation Models:

- Terminology and definitions. *Remote Sensing* 2021, Vol. 13, Page 3581, 13(18), 3581. <https://doi.org/10.3390/RS13183581>
- Hofierka, J., & Knutová, M. (2015). Simulating spatial aspects of a flash flood using the Monte Carlo method and GRASS GIS: A case study of the Malá Svinka Basin (Slovakia). *Open Geosciences*, 7(1), 118–125. <https://doi.org/10.1515/GEO-2015-0013>
- Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J., & Rosette, J. (2019). Structure from Motion photogrammetry in forestry: A review. *Current Forestry Reports*, 5(3), 155–168. <https://doi.org/10.1007/S40725-019-00094-3/FIGURES/4>
- ISTAT. (2020). Coltivazioni legnose fruttifere.
- Jiao, Y., Zhao, D., Ding, Y., Liu, Y., Xu, Q., Qiu, Y., Liu, C., Liu, Z., Zha, Z., & Li, R. (2019). Performance evaluation for four GIS-based models purposed to predict and map landslide susceptibility: A case study at a world heritage site in southwest China. *CATENA*, 183, 104221. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2019.104221>
- Kalcic, M., Crumpton, W., Liu, X., D'Ambrosio, J., Ward, A., & Witter, J. (2018). Assessment of beyond-the-field nutrient management practices for agricultural crop systems with subsurface drainage. *Journal of Soil and Water Conservation*, 73(1), 62–74. <https://doi.org/10.2489/JSWC.73.1.62>
- Kamali, P., Ebrahimian, H., & Parsinejad, M. (2018). Estimation of Manning roughness coefficient for vegetated furrows. *Irrigation Science*, 36, 339–348. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0593-9>
- Kia, A., Wong, H. S., & Cheeseman, C. R. (2017). Clogging in permeable concrete: A review. *Journal of Environmental Management*, 193, 221–233. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2017.02.018>
- Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A., & Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 132, 105078. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2019.105078>
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12(6), 519–539. <https://doi.org/10.1002/LDR.472>

- Lanni, C., Borga, M., Rigon, R., & Tarolli, P. (2012). Modelling shallow landslide susceptibility by means of a subsurface flow path connectivity index and estimates of soil depth spatial distribution. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11), 3959–3971. <https://doi.org/10.5194/HESS-16-3959-2012>
- López-Vicente, M., Nadal-Romero, E., & Cammeraat, E. L. H. (2017). Hydrological connectivity does change over 70 years of abandonment and afforestation in the Spanish Pyrenees. *Land Degradation & Development*, 28(4), 1298–1310. <https://doi.org/10.1002/LDR.2531>
- Lucieer, A., Robinson, S., & Turner, D. (2011). Unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing for hyperspatial terrain mapping of Antarctic moss beds based on structure from motion (SfM) point clouds. *34th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. <https://ro.uow.edu.au/scipapers/1132>
- Manfreda, S., & Samela, C. (2019). A digital elevation model based method for a rapid estimation of flood inundation depth. *J Flood Risk Management*. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12541>
- Manfredonia, I., Stallo, C., Ruggieri, M., Massari, G., & Barbante, S. (2015). An early-warning aerospace system for relevant water bodies monitoring. *2nd IEEE International Workshop on Metrology for Aerospace, MetroAeroSpace 2015 - Proceedings*, 536–540. <https://doi.org/10.1109/METROAEROSPACE.2015.7180714>
- Marchi, E., Piegai, F., Fabiano, F., & Neri, F. (2013). La progettazione, la realizzazione e la manutenzione della viabilità forestale e delle opere connesse Direzione.
- Marzen, M., Iserloh, T., Fister, W., Seeger, M., Rodrigo-Comino, J., & Ries, J. B. (2019). On-site water and wind erosion experiments reveal relative impact on total soil erosion. *Geosciences* 2019, Vol. 9, Page 478, 9(11), 478. <https://doi.org/10.3390/GEOSCIENCES9110478>
- Mauri, L., Masin, R., & Tarolli, P. (2020). Wildlife impact on cultivated lands: A multi-temporal spatial analysis. *Agricultural Systems*, 184. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2020.102890>

- Mauri, L., Sallustio, L., & Tarolli, P. (2019). The geomorphologic forcing of wild boars. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(10), 2085–2094. <https://doi.org/10.1002/ESP.4623>
- Mauri, L., Straffelini, E., Cucchiaro, S., & Tarolli, P. (2021). UAV-SfM 4D mapping of landslides activated in a steep terraced agricultural area. *Journal of Agricultural Engineering*, 52(1). <https://doi.org/10.4081/jae.2021.1130>
- Mauri, L., Straffelini, E., & Tarolli, P. (2022). Multi-temporal modeling of road-induced overland flow alterations in a terraced landscape characterized by shallow landslides. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(2), 240–253. <https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2021.07.004>
- Minotti, M., Giancola, C., di Marzio, P., & di Martino, P. (2018). Land use dynamics of drove roads: The case of Tratturo Castel di Sangro-Lucera (Molise, Italy). *Land* 2018, Vol. 7, Page 3, 7(1), 3. <https://doi.org/10.3390/LAND7010003>
- Mitas, L., & Mitasova, H. (1998). Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water Resources Research*, 34(3), 505–516. <https://doi.org/10.1029/97WR03347>
- Mitasova, H., Barton, M., Ullah, I., Hofierka, J., & Harmon, R. S. (2013). GIS-based soil erosion modeling. *Treatise on Geomorphology*, 3, 228–258. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00052-X>
- Moges, E., Demissie, Y., Larsen, L., & Yassin, F. (2020). Review: Sources of hydrological model uncertainties and advances in their analysis. *Water* 2021, Vol. 13, Page 28, 13(1), 28. <https://doi.org/10.3390/W13010028>
- Mohd Razali, N., & Bee Wah, Y. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 13–14.
- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3–30. <https://doi.org/10.1002/HYP.3360050103>
- Nair, G. G., & Kumar A. (2006). Impact of roads on rural agriculture economy: Evidences from Tamil Nadu. *Indian Journal of Agricultural Economics*.

- Nawaz, M. F., Bourrié, G., & Trolard, F. (2012). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 2012 33:2, 33(2), 291–309. <https://doi.org/10.1007/S13593-011-0071-8>
- Needelman, B. A., Kleinman, P. J. A., Strock, J. S., & Allen, A. L. (2007). Drainage ditches. *Journal of Soil and Water Conservation*, 62(4), 171–178. <https://www.jswnonline.org/content/62/4/171>
- O’Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28(3), 323–344. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)
- Peng, D., Xu, Q., Zhang, X., Xing, H., Zhang, S., Kang, K., Qi, X., Ju, Y., & Zhao, K. (2019). Hydrological response of loess slopes with reference to widespread landslide events in the Heifangtai terrace, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 171, 259–276. <https://doi.org/10.1016/J.JSEAES.2018.12.003>
- Persichillo, M. G., Bordoni, M., Cavalli, M., Crema, S., & Meisina, C. (2018). The role of human activities on sediment connectivity of shallow landslides. *CATENA*, 160, 261–274. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2017.09.025>
- Picuno, Z. G. P. (2002, January 1). Il ruolo della viabilità rurale per lo sviluppo sostenibile dell’agricoltura. *Il Sole 24 Ore*.
- Pijl, A., Barneveld, P., Mauri, L., Borsato, E., Grigolato, S., & Tarolli, P. (2019). Impact of mechanisation on soil loss in terraced vineyard landscapes. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 45(1), 287–308. <https://doi.org/10.18172/CIG.3774>
- Pijl, A., Reuter, L. E. H., Quarella, E., Vogel, T. A., & Tarolli, P. (2020). GIS-based soil erosion modelling under various steep-slope vineyard practices. *Catena*, 193. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2020.104604>
- Pijl, A., Tosoni, M., Roder, G., Sofia, G., & Tarolli, P. (2019). Design of terrace drainage networks using UAV-based high-resolution topographic data. *Water* 2019, Vol. 11, Page 814, 11(4), 814. <https://doi.org/10.3390/W11040814>
- Pinhasi, R., Fort, J., & Ammerman, A. J. (2005). Tracing the origin and spread of agriculture in Europe. *PLOS Biology*, 3(12), e410. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PBIO.0030410>

- Read, J. M., & Torrado, M. (2009). Remote sensing. *International Encyclopedia of Human Geography*, 335–346. <https://doi.org/10.1016/B978-008044910-4.00508-3>
- Saleem, N., Enamul Huq, M., Twumasi, N. Y. D., Javed, A., & Sajjad, A. (2019). Parameters derived from and/or used with Digital Elevation Models (DEMs) for landslide susceptibility mapping and landslide risk assessment: A review. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2019, Vol. 8, Page 545, 8(12), 545. <https://doi.org/10.3390/IJGI8120545>
- Schäuble, H., Marinoni, O., & Hinderer, M. (2008). A GIS-based method to calculate flow accumulation by considering dams and their specific operation time. *Computers and Geosciences*, 34(6), 635–646. <https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2007.05.023>
- Shamdasani, Y. (2021). Rural road infrastructure & agricultural production: Evidence from India. *Journal of Development Economics*, 152, 102686. <https://doi.org/10.1016/J.JDEVECO.2021.102686>
- Sharma, R., Kamble, S. S., & Gunasekaran, A. (2018). Big GIS analytics framework for agriculture supply chains: A literature review identifying the current trends and future perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 103–120. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2018.10.001>
- Sidle, R. C., & Ziegler, A. D. (2012). The dilemma of mountain roads. *Nature Geoscience* 2012 5:7, 5(7), 437–438. <https://doi.org/10.1038/ngeo1512>
- Sidle, R. C., Ziegler, A. D., Negishi, J. N., Nik, A. R., Siew, R., & Turkelboom, F. (2006). Erosion processes in steep terrain—Truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia. *Forest Ecology and Management*, 224(1–2), 199–225. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2005.12.019>
- Soane, B. D., & van Ouwerkerk, C. (1994). Soil compaction problems in world agriculture. *Developments in Agricultural Engineering*, 11(C), 1–21. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50009-X>
- Sofia, G., Masin, R., & Tarolli, P. (2017). Prospects for crowdsourced information on the geomorphic ‘engineering’ by the invasive Coypu (*Myocastor coypus*). *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(2), 365–377. <https://doi.org/10.1002/ESP.4081>

- Stanchi, S., Freppaz, M., Agnelli, A., Reinsch, T., & Zanini, E. (2012). Properties, best management practices and conservation of terraced soils in southern Europe (from Mediterranean areas to the Alps): A review. *Quaternary International*, *265*, 90–100. <https://doi.org/10.1016/J.QUAINT.2011.09.015>
- Streeter, M. T., & Schilling, K. E. (2020). Assessing and mitigating the effects of agricultural soil erosion on roadside ditches. *Journal of Soils and Sediments*, *20*(1), 524–534. <https://doi.org/10.1007/S11368-019-02379-3/TABLES/3>
- Strock, J. S., Dell, C. J., & Schmidt, J. P. (2007). Managing natural processes in drainage ditches for nonpoint source nitrogen control. *Journal of Soil and Water Conservation*, *62*(4), 188–196. <https://www.jswconline.org/content/62/4/188>
- Survila, K., Yildirim, A. A., Li, T., Liu, Y. Y., Tarboton, D. G., & Wang, S. (2016). A scalable high-performance topographic flow direction algorithm for hydrological information analysis. *ACM International Conference Proceeding Series*, *17-21-July-2016*. <https://doi.org/10.1145/2949550.2949571>
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, *33*(2), 309–319. <https://doi.org/10.1029/96WR03137>
- Tarolli, P. (2018). Agricultural terraces special issue preface. *Land Degradation and Development*, *29*(10), 3544–3548. <https://doi.org/10.1002/LDR.3129>
- Tarolli, P., Calligaro, S., Cazorzi, F., & Dalla Fontana, G. (2013). Recognition of surface flow processes influenced by roads and trails in mountain areas using high-resolution topography. *European Journal of Remote Sensing*, *46*(1), 176–197. <https://doi.org/10.5721/EUJRS20134610>
- Tarolli, P., Pijl, A., Cucchiaro, S., & Wei, W. (2021). Slope instabilities in steep cultivation systems: Process classification and opportunities from remote sensing. *Land Degradation and Development*, *32*(3), 1368–1388. <https://doi.org/10.1002/LDR.3798>
- Tarolli, P., Preti, F., & Romano, N. (2014). Terraced landscapes: From an old best practice to a potential hazard for soil degradation due to land abandonment. *Anthropocene*, *6*, 10–25. <https://doi.org/10.1016/J.ANCENE.2014.03.002>

- Tarolli, P., Rizzo, D., & Brancucci, G. (2019). Terraced landscapes: Land abandonment, soil degradation, and suitable management. *Environmental History (Netherlands)*, 9, 195–210. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96815-5_12/COVER
- Torresani, L., Wu, J., Masin, R., Penasa, M., & Tarolli, P. (2019). Estimating soil degradation in montane grasslands of North-eastern Italian Alps (Italy). *Heliyon*, 5(6), e01825. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2019.E01825>
- Tropicchio, P., Satler, M., Stefanini, G., Dabisias, G., Ruffaldi, E., & Avizzano, C. A. (2015). Towards smart farming and sustainable agriculture with drones; Towards smart farming and sustainable agriculture with drones. *2015 International Conference on Intelligent Environments*. <https://doi.org/10.1109/IE.2015.29>
- Tsoraeva, E., Alborova, P., Bazaeva, L., Khanaeva, D., & Kozyrev, B. (2021). Modern innovative and unconventional methods to combat soil erosion. *E3S Web of Conferences*, 284, 02003. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202128402003>
- Turner, S. W. D., Bennett, J. C., Robertson, D. E., & Galelli, S. (2017). Complex relationship between seasonal streamflow forecast skill and value in reservoir operations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(9), 4841–4859. <https://doi.org/10.5194/HESS-21-4841-2017>
- van Pelt, R. S., Hushmurodov, S. X., Baumhardt, R. L., Chappell, A., Nearing, M. A., Polyakov, V. O., & Strack, J. E. (2017). The reduction of partitioned wind and water erosion by conservation agriculture. *CATENA*, 148, 160–167. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2016.07.004>
- Wei, W., Chen, D., Wang, L., Daryanto, S., Chen, L., Yu, Y., Lu, Y., Sun, G., & Feng, T. (2016). Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing. *Earth-Science Reviews*, 159, 388–403. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2016.06.010>
- Wen, Y., Gao, P., Mu, X., Li, M., Su, Y., & Wang, H. (2021). Experimental study on landslides in terraced fields in the chinese Loessial region under extreme rainfall. *Water 2021, Vol. 13, Page 270, 13(3)*, 270. <https://doi.org/10.3390/W13030270>
- Wen, Y., Kasielke, T., Li, H., Zhang, B., & Zepp, H. (2021). May agricultural terraces induce gully erosion? A case study from the Black Soil Region of Northeast China.

Science of The Total Environment, 750, 141715.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.141715>

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314.
<https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2012.08.021>

Wild, A. (2003). *Soils, land and food: Managing the land during the twenty-first century*. Cambridge University Press.

Woodhouse, I. H. (2017). *Introduction to microwave remote sensing*. 1–400.
<https://doi.org/10.1201/9781315272573/INTRODUCTION-MICROWAVE-REMOTE-SENSING-IAIN-WOODHOUSE>

Zhang, J., & Lin, X. (2017). Advances in fusion of optical imagery and LiDAR point cloud applied to photogrammetry and remote sensing. *International Journal of Image and Data Fusion*, 8(1), 1–31.
<https://doi.org/10.1080/19479832.2016.1160960>

Zhao, B., Dai, Q., Han, D., Dai, H., Mao, J., & Zhuo, L. (2019). Probabilistic thresholds for landslides warning by integrating soil moisture conditions with rainfall thresholds. *Journal of Hydrology*, 574, 276–287.
<https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.04.062>

Zhou, Z., Duan, J., Li, W., & Geng, S. (2021). Can rural road construction promote the sustainable development of regional agriculture in China? *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 10882, 13(19), 10882. <https://doi.org/10.3390/SU131910882>

Ringraziamenti

In primo luogo, desidero ringraziare i miei genitori, che mi hanno sempre supportato durante questi anni di studio passati lontano da casa. Ovviamente ringrazio anche mio fratello Luca, il quale è sempre stato presente, sia per passare un po' di tempo in compagnia che nel darmi consigli e suggerimenti durante la tesi.

Desidero poi ringraziare Alessia, la mia ragazza, che mi ha supportato e sopportato durante questi ultimi mesi di università; la sua presenza mi è risultata indispensabile e allo stesso tempo essenziale.

Ringrazio il prof. Paolo Tarolli, che mi ha proposto un argomento di tesi molto interessante e allo stesso tempo attuale, permettendomi di approfondire la conoscenza dei software GIS. Ringrazio ovviamente anche il dott. Luca Mauri, il quale è sempre stato disponibile nel dedicare il suo tempo nei miei confronti, oltre che grande risorsa di consigli.

Inoltre, ringrazio tutti i miei amici che sono sempre stati al mio fianco in questi lunghi anni: quelli di vecchia data, in particolare Alessio, Cosimo e Mariarita; ma anche le amicizie nate a Padova, come quelle con Riccardo, Carlo, Antonio, Marianna, Asia, Federico, Vittoria, Chiara, Francesca.

Un grande grazie va infine ai colleghi CUAMM e Gregorianum, i quali mi hanno accompagnato durante gli studi, permettendomi di crescere come persona e soprattutto di stringere tante belle amicizie.