

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Agronomia, Animali, Alimenti,  
Risorse Naturali e Ambiente  
Dipartimento Territorio e Sistemi Agro - Forestali

Corso di laurea in Scienze e Tecnologie Agrarie

Impiego di droni per il monitoraggio e il  
mantenimento dei terrazzamenti agricoli in  
Valle Camonica

Relatore  
Prof. Paolo Tarolli

Correlatore  
Dott.ssa Giulia Roder  
Dott.ssa Giulia Sofia

Laureando  
Michele Tosoni  
Matricola n.  
1130915

ANNO ACCADEMICO 2016 – 2017



## Riassunto

L'elaborato propone una metodologia di indagine finalizzata alla tutela dei terrazzamenti presenti in Valle Camonica, patrimonio storico e culturale del luogo.

I terrazzi agricoli hanno permesso alle comunità rurali situate in montagna e in collina di ricavare piani di coltivazione, laddove l'attività agricola era difficile da praticare. Attualmente sono diffusi in tutto il mondo e possiedono peculiarità (materiali e modalità di costruzione) legate alle caratteristiche climatiche e alle tradizioni locali. Nonostante ci siano differenze strutturali, essi tutelano il territorio dal punto di vista idrogeologico.

Uno dei problemi più diffusi delle aree terrazzate è l'instabilità, specie per le strutture con muri a secco. Questi possono infatti essere soggetti a fenomeni di dissesto legati a cause endogene ed esogene che portano a diverse tipologie di degrado dei manufatti.

Un altro problema è l'abbandono. Per motivi storici e climatici, in Italia (ma non solo), negli ultimi 50-60 anni si è assistito ad un esodo rurale massiccio verso le città, con conseguente aumento del dissesto idrogeologico in determinate zone montuose e collinari.

Grazie all'attività di progetti nazionali e internazionali, i terrazzamenti hanno assunto sempre maggiore rilevanza nell'opinione pubblica. Strumenti e tecnologie hanno permesso la protezione e il controllo dei terrazzi agricoli, introducendo nuove misure per la loro tutela nella prevenzione di crolli e dissesti e nel monitoraggio nel lungo periodo.

Nel presente lavoro di tesi sono state considerate due aree terrazzate presenti nei comuni di Malegno e di Darfo Boario Terme (provincia di Brescia). La prima comprende diversi lotti recentemente disboscati dopo un periodo di abbandono di 40 anni circa, mentre la seconda è un'area all'interno dell'azienda agricola Scraleca, attualmente coltivata e mantenuta.

E' stato poi impiegato un drone per il rilievo fotogrammetrico di entrambe le aree. Il rilievo è stato eseguito in modalità manuale ad un'altezza media di 50 m a Malegno e di 60 m a Darfo Boario Terme. Nella prima area il volo è durato circa 15 minuti, mentre nella seconda 35 minuti circa e sono state raccolte 269 foto a Malegno e 712 a Darfo Boario Terme.

Successivamente le immagini sono state elaborate con tecnica SfM (*Structure from Motion*) per ottenere le due nuvole di punti georeferenziate, utilizzando il programma Photoscan©. Le nuvole di punti sono state poi processate con il programma CloudCompare e quindi elaborate con ArcGis® per generare i due modelli digitali del terreno (DEMs, *Digital Elevation Models*). Utilizzando i DEMs delle due aree di studio è stato possibile calcolare l'indice morfometrico *Relative Path Impact Index* (RPII). Grazie all'indice sono state individuate zone potenzialmente critiche degli appezzamenti, nelle quali lo scorrimento superficiale dell'acqua può comportare una possibile erosione. Sulla base di questa informazione sono state poi proposte diverse soluzioni progettuali di scoline con lo scopo di individuare la soluzione più adeguata al fine di minimizzare potenziali processi di instabilità nella zona.

È stato notato come le scoline poste ai piedi dei muri a secco, sulle strade interpoderali e di collegamento tra i terrazzamenti riducano significativamente deflusso superficiale di acqua, e quindi processi erosivi. Il caso di studio e metodologia di indagine proposti nella presente tesi hanno la potenzialità di servire da linea guida per qualsiasi intervento futuro finalizzato al recupero e manutenzione di aree terrazzate.

## Abstract

This thesis offers a survey method focused on protecting and monitoring agricultural terraces status in Valle Camonica, which is a local and historical heritage.

These terraces have permitted mountain and rural communities to get flat agricultural surfaces in those places where agricultural activities were complex to manage. Terraces are currently used all over the world having peculiar materials and construction methods linked to climatic features and local traditions. Despite structural differences, terraces safeguard the territory from hydrogeological issues.

One of the most common problems in terraces is structural stability, especially those with dry stone walls. Dry stone walls could be prone to instability phenomena due to endogenous or exogenous causes, which lead to different types of degradation.

Another issue is the abandonment. In the last 50-60 years, a rural migration towards cities have been witnessed caused by historical and climatic reasons. This phenomenon increased the hydrogeological instability in confined hilly and mountainous areas.

Thanks to national and international projects, terraces have taken more relevance to public opinion. Instruments and technologies have been introduced to protect terraces and to prevent their collapse, monitoring them in the long run.

In this thesis, two terraced areas in Malegno and Darfo Boario Terme have been studied. The first one correspond to an area recently deforested after a 40 years-abandonment period. The second area is located inside a farm property called Scraleca, that has been properly managed through time.

A drone has been used for the photogrammetric survey of both areas. The flight has been scheduled manually at an average height of 50 m in Malegno and around 60 average Darfo Boario Terme. In the first area the flight of the drone lasted 15 minutes and it took 269 photos while in the second area the flight lasted 35 minutes and it took 712 photos. These images were later processed by a SfM (*Structure from Motion*) technology to obtain two georeferenced point clouds using Photoscan©. These point clouds have been later elaborated with CloudCompare and then processed with ArcGis® for creating two digital elevation models (DEMs). Using the two areas DEMs it has been possible the calculation of the morphometric index called *Relative Path Impact Index* (RPII). Based

on his elaboration, it has been possible to detect potentially dangerous areas in the fields, where the surface runoff can cause potential soil erosion. The results obtained offered several management solutions where ditches have been found to be the most adequate solution for minimising the potential instability.

Ditches placed at the bottom of dry walls or plants inter-rows, could reduce the surface runoff avoiding soil erosion processes

This study case and methodology proposed can be seen as guideline for future interventions aimed at the protection and maintenance of agricultural terraces.

# Indice

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Introduzione.....  | 15 |
| 1.1   | I terrazzi agricoli.....   | 15 |
| 1.2   | Principali problematiche relative ai muri a secco .....  | 20 |
| 1.2.1 | Il problema dell'abbandono dei terrazzamenti.....  | 24 |
| 1.3   | Tecniche di monitoraggio e di intervento per la salvaguardia dei terrazzamenti .....                           | 29 |
| 1.4   | Obiettivi della tesi .....   | 33 |
| 2     | Materiali e metodi.....  | 35 |
| 2.1   | Area di studio .....   | 35 |
| 2.2   | Descrizione della Valle Camonica.....  | 36 |
| 2.2.1 | Morfologia.....  | 36 |
| 2.2.2 | Principali coltivazioni della Valle Camonica .....   | 37 |
| 2.3   | Area di studio di Malegno .....  | 39 |
| 2.4   | Area di studio di Darfo Boario Terme .....   | 40 |
| 2.5   | Metodologia .....  | 43 |
| 2.5.1 | Il rilievo UAV .....   | 43 |
| 2.5.2 | Il metodo SfM ( <i>Structure-From-Motion</i> ) e la creazione del DEM ( <i>Digital Elevation Model</i> ) ..... | 48 |
| 2.5.3 | L'indice <i>Relative Path Impact Index (RPII)</i> .....  | 54 |
| 2.6   | Risultati.....   | 57 |
| 2.6.1 | Area di studio di Malegno.....   | 57 |
| 2.6.2 | Area di studio di Darfo Boario Terme .....   | 60 |
| 2.6.3 | Costo di realizzazione delle scoline .....   | 79 |

|   |                   |    |
|---|-------------------|----|
| 3 | Conclusioni.....  | 83 |
| 4 | Bibliografia..... | 85 |

## Indice delle figure

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Modalità di realizzazione dei terrazzamenti (Fonte: Martini e Pesce 2014)...  | 16 |
| Figura 2: Parti che compongono il terrazzamento (Fonte: Sangiorgi 2007).....  | 18 |
| Figura 3: Terrazzi coltivati a vite in Valtellina (Fonte: Alberto Campanile, 2014) .....  | 19 |
| Figura 4: Degrado del coronamento dovuto all'azione della vegetazione o al calpestio del bestiame (Fonte: Sangiorgi 2007) .....   | 22 |
| Figura 5: Collasso della parte superiore del muro, dovuta alla scarsa manutenzione del coronamento e alla vegetazione tra le pietre (Fonte: Sangiorgi 2007).....  | 22 |
| Figura 6: Spanciamento del muro, dovuto alle pressioni esercitate dal terreno e all'azione dell'acqua (Fonte: Sangiorgi 2007) .....   | 23 |
| Figura 7: Crollo del muro in seguito alla scarsa manutenzione e alle riparazioni non effettuate (Fonte: Sangiorgi 2007) .....   | 23 |
| Figura 8: Porzione di muro a secco crollata in un terrazzamento abbandonato e prossimo al recupero presso l'azienda agricola Scraleca .....   | 26 |
| Figura 9: Porzione di muro a secco crollata in un terrazzamento abbandonato e prossimo al recupero presso l'azienda agricola Scraleca .....   | 26 |
| Figura 10: Esempio di deflusso naturale dell'acqua in seguito all'abbandono dei terrazzamenti e alla mancata manutenzione delle scoline (Fonte: Lourenço et al. 2014) .....                               | 27 |
| Figura 11: Sistema LIDAR aereo (Fonte: Abed e Mcgough 2017).....  | 31 |
| Figura 12: Posizione geografica della Lombardia e della provincia di Brescia (Fonte: Wikipedia).....  | 35 |
| Figura 13: Immagine dell'area di studio di Malegno .....  | 39 |
| Figura 14: Immagine tratta da Google Earth con l'area del rilievo evidenziata nel riquadro rosso (Fonte: Google Earth) .....  | 40 |
| Figura 15: Immagine tratta da Google Earth con l'area del rilievo evidenziata nel riquadro rosso (Fonte: Google Earth) .....  | 41 |
| Figura 16: Esempio di terrazzamenti abbandonati (che presto saranno recuperati) presso l'azienda agricola Scraleca (a, b) ed esempi di recupero dei muri a secco effettuati presso l'azienda (c, d) ..... | 42 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 17: Ortofoto georeferenziata del rilievo effettuato presso Darfo Boario Terme .....   | 43 |
| Figura 18: Drone utilizzato per il rilievo .....   | 45 |
| Figura 19: Pannello di compensato utilizzato per il rilievo .....  | 46 |
| Figura 20: Stazione totale GPS utilizzata per il rilievo (a) e rilevazione delle coordinate al centro dei targets (b).....   | 46 |
| Figura 21: Serie di fotografie scattate presso il rilievo a Malegno (a) e presso il rilievo a Darfo Boario Terme (b) .....   | 48 |
| Figura 22: Risultato dell'Image Alignment sul rilievo effettuato presso l'area di studio a Malegno (a) e presso l'area di studio a Darfo Boario Terme (b).....   | 49 |
| Figura 23: Marker posizionato al centro del GCPs .....   | 50 |
| Figura 24: Markers posizionati nella nuvola di punti sparsa del rilievo di Malegno.....  | 50 |
| Figura 25: Nuvole dense di punti del rilievo di Malegno (a) e di Darfo Boario Terme (b) .....  | 51 |
| Figura 26: Nuvole dense di punti del rilievo di Malegno (a) e di Darfo Boario Terme (b) "ripulite" dalla vegetazione esterna.....  | 52 |
| Figura 27: Chiome di ulivo asportate utilizzando CloudCompare.....   | 53 |
| Figura 28: DEMs dei rilievi effettuati a Malegno (a) e a Darfo Boario Terme (b) .....  | 53 |
| Figura 29: DEMs delle aree di studio di Malegno (a) e di Darfo Boario Terme (b) smussati utilizzando il programma Landserf ed elaborati con il programma ArcGis per ottenere l'effetto "hillshade" ..... | 55 |
| Figura 30: Esempio di mappa classificata di RPII (rilievo di Darfo Boario Terme) .....   | 56 |
| Figura 31: Ortofoto dell'area di studio di Malegno, sulla quale è stato calcolato l'indice RPII; le aree potenzialmente critiche sono evidenziate dai rettangoli bianchi .....                           | 57 |
| Figura 32: Ortofoto dell'area di studio di Malegno, sulla quale è stata disegnata la rete di drenaggio.....  | 58 |
| Figura 33: Ortofoto dell'area di studio di Malegno, dove si può notare come l'RPII sia cambiato grazie all'azione della rete di drenaggio .....  | 59 |
| Figura 34: Prima area considerata per la dimostrazione dell'azione della rete di drenaggio sulla concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua lungo le vie preferenziali .....                    | 61 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 35: Calcolo dell'indice RPII nella prima area considerata. Le aree potenzialmente critiche sono evidenziate dai rettangoli bianchi.....  | 62 |
| Figura 36: Azione della rete di scoline e variazione dell'indice RPII .....   | 63 |
| Figura 37: Seconda area considerata per la dimostrazione dell'azione della rete di drenaggio sulla concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua lungo le vie preferenziali .....   | 64 |
| Figura 38: Calcolo dell'indice RPII nella seconda area considerata. Le aree potenzialmente critiche sono evidenziate dai rettangoli bianchi .....   | 65 |
| Figura 39: Azione della rete di scoline e variazione dell'indice RPII .....   | 66 |
| Figura 40: Terza area considerata per la dimostrazione dell'azione della rete di drenaggio sulla concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua lungo le vie preferenziali.....  | 67 |
| Figura 41: Calcolo dell'indice RPII nella terza area considerata. Le aree potenzialmente critiche sono evidenziate dai rettangoli bianchi.....  | 68 |
| Figura 42: Azione della rete di scoline e variazione dell'indice RPII .....   | 69 |
| Figura 43: Quarta area considerata per la dimostrazione dell'azione della rete di drenaggio sulla concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua lungo le vie preferenziali.....   | 70 |
| Figura 44: Calcolo dell'indice RPII nella quarta area considerata. Le aree potenzialmente critiche sono evidenziate dai rettangoli bianchi.....   | 71 |
| Figura 45: Azione della rete di scoline e variazione dell'indice RPII .....   | 72 |
| Figura 46: Quinta area considerata per la dimostrazione dell'azione della rete di drenaggio sulla concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua lungo le vie preferenziali. Il rettangolo rosso delimita la zona in cui è avvenuto il crollo di un muro a secco .....   | 73 |
| Figura 47: Calcolo dell'indice RPII nella quinta area considerata. Si noti la corrispondenza tra la porzione di muro a secco crollata nel rettangolo rosso e la direzione della concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua lungo le vie preferenziali. Le aree potenzialmente critiche sono evidenziate dai rettangoli bianchi ..... | 74 |
| Figura 48: Azione della rete di scoline e variazione dell'indice RPII .....   | 75 |
| Figura 49: Sesta area considerata per la dimostrazione dell'azione della rete di drenaggio sulla concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua lungo le vie preferenziali.....  | 76 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 50: Calcolo dell'indice RPII nella sesta area considerata. Le aree potenzialmente critiche sono evidenziate dai rettangoli bianchi ..... | 77 |
| Figura 51: Azione della rete di scoline e variazione dell'indice RPII .....   | 78 |
| Figura 52: Canaletta in legno dotata di ferri distanziatori ad omega rovesciato (Fonte: Bortoli 1982).....                                      | 80 |
| Figura 53: Canaletta in metallo (Fonte: Bortoli 1982) .....   | 80 |
| Figura 54: Canaletta in tronchetti (Fonte: Bortoli 2001).....   | 81 |
| Figura 55: Canaletta in legname e fondo cementizio (Fonte: Bischetti 2005).....   | 81 |
| Figura 56: Canaletta in calcestruzzo (Fonte: Bortoli 2001) .....  | 82 |

## **Indice delle tabelle**

|   |    |
|---|----|
| Tabella 1: Parametri relativi ai due rilievi effettuati.....              | 47 |
| Tabella 2: Errori medi relativi ai rilievi delle due aree di studio ..... | 51 |



# 1 Introduzione

## 1.1 I terrazzi agricoli

L'agricoltura nacque circa 11.500 anni fa e permise agli uomini di formare comunità stanziali dalle quali si sarebbero sviluppati villaggi e successivamente centri abitativi sempre più grandi (Giusti 1996). La necessità di cibo spinse l'uomo a reclamare terra coltivabile. Nel passato la morfologia del territorio montuoso e collinare ostacolava la coltivazione del terreno. Le comunità locali iniziarono così a modellare il territorio con l'obiettivo di creare piani di coltivazione, facilitandone il lavoro e l'irrigazione (Tarolli, Preti e Romano 2014; Silei 2014). Il risultato fu la realizzazione dei primi terrazzamenti. Essi sono diffusi in tutto il mondo e sono differenziati dalle modalità di costruzione e dai materiali impiegati (Wei et al. 2016). Le diversità sono dovute al clima della zona di realizzazione, alla pendenza del versante, alle proprietà fisico-chimiche del terreno e all'orografia del territorio (Contessa, Tarolli e Romano 2014). Secondo Wei et al. (2016) i terrazzamenti possono essere suddivisi in più gruppi, a seconda della caratteristica presa in esame. Se si considerano i materiali di costruzione, si può fare una distinzione fra terrazzi con alzata in terreno (tipici delle risaie) o terrazzi con alzata in terreno e sassi. In funzione della disponibilità di acqua legata alla posizione geografica del luogo, la classificazione è fra terrazzi delle zone aride e terrazzi delle zone umide. Un altro criterio di distinzione è la presenza o l'assenza del terrapieno. In base al periodo storico di costruzione, i terrazzi sono suddivisi in antichi e moderni. Infine, considerando le coltivazioni presenti sul terrazzamento, questi sono definiti agricoli o di riforestazione. Tuttavia, i terrazzamenti sono accomunati da poche ed essenziali operazioni effettuate durante la loro realizzazione (Martini e Pesce 2014):

- Creazione di un piano di posa per il muro a valle, ottenuto tramite scavo e setaccio del terreno
- Creazione di un secondo piano a monte, sul quale viene realizzato un muro a secco; il materiale di riporto è utilizzato per creare il piano di coltivazione tra il primo e il secondo muro citato

Le operazioni prima descritte vengono ripetute lungo tutto il versante, come si può vedere nella Fig. 1.

### *Schema di realizzazione del terrazzamento*



Stato iniziale con stratificazione naturale



Preparazione del piano di posa del muro a valle



Costruzione del muro e scavo a monte per il successivo



Il terreno di scavo è utilizzato come riempimento per il terrazzamento



Il procedimento è ripetuto per il resto del versante



Esempio di versante completamente terrazzato

*Figura 1: Modalità di realizzazione dei terrazzamenti (Fonte: Martini e Pesce 2014)*

Oltre alla realizzazione di piani di coltivazione, i terrazzi agricoli svolgono altre funzioni utili per la gestione del territorio: stabilizzazione del versante, prevenzione dell'erosione di terreno dovuta allo scorrimento superficiale, favoreggiamento dello sgrondo delle acque meteoriche, mantenimento dell'umidità del terreno e incremento dell'assorbimento e dello stoccaggio di acqua. Inoltre l'attività delle radici delle piante coltivate, favorisce lo sgretolamento della roccia primaria con la conseguente formazione di nuova terra. Le pietre che compongono i muri sono collettori di rugiada e

vettori di calore, gli anfratti naturali che si creano fra i sassi sono ospiti di insetti utili per l'agricoltura (Tarolli, Preti e Romano 2014; Sangiorgi 2007; Grove et al. 2002; Košulič, Michalko e Hula 2014; van Wesemael et al. 1998; K. K. Gachene et al. 1997; Wei et al. 2016; Yuan, Fengmin e Puhai 2003; Arnáez et al. 2015; Chen, Wei e Chen 2017; Hammad, Haugen e Børresen 2004; Teodoro Lasanta, Errea e Nadal-Romero 2017).

Come si può notare in Fig. 2, Sangiorgi (2007) descrive il terrazzamento come l'insieme di più parti:

- Fondazione: base sulla quale poggia l'intero muro. Di norma è preferibile che essa sia roccia primaria, per far sì che il muro sia meno soggetto a fenomeni erosivi dovuti all'azione dell'acqua. Nel caso in cui non si possa erigere un muro a secco su della roccia primaria, si opta per l'utilizzo di grossi massi (più larghi del muro) posizionati sotto il livello del piano di coltivazione.
- Paramento murario o alzata: è il muro a secco posto a vista; è realizzato con materiali prelevati durante la spietatura del terreno. Ha caratteristiche diverse (conformazione, disposizione delle pietre, altezza, lunghezza) in funzione del luogo in cui viene realizzato.
- Coronamento: è la parte superiore del muro a secco, a livello del piano di campagna.
- Piano di coltivazione: è la parte pianeggiante, costituita dal terreno di riporto spietrato, sulla quale si coltiva. Di norma è leggermente inclinata a monte per favorire lo sgrondo dell'acqua nelle canalette.
- Scoline: non sono presenti in tutti i terrazzamenti; favoriscono l'allontanamento delle acque superficiali. Di norma sono dei semplici solchi inclinati, posti alla base del muro a secco.
- Materiale drenante: si trova tra il muro a secco e la terra del piano di coltivazione. È composto da ghiaia e sassi di piccole dimensioni. La funzione è quella di realizzare uno strato verticale che favorisca il drenaggio.

- Corsi: sono gli strati orizzontali di pietre che vanno a costituire il muro e comprendono sia gli elementi del paramento murario che quelli dello strato drenante.
- Giunto: “interfaccia di separazione di due elementi litici. Si intendono divisi in orizzontali e verticali in base alla loro giacitura”.

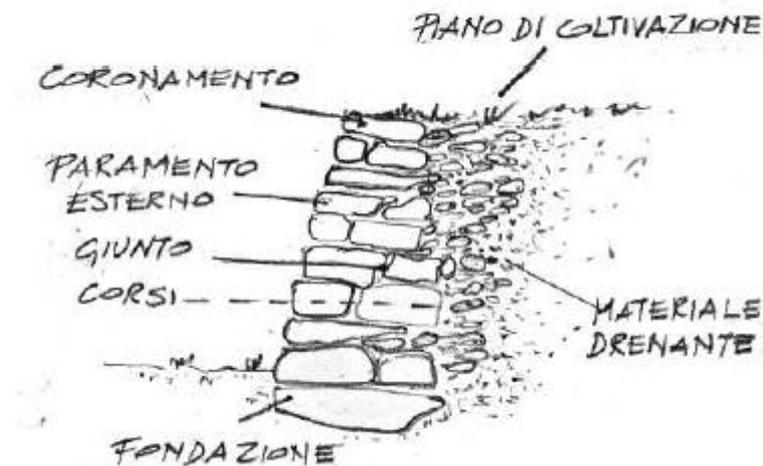


Figura 2: Parti che compongono il terrazzamento (Fonte: Sangiorgi 2007)

La pratica e la costruzione di queste opere risale addirittura a 5000 anni fa, stima ottenuta grazie alle tracce trovate in Palestina e Yemen (Barker et al. 1999; Hammad, Haugen e Børresen 2004). La realizzazione di terrazzamenti si è poi diffusa da queste zone in tutte le regioni semiaride del Mediterraneo ; per quel che riguarda le regioni alpine e le aree submediterranee sono stati rinvenuti terrazzamenti dell’Età del Ferro o precedenti (Dunning e Beach 1994; T Beach et al. 2002; Kuijt, Finlayson e MacKay 2007; Stanchi et al. 2012). Nelle Americhe i terrazzi agricoli erano realizzati e coltivati dalle civiltà Maya e Inca (Londoño, Williams e Hart 2016; Dunning e Beach 1994; Timothy Beach et al. 2002; Timothy Beach e Dunning 1995).

Attualmente la coltivazione su terrazzamenti è diffusa in tutto il mondo, dall’ Oriente (Cina, Thailandia, Giappone, Indonesia), all’Europa (Germania, Francia, Svizzera, Italia, Spagna, Grecia), al Medioriente (Palestina, Yemen, Iraq), al Centro - Sud America (Messico, Perù, Cile). La tipologia di coltura cambia in funzione della latitudine e

altitudine alla quale i manufatti sono realizzati. In Sud America, per esempio, si coltivano patate e mais (Posthumus e Stroosnijder 2010; Wei et al. 2016), mentre in Asia le principali colture sono il riso, il miglio, il grano e il mais (Wei et al. 2016; Tarolli, Preti e Romano 2014). Negli USA si coltivano mais, soia e grano sia in zone con climi semiaridi che in zone con climi umidi (Wei et al. 2016). Nel Medioriente sono presenti terrazzi coltivati a cereali in Libano, a caffè in Yemen e a piante da frutto in Palestina (Wei et al. 2016; Hammad, Haugen e Børresen 2004). In Italia, nella zona delle Cinque Terre, la coltura principale è la vite, mentre sulla costiera amalfitana sono gli agrumi (Tarolli, Preti e Romano 2014). Se si considera la Valtellina (si osservi la Fig. 3), sono sempre i vigneti e i frutteti a dominare il paesaggio terrazzato, così come nella zona del Chianti e del Prosecco.



*Figura 3: Terrazzi coltivati a vite in Valtellina (Fonte: Alberto Campanile, 2014)*

In Austria e in Svizzera sono presenti vigneti terrazzati, così come in Portogallo e in Spagna (quest'ultima caratterizzata anche dalla coltivazione di ulivi) (Wei et al. 2016).

## 1.2 Principali problematiche relative ai muri a secco

I muri a secco sono sottoposti a diverse tipologie di stress ed agenti di degradazione. Secondo Contessa, Tarolli e Romano (2014) le opere subiscono in primis la pressione del terreno che agisce dietro la parete di sassi. I diversi strati di suolo e la roccia madre hanno proprietà chimico-fisiche diverse e, nella zona di contatto, possono generare crolli. L'acqua infatti può essere assorbita in modo differente lungo il profilo e potrebbe fuoriuscire in zone del muro diverse dalla base (Crosta et al., 2003).

Nel caso in cui la pendenza del versante sia elevata, i terrazzamenti possono subire un sovraccarico, dovuto alla presenza di ulteriore terreno sul piano di coltivazione. In tal modo la spinta aumenta e la stabilità dell'opera diminuisce.

L'acqua può esercitare pressione sul muro. Durante un evento piovoso diversi strati di terreno possono saturarsi e, a seconda delle caratteristiche del suolo, della copertura vegetale e dell'intensità della pioggia, si creano diverse forze agenti sugli elementi litici (Crosta, Dal Negro e Frattini 2003; Contessa, Tarolli e Romano 2014; Lesschen, Cammeraat e Nieman 2008). Con una buona gestione delle scoline e dei muri a secco, il danno legato a questo fenomeno può diminuire notevolmente. La copertura vegetale e il buon funzionamento del sistema drenante redistribuisce i flussi che vengono a crearsi, evitando la formazione di canali più grandi (Contessa, Tarolli e Romano 2014; Chen, Wei e Chen 2017; Hammad, Haugen e Børresen 2004).

Secondo Sangiorgi (2007) il muro può incorrere in fenomeni di dissesto, nel caso in cui sia intaccata l'intera costruzione, o di degrado nel caso in cui agenti fisici o biologici abbiano un'azione distruttiva nei confronti degli elementi strutturali.

Le cause possono essere:

- Endogene: legate alla costruzione del muro (p.e. disposizione delle pietre, stabilità delle fondamenta) o alla naturale degradazione del muro dovuta a diversi agenti (Contessa, Tarolli e Romano 2014; Martini e Pesce 2014).
- Esogene: legate ad azioni antropiche, animali o naturali (p.e. eccesso d'acqua) (Sangiorgi 2007; Lesschen, Cammeraat e Nieman 2008).

Per quel che riguarda le cause endogene, l'abilità del costruttore ed i materiali impiegati sono i fattori principalmente coinvolti. La disposizione corretta delle pietre favorisce l'allontanamento dell'acqua in eccesso, indirizzandola nelle canalette scavate ai piedi dei muri. In tal modo si mantengono i manufatti stabili, prevenendone il crollo. Se consideriamo la naturale degradazione degli elementi litici, solo l'occhio dell'agricoltore può notare il danno che si sta verificando e prevederne una riparazione (Martini e Pesce 2014).

Tra le cause esogene possiamo annoverare il passaggio con mezzi agricoli (trattori o altri macchinari) i quali, con il loro peso, aumentano la pressione sulla superficie compattando il terreno. Ripetuti passaggi sul piano di coltivazione possono creare croste sotto-superficiali che inibiscono lo scolo e possono favorire crolli parziali di muri.

Il pascolo sui terrazzamenti è una pratica sconsigliata per la buona manutenzione del sistema terrazzato. Gli animali possono rovinare il piano di coltivazione con la creazione di sentieri (modifica dello scolo idrico) e, pascolando sul bordo dei muri, possono danneggiare i manufatti, comportando un degrado localizzato del coronamento ed un eventuale collasso della parte superiore del muro (Sangiorgi 2007; Martini e Pesce 2014).

L'acqua è il principale fattore di erosione superficiale e sotterranea. In inverno, la continua espansione e ritenzione di questo elemento, esercita diverse forze disaggreganti tra i massi (Sangiorgi 2007; Tarolli, Preti e Romano 2014; Martini e Pesce 2014). Infine la vegetazione, come rampicante o pianta arborea, se non adeguatamente gestita può penetrare con le radici fra le rocce. Nel primo caso le radici che si insinuano tra i massi danneggiano l'aggregazione del profilo portando a crolli localizzati, mentre nel secondo caso se un albero fosse abbattuto, potrebbe far crollare con sé diversi metri di muro (Sangiorgi 2007; Arnáez et al. 2015; Lourenço et al. 2014).

Esistono diversi stadi di deterioramento del muro a secco:

- Degrado localizzato del coronamento: l'azione dello scorrimento superficiale (Contessa, Tarolli e Romano 2014; Martini e Pesce 2014) e della vegetazione che cresce sulla parte superiore del muro, portano al distacco degli elementi litici (Fig. 4). Basta un'ordinaria manutenzione (pulizia della vegetazione e

riposizionamento dei corsi) per poter prevenire l'aggravamento della situazione (Sangiorgi 2007).

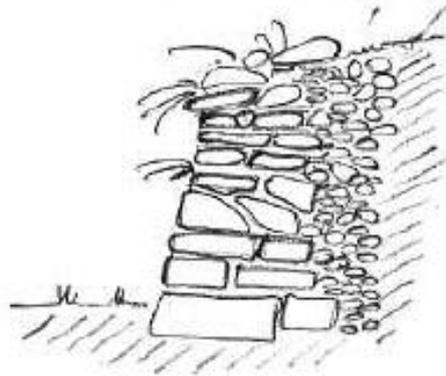


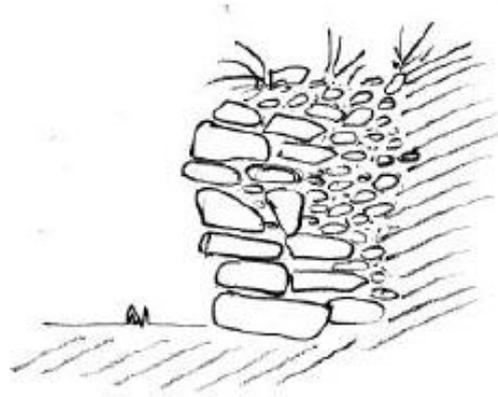
Figura 4: Degrado del coronamento dovuto all'azione della vegetazione o al calpestio del bestiame (Fonte: Sangiorgi 2007)

- Degrado diffuso della parte superiore di muro: in questo caso non è danneggiato solo il coronamento superficiale, ma parte del profilo verticale del muro (Fig. 5). Se il danno citato al punto precedente non viene riparato o prevenuto, può evolvere in questa tipologia di collasso. L'unica riparazione da effettuare in questo caso, è smontare la parte di muro danneggiato e ricostruirla (Sangiorgi 2007).



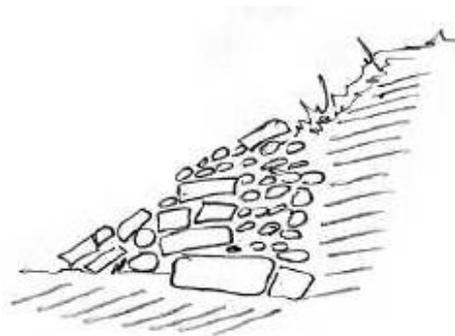
Figura 5: Collasso della parte superiore del muro, dovuta alla scarsa manutenzione del coronamento e alla vegetazione tra le pietre (Fonte: Sangiorgi 2007)

- Spanciamiento del muro: a causa delle spinte dell'acqua e del terreno, gli elementi litici possono slittare gli uni sugli altri, staccandosi dallo strato drenante (Fig. 6). Si formano così delle curvature rispetto alla linea del muro che possono coinvolgere qualsiasi parte del muro (Contessa, Tarolli e Romano 2014; Martini e Pesce 2014). In questo caso si interviene smontando tutta la parte danneggiata e ricostruendola (Sangiorgi 2007).



*Figura 6: Spanciamiento del muro, dovuto alle pressioni esercitate dal terreno e all'azione dell'acqua (Fonte: Sangiorgi 2007)*

- Crollo di porzione di muro: sono dovuti all'incuria o ad eventi piovosi eccezionali (Fig. 7). In questo caso bisogna rimuovere tutti i sassi fino ad arrivare alla parte stabile del manufatto. Successivamente si ricostruisce l'intero profilo danneggiato, connettendolo in maniera corretta con il muro preesistente (Sangiorgi 2007; Martini e Pesce 2014).



*Figura 7: Crollo del muro in seguito alla scarsa manutenzione e alle riparazioni non effettuate (Fonte: Sangiorgi 2007)*

### 1.2.1 Il problema dell'abbandono dei terrazzamenti

Nonostante l'insieme dei terrazzamenti sia una vera e propria eredità culturale, negli anni passati sempre più aree terrazzate sono state abbandonate. Il fenomeno delle migrazioni dalle aree collinari e montuose iniziò nel 19° secolo, durante la Rivoluzione Industriale. Inghilterra, Germania, Svizzera, Nord Italia e Francia assistettero ad un nuovo fenomeno migratorio dalle zone rurali verso le città (Walther 1986).

Le migrazioni continuarono anche dopo gli inizi del 20° secolo e coinvolsero i paesi mediterranei e l'Italia meridionale. Nell'Europa dell'Est, invece, dopo la caduta del muro di Berlino e l'apertura dei mercati alla libera concorrenza, le realtà agricole montane e collinari iniziarono ad essere abbandonate.

Dati raccolti da diverse pubblicazioni (Hostert 2010; Tasser et al. 2007; Taillefumier e Piégay 2003; T. Lasanta 1988; Kuemmerle et al. 2008; Kozak et al. 2004) indicano chiaramente che circa il 20 % delle terre coltivate in Polonia sono colpite dal fenomeno dell'abbandono, così come più del 90 % dei Pirenei spagnoli, il 70 % delle Alpi orientali e il 30 % dei Carpazi. Ciò è dovuto, secondo García-Ruiz & Lana-Renault (2011), Arnáez et al. (2015) e Lourenço et al. (2014) alle seguenti motivazioni:

- Sviluppo della meccanica agricola e impossibilità di utilizzarla su piani di coltivazione stretti
- Scarsa produttività delle aree rurali
- Condizioni di mercato nazionale e internazionale (ridotta competitività delle aziende situate in zone terrazzate, a causa del maggiore impiego di lavoro manuale che comporta un costo più alto di produzione)
- Iniziative dei governi (incentivi economici per la lavorazione di certe colture piuttosto che di altre)

- Effetti della PAC (con l'introduzione del *set-aside*<sup>1</sup>, per ridurre la sovrapproduzione di cereali nell'UE, molti appezzamenti marginali furono abbandonati)
- Effetti della trasformazione del mercato per l'Europa dell'Est, dopo la caduta del muro di Berlino
- Scarsità d'acqua nelle zone semiaride d'Europa (p.e. i Pirenei)
- Costo della manodopera per mantenere i muri a secco e i terrazzamenti in generale

Sempre secondo García-Ruiz & Lana-Renault (2011), gli aspetti prima citati legati all'abbandono delle zone rurali, hanno effetti in termini di:

- Idraulica del suolo
- Generazione dello scorrimento superficiale
- Estensione dell'area colpita dallo scorrimento superficiale
- Provenienza dei sedimenti
- Erosione del suolo
- Modifica dei canali fluviali

Secondo Stanchi et al. (2012), i crolli dei muri a secco iniziano dopo circa 12 – 15 anni dall'abbandono e comportano uno spostamento di massa (rocce e terreno) che destabilizza il versante, come illustrato nella Fig. 8 e nella Fig. 9.

---

<sup>1</sup> Il *set-aside*, che in inglese significa "mettere da parte", era un intervento programmato dalla CEE (Comunità Economica Europea) all'interno della PAC (Politica Agricola Comune). Era stato introdotto con il Reg. 1272/88 e prevedeva l'istituzione di aiuti economici per incentivare gli agricoltori a ritirare i seminativi dalla produzione. Le superfici "ritirate" dalla produzione erano mantenute incolte per periodi più o meno lunghi, con l'obiettivo di diminuire i quantitativi di materie prime COP (Cerealicole Oleo Proteaginose) presenti sul mercato europeo. In tal modo si prevedeva che i prezzi delle colture COP sarebbero aumentati dopo una o due annate agrarie (Reg. CEE 1272/88 1988).



*Figura 8: Porzione di muro a secco crollata in un terrazzamento abbandonato e prossimo al recupero presso l'azienda agricola Scraleca*



*Figura 9: Porzione di muro a secco crollata in un terrazzamento abbandonato e prossimo al recupero presso l'azienda agricola Scraleca*

L'acqua inizia a trovare percorsi diversi per defluire, che portano lentamente al collasso dei muri sottostanti (Arnáez et al. 2015). Il sistema drenante diviene in tal modo "naturale" (Lourenço et al. 2014). I canali di nuova formazione divengono trasportatori di sedimenti, poiché l'acqua tende a seguire la linea di massima pendenza per defluire (Gallart, Llorens e Latron 1994), come si può vedere nella Fig. 10.



*Figura 10: Esempio di deflusso naturale dell'acqua in seguito all'abbandono dei terrazzamenti e alla mancata manutenzione delle scoline (Fonte: Lourenço et al. 2014)*

L'assenza di leganti cementizi tra le rocce comporta una perdita di coesione tra di esse, a causa del passare del tempo e dell'azione della vegetazione (Arnáez et al. 2015). Tale perdita di coesione potrebbe condurre al collasso del terrazzo.

Nel caso in cui nel profilo del terreno coltivato siano presenti strati con diverse proprietà chimico – fisiche, la superficie di crollo è situata nella zona del contatto fra di essi (Crosta, Dal Negro e Frattini 2003). Le frane che si possono generare inducono la formazione di flussi di detriti, che potrebbero destabilizzare il profilo della collina o della montagna (Arnáez et al. 2015).

Secondo Rodríguez-Aizpeolea et al. (1991), le perdite di suolo, tramite una simulazione di pioggia su terrazzamenti abbandonati da più di 1, 5, 10 o 50 anni, hanno valori pari a rispettivamente 43, 46 t ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>, 0,20 t ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>, 1,65 t ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup> e 0,18 t ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>. Ciò evidenzia il fatto che nei primi anni l'erosione è consistente a causa dello scorrimento superficiale dell'acqua e della formazione di piccoli canali che col tempo si ingrandiscono. Successivamente, grazie alle specie arboree ed erbacee spontanee che vanno a ricoprire il versante, la perdita di suolo diminuisce. Le piante, tramite la chioma, riducono la forza della pioggia battente e con le radici trattengono il terreno.

Watts (1991) sostiene che la creazione di canali sotterranei sia favorita dalla pressione esercitata sul muro dall'acqua. In tal modo le particelle di terreno del terrazzo si distaccano dalle pietre del manufatto e favoriscono la formazione di un canale che danneggerà il terrazzo. L'autore sostiene inoltre che possano esserci dei canali preesistenti i quali, una volta abbandonata la coltivazione, continuano ad aumentare in diametro grazie all'azione dell'acqua.

Un'azione importante svolta dalle aree terrazzate è la riduzione o interruzione dello scorrimento superficiale. Non è da sottovalutare tuttavia il fatto che, anche in realtà agricole attive di montagna o di collina, le strade interpoderali e le zone di passaggio dei trattori costituiscano punti dove la connessione tra i vari flussi superficiali possa aumentare (Arnáez et al. 2015).

Se si considerano le aree semiaride (p.e. Pirenei spagnoli), dove le precipitazioni annuali sono inferiori a 400 mm/anno e quindi la ricolonizzazione da parte della vegetazione spontanea è difficile, la formazione di croste superficiali e sotto superficiali comporta un'erosione massiccia del suolo (formazione di canali più o meno grandi) (García-Ruiz e Lana-Renault 2011).

### **1.3 Tecniche di monitoraggio e di intervento per la salvaguardia dei terrazzamenti**

L'obiettivo di salvaguardare i terrazzamenti ha assunto negli ultimi anni sempre più rilevanza a livello internazionale. I terrazzi agricoli non sono solamente una pratica per rendere coltivabile il terreno in pendenza, bensì sono considerati un'eredità culturale da preservare.

Tarolli, Preti e Romano (2014) suddividono le pratiche per la manutenzione e la tutela dei terrazzamenti in strutturali e non strutturali. Inoltre annoverano nelle sfide future l'impiego di nuove tecnologie (es. remote sensing) che sono descritte in seguito.

Le pratiche non strutturali comprendono progetti nazionali ed internazionali atti a sensibilizzare le persone sulla tematica dei terrazzamenti ed alla loro tutela come eredità culturale. FAO e UNESCO, organizzazioni che per prime si sono mosse per tutelare i terrazzi, hanno lanciato progetti per aumentare la consapevolezza nelle persone che il sistema "paesaggio terrazzato" va conservato tramite processi che coinvolgano le popolazioni locali (Jane, Cruz e Koohafkan 2009).

Nel 2005 in Italia è nato il progetto ALPTER<sup>2</sup>, cofinanziato dall'Unione Europea, nel quale sono state analizzate otto zone terrazzate in diversi stati. L'obiettivo è stato quello di valutare i rischi e le potenzialità che tali luoghi potevano avere per la presenza dei terrazzamenti. L'incentivazione dell'attività agricola e la promozione di un turismo legato al paesaggio terrazzato erano tra i propositi.

Altri progetti e conferenze internazionali sono tutt'ora presenti e attivi (p.e. Terraced Landscapes World Conference) e cercano di sensibilizzare l'opinione pubblica sul tema della tutela dei terrazzamenti.

I terrazzi agricoli sono un'eredità; solo con misure appropriate si può evitarne l'abbandono, comportamento che implica dissesti idrogeologici e perdita di terra coltivabile in ambiente montano e collinare.

---

<sup>2</sup> Il progetto ALPTER è un progetto della Comunità Europea nato per contrastare l'abbandono delle aree agricole terrazzate nelle regioni alpine. Operando in aree situate lungo tutto l'arco alpino, il progetto intende raccogliere una base di conoscenza territoriale, sviluppare un repertorio di tecniche e infine realizzare interventi pilota di recupero, con il fine di studiare strategie per contrastare l'abbandono. (<http://www.irealp.it>, 2008)

Tra le misure strutturali, sono annoverati diverse pratiche e strumenti per la misurazione delle forze che agiscono sui muri a secco. Il controllo e la gestione dei manufatti da parte dell'agricoltore è fondamentale. L'occhio umano può notare principi di crollo, dissesti della struttura e crescita di vegetazione indesiderata. Di norma è bene riparare subito piccoli danni presenti, prima che si aggravino e compromettano il profilo del muro. La vegetazione tra le pietre va sempre rimossa per evitare che crescendo, eserciti pressioni all'interno della struttura e la faccia collassare pian piano. Il sistema idrico (canalette e canali più grandi) va mantenuto e controllato, per evitare che l'acqua inizi a scorrere al di fuori di esso portando a fenomeni erosivi (Lourenço et al. 2014).

Oltre ai normali controlli che può effettuare l'uomo, esistono anche strumenti che possono aiutare a prevenire crolli, permettendo di intervenire prima che avvenga il collasso. Secondo Tarolli, Romano e Contessa (2014), la prima operazione da eseguire è registrare dati pluviometrici annuali tramite l'installazione di un pluviometro. Successivamente è possibile iniziare a valutare le caratteristiche idrauliche del terreno. La permeabilità del terreno è una di queste ed è possibile misurarla tramite l'infiltrometro. Tale strumento è costituito da due anelli concentrici di diametro ed altezza correlati fra loro, i quali vengono fissati nel terreno senza alterarne il profilo. L'anello esterno serve per controllare il deflusso laterale dell'acqua, mentre quello interno serve per calcolare l'infiltrazione. Si fornisce acqua con una portata costante e si può calcolare la conduttività idraulica quando l'infiltrazione nell'anello interno è costante. Dopo aver stimato i valori di infiltrazione, grazie ai quali si possono studiare interventi atti a deviare opportunamente le acque meteoriche, si possono applicare, tra il muro e il terreno, delle celle di pressione. Il lato che registra i dati è posizionato verso il terreno e, tramite la presenza di un cavo elettrico, si possono scaricare i valori registrati. I dati ricavati ci permettono di capire a che tipologia di stress sono sottoposti i manufatti e di intervenire dove è necessario.

Per stimare il quantitativo di acqua presente nel terreno e quindi la pressione esercitata da essa, si utilizzano i sensori capacitivi. Tali strumenti permettono di calcolare in percentuale (metro cubo di acqua per metro cubo di terreno) la saturazione del suolo tramite la permittività elettrica di quest'ultimo. Maggiore è il contenuto in acqua, maggiore sarà la costante dielettrica del terreno.

Un altro strumento utilizzato per la misurazione della pressione esercitata dall'acqua è il piezometro.

Tra i sistemi utilizzati per la raccolta di dati che evitano il contatto con il terrazzamento, c'è il telerilevamento. Questo metodo include tutti quei rilevamenti effettuati utilizzando mezzi aerei e non, che si avvalgono dell'utilizzo di segnali propagati per ottenere informazioni dal territorio. I segnali possono essere emessi dal soggetto che si vuole analizzare e rilevati in maniera passiva (p.e. luce, calore; nel metodo fotogrammetrico si imprime nelle fotografie la luce emessa dall'oggetto), o dal mezzo che analizza (raggi infrarossi, laser, onde elettromagnetiche) e in questo caso il rilievo è attivo. I veicoli utilizzati per il rilevamento dei dati attivo sono solitamente degli aerei come si può vedere nella Fig. 11 (sistema LiDAR, *Light Detection And Ranging* e sistema IfSar, *Interferometric Synthetic Aperture Radar*), oppure sono degli scanner dotati di treppiede appoggiati al terreno (*Terrestrial Laser Scanner*).

Tutti i rilievi effettuati devono essere georeferenziati, quindi i sistemi prima citati non possono prescindere dall'utilizzo del GPS.



Figura 11: Sistema LIDAR aereo (Fonte: Abed e Mcgough 2017)

Oltre all'uso di aerei per la rilevazione di dati, durante l'ultimo decennio si è sempre più affermato l'utilizzo di UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*), tra cui i droni. Tramite questi mezzi si possono eseguire rilievi raggiungendo ottimi risultati (si veda il Cap. 2.5).

I dati rilevati tramite dei programmi di elaborazione, permettono di ottenere i DEM (*Digital Elevation Model*), che vengono poi processati con GIS (*Geographic Information*

*System*). Tale sistema permette di lavorare con elementi di tipo geografico, il suo utilizzo è cresciuto notevolmente negli ultimi anni. Per questo motivo è necessario che i rilievi eseguiti con UAV, aerei pilotati o TLS siano accurati e rappresentativi della realtà. In tal modo si ottengono DEM georeferenziati e dotati di quota e coordinate (per ogni pixel). Dai DEM si possono ottenere dei modelli tridimensionali sui quali si può lavorare valutando la stabilità dei pendii, l'evoluzione morfologica e il rischio idrogeologico di determinate zone (Tarolli 2014).

Tale procedimento permette di stimare in quali zone dei terrazzamenti l'azione dell'acqua potrebbe comportare crolli dei muri a secco o eccessiva erosione (Tarolli, Preti e Romano 2014). Inoltre, tramite l'elaborazione del rilievo, si può anche prevenire un evento franoso, pianificando la realizzazione di scoline o di rinforzi per i muri.

L'utilizzo della tecnologia può aiutare molto gli agricoltori nella gestione dei loro appezzamenti terrazzati e consente così di implementare l'azione di salvaguardia di questo patrimonio culturale.

## 1.4 Obiettivi della tesi

Negli ultimi 60 anni la concatenazione di diversi eventi e motivazioni, ha comportato, in molti paesi europei, un esodo rurale con conseguente abbandono delle terre coltivate in montagna e collina. Gli abitanti di queste zone si sono trasferiti nelle città, dove l'economia legata alle industrie generava e genera tutt'oggi posti di lavoro garantendo un salario. I terrazzamenti, tipici dell'agricoltura praticata in montagna, sono stati lentamente ricoperti da vegetazione spontanea e, in assenza di manutenzione, sono collassati compromettendo la stabilità dei versanti.

In Valle Camonica, specialmente negli anni 60 del 1900, il "Boom economico" fece nascere molte attività industriali (in particolar modo siderurgiche) che richiamarono comunità sempre crescenti di lavoratori dalle montagne verso il fondovalle. L'abbandono dei versanti terrazzati fu una conseguenza quasi naturale e, anche in questo caso, si è assistito al rimboschimento di molte aree prima coltivate.

Negli ultimi vent'anni fortunatamente si è assistito al recupero di terrazzamenti grazie alla rinascita del settore vitivinicolo nella valle. Piccole e medie aziende hanno iniziato un importante lavoro di tutela e di conservazione dei muri a secco per poter coltivare la vite.

L'obiettivo di questa tesi è proporre un modello di prevenzione e tutela dei versanti terrazzati. È stata impiegata la tecnica fotogrammetrica *Structure from Motion* (SfM) applicata a seguito di un rilievo con drone e poi i dati sono stati elaborati in ambiente GIS. L'obiettivo è fornire agli agricoltori preziose informazioni inerenti le direzioni di deflusso superficiale durante un evento meteorico. In tal modo essi potrebbero adottare delle misure per ridurre l'erosione superficiale e prevenire quindi collassi di muri a causa dell'azione dell'acqua.

Le aree considerate per questo studio sono situate nei comuni di Darfo Boario Terme e di Malegno (provincia di Brescia). L'area situata nel comune di Darfo Boario Terme (3 ha circa) è parte dell'azienda agricola Scraleca nella quale, dai primi anni del 1990, i fratelli Tedeschi stanno eseguendo un eccellente lavoro di recupero e mantenimento dei muri a secco. Per quel che riguarda l'area situata a Malegno (7000 m<sup>2</sup> circa) il Comune, la Comunità Montana di Valle Camonica e il Consorzio Forestale Pizzo Camino di Borno

hanno disboscato e ripulito dalla vegetazione dei vecchi terrazzamenti abbandonati per renderli coltivabili.

Nello specifico gli obiettivi di questa tesi sono:

- Creare i DEMs (*Digital Elevation Models*) delle aree di studio, utilizzando il metodo fotogrammetrico *Structure from Motion* (SfM), applicato a seguito di un rilievo con drone.
- calcolare il deflusso superficiale dell'acqua ed individuare le aree con maggiore propensione all'erosione, tramite l'indice morfometrico RPII (*Relative Path Impact Index*)
- realizzare sistemi di drenaggio che possano prevenire crolli parziali di muri o di interi terrazzamenti

Grazie ai tre passaggi prima citati, si vuole proporre, un modello che faciliti l'attività agricola in zone terrazzate e che permetta di tutelare i muri a secco, patrimonio storico e culturale dell'umanità.

## 2 Materiali e metodi

### 2.1 Area di studio

Le aree considerate per questo studio sono situate in Lombardia, più precisamente in provincia di Brescia nella zona della Valle Camonica. I comuni di Darfo Boario Terme e Malegno, evidenziati in giallo nella Fig. 12 sono quelli in cui si localizzano le aree di studio.

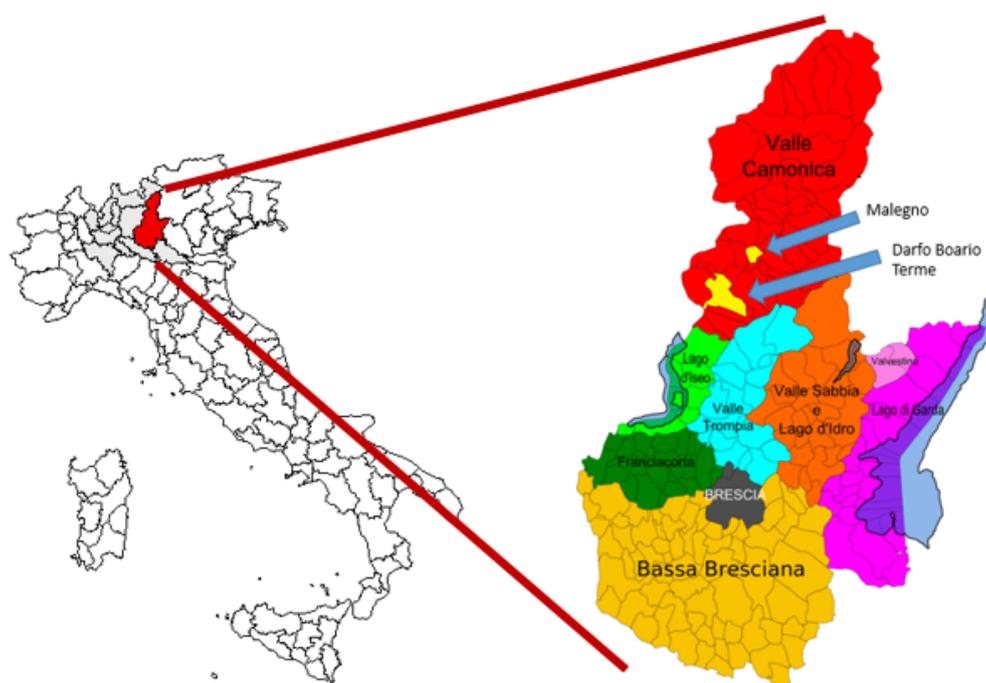


Figura 12: Posizione geografica della Lombardia e della provincia di Brescia (Fonte: Wikipedia)

Per quel che riguarda l'area situata nel comune di Darfo Boario Terme, il rilievo è stato effettuato presso l'Azienda Agricola Scraleca (superficie di circa 3 ha), mentre l'area nel Comune di Malegno comprende dei terrazzamenti di proprietà privata e abbandonati che sono stati disboscati e ripuliti grazie all'azione del Comune, della Comunità Montana e del Consorzio Forestale (superficie di circa 7000 m<sup>2</sup>).

## **2.2 Descrizione della Valle Camonica**

### **2.2.1 Morfologia**

La Valle Camonica è normalmente suddivisa in tre parti: Bassa (da Pisogne fino alla stretta di Breno, 22 km), Media (da Breno fino ad Edolo, lunga 37 km e che descrive una grande “S”) ed Alta (da Edolo fino a Ponte di Legno) (Caraci e Putelli, 1937; Treccani online). È una valle di origine glaciale, caratteristica comune alle vallate alpine e prealpine, racchiusa tra i monti del gruppo dell’Adamello a Est e le prealpi Orobianche a Ovest (Caraci e Putelli, 1937; Treccani online). Nella piana centrale scorre il fiume Oglio da Nord Est verso Sud Ovest. I torrenti laterali che dalle montagne affluiscono verso l’Oglio, hanno generato, con un lavoro millenario, le valli laterali. Esse sono quasi sempre perpendicolari alla valle principale, ma ciò può variare in funzione alla conformazione del territorio.

La caratteristica che denota l’origine glaciale della Valle Camonica è la presenza di pareti rocciose che in molti casi si ergono ripide dal fondo valle. La piana dove scorre il fiume Oglio si restringe sempre più a mano a mano che si sale verso Ponte di Legno, con i versanti montuosi che tendono ad avvicinarsi.

I comuni nei quali giacciono le due aree di studio, sono situati nella Media Valle Camonica, caratterizzata, dal punto di vista geologico, da sedimenti che si sono stratificati nel corso dei millenni dando origine a formazioni calcaree di dolomia e di arenaria (Ghidoni, Gregorini e Ducoli 2013).

### 2.2.2 Principali coltivazioni della Valle Camonica

Fin dal 1600 Giovanni da Lezze, nel suo libro il Catastico Bresciano redatto per il Senato di Venezia tra il 1609 e il 1610, suddivideva i terreni della Valle Camonica in (riportando Da Lezze 1610):

- “Pochi domestici” (“che si arano e seminano e si piantano viti e si falciano due volte l’anno”);
- “Pochi semidomestici” (“quelli che si zappano, e dove il prato si sfalci una sola volta”);
- “Molti salvatici” (“i pascoli, i monti per il pascolo delle bestie d’estate, i boschi di castagni da frutto e da legna”).”

Verso la fine del 1600, Padre Gregorio di Valcamonica, descriveva l’utilizzo dei terrazzamenti come forma di sistemazione del pendio per la coltivazione della vite e per il sostentamento delle famiglie.

Secondo Sangiorgi (2007) la valle, a fine 1800, era divisa in quattro *spartiti*:

- Primo *spartito*: comprendeva la zona che va dall’estremità settentrionale del Sebino fino a Civate Camuno; era caratterizzato dalla coltivazione di viti per produrre del buon vino, di granoturco e frumento che davano granaglie di mediocre qualità, di castagni, alberi da frutto e boschi da taglio;
- Secondo *spartito*: comprendeva la zona che va da Civate Camuno fino a Cedegolo; si coltivava frumento, mais nero, mais giallo e poca segale; erano presenti molti castagni ed alberi da frutto;
- Terzo *spartito*: comprendeva la zona tra Cedegolo ed Edolo; qui si coltivava poco la vite a causa delle condizioni climatiche avverse, mentre c’erano castagni ed alberi da frutto;

- Quarto *spartito*: comprendeva la zona tra Edolo e Ponte di Legno; le condizioni climatiche sempre più avverse, dettate anche dalla sempre minor distanza tra i versanti, permettevano di coltivare solo segale, orzo e frumento.

I pascoli ed i prati erano un'altra forma di mantenimento del territorio, poiché è da secoli che in Valle Camonica si allevano vacche, ovini e caprini (Ghitti, Petrocchi e Chiesa 1989). Dove le pendenze non erano eccessive, erano presenti dei piani di coltivazione lasciati a prato, per poter ottenere del fieno per l'inverno. Negli anni passati, la necessità di sostentamento delle famiglie, ha spinto l'uomo a coltivare. I versanti infatti erano difficilmente lasciati incolti o abbandonati. I nuclei famigliari possedevano più appezzamenti a diverse altitudini con svariate destinazioni d'uso: pascolo, prato, grano saraceno, patata, segale, mais, frumento, vite, piante da frutto e colture orticole. Va sottolineata anche la gestione che una volta veniva fatta nei castagneti. La popolazione locale infatti realizzava delle lunette al piede delle piante per facilitare la raccolta delle castagne e mantenere il terreno fertile vicino alla pianta (Sangiorgi, 2007 ; Caraci e Putelli, 1937, Treccani online).

L'esodo rurale arrivò negli anni '50 del ventesimo secolo con il boom economico e l'avvento del settore siderurgico, che portò alla nascita di diverse aziende nel fondovalle. Il fenomeno dell'abbandono persistette fino agli anni '90, mentre oggi stiamo assistendo fortunatamente ad un ritorno dell'agricoltura in montagna ed in collina.

Secondo i dati della Comunità Montana di Valle Camonica, attualmente la superficie agraria e forestale è pari a 96290 ha, la Superficie Agricola Utilizzata è pari a 36573 ha di cui 200 ha a seminativi, 34473 destinati a prati e pascoli e 1200 destinati a colture arboree permanenti (Putelli, Flocchini e Milani, 2014) .

Il settore vitivinicolo è in espansione, soprattutto dopo la creazione del Consorzio Valcamonica e del disciplinare di produzione IGT nel 2003 (si vedano le immagini relative all'azienda agricola Scraleca, che ha eseguito un eccellente lavoro di recupero e coltivazione di terrazzi abbandonati). Dal 2008 sono 150 gli ha coltivati a vite e, secondo il CERVIM, sono circa 83 gli ha in condizioni di "difficoltà strutturali" (altitudine, forte pendenza, terrazzamenti). Di questi 83, circa 52 ha sono su superfici terrazzate e 13 ha hanno pendenze maggiori del 30% (CERVIM © 2017).

Nella zona di Berzo Demo sono presenti coltivazioni di actinidia ed in Val Savio sono coltivati i lamponi, entrambi su terrazzamenti.

### 2.3 Area di studio di Malegno

Secondo le informazioni disponibili sul Geoportale della Provincia di Brescia (<http://sit.provincia.bs.it>) vengono di seguito descritte le caratteristiche climatiche, geomorfologiche e litologiche dell'area di studio considerata.

I terrazzamenti situati nel comune di Malegno sono stati eretti su rocce calcaree mediamente stratificate, sulle quali erano presenti sedimenti più o meno profondi, utilizzati anch'essi nella realizzazione dei piani di coltivazione (Fig.13)



*Figura 13: Immagine dell'area di studio di Malegno*

La pendenza del terreno è tra il 30 e il 40 %. L'esposizione dell'appezzamento è a Sud e Sud-Est.

Nell'area di studio di Malegno le condizioni climatiche sono classificate come Cfb, cioè clima temperato umido con estate tiepida (Merkel, 2017; Clima Malegno), dove il mese più caldo non supera mediamente i 22°C. La piovosità media annuale assume valori tra i 1300 e i 1400 mm/anno (dati medi rilevati nel periodo

1891-1990 da M. Ceriani e M. Carelli, Direzione Generale Territorio ed Urbanistica U.O. Difesa del Suolo).

La larghezza notevole della piana e la relativa altezza dei monti, fanno sì che il sole illumini e riscaldi i versanti per molte ore durante il giorno. La latitudine del comune però impedisce la coltivazione di piante come l'ulivo (nonostante ultimamente, grazie agli inverni sempre più miti, la pianta si stia spostando sempre più a nord nella valle). In Fig. 14 viene evidenziata la posizione dell'area di studio, localizzata sui monti che circondano il comune di Malegno.

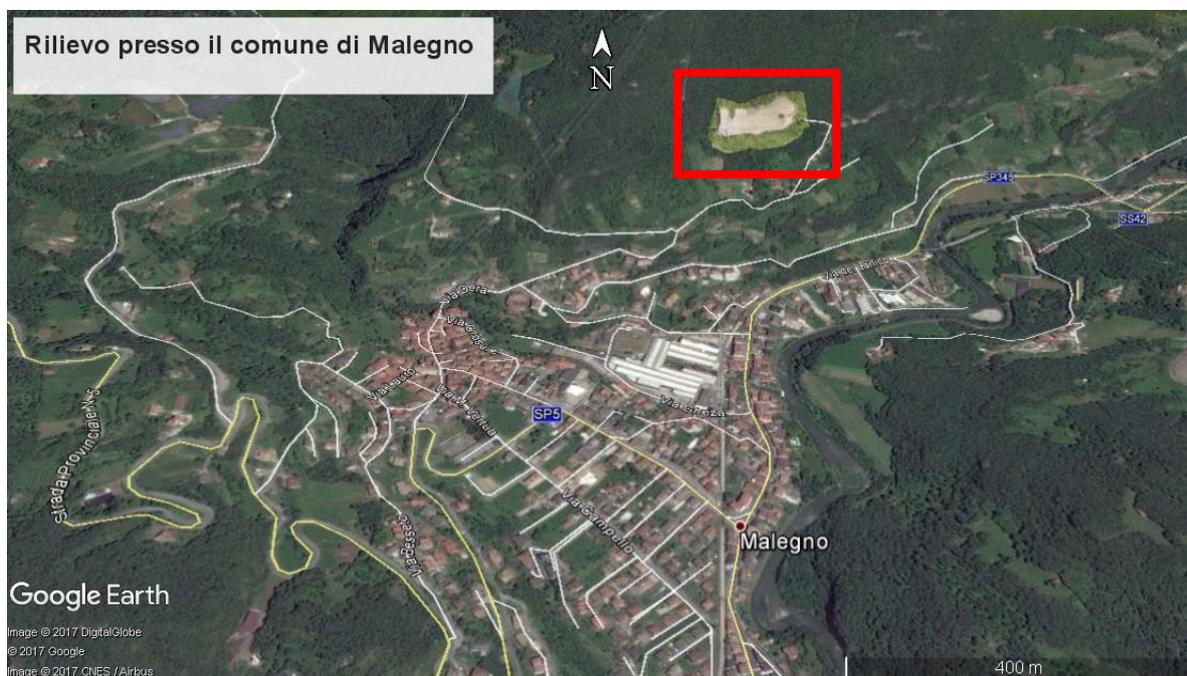


Figura 14: Immagine tratta da Google Earth con l'area del rilievo evidenziata nel riquadro rosso (Fonte: Google Earth)

## 2.4 Area di studio di Darfo Boario Terme

Secondo le informazioni disponibili sul Geoportale della Provincia di Brescia (<http://sit.provincia.bs.it>) vengono di seguito descritte le caratteristiche climatiche, geomorfologie e litologiche dell'area di studio considerata. I terrazzamenti situati nel comune di Darfo Boario Terme, sono stati costruiti sopra affioramenti rocciosi continui

e discontinui di arenaria ed arenaria massiccia ben stratificata, dal tipico colore rossiccio dovuto all'ossidazione degli elementi in essa contenuti. Sono presenti anche dei depositi superficiali dalla profondità variabile dai 30 ai 50 cm che sono stati spostati e riutilizzati con la realizzazione dei manufatti. La pendenza del terreno si aggira tra il 9 e il 50 % fino a punte del 70%, a seconda delle zone dell'appezzamento considerate. L'esposizione dei terreni è a Est, Sud e Sud-Est. Per quel che riguarda il clima, l'area terrazzata di Darfo è posta in buone condizioni di assolazione. Infatti i terrazzamenti sono stati costruiti sui versanti dei monti posti ad ovest rispetto al fiume Oglio, per godere di una migliore esposizione anche d'inverno. Il comune è caratterizzato da un clima definito come Cfa, cioè temperato caldo con estate umida (Merkel, 2017 Clima Darfo Boario Terme), dove il mese più caldo supera la media di 22°C. La piovosità media annua si aggira attorno ai 1200-1400 mm (dati medi rilevati nel periodo 1891-1990 da M. Ceriani e M. Carelli, Direzione Generale Territorio ed Urbanistica U.O. Difesa del Suolo). Il lago Moro, dal canto suo, mitiga l'ambiente circostante, permettendo la coltivazione dell'ulivo. La vicinanza dell'area di studio al lago Moro e la locazione rispetto al comune di Darfo Boario Terme si può evincere in Fig. 15.



Figura 15: Immagine tratta da Google Earth con l'area del rilievo evidenziata nel riquadro rosso (Fonte: Google Earth)

Presso l'azienda agricola Scraleca è stato possibile apprezzare il lavoro svolto dai fratelli Tedeschi i quali, con molte ore di lavoro e passione, hanno recuperato terrazzamenti abbandonati. Il lavoro continua tutt'oggi e, in Fig. 16, si può capire in che modo stiano tutelando il patrimonio storico-culturale dei terrazzi agricoli della Valle Camonica.



*Figura 16: Esempio di terrazzamenti abbandonati (che presto saranno recuperati) presso l'azienda agricola Scraleca (a, b) ed esempi di recupero dei muri a secco effettuati presso l'azienda (c, d)*

## 2.5 Metodologia

### 2.5.1 Il rilievo UAV

Il rilievo presso le aree di Malegno e Darfo Boario Terme è stato eseguito utilizzando un drone o UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) veicolo aereo senza pilota.

Inizialmente i mezzi UAV erano utilizzati in campo militare per sorvegliare, fare ricognizioni e mappare le aree nemiche (Colomina e Molina 2014). Negli ultimi 10-15 anni hanno assunto sempre più rilevanza per applicazioni in campo civile ed agricolo, anche grazie allo sviluppo delle tecniche fotogrammetriche (si veda il Cap. 2.5.2) (Colomina e Molina 2014; Grenzdörffer, Engel e Teichert 2008). Tramite l'applicazione di tecniche fotogrammetriche e UAV, è possibile generare dei modelli tridimensionali (modelli digitali delle elevazioni -*Digital Elevation Models* – DEMs), e delle ortofoto georeferenziate (Fig. 17).



Figura 17: Ortofoto georeferenzata del rilievo effettuato presso Darfo Boario Terme

In agricoltura, modelli 3D e ortofoto possono essere utilizzati per calcolare danni alla vegetazione, registrare eventuali problemi fitosanitari delle colture, calcolare la quantità di biomassa che sta crescendo o per pianificare interventi di agricoltura di precisione

(Nex e Remondino 2014; Grenzdörffer, Engel e Teichert 2008). Nel campo dell'arte e dell'architettura possono essere realizzati modelli 3D di siti archeologici, opere d'arte, edifici, con l'obiettivo di renderli fruibili a quante più persone possibile, conservarli e pianificare interventi per evitarne il danneggiamento (Chou et al. 2010).

Nel caso in cui ci fossero emergenze ambientali come dissesti idrogeologici, valanghe o altre tipologie di problemi, gli UAV potrebbero volare rilevando eventuali persone disperse o dati per calcolare rischi successivi (Chou et al. 2010; Haarbrink e Koers 2006; Molina et al. 2012).

Secondo Nex e Remondino (2014) i mezzi UAV possono essere suddivisi, in funzione del loro sistema di propulsione, in:

- Mezzi senza sistemi di propulsione: palloni aerostatici, aquiloni, alianti;
- Mezzi con sistema di propulsione: dirigibili, alianti con motore, mezzi ad elica elettrici e con motore a scoppio;

Un'altra classificazione proposta da Nex e Remondino (2014) è basata sulle caratteristiche aerodinamiche e fisiche:

- Più leggeri dell'aria: palloni aerostatici, dirigibili;
- Dotati di elica rotante (alimentata ad elettricità o a combustibile): con un solo rotore, quadricottero, con più rotori;
- Dotati di eliche fisse

Per questa tesi, è stato utilizzato un drone MH401, realizzato da Mesodrone srl di Lovere (Fig. 18), del peso di 3 kg e con una velocità di avanzamento di 5m/s. Il mezzo è registrato presso la Zenith - Aerial Solutions (ditta individuale) ed il rilievo è stato effettuato dall'operatore Flavio Angoli. Il volo è stato eseguito ad un'altezza media di 50 m nell'area di Malegno e di 60 m nell'area di Darfo Boario Terme, in modalità manuale in entrambi i casi. A Malegno, tale scelta è stata una decisione obbligata, poiché non si conosceva la locazione precisa né l'entità dell'area disboscata. Nel caso dell'azienda agricola Scraleca l'operatore ha preferito mantenere sempre la modalità manuale, affidandosi alla sua esperienza.

La fotocamera montata sul drone era una Sony RX 100 Mark 3, dotata di una lente Zeiss con lunghezza focale dai 24 ai 70 mm. Lo scatto delle foto è stato gestito completamente dalla macchina, regolando automaticamente il bilanciamento del bianco la ISO, l'apertura del diaframma e dell'otturatore della fotocamera.



*Figura 18: Drone utilizzato per il rilievo*

Prima di effettuare il volo con il drone è stato necessario posizionare dei target, chiamati GCPs (*Ground Control Points*) nelle aree di rilievo. A tale scopo è stata valutata la morfologia (in loco) delle due zone terrazzate, in modo da decidere dove distribuire i targets. Nel caso dell'azienda agricola Scraleca, tramite Google Earth® era stato fatto un sopralluogo virtuale, valutando le possibili posizioni dei GCPs. Una volta in campo, è stata poi definita una mappa specifica, prendendo in considerazione anche la morfologia e l'accessibilità del luogo. Per quel che riguarda l'area di Malegno, dato che l'estensione era inferiore e l'area era priva di vegetazione, la distribuzione dei GCPs è stata decisa sul posto. I GCPs sono stati costruiti con pannelli di compensato di 0,8 m x 0,8 m, forati al centro e suddivisi in quattro quadrati colorati a scacchiera in bianco e nero (Fig. 19).



*Figura 19: Pannello di compensato utilizzato per il rilievo*

I pannelli sono stati fissati al terreno con dei chiodi, in modo da impedirne il movimento. Nell'area di Darfo Boario Terme sono stati distribuiti 16 GCPs, mentre nell'area di Malegno 10.

Successivamente, tramite l'utilizzo della stazione totale Topcon HiPer V dell'azienda neozelandese Synergy Positioning Systems Ltd (Fig. 20 a), il centro dei pannelli è stato rilevato come punto GPS, come si può vedere nella Fig. 20 (b).



*Figura 20: Stazione totale GPS utilizzata per il rilievo (a) e rilevazione delle coordinate al centro dei targets (b)*

Per quanto riguarda il rilievo fotogrammetrico, sono state scattate 981 immagini (712 nel rilievo di Darfo Boario Terme e 269 nel rilievo di Malegno), alla velocità di uno scatto al secondo. La risoluzione delle fotografie è di 5472x3648 pixels. La tabella n.1 elenca brevemente i parametri dei due rilievi effettuati.

*Tabella 1: Parametri relativi ai due rilievi effettuati*

|                                  | <b>Area di studio di Darfo Boario Terme</b> | <b>Area di studio di Malegno</b> |
|----------------------------------|---|----------------------------------|
| <b>Grandezza area</b>            | 3 ha  | 0,7 ha                           |
| <b>N° GCPs</b>                   | 16  | 10                               |
| <b>Tempo di volo</b>             | ~35 minuti                                  | ~15 minuti                       |
| <b>Altezza media di volo</b>     | 60 m  | 50 m                             |
| <b>N° di fotografie scattate</b> | 712   | 269                              |

La scelta delle zone da fotografare e della quantità di immagini da rilevare è stata affidata all'operatore Angoli, in base alla sua esperienza tecnica specifica. Un aspetto importante di cui tener conto durante il rilievo è la sovrapposizione delle fotografie rilevate. Una sovrapposizione pari al 75 % è ritenuta buona e permette di ottenere un modello in 3D del rilievo di buona qualità (Agisoft LLC 2016). La Fig. 21 riporta la posizione delle foto scattate (quadrati blu) per le due aree. Si può vedere come entrambe le zone siano state coperte in maniera completa.

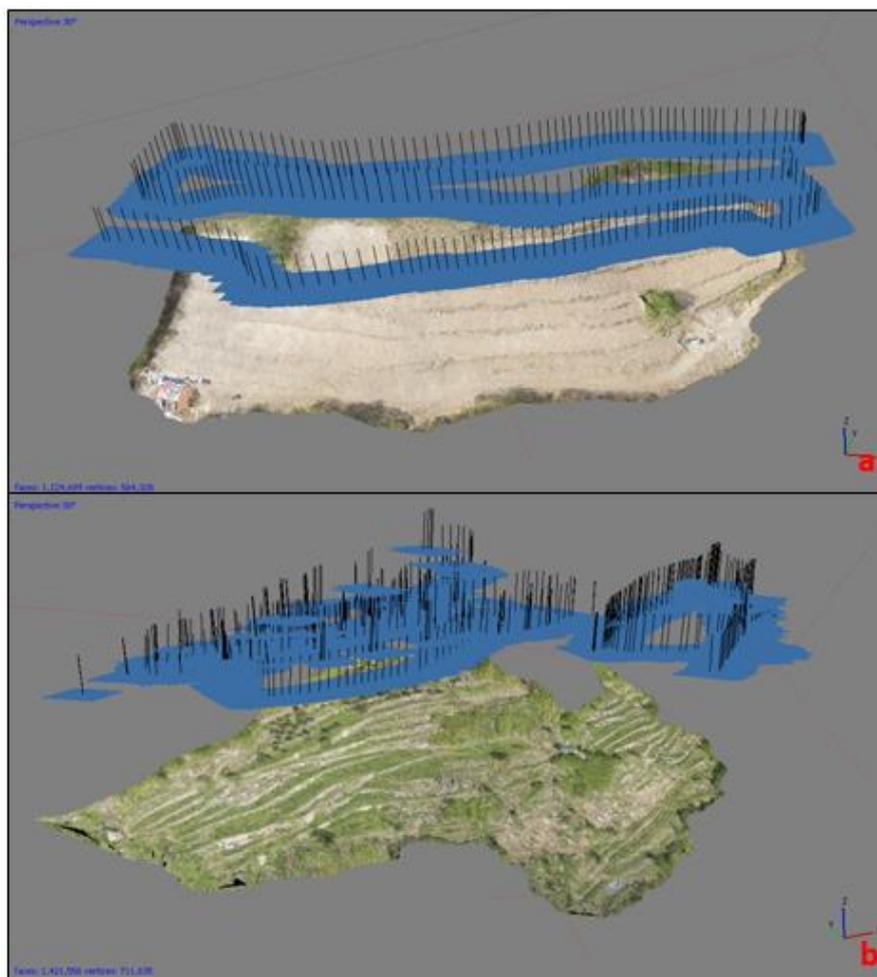


Figura 21: Serie di fotografie scattate presso il rilievo a Malegno (a) e presso il rilievo a Darfo Boario Terme (b)

### 2.5.2 Il metodo SfM (*Structure-From-Motion*) e la creazione del DEM (*Digital Elevation Model*)

Per l'elaborazione delle immagini ottenute durante il rilievo è stato utilizzato il programma Agisoft Photoscan © (sviluppato dalla © 2016 Agisoft LLC), in dotazione presso lo studio di Geomatica del polo universitario di Legnaro. Tale programma esegue l'elaborazione fotogrammetrica di immagini digitali e permette di generare una nuvola di punti tridimensionali dell'area interessata. La tecnica SfM (*Structure-From-Motion*) permette di "ricostruire la forma di oggetti attraverso la collimazione automatica di punti da un insieme di foto. Basata su algoritmi di computer vision, la SfM estrae i punti dalle singole foto, desume i parametri fotografici e incrocia i punti riconoscibili su più

foto, trovando le coordinate nello spazio dei punti stessi.” (MicroGeo © 2016). Tale processo inizia con l'*Image Alignment* (Allineamento dell'immagine), che si basa sull'identificazione e il successivo allineamento di punti chiave (o punti in comune) tra più immagini. Una volta allineate, le immagini sono poi utilizzate per la creazione della *mesh* e della nuvola di punti (Fig. 22).

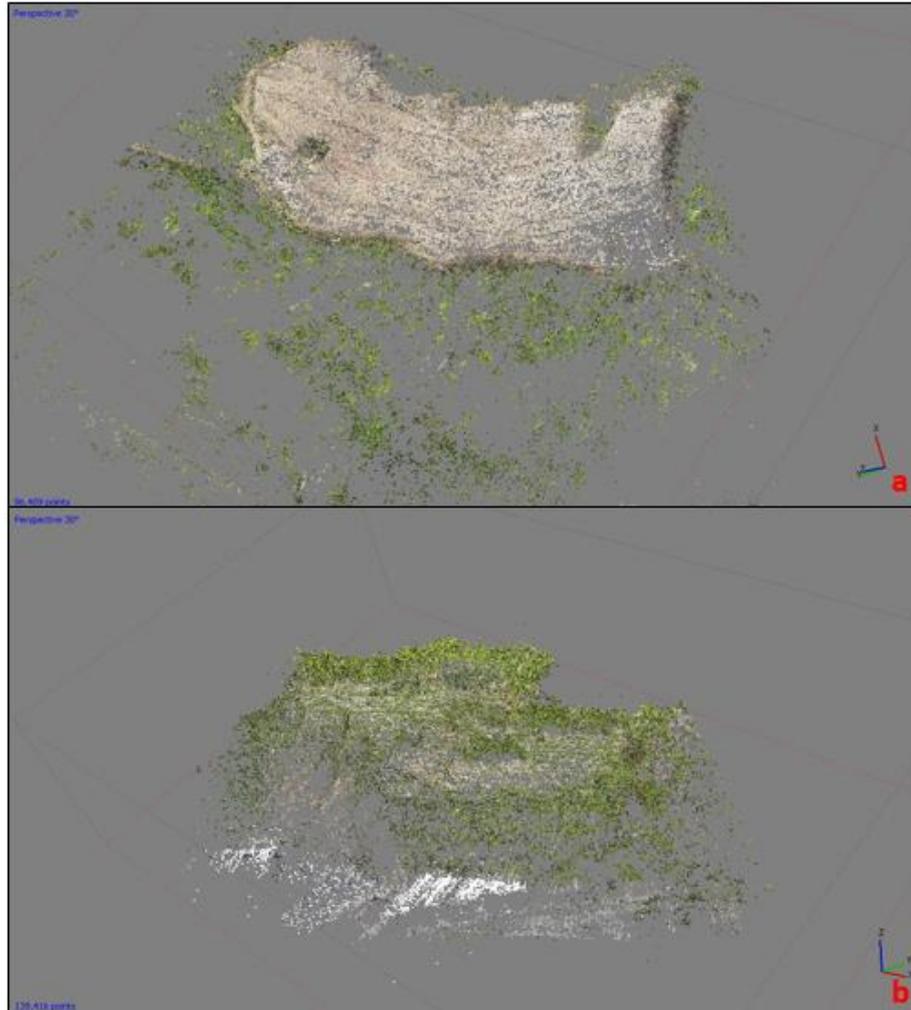


Figura 22: Risultato dell'*Image Alignment* sul rilievo effettuato presso l'area di studio a Malegno (a) e presso l'area di studio a Darfo Boario Terme (b)

Successivamente, tramite le coordinate GPS registrate dalla stazione totale sui GCPs, è stato possibile posizionare dei *markers –contrassegni-* (uno per ogni GCPs, come si può vedere nella Fig. 23), grazie ai quali è stata georeferenziata la nuvola. Agisoft Photoscan © è in grado di stimare la posizione dei markers in automatico, una volta attribuite le coordinate ad almeno due o tre *markers*. Tuttavia, con tale allineamento automatico,

non sempre la posizione dei markers combaciava con il centro dei GCPs, quindi è stato necessario spostarli manualmente controllando ogni fotografia.



Figura 23: Marker posizionato al centro del GCPs

Nella Figura 24 si possono notare i vari markers all'interno della nuvola di punti, rappresentati da bandierine azzurre. L'errore stimato dal programma per quel che riguarda il posizionamento dei *markers* (ovvero l'accuratezza della nuvola di punti) è di  $\pm 0,094040$  m per il rilievo effettuato presso Malegno, e di  $\pm 0,066086$  m per quello effettuato presso l'azienda agricola Scraleca.

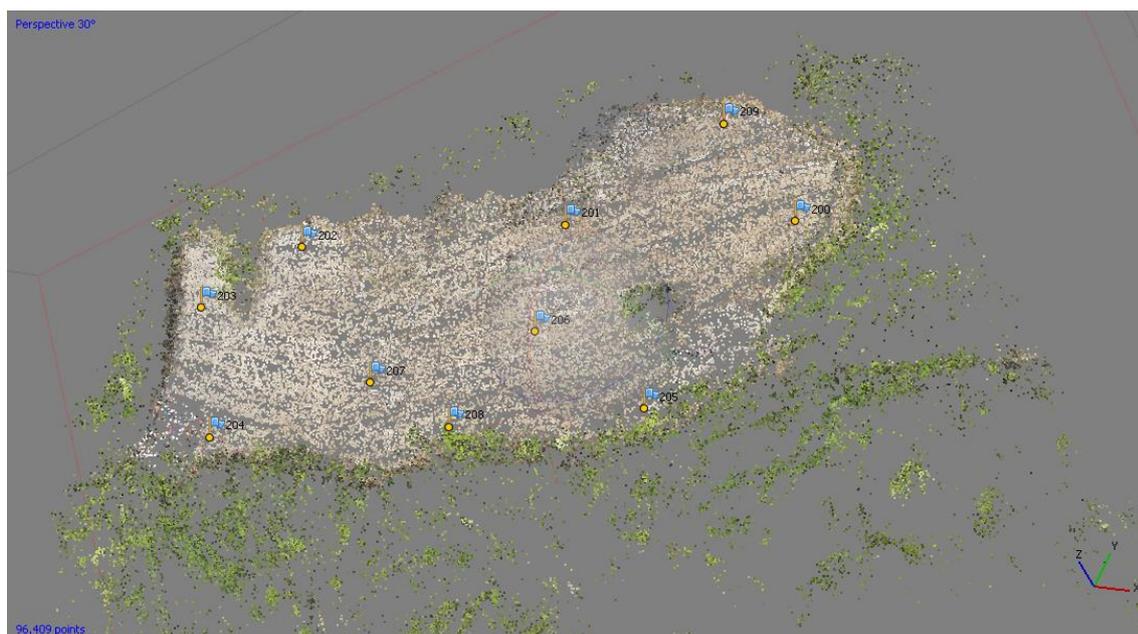


Figura 24: Markers posizionati nella nuvola di punti sparsa del rilievo di Malegno

Una volta terminato il posizionamento dei GCPs al centro dei pannelli fotografati, la nuvola ha assunto delle coordinate x-y-z con il sistema di georeferenziazione WGS UTM 84 zona 32 N (Fig. 25), ottenendo quindi una rappresentazione tridimensionale in scala.

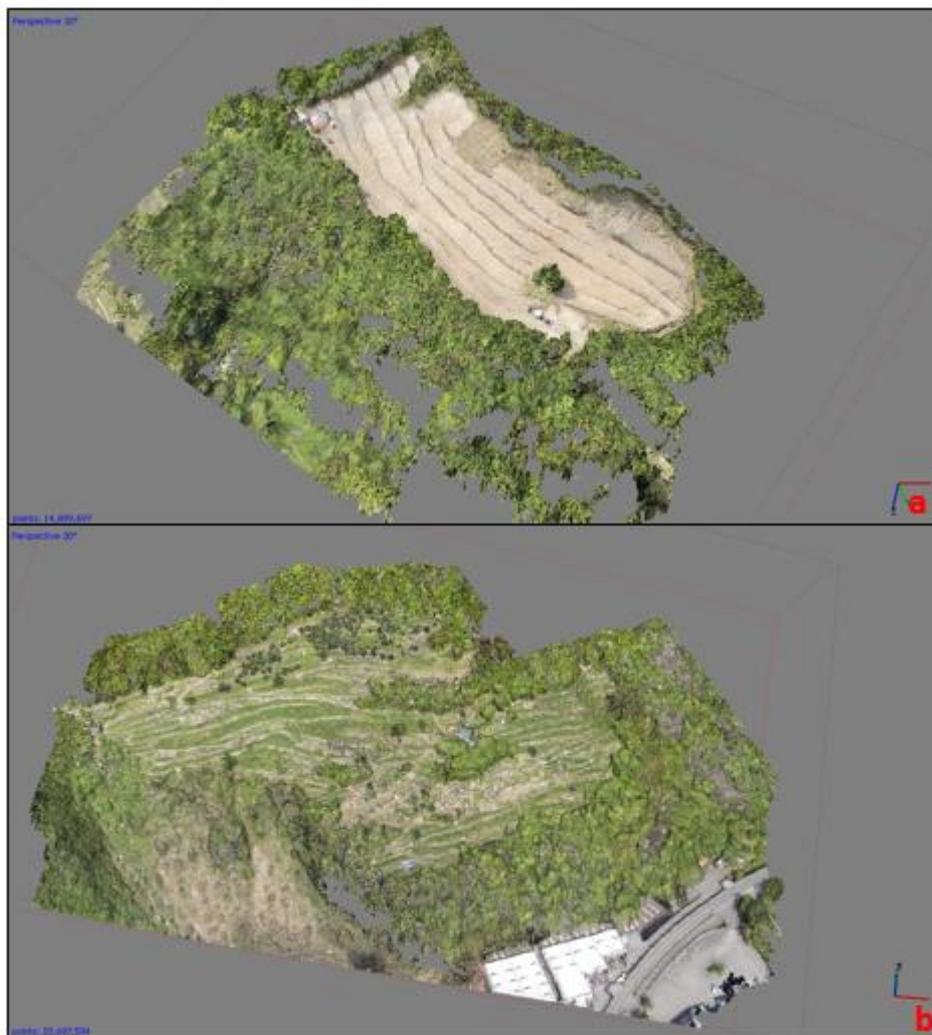


Figura 25: Nuvole dense di punti del rilievo di Malegno (a) e di Darfo Boario Terme (b)

Il programma Agisoft Photoscan © ha anche stimato gli errori relativi (nelle direzioni X, Y, Z) ai due rilievi, come indicato nella tabella n.2.

Tabella 2: Errori medi relativi ai rilievi delle due aree di studio

|                       | <b>Errore X (m)</b> | <b>Errore Y (m)</b> | <b>Errore Z (m)</b> |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Area di studio</b> |                     |                     |                     |
| Malegno               | 0,051495            | 0,044595            | 0,064831            |
| Darfo Boario Terme    | 0,040387            | 0,041975            | 0,031213            |

Prima di realizzare un modello 3D ad alta risoluzione (*mesh*), è stato necessario ripulire le nuvole di punti dei due rilievi utilizzando Agisoft Photoscan® ed il programma CloudCompare (GPL software, versione 2.7). In tal modo è stato possibile rimuovere la vegetazione in eccesso ai margini del rilievo, non necessaria ai fini dell'elaborazione del modello delle elevazioni, e i punti troppo esterni rispetto alla nuvola, come si può vedere nella Fig. 26.



Figura 26: Nuvole dense di punti del rilievo di Malegno (a) e di Darfo Boario Terme (b) "ripulite" dalla vegetazione esterna

Grazie a CloudCompare è stato anche possibile, nel caso del rilievo dell'azienda agricola Scraleca, eliminare la vegetazione presente (ulivi e altri alberi con notevole altezza), pur

non danneggiando il profilo del piano di coltivazione (Fig. 27), in modo da garantire la corretta rappresentazione dei terrazzi.

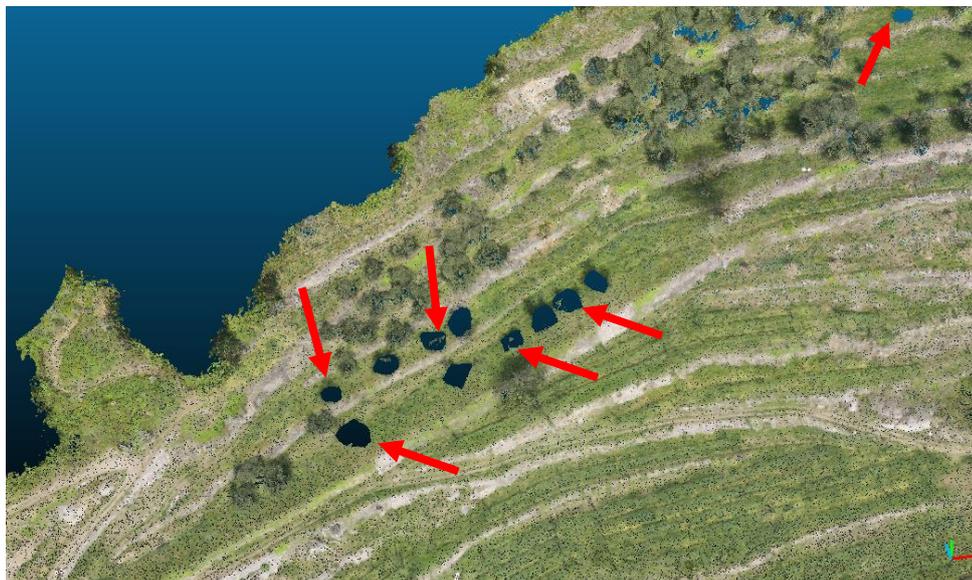


Figura 27: Chiome di ulivo asportate utilizzando CloudCompare

In seguito alla rimozione di punti superflui, le nuvole di punti sono state esportate con l'obiettivo di creare un DEM dei due rilievi. Il risultato è stato soddisfacente e sono stati

ottenuti due DEM con una risoluzione pari a 20 cm/pixel (Fig. 28).

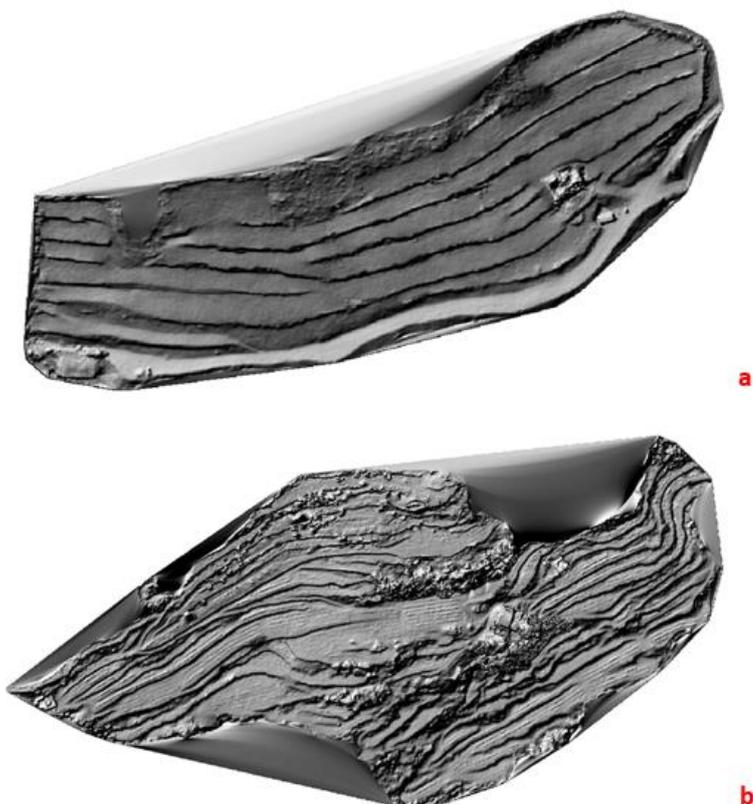


Figura 28: DEMs dei rilievi effettuati a Malegno (a) e a Darfo Boario Terme (b)

### 2.5.3 L'indice *Relative Path Impact Index (RPII)*

Dopo aver ottenuto i due DEM delle aree di studio, è stato calcolato l'indice RPII (*Relative Path Impact Index*) per entrambe. L'RPII permette di quantificare l'influenza dei terrazzamenti sul deflusso superficiale. In forma logaritmica, l'RPII enfatizza e segnala aree dove la presenza di terrazzamenti o strutture antropiche aumenta il possibile accumulo di acqua sulla superficie (Tarolli et al. 2015). La formula dell'indice è la seguente:

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

dove  $A_r$  è l'area contribuyente (ovvero la porzione di territorio estesa fino allo spartiacque che contribuisce alla formazione di deflusso in un punto specifico), calcolata con la presenza di terrazzamenti, mentre  $A_{sm}$  è l'area calcolata da una morfologia priva di strutture antropiche (Tarolli et al. 2015).

Per il calcolo sono stati utilizzati i DEM illustrati precedentemente nella Fig. 28. Per il calcolo di  $A_r$ , sono stati utilizzati i DEM originali, mentre nel caso di  $A_{sm}$  sono stati utilizzati dei DEM "smussati". È stato possibile simulare la superficie smussata tramite l'utilizzo di un polinomio di secondo grado, come proposto da Evans nel 1980

$$Z = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (2)$$

dove  $x$ ,  $y$  e  $Z$  sono le coordinate, mentre, dalla  $a$  alla  $f$ , sono i coefficienti quadratici (Tarolli et al. 2015). I parametri caratteristici vengono calcolati mediante un approccio a "finestra mobile" (Wood 1996) secondo il quale più grande è la finestra di analisi, maggiore è lo smussamento del DEM. Tramite l'utilizzo del programma Landserf, applicando una "finestra mobile" di 71-m, sono stati quindi ottenuti i DEM smussati dei due rilievi, come si può vedere nella Fig. 29.

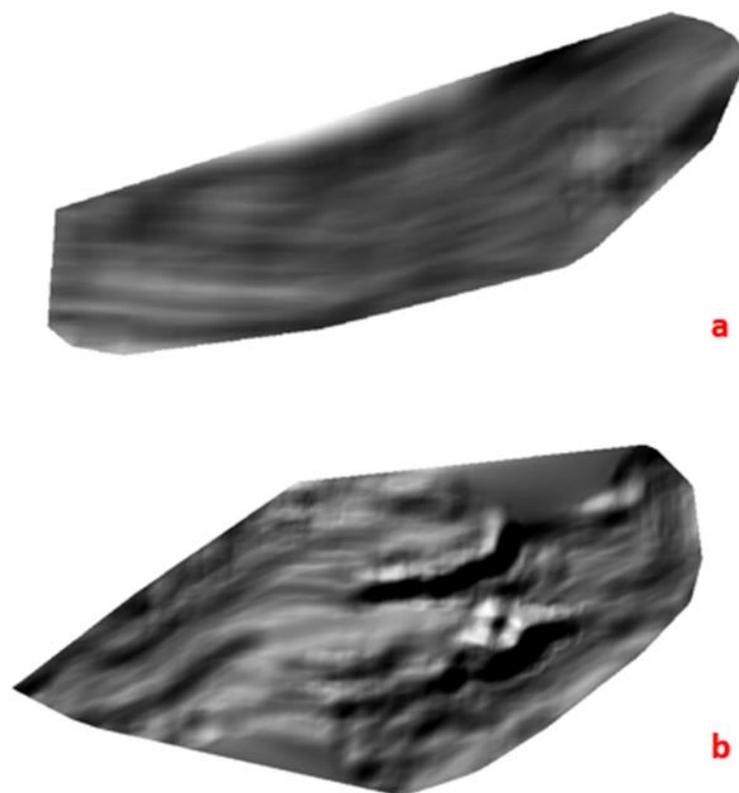


Figura 29: DEMs delle aree di studio di Malegno (a) e di Darfo Boario Terme (b) smussati utilizzando il programma Landserf ed elaborati con il programma ArcGis per ottenere l'effetto "hillshade"

In seguito all'elaborazione dei DEM originali e smussati, con il programma ArcGis<sup>®</sup> è stato possibile applicare l'algoritmo  $D^\infty$  (Tarboton 1997) per il calcolo dell'area drenata. Una volta applicata la formula (1), l'RPII è stato classificato in multipli di deviazione standard ( $\sigma_{RPII}$ ), da  $<-5$  std (*standard deviation*) a  $>4$  std. Maggiore è il valore di RPII, maggiore è la potenziale erosione (Tarolli et al. 2015). Grazie all'indice è stato quindi possibile identificare le aree con maggiori criticità e pianificare interventi per ridurre lo scorrimento superficiale (Fig. 30).

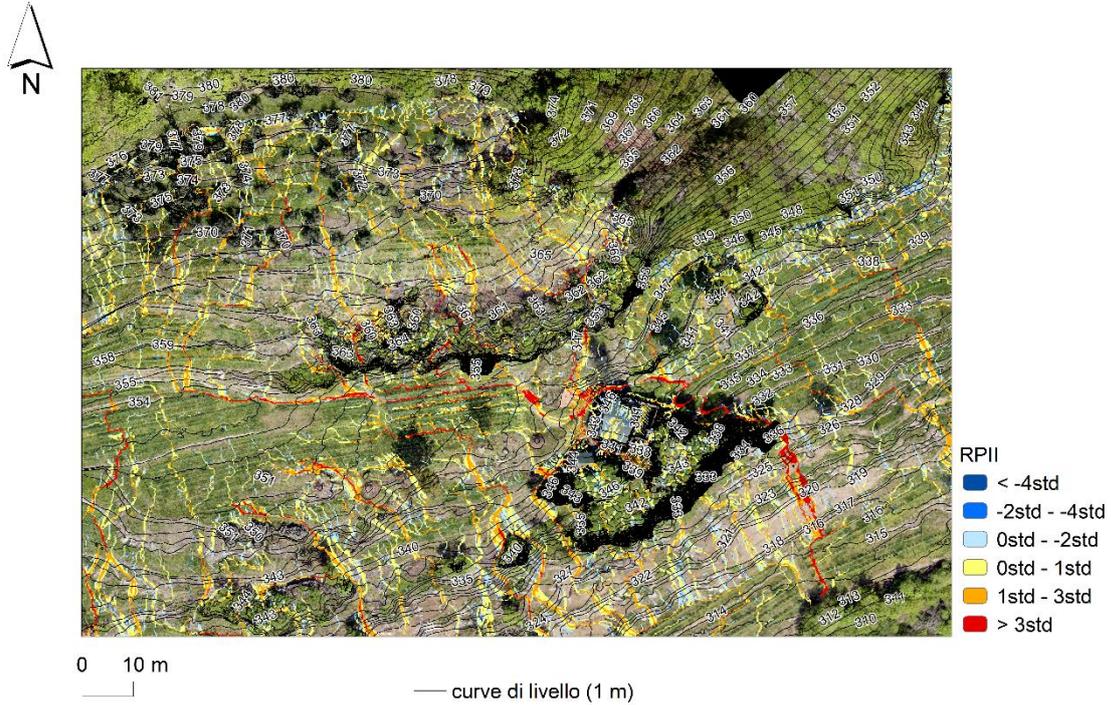


Figura 30: Esempio di mappa classificata di RPII (rilievo di Darfo Boario Terme)

Successivamente sono stati simulati gli interventi di sistemazione dei versanti, progettando sui DEM delle scoline. L'indice RPII è stato quindi ricalcolato al fine di valutare l'azione della rete di drenaggio sulla redistribuzione del deflusso.

## 2.6 Risultati

### 2.6.1 Area di studio di Malegno

Durante il rilievo a Malegno si è notato che i terrazzamenti non erano in buone condizioni, a causa della scarsa manutenzione e della crescita di vegetazione sui piani di coltivazione. L'area era stata ricoperta, fino all'esbosco, da una fitta boscaglia composta prevalentemente da carpini, che aveva destabilizzato i muri a secco.

Le ipotesi avanzate durante l'osservazione della morfologia del luogo sono state confermate dal calcolo dell'RP11. Osservando la Fig. 31 si può notare che l'acqua proveniente dai terrazzamenti e dal bosco posti più in alto, defluisce senza subire l'influenza degli stessi, incanalandosi in certe zone (evidenziate dai rettangoli bianchi) dove l'erosione è maggiore.



Figura 31: Ortofoto dell'area di studio di Malegno, sulla quale è stato calcolato l'indice RP11; le aree potenzialmente critiche sono evidenziate dai rettangoli bianchi

Si ritenuto che l'RPll fosse indicativo poiché basato su un DEM di 0,2 m/pixel, valore considerato ottimale per individuare zone critiche e zone di concentrazione di flussi superficiali secondo Tarolli et al. (2015), Preti et al. (2013), Tarolli et al. (2013). Data l'assenza di vegetazione e il risultato ottenuto dall'indice è stato concluso che in presenza di eventi meteorici anche di media intensità, l'erosione superficiale poteva diventare critica. Dal punto di vista operativo, si è proposto un sistema di drenaggio che riducesse, anche solo in minima parte, la concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua (Fig. 32). In seguito all'osservazione delle direzioni di deflusso sono state disegnate, utilizzando ArcGis®, delle scoline con larghezza 0.4 m ai piedi dei muretti a secco.

Data la mancanza di vegetazione si è pianificata la realizzazione di una rete di drenaggio senza il rischio di danneggiare colture presenti, con scoline collegate fra loro che confluiscono l'acqua in tre acquidocci (due esterni e uno centrale).

La presenza di un vecchio edificio rurale a Sud Est dell'appezzamento comporta la progettazione di scoline che evitano un accumulo di acqua alla base dell'edificio.

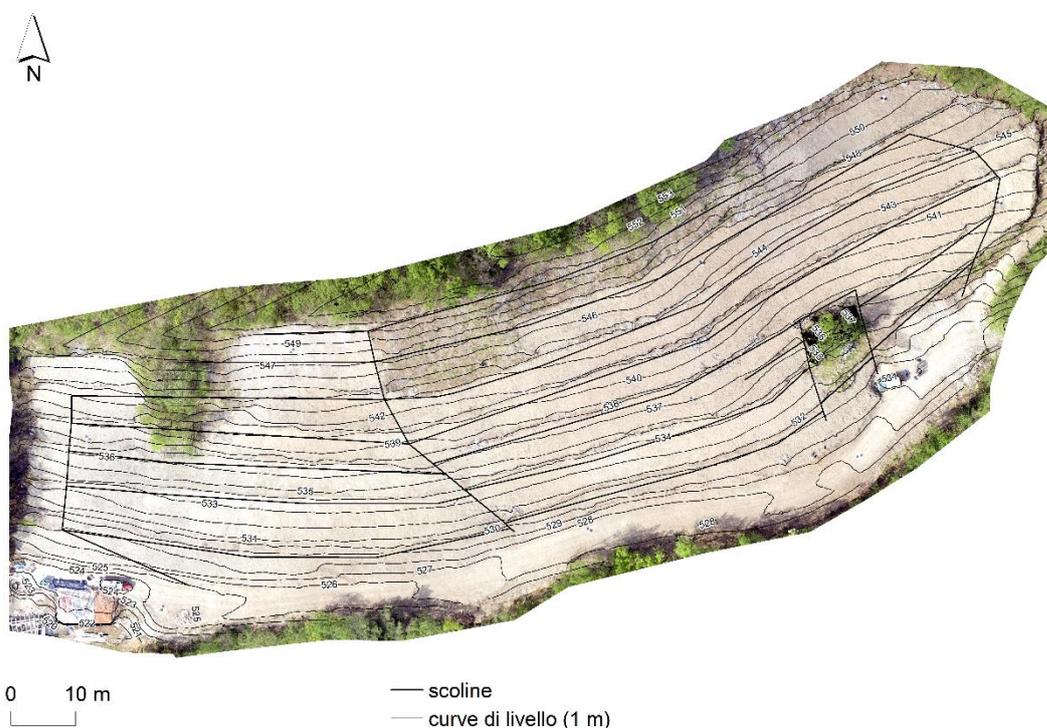


Figura 32: Ortofoto dell'area di studio di Malegno, sulla quale è stata disegnata la rete di drenaggio

Il DEM “smussato”, ottenuto dopo l’elaborazione con il programma Landserf, ha dimensioni inferiori rispetto al DEM ottenuto col metodo fotogrammetrico. Per questo motivo non è possibile disegnare degli scoli sulla strada presente a sud dell’appezzamento.

In Fig. 33 si può notare come l’RPII è cambiato grazie all’attività svolta dalla rete di drenaggio, comportando una diminuzione del deflusso superficiale e quindi dell’erosione. Una soluzione possibile per evitare l’eccessiva erosione può essere quella di progettare il posizionamento di alcuni pozzetti. Bisogna comunque considerare il fatto che, una volta coltivati, i terrazzamenti possono avere una copertura vegetale (che riduce molto l’erosione e lo scorrimento superficiale dell’acqua).

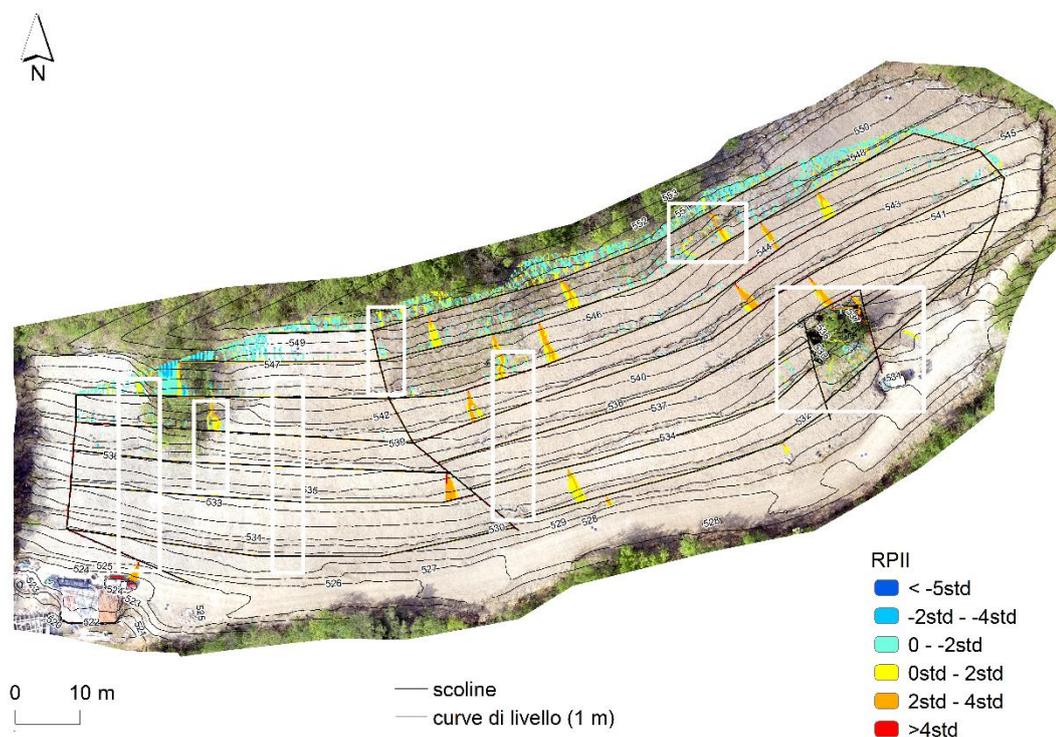


Figura 33: Ortofoto dell’area di studio di Malegno, dove si può notare come l’RPII sia cambiato grazie all’azione della rete di drenaggio

In questa area di studio il primo intervento da realizzare sarebbe quello di ricostruire o riparare, dove possibile, i muri a secco. In tal modo i terrazzamenti potrebbero tutelare

l'appezzamento deviando i flussi superficiali di acqua. In secondo luogo si potrebbero realizzare le scoline ai piedi dei muri, anche tramite uno scavo con dei macchinari, per incrementare l'azione dei terrazzi agricoli.

Tuttavia le misure proposte dovrebbero avere uno sguardo d'insieme. L'agricoltura è una delle principali attività antropiche che causa erosione di suolo e, se non praticata con attenzione, può comportare perdite notevoli di terreno (Van Oost et al. 2006; Tarolli e Sofia 2016). Non bisogna dimenticare che la creazione di una nuova rete di scolo superficiale porterebbe l'acqua dove prima non era mai arrivata naturalmente per circa 40 anni. Inoltre la realizzazione di nuovi muri o di strade d'accesso potrebbero intercettare acque provenienti dallo scorrimento sotterraneo, comportando problemi maggiori rispetto alla situazione iniziale, come evidenziato da Tarolli et al. (2013). La sistemazione dell'area di studio potrebbe risolvere il problema dell'erosione superficiale entro i suoi confini, ma potrebbe provocare dissesti idrogeologici nelle zone limitrofe. L'approccio migliore potrebbe essere quello di eseguire i primi lavori di manutenzione di terrazzi con successivo ricalcolo dell'RPIL ed analizzarne i possibili sviluppi.

## **2.6.2 Area di studio di Darfo Boario Terme**

Nell'area di studio di Darfo Boario Terme era stato subito ipotizzato che la buona manutenzione dei terrazzamenti avrebbe influito su un corretto deflusso superficiale dell'acqua. Calcolando l'RPIL si è avuta la conferma di quanto prima citato, ma sono emerse anche delle criticità, a volte rilevanti, in alcune zone. Secondo Tarolli et al. (2013) e Tarolli e Sofia (2016), le reti stradali realizzate in aree montuose possono influenzare le direzioni dello scorrimento superficiale dell'acqua. Infatti le strade potrebbero intercettare le acque provenienti dai versanti modificati durante la loro realizzazione, fungendo da vere e proprie scoline. Queste considerazioni sono utilizzate in riferimento alle strade interpoderali e di connessione tra i terrazzi agricoli. Infatti nell'area di studio, laddove la larghezza della sede stradale lo permetteva, passavano macchinari (piccoli trattori). Di conseguenza essi hanno provocato assenza di vegetazione e il compattamento del suolo nelle zone di passaggio delle ruote. La combinazione di questi due fattori ha ridotto l'infiltrazione alimentando lo scorrimento superficiale (Tarolli e

Sofia 2016). L'indice RPII non considera i fattori prima citati, ma evidenzia, a causa della morfologia del territorio, come nelle strade interpoderali si concentri il deflusso superficiale. È stata quindi disegnata una rete di drenaggio composta da scoline della larghezza di 0,3 m, andando ad intervenire sia nelle zone maggiormente critiche che nelle zone più a monte dell'appezzamento. L'area in questione ha un'estensione di circa 3 ha ed è quindi difficile, inserendo l'intera ortofoto sulla quale è stato calcolato l'RPII, far capire come la rete di drenaggio abbia modificato l'indice. Il DEM utilizzato per il calcolo dell'indice ha dimensioni dei pixel pari a 0,2 m, valore considerato buono per l'analisi della morfologia del territorio (Tarolli et al. 2013; Preti et al. 2013).

Di seguito sono riportati dettagli relativi a sei zone critiche dell'appezzamento nelle quali viene illustrata l'efficacia delle scoline.

In Fig. 34 è rappresentata la prima area considerata, caratterizzata da strade di connessione tra i terrazzamenti sui quali è stato da poco impiantato un vigneto.



Figura 34: Prima area considerata per la dimostrazione dell'azione della rete di drenaggio sulla concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua lungo le vie preferenziali

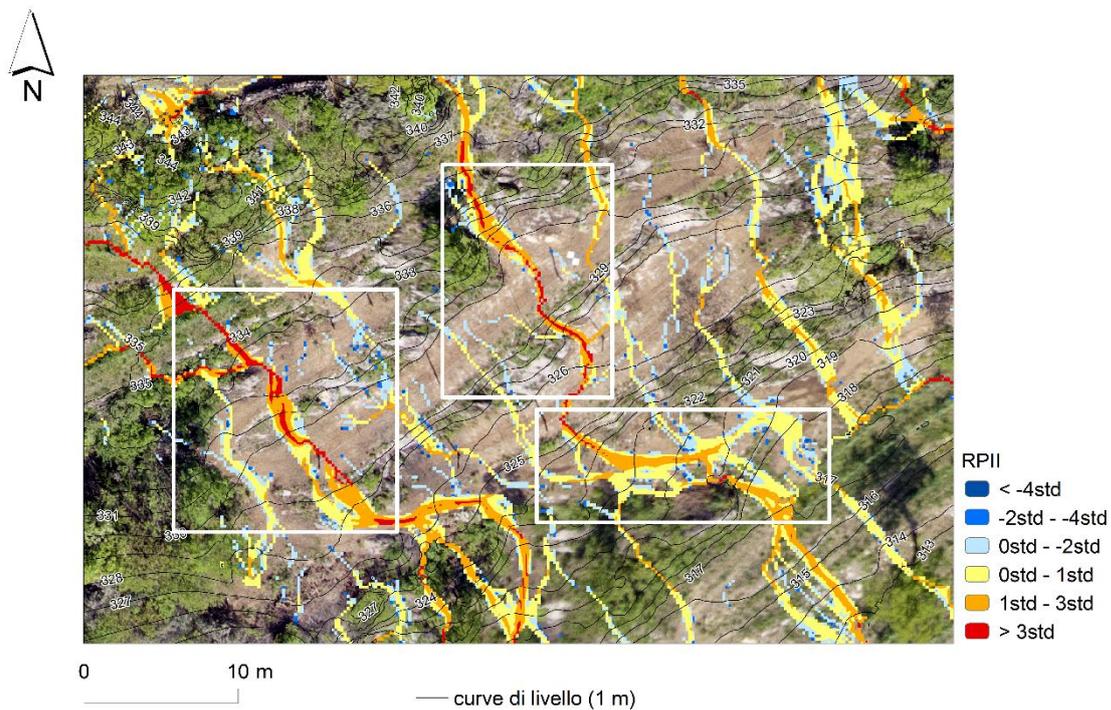


Figura 35: Calcolo dell'indice RPII nella prima area considerata. Le aree potenzialmente critiche sono evidenziate dai rettangoli bianchi

Tramite il calcolo dell'indice RPII è possibile evidenziare come le strade siano delle aree critiche, poiché lungo di esse il deflusso si concentra comportando erosione superficiale (Fig. 35).

L'assenza di copertura vegetale, dovuta alla recente realizzazione del vigneto, aggrava la situazione poiché aumenta l'asportazione di terreno durante un evento meteorico.

In seguito alla creazione di scoline, si può notare come indice RPII vari grazie all'azione della rete di drenaggio (Fig. 36). Il deflusso presente sulle strade di collegamento tra i terrazzamenti è fortemente diminuito. Questo grazie all'azione combinata di scoline ai piedi dei muri a secco soprastanti e scoline poste sulle strade stesse. Le prime modificano le direzioni di deflusso dell'acqua, evitando concentrazione lungo vie preferenziali, mentre le seconde favoriscono il drenaggio prevenendo smottamenti o la creazione di nuove vie di deflusso.

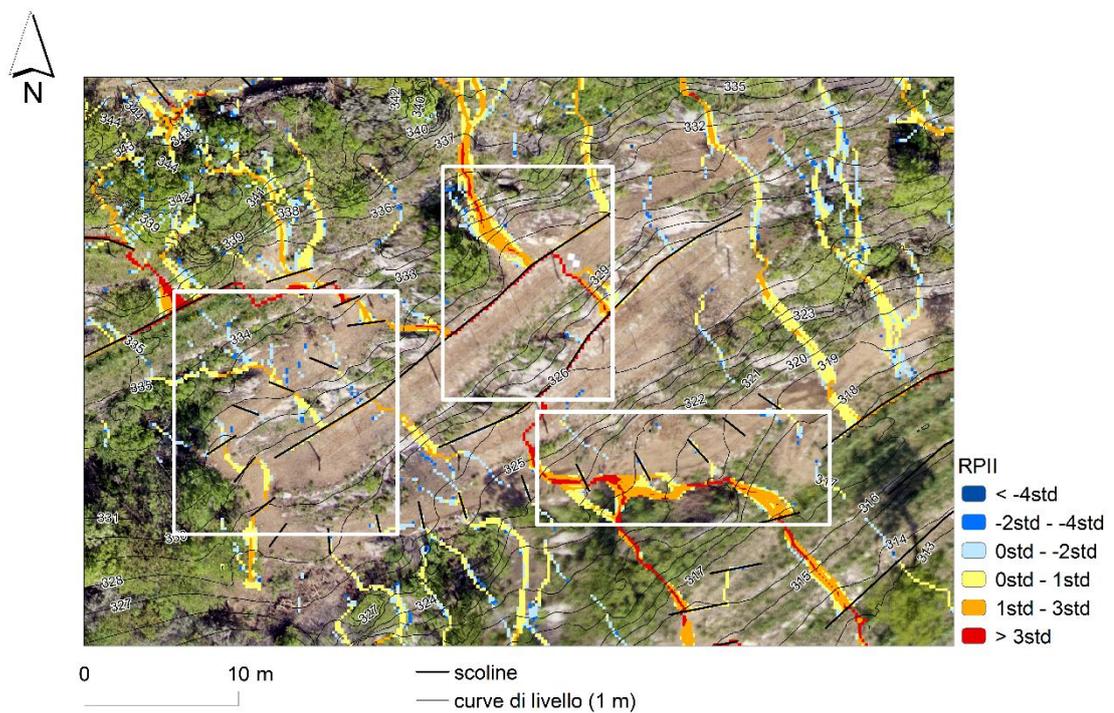


Figura 36: Azione della rete di scoline e variazione dell'indice RPII

La seconda area presa in considerazione è situata vicino ad un edificio rurale che sta subendo lavori di ristrutturazione. Anche in questo caso è presente una strada interpodereale caratterizzata da una buona pendenza (Fig. 37).



Figura 37: Seconda area considerata per la dimostrazione dell'azione della rete di drenaggio sulla concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua lungo le vie preferenziali

A nord dell'edificio è presente una zona rocciosa non coltivata, con versanti scoscesi, mentre a sud è presente un piccolo bosco di bagolari.

Osservando la morfologia della zona, si è subito ipotizzato che le rocce a nord del casolare possa favorire deflusso superficiale. Anche la strada interpodereale che conduce all'edificio in direzione Ovest-Est pare come una possibile zona potenzialmente soggetta a fenomeni erosivi. Essa infatti si articola lungo l'appezzamento per un centinaio di metri ed è caratterizzata da una media pendenza.

L’RPII evidenzia come nella zona rocciosa a settentrione l’acqua si incanali per poi scendere in corrispondenza dell’edificio. Anche le strade interpoderali fungono da potenziali canali per la raccolta delle acque provenienti dai terrazzamenti soprastanti. Inoltre la pendenza della strada è maggiore ad Ovest, facilitando il deflusso verso i terrazzamenti posti più in basso (come si può vedere a destra della casa nella Fig. 38).

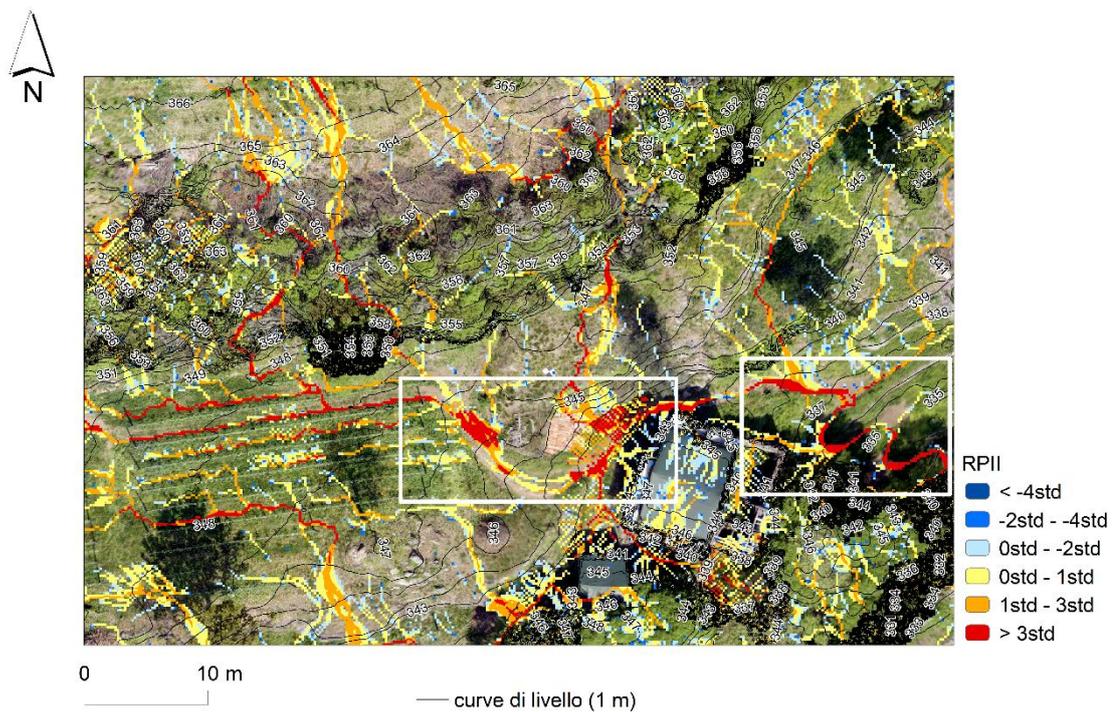


Figura 38: Calcolo dell'indice RPII nella seconda area considerata. Le aree potenzialmente critiche sono evidenziate dai rettangoli bianchi

Grazie alla progettazione di canalette si può diminuire la concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua sulla strada interpodereale (Fig. 39). Inoltre, grazie all'azione degli scoli disegnati sui terrazzamenti soprastanti (non visibili in Fig. 39), la portata di acqua proveniente dai piani di coltivazione posti a nord rispetto alla zona considerata può essere ridotta. Tali misure permettono di preservare la strada dall'erosione superficiale, evitando che essa funga da canale di scolo dell'acqua verso i terrazzamenti sottostanti.

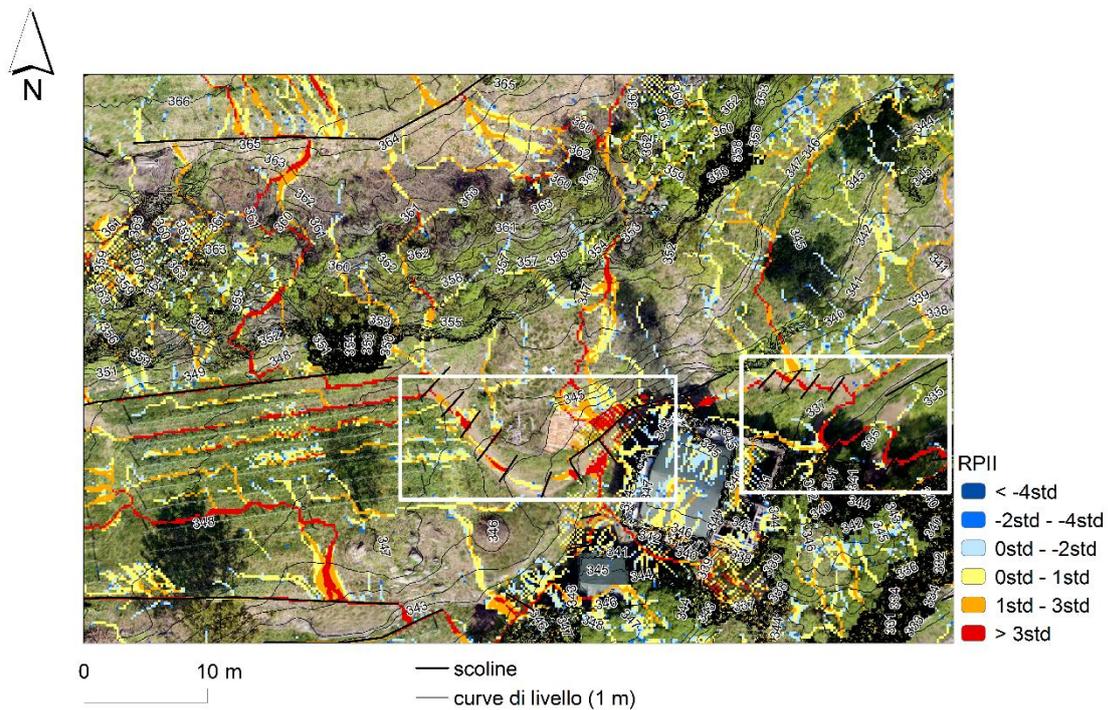


Figura 39: Azione della rete di scoline e variazione dell'indice RPII

La terza zona critica è un'area nella quale è stato realizzato un filare nuovo del vigneto, come si può vedere nella Fig. 40.



*Figura 40: Terza area considerata per la dimostrazione dell'azione della rete di drenaggio sulla concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua lungo le vie preferenziali*

A Nord Ovest, come si può vedere dalla Fig. 40, si articola una stradina interpodereale e sono presenti piccole strade di connessione tra i terrazzamenti già coltivati a vite. Osservando la pendenza della zona è stato subito ipotizzato che le suddette strade possano risultare critiche.

Infatti, secondo l'indice, (Fig. 41) l'acqua si incanala seguendo la morfologia delle stesse, concentrando il deflusso superficiale in un'area che attraversa il vitigno appena impiantato. Tale situazione è ritenuta grave poiché non è presente vegetazione sull'appezzamento ed un evento meteorico di media intensità potrebbe comportare un'erosione superficiale particolarmente severa.

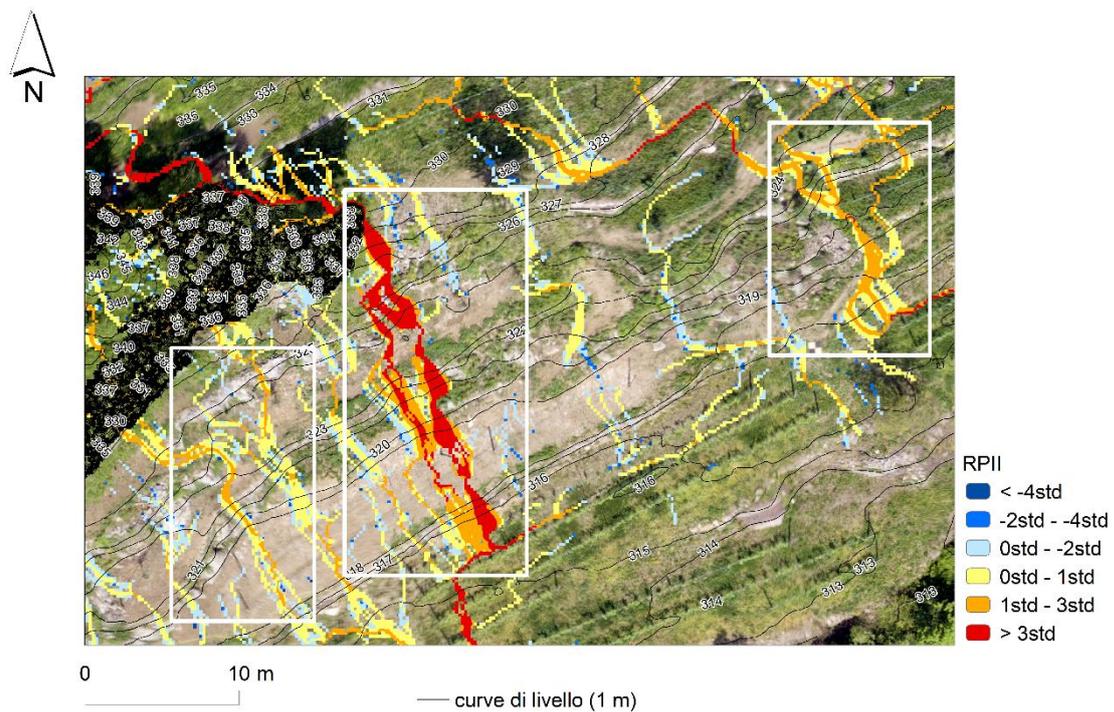


Figura 41: Calcolo dell'indice RPII nella terza area considerata. Le aree potenzialmente critiche sono evidenziate dai rettangoli bianchi

In seguito al posizionamento di scoline sulla stradina interpoderale e ai piedi dei muretti a secco, il deflusso superficiale lungo linee preferenziali è stato ridotto preservando la stabilità dei manufatti (Fig. 42).

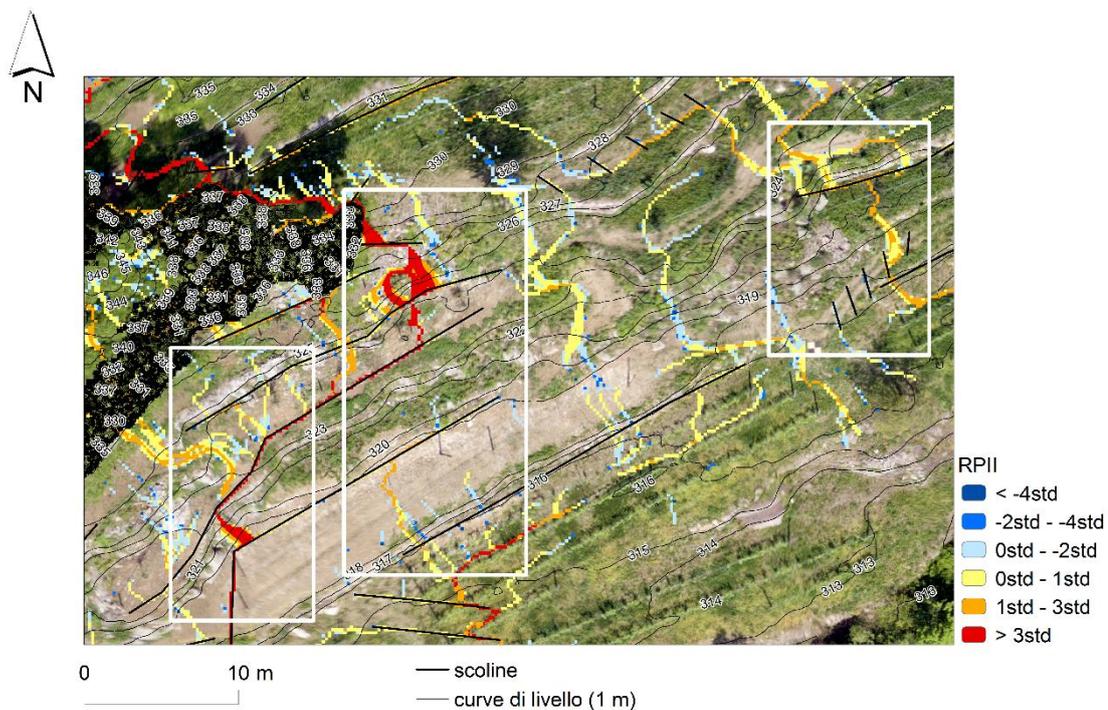
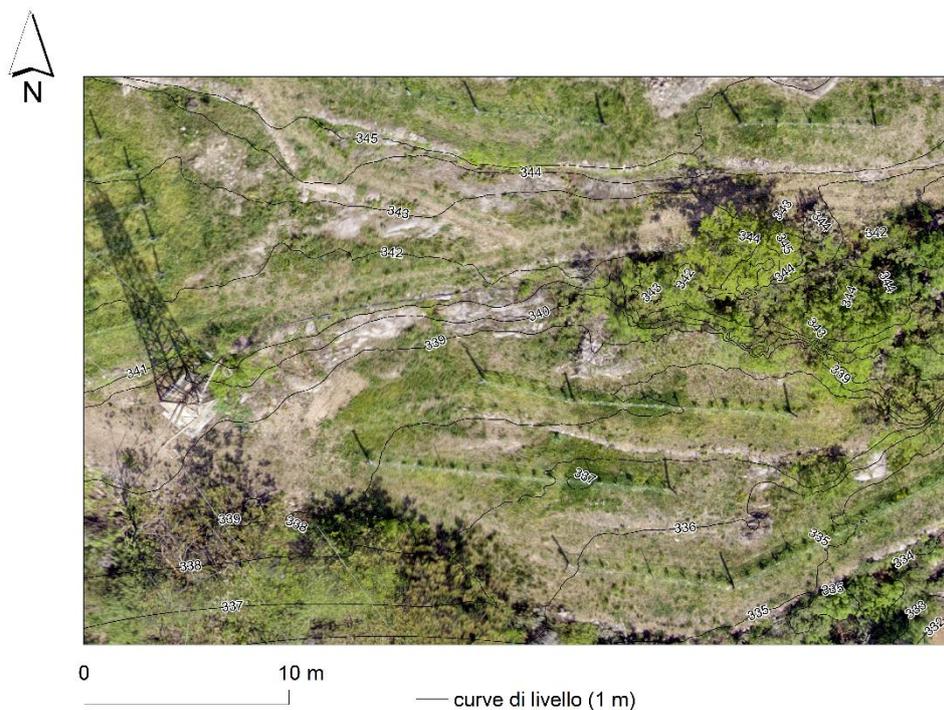


Figura 42: Azione della rete di scoline e variazione dell'indice RPII

La quarta area considerata comprende terrazzamenti e strade di collegamento interpoderali tra zone terrazzate. La pendenza non è eccessiva e, anche in questo caso, è presente un vigneto di nuovo impianto (Fig. 43).



*Figura 43: Quarta area considerata per la dimostrazione dell'azione della rete di drenaggio sulla concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua lungo le vie preferenziali*

Nella zona settentrionale sono presenti agglomerati rocciosi e i terrazzamenti sono caratterizzati da piani di coltivazione piuttosto larghi (da 4 – 5 m e più) e muri a secco non troppo alti (2 m circa).

Le zone critiche ipotizzate sono state le strade interpoderali e le zone di roccia viva poste a Nord.

Calcolando l'RPII si nota come il deflusso possa seguire la via preferenziale delle strade, comportando problemi sia per l'integrità delle stesse che dei piani di coltivazione (Fig. 44). Inoltre, il deflusso si incanala percorrendo i piani di coltivazione, azione che può portare all'erosione degli stessi.

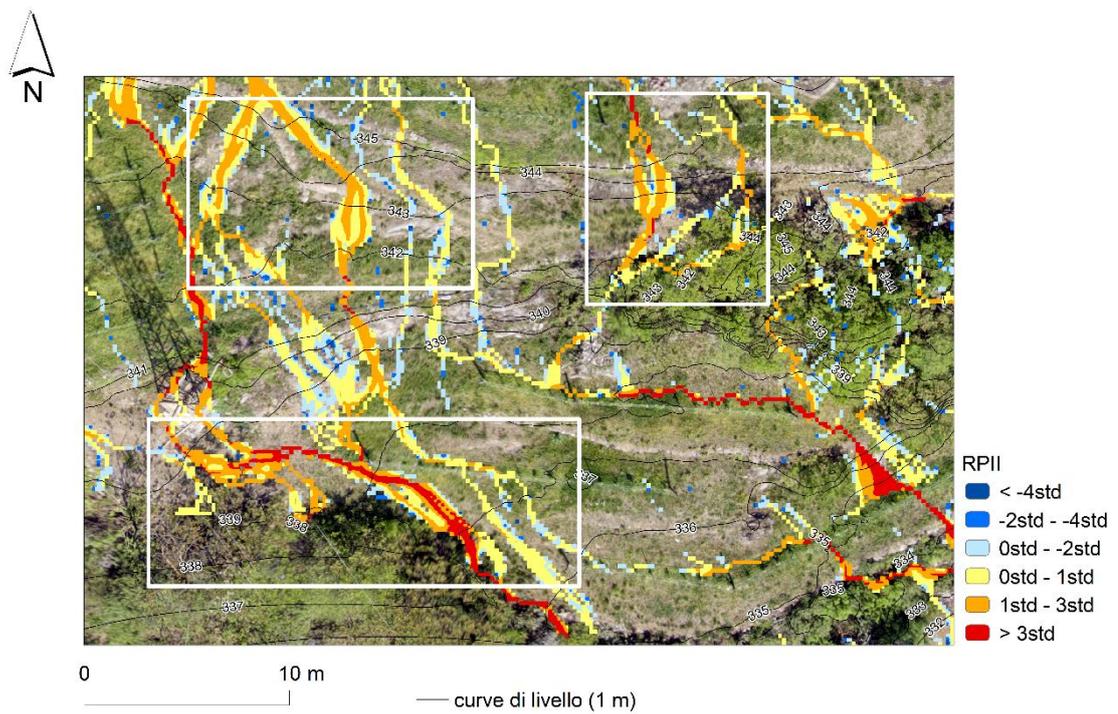


Figura 44: Calcolo dell'indice RPII nella quarta area considerata. Le aree potenzialmente critiche sono evidenziate dai rettangoli bianchi

Successivamente, tramite la realizzazione di scoline ai piedi dei muri a secco e lungo le strade interpoderali, si può notare come l'indice RPII sia diverso (Fig. 45).

Ciò evidenzia il fatto che il semplice posizionamento di canalette nelle strade e la creazione di scoli ai piedi dei muri, può migliorare in modo significativo eventuali criticità lungo gli appezzamenti.

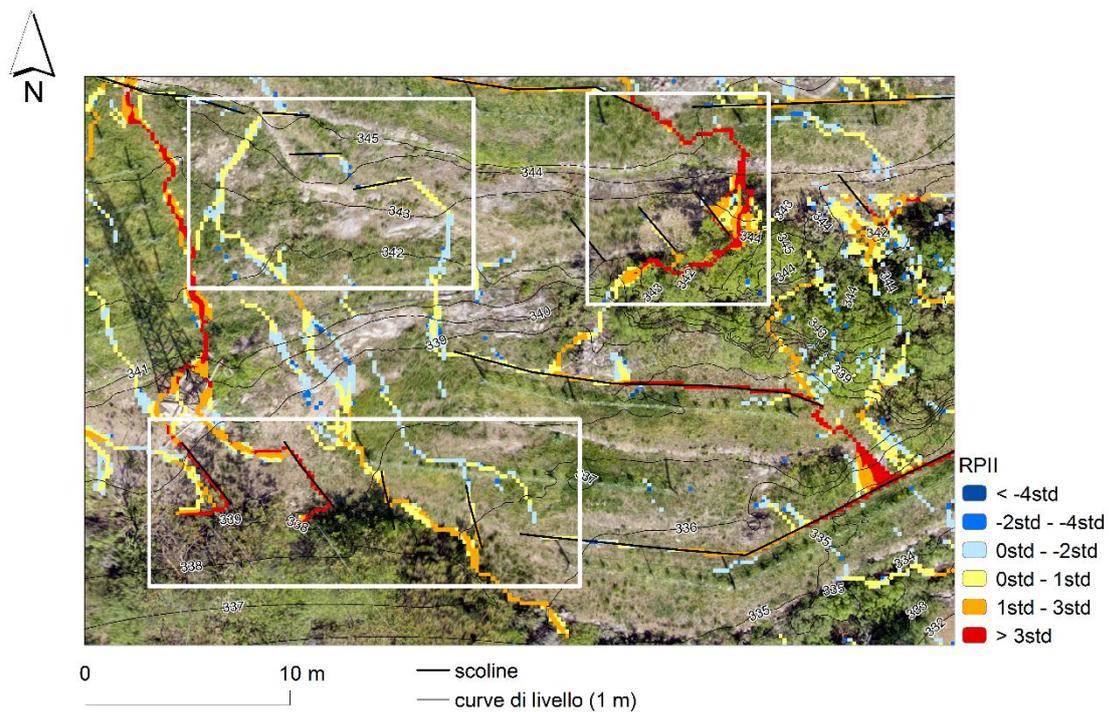


Figura 45: Azione della rete di scoline e variazione dell'indice RPII

La quinta area rappresentata in Fig. 46 comprende terrazzamenti coltivati a vite e olivo e delle strade interpoderali. I piani di coltivazione sono piuttosto larghi (più di 5 m) e, data la media pendenza delle strade, l'ipotesi avanzata è che possano essere interessate da concentrazione di deflusso superficiale. Nella zona considerata è presente un muro a secco completamente crollato (delimitato da un rettangolo rosso nella Fig. 46). L'ipotesi è che il muro sia crollato per una concentrazione di deflusso dell'acqua verso quella zona.

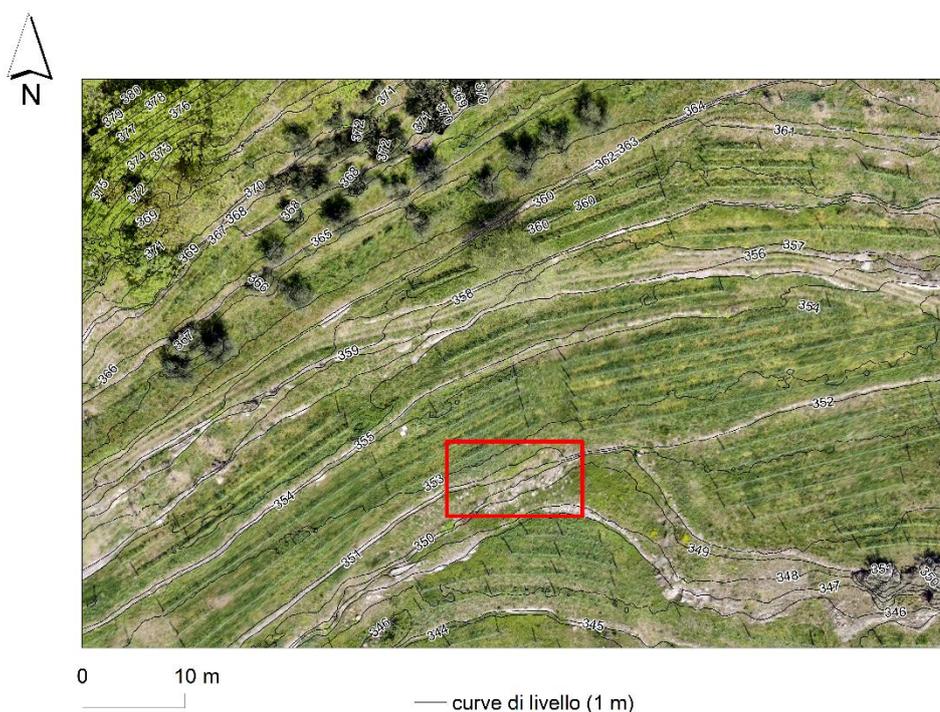
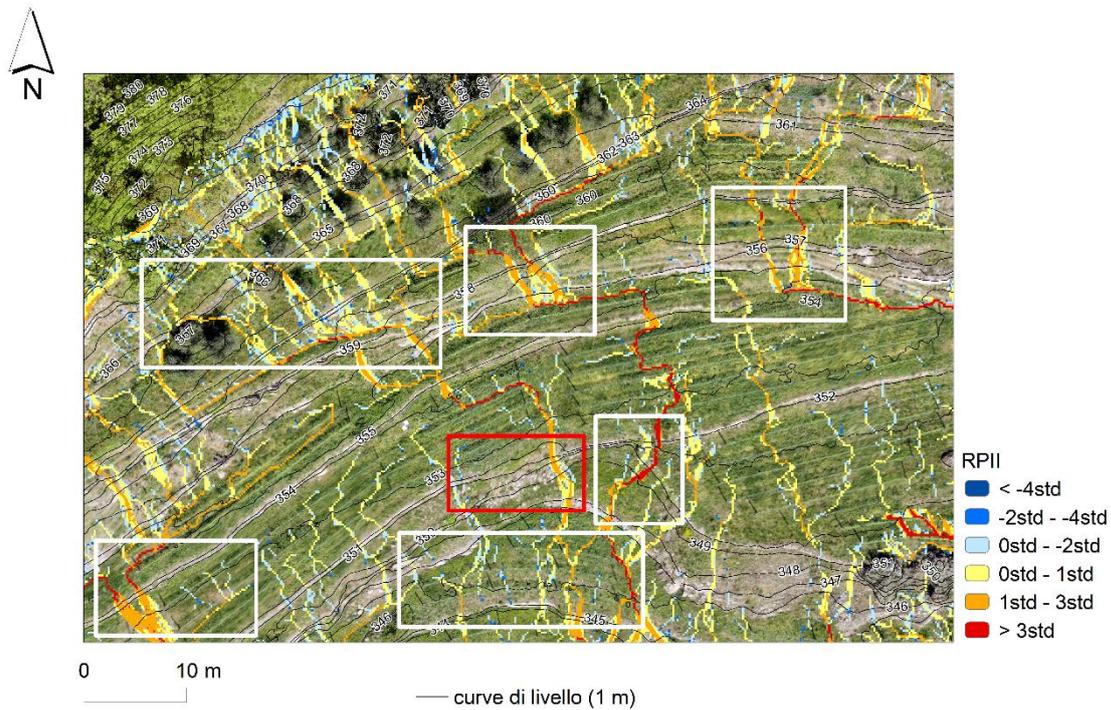


Figura 46: Quinta area considerata per la dimostrazione dell'azione della rete di drenaggio sulla concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua lungo le vie preferenziali. Il rettangolo rosso delimita la zona in cui è avvenuto il crollo di un muro a secco

Grazie al calcolo dell'RPII (Fig. 47) è possibile individuare le zone maggiormente critiche, ed è inoltre evidenziato come nella zona del muro crollato ci sia un significativo accumulo di deflusso. Nelle strade interpoderali, inoltre, l'acqua si incanala superando i muretti a secco passando da un piano di coltivazione all'altro.



*Figura 47: Calcolo dell'indice RPII nella quinta area considerata. Si noti la corrispondenza tra la porzione di muro a secco crollata nel rettangolo rosso e la direzione della concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua lungo le vie preferenziali. Le aree potenzialmente critiche sono evidenziate dai rettangoli bianchi*

Tramite la creazione di scoline è possibile ridurre la concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua che in questa zona minaccia la stabilità dei muri a secco (nei punti in cui li attraversa). Grazie alla rete di drenaggio è possibile quindi preservare i muri a secco da possibili futuri crolli (Fig. 48).

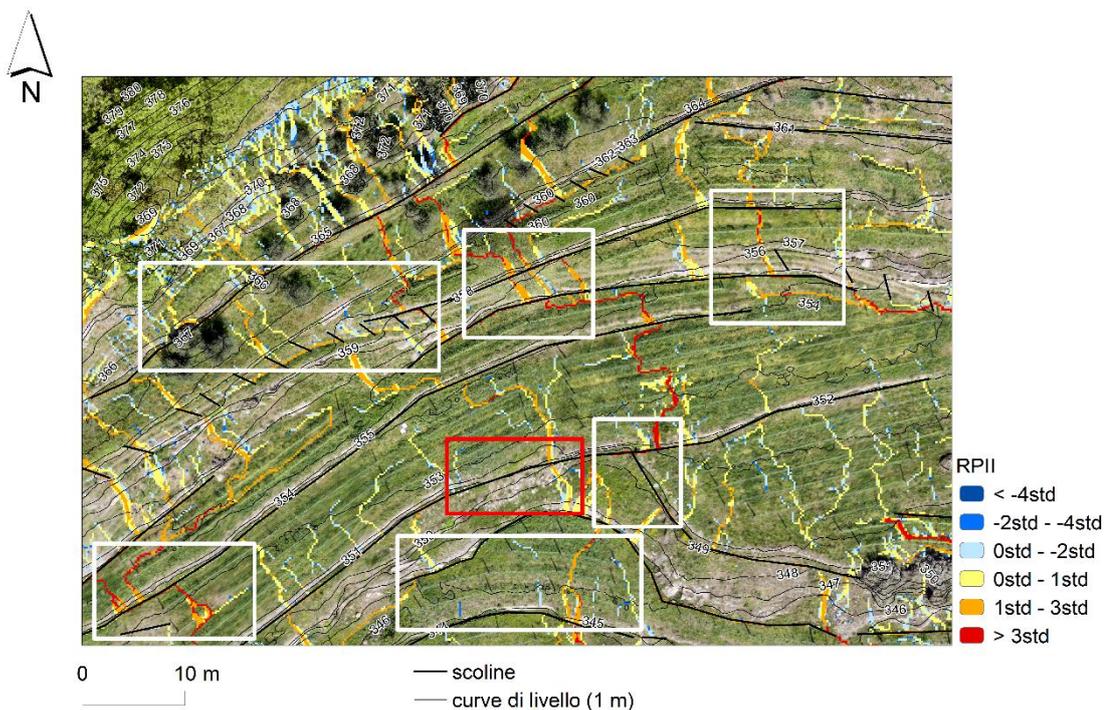


Figura 48: Azione della rete di scoline e variazione dell'indice RPII

La sesta area considerata è una porzione dell'appezzamento coltivata a vite e caratterizzata da terrazzamenti con piani di coltivazione stretti (larghezza compresa tra i 2,5 e i 4 m). Sono presenti strade interpoderali e di connessione tra i terrazzamenti (Fig. 49). La pendenza dell'area è elevata e nella zona settentrionale sono presenti agglomerati rocciosi non coltivati. I muri sono alti mediamente 2 m o poco meno e, osservando la pendenza e notando l'assenza delle scoline ai piedi dei muri, si è pensato che il problema della concentrazione di deflusso potenzialmente possa coinvolgere l'intera area.



*Figura 49: Sesta area considerata per la dimostrazione dell'azione della rete di drenaggio sulla concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua lungo le vie preferenziali*

Calcolando l'indice RPII (Fig. 50) è stato possibile evidenziare che il problema della concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua lungo le vie preferenziali interessa l'intera zona.



Figura 50: Calcolo dell'indice RPII nella sesta area considerata. Le aree potenzialmente critiche sono evidenziate dai rettangoli bianchi

Dagli agglomerati rocciosi nella zona settentrionale l'acqua defluisce verso i terrazzamenti sottostanti, unendosi in canali che potenzialmente possono aumentare la loro azione erosiva.

Grazie alla progettazione di scoline, si può notare come nella Fig. 51 la concentrazione del deflusso superficiale sia diminuita da un piano di coltivazione all'altro, riducendo il rischio di crolli e smottamenti del versante.



Figura 51: Azione della rete di scoline e variazione dell'indice RPII

I risultati ottenuti grazie al calcolo dell'RPII hanno permesso di analizzare in dettaglio le direzioni del deflusso superficiale, favorendo in questo modo una possibile progettazione di un sistema di drenaggio. L'area è potenzialmente soggetta a fenomeni di dissesto, poiché ai piedi dei terrazzamenti e lungo le strade non sono presenti canalette di scolo.

Le scoline progettate permetterebbero agli agricoltori dell'azienda agricola Scraleca di prevenire fenomeni erosivi e collassi di muri a secco (come nella quinta area considerata), tutelando i terrazzamenti e l'intera l'attività agricola. La realizzazione della rete di drenaggio potrebbe essere possibile solo grazie a degli scavi a mano nella maggior parte dell'appezzamento (si veda il Cap. 2.6.3). L'area considerata è coltivata con ulivi e viti e sarebbe molto difficile entrare con dei macchinari tra i filari senza danneggiare le colture. Per quel che riguarda le strade interpoderali e di connessione tra i terrazzamenti, in corrispondenza delle scoline disegnate si potrebbero posizionare delle canalette in legno o metallo, facendo particolare attenzione alle zone più critiche (si veda il Cap. 2.6.3).

La dimensione dell'area di studio consente, a differenza dell'area di Malegno, di pianificare interventi che tutelino una zona molto ampia di versante montuoso. In questo caso si può preservare l'integrità dei territori limitrofi all'azienda, tramite una manutenzione mirata delle aree terrazzate.

### **2.6.3 Costo di realizzazione delle scoline**

Nel capitolo precedente è stato illustrato come l'indice RPII può essere impiegato per evidenziare potenziali fenomeni di dissesto in aree terrazzate. La realizzazione delle scoline ha infatti permesso di ridurre la concentrazione del deflusso superficiale dell'acqua lungo vie preferenziali; tuttavia serve ora stimare il costo di realizzazione, al fine di valutarne la sostenibilità. Nel caso dell'area di studio di Darfo Boario Terme gli scavi andrebbero eseguiti a mano nelle zone terrazzate, mentre potrebbero essere eseguiti con mezzo meccanico sulle strade interpoderali (verrebbero posizionate scoline di metallo o legno). Per semplificare è stato calcolato il preventivo di realizzazione con il costo al metro cubo dello scavo a mano (Prezzario manutenzione fabbricati provinciali opere edili. Provincia di Brescia 2015). Il costo di realizzazione si aggirerebbe attorno ai 40.000 €, cifra calcolata come segue:  $2502 \text{ m (lunghezza totale scoline)} \times 0,3 \text{ m} \times 0,3 \text{ m} \times 173,30 \text{ €/m}^3 = 39.023,70 \text{ €}$ .

Nel caso dell'area di studio di Malegno, essendo totalmente disboscata ed accessibile a mezzi meccanici, il costo di realizzazione si aggirerebbe attorno ai 4.000 €. Il calcolo è stato eseguito tenendo conto del costo al metro cubo dello scavo eseguito con mezzi meccanici:  $1904 \text{ m (lunghezza totale scoline)} \times 0,4 \text{ m} \times 0,4 \text{ m} \times 12,60 \text{ €/m}^3 = 3.838,46 \text{ €}$ . L'intervento avrebbe senso solo se anche i muri a secco fossero ricostruiti o riparati e tali lavori comporterebbero costi aggiuntivi.

Sulle strade interpoderali e di connessione tra i terrazzi potrebbero essere posate trasversalmente delle canalette con un'inclinazione di 30°. La pendenza trasversale non dovrebbe essere inferiore al 3-4 % e potrebbero essere realizzate in diversi materiali (Bischetti 2005). Inoltre, nella zona dello sbocco, si dovrebbero posizionare delle pietre per evitare un'eccessiva erosione nel caso in cui ci fossero eventi meteorici con portate

notevoli. Secondo Bischetti (2005) sono presenti diverse tipologie di manufatti per lo sgrondo superficiale:

- Canalette in legno assemblate a sezione rettangolare: si ottengono unendo due o tre assoni in larice dello spessore di 7-10 cm, creando una sezione rettangolare di 10-12 cm. Gli assoni sono uniti da 3-4 distanziatori in metallo che reggono la struttura e, se sono a forma di omega rovesciata, consentono la pulizia della canaletta. La durata si aggira attorno ai 10-15 anni, in funzione dell'entità del passaggio di automezzi sulla strada (Fig. 52).

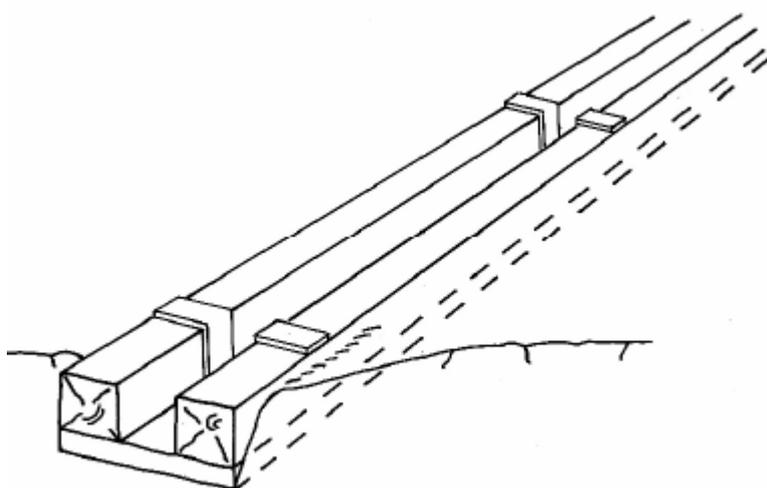


Figura 52: Canaletta in legno dotata di ferri distanziatori ad omega rovesciato (Fonte: Bortoli 1982)

- Canalette in metallo: sono facilmente reperibili ed efficienti nello smaltimento delle acque. Tuttavia il loro costo e la scarsa resistenza a deformazioni dovute a carichi, ne ha limitato la diffusione (Fig. 53).

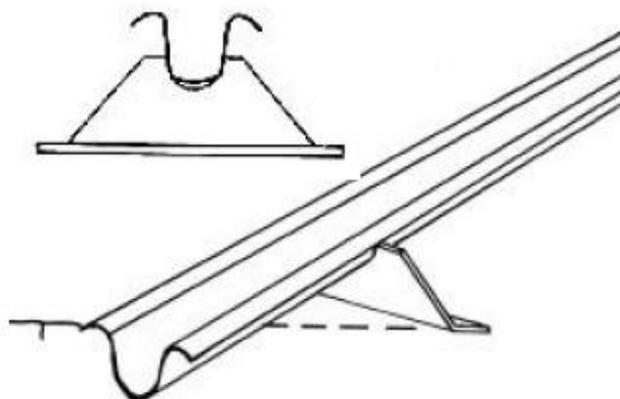
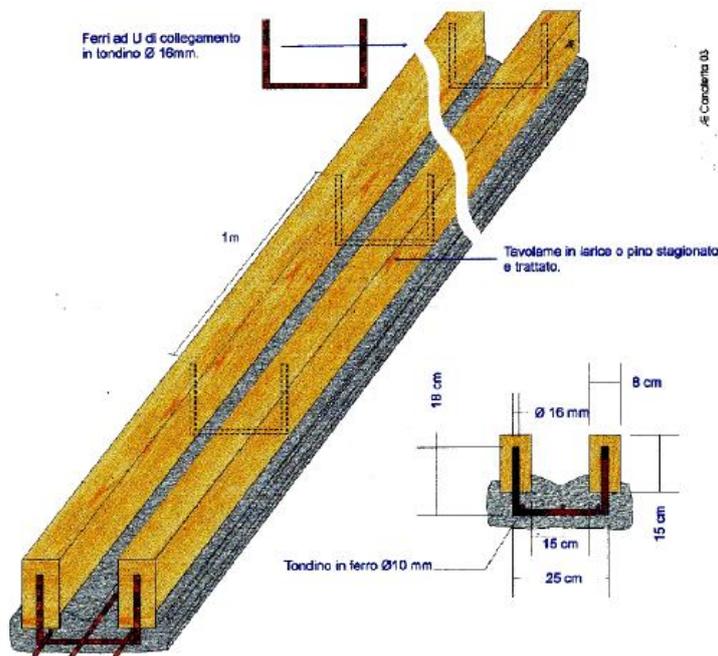


Figura 53: Canaletta in metallo (Fonte: Bortoli 1982)

- Canalette in tronchetti: sono canalette realizzate utilizzando due o tre tronchetti di diametro uguale, inchiodati ad una tavola interrata oppure fissando direttamente i tronchetti al terreno. La sezione di scolo ha una larghezza di circa 10 cm (Fig. 54).



Figura 54: Canaletta in tronchetti (Fonte: Bortoli 2001)



- Canalette in legname e fondo cementizio: sono realizzate unendo un fondo di malta a due tavole di legno tenute salde fra di loro da ferri a U fissati in basso (Fig. 55).

Figura 55: Canaletta in legname e fondo cementizio (Fonte: Bischetti 2005)

- Canalette prefabbricate in calcestruzzo: possono avere sezione trapezia, rettangolare o semicircolare e possono essere armate oppure no. La canaletta ideale per la viabilità agro-silvo-pastorale è quella arrotondata ed armata poiché si adatta meglio al passaggio degli automezzi. Le canalette possono essere dotate di griglie oppure no, in funzione della manutenzione che si vuole effettuare. A causa dell'elevato costo però difficilmente vengono utilizzate nella viabilità interpodereale (Fig. 56).

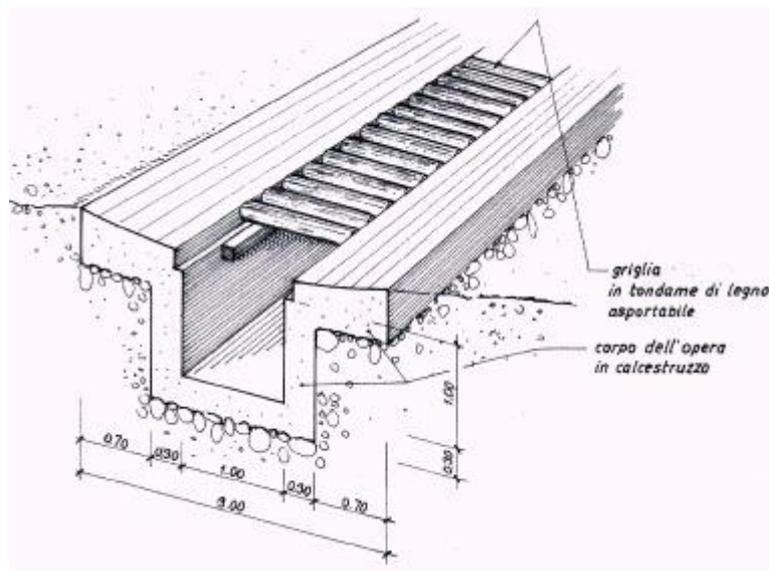


Figura 56: Canaletta in calcestruzzo (Fonte: Bortoli 2001)

Un'opera aggiuntiva al posizionamento di canalette potrebbe essere quella di realizzare delle cunette a bordo strada in grado di intercettare il deflusso sotto-superficiale proveniente dal versante a monte e dal deflusso superficiale stradale. Andrebbero dimensionate in funzione dell'efflusso atteso, per evitare che la portata superi la capacità di deflusso. La soluzione migliore sarebbe quella di rivestirle in legname, pietrame, cemento o posare nella sede dello scavo delle cunette semicircolari in acciaio zincato. In tal modo si eviterebbero fenomeni erosivi (Bischetti 2005).

### 3 Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi è stato quello di proporre l'impiego di droni (UAVs, Unmanned Aerial Vehicles) per il monitoraggio ed il mantenimento dei terrazzi agricoli in Valle Camonica. Tramite un rilievo effettuato con il drone e l'elaborazione delle immagini, applicando il metodo fotogrammetrico della Structure from Motion (SfM), si è potuto generare, per le aree di studio oggetto di indagine, due modelli digitali del terreno (DEMs) ad alta risoluzione di cella. Successivamente è stato calcolato l'indice morfometrico RPII, grazie al quale si sono potute individuare aree potenzialmente critiche, dove il deflusso superficiale dell'acqua potrebbe attivare fenomeni di dissesto idrogeologico. Infine sono state proposte delle soluzioni progettuali finalizzate alla messa in opera di scoline, con lo scopo di mitigare le potenziali criticità dovute alla concentrazione del deflusso lungo vie preferenziali.

Lo scopo della tesi è stato proporre un modello di gestione dei potenziali fenomeni di dissesto idrogeologico in aree terrazzate e provvedere alla mitigazione degli stessi, al fine di fornire agli agricoltori un'analisi di dettaglio che permetta loro di pianificare interventi efficaci, preservando in questo modo i terrazzi agricoli.

Dai risultati è emersa l'efficacia dell'indice morfometrico RPII nell'individuare aree potenzialmente soggette a maggiori criticità. Un chiaro esempio è fornito dalla quinta area considerata nell'azienda agricola Scraleca. Nelle zone dove sono presenti alti valori di RPII, un muro a secco era crollato. Questa è la dimostrazione di come il modello abbia notevoli potenzialità di impiego. Si tratta di un indice di facile lettura; le mappe che segnalano le zone critiche, tramite un'apposita scala cromatica con il rosso come ultimo colore per i valori più alti dell'indice (maggiore propensione all'erosione), possono essere facilmente interpretate dagli agricoltori.

Nei prossimi anni la tecnica fotogrammetrica SfM, applicata mediante l'impiego di UAVs, sarà sempre più impiegata in vari settori, soprattutto agricoltura. In questa tesi è stato proposto l'impiego in ambito agricolo, ma è già ampiamente sfruttata per la tutela di beni culturali, monumenti storici ed architettonici, in campo forestale e addirittura militare. La relativa facilità del rilievo con UAVs e la sua possibile applicazione anche in aree di piccole dimensioni, sono il vero valore aggiunto per questo tipo di analisi. In Valle

Camonica sono presenti molti terrazzamenti coltivati appartenenti a privati che non sono agricoltori. Potrebbero essere programmati rilievi analoghi fornendo in questo modo un'opportunità per tutelare tutti i versanti della Valle Camonica.

In questo modo i muri a secco verrebbero preservati, evitando così che vengano demoliti in favore di strutture con cemento. Sembra un'osservazione banale, ma molte volte si evidenzia che a seguito di crolli ripetuti dei manufatti, il privato decida di erigere muri in cemento armato e sassi. Sempre nelle stesse aree si può assistere a riparazioni di spanciamanti o di slittamenti con elementi litici e malta. Tali interventi sono eseguiti con le migliori intenzioni, ma non tengono conto della forza di spinta dell'acqua e della grande attività drenante svolta dai muretti a secco.

La tesi vuole proporre quindi un modello che permetta di tutelare tutti i terrazzamenti agricoli sia come elementi produttivi, sia come elementi integranti del tipico paesaggio della valle. La possibilità di rendere maggiormente stabili i versanti terrazzati costituirebbe un punto a favore delle piccole e medie aziende vitivinicole dell'areale. Se si pensa anche ai servizi che i muri a secco svolgono, non solo di prevenzione di fenomeni di dissesto ma anche del turismo legato al paesaggio che costituiscono, si può comprendere come lo studio proposto assuma una rilevante importanza.

Tutelare i terrazzi agricoli, la loro storia, le tradizioni e le conoscenze legate alla loro costruzione, valorizzare e far conoscere tutte quelle persone che ogni giorno li preservano sono azioni necessarie al fine di mantenere le radici culturali di un popolo e di un paesaggio.

## 4 Bibliografia

- Abed, Fanar M, and Andrew MCGough. 2017. *Processing Data Intensive Matlab Jobs through Condor*.
- Agisoft LLC. 2016. "Agisoft PhotoScan User Manual." *Professional Edition, Version 1.2*, 37. [www.agisoft.ru](http://www.agisoft.ru).
- Arnáez, J., N. Lana-Renault, T. Lasanta, P. Ruiz-Flaño, and J. Castroviejo. 2015. "Effects of Farming Terraces on Hydrological and Geomorphological Processes. A Review." *Catena* 128. Elsevier B.V.: 122–34. doi:10.1016/j.catena.2015.01.021.
- Barker, Graeme W, R Adams, O H Creighton, D Crook, J P Grattan, C O Hunt, D J Mattingly, et al. 1999. "Environment and Land Use in the Wadi Faynan Southern Jordan: The Third Season of Geoarchaeology and Landscape Archaeology (1998)." *Levant* 31: 255–92. doi:10.1179/007589198790217133.
- Beach, T, S Luzzadder-Beach, N Dunning, J Hageman, and J Lohse. 2002. "Upland Agriculture in the Maya Lowlands: Ancient Maya Soil Conservation in Northwestern Belize." *Geographical Review* 92 (3): 372–97. doi:10.2307/4140916.
- Beach, Timothy, and Nicholas P Dunning. 1995. "Ancient Maya Terracing and Modern Conservation in the Peten Rain Forest of Guatemala." *Journal of Soil and Water Conservation* 50: 138. <http://proquest.umi.com/pqdweb?did=35213933&Fmt=7&clientId=3738&RQT=309&VName=PQD>.
- Bischetti, Gian Battista. 2005. *Linee Guida per La Progettazione Della Viabilità Agro-Silvo-Pastorale in Lombardia*.
- Bortoli, Pietro Luigi. 1982. *Criteri Tecnici Generali per La Programmazione, Progettazione Ed Esecuzione Della Viabilità Forestale*.
- . 2001. "Viabilità Forestale Regionale, Intervento Al Seminario Viabilità Forestale E Agro-Silvo-Pastorale." In . Barzio, Italia.
- Chen, Die, Wei Wei, and Liding Chen. 2017. "Effects of Terracing Practices on Water Erosion Control in China: A Meta-Analysis." *Earth-Science Reviews*. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.earscirev.2017.08.007.
- Chou, Tien-yin, Mei-ling Yeh, Ying-chih Chen, and Yen-hung Chen. 2010. "DISASTER

- MONITORING AND MANAGEMENT BY the Unmanned Aerial Vehicle Technology.” *ISPRS TC VII Symposium XXXVIII*: 137–42.
- Colomina, I., and P. Molina. 2014. “Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review.” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Inc. (ISPRS): 79–97. doi:10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.
- Contessa, Valeria, Paolo Tarolli, and Nunzio Romano. 2014. “Terraced Landscapes in Italy: State of the Art and Future Challenges.”
- Crosta, G. B., P. Dal Negro, and P. Frattini. 2003. “Soil Slips and Debris Flows on Terraced Slopes.” *Natural Hazards and Earth System Science* 3 (1/2): 31–42. doi:10.5194/nhess-3-31-2003.
- Dunning, Nicholas P., and Timothy Beach. 1994. “Soil Erosion, Slope Management, and Ancient Terracing in the Maya Lowlands.” *Latin American Antiquity*. doi:10.2307/971902.
- Evans, Ian. 1980. *An Integrated System of Terrain Analysis and Slope Mapping. Zeitschrift Fur Geomorphologie, Supplementband*. Vol. 36.
- Gallart, Francesc, Pilar Llorens, and J??r??me Latron. 1994. “Studying the Role of Old Agricultural Terraces on Runoff Generation in a Small Mediterranean Mountainous Basin.” *Journal of Hydrology* 159 (1–4): 291–303. doi:10.1016/0022-1694(94)90262-3.
- García-Ruiz, José M., and Noemí Lana-Renault. 2011. “Hydrological and Erosive Consequences of Farmland Abandonment in Europe, with Special Reference to the Mediterranean Region - A Review.” *Agriculture, Ecosystems and Environment* 140 (3–4): 317–38. doi:10.1016/j.agee.2011.01.003.
- Ghidoni, Alessandro, Gianfranco Gregorini, and Alessandro Ducoli. 2013. *La Gestione Forestale Dei Boschi Camuni : Modelli a Confronto*.
- Ghitti, Gian Paolo, L. Petrocchi, and G. Chiesa. 1989. “Notizie Storiche Riguardanti L’origine E La Produzione Dei Formaggi Denominati ‘Casolet’ E ‘Silter’ Nel Comprensorio Sebino.” *Quaderno Dell’agricoltura Del Sebino Bresciano N. 19. Sale Marasino, Brescia: Comunità Montana Del Sebino Bresciano*.
- Giusti, Francesca. 1996. *La Nascita Dell’agricoltura: Aree, Tipologie E Modelli*.
- Grenzdörffer, G J, A Engel, and B Teichert. 2008. “The Photogrammetric Potential of

- Low-Cost UAVs in Forestry and Agriculture.” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII 31 (B3)*: 1207–2014. doi:10.2747/1548-1603.41.4.287.
- Grove, A T, O Rackham, New Haven, and The Himalayan Dilemma. 2002. “The Nature of Mediterranean Europe: An Ecological History.” *Land Degrad. Develop* 83: 79–80. doi:10.1111/1467-8306.93020141.
- Haarbrink, R.B, and E. Koers. 2006. “Helicopter UAV For Photogrammetry And Rapid Response.” *The International Archives Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Antwerp Belgium. Vol XXXVI-I/W44 XXXVI*: 2–5.
- Hammad, Ahmad Abu, Lars Egil Haugen, and Trond Børresen. 2004. “Effects of Stonewalled Terracing Techniques on Soil-Water Conservation and Wheat Production under Mediterranean Conditions.” *Environmental Management* 34 (5): 701–10. doi:10.1007/s00267-003-0278-9.
- Hostert, P. 2010. “Mri News.” *Mountain Research Initiative Newsletter*, no. 3: 5, 6–8.
- Jane, Mary, Dela Cruz, and Parviz Koohafkan. 2009. “Globally Important Agricultural Heritage Systems : A Shared Vision of Agricultural , Ecological and Traditional Societal Sustainability.” *Environment*.
- K. K. Gachene, C, Joseph Mbuvi, N J. Jarvis, and H Linner. 1997. *Soil Erosion Effects on Soil Properties in a Highland Area of Central Kenya. Soil Science Society of America Journal - SSSAJ*. Vol. 61. doi:10.2136/sssaj1997.03615995006100020027x.
- Košulič, Ondřej, Radek Michalko, and Vladimír Hula. 2014. “Recent Artificial Vineyard Terraces as a Refuge for Rare and Endangered Spiders in a Modern Agricultural Landscape.” *Ecological Engineering* 68: 133–42. doi:10.1016/j.ecoleng.2014.03.030.
- Kozak, Jacek, Katarzyna Ostapowicz, Aneta Szablowska-Midor, and Wojciech Widacki. 2004. “Land Abandonment in the Western Beskidy Mts and Its Environmental Background.” In *Ekologia Bratislava*, 23:116–26.
- Kuemmerle, Tobias, Patrick Hostert, Volker C. Radeloff, Sebastian van der Linden, Kajetan Perzanowski, and Ivan Kruhlov. 2008. “Cross-Border Comparison of Post-Socialist Farmland Abandonment in the Carpathians.” *Ecosystems* 11 (4): 614–28. doi:10.1007/s10021-008-9146-z.
- Kuijt, Ian, Bill Finlayson, and Jode MacKay. 2007. “Pottery Neolithic Landscape

- Modification at Dhra." *Antiquity* 81 (December 2005): 106–18. doi:Article.
- Lasanta, T. 1988. "The Process of Desertion of Cultivated Areas in the Central Spanish Pyrenees."
- Lasanta, Teodoro, María Paz Errea, and Estela Nadal-Romero. 2017. "Traditional Agrarian Landscape in the Mediterranean Mountains. A Regional and Local Factor Analysis in the Central Spanish Pyrenees." *Land Degradation and Development* 28 (5): 1626–40. doi:10.1002/ldr.2695.
- Lesschen, J. P., L. H. Cammeraat, and T. Nieman. 2008. "Erosion and Terrace Failure due to Agricultural Land Abandonment in a Semi-Arid Environment." *Earth Surface Processes and Landforms* 33 (10): 1574–84. doi:10.1002/esp.1676.
- Lezze, Giovanni Da. 1610. *Catastico Bresciano*.
- Londoño, Ana C., Patrick Ryan Williams, and Megan L. Hart. 2016. "A Change in Landscape: Lessons Learned from Abandonment of Ancient Wari Agricultural Terraces in Southern Peru." *Journal of Environmental Management* 202: 532–42. doi:10.1016/j.jenvman.2017.01.012.
- Lourenço, L., A.N. Nunes, A. Bento-Gonçalves, and A. Vieira. 2014. "Environmental Concerns of Portuguese Mountains: A Case Study in the Central Mountains." *Mountains: Geology, Topography and Environmental Concerns*, no. February: 195–212.
- Martini, Simona, and Gianluca Pesce. 2014. *Manuale per La Costruzione Dei Muri a Secco. Linee Guida per La Manutenzione Dei Terrazzamenti Delle Cinque Terre. Life00Env/It/000191 Prosit. Vol. LIFE00ENV/. Tipografia Ambrosiana. <http://db.parks.it/pdf/sitiufficiali/PN5TRdocumento-7-1.pdf>.*
- Molina, P., I. Colomina, T. Vitoria, P. F. Silva, J. Skaloud, W. Kornus, R. Prades, and C. Aguilera. 2012. "Searching Lost People With Uavs: The System and Results of the Close-Search Project." *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIX-B1* (September 2012): 441–46. doi:10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-441-2012.
- Nex, Francesco, and Fabio Remondino. 2014. "UAV for 3D Mapping Applications: A Review." *Applied Geomatics* 6 (1): 1–15. doi:10.1007/s12518-013-0120-x.
- Oost, K. Van, G. Govers, S. De Alba, and T. A. Quine. 2006. "Tillage Erosion: A Review of Controlling Factors and Implications for Soil Quality." *Progress in Physical*

- Geography* 30 (4): 443–66. doi:10.1191/0309133306pp487ra.
- Posthumus, H., and L. Stroosnijder. 2010. "To Terrace or Not: The Short-Term Impact of Bench Terraces on Soil Properties and Crop Response in the Peruvian Andes." *Environment, Development and Sustainability* 12 (2): 263–76. doi:10.1007/s10668-009-9193-4.
- Preti, Federico, Paolo Tarolli, Andrea Dani, Simone Calligaro, Massimo Prosdocimi, Ingegneria Agraria, Università Firenze, and Legnaro Pd. 2013. "LiDAR Derived High Resolution Topography : The next Challenge for the Analysis of Terraces Stability and Vineyard Soil Erosion" XLIV. doi:10.4081/jae.2013.s2.e16.
- Prezzario manutenzione fabbricati provinciali opere edili. Provincia di Brescia. 2015. "MANUTENZIONE FABBRICATI PROVINCIALI OPERE EDILI 2015 - 2017 ELENCO PREZZI."
- Putelli, Alessandro, Eletta Flocchini, and Leo Milani. 2014. *Alla Scoperta Dei Vini IGT Di Valle Camonica*. Edited by Tipografia Camuna S.p.a.
- Reg. CEE 1272/88. 1988. "REGOLAMENTO (CEE) N. 1272/88 DELLA COMMISSIONE Del 29 Aprile 1988 Che Fissa Le Modalità D'applicazione Del Regime Di Aiuti per Incoraggiare Il Ritiro Dei Seminativi Dalla Produzione," 36–40.
- Rodríguez-Aizpeoloea, J., Pérez-Badía, R., Cerdá, A. 1991. "Colonización Vegetal Y Producción de Escorrentía En Bancales Abandonados." *Cuaternario Y Geomorfología*.
- Sangiorgi, Franco. 2007. "Muri a Secco E Terrazzamenti Nel Parco dell'Adamello: Linee Guida per Il Recupero." <http://air.unimi.it/handle/2434/45036>.
- Silei, Gianni. 2014. *The Basic Environmental History. The Basic Environmental History*. Vol. 4. doi:10.1007/978-3-319-09180-8.
- Stanchi, S., M. Freppaz, A. Agnelli, T. Reinsch, and E. Zanini. 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. doi:10.1016/j.quaint.2011.09.015.
- Taillefumier, Fabrice, and Hervé Piégay. 2003. "Contemporary Land Use Changes in Prealpine Mediterranean Mountains: A Multivariate Gis-Based Approach Applied to Two Municipalities in the Southern French Prealps." *Catena* 51 (3–4): 267–96. doi:10.1016/S0341-8162(02)00168-6.

- Tarboton, David G. 1997. "A New Method for the Determination of Flow Directions and Upslope Areas in Grid Digital Elevation Models." *Water Resources Research* 33 (2): 309–19. doi:10.1029/96WR03137.
- Tarolli, Paolo. 2014. "High-Resolution Topography for Understanding Earth Surface Processes: Opportunities and Challenges." *Geomorphology*. doi:10.1016/j.geomorph.2014.03.008.
- Tarolli, Paolo, Simone Calligaro, Federico Cazorzi, and Giancarlo Dalla Fontana. 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): 176–97. doi:10.5721/EuJRS20134610.
- Tarolli, Paolo, Federico Preti, and Nunzio Romano. 2014. "Terraced Landscapes: From an Old Best Practice to a Potential Hazard for Soil Degradation due to Land Abandonment." *Anthropocene* 6. Elsevier B.V.: 10–25. doi:10.1016/j.ancene.2014.03.002.
- Tarolli, Paolo, and Giulia Sofia. 2016. "Human Topographic Signatures and Derived Geomorphic Processes across Landscapes." *Geomorphology* 255: 140–61. doi:10.1016/j.geomorph.2015.12.007.
- Tarolli, Paolo, Giulia Sofia, Simone Calligaro, Massimo Prosdocimi, Federico Preti, and Giancarlo Dalla Fontana. 2015. "Vineyards in Terraced Landscapes: New Opportunities from Lidar Data." *Land Degradation and Development* 26 (1): 92–102. doi:10.1002/ldr.2311.
- Tasser, Erich, Janette Walde, Ulrike Tappeiner, Alexandra Teutsch, and Werner Noggler. 2007. "Land-Use Changes and Natural Reforestation in the Eastern Central Alps." *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118 (1–4): 115–29. doi:10.1016/j.agee.2006.05.004.
- Walther, Pierre. 1986. *Land Abandonment in the Swiss Alps. A New Understanding of a Land-Use Problem. Mountain Research and Development*.
- Watts, Glenn. 1991. "Hydrological Basis of Ecologically Sound Management of Soil and Groundwater (Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991). IAHS Publ. No. 202,1991.," no. 202: 81–90.
- Wei, Wei, Die Chen, Lixin Wang, Stefani Daryanto, Liding Chen, Yang Yu, Yonglong Lu, Ge Sun, and Tianjiao Feng. 2016. "Global Synthesis of the Classifications,

Distributions, Benefits and Issues of Terracing.” *Earth-Science Reviews* 159 (18): 388–403. doi:10.1016/j.earscirev.2016.06.010.

Wesemael, B. van, J. Poesen, a. Solé Benet, L. Cara Barrionuevo, and J. Puigdefábregas. 1998. “Collection and Storage of Runoff from Hillslopes in a Semi-Arid Environment: Geomorphic and Hydrologic Aspects of the Aljibe System in Almeria Province, Spain.” *Journal of Arid Environments* 40: 1–14. doi:10.1006/jare.1998.0429.

Wood, Joseph. 1996. “The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models.” *Ph. D. Dissertation*, no. March: 160. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.

Yuan, Tian, Li Fengmin, and Liu Puhai. 2003. “Economic Analysis of Rainwater Harvesting and Irrigation Methods, with an Example from China.” *Agricultural Water Management* 60 (3): 217–26. doi:10.1016/S0378-3774(02)00171-3.

MicroGeo © 2016, <http://www.microgeo.it/it/default.aspx>; disponibile su <http://www.microgeo.it/it/prodotti-e-soluzioni/droni-sapr/201568-applicazioni/fotogrammetria.aspx>

<http://www.irealp.it>, 2008; disponibile su <http://www.irealp.it/35,Projects.html>

Caraci e Putelli, 1937 Valle Camonica; Treccani online; disponibile su: [http://www.treccani.it/enciclopedia/valcamonica\\_%28Enciclopedia-Italiana%29/](http://www.treccani.it/enciclopedia/valcamonica_%28Enciclopedia-Italiana%29/)

CERVIM © 2017 <http://www.cervim.org/>; disponibile su <http://www.cervim.org/valcamonica.aspx>

Geoportale provincia di Brescia, <http://sit.provincia.bs.it>, disponibile su [http://sit.provincia.bs.it/gfmaplet10/?token=NULLNULLNULLNULL&htmlstyle=provinciabrescia&map=m\\_basi\\_map](http://sit.provincia.bs.it/gfmaplet10/?token=NULLNULLNULLNULL&htmlstyle=provinciabrescia&map=m_basi_map)

Merkel, 2017 Clima Malegno; disponibile su: <https://it.climate-data.org/location/110701/>

Dati medi rilevati nel periodo 1891-1990 da M. Ceriani e M. Carelli, Direzione Generale Territorio ed Urbanistica U.O. Difesa del Suolo; [www.centrometeolombardo.com](http://www.centrometeolombardo.com); disponibile su

<http://www.centrometeolombardo.com/files/documenti/carte%20e%20grafici/precilomb/precipitazioni%20medie.jpg>

Merkel, 2017 Clima Darfo Boario Terme; disponibile su: <https://it.climate-data.org/location/110701/>

<https://bottleofrhum.files.wordpress.com/2016/06/dsc07737-2.jpg?w=1108>

[https://www.researchgate.net/profile/Adelia\\_Nunes/publication/292251021/figure/fig9/AS:324283302727693@1454326572773/figure-12-Re-establishment-of-natural-drainage-network-after-terraces-abandonment.png](https://www.researchgate.net/profile/Adelia_Nunes/publication/292251021/figure/fig9/AS:324283302727693@1454326572773/figure-12-Re-establishment-of-natural-drainage-network-after-terraces-abandonment.png)

<http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0341816215000351-gr6.jpg>

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c0/Brescia\\_Province\\_Map.svg/800px-Brescia\\_Province\\_Map.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c0/Brescia_Province_Map.svg/800px-Brescia_Province_Map.svg.png)

[http://wikitravel.org/it/File:Brescia\\_posizione.png](http://wikitravel.org/it/File:Brescia_posizione.png)

<http://i0.wp.com/www.mondinostri.it/magazine/wp-content/uploads/2014/10/Valtellina-0370-Villa-di-Tirano-SO-Casa-Vinicola-Triaccavigneti-in-loc-La-Gatta.jpg?resize=710%2C531>

[https://www.researchgate.net/profile/Andrew\\_McGough/publication/268347372/figure/fig1/AS:295470430736384@1447457048092/figure-2-Airborne-laser-scanning-technique.png](https://www.researchgate.net/profile/Andrew_McGough/publication/268347372/figure/fig1/AS:295470430736384@1447457048092/figure-2-Airborne-laser-scanning-technique.png)

<https://synergypositioning.co.nz/products/gpsequipment/topcon-hiper-v>

