



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E ARCHITETTURA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

ANALISI IDROGEOMORFOLOGICA DI UN VERSANTE SOGGETTO A FRANA NELL'AREA DELL'AZIENDA AGRARIA UNIVERSITARIA DI BORGO RUFFINI

Hydrogeomorphological analysis of a slope subject to landslide in the area of
the agricultural university of Borgo Ruffini

Tesi di Laurea Triennale di:

Pierantoni Alberto

Relatore:

Prof. Alberto Tazioli

Correlatori:

Dott.ssa Elisa Mammoliti

Dott. Roberto Pierdicca

Anno Accademico 2023/2024

SOMMARIO

Riassunto	4
1. INTRODUZIONE	5
1.1 Frane	6
1.2 Fattori e cause dei movimenti franosi	7
1.3 Classificazione dei movimenti franosi	11
1.4 Attività dei movimenti franosi.....	16
2. INQUADRAMENTO AREA DI STUDIO.....	17
2.1 Inquadramento geografico	17
2.2 Inquadramento climatico	19
2.3 Inquadramento geologico regionale	22
2.4 Litostratigrafia	25
2.4.1 Successione marina.....	27
2.4.2 Depositi continentali quaternari.....	28
2.5 Assetto strutturale	29
2.6 Inquadramento geomorfologico	30
3. MATERIALI E METODI.....	32
3.1 Materiali.....	32

3.1.1	Cartografia	32
3.1.2	Antenna GNSS.....	36
3.1.3	Drone	37
3.1.4	Camera LiDAR.....	40
3.1.5	Software Mercurio	42
3.1.6	Software DJI Pilot 2.....	43
3.1.7	GIS	44
3.2	Metodi.....	46
3.2.1	Pianificazione rilievo aerofotogrammetrico e LiDAR	47
3.2.2	Rilievo aerofotogrammetrico e LiDAR.....	51
3.2.3	Rilievo geologico-geomorfologico.....	55
3.2.4	Estrazione dei parametri morfometrici	56
3.2.5	DTM.....	56
3.2.6	Pendenza	59
3.2.7	Curvatura	61
3.2.8	Esposizione	65
3.2.9	Accumulo di flusso	67
3.2.10	Iso Cluster Unsupervised Classification	69

4. RISULTATI.....	75
5. DISCUSSIONE.....	91
6. CONCLUSIONI	103
7. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	104
7.1 Bibliografia.....	104
7.2 Sitografia.....	107
8. RINGRAZIAMENTI.....	109

Riassunto

I versanti instabili e i fenomeni franosi rappresentano una delle principali criticità idrogeomorfologiche in contesti collinari e montani. Alla base di tali fenomeni che, oltre a provocare danni significativi alle infrastrutture e all'ambiente, minacciano le attività economiche locali e la sicurezza della comunità, vi sono delle dinamiche specifiche. Per sviluppare strategie efficaci di mitigazione e gestione del rischio idrogeologico, è essenziale quindi identificare e cartografare adeguatamente queste dinamiche.

Il focus di questo studio è il versante di un'area soggetta a fenomeni franosi ubicato all'interno dell'area dell'Azienda Agraria Universitaria di Borgo Ruffini (Ancona), sulla quale è stato effettuato un rilievo drone equipaggiato con camera LiDAR. A seguito, è stata effettuata un'analisi morfometrica al fine di evidenziare i fenomeni franosi nell'area.

1. INTRODUZIONE

Il dissesto idrogeologico è un fenomeno complesso e ampio che comporta la degradazione ambientale attraverso frane, inondazioni, agenti esogeni erosivi e altre forme di instabilità del suolo e delle acque sotterranee. Rappresenta, in Italia, uno dei principali allarmi ambientali, essendo composto da una combinazione di fattori geologici, morfologici e climatici, nonché essendo strettamente legato all'uso intensivo e spesso non pianificato del territorio. Sebbene gli impatti principali del fenomeno siano ambientali, la sua portata si estende alla popolazione, alle infrastrutture e all'economia. A partire dal secondo dopoguerra, l'urbanizzazione intensiva, ha aumentato notevolmente la vulnerabilità del territorio italiano a scapito delle aree rurali. Effettivamente, più del 90% dei comuni italiani è esposto al rischio di frane o alluvioni. Pertanto, diventa inevitabile, adottare un approccio integrato nella gestione del territorio, che si concentri sulla prevenzione, mediante monitoraggio e interventi di mitigazione.

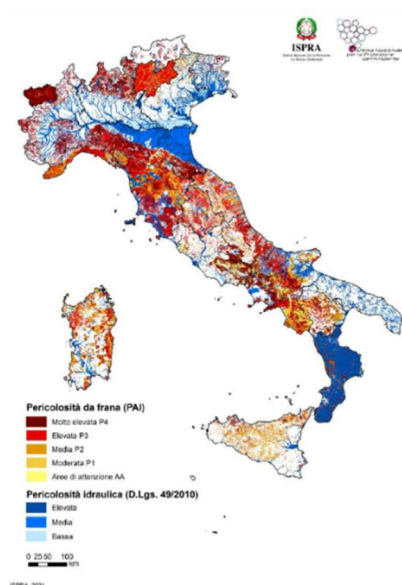


Figura 1 - Aree a pericolosità da frana (PAI) e idraulica (Scenari D.Lgs. 49/2010) – elaborazione 2021

1.1 Frane

Il termine “frana” indica un movimento gravitativo di una massa di roccia, terra o detrito lungo un versante. ¹

In Italia, fino agli anni '80, la normativa non si concentrava sulla prevenzione di tali fenomeni, ma piuttosto adoperava nel sopperire tali emergenze, con interventi a scala locale. La svolta arrivò con la Legge 183/1989, la quale segnò un passaggio cruciale nella gestione del dissesto idrogeologico nel paese, introducendo un approccio coordinato e obbligando le autorità ad elaborare piani per la gestione delle risorse idriche e del territorio, concentrandosi sulla prevenzione dei rischi naturali, inclusi gli eventi franosi. Tuttavia, non fu pienamente attuata fino alla catastrofica frana a Sarno del 1998, che provocò 161 vittime. A seguito di questo evento, fu emanata la Legge 267/1998, rendendo possibile, il rapido intervento in situazioni di emergenza nelle aree ad alto rischio idrogeologico, per garantire una pronta messa in sicurezza del territorio. Vennero adottati i Piani stralcio di bacino per l'Assetto Idrogeologico (PAI), essenziali per la pianificazione del territorio. Questi piani sono continuamente aggiornati per adattarsi alle nuove informazioni geologiche e climatiche.

¹ Cruden, David. "A simple definition of a landslide." *Bulletin of Engineering Geology & the Environment* 43.1 (1991).

1.2 Fattori e cause dei movimenti franosi

I principali fattori che causano movimenti franosi sono:

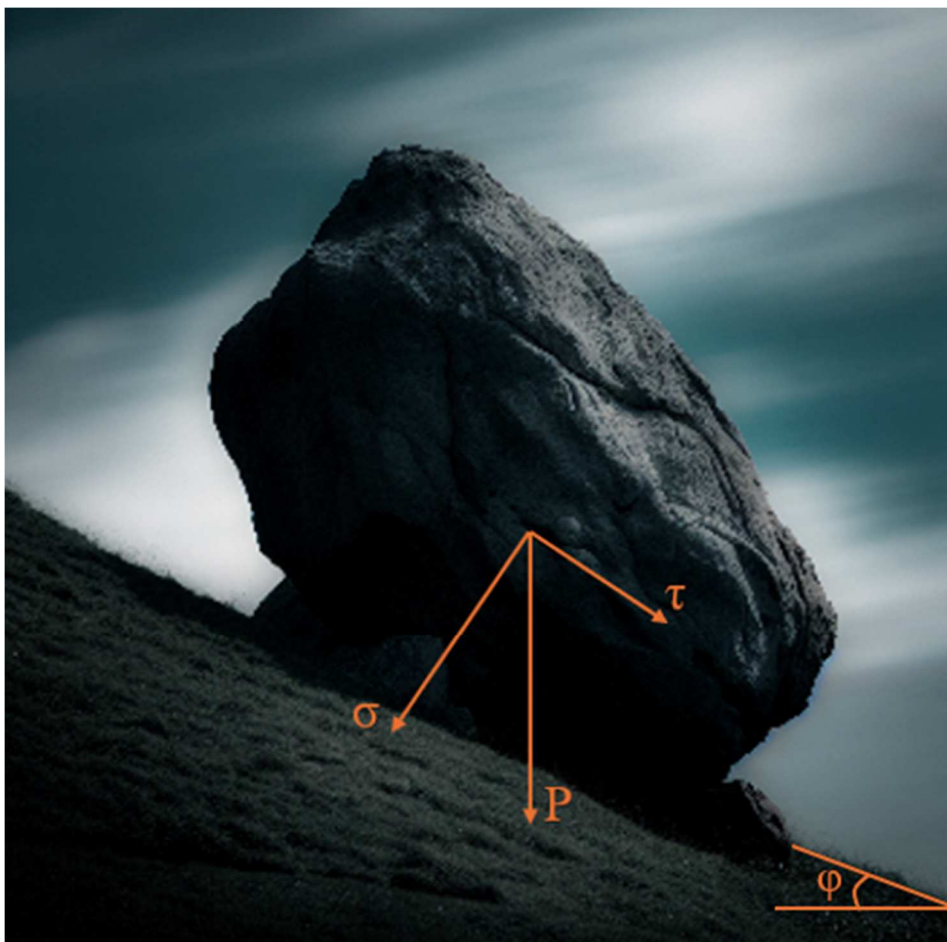
- Fattori geologici: tipo di roccia o suolo, faglie, fratture, stratificazione, scistosità
- Fattori morfologici: inclinazione dei versanti
- Fattori idrogeologici: permeabilità, scioglimento di neve o ghiacciai
- Fattori climatici: alternanza di climi secchi e umidi
- Fattori vegetazionali: disboscamenti
- Esposizione di versante
- Fattori antropici: deforestazione, scavi, modifica del regime delle acque

Le principali cause che scatenano movimenti franosi sono:

- Erosione alla base di un versante causata dall'azione di acque fluviali o marine
- Precipitazioni meteoriche intense e prolungate
- Processi di alterazione causati dagli agenti atmosferici
- Attività sismica
- Attività antropica

Considerando una massa appoggiata su un pendio, assimilabile ad un piano inclinato, è possibile scomporre la forza peso (P), a cui è sottoposto il corpo in:

- Componente tangenziale (τ): Forza che agisce parallelamente al piano inclinato. È la componente responsabile del potenziale movimento della massa lungo il pendio.
- Componente normale (σ): Forza che agisce perpendicolarmente al piano inclinato, contribuendo alla compressione del terreno. La pressione esercitata influisce sull'equilibrio del pendio, aumentandone la stabilità.



*Figura 2 – Forza peso (P) scomposta in componente tangenziale (τ) e componente normale (σ),
angolo di attrito interno (φ)*

Il movimento franoso si instaura quando la componente tangenziale della forza peso (τ) supera la resistenza a taglio massima (τ_{\max}) intrinseca al terreno. Il primo criterio di rottura proposto è quello di Coulomb ², modificato successivamente con la formulazione del principio delle tensioni efficaci di Terzaghi ³ andando a considerare:

$$\tau_{\max} = c + (\sigma - u) \cdot \tan (\varphi)$$

Dove:

- Coesione (c): Forza di adesione dei granuli di terra uno con l'altro, contrasta la forza che tende a far muovere le particelle di terra una sull'altra. ⁴
- Pressione interstiziale (u): Pressione neutra, agisce in ogni direzione con uguale intensità.
- Angolo di attrito interno (φ): Angolo tra l'ascissa e la tangente alla curva rappresentante la relazione tra resistenza a taglio e sforzi normali agenti all'interno del terreno. ⁵

Il rapporto tra la resistenza a taglio massima (τ_{\max}) e la componente tangenziale della forza peso (τ) è indicato come fattore di sicurezza (FS)

$$FS = \frac{\tau_{\max}}{\tau}$$

Se il fattore di sicurezza è maggiore di 1, il pendio è stabile; se è minore o uguale a 1, il pendio è instabile.

² Coulomb, C. "Test on the applications of the rules of maxima and minima to some problems of statics related to architecture." Mem. Math. Phys 7 (1773): 343-382.

³ Terzaghi, Karl. Theoretical soil mechanics. 1943.

⁴ U. Alasia - M. Pugno, Corso di Costruzioni 5 © SEI (2011)

⁵ AGI, American Geological Institute, Glossary of Geology, 2a ed. (1973)

Ci sono due principali modi in cui l'equilibrio può essere alterato causando un movimento franoso:

- Aumento della forza tangenziale (τ) dovuto dall'incremento del peso della massa sul pendio (ad esempio dalla costruzione di un'opera) o dall'aumento dell'inclinazione del pendio
- Diminuzione della resistenza a taglio massima (τ_{max}) dovuto dall'incremento delle pressioni interstiziali o per effetto di fenomeni fisici, chimici o biologici.

Terminologia per la fisionomia della frana

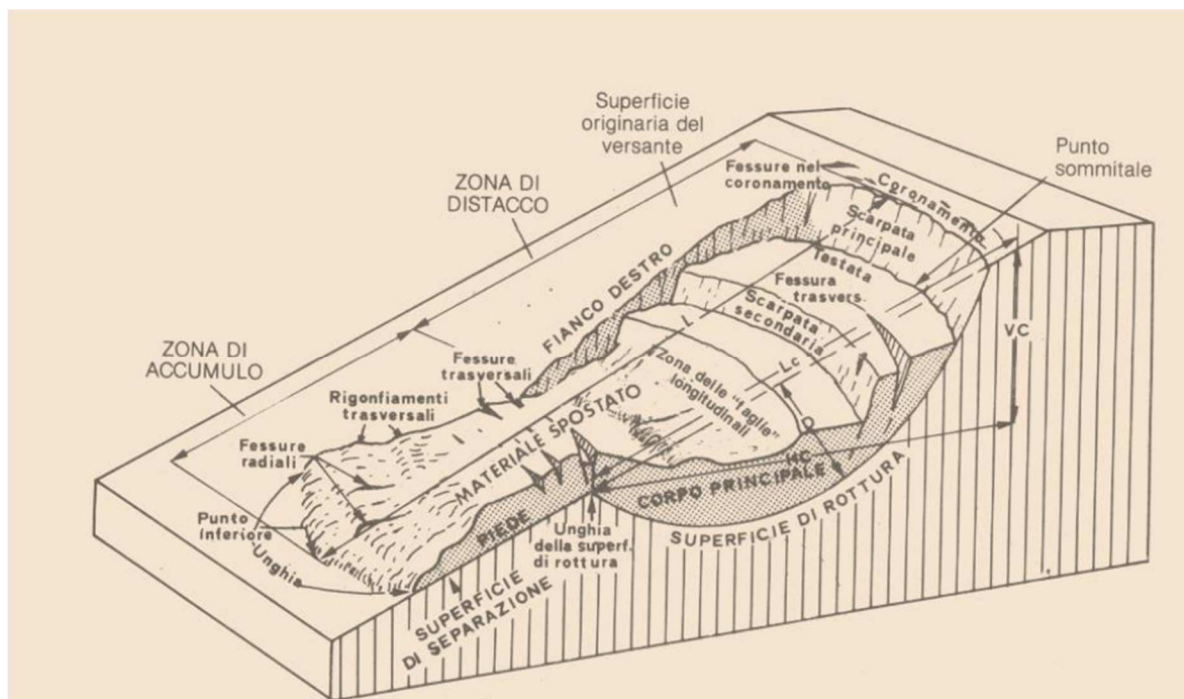


Figura 3 – Fisionomia della frana (UNESCO WP/WLI, 1990)

Terminologia per la morfometria della frana

1. larghezza della massa spostata W_d
2. larghezza della superficie di rottura W_r
3. lunghezza totale L
4. lunghezza della massa spostata L_d
5. lunghezza della superficie di rottura L_r
6. profondità della massa spostata D_d
7. profondità della superficie di rottura D_r
8. lunghezza della linea di mezzeria L_{cl}
9. dislivello H

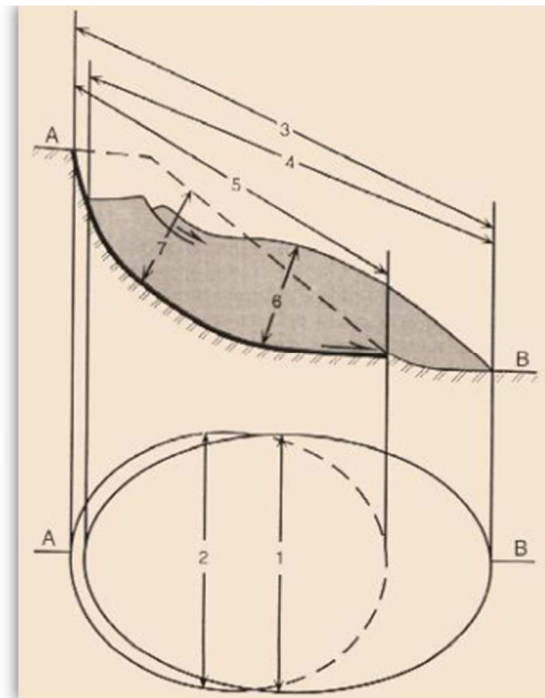


Figura 4 – Morfometria della frana (UNESCO WP/WLI, 1990)

1.3 Classificazione dei movimenti franosi

I movimenti franosi sono caratterizzati da vari meccanismi di rottura e differenti superfici di scorrimento, ciascuno dei quali richiede approccio specifico per comprenderne la dinamica. L'individuazione del cinematismo di collasso è essenziale per scegliere il metodo di analisi più idoneo e per pianificare interventi di stabilizzazione e mitigazione efficaci. Per affrontare in modo adeguato queste problematiche, sono stati elaborati diversi sistemi di classificazione delle frane. Tra questi, il più diffuso e ampiamente adottato è il sistema di Varnes ⁶, che suddivide i movimenti franosi in:

⁶ Varnes, D. J. "Slope movement types and processes." Landslides: analysis and control (1978).

Crolli (falls): Il movimento franoso da crollo è caratterizzato dalla caduta libera e improvvisa di materiali, come rocce e detriti. Questi eventi si verificano generalmente in versanti interessati da discontinuità, come faglie o piani di stratificazione. Questi fenomeni si verificano principalmente in ambienti rocciosi o in scarpate molto ripide, dove la gravità agisce come forza predominante.

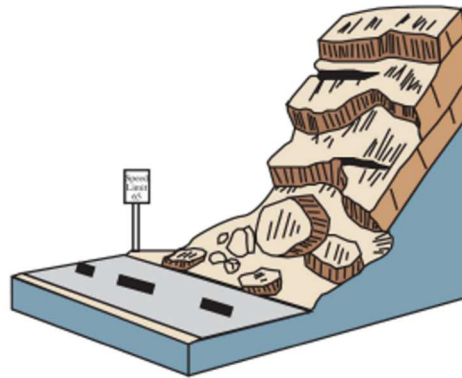


Figura 5 – Frana per crollo (USGS, 2004)

Ribaltamenti: Il movimento franoso da ribaltamento è caratterizzato dal materiale che perdendo gradualmente stabilità non scivola, ma ruota attorno a un punto posto al di sotto della loro base.

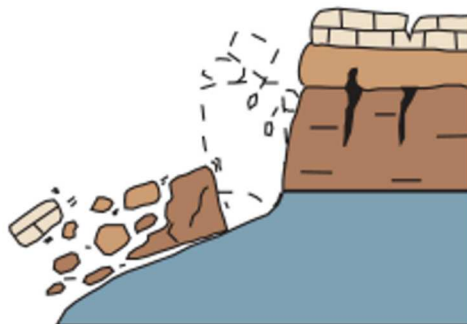


Figura 6 – Frana per ribaltamento (USGS, 2004)

Scorrimenti: Nel movimento franoso per scorrimento il materiale si sposta lungo una superficie di rottura, o piano di scorrimento, con un movimento di scivolamento. Si distingue in base alla forma della superficie di scorrimento:

- Scorrimento rotazionale: avviene in terreni o rocce caratterizzati da una certa coesione e nella quale la massa ruota attorno a un asse situato all'interno o vicino alla superficie di frana. La superficie di rottura è curva e concava
- Scorrimento traslazionale: si sviluppa lungo una superficie preesistente che rappresenta un livello di debolezza, come un piano di stratificazione o superfici di scistosità. Può coinvolgere rocce che terreni non coesivi, inclusi detriti di versante

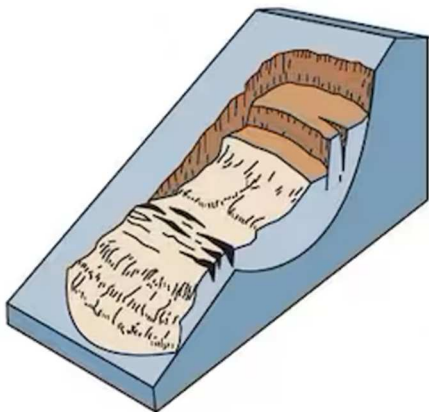


Figura 7 - frana per scorrimento rotazionale
(USGS, 2004)

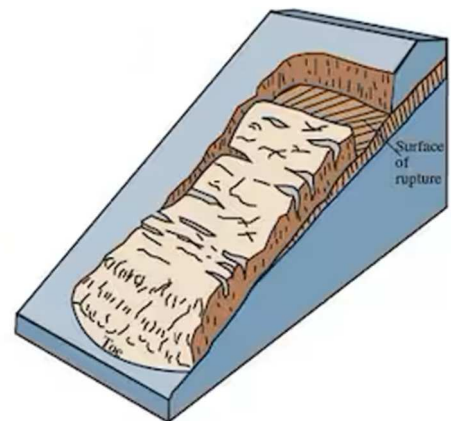


Figura 8 - frana per scorrimento traslazionale
(USGS, 2004)

Espansioni laterali: Il movimento franoso per espansione laterale si verifica quando uno strato di roccia, con comportamento altamente plastico, è sottoposto ad una massa di roccia fratturata e rigida. L'acqua, transita dalle masse rocciose rigide agli strati di rocce più fini, che assorbono l'umidità e diventano plastiche. Questa trasformazione aumenta la loro deformabilità innescando il movimento delle rocce soprastanti.



Figura 9 - Frana per espansione laterale (USGS, 2004)

Colamenti: Il movimento franoso per colamento si verifica nei terreni sciolti che, una volta saturati, perdono la loro coesione innescando un flusso di materiale che scivola o scorre lungo il pendio. Questo tipo di frana può avvenire anche senza una superficie di scorrimento definita e nel caso in cui la velocità di movimento fosse elevata gli effetti sarebbero devastanti.

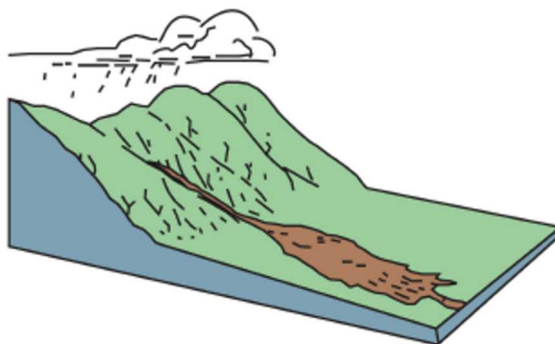


Figura 10 - Frana per colamento (USGS, 2004)

Fenomeni complessi: Si riferiscono a movimenti franosi che combinano due o più tipi distinti di frane già descritti.

Soil creep: È un fenomeno di movimento lento e impercettibile del suolo verso valle. La velocità di questo movimento è di solito dell'ordine di frazioni di millimetro all'anno, ottenendo perciò effetti visivi, come inclinazioni di staccionate e pali verso valle, solo dopo anni. Il movimento associato al soil creep è di natura laminare, considerando che la massa di suolo è composta da innumerevoli lamine di spessore infinitesimo, ognuna avrà una velocità propria, che decresce progressivamente con la profondità. Ciò significa che l'effetto di questo fenomeno è massimo in superficie e minimo in profondità. Le principali cause sono le ripetute espansioni e contrazioni del terreno dovute ai cambiamenti di temperatura, umidità, gelo e disgelo.

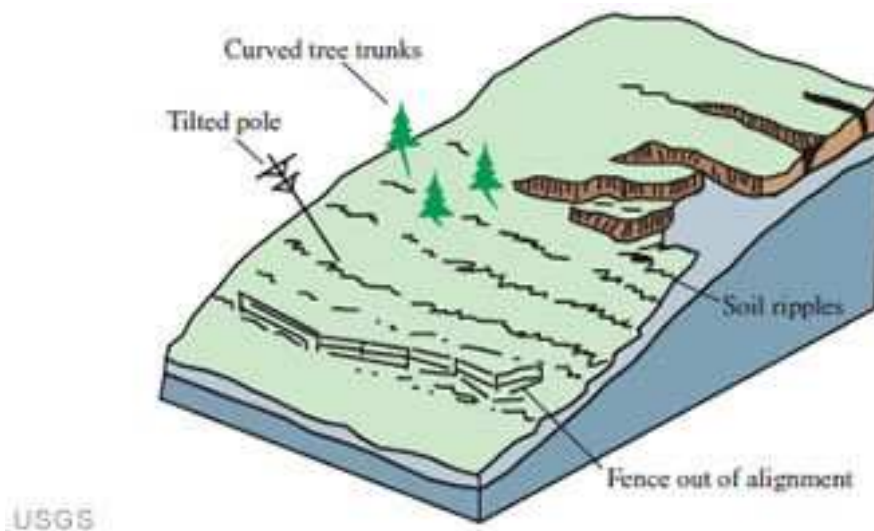


Figura 11 – Soil creep (USGS, 2004)

1.4 Attività dei movimenti franosi

Per comprendere il potenziale rischio dei movimenti franosi è opportuno analizzarne lo stato di attività. L'individuazione dello stato di attività delle frane ci fornisce informazioni sul tempo in cui la frana si è verificata e sul suo comportamento nel tempo. Questo processo di analisi consente di determinare se sia necessario intervenire, poiché stabilisce se vi sia un rischio attuale di nuovi movimenti franosi. Lo stato di attività delle frane si suddivide in:

- Attiva: Frana che si sta muovendo al momento dell'osservazione.
- Sospesa: Frana che al momento dell'osservazione non è attiva, ma si è mossa nell'ultimo ciclo stagionale.
- Inattiva: Frana che al momento dell'osservazione non è attiva, ma si è mossa prima dell'ultimo ciclo stagionale. Le frane inattive si possono suddividere ulteriormente in:
 - Quiescente: Frana inattiva, ma che può essere nuovamente attivata dalle sue cause originali.
 - Naturalmente stabilizzata: Frana inattiva che non può essere nuovamente attivata dalle sue cause originali.

2. INQUADRAMENTO AREA DI STUDIO

L'inquadramento dell'area studio è una sezione che fornisce caratteristiche dettagliate in aspetti geografici, climatici, geologici ed idrologici della zona di interesse. Lo studio in questione è focalizzato nell'area dell'Azienda Agraria Universitaria di “Borgo Ruffini”, frazione del comune di Agugliano (AN), con l'obiettivo di fornire un quadro completo delle caratteristiche fisiche e ambientali.

2.1 Inquadramento geografico

Agugliano sorge sulla cima di un colle (203 m s.l.m.), nell'immediato entroterra anconetano. Il paese dista appena 15 km da Ancona e comprende nella sua giurisdizione gli abitanti di Castel D'Emilio, Borgo Ruffini, la Chiusa e il Molino ⁷. Il comune si estende su una superficie di 21,82 km² e confina con i comuni di Ancona, Camerata Picena, Jesi e Polverigi.

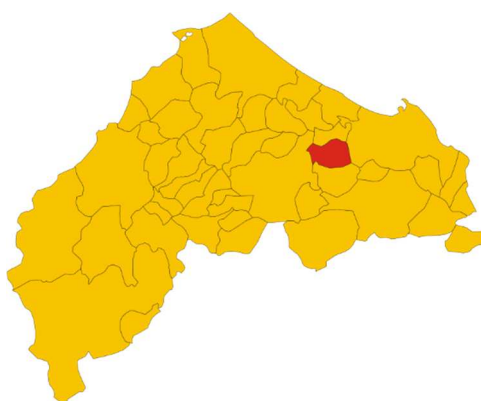


Figura 12 – Ubicazione del comune di Agugliano (Vonvikken, 2011)

⁷ Comune di Agugliano, storia e cultura, (2024)

L'area studiata si trova nella frazione di Borgo Ruffini, è visualizzabile sulle sezioni alla scala 1:10000 della carta tecnica regionale delle Marche n° 293010 e 293050; all'interno della zona, l'Azienda Agraria Universitaria conduce la propria attività di ricerca. I campi di coltivazione di pertinenza dell'azienda sono situati in un terreno pianeggiante, ai piedi dei versanti interessati da diversi fenomeni franosi, costituendone così un pericolo. Inoltre, il lago utilizzato per l'irrigazione delle colture è ubicato all'interno di una frana attiva.



Figura 13 – Inquadramento satellitare area d'indagine (Google Maps, 2024)

2.2 Inquadramento climatico

La particolare posizione geografica di Agugliano, situato nell'entroterra collinare anconetano a circa 15 km dalla costa adriatica, è caratterizzata da un clima submediterraneo, ovvero risente sia dell'influenza marittima ma anche di quella collinare.

Le temperature medie invernali oscillano tra i 2°C e i 4°C, raramente si registrano picchi di freddo sottozero; le temperature medie estive oscillano tra i 30°C e i 32°C, in particolare nei mesi di luglio e agosto.

I dati sulle precipitazioni sono affidati al Servizio Protezione Civile e Sicurezza Locale, i quali redigono e pubblicano annualmente gli "ANNALI IDROLOGICI", nel caso della regione Marche e quindi di Agugliano l'ultimo risale al 2022.

Nella "Sezione B" del documento, ovvero i dati sulla pluviometria, si evince che ad Agugliano è stato utilizzato un pluviometro in telemisura (PP) per le misurazioni, esso è posto a 170 m s.l.m. e ad un'altezza di 2 m dal suolo.

BACINO E STAZIONE	Tipo dell'apparecchio	Quota sul mare	Altezza dell'apparecchio sul suolo	Anno di inizio delle osservazioni
Agugliano	PP	170	2	2003

Figura 14 – Annali Idrologici (Servizio Protezione Civile regione Marche, 2022)

La “TABELLA I” del documento, riporta per ogni stazione la quantità di pioggia caduta giornalmente ed i totali mensili e annuale delle precipitazioni e del numero dei giorni piovosi. Il valore segnato rappresenta quindi la quantità di pioggia e neve (contraddistinta dal simbolo “*”) caduta nelle 24 ore che hanno preceduto la misura, la quale avviene generalmente alle ore 9:00 di ogni giorno.

AGUGLIANO												Giorno	
Bacino: Esino (170m s.l.m.)													
(PP)	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	
0.4				0.8	1.6				12.6	0.4			1
0.2													2
0.2									0.2			1.0	3
			7.0							0.2	10.0	0.2	4
0.6			1.0		1.4						5.0	0.4	5
0.2			0.2	6.8	3.4							7.2	6
0.4	1.0	2.8	0.4	0.2			12.8					2.8	7
						«		11.2	5.2			3.8	8
*8.6			5.0			«							9
7.2						«						37.8	10
						«			1.0	0.2		0.6	11
2.0						«	1.8					0.2	12
	0.2					«		1.4		«	2.2	5.2	13
«	0.2					«					12.6	5.8	14
	2.2								83.4		7.0	5.8	15
	0.2										15.0	1.6	16
									8.0		0.2	0.2	17
								0.2			1.2	0.2	18
								27.0	0.4		29.4		19
1.4	0.2										3.2		20
0.8	1.8		11.4						7.0			0.2	21
			33.6								«		22
			2.8								0.6		23
									4.2			0.2	24
	5.0								19.4			0.2	25
	49.6										0.4	0.2	26
0.2	1.0						30.4	3.4	0.8	0.2			27
0.2					3.2					0.2		0.2	28
0.2		0.2			5.4				12.2	0.2	2.8		29
		5.8			0.2				13.8				30
		7.4						4.0					31
22.6	61.4	24.4	60.8	15.4	«	45.0	47.2	168.2	1.4	89.6	73.8		Totale
4	6	5	5	5	«	3	5	10	0	10	9		mensili
Totale annuo: «											Giorni piovosi: «		N giorni piovosi

Figura 15 – Annali Idrologici, TABELLA I (Servizio Protezione Civile regione Marche, 2022)

La “TABELLA III” del documento, riporta per le stazioni dotate di pluviografo, i dati relativi ai valori più elevati delle precipitazioni registrate nell’anno, per 1, 3, 6, 12 e 24 ore consecutive appartenenti o no allo stesso giorno.

BACINO E STAZIONE	INTERVALLO DI ORE														
	1			3			6			12			24		
	mm	Inizio		mm	Inizio		mm	Inizio		mm	Inizio		mm	Inizio	
		giorno	mese		giorno	mese		giorno	mese		giorno	mese		giorno	mese
Agugliano	30.4	27	Lug	64.8	15	Set	81.2	15	Set	83.2	15	Set	83.4	15	Set

Figura 16 – Annali Idrologici, TABELLA III (Servizio Protezione Civile regione Marche, 2022)

La “TABELLA IV” del documento, riporta i dati relativi ai valori più elevati delle precipitazioni registrate nell’anno, per 1, 2, 3, 4 e 5 giorni consecutivi, appartenenti o no allo stesso mese.

BACINO E STAZIONE	NUMERO DI GIORNI NEL PERIODO														
	1		2			3			4			5			
	mm	data	mm	dal	al	mm	dal	al	mm	dal	al	mm	dal	al	
Agugliano	83.4	15 Set.	91.2	15 Set.	16 Set	91.4	15 Set.	17 Set	91.6	15 Set.	18 Set	91.8	15 Set.	19 Set	

Figura 17 – Annali Idrologici, TABELLA IV (Servizio Protezione Civile regione Marche, 2022)

La “TABELLA V” del documento, riporta i dati relativi al valore, la durata e la data delle precipitazioni di maggiore intensità e di breve durata registrate dai pluviografi nell’anno.

BACINO E STAZIONE	Giorno e mese	Durata ore e minuti	Quantità di precipita- zione mm
Agugliano	27 Lug.	15	26.6
Agugliano	27 Lug.	30	29.6

Figura 18 – Annali Idrologici, TABELLA V (Servizio Protezione Civile regione Marche, 2022)

2.3 Inquadramento geologico regionale

La zona oggetto d'indagine è composta da unità che appartengono alla successione stratigrafica Umbro-Marchigiana. Le formazioni di cui è composta si sono depositate nel bacino omonimo e successivamente sono state deformate, emergendo e andando a comporre la parte esterna della catena montuosa degli Appennini. La successione Umbro-Marchigiana rappresenta all'incirca 230 milioni di anni di storia, che inizia con la deposizione delle Anidridi di Burano⁸. Questa formazione, mai affiorante, riconduce alla presenza, nel Triassico Superiore, di un vasto bacino evaporitico poggiante sul basamento Ercinico; questa situazione perdurò fino alla fine del Triassico, dove il cambiamento climatico portò alla costituzione di un'ambiente bahamiano, con la formazione di una piattaforma carbonatica di acqua bassa. Con l'avvento del Giurassico cominciò a depositarsi la formazione del Calcarea Massiccio: è una delle formazioni arealmente più presenti che va ad estendersi dalle parti prossimali della Toscana fino al sud delle Marche. Nel Giurassico Inferiore la piattaforma iniziò un processo di rottura, formando parti sollevate e parti che annegarono, denominate Horst e Graben; questa rottura si ebbe a causa dell'iniziale ampliamento dell'Oceano Ligure-Piemontese. Nell'Umbro-Marchigiano la differenza tra alti e bassi strutturali si ripercuote sul tipo di sedimentazione, creando due tipologie ben distinte di membri:

⁸ COCCIONI R., GALEOTTI S. & RAGNI D. (1992) - Litho- and biostratigraphy of the Scaglia Bianca formation (Late Albian-Late Cenomanian) in the Umbria-Marche Apennines. 6th Congress Geol. Soc. of Greece & IGCP, 262 Annual Meeting (Athens, May 1992), Abstracts: 4, Athens.

- Gruppo del Bugarone: riconducibile alle aree rialzate con una sedimentazione condensata;
- Successione continua senza particolari lacune.

Si passa quindi a formazioni come la Corniola, le marne del M. Serrone che si interdigitano con il Rosso Ammonitico, i Calcari e Marne a Posidonia e i Calcari Diasprigni. Tutte queste formazioni prendono dei caratteri differenti nella successione condensata, dove si riconoscono le due tipologie di Calcare Massiccio (da ciclo tidale A, da fase di annegamento B); la parte alta dei calcari subisce uno Hiatus deposizionale, il quale si colloca precisamente tra il Giurassico Medio (180 milioni di anni) e il Giurassico Superiore (150,8 circa milioni di anni) ⁹. Nel periodo seguente si assistè al livellamento tra gli Horst e i Graben, con la messa in posto di successioni di ambiente pelagico (ovvero un ambiente di mare aperto); riconosciamo dunque la formazione della Maiolica, le Marne a Fucoidi, la Scaglia Bianca, la Scaglia Rossa e infine la Scaglia Variegata ¹⁰. Con l'avvento dell'Oligocene (30 milioni di anni fa) il dominio Umbro-Marchigiano iniziava a ricevere i prodotti dell'orogenesi appenninica che si stava sviluppando nei settori più alti dell'Appennino Settentrionale, come arenarie torbiditiche. Cominciarono a prendere posto la sedimentazione della Scaglia Cinerea e, nelle parti più esterne, delle formazioni del Bisciario e dello Schiler. A questo punto la zona Umbro-Marchigiana cominciò ad essere interessata dai fenomeni orogenetici

⁹ PIERGIOVANNI F. (1989) - Eventi lito-biostratigrafici nella Scaglia Bianca umbro-marchigiana in connessione con l'episodio anossico del "Livello Bonarelli" (limite Cenomaniano-Turoniano). Boll. Soc. Geol. It., 108: 29-314, 8 figg., 1 tav., Roma.

¹⁰ ALVAREZ W. & MONTANARI A. (1988) - The Scaglia Limestones (Late Cretaceous-Oligocene) in the northeastern Apennines carbonate sequence: stratigraphic context and geological significance.

dovuti al movimento antiorario del blocco Sardo-Corso verso est e dall'apertura del Mar Tirreno. Il dominio Umbro-Marchigiano si trovò, e si trova tuttora, in una zona caratterizzata da fenomeni tettonici compressivi, con la presenza tipica di faglie inverse, pieghe e sovrascorrimenti. Le formazioni riconducibili a questo periodo sono caratterizzate dalla presenza di sedimenti torbiditici in sedimenti terrigeni come la Marnoso Arenacea. Nel Miocene Superiore si verificò una importante crisi di salinità (Messiniano 8 milioni di anni fa), la quale lasciò una sedimentazione di unità evaporitiche tra i sedimenti silicoclastici che si stavano via via formando. È l'unità denominata Gessoso Solfifera e la troviamo nelle zone più esterne del bacino. La successione stratigrafica del dominio Umbro-Marchigiano si può dire chiusa con l'unità delle argille azzurre (per la zona marchigiana), depositi Pliocenici che si trovano nelle attuali zone costiere.



Figura 19 – Schema cronostratigrafico

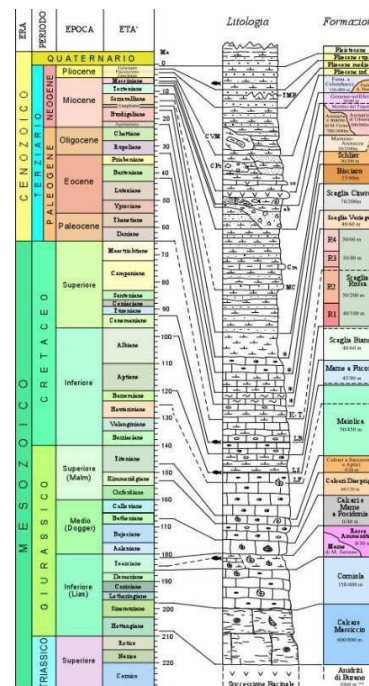


Figura 20 – Cronostratigrafia, litologia, formazioni

2.4 Litostratigrafia

Nella zona in esame affiorano alcune formazioni di ambiente di deposizione marino riferibili alla successione Umbro-Marchigiana. In particolare, si osservano le seguenti unità: Argille Azzurre (FAA), Litofacies pelitico-arenacea (FAAa) e Litofacies arenacea (FAAb).

Su queste unità poggiano alcuni depositi continentali di età quaternaria: Depositi eluvio-colluviali (MUSb2), Depositi alluvionali terrazzati (MUSbn) e Frane senza indizi di evoluzione (MUSa1q).

CARTA GEOLOGICA REGIONALE EDIZIONE CTR

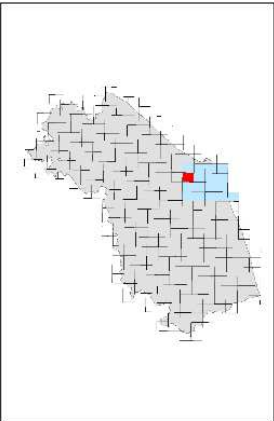
SCALA 1:10.000

0 100 200 300 400 500 metri

PRODOTTO DAL SERVIZIO REGIONALE DELLE INFRASTRUTTURE, TRANSPORTI ED ENERGIA

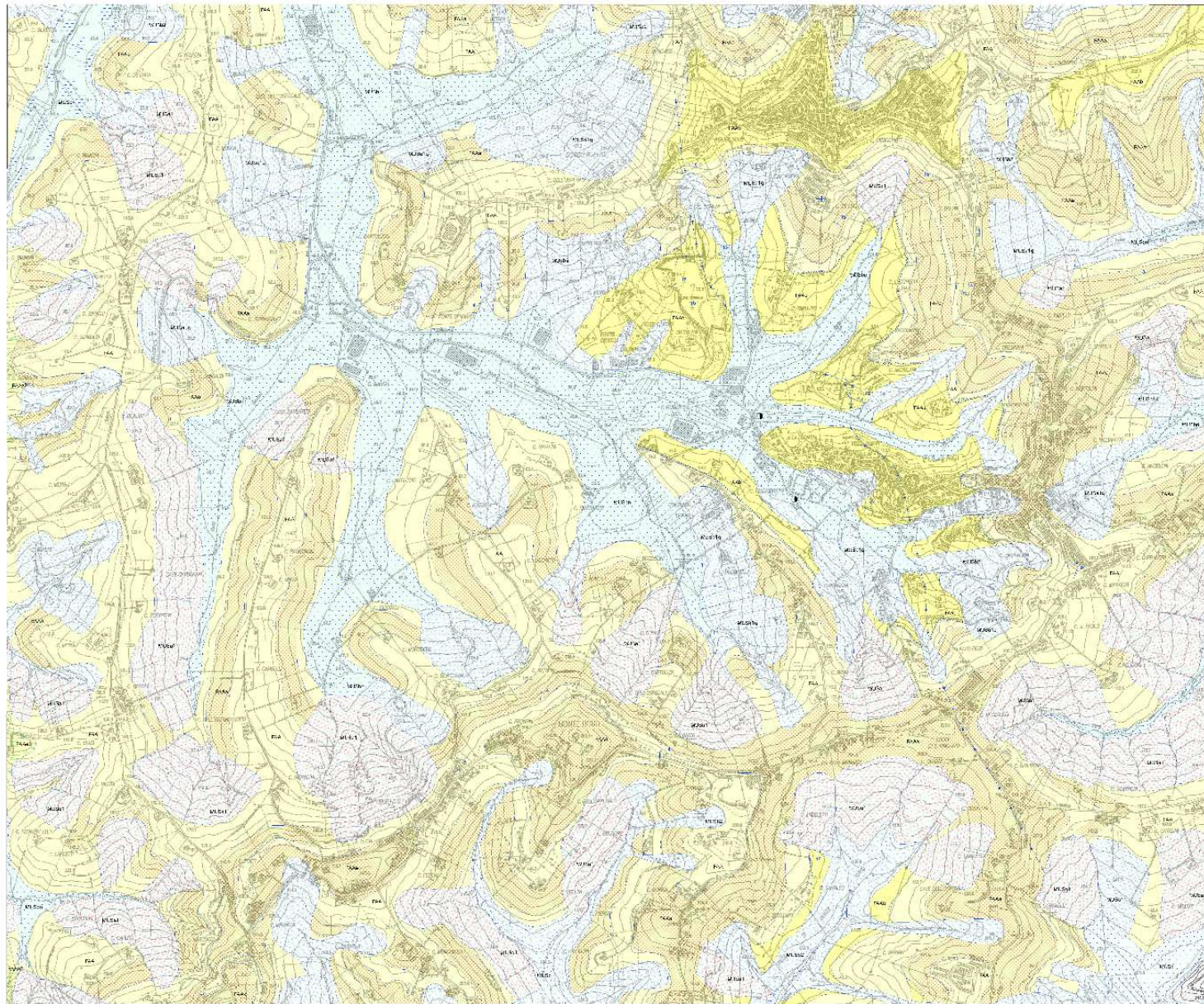
SEZIONE 293050 AGUGLIANO

QUADRO DI POSIZIONE SEZIONE 1:10.000



COORDINATE DEL VERTICE			
COORDINATE UTM	PROJEZIONE	FUSO ORO	
	UTM	N	E
43° 55' 00" N	32T UTM	4 867 111	2 386 351
43° 55' 00" N	32T UTM	4 867 200	2 386 351
43° 55' 00" N	32T UTM	4 867 289	2 386 351
43° 55' 00" N	32T UTM	4 867 378	2 386 351

COORDINATORE SCIENTIFICO: M. Sesti
 DIRETTORE DEL RILEVAMENTO: M. Colonna
 RILEVATORE: A. Bardi
 Rilevamenti eseguiti negli anni 2001-2003



LEGENDA GEOLOGICA

DEPOSITI CONTINENTALI QUATERNARI

- DEPOSITI QUATERNARI**
- Q4a: Fango e sabbie
 - Q4b: Fango e sabbie e argille
 - Q4c: Depositi colluviali
 - Q4d: Depositi fluviali
 - Q4e: Depositi fluviali e lacustri
 - Q4f: Depositi fluviali e lacustri con sabbie e ghiaie
 - Q4g: Depositi fluviali e lacustri con sabbie e ghiaie e argille
 - Q4h: Depositi fluviali e lacustri con sabbie e ghiaie e argille e limi
 - Q4i: Depositi fluviali e lacustri con sabbie e ghiaie e argille e limi e argille

SUCCESSIONE UMBRO-MARCHIGIANO-ROMAGNOLA

- SUCCESSIONE UMBRO-MARCHIGIANO-ROMAGNOLA**
- A: ARGILLE VERDI
 - B: ARGILLE VERDI (sottile)
 - C: ARGILLE VERDI (spesse)
 - D: ARGILLE VERDI (spesse)
 - E: ARGILLE VERDI (spesse)
 - F: ARGILLE VERDI (spesse)
 - G: ARGILLE VERDI (spesse)
 - H: ARGILLE VERDI (spesse)
 - I: ARGILLE VERDI (spesse)
 - J: ARGILLE VERDI (spesse)
 - K: ARGILLE VERDI (spesse)
 - L: ARGILLE VERDI (spesse)
 - M: ARGILLE VERDI (spesse)
 - N: ARGILLE VERDI (spesse)
 - O: ARGILLE VERDI (spesse)
 - P: ARGILLE VERDI (spesse)
 - Q: ARGILLE VERDI (spesse)
 - R: ARGILLE VERDI (spesse)
 - S: ARGILLE VERDI (spesse)
 - T: ARGILLE VERDI (spesse)
 - U: ARGILLE VERDI (spesse)
 - V: ARGILLE VERDI (spesse)
 - W: ARGILLE VERDI (spesse)
 - X: ARGILLE VERDI (spesse)
 - Y: ARGILLE VERDI (spesse)
 - Z: ARGILLE VERDI (spesse)

Figura 21 – Carta geologica regionale n°293050 (Regione Marche, 2001/2003)

2.4.1 Successione marina

- **Argille azzurre (FAA):** Le argille azzurre risalgono al Pliocene inferiore e sono legate alla sedimentazione in ambiente marino poco profondo, dove l'energia delle onde e delle correnti era ridotta. Questo tipo di ambiente è caratterizzato da una sedimentazione fine e continua, con bassa energia che ha favorito la deposizione di argille piuttosto che di sabbie o ghiaie ¹¹. Il loro nome deriva dal colore grigio-azzurro dovuto alla presenza di minerali come smectite e illite. A occhio nudo si presentano come una roccia omogenea, finemente laminata, con strati sottili che possono mostrare una debole stratificazione. Al microscopio, si osserva una struttura a grana fine, con predominanza di minerali argillosi ma con possibili piccole variazioni nelle condizioni deposizionali o nell'apporto di sedimenti più grossolani ¹². Queste variazioni hanno portato alla formazione di **Litofacies pelitico-arenacea (FAAa)**, che contengono un'intercalazione di sottili strati di sabbia fine o altri sedimenti pelitici dovuti ad esempio a occasionali aumenti di energia nel sistema marino o di **Litofacies arenacea (FAAb)**, dove le arenarie sono più frequenti e spesse, dove gli strati indicano fasi di deposizione più dinamica, ad esempio vicino alla costa o in aree di piattaforma con correnti più forti. ¹³

11 Amorosi, Alessandro, et al. "Sedimentology, micropaleontology, and strontium-isotope dating of a lower-middle Pleistocene marine succession ("Argille Azzurre") in the Romagna Apennines, Northern Italy." *Bollettino della Società geologica italiana* 117.3 (1998): 789-806.

12 Channell, J. E. T., et al. "Magnetic stratigraphy and biostratigraphy of Pliocene "argille azzurre"(Northern Apennines, Italy)." *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 110.1-2 (1994): 83-102.

13 Nichols, Gary. *Sedimentology and stratigraphy*. John Wiley & Sons, 2009.

2.4.2 Depositi continentali quaternari

Nell'area di studio sono state osservate diverse coperture del periodo Quaternario legate principalmente a fenomeni gravitativi, alluvionali ed eluviali. In particolare:

- **Depositi eluvio-colluviali (MUSb2):** I litotipi del substrato sono spesso ricoperti da una coltre detritica di origine eluvio-colluviale e/o da frane, con uno spessore variabile. La cui genesi è riconducibile all'alterazione fisica e chimica del substrato e al trasporto dei detriti attraverso ruscellamento superficiale o movimenti di massa. La composizione litologica di questa copertura varia in base alla natura del substrato, ed è prevalentemente costituita da limi argillosi, limi sabbiosi e sabbie limose, riferibili in particolare al periodo Olocene-Pleistocene superiore, inclusi arenacei e/o calcarei eterometrici.¹⁴
- **Depositi alluvionali terrazzati (MUSbn):** Depositi alluvionali più antichi (e debolmente cementati), posti a quote più alte rispetto l'attuale livello del corso d'acqua. Nel caso dell'area studio sono prevalentemente composti da sabbie e sabbie ghiaiose.¹⁵
- **Frane senza indizi di evoluzione (MUSa1q):** Diversamente alle frane attive che continuano a muoversi e modellare il terreno, le frane senza indizi di evoluzione nell'ultimo ciclo stagionale sono considerate sospese.

14 Múcher, Herman, Henk van Steijn, and Frans Kwaad. "Colluvial and mass wasting deposits." Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. Elsevier, 2018. 21-36.

15 Knighton, David. Fluvial forms and processes: a new perspective. Routledge, 2014.

2.5 Assetto strutturale

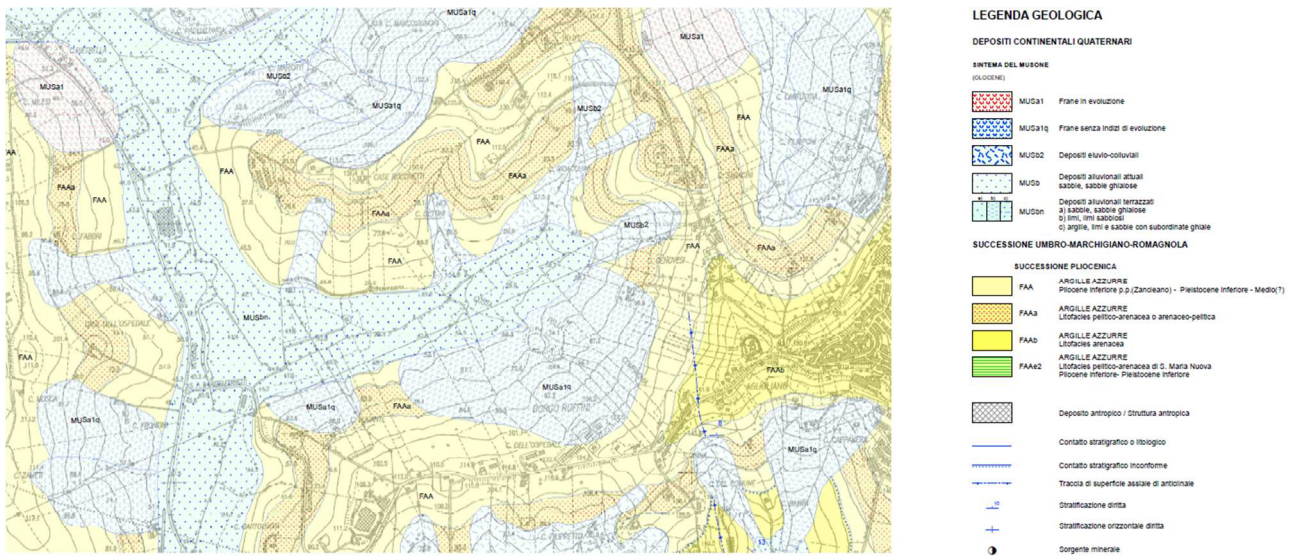


Figura 22 – Carta geologica regionale (Regione Marche, 2001/2003)

Nello stralcio dei fogli 293010 e 293050 è possibile distinguere strutture legate a deformazioni in regime duttile.

Nell'area di studio è evidente una piega anticlinale di "Agugliano", che risulta avere direzione NNW-SSE.

2.6 Inquadramento geomorfologico

La zona di studio è caratterizzata principalmente da morfologia collinare. In generale possiamo suddividere la zona in due morfologie principali:

- Zone di versante
- Zona di fondovalle in cui opera l'Azienda Agraria Universitaria

Nei versanti sono visibili molti fenomeni di instabilità, sono presenti infatti movimenti di massa di diverse tipologie come: frane per scorrimento in fase inattiva e frane per colamento, che possono essere sia attive che inattive. Questi fenomeni dipendono dalla natura litologica delle formazioni affioranti, costituite principalmente da rocce di tipo marnoso, marnoso-pelitiche e pelitiche (GS3), rocce caratterizzate da alternanza di strati diversi (GS4) e da rocce prevalentemente arenitiche (GS5). La combinazione di questi litotipi costituisce al terreno un'elevata erodibilità, rendendo i versanti particolarmente suscettibili a movimenti gravitativi.

L'idrografia dei versanti è contrassegnata da piccoli corsi d'acqua, con portate basse o del tutto assenti nei mesi estivi; mentre nei mesi invernali, a seguito di elevate precipitazioni, aumentano in modo significativo. La particolare morfologia superficiale dei versanti, insieme all'alto livello di erodibilità dei terreni, favorisce il ruscellamento superficiale delle acque piovane. Aumentando il pericolo di erosione del suolo e di fenomeni di instabilità, soprattutto durante le piogge intense. Un ulteriore elemento di interesse geomorfologico è la presenza di un lago artificiale, situato sul versante orientato verso nord, utilizzato a scopo irriguo.

3. MATERIALI E METODI

3.1 Materiali

La scelta mirata degli strumenti e delle risorse è fondamentale per assicurare precisione e affidabilità dei dati raccolti e delle analisi eseguite. Questo capitolo include una spiegazione completa dei materiali fisici impiegati sul campo, così come i sistemi utilizzati per supportare la ricerca e dati. Ogni risorsa è stata selezionata per rispondere a vari aspetti della ricerca e garantire un alto livello di metodologia.

3.1.1 Cartografia

La Cartografia comprende l'insieme di studi e operazioni scientifiche, artistiche e tecniche che, basandosi sia su osservazioni dirette sia su documentazione preesistente, mirano a elaborare ed allestire carte, piante e altre forme di rappresentazione, con lo scopo di riprodurre in maniera precisa la realtà.¹⁶

Con l'evoluzione della tecnologia, anche i sistemi cartografici hanno subito un significativo aggiornamento e miglioramento. Le innovazioni tecnologiche hanno rivoluzionato il modo in cui vengono creati, gestiti e utilizzati i dati cartografici, portando a progressi notevoli nella precisione e nell'efficacia delle rappresentazioni topografiche e tematiche, arrivando ai più recenti sviluppi come:

¹⁶ ICA (International Cartographic Association)

- GPS: Global Positioning System: Sistema di posizionamento globale che sfrutta una rete di satelliti artificiali in orbita, basati sul sistema di riferimento WGS84, per determinare con precisione le coordinate di qualsiasi punto sulla superficie terrestre, con un margine di errore inferiore al centimetro.
- GIS (Geographic Information System): Sistemi informativi geografici computerizzati che consentono l'acquisizione, la registrazione, l'analisi, la visualizzazione e la restituzione di dati spaziali e geografici. Questi sistemi permettono di gestire e interpretare informazioni geografiche attraverso la combinazione di dati e strumenti analitici per una comprensione approfondita e una gestione efficace delle informazioni territoriali.

Grazie a questi sviluppi, le mappe possono ora includere una vasta gamma di informazioni tematiche e analitiche, offrendo rappresentazioni più dettagliate e interattive del territorio.

In particolare, nell'area di studio sono state utilizzate le seguenti mappe:

- Cartografia di base IGM 1:25000 (Geoportale nazionale)
- Carta geologica regionale 1:10000
- Carta delle litologie della regione Marche zona SUD 1:100000
- Carta del reticolo idrografico (Geoportale nazionale)
- Ortofoto nazionale 1988,1994,2000,2006,2012 (Geoportale nazionale)
- Carta aree a pericolosità frana e pericolosità idraulica 2021 (ISPRA)

Quaderno 13

Il Quaderno 13 è un documento prodotto dall'ISPRA, contenente le linee guida e i criteri metodologici per la cartografia italiana. Lo scopo del Quaderno 13 è quello di standardizzare la cartografia geomorfologica, fornendo un insieme di norme e simbologie per classificarne i fenomeni e supportare la gestione del territorio.¹⁷

FORME GRAVITATIVE⁽²⁾

FORME DI ACCUMULO

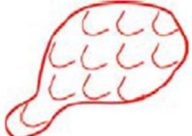

Sigla	Nome forma	Attività		Simbolo (gradazioni di rosso)			Note Informazioni in BD
		A	R	poligono	linea	punto	
GR 21	Corpo di frana per colamento lento di terra/fango <i>Earth/mud flow body</i>	X					Le convessità vanno orientate verso valle. <i>Database:</i> specificare il volume di materiale coinvolto e eventualmente la profondità della superficie/i di scorrimento. Segnalare la presenza di eventuali strumenti di monitoraggio.

Figura 24 – Forme gravitative (ISPRA, 2021)

¹⁷ ISPRA, Quaderno 13 (2021)

FORME FLUVIALI, FLUVIO-GLACIALI E DOVUTE AL DILAVAMENTO⁽³⁾

FORME DI EROSIONE


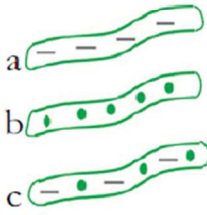
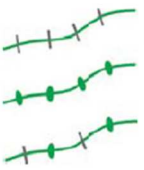
Sigla	Nome forma	Attività		Simbolo (gradazioni di verde)			Note Informazioni in BD
		A	R	poligono	linea	punto	
FD 11	Solco da ruscellamento concentrato <i>Gully/Barranco</i>	X					<i>Database:</i> dimensioni (larghezza, profondità).
FD 32	Alveo fluviale a - in roccia b - in depositi alluvionali c - in roccia e alluvioni <i>Fluvial channel</i> a - <i>bedrock</i> b - <i>alluvial</i> c - <i>semi-alluvial</i>	X	X				Simboli della roccia e/o del deposito all'interno del simbolo. <i>Database:</i> spessore e tipologia dei depositi (D_{50} percentuali). Specificare se si tratta di meandri incastrati.

Figura 25 – Forme fluviali, fluvio-glaciali e dovute al dilavamento (ISPRA, 2021)

FORME ANTROPICHE⁽⁸⁾

FORME DI EROSIONE

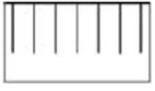
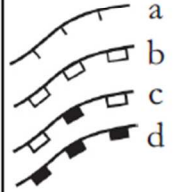
Sigla	Nome forma	Simbolo			Note Informazioni in BD
		poligono	linea	punto	
AN 1	Scarpata di scavo: a - ≤ 5 m; b - >5 m ≤ 15 m; c - > 15 m ≤ 50 m; d - > 50 m <i>Man-made scarp edge</i>				Orientare i trattini e i rettangoli verso valle. <i>Database:</i> indicare il motivo dello scavo.

Figura 26 – Forme antropiche (ISPRA, 2021)

3.1.2 Antenna GNSS

Il posizionamento satellitare dell'area oggetto di rilievo è stato eseguito con l'antenna GNSS Topcon Hiper, equipaggiata con una palina telescopica, progettata per garantire la messa in bolla e assicurare un preciso allineamento verticale. L'antenna raccoglie i dati di campagna tramite il sistema GNSS (Global Navigation Satellite System), i quali vengono acquisiti, tracciati e gestiti dal software "Mercurio" utilizzato dal tablet.



Figura 27 – Antenna GNSS Topcon Hiper equipaggiata con palina telescopica e tablet

3.1.3 Drone

La mappatura del terreno è stata eseguita dal drone DJI Matrice 350 RTK, equipaggiato con la camera LiDAR DJI Zenmuse L2. La combinazione dei due strumenti è stata ottimale per la precisione e affidabilità dei dati raccolti, assicurando un'elevata e dettagliata mappatura dell'area di studio.



Figura 28 – Drone equipaggiato con camera LiDAR

Il DJI Matrice 350 RTK, è un drone professionale di ultima generazione. Le principali caratteristiche per il quale è stato optato nella mappatura dell'area a Borgo Ruffini sono:¹⁸

- **Autonomia di volo:** Il drone è dotato di un sistema a doppia batteria TB65, che permette l'autonomia di volo per un massimo di 25 minuti. Prima di scaricarsi, grazie alla funzione di ritorno automatico, il drone è in grado di ritornare da solo al punto di decollo. Avendo in dotazione un totale di 6 batterie, è garantita l'acquisizione dei dati per circa 75 minuti effettivi.
- **Precisione:** Il drone è dotato di una cinematica in tempo reale (RTK: Real-Time Kinematics), che invia dati in tempo reale sia al controller che ai satelliti, garantendo un grado di precisione a livello centimetrico.
- **Sicurezza e resistenza:** Il drone è dotato di radar CSM in grado di rilevare ostacoli sia verso l'alto che lungo un raggio orizzontale di 360°, permettendo di evitarli in tempo. Inoltre, il drone ha un grado di protezione IP55 che lo rende resistente all'acqua, alla polvere e a temperature tra -20°C e 50°C.
- **Trasmissione dati a lunga distanza:** Il drone adotta la Trasmissione DJI O3 Enterprise, che supporta feed live HD 1080p a tre canali, con una distanza massima di 20 km dal controller "DJI RC Plus".

¹⁸ Le caratteristiche elencate sono tratte dal sito del produttore (<https://enterprise.dji.com/it/matrice-350-rtk>)



Figura 29 – Controller DJI RC Plus

- Stabilità dei carichi utili: Il drone supporta un singolo gimbal verso il basso, un doppio gimbal verso il basso e un singolo gimbal verso l'alto, assicurando che la camera LiDAR DJI Zenmuse L2 rimanga stabile e allineata durante il volo, riducendo vibrazioni e movimenti indesiderati.

3.1.4 Camera LiDAR

La camera LiDAR DJI Zenmuse L2, è uno strumento professionale di ultima generazione. Le principali caratteristiche per la quale è stata optata nella mappatura dell'area a Borgo Ruffini sono: ¹⁹

- **Facilità di pianificazione del volo:** La camera LiDAR è compatibile con il software DJI Pilot 2, che permette di programmare in anteprima, le traiettorie di volo necessarie per la mappatura del terreno, rendendo automatizzato l'acquisizione dei dati e garantendo la copertura completa dell'area di rilievo con alta efficienza e precisione.
- **Rilevamento e Mappatura 3D:** La camera è dotata di telerilevamento LiDAR (Light Detection and Ranging) che utilizza impulsi laser per determinare con precisione le distanze tra il sensore e il terreno o gli oggetti. Programmando un'altezza costante dal suolo, è in grado di rappresentare una dettagliata mappatura 3D, grazie ai sensori che rilevano e riportano le variazioni di altezza della camera e drone, creando una nuvola di punti.
- **Alta precisione nelle misurazioni:** Ogni impulso laser copre un'area di 4x12 cm² a una distanza di 100 m. Grazie alla doppia modalità di scansione e alla capacità di rilevare dettagli su oggetti di piccole dimensioni, la camera LiDAR è in grado di penetrare la vegetazione più densa e di generare modelli digitali del terreno (DTM) molto dettagliati.

¹⁹ Le caratteristiche elencate sono tratte dal sito del produttore (<https://enterprise.dji.com/it/zenmuse-l2>)

- **Compatibilità col drone RTK:** Il sistema IMU ad alta precisione della camera LiDAR, integrato con il sistema di posizionamento RTK del drone, permette alla camera di ottenere informazioni estremamente precise sulla posizione, sulla velocità e sull'altitudine assolute.
- **Alta risoluzione delle immagini complessive:** Ogni pixel ha una dimensione di $3,3 \mu\text{m}$ e il sensore offre una risoluzione complessiva di 20 MP. Questo garantisce che la qualità delle immagini generate durante la creazione di una nuvola di punti sia elevata e dettagliata.
- **Compatibilità con il GIS:** I dati raccolti con la camera LiDAR sono già georeferenziati, permettendo l'utilizzo diretto in software come il GIS.



Figura 30 – Camera LiDAR DJI Zenmuse L2

3.1.5 Software Mercurio

Il software Mercurio, sviluppato da Topcon, è utilizzato per la gestione e l'analisi di dati geospaziali in ambito topografico, ingegneristico e di rilevamento del territorio.

Le principali caratteristiche per il quale è stato optato nella scelta del rilievo di Borgo Ruffini sono:²⁰

- **Elaborazione di dati geospaziali:** Il software permette di elaborare e gestire i dati raccolti durante la missione, e di trasformarli in mappe digitali, modelli 3D o rappresentazioni grafiche utilizzabili per analisi avanzate.
- **Automazione dei processi:** Il software permette di automatizzare l'integrazione dei dati rendendo più facile e veloce il lavoro all'operatore.
- **Compatibilità con sensori avanzati:** Il software supporta l'antenna GNSS e la camera LiDAR DJI Zenmuse L2, permettendo quindi di importare, elaborare e visualizzare dati provenienti dai dispositivi di misurazione, assicurando un'elevata precisione nei risultati.
- **Compatibilità con il GIS:** Il software supporta i formati di file geospaziali e sistemi GIS, facilitando la condivisione e il trasferimento tra software e differenti piattaforme.

²⁰ Le caratteristiche elencate sono tratte dal sito del produttore (<https://www.geopro.it/programmi/mercurio>)

3.1.6 Software DJI Pilot 2

Il software DJI Pilot 2, sviluppato da DJI Enterprise, è utilizzato per il controllo dei droni. Il software consente di pianificare, eseguire e monitorare le missioni di volo rendendole automatizzate. Le principali caratteristiche per il quale è stato optato nella scelta del rilievo di Borgo Ruffini sono: ²¹

- Pianificazione del volo: Definendo parametri di volo come altitudine, velocità e percorso, assicura una corretta e completa copertura dell'area.
- Automazione del volo: Avendo pianificato il volo, il drone esegue le missioni in modo autonomo, eliminando il rischio di errori umani dovuti al controllo manuale.
- Monitoraggio in tempo reale: Consente di visualizzare i parametri preimpostati e i dati del volo in tempo reale, permettendo all'operatore di intervenire se necessario.
- Compatibilità con sensori avanzati: Il software supporta la camera LiDAR DJI Zenmuse L2, permettendo quindi di acquisire dati di alta qualità durante il volo e di trasformarli in mappe e modelli 3D dettagliati.

²¹Le caratteristiche elencate del software DJI Pilot 2 sono descritte nel manuale d'uso del drone DJI Matrice 350 RTK (https://dl.djicdn.com/downloads/matrice_350_rtk/Matrice_350_RTK_User_Manual_v1.0_it.pdf)

3.1.7 GIS

Il GIS (Geographic Information System) è un insieme di sistemi informativi che ci permettono di organizzare, analizzare, archiviare, condividere e visualizzare in una mappa le informazioni che riguardano il territorio. ArcGIS e QGIS sono i software utilizzati per operare all'interno di un sistema GIS, contengono dei database relazionali, ovvero dei database in cui si possono archiviare grandi quantità di dati georeferenziati, dati a cui si possono associare informazioni relative alle posizioni geografiche all'interno di un particolare sistema geodetico di riferimento.

Nel caso studio è stato utilizzato ArcGIS Enterprise. Le principali caratteristiche per il quale è stato impiegato sono: ²²

- Gestione dei dati spaziali: ArcGIS Enterprise permette l'importazione, la gestione e l'organizzazione di dati spaziali di diverse tipologie come shapefile, modelli digitali del terreno (DTM), dati raster e dati ottenuti tramite tecnologie come LiDAR. Grazie alla sua versatilità è possibile integrare anche informazioni provenienti da diverse fonti che possono includere dati satellitari, misurazioni sul campo e rilievi topografici. Questo vasto processo di integrazione consente di avere una visione completa e dettagliata del territorio, poiché andando a sovrapporre i dati ottenuti dalle diverse tipologie di acquisizione, si evidenziano

²² Le caratteristiche elencate sono tratte dal sito del produttore (<https://www.esri.com/it-it/arcgis/products/arcgis-online/overview>)

la relazione tra diversi elementi come la morfologia del suolo, la presenza di corsi d'acqua, l'erosione...

- **Analisi geospaziale:** ArcGIS Enterprise dispone di un'estesa selezione di strumenti per le analisi spaziali, come la creazione di buffer, operazioni di overlay e altre tecniche di elaborazione dati. Questi strumenti sono stati essenziali nello studio delle caratteristiche territoriali, consentendo di esaminare dettagliatamente i rapporti tra i diversi parametri. Grazie a queste funzionalità è stato possibile individuare le aree soggette a rischio geomorfologico. Il software è risultato quindi indispensabile per supportare decisioni relative alla mitigazione di queste problematiche.

3.2 Metodi

L'ortofoto più recente dell'area oggetto di studio risale al 2012, perciò si è ritenuto necessario aggiornarlo, con un modello rappresentativo della situazione attuale del territorio. Il rilievo integrato aerofotogrammetrico e LiDAR è stato effettuato impiegando tecnologie avanzate come il drone DJI Matrice 350 RTK, equipaggiato con la camera LiDAR DJI Zenmuse L2.

Questa operazione, relativamente complessa sia dal punto di vista organizzativo che economico, è stata resa possibile grazie alla collaborazione tra più dipartimenti dell'Università Politecnica delle Marche. In particolare i dipartimenti di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA), di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU), di Ingegneria dell'Informazione (DII) e Scienze Agrarie, Alimentari ed Ambientali (D3A) hanno lavorato in sinergia con l'obiettivo di fornire un quadro completo delle caratteristiche fisiche e ambientali, relative al territorio dell'Azienda Agraria di "Borgo Ruffini", necessarie per il proseguo di gestione e lavorazione in condizioni ottimali dell'area coltivata, andando a mitigare eventuali problematiche relative al rischio geomorfologico. In particolare, si ritiene opportuno attribuire i meriti di questa operazione al professore Pierdicca Roberto e la professoressa Malinverni Eva Savina per il dipartimento DICEA e al professore Mancini Adriano per il dipartimento DII.

Di seguito viene riportato il report della missione compresa tra il 10/05/2024 e il 17/05/2024:

3.2.1 Pianificazione rilievo aerofotogrammetrico e LiDAR

Prima di procedere con l'esecuzione del rilievo integrato aerofotogrammetrico e LiDAR, è fondamentale affrontare una fase preliminare di pianificazione dettagliata. Questa fase ha lo scopo di definire gli obiettivi specifici della missione, andando ad ottimizzare l'intero percorso di volo del drone, al fine di ottenere risultati qualitativi e precisi.

Nell'area di studio è stata effettuata la seguente pianificazione:

- Delimitazione dell'area di interesse: Consiste nel tracciare l'area esatta del terreno nel quale si andrà ad eseguire la mappatura, definendone i confini.
- Identificazione dell'area di interesse: Consiste nel valutare l'assetto geografico e ambientale dell'area di studio. Utilizzando i dati satellitari forniti da Google Earth e Google Maps è stato possibile individuare ostacoli naturali e antropici. Nello specifico, l'area di rilievo è soggetta a difficoltà come diversi casolari sparsi e una fitta vegetazione costituita da numerosi alberi in zone specifiche, che avrebbero potuto rappresentare un problema durante il volo del drone. Per ovviare a tali difficoltà si è impostato un'altitudine di volo maggiore, in modo che il drone riesca a sorvolare agevolmente questi ostacoli.

- **Punti di controllo a terra:** Per ottenere una georeferenziazione precisa e affidabile del rilievo integrato aerofotogrammetrico e LiDAR sono stati posizionati in punti strategici all'interno dell'area dei target. Questi punti di controllo costituiscono una rete di riferimento che permette di correlare i dati acquisiti dal drone col sistema di coordinate reali. A tal fine, è stato necessario misurare con precisione le coordinate del centro dei punti con l'antenna GNSS. Inoltre, i settori triangolari formati dall'incrocio di due diagonali che caratterizzano i target, sono colorati alternativamente di giallo e nero, per creare un forte contrasto con la natura che li circonda, rendendoli ben visibili dalle immagini aeree scattate dal drone.



Figura 31 – Misurazione delle coordinate dei Punti di controllo a terra

- Definizione dei parametri di volo: Utilizzando il software DJI Pilot 2 è possibile pianificare le condizioni di volo. Nell'area di studio sono stati impostati i seguenti parametri:
 - Altitudine di volo: 60 m dal suolo, determinata in conformità al vincolo geografico, che consente di volare ad un'altitudine massima di 60 m. Il parametro considera anche la topografia dell'area e la risoluzione delle immagini ottenute dalla LiDAR, che funziona efficacemente anche a tali altezze.
 - Copertura dell'area: Si suddivide l'area in "blocchi di volo" definiti in base alla grandezza dell'area che il drone riesce a rilevare con un solo volo, affinché riesca a tornare al punto di decollo prima del completo esaurimento delle batterie.
 - Sovrapposizione delle immagini: 80%, impostata per garantire che il software possa unire correttamente le immagini successive e generare modelli 3D accurati.
 - Velocità di volo: mediamente 5,3 m/s con picchi fino a 6 m/s, impostata in modo da garantire alla LiDAR di catturare immagini di alta qualità.
 - Durata massima di un volo: 25 min, impostata in base alla capacità massima della batteria del drone, che è in grado effettuare e tornare al punto di decollo in completa autonomia.

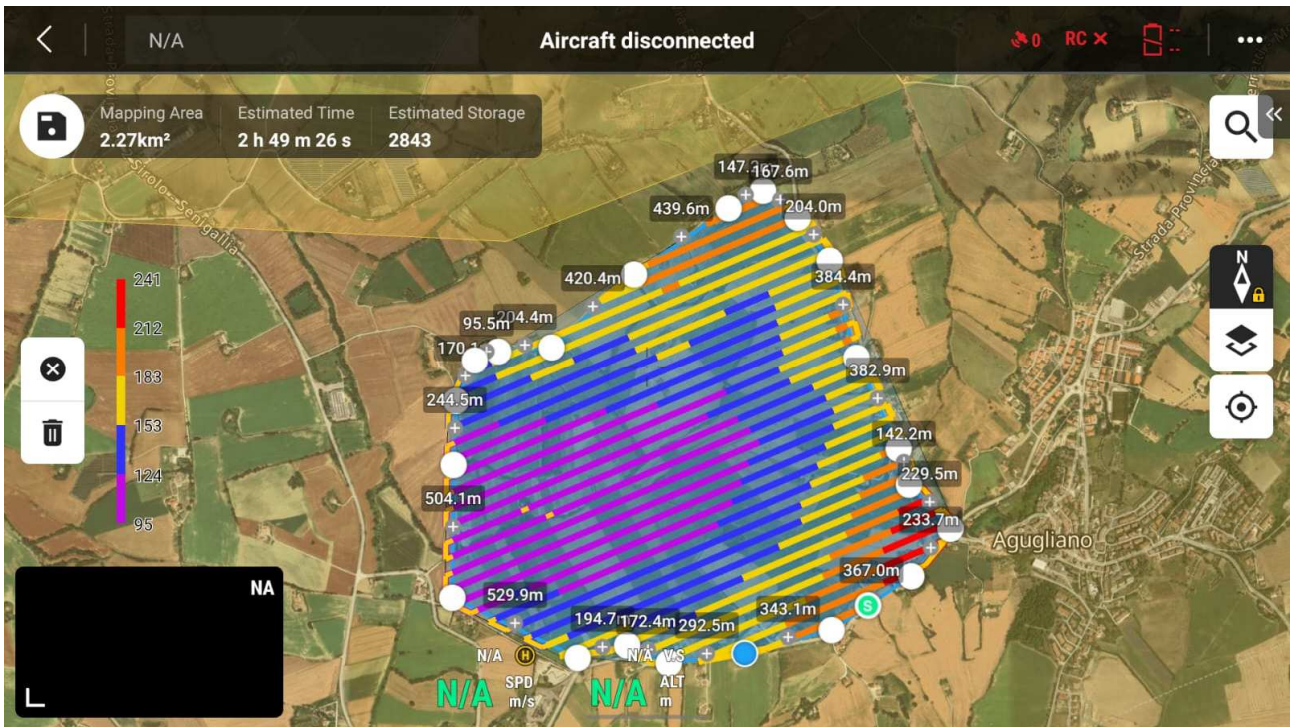


Figura 32 – Piano di volo

- Preparazione del drone: Estrarre il drone DJI Matrice 350 RTK dalla valigia rigida, dispiegare le ali e montare i supporti inferiori garantendo la sopraelevazione da terra durante la fase di decollo e atterraggio.
- Preparazione della camera LiDAR: Fissare la camera LiDAR DJI Zenmuse L2 al drone DJI Matrice 350 RTK tramite l'apposito supporto Gimbal, verificando che sia allineata e stabile.



Figura 33 – Preparazione del drone

3.2.2 Rilievo aerofotogrammetrico e LiDAR

Il volo è stato eseguito dall'ingegnere Stefano Chiappini con il supporto dei tesisti Alberto Pierantoni e Tommaso Cancellieri.

- Decollo: Utilizzando il software DJI Pilot 2, il drone decolla in modo autonomo e segue le traiettorie prestabilite automaticamente. Tuttavia, il pilota mantiene il controllo manuale in caso di avarie.



Figura 34 – Decollo del drone

- Raccolta dati:
 - Sensore LiDAR: Durante il volo la camera LiDAR DJI Zenmuse L2 emette impulsi laser per determinare con precisione le distanze tra il sensore e il terreno o gli oggetti, rappresentando una dettagliata mappatura 3D. Grazie al sensore LiDAR si ottengono informazioni geomorfologiche precise anche nella vegetazione più densa.

- Camera: oltre al sensore LiDAR della camera, il drone è dotato di camera ottica che permette di scattare immagini ad alta risoluzione. La combinazione delle immagini con i dati Lidar permettono di ottenere nuvole di punti colorate.
- Dati GNSS e IMU: Il drone utilizza un sistema GNSS che combinato ai punti di controllo a terra, rilevati dall'antenna GNSS nella fase preliminare di pianificazione, ottengono informazioni di posizionamento precise e in tempo reale, mentre il sistema IMU garantisce la corretta stabilizzazione.



Figura 35 – Posizione e traiettoria del drone in volo durante la raccolta dati

- Atterraggio: Prima di scaricarsi, grazie alla funzione di ritorno automatico, il drone è in grado di tornare da solo al punto di decollo.



Figura 36 – Atterraggio del drone

- Verifica: Terminata la missione di raccolta dati viene effettuato un controllo sulla qualità e completezza delle informazioni acquisite.
- Backup: I dati raccolti durante la missione vengono trasferiti dal drone e Sensore LiDAR a un dispositivo di archiviazione esterno per la successiva elaborazione.

3.2.4 Estrazione dei parametri morfometrici

Per integrare i dati acquisiti dalla camera LiDAR e dalla camera ottica del drone in un sistema GIS è opportuno seguire una serie di passaggi, verificando inizialmente che siano georeferenziati e associati allo stesso sistema di riferimento, nel caso studio è il WGS84. Avendo verificato le due condizioni iniziali, si procede con la generazione del modello DTM dalle nuvole di punti acquisite dalla LiDAR in combinazione con le immagini acquisite dal drone e alla generazione dell'ortofoto dalle immagini acquisite dal drone. In questa sezione verranno riportati i parametri morfometrici utilizzati per identificare il tipo di movimento franoso e le zone soggette a smottamento:

3.2.5 DTM

Il DTM (Digital Terrain Model) è una rappresentazione digitale del terreno che si concentra sulla topografia della superficie. A differenza di un modello digitale di elevazione (DEM), che può includere elementi come vegetazione e costruzioni, il DTM rappresenta esclusivamente il terreno nudo, eliminando strutture artificiali e vegetazione. Questa caratteristica lo rende utile per analisi geologiche e geomorfologiche. In particolare, il DTM fornisce valori di elevazione per ogni punto di una griglia regolare, consentendo una visualizzazione dettagliata delle variazioni di altitudine.²³

²³ TERRAIN, ADIGITAL. "Digital terrain models: an overview." Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 44.12 (1978): 1481-1485.

Il DTM viene definito attraverso diverse tecniche di interpolazione. In particolare, per il caso studio, è stato impiegato il metodo IDW (Inverse Distance Weighting) ²⁴, che può essere espresso matematicamente nella seguente forma:

$$Z(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

Dove:

- $Z(x, y)$: Valore interpolato per la posizione (x, y) .
- Z_i : Valore di elevazione dei punti di campionamento.
- d_i : Distanza tra il punto di campionamento i e il punto da interpolare (x, y) .
- p : Grado di influenza dei punti vicini.
- Numeratore $\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p}$: Somma dei valori di elevazione (Z_i) pesati in base alla distanza (d_i) elevata alla potenza p .
- Denominatore $\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}$: Somma dei pesi, che serve a normalizzare il valore interpolato.

²⁴ <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/idw.htm>

L'estrazione dei parametri morfometrici è stata eseguita a partire dal DTM utilizzando gli strumenti integrati in ArcGIS Enterprise. Ogni parametro è espresso attraverso una formula matematica specifica, che consente di quantificare con precisione una determinata caratteristica del terreno:

Parametro geomorfologico	Formula
Pendenza	$\tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2}$ [°]
Curvatura longitudinale	$\frac{\frac{d^2z}{dx^2}\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \frac{d^2z}{dy^2}\left(\frac{dz}{dy}\right)^2 + 2\frac{d^2z}{dxdy}\frac{dz}{dx}\frac{dz}{dy}}{\left(1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2\right)^{3/2}}$ [L ⁻¹]
Curvatura trasversale	$\frac{\frac{d^2z}{dx^2}\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \frac{d^2z}{dy^2}\left(\frac{dz}{dy}\right)^2 - 2\frac{d^2z}{dxdy}\frac{dz}{dx}\frac{dz}{dy}}{\left(\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2\right)^{3/2}}$ [L ⁻¹]
Esposizione	$\left(\frac{180}{\pi}\right) \cdot \text{atan2}\left(\frac{dz}{dy}, -\frac{dz}{dx}\right)$ [°]
Accumulo di flusso	$\sum_k F_k(i, j)$ [L/s/ha]

3.2.6 Pendenza

Il metodo utilizzato da ArcGIS Enterprise è quello enunciato da Horn ²⁵ . In particolare, lo strumento pendenza (slope) calcola il tasso di variazione più elevato dell'altitudine (coordinata z) da ogni cella a quelle immediatamente circostanti alla considerata.²⁶

In sostanza, calcola la variazione massima del valore di quota attraverso la distanza tra la cella centrale e quelle adiacenti.

$$\text{Pendenza} = \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2}$$

Dove:

- $\frac{dz}{dx}$: Variazione dell'altitudine lungo la direzione X (est-ovest)
- $\frac{dz}{dy}$: Variazione dell'altitudine lungo la direzione Y (nord-sud)

Come evidenziato in precedenza, per calcolare la pendenza il software determina le derivate parziali $\left(\frac{dz}{dx} ; \frac{dz}{dy}\right)$ analizzando una finestra 3x3 di celle attorno a quella centrale.

²⁵ Horn, Berthold KP. "Hill shading and the reflectance map." Proceedings of the IEEE 69.1 (1981): 14-47.

²⁶ <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>

- $\frac{dz}{dx} = \frac{(c + 2f + i) - (a + 2d + g)}{8 \times \text{dimensione della cella in direzione orizzontale}}$
- $\frac{dz}{dy} = \frac{(g + 2h + i) - (a + 2b + c)}{8 \times \text{dimensione della cella in direzione verticale}}$

a	b	c
d	e	f
g	h	i

Figura 38 – Finestra 3x3 con nominazione delle celle

(<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>)

Dopo aver calcolato la pendenza, è possibile classificarla in base ai gradi di inclinazione. Questa classificazione riveste un'importanza fondamentale in geologia, poiché le inclinazioni del terreno influenzano in modo significativo il rischio di frane e altri fenomeni di instabilità del suolo. Le pendenze possono essere suddivise nei seguenti intervalli:

- Pendenza bassa: $< 10^\circ$
- Pendenza moderata: $10^\circ < P < 25^\circ$
- Pendenza elevata: $> 25^\circ$

3.2.7 Curvatura

Il metodo utilizzato da ArcGIS Enterprise si basa sullo stesso principio del calcolo della pendenza. In particolare, lo strumento curvatura (curvature) calcola il tasso di variazione della pendenza di una superficie, da ogni cella a quelle immediatamente circostanti alla considerata.²⁷

Il concetto matematico di curvatura ha visto contributi da parte di vari matematici come Pierre-Simon Laplace che ha introdotto il concetto di “Laplaciano”²⁸ passando poi a Carl Friedrich Gauss che ha introdotto il concetto di “Curva Gaussiana”²⁹. Come evidenziato in precedenza la pendenza è espressa:

$$\text{Pendenza} = \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2}$$

Essendo la curvatura la variazione della pendenza di una superficie, per determinare la formula matematica della curvatura è necessario derivare nuovamente la pendenza:

$$\text{Curvatura} = \frac{d^2z}{dx^2} + \frac{d^2z}{dy^2} = \nabla^2 z \quad [L^{-1}]$$

²⁷ https://spatialanalysisonline.com/HTML/profiles_and_curvature.htm

²⁸ Laplace, Pierre Simon. *Théorie analytique des probabilités*. Courcier, 1820.

²⁹ Gauss, Carl Friedrich. *Disquisitiones generales circa superficies curvas*. Dieterich, 1828.

Dove:

- $\frac{d^2z}{dx^2}$: Grado di convergenza e/o divergenza.
- $\frac{d^2z}{dy^2}$: Grado di convessità e/o concavità.
- $\nabla^2 z < 0$: Superficie convergente /concava
- $\nabla^2 z > 0$: Superficie divergente/convessa

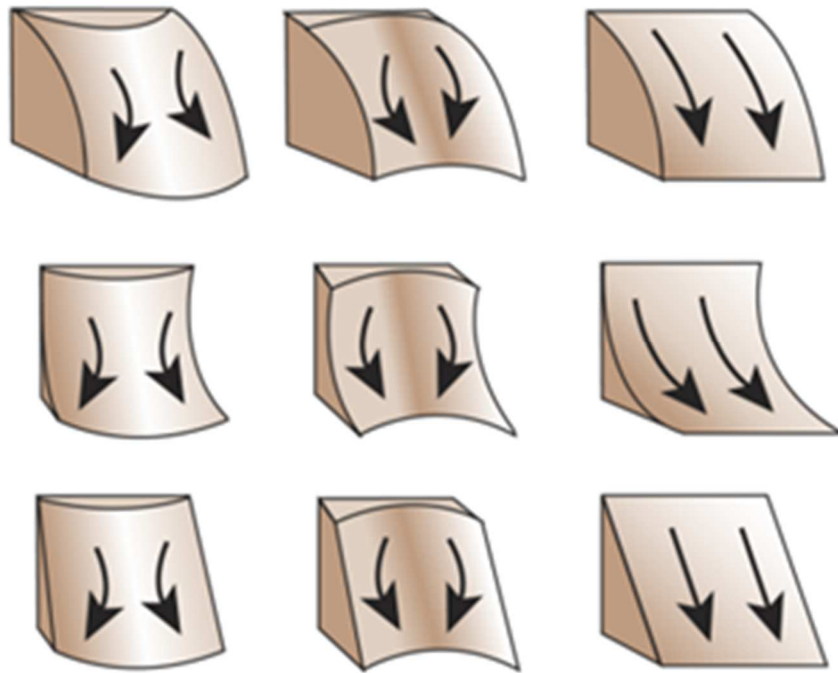


Figura 39 – Curvatura di un terreno

<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>

Nell'elaborazione del DTM sono state elaborate due tipologie di curvatura:

Curvatura longitudinale

La curvatura longitudinale (profile curvature) determina la curvatura del profilo, ovvero la forma della superficie nelle immediate vicinanze del punto campione riferito al piano verticale. Rappresenta come varia la velocità della pendenza in quel punto.³⁰

La curvatura longitudinale è definita come:

$$K_{pr} = \frac{\frac{d^2z}{dx^2}(\frac{dz}{dx})^2 + \frac{d^2z}{dy^2}(\frac{dz}{dy})^2 + 2\frac{d^2z}{dxdy}\frac{dz}{dx}\frac{dz}{dy}}{(1 + (\frac{dz}{dx})^2 + (\frac{dz}{dy})^2)^{3/2}} \quad [L^{-1}]$$

Dove:

- $K_{pr} < 0$: Superficie convessa longitudinalmente
- $K_{pr} > 0$: Superficie concava longitudinalmente
- $K_{pr} = 0$: Superficie lineare

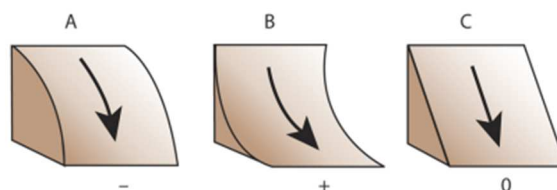


Figura 40 – Curvatura longitudinale di un terreno

<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>

³⁰ https://spatialanalysisonline.com/HTML/profiles_and_curvature.htm

Curvatura trasversale

La curvatura trasversale (planform curvature) è la forma della superficie determinata come se un piano la tagliasse nel punto campione. Rappresenta la linea di curvatura di contorno all'altezza z e posizione (x,y) ³¹. La curvatura trasversale è definita come:

$$K_{pl} = \frac{\frac{d^2z}{dx^2}(\frac{dz}{dx})^2 + \frac{d^2z}{dy^2}(\frac{dz}{dy})^2 - 2\frac{d^2z}{dxdy}\frac{dz}{dx}\frac{dz}{dy}}{\left(\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2\right)^{3/2}} \quad [L^{-1}]$$

Dove:

- $K_{pl} < 0$: Superficie lateralmente concava
- $K_{pl} > 0$: Superficie lateralmente convessa
- $K_{pl} = 0$: Superficie lineare

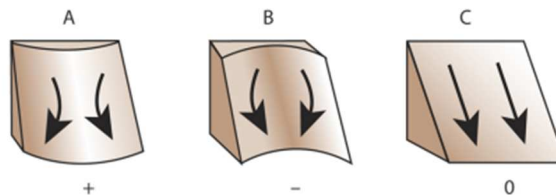


Figura 41 – Curvatura trasversale di un terreno

<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>

³¹ https://spatialanalysisonline.com/HTML/profiles_and_curvature.htm

3.2.8 Esposizione

Il metodo utilizzato da ArcGIS Enterprise si basa sullo stesso principio del calcolo dei precedenti parametri morfologici. In particolare, lo strumento esposizione (aspect) identifica il tasso massimo di variazione della direzione discendente, da ogni cella a quelle immediatamente circostanti alla considerata. I valori di ogni cella indicano la direzione della bussola in cui è rivolta la superficie in quella posizione. Le aree piane e orizzontali vengono assegnate con un valore di -1 per indicare l'assenza di orientamento.³²

L'esposizione può essere calcolata in due metodi:

Metodo planare

È il metodo tradizionale per calcolare l'esposizione, eseguito utilizzando un sistema di coordinate cartesiane 2D. Il metodo planare è definito come:

$$\text{Esposizione} = \text{atan2} \left(\frac{dz}{dy}, -\frac{dz}{dx} \right) \quad [\text{rad}]$$

Dove:

- $\frac{dz}{dx}$: Variazione di altitudine lungo la direzione X (est-ovest)
- $\frac{dz}{dy}$: Variazione di altitudine lungo la direzione Y (nord-sud)

³² <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/how-aspect-works.htm>

Come evidenziato in precedenza, per calcolare l'esposizione il software determina le derivate parziali $(\frac{dz}{dx} ; \frac{dz}{dy})$ analizzando una finestra 3x3 di celle attorno a quella centrale.

- $\frac{dz}{dx} = \frac{(c + 2f + i) - (a + 2d + g)}{8}$
- $\frac{dz}{dy} = \frac{(g + 2h + i) - (a + 2b + c)}{8}$

a	b	c
d	e	f
g	h	i

Figura 42 – Finestra 3x3 con nominazione delle celle

(<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/how-aspect-works.htm>)

Metodo geodetico

Il metodo non è stato applicato nell'area studiata poiché viene utilizzato in ampie aree geografiche, operando in un sistema di coordinate geodetiche per rappresentare la superficie come un ellissoide. Il calcolo si basa sulle coordinate X, Y, Z determinate a partire dalle coordinate geodetiche (latitudine φ , longitudine λ , altezza h).³³

³³ <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/how-aspect-works.htm>

3.2.9 Accumulo di flusso

Il metodo utilizzato da ArcGIS Enterprise si basa sullo stesso principio del calcolo dei precedenti parametri morfologici. In particolare, lo strumento accumulo di flusso (flow accumulation) determina per ogni cella di un raster il numero totale di celle che scaricano l'acqua in quella specifica cella. Il flusso d'acqua proviene dalle celle a monte, che rilasciano l'acqua verso quelle a valle, tracciando così il percorso e la quantità d'acqua accumulata in ogni punto del terreno. Prima di calcolare l'accumulo di flusso è necessario determinare la direzione di flusso (flow direction). La direzione di flusso è stabilita in base all'altitudine e alla pendenza del terreno: l'acqua scorrerà sempre verso la cella adiacente con altitudine più bassa.³⁴

ArcGIS Enterprise utilizza il seguente schema come direzione di flusso:

- 1 = Est
- 2 = Sud-Est
- 4 = Sud
- 8 = Sud-Ovest
- 16 = Ovest
- 32 = Nord-Ovest
- 64 = Nord
- 128 = Nord-Est

³⁴ <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm>

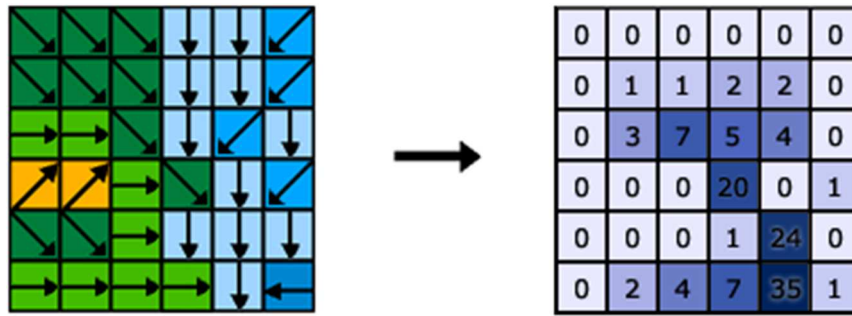


Figura 43 – La figura a sinistra indica la direzione di flusso, mentre quella a destra l'accumulo di flusso

L'accumulo di flusso è definito come:

$$\text{Accumulo di flusso } (i, j) = \sum_k F_k(i, j) \quad [\text{L/s/ha}]$$

Dove:

- i, j : Posizione della cella considerata nel raster.
- k : Numero di celle adiacenti che influiscono sul flusso d'acqua verso la cella considerata.
- $F_k(i, j)$: Contributo del flusso delle celle k che contribuiscono al volume totale di acqua accumulato nella cella (i, j) .

3.2.10 Iso Cluster Unsupervised Classification

Uno dei metodi utilizzati da ArcGIS Enterprise per valutare l'assetto geologico e geomorfologico di una area è lo strumento Iso Cluster Unsupervised Classification (Spatial Analyst). In particolare, lo strumento utilizza un algoritmo non supervisionato per raggruppare i pixel di un'immagine raster o di un insieme di dati raster in cluster omogenei, basandosi su somiglianze statistiche tra le diverse bande o variabili (ad esempio, pendenza, altitudine, curvatura, accumulo di flusso).³⁵

Applicato nel contesto geologico e geomorfologico, questo strumento consente di identificare automaticamente pattern legati alle caratteristiche del terreno, come zone di accumulo di flusso, zone con inclinazioni ripide o determinate condizioni morfologiche, che possono indicare aree soggette a frane o altri rischi geomorfologici. I cluster risultanti rappresentano porzioni di territorio con caratteristiche simili, utili per interpretare e valutare l'assetto fisico dell'area studiata.

I passaggi che ci hanno portato all'utilizzo dello strumento Iso Cluster Unsupervised Classification su ArcGIS Enterprise sono stati accuratamente pianificati al fine di garantire un'elevata precisione dei cluster finali, per assicurare un'analisi dettagliata e meticolosa delle aree soggette a movimenti franosi. Di seguito sono riportate le fasi operative intraprese:

³⁵ <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-iso-cluster-works.htm>

- PASSO 1 - Soglia FLOW ACCUMULATION:
 1. Caricare il raster relativo alla flow accumulation su ArcGIS Enterprise.
 2. Controllare i valori della flow accumulation in corrispondenza delle aste fluviali.
 3. Individuare la soglia della flow accumulation oltre la quale vengono identificati i valori che saranno caratteristici delle aste fluviali. I valori oltre tale soglia verranno tagliati. La soglia è 15000, significa che i valori oltre 15000 non verranno usati per la classificazione.
 4. Attribuire dalla simbologia-> classified-> classify (n.2 classi) attribuendo la soglia (vedi punto 3) al primo valore selezionabile.
 5. Fare un "Reclassify" attribuendo "1" ai valori al di sotto della soglia (15000) e a tutti gli altri "NoData". Ottengo una maschera che nasconde tutti i pixel al di sopra della soglia di flow accumulation.
 6. Fare un "Reclassify" attribuendo "201" ai valori al di sopra della soglia (15000) e a tutti gli altri "NoData". Ottengo una maschera che nasconde tutti i pixel al di sotto della soglia di flow accumulation.

- PASSO 2 – RITAGLIO sulla soglia stabilita dalla FLOW ACCUMULATION
 1. Caricare su ArcGIS Enterprise i raster relativi alla pendenza, curvatura longitudinale e trasversale, esposizione.

2. Con la funzione “Raster calculator” su ArcGIS Enterprise moltiplicare la maschera ottenuta al punto 5 del passo 1 per il relativo raster (Es: flow_acc_mask_15000 * pendenza). Ottengo i vari raster ritagliati sul valore soglia della flow accumulation.

- PASSO 3 – SELEZIONE DEGLI OUTLIERS

1. Convertire i raster ottenuti alla fine del passo 2 in file ascii (raster to ascii) e caricarli su Excel.
2. Calcolare i percentili (0.5% e 99.5%) tralasciando dal calcolo i valori “NoData” per il raster relativo alla pendenza, curvatura longitudinale e trasversale (i raster utilizzati sono quelli del punto 2 del passo 2).
3. Per ciascun raster è stato trovato un valore di outlier min e max.

- PASSO 4 – OUTLIERS FINALE

1. Caricare il raster ritagliato sulla flow accumulation del punto 2 del passo 2.
2. Dalla simbologia-> classified-> classify (n.3 classi) attribuire il min e max (ottenuti al punto 2 del passo 3) ai primi due valori selezionabili.
3. Fare un “Reclassify” attribuendo “1” all’interno dell’intervallo delimitato dal min e max, mentre all’esterno dell’intervallo attribuire “NoData”. Ottengo una maschera che nasconde tutti i pixel all’esterno dei valori min e max degli outliers. Ripetere questa

operazione per gli altri raster (caricare i raster del punto 2 del passo 3) in modo da ottenere la maschera della pendenza, della curvatura longitudinale e trasversale, esposizione.

4. Con la funzione “Raster calculator” su ArcGIS Enterprise moltiplicare le tre maschere ottenute al precedente punto per la maschera della flow accumulation (maschera ottenuta al punto 5 del passo 1). Ottengo una maschera totale che nasconde quei pixel sui quali è presente su almeno un raster un valore di “NoData”; per il resto dei pixel i valori restano inalterati.
5. Con la funzione “Raster calculator” su ArcGIS Enterprise moltiplicare la maschera totale ottenuta al precedente punto per il raster morfometrico. Posso usare il raster morfometrico originale (ottenuto alla fine del passo 1) perché la maschera totale ottenuta precedentemente tiene conto di tutti gli outliers (soglia della flow accumulation e outliers della pendenza, curvatura longitudinale e trasversale). Ottengo quattro raster morfometrici tagliati tenendo conto di tutti gli outliers.

- **PASSO 5 – LOGARITMO DELLA FLOW ACCUMULATION**

- Con la funzione “Raster calculator” su ArcGIS Enterprise calcolare il logaritmo in base 10 della flow accumulation determinata al punto 5 del passo 4. La formula da applicare è la seguente:

$$\log_{10}(\textit{flow accumulation})$$

- PASSO 6 – RISCALARE 0 -100, o altro intervallo

1. I raster determinati al punto 5 del passo 4 e quello del logaritmo della flow accumulation determinato al passo 5, vanno rapportati a 100; vale a dire tutti i valori numerici vanno portati in una scala che va da 0 a 100. I valori massimi e minimi si trovano su Classified ed è necessario sostituire la “,” (virgola) con il “.” (punto) quando si inseriscono nella formula.

2. Con la funzione “Raster calculator” su ArcGIS Enterprise applico le seguenti formule:

$$- \frac{(Flow\ accumulation - Min) \cdot 100}{(Max - Min)}$$

$$- \frac{(Pendenza - Min) \cdot 100}{(Max - Min)}$$

$$- \frac{(Curvatura\ longitudinale + |Min|) \cdot 100}{(Max + |Min|)}$$

$$- \frac{(Curvatura\ trasversale + |Min|) \cdot 100}{(Max + |Min|)}$$

$$- \frac{(DEM - Min) \cdot 100}{(Max - Min)}$$

$$- \frac{(Esposizione - Min) \cdot 100}{(Max - Min)}$$

- Max e Min è il valore massimo e minimo del raster ottenuto al precedente punto. La formula per la curvatura longitudinale e trasversale è diversa rispetto agli altri raster perché hanno valori negativi e vanno presi col valore assoluto.
 - Per evitare valori negativi dovuti a problemi di approssimazione su ArcGIS Enterprise, al valore minimo va tolto un'unità all'ultima cifra inserita nei raster di Flow Accumulation, Pendenza, DEM, Esposizione. Per il medesimo problema al valore minimo va aggiunta un'unità all'ultima cifra inserita nei raster di Curvatura Longitudinale e Trasversale.
- **PASSO 7 – CLASSIFICAZIONE UNSUPERVISED**
 - Con ArcGIS Enterprise selezionare la funzione “Iso Cluster Unsupervised Classification” ed immettere i raster riscaldati a 100, ottenuti nel punto 2 del passo 6. Selezionare il numero delle classi o cluster che andranno costruiti e impostare simple interval 1 (è l'estensione della cella usata nel calcolo dei cluster).

4. RISULTATI

Nel seguente capitolo vengono presentati gli esiti dell'elaborazione dei dati ottenuti dal rilievo integrato aerofotogrammetrico e LiDAR. Con il supporto di ArcGIS Enterprise si è generato il modello digitale del terreno (DTM). Si è inoltre ricavata una rappresentazione grafica dei parametri morfologici che lo caratterizzano, quali pendenza, curvatura longitudinale e trasversale, esposizione e accumulo di flusso.

Nella figura 44 è riportato il modello digitale del terreno (DTM), che descrive in dettaglio le variazioni altimetriche dell'area analizzata. Le curve di livello presenti nell'immagine definiscono le diverse quote altimetriche, evidenziate dalle differenti sfumature di grigio. L'elevazione varia da un minimo di circa 40 m s.l.m., rappresentato dalle aree in grigio scuro, fino ad un massimo di circa 194 m s.l.m., indicato dalle zone in grigio chiaro.



Legenda

DTM (m s.l.m)

Value

High : 193,789

Low : 40,4426

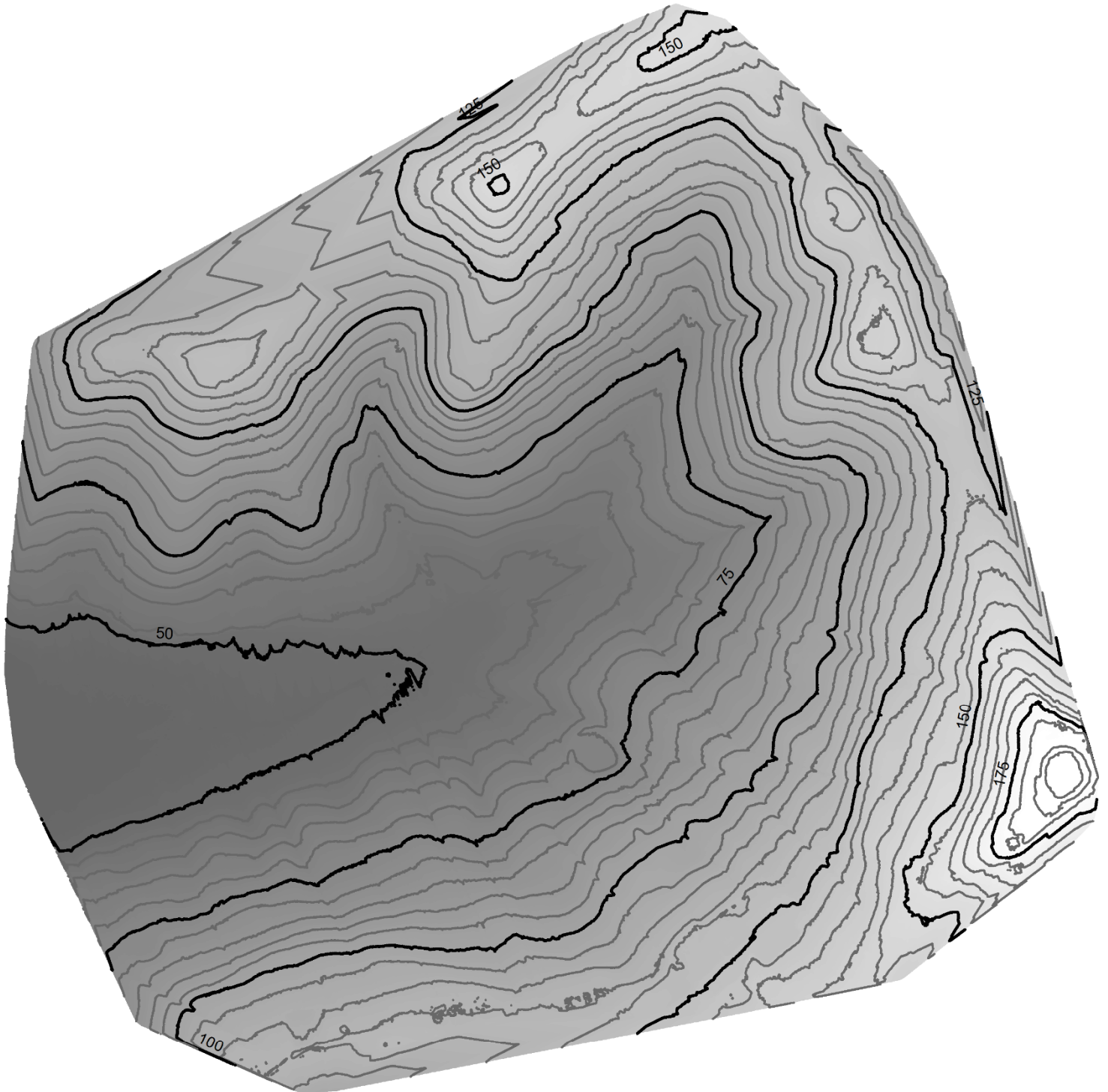


Figura 44 – DTM

0 0.1 0.2 0.4
Kilometers

Nella figura 45 è illustrata la mappa della pendenza del terreno, che descrive con precisione le inclinazioni delle superfici all'interno dell'area di studio. Le curve di livello delineano le diverse altitudini, mentre le pendenze sono rappresentate attraverso un gradiente cromatico che varia dal rosso al verde. Le aree con pendenze minime, prossime a $0,6^\circ$, sono indicate in rosso, mentre le pendenze massime, che raggiungono circa $31,6^\circ$, sono evidenziate in verde.

L'immagine include anche un dettaglio ingrandito che consente una visione più accurata di una specifica porzione del territorio, facilitando l'interpretazione delle variazioni di pendenza in quella zona. Questa rappresentazione fornisce una panoramica chiara e dettagliata delle caratteristiche topografiche e morfologiche del terreno, utile per analisi riguardanti la stabilità e il drenaggio del suolo.



Legenda

Pendenza (°)

Value

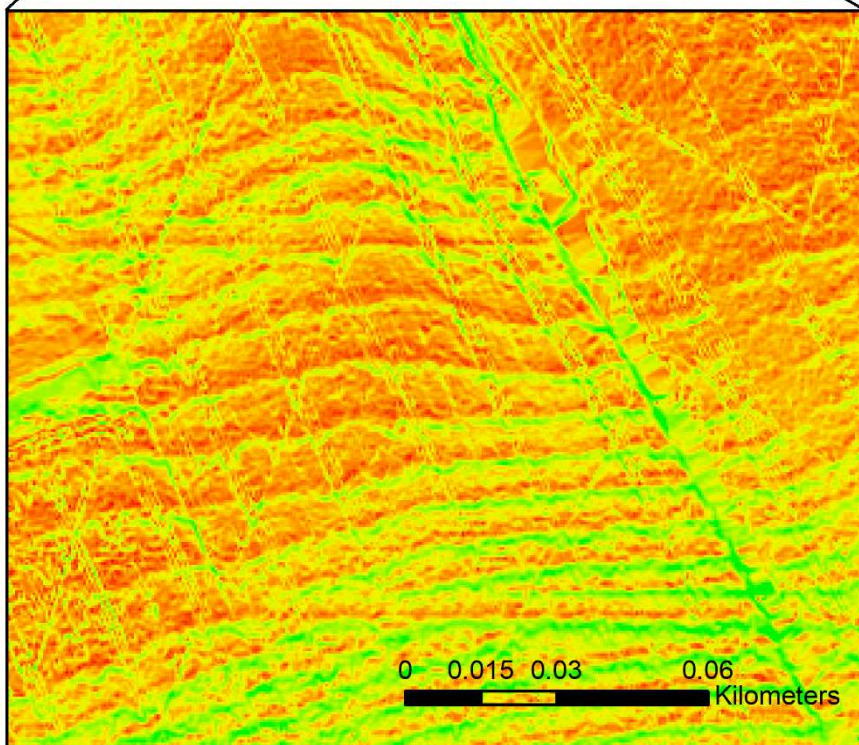
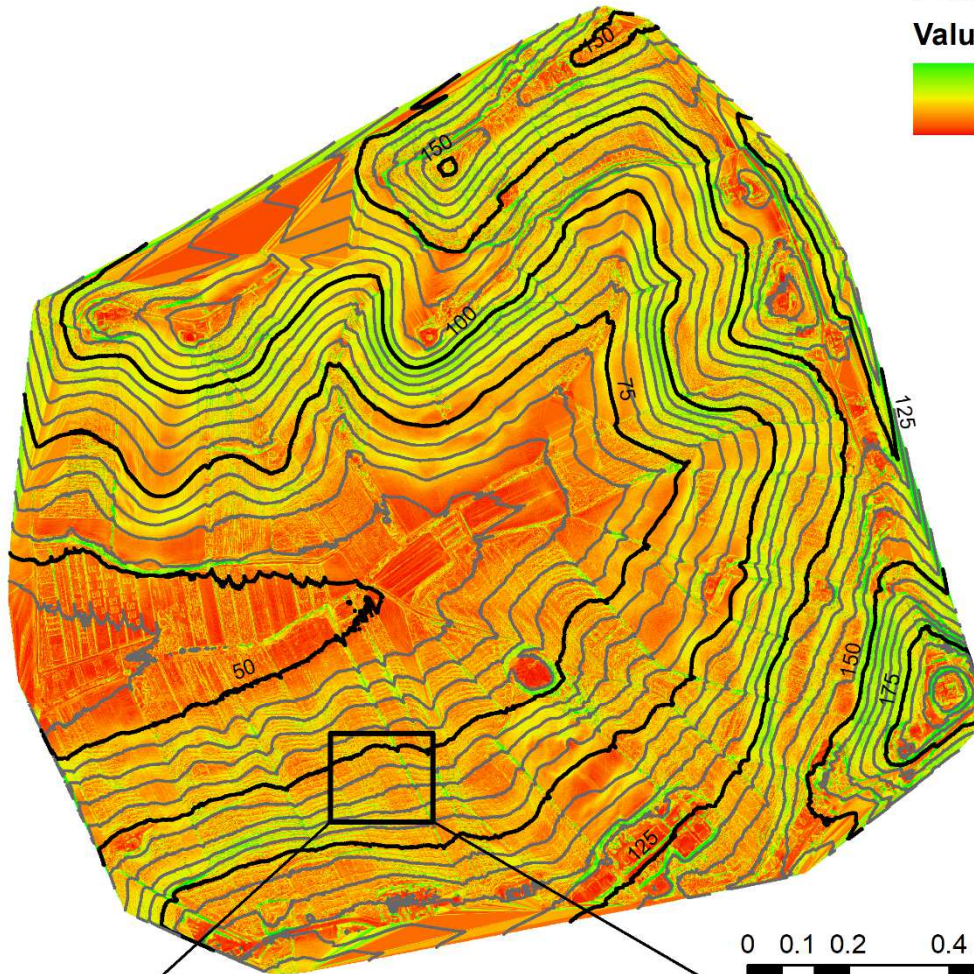
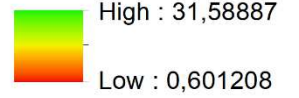


Figura 45 – Pendenza

La figura 46 indica la mappa della curvatura longitudinale, che descrive le variazioni della curvatura del profilo in termini di concavità e convessità. La mappa utilizza un gradiente cromatico dal verde al rosso per rappresentare i valori della curvatura: le superfici convesse longitudinalmente, con valori negativi fino a $-75,76 \text{ m}^{-1}$, sono indicate in verde, mentre le superfici concave longitudinalmente, con valori massimi di $83,91 \text{ m}^{-1}$, sono evidenziate in rosso.

Le curve di livello sovrapposte forniscono un contesto altimetrico che aiuta a comprendere meglio la conformazione del terreno. Inoltre, è presente un ingrandimento di una specifica porzione del territorio, nella parte inferiore della figura, che offre una visione più dettagliata della distribuzione della curvatura in una sezione del terreno.

Legenda

Curvatura longitudinale (1/m)

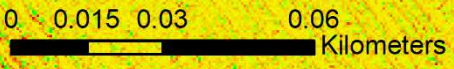
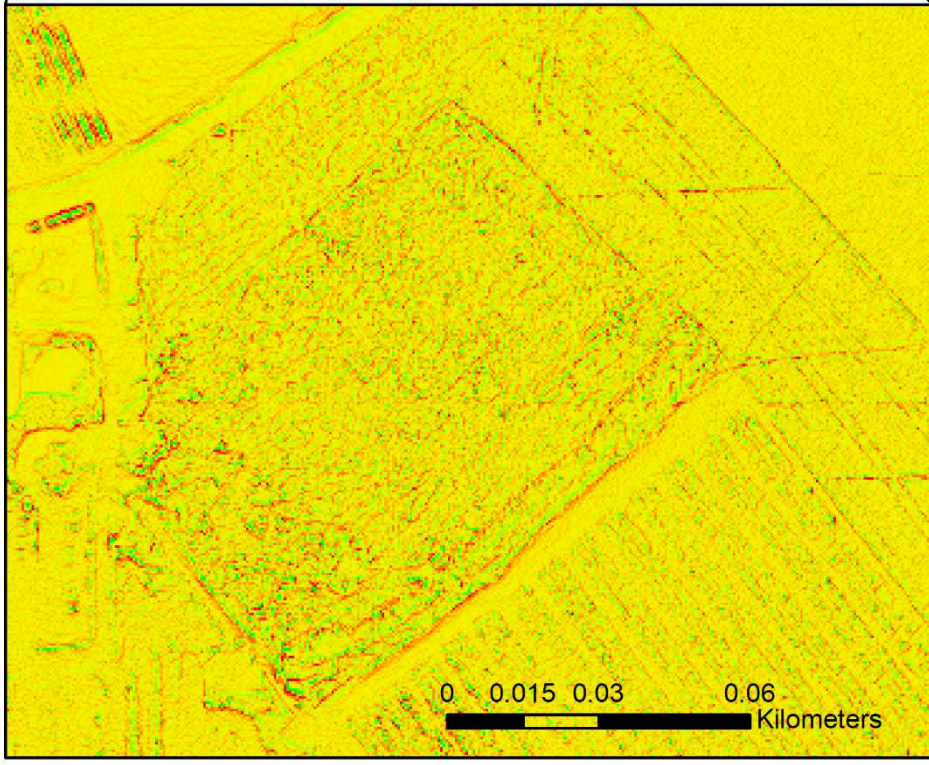
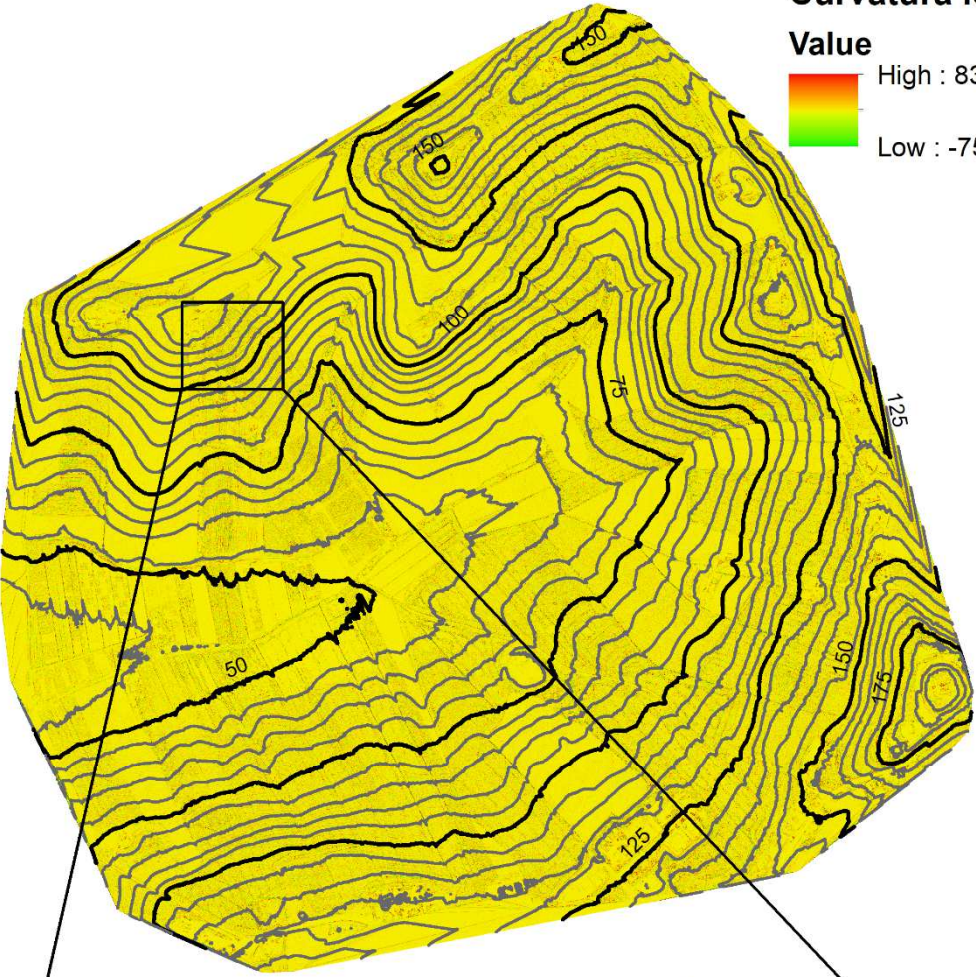
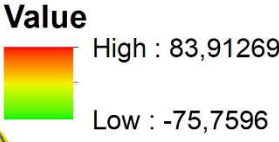


Figura 46 – Curvatura longitudinale

La figura 47 indica la mappa della curvatura trasversale, che descrive le variazioni della curvatura della sezione trasversale in termini di concavità e convessità. La mappa utilizza un gradiente cromatico dal rosso al blu per rappresentare i valori della curvatura: le superfici lateralmente concave, con valori negativi fino a $-80,36 \text{ m}^{-1}$, sono indicate in rosso, mentre le superfici lateralmente convesse, con valori massimi di $69,15 \text{ m}^{-1}$, sono evidenziate in blu.

Le curve di livello sovrapposte forniscono un contesto altimetrico che aiuta a comprendere meglio la conformazione del terreno. Inoltre, è presente un ingrandimento di una specifica porzione del territorio, nella parte inferiore della figura, che offre una visione più dettagliata della distribuzione della curvatura in una sezione del terreno.



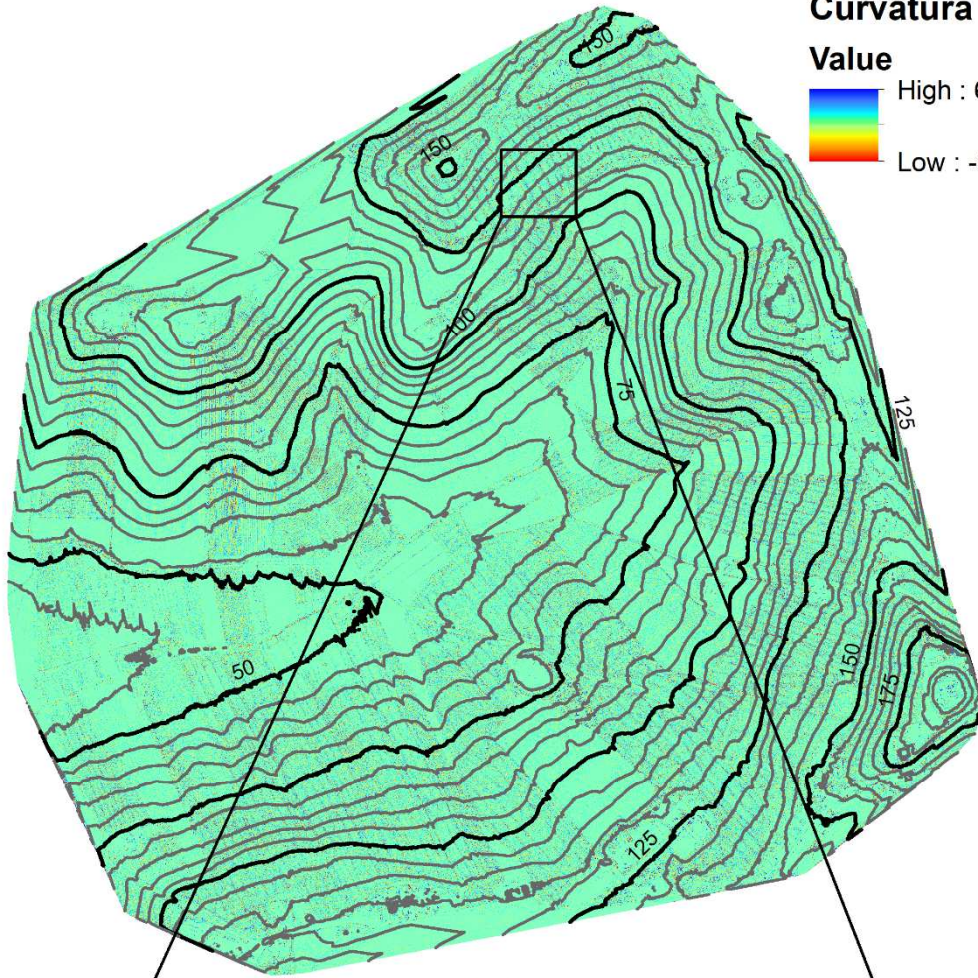
Legenda

Curvatura trasversale (1/m)

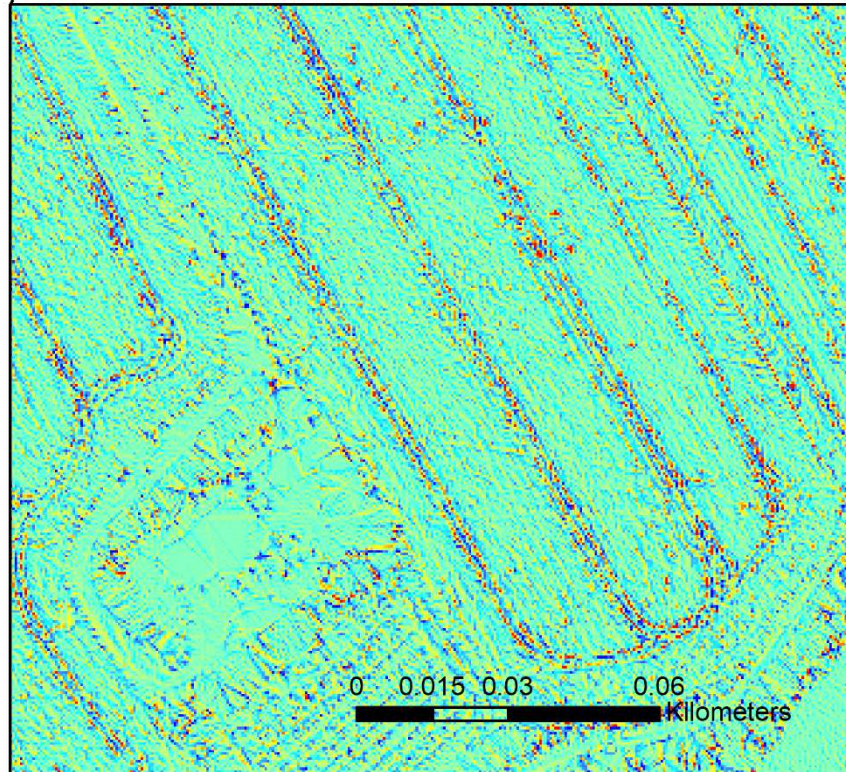
Value

High : 69,15435

Low : -80,3627



0 0.1 0.2 0.4 0.6 Kilometers



0 0.015 0.03 0.06 Kilometers

Figura 47 – Curvatura trasversale

La figura 48 rappresenta una mappa dell'esposizione del terreno, che indica l'orientamento delle superfici rispetto ai punti cardinali. Un gradiente cromatico, che va dal rosso al viola, rappresenta i diversi valori di esposizione: le aree esposte a nord ($337,5^\circ$ - $22,5^\circ$) sono indicate in rosso, le superfici esposte a est ($67,5^\circ$ - $112,5^\circ$) sono evidenziate in giallo, quelle a sud ($157,5^\circ$ - $202,5^\circ$) sono indicate in azzurro e quelle a ovest ($247,5^\circ$ - $292,5^\circ$) in blu.











Le curve di livello sovrapposte offrono un contesto altimetrico, rendendo più chiara la conformazione del terreno. Inoltre, la parte inferiore della figura presenta un ingrandimento di una specifica area, che consente di osservare in modo più dettagliato le variazioni di esposizione all'interno di una porzione ridotta del territorio.

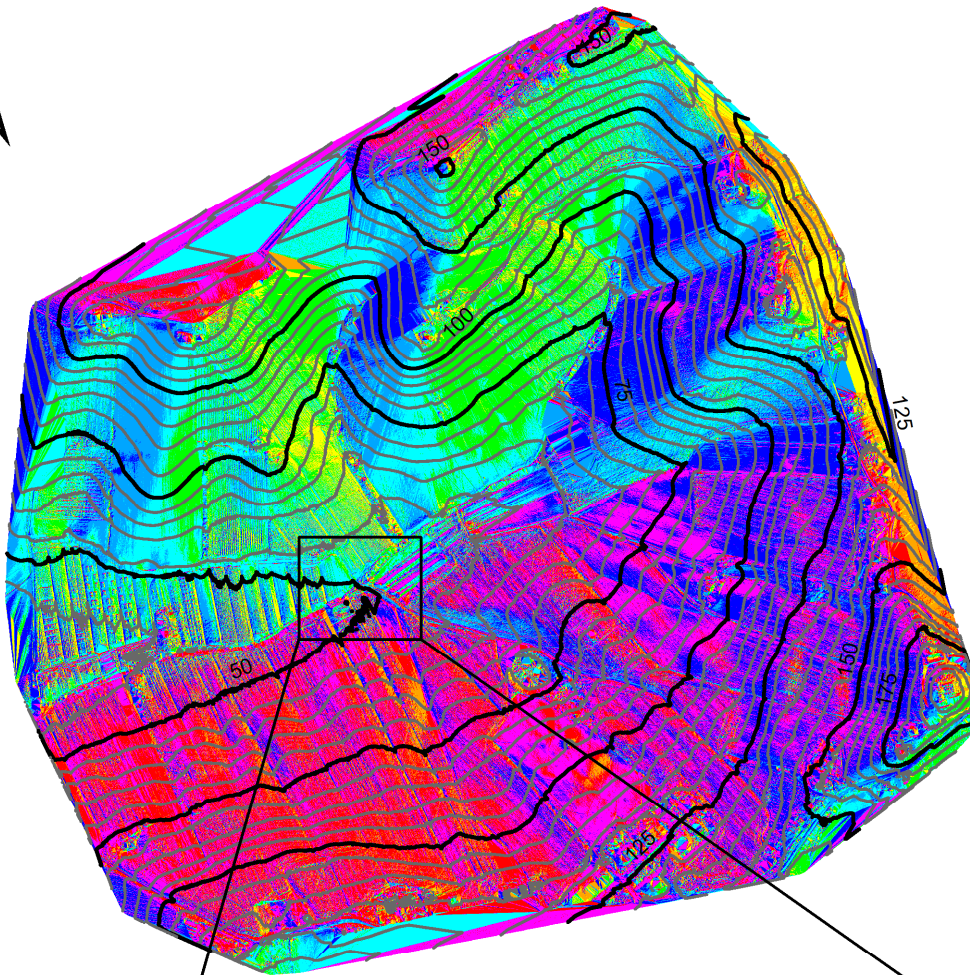


Legenda

Esposizione (°)

Value

-  Flat (-1)
-  North (0-22.5)
-  Northeast (22.5-67.5)
-  East (67.5-112.5)
-  Southeast (112.5-157.5)
-  South (157.5-202.5)
-  Southwest (202.5-247.5)
-  West (247.5-292.5)
-  Northwest (292.5-337.5)
-  North (337.5-360)



0 0.1 0.2 0.4 0.6 Kilometers

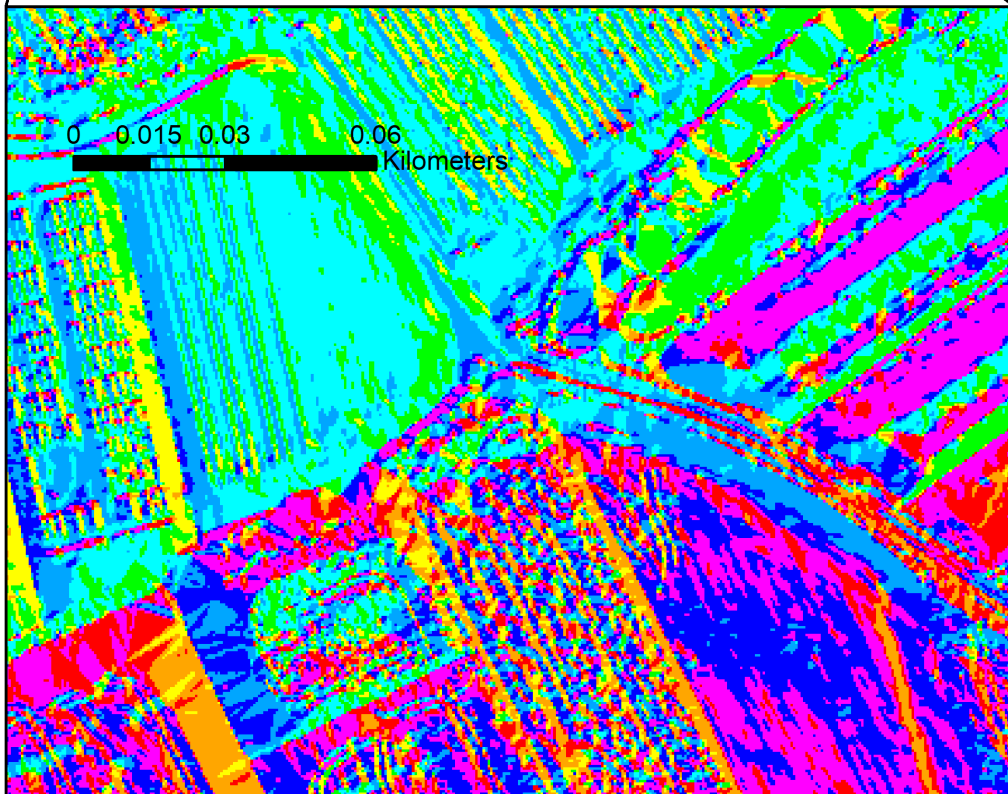


Figura 48 – Esposizione

La figura 49 mostra una mappa dell'accumulo di flusso idrico nel territorio. I valori sono rappresentati in due classi: le aree con accumulo di flusso compreso tra 0 e 15.000 sono colorate in bianco, mentre le aree con accumulo maggiore (fino a 23.369) sono rappresentate in blu. Questa soglia permette di evidenziare la direzione e la concentrazione dei canali di deflusso dell'acqua.

Nella parte inferiore della figura, un ingrandimento di una zona specifica consente di osservare con maggiore dettaglio la rete di drenaggio superficiale in quella particolare sezione del terreno.



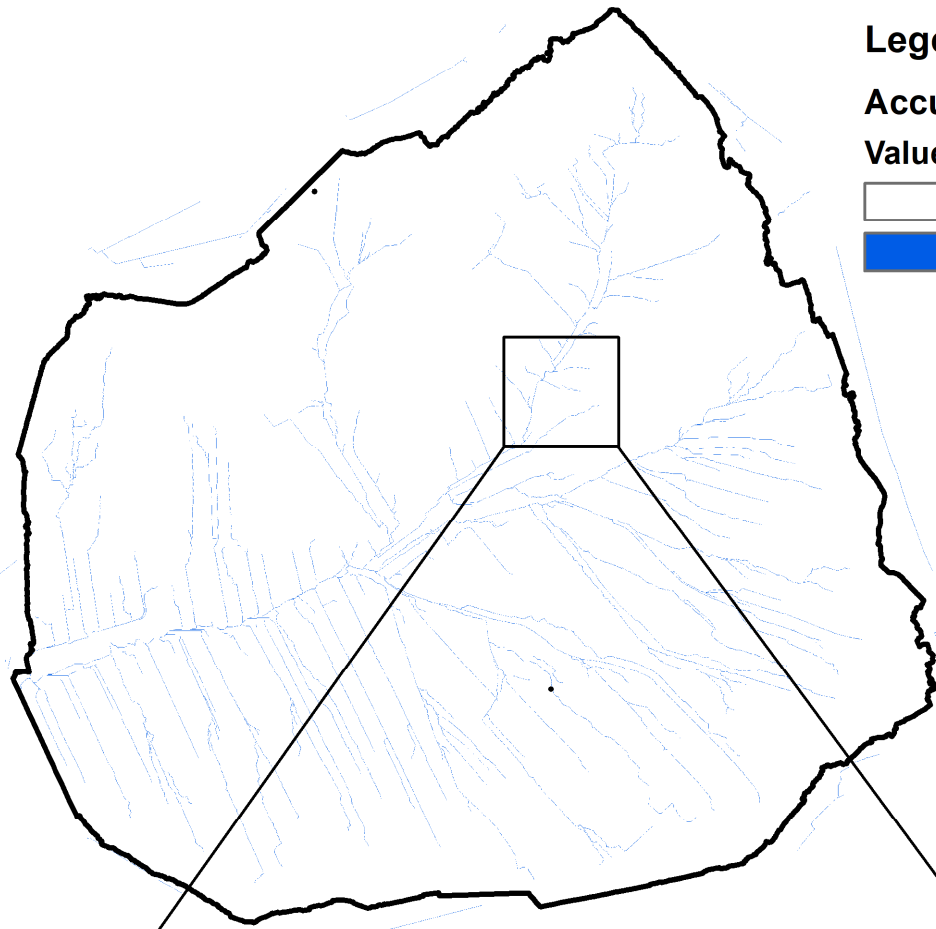
Legenda

Accumulo di flusso

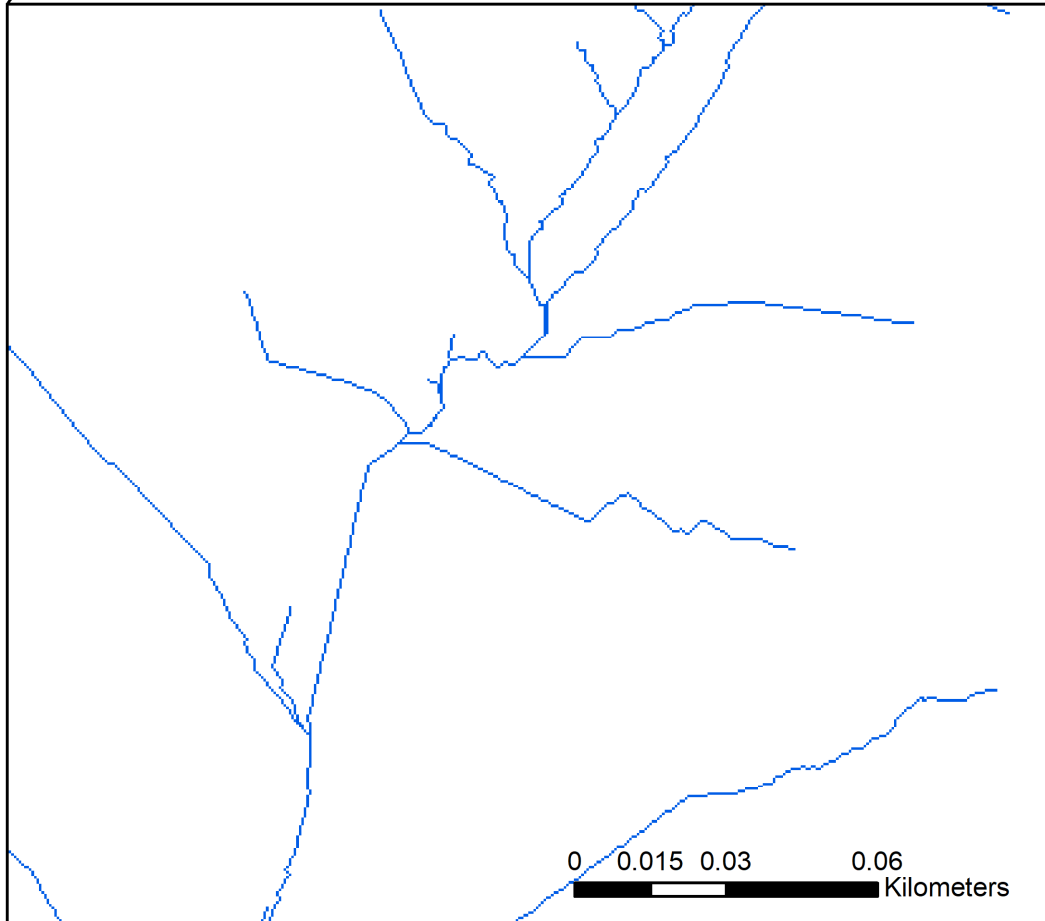
Value

0 - 15,000

15,000.00001 - 23,369.835



0 0.1 0.2 0.4 0.6
Kilometers



0 0.015 0.03 0.06
Kilometers

Figura 49 – Accumulo di flusso

La figura 50 mostra una mappa di classificazione non supervisionata utilizzando il metodo Iso Cluster, con quattro differenti classi di suolo rappresentate da colori distinti: il cluster 1 è rappresentato in blu, il cluster 2 in rosso, il cluster 3 in giallo, e il cluster 4 in viola. Questa classificazione evidenzia le differenze nella composizione e struttura del terreno in diverse aree.

Le curve di livello sovrapposte aiutano a fornire un contesto altimetrico per comprendere meglio le variazioni topografiche. Nella parte inferiore della figura è presente un ingrandimento di una specifica sezione del territorio, che permette di osservare più nel dettaglio la distribuzione spaziale delle classi di terreno in un'area più ristretta.



Legenda
Iso Cluster Unsupervised Classification
Value

-  cluster 1
-  cluster 2
-  cluster 3
-  cluster 4

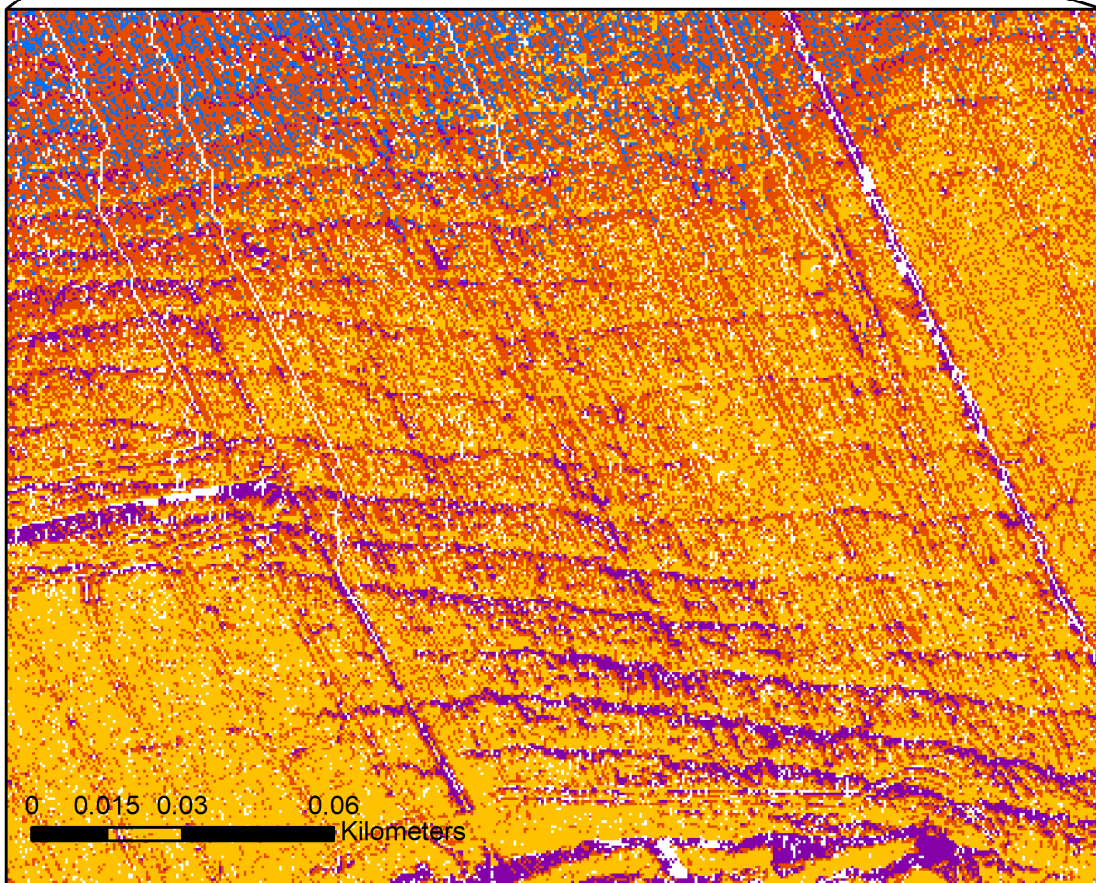
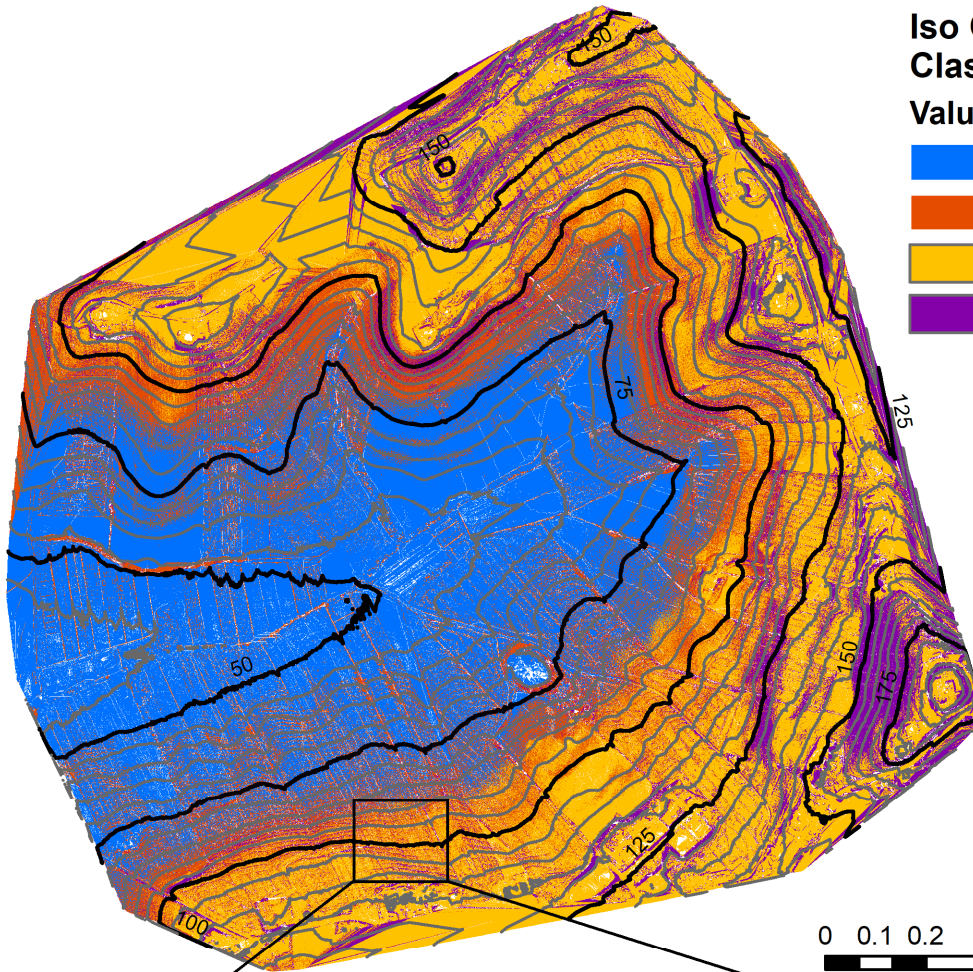


Figura 50 – Iso Cluster Unsupervised Classification, 4 cluster

La figura 51 mostra una mappa di classificazione non supervisionata utilizzando il metodo Iso Cluster, con sette differenti classi di suolo rappresentate da colori distinti: il cluster 1 è rappresentato in bianco, il cluster 2 in viola, il cluster 3 in azzurro, il cluster 4 in ciano, il cluster 5 in giallo, il cluster 6 in arancione e il cluster 7 in rosso. Questa classificazione evidenzia le differenze nella composizione e struttura del terreno in diverse aree.

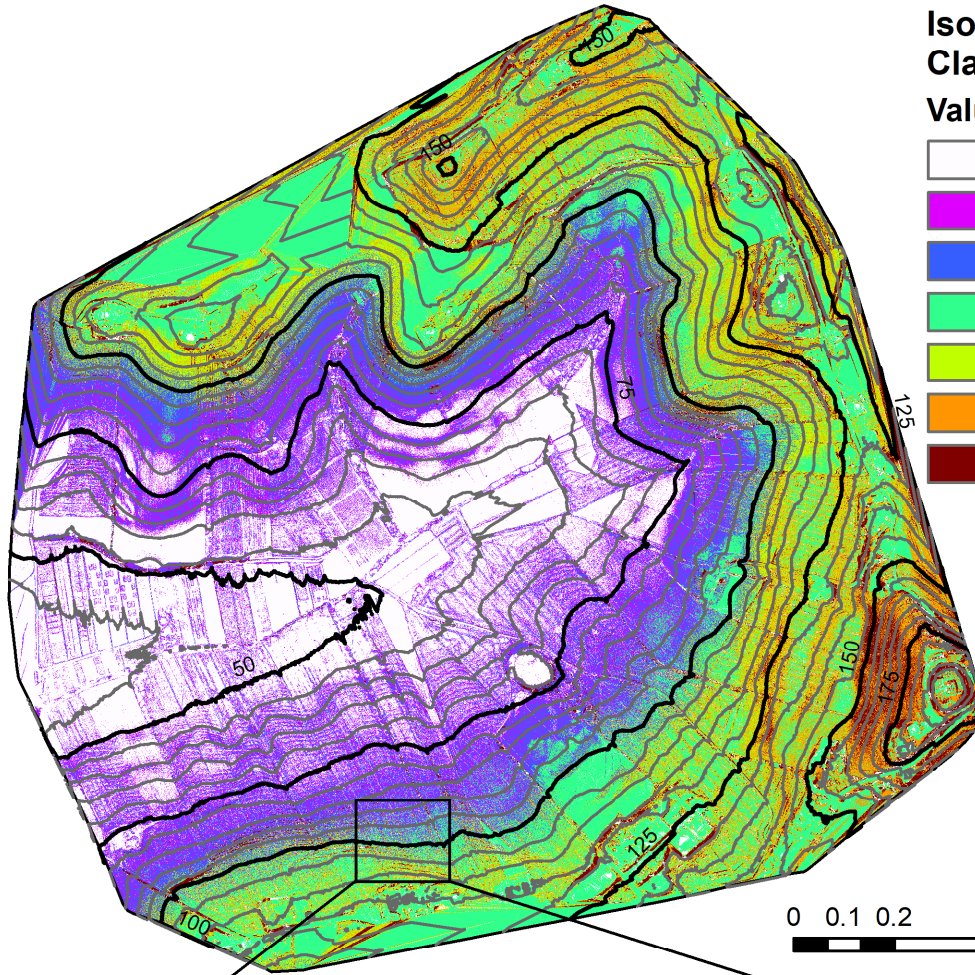
Le curve di livello sovrapposte aiutano a fornire un contesto altimetrico per comprendere meglio le variazioni topografiche. Nella parte inferiore della figura è presente un ingrandimento di una specifica sezione del territorio, che permette di osservare più nel dettaglio la distribuzione spaziale delle classi di terreno in un'area più ristretta.



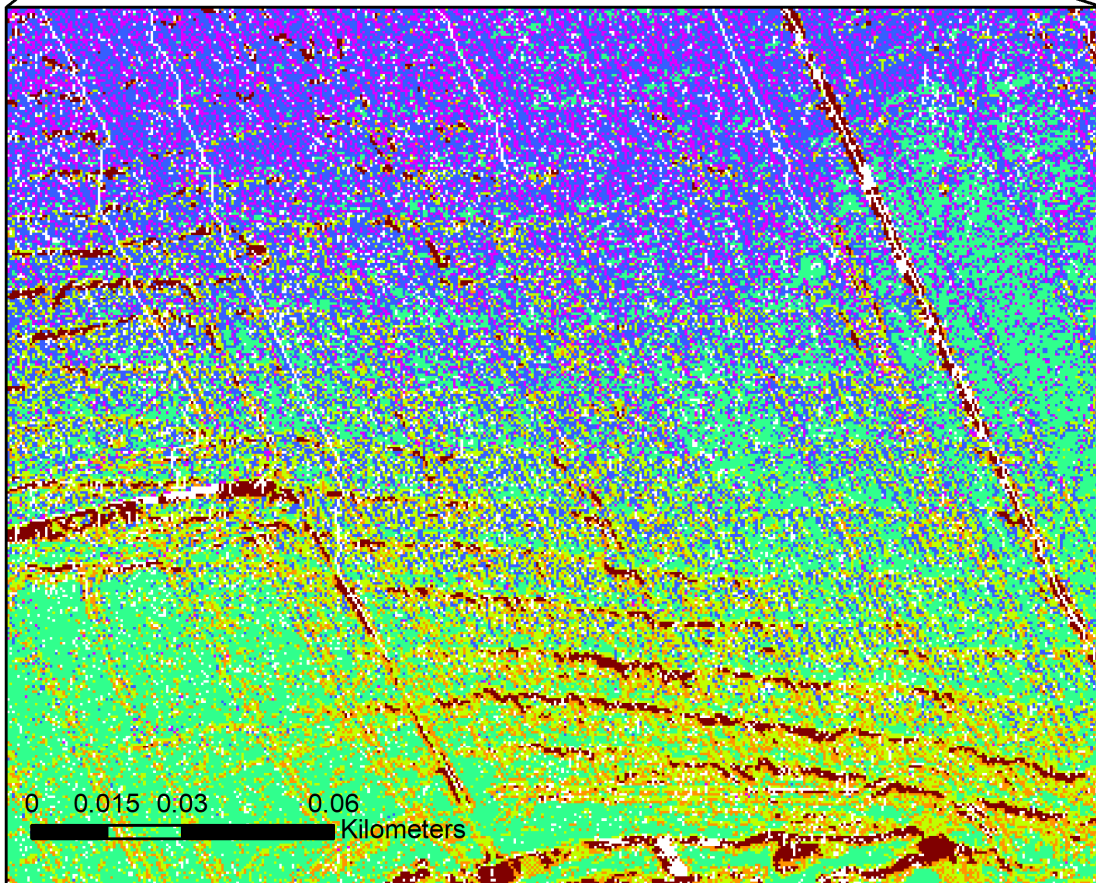
Legenda Iso Cluster Unsupervised Classification

Value

-  cluster 1
-  cluster 2
-  cluster 3
-  cluster 4
-  cluster 5
-  cluster 6
-  cluster 7



0 0.1 0.2 0.4 0.6
Kilometers



0 0.015 0.03 0.06
Kilometers

Figura 51 – Iso Cluster Unsupervised Classification, 7 cluster

5. DISCUSSIONE

Le due mappe ottenute con l'Iso Cluster Unsupervised Classification presentate nel capitolo precedente, sono il risultato di una serie di tentativi di classificazione, nei quali sono stati testati diversi numeri di classi e parametri morfologici. Alla fine, sono stati ottenuti i risultati migliori utilizzando modelli a quattro e sette cluster, escludendo dai parametri considerati l'accumulo di flusso e l'esposizione. Sebbene questi raster (flow accumulation e aspect) siano stati utili nelle analisi preliminari, sono stati esclusi per la classificazione unsupervised in quanto non utili all'identificazione delle zone in frana.

Focalizzandoci sul modello a quattro cluster, risulta particolarmente efficace nell'identificare i movimenti franosi e le aree instabili presenti nel terreno. In questo contesto, il ruolo del DTM e della pendenza risulta fondamentale, incidendo maggiormente rispetto alle curvature. Sebbene il DTM, con una risoluzione di 0,5 metri, mostri variazioni di curvatura molto ravvicinate a causa dell'alta risoluzione, queste ultime possono sovrapporsi e rendere difficile per ArcGIS Enterprise suddividerle in classi, facendo risultare meno rilevante il loro contributo rispetto a quello del DTM e della pendenza.

Lo studio dei valori medi, minimi, massimi e del deviatore standard relativi ai parametri morfologici fornisce una panoramica delle caratteristiche del terreno, evidenziando differenze e similitudini tra i cluster.

Di seguito le tabelle con i dati e i risultati schematizzati:

- DTM

Il grafico mostra la distribuzione delle quote altimetriche per ciascun cluster. Cluster 3 (giallo) si distingue per essere associato alle quote più elevate, mentre cluster 1 (blu) si colloca nelle zone più basse. Le aree a quote più elevate nel caso studio corrispondono a zone più instabili e inclini a movimenti franosi.

	Media	Minimo	Massimo	Deviatore standard
Cluster 1	63,00	40,50	96,91	12,46
Cluster 2	89,31	40,51	183,62	18,70
Cluster 3	121,49	78,09	193,70	17,47
Cluster 4	127,87	40,60	193,63	23,66

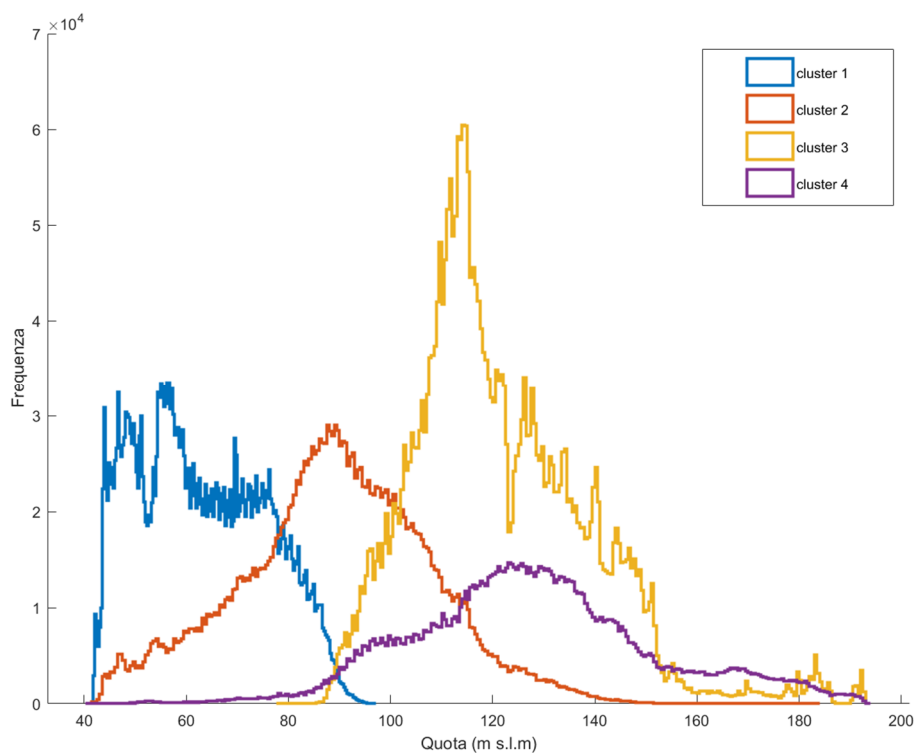


Figura 52 – Distribuzione statistica parametro DTM

- Pendenza

Il grafico mostra come i diversi cluster siano associati a differenti range di pendenza. Cluster 1 (blu) presenta pendenze basse, con una media inferiore rispetto agli altri, mentre cluster 4 (viola) rappresenta le pendenze più elevate. Le aree con pendenze maggiori sono più suscettibili ai movimenti franosi.

	Media	Minimo	Massimo	Deviatore standard
Cluster 1	6,34	0,60	17,24	2,97
Cluster 2	11,63	0,60	31,58	3,61
Cluster 3	7,10	0,60	13,13	2,97
Cluster 4	17,81	6,07	31,59	4,50

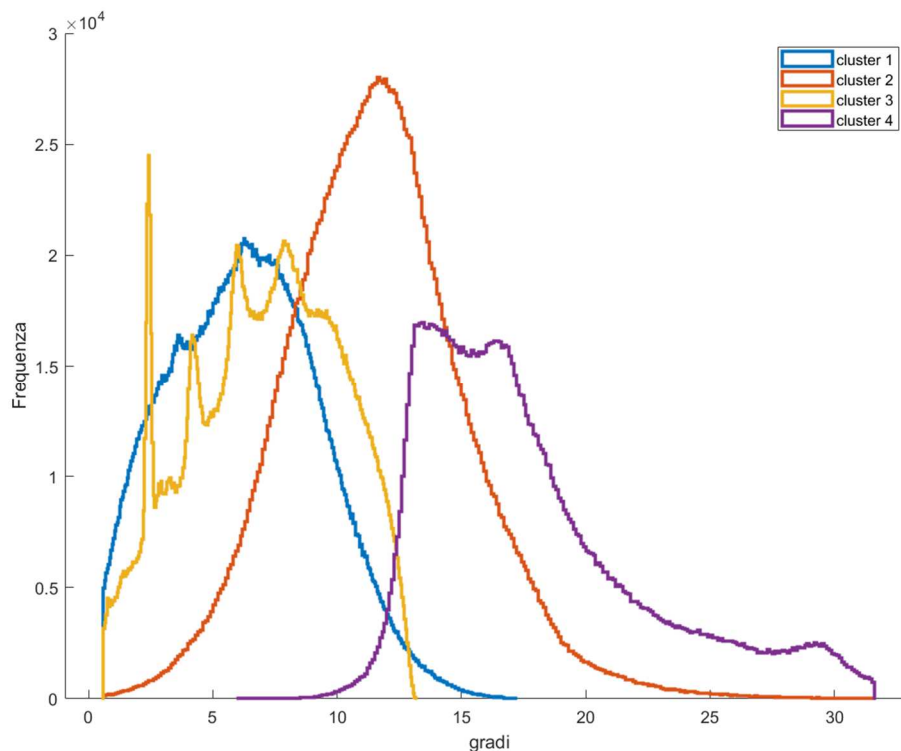


Figura 53 – Distribuzione statistica parametro pendenza

- Curvatura longitudinale

La curvatura longitudinale evidenzia come si distribuiscono le curvature concave e convesse nelle diverse aree. Le curvature concave (valori positivi) tendono a trattenere l'acqua, aumentando il rischio di saturazione e colamento. Le curvature convesse (valori negativi), invece, facilitano l'erosione.

	Media	Minimo	Massimo	Deviatore standard
Cluster 1	3,54	-75,09	83,91	15,34
Cluster 2	-13,14	-75,76	83,89	18,82
Cluster 3	2,25	-75,71	83,89	14,76
Cluster 4	5,94	-75,76	83,91	24,02

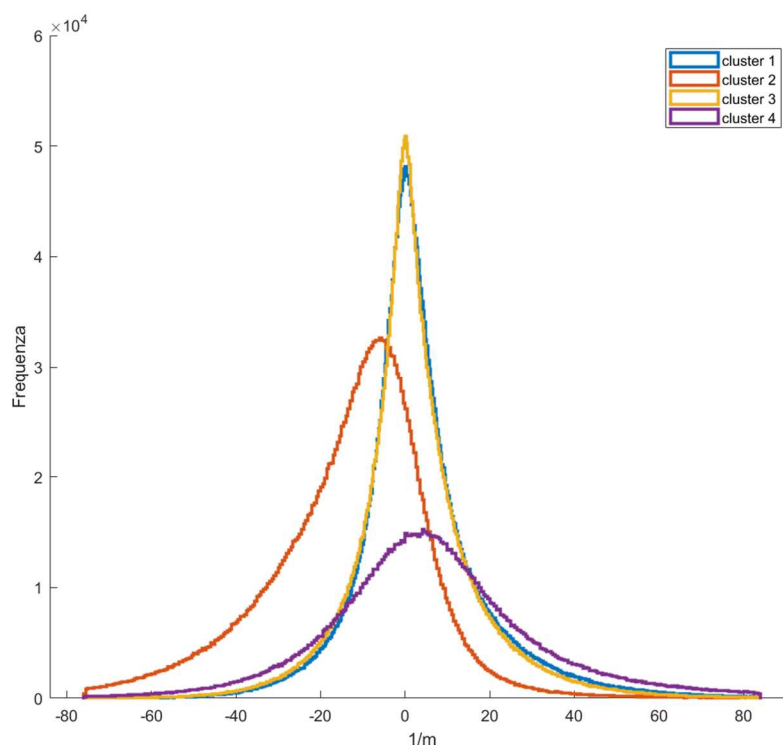


Figura 54 – Distribuzione statistica parametro curvatura longitudinale

- Curvatura trasversale

La curvatura trasversale evidenzia come si distribuiscono le curvature concave e convesse nelle diverse aree. Le curvature concave (valori negativi) tendono a trattenere l'acqua, aumentando il rischio di saturazione e colamento. Le curvature convesse (valori positivi), invece, facilitano l'erosione.

	Media	Minimo	Massimo	Deviatore standard
Cluster 1	-4,03	-80,36	69,01	15,50
Cluster 2	14,56	-80,35	69,15	17,50
Cluster 3	-2,50	-80,36	69,15	14,96
Cluster 4	-6,42	-80,36	69,15	22,98

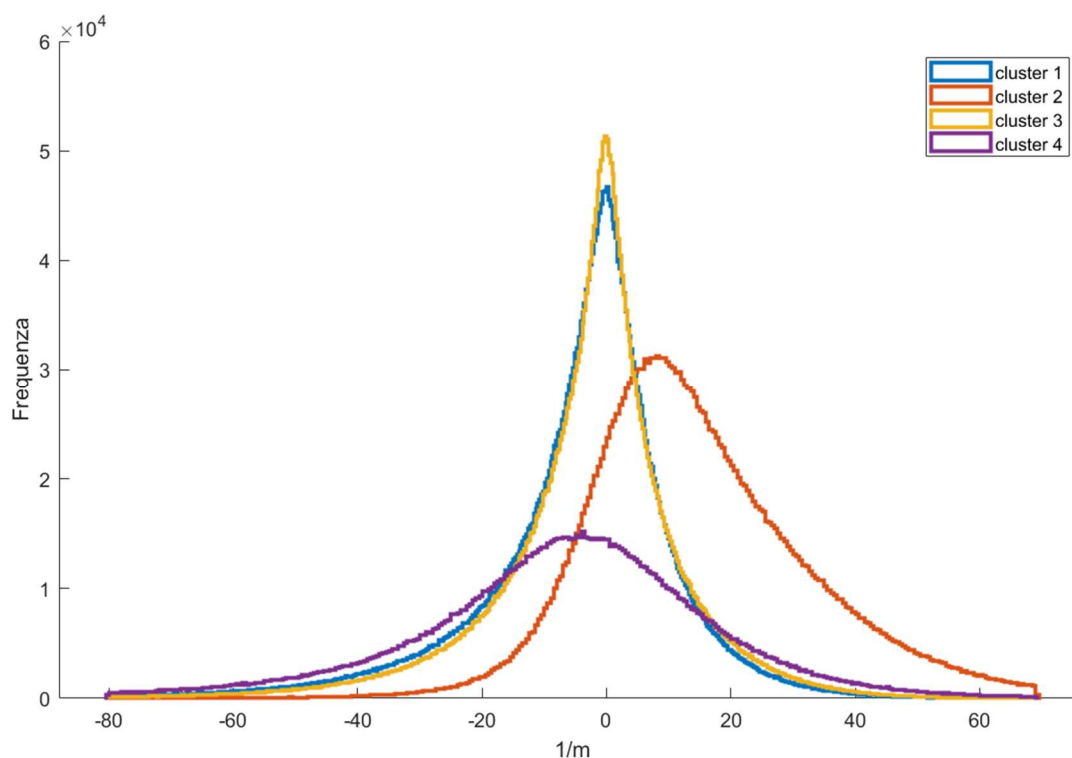


Figura 55 – Distribuzione statistica parametro curvatura trasversale

Tramite l'analisi dei grafici sovrastanti è possibile dare la seguente interpretazione alle quattro classi:

- Cluster 1 (blu): Rappresenta le aree con basse pendenze e valori di elevazione inferiori all'interno dell'area studio, pertanto le più stabili e sicure, poiché la bassa pendenza riduce significativamente il rischio di frane. Durante i rilievi, in queste zone è stata osservata una vegetazione ben sviluppata e suoli consolidati, a conferma della loro stabilità. La mancanza di segni di frane recenti o processi erosivi accentuati supporta la classificazione ottenuta dall'isocluster. Queste aree sono quindi adatte alla coltivazione.
- Cluster 2 (rosso): Rappresenta le aree con pendenze moderate ed elevazioni relativamente basse, identificabili in campo come aree vulnerabili a fenomeni erosivi soprattutto in presenza di piogge intense. Durante i rilievi geomorfologici, sono stati individuati segni di degrado superficiale e creste che facilitano il rapido deflusso delle acque. La morfologia convessa, evidenziata nell'analisi dei valori medi del cluster, favorisce l'erosione in queste zone, rendendole suscettibili a frane nei periodi di precipitazioni abbondanti.
- Cluster 3 (giallo): Rappresenta le aree con pendenze basse ma con valori di elevazione superiori rispetto ai due cluster precedenti, pertanto, sono soggette a movimenti di massa e smottamenti dovuti alla saturazione del terreno, specialmente dopo prolungati eventi piovosi. Questa condizione è stata confermata dai rilievi, durante i quali sono stati osservati segni di ristagno

d'acqua, come tracce di erosione superficiale e accumuli di sedimenti. Questo conferma il rischio potenziale di smottamento già emerso dall'isocluster.

- Cluster 4 (viola): Rappresenta le aree con le pendenze e i valori di elevazione maggiori, pertanto risultano essere le più instabili. Alcune di queste zone coincidono con frane attive, individuate sia attraverso l'analisi isocluster che dai rilievi geomorfologici. Durante le osservazioni sul campo sono stati rilevati movimenti di massa in corso e segni evidenti di frane recenti, confermando l'elevato rischio di instabilità. Il corpo di frana attivo è chiaramente visibile in questo cluster, come illustrato nella Figura 50.

In particolare, nelle zone di frana evidenziate in Figura 57, rispettivamente ri-cartografate sulla base delle elaborazioni eseguite in questa tesi, le morfologie (ondulazioni) segnalano movimenti franosi attivi, in particolare corpi di frana per colamento. La conformazione ondulata del terreno individuata nell'isocluster trova analogia con quanto visto durante i sopralluoghi sul posto. Le ondulazioni visibili nella mappa, che segnalano movimenti franosi attivi, sono infatti chiaramente riconoscibili anche sul versante in esame (vedi Figura 56), dove le forme del terreno evidenziano un corpo di frana attivo per colamento. Le pieghe e i rigonfiamenti del terreno osservati in campo confermano la dinamica del movimento franoso già suggerita dall'analisi isocluster.



Figura 56 – Versante interessato da frana attiva per colamento

Tuttavia, va notato che questa chiarezza può diminuire nelle aree che vengono coltivate o lavorate dall'azienda agraria. In queste situazioni, l'azione antropica altera la morfologia del terreno, rendendo più difficile interpretare i risultati. Nelle zone disturbate, l'analisi isocluster ha suggerito potenziali movimenti franosi, ma non con la stessa evidenza delle aree non perturbate.

I movimenti franosi sono evidenziati in modo significativo dai parametri morfometrici quali pendenza e curvatura. La pendenza, infatti, aumenta la forza di gravità che agisce sul terreno, rendendo più probabile il colamento ³⁶. La curvatura positiva (concava longitudinalmente) tende ad accumulare l'acqua, saturando il terreno e aumentando il rischio di colamento, mentre una curvatura convessa agevola il deflusso dell'acqua, aumentando il rischio di erosione ³⁷.

L'analisi effettuata tramite l'isocluster ha prodotto risultati che, in generale, trovano conferma nelle osservazioni svolte durante i rilievi geomorfologici. Tuttavia, tale analisi ha permesso di evidenziare con maggiore chiarezza alcune caratteristiche del terreno e dei fenomeni franosi che non erano immediatamente visibili sul campo.

³⁶ Terzaghi, Karl, Ralph B. Peck, and Gholamreza Mesri. Soil mechanics in engineering practice. John Wiley & sons, 1996.

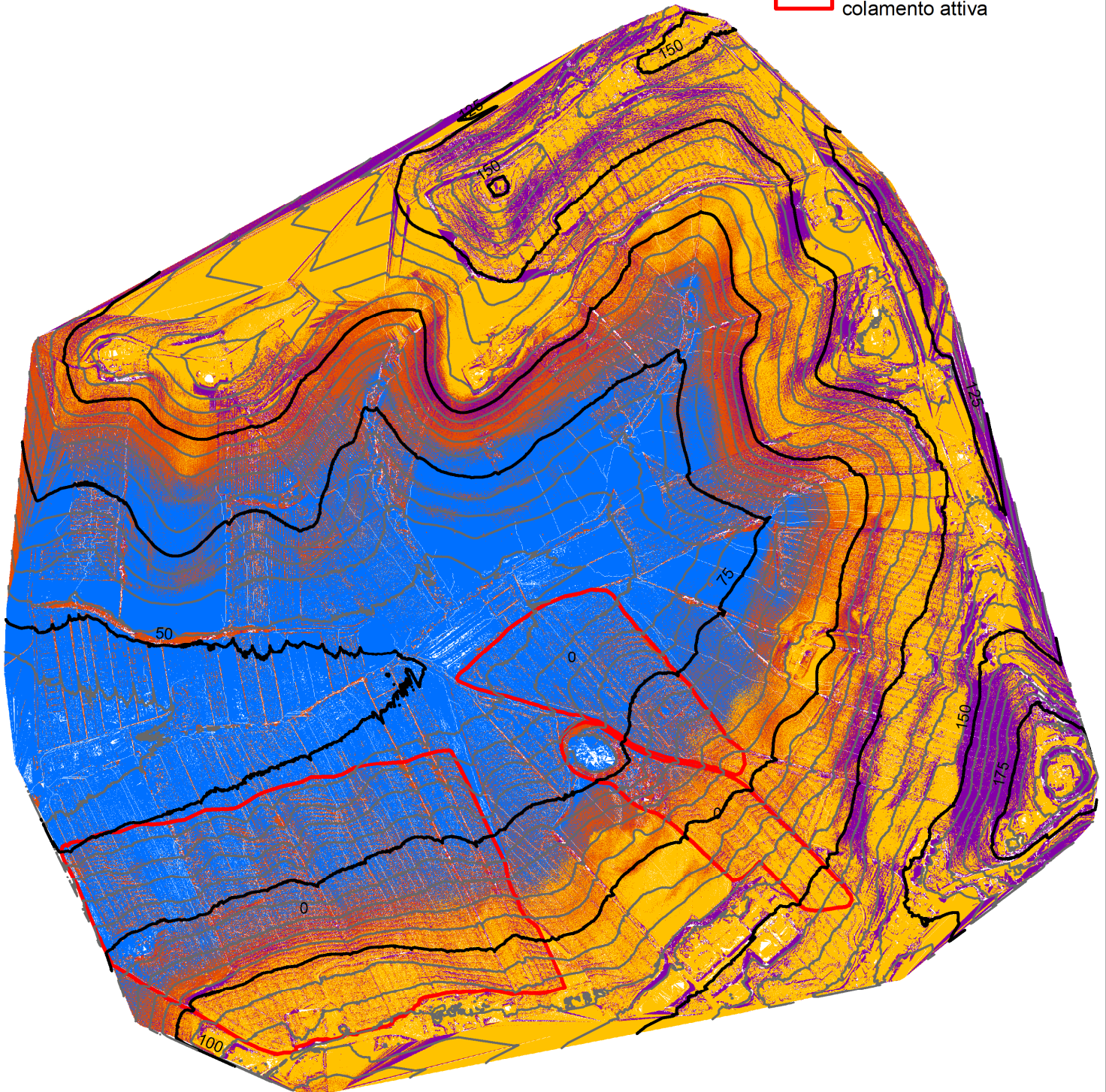
³⁷ Selby, M. J. Hillslope Materials. Oxford University Press, 451p, 1993.



Legenda Iso Cluster Unsupervised Classification

Value

-  cluster 1
-  cluster 2
-  cluster 3
-  cluster 4
-  Corpo di frana di colamento attiva



0 0.1 0.2 0.4 Kilometers

Figura 57 – Iso Cluster Unsupervised Classification, 4 cluster

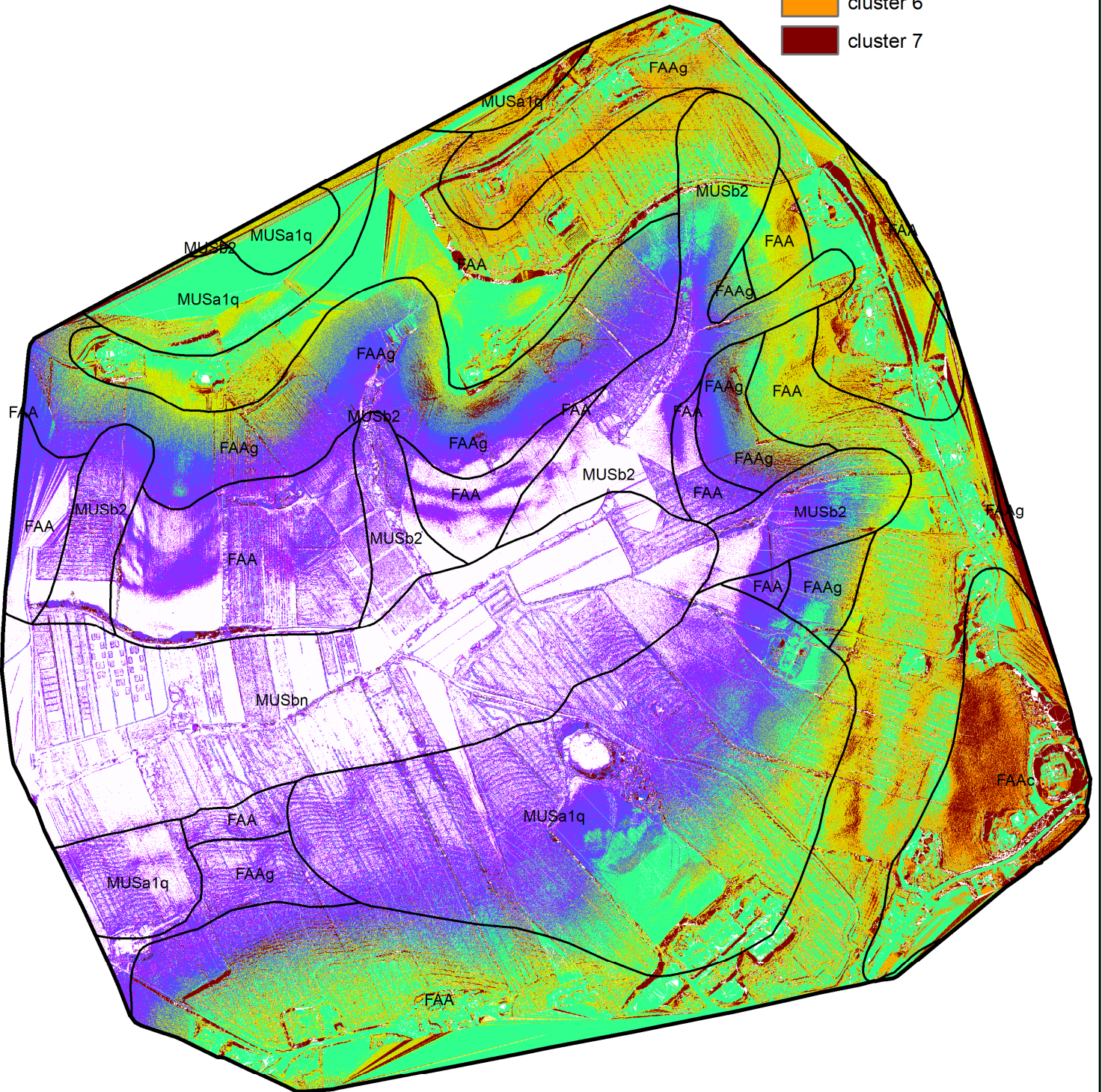
Passando all'analisi della mappa a sette cluster, questa è più accurata nell'identificare i contrasti litologici. Il cluster 3 rappresenta il contatto tra FAA e FAAG. Ciò suggerisce che i parametri morfologici utilizzati nell'analisi siano particolarmente efficaci nel rappresentare le caratteristiche geologiche dell'area studiata, e possono contribuire a ri-cartografare con maggiore precisione la geologia dell'area.



Legenda Iso Cluster Unsupervised Classification

Value

-  cluster 1
-  cluster 2
-  cluster 3
-  cluster 4
-  cluster 5
-  cluster 6
-  cluster 7



0 0.1 0.2 0.4
Kilometers

Figura 58 – Iso Cluster Unsupervised Classification, 7 cluster

6. CONCLUSIONI

Le analisi svolte in questo lavoro mettono in luce l'importanza dell'analisi morfometrica derivante da dati drone e LiDAR di alta risoluzione per identificare fenomeni franosi superficiali. In particolare, l'attenzione è stata posta sull'instabilità dei versanti a sud dell'Azienda Agraria dell'Università Politecnica delle Marche, situati a monte e nelle vicinanze del lago, con un approfondimento sulle dinamiche erosive e i processi di rimodellamento del territorio.

La metodologia adottata, basata su una raccolta e un'analisi approfondita di dati morfometrici, ha permesso di identificare i fenomeni gravitativi di versante, nello specifico i colamenti lenti. I parametri morfometrici come Esposizione e Accumulo di Flusso non sono risultati utili alla classificazione Iso Cluster Unsupervised, mentre la Pendenza, Curvatura e Quota sono risultati utili all'identificazione delle frane. Questa metodologia ha contribuito ad evidenziare e cartografare con estrema precisione le frane di colamento, servendo da integrazione al rilievo geologico classico.

Future implementazioni riguardano l'applicazione di diversi metodi statistici, sia supervisionati che semi-supervisionati ed il loro confronto con il metodo applicato in questa tesi.

7. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

7.1 Bibliografia

Cruden, David. "A simple definition of a landslide." *Bulletin of Engineering Geology & the Environment* 43.1 (1991).

Coulomb, C. "Test on the applications of the rules of maxima and minima to some problems of statics related to architecture." *Mem. Math. Phys* 7 (1773): 343-382.

Terzaghi, Karl. *Theoretical soil mechanics*. 1943.

U. Alasia - M. Pugno, *Corso di Costruzioni 5* © SEI (2011)

AGI, American Geological Institute, *Glossary of Geology*, 2a ed. (1973)

Varnes, D. J. "Slope movement types and processes." *Landslides: analysis and control* (1978).

Comune di Agugliano, *storia e cultura*, (2024)

COCCIONI R., GALEOTTI S. & RAGNI D. (1992) - Litho- and biostratigraphy of the Scaglia Bianca formation (Late Albian-Late Cenomanian) in the Umbria-Marche Apennines. 6th Congress Geol. Soc. Of Greece & IGCP, 262 Annual Meeting (Athens, May 1992), Abstracts: 4, Athens.

PIERGIOVANNI F. (1989) - Eventi lito-biostratigrafici nella Scaglia Bianca umbro-marchigiana in connessione con l'episodio anossico del "Livello Bonarelli" (limite Cenomaniano-Turoniano). Boll. Soc. Geol. It., 108: 29-314, 8 figg., 1 tav., Roma.

ALVAREZ W. & MONTANARI A. (1988) - The Scaglia Limestones (Late Cretaceous-Oligocene) in the northeastern Apennines carbonate sequence: stratigraphic context and geological significance.

Amorosi, Alessandro, et al. "Sedimentology, micropaleontology, and strontium-isotope dating of a lower-middle Pleistocene marine succession (" Argille Azzurre") in the Romagna Apennines, Northern Italy." Bollettino della Società geologica italiana 117.3 (1998): 789-806.

Channell, J. E. T., et al. "Magnetic stratigraphy and biostratigraphy of Pliocene "argille azzurre"(Northern Apennines, Italy)." Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 110.1-2 (1994): 83-102.

Nichols, Gary. Sedimentology and stratigraphy. John Wiley & Sons, 2009.

Mücher, Herman, Henk van Steijn, and Frans Kwaad. "Colluvial and mass wasting deposits." Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. Elsevier, 2018. 21-36.

Knighton, David. Fluvial forms and processes: a new perspective. Routledge, 2014.

ICA (International Cartographic Association)

ISPRA, Quaderno 13 (2021)

TERRAIN, ADIGITAL. "Digital terrain models: an overview." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 44.12 (1978): 1481-1485.

Horn, Berthold KP. "Hill shading and the reflectance map." *Proceedings of the IEEE* 69.1 (1981): 14-47.

Laplace, Pierre Simon. *Théorie analytique des probabilités*. Courcier, 1820.

Gauss, Carl Friedrich. *Disquisitiones generales circa superficies curvas*. Dieterich, 1828.

Terzaghi, Karl, Ralph B. Peck, and Gholamreza Mesri. *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons, 1996.

Selby, M. J. *Hillslope Materials*. Oxford University Press, 451p, 1993.

7.2 Sitografia

<https://enterprise.dji.com/it/matrice-350-rtk>

<https://enterprise.dji.com/it/zenmuse-12>

<https://www.geopro.it/programmi/mercurio>

[https://dl.djicdn.com/downloads/matrice_350_rtk/Matrice 350 RTK User Manual v1.0_it.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/matrice_350_rtk/Matrice_350_RTK_User_Manual_v1.0_it.pdf)

<https://www.esri.com/it-it/arcgis/products/arcgis-online/overview>

<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/idw.htm>

<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>

https://spatialanalysisonline.com/HTML/profiles_and_curvature.htm

<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>

https://spatialanalysisonline.com/HTML/profiles_and_curvature.htm

<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/how-aspect-works.htm>

<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm>

<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-iso-cluster-works.htm>

8. RINGRAZIAMENTI

Desidero innanzitutto esprimere la più profonda gratitudine ai professori che mi hanno guidato e sostenuto in questo percorso. Al Prof. Alberto Tazioli, il mio relatore, per la sua preziosa guida e il continuo supporto che ha reso possibile la realizzazione di questa tesi. Alla Prof.ssa Elisa Mammoliti e al Prof. Roberto Pierdicca, per i loro consigli e incoraggiamenti che hanno arricchito il mio lavoro. Un ringraziamento speciale va anche all' Ing. Stefano Chiappini, per il suo contributo e la sua disponibilità.

A mio padre e a mia madre, per aver sempre creduto in me e per il loro amore incondizionato. Grazie per avermi trasmesso il valore dell'impegno e della perseveranza, e per avermi insegnato che, con il sostegno della famiglia, nessun obiettivo è irraggiungibile.

A mio fratello e a mia sorella, che sono sempre stati al mio fianco, anche nei momenti più difficili. È vero che vi ho sempre dato i piatti e le posate più brutte a tavola, ma se me lo chiedeste, non esiterei a donarvi il cuore.

Un pensiero speciale va ai miei nonni. Ho due angeli in cielo e due sulla terra. Ai miei nonni che mi guardano dall'alto, vi porto sempre nel cuore, siete la mia guida silenziosa. Ai miei nonni che sono qui con me, vi ringrazio per il vostro amore, la vostra saggezza e per tutto il sostegno che non mi avete mai fatto mancare. Siete un esempio di forza e dedizione, e sono immensamente fortunato ad avervi al mio fianco.

Un ringraziamento speciale va ai miei amici di sempre: Calcio, Jajo, Richi, Rosa, Alex, Ju, Gigi e Mike, per tutte le serate trascorse insieme, e per quella leggerezza e spensieratezza che solo loro sanno regalarmi. Tra tutti, vorrei citare in particolare Arca, Den e Leo, che sono stati presenti in ogni momento, non solo nei momenti di svago, ma anche nei più difficili.

Non posso non ringraziare Massa, Grassi, Colle, Palma, Castrico, Mimmo, Lele, Daniel e Met. Senza di voi, questo percorso non sarebbe stato lo stesso. Insieme abbiamo preparato esami, affrontato sfide e ci siamo sostenuti a vicenda, ma abbiamo anche preso molte decisioni discutibili in serate indimenticabili. Vi auguro tutto il meglio nel mondo del lavoro, ma se qualcuno dovesse chiedermi di consigliarvi come ingegneri... suggerirei sicuramente di cercare un secondo parere!

Un grazie speciale va a Tommaso, che non conoscevo prima dell'università ma con cui ho trascorso i momenti più intensi, belli e difficili del percorso. Sei stato la spalla su cui contare nei momenti di incertezza, e non lo dimenticherò mai. Questo legame va ben oltre il nostro percorso di studi.