



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E ARCHITETTURA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

**BILANCIO IDROLOGICO DELL'AREA DELL'AZIENDA AGRARIA UNIVPM: STIMA DEL
RUSCELLAMENTO SUPERFICIALE PER LA GESTIONE DEL LAGO IRRIGUO**

Hydrological balance of the agricultural holding UNIVPM: Estimation of surface runoff for the
management of the lake

Tesi di Laurea Triennale di:

Cancellieri Tommaso

Relatore:

Prof. Tazioli Alberto

Correlatori:

Dott. Fronzi Davide

Prof. Mancini Adriano

Anno Accademico 2023/2024

Sommario

1. INTRODUZIONE	4
2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO.....	6
2.1 Inquadramento geografico.....	6
2.2 Inquadramento climatico.....	9
2.3 Inquadramento geologico	11
2.4 Inquadramento idrologico	12
3. DEFINIZIONI PRINCIPALI E STATO DELL'ARTE.....	14
3.1 Idrogeologia	14
3.2 Bilancio idrologico.....	16
3.3 Bacino idrografico.....	20
3.4 Reticolo idrografico	24
4. MATERIALI E METODI D'INDAGINE	26
4.1 Materiali.....	28
4.1.1 Cartografia.....	28
4.1.2 Drone.....	29
4.1.3 Strumenti informatici.....	33
4.2 Metodi d'indagine	39
4.2.1 Rilievo aerofotogrammetrico	39
4.2.2 Analisi e interpretazione dei dati tramite strumenti informatici	49

4.2.3 Uscite in campagna	56
5. RISULTATI	58
5.1 Modello digitale del terreno	58
5.1.1 DTM.....	58
5.1.2 Pendenza	61
5.1.3 Accumulo del flusso.....	65
5.2 Estrazione del reticolo idrografico	68
5.3 Calcolo del ruscellamento superficiale	71
6. DISCUSSIONI	79
7. CONCLUSIONI.....	90
8. FONTI	92
8.1 Bibliografia	92
8.2 Sitografia	99
9. RINGRAZIAMENTI	100

1. INTRODUZIONE

La gestione delle risorse idriche rappresenta una delle principali sfide per la sostenibilità ambientale, soprattutto in un contesto di cambiamenti climatici e pressione crescente sulle risorse naturali (Rulli et al., 2013). I cambiamenti climatici stanno modificando i regimi delle precipitazioni, rendendoli meno prevedibili e intensificando sia i periodi di siccità che di pioggia (Foley et al., 2011). In questo quadro, l'ottimizzazione della raccolta e dell'uso delle acque piovane, supportata da una pianificazione accurata delle risorse idriche, è essenziale per ridurre la vulnerabilità del territorio (Bates et al., 2008).

Il presente studio si colloca in questo ambito, con l'obiettivo di analizzare il bilancio idrologico dell'azienda agraria dell'Università Politecnica delle Marche (d'ora in avanti denominata UNIVPM), situata ad Agugliano. L'attenzione è rivolta alla stima del ruscellamento superficiale e alla gestione di un lago, che rappresenta una risorsa strategica per l'irrigazione. La gestione sostenibile delle risorse idriche è particolarmente importante per garantire che i beni limitati siano utilizzati nel modo più efficiente possibile, riducendo al minimo gli sprechi (Singh & Woolhiser, 2002).

Il lago in questione, è alimentato principalmente dal deflusso superficiale generato dalle precipitazioni ed è minacciato da un movimento franoso nel versante a monte. Il contributo del ruscellamento superficiale non solo alimenta il lago, ma può anche incrementare i rischi di dissesto idrogeologico, accelerando fenomeni di erosione e scorrimento (Crosta e Frattini, 2008). Di conseguenza, una stima accurata del ruscellamento diventa cruciale non solo per la gestione delle acque ma anche per la prevenzione dei rischi geologici e idrologici (Cascini et al., 2010).

La metodologia utilizzata in questo studio integra tecniche di rilevamento avanzate con metodologie di analisi idrologica tradizionali. In particolare, un drone di ultima generazione è stato impiegato per ottenere un modello digitale aggiornato dell'area di studio, mentre strumenti informatici e cartografie disponibili sono stati utilizzati per elaborare ed interpretare i dati. Questa combinazione di tecnologie ha permesso di ottenere una visione dettagliata della morfologia del territorio, fondamentale per l'analisi dei flussi idrici e la gestione delle risorse.

L'obiettivo principale della tesi è quindi stimare il ruscellamento superficiale basandosi sui dati pluviometrici per ottimizzare la gestione del lago irriguo.

2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

2.1 Inquadramento geografico

Agugliano è un comune nelle Marche di circa 22 chilometri quadrati, rientra nella provincia di Ancona, e si trova a circa 15 chilometri ad ovest dal capoluogo regionale. Sorge su un colle e fa parte della Terra dei Castelli, denominazione derivante dalla presenza di numerose fortificazioni, un tempo destinate alla difesa e alla salvaguardia della città di Ancona. Agugliano conta quattro frazioni: Castel d'Emilo, Il Molino, La Chiusa e il Borgo Ruffini (Wikipedia).

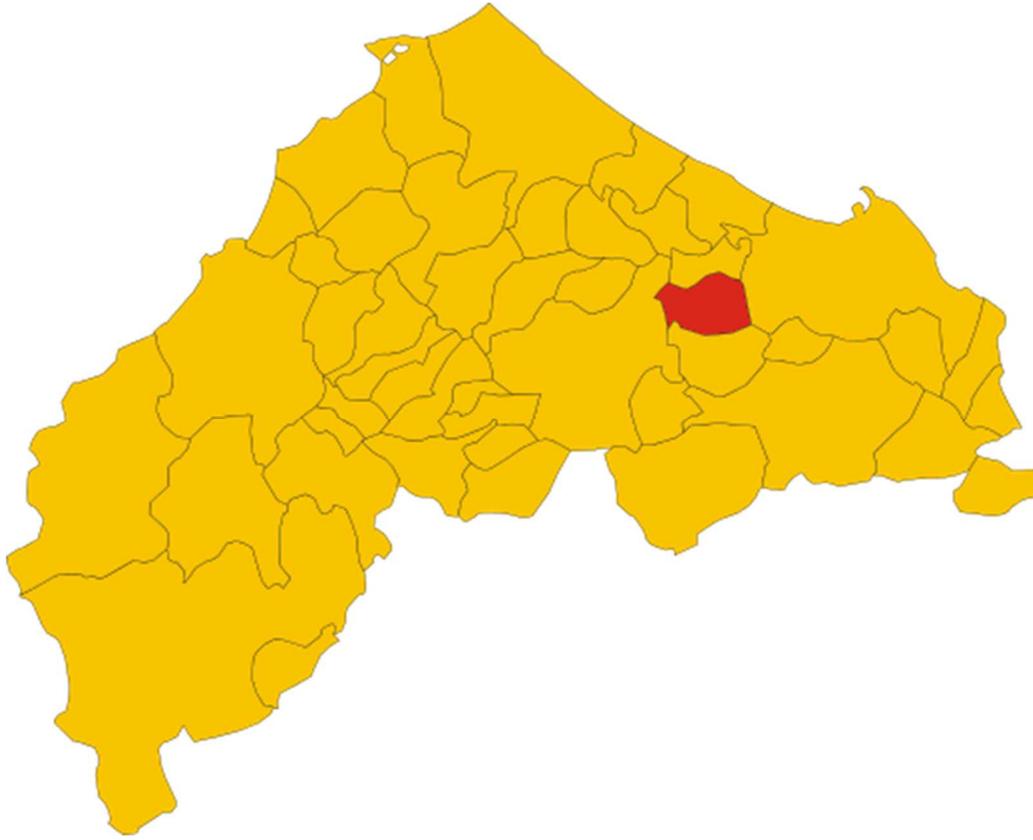


Figura 1: Comune di Agugliano nella provincia di Ancona

La zona in esame, visibile in figura 2, è ubicata nella frazione di Borgo Ruffini, nello specifico è l'area di pertinenza dell'Azienda agricola UNIVPM. Questa azienda svolge ricerca nell'ambito agricolo coltivando diverse sementi per poi esaminare i raccolti ed elaborarne i dati.

All'interno dell'appezzamento è presente uno specchio d'acqua alimentato prevalentemente dal deflusso superficiale dovuto alle precipitazioni. Questo è utilizzato per l'irrigazione delle coltivazioni, ed è quindi fondamentale definirne il bilancio idrologico e sfruttarne a pieno la potenzialità.

Inoltre, si è notato che, soprattutto nelle zone a monte del lago, il terreno è soggetto a frane, che dovranno essere quindi studiate, al fine di capirne le origini e le possibili soluzioni per metterle in sicurezza.



Figura 2: Area di studio

2.2 Inquadramento climatico

L'area di studio, essendo a circa 15 chilometri dalla costa del Mediterraneo, risente sia dell'influenza marina, sia di quella montana. Questa combinazione dà vita ad un clima submediterraneo a tratti continentale, creando una certa varietà annuale. Le temperature variano dai 2-4°C in inverno, fino ai 30-32°C in estate. Non è solito avere temperature più estreme, ma negli anni è successo più volte.

I dati pubblici sulle precipitazioni sono scarsi, l'unico annale pluviometrico della stazione di Agugliano risale al 2003, con 609,8 mm annui, allegato nella figura 4 (Servizio Protezione civile regione Marche, Tabella 1 Sezione B, 2022, https://www.regione.marche.it/portals/0/Protezione_Civile/Manuali%20e%20Studi/annale-parte-I-2022.pdf).

AGUGLIANO													
Bacino: Esino (170m s.l.m.)											Giorno		
(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
		5.0							4.2			0.2	24
		49.6							19.4			0.2	25
											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 annuo: «
4	6	5	5	5	«	3	5	10	0	10	9	«	Totale mensili N giorni piovosi

Figura 3: Annale pluviometrico stazione Agugliano

I dati degli annali pluviometrici, riferiti a un solo anno, non risultano sufficienti per le analisi richieste. Pertanto, sono stati arricchiti con ulteriori informazioni, in particolare riguardanti temperatura e pioggia, relative al periodo 2009-2023, attraverso la piattaforma gestita dalla Protezione Civile regione Marche SIRMIP (<https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Protezione-Civile/Console-Servizi-Protezione-Civile/SIRMIP-online>).

In figura 4 sono mostrati i grafici relativi a precipitazioni e temperature delle stazioni di Agugliano per le precipitazioni e Monte Polesco per le temperature. Non essendo presente una stazione che registra le temperature in Agugliano, si è scelta la stazione più prossima.

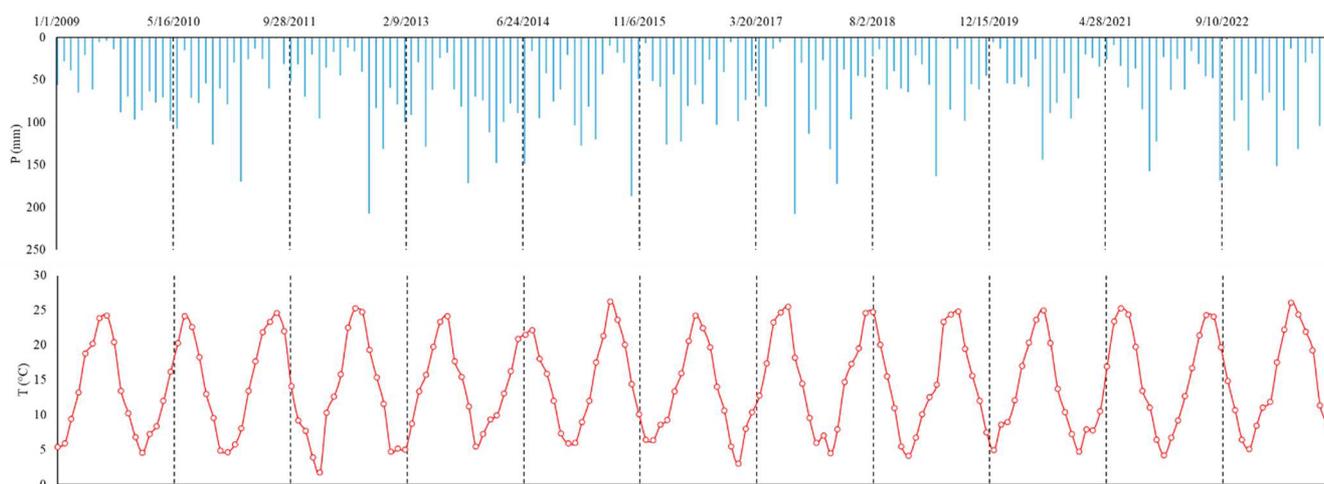


Figura 4: Dati di precipitazioni e temperatura di Agugliano relativi al periodo 2009-2023

2.3 Inquadramento geologico

Dal punto di vista geomorfologico, Agugliano si trova in un'area caratterizzata da rilievi collinari, con pendii dolci e valli incise da processi fluviali che hanno modellato il paesaggio nel corso del tempo. Questi rilievi sono il risultato dell'erosione delle rocce sedimentarie, prevalentemente argillose e marnose, influenzata anche dal sollevamento tettonico che ha agito sull'intera area appenninica (Pizzi, 2003; Centamore et al., 1996). Le argille presenti nell'area sono particolarmente suscettibili ai movimenti franosi, essendo terreni che perdono facilmente coesione in presenza di acqua, un fattore che contribuisce alla vulnerabilità del territorio a fenomeni di dissesto idrogeologico (Crosta et al., 2008).

Dall'analisi della carta geologica, allegata in figura 5, emerge che gli affioramenti sono costituiti principalmente da argille azzurre, spesso associate a depositi marini pliocenici, e da depositi alluvionali ed eluvio-colluviali nelle aree più basse, formati in seguito al trasporto e alla sedimentazione da parte dei corsi d'acqua locali (Pierantoni et al., 2013). Questa conformazione geologica conferma la presenza di instabilità dei versanti, in quanto i terreni argillosi sono soggetti a deformazioni e movimenti franosi superficiali, soprattutto durante periodi di piogge intense (Cardinali et al., 2001).

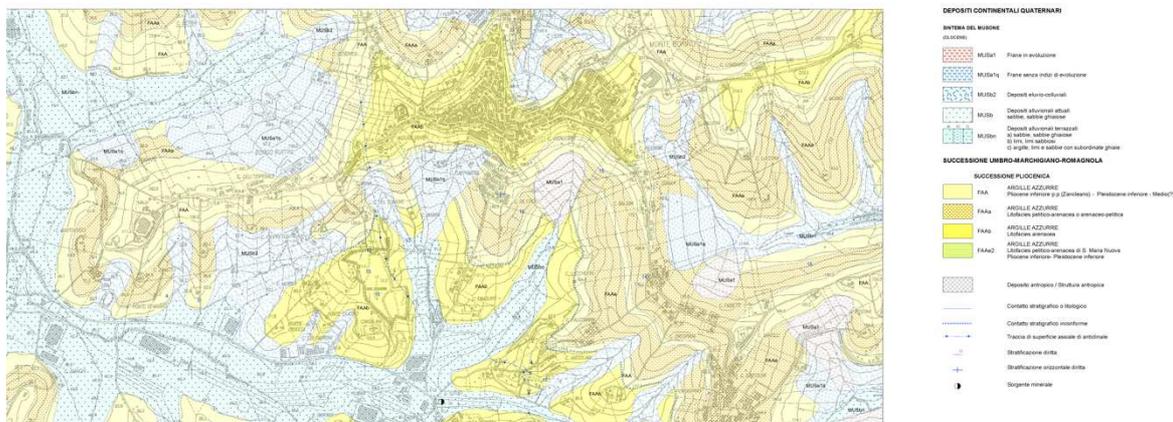


Figura 5: Mappa geologica

2.4 Inquadramento idrologico

Agugliano rientra nel bacino idrografico del fiume Esino, uno dei più importanti della regione Marche, che drena una vasta area della provincia di Ancona (Fanciulli et al., 2003). Il fiume Esino, che scorre a est di Agugliano, svolge un ruolo cruciale nel sistema idrografico locale, poiché raccoglie il ruscellamento delle precipitazioni provenienti dalle colline circostanti. Sebbene Agugliano non sia direttamente attraversata da grandi corsi d'acqua, l'influenza del sistema di drenaggio del fiume Esino è evidente, con la presenza di corsi d'acqua intermittenti e stagionali, che aumentano significativamente la

loro portata durante i mesi autunnali e invernali, in corrispondenza delle piogge più intense (Tebaldi et al., 2013).

La conformazione idrologica del territorio è fortemente influenzata dalla natura del suolo, costituito prevalentemente da argille e sabbie, che favoriscono il ruscellamento superficiale. Questo fenomeno, unito alla natura collinare del paesaggio, contribuisce a frequenti episodi di erosione del suolo e, in alcuni casi, ad allagamenti nelle aree a valle, soprattutto durante gli eventi di pioggia eccezionali (Borga et al., 2014). Fenomeni di questo tipo sono comuni in regioni con terreni a bassa permeabilità, come dimostrato in studi sui bacini collinari italiani, dove i terreni argillosi accentuano il rischio di dissesto idrogeologico (Marchi et al., 2010).

3. DEFINIZIONI PRINCIPALI E STATO DELL'ARTE

3.1 Idrogeologia

L'idrogeologia è una disciplina che si concentra sullo studio delle acque sotterranee e delle loro interazioni con le formazioni geologiche. La presenza e il comportamento dell'acqua nel sottosuolo sono fortemente influenzati dalle caratteristiche geologiche del terreno, come la sua permeabilità e porosità. Gli acquiferi, strutture geologiche che possono immagazzinare e trasmettere acqua, sono particolarmente studiati per comprendere il flusso delle acque sotterranee e stimare la loro capacità di contenimento (Freeze & Cherry, 1979). Gli acquiferi vengono analizzati utilizzando modelli idrogeologici che permettono di stimare il flusso e la disponibilità delle risorse idriche sotterranee attraverso parametri geologici e idrodinamici per valutare la sostenibilità degli sfruttamenti idrici (Domenico e Schwartz, 1990).

Il flusso delle acque sotterranee è regolato dalle leggi della fisica, in particolare dalla legge di Darcy (1856), che descrive la relazione tra la permeabilità del terreno e il gradiente idraulico. Questo principio fondamentale consente di comprendere come l'acqua si muove attraverso vari strati di roccia e sedimenti (Bear, 1972). Studi recenti hanno inoltre evidenziato come il cambiamento climatico possa influenzare il ciclo dell'acqua sotterranea, modificando i

pattern di ricarica degli acquiferi e, di conseguenza, la disponibilità di risorse idriche (Taylor et al., 2013).

L'idrogeologia studia anche il moto dell'acqua sotterranea, che dipende dalla geomorfologia del terreno e dalle condizioni ambientali. L'utilizzo di modelli numerici, come i modelli MODFLOW, è cruciale per tracciare e prevedere i percorsi che l'acqua sotterranea può seguire all'interno del sottosuolo (Harbaugh et al., 2000). Questi modelli forniscono un quadro dettagliato che permette di pianificare e gestire in modo sostenibile l'estrazione delle acque sotterranee e di prevenire fenomeni di sfruttamento eccessivo (overexploitation) e contaminazione.

In sintesi, l'idrogeologia offre una prospettiva integrata sulla gestione sostenibile delle risorse idriche sotterranee. Le sue applicazioni vanno dalla pianificazione idrica alla prevenzione di disastri naturali come smottamenti e frane, che possono essere influenzati dalle dinamiche delle acque sotterranee, soprattutto in contesti geologici complessi come le aree collinari e montane (Bruno et al., 2008).

3.2 Bilancio idrologico

- L'acqua studiata dell'idrogeologia è la risultante delle precipitazioni al netto dell'evapotraspirazione e del ruscellamento e prende il nome di "infiltrazione efficace" - (Castany, 1982).

L'infiltrazione efficace rappresenta dunque quella porzione di acque meteoriche che riesce a penetrare nel sottosuolo. Tale acqua è essenziale per la ricarica degli acquiferi, e la sua entità viene calcolata utilizzando questa formula:

$$\textit{Infiltrazione efficace} = \textit{Precipitazioni} - \textit{Evapotraspirazione} - \textit{Ruscellamento}$$

L'infiltrazione efficace è quindi determinata dalla capacità del terreno di assorbire l'acqua, che a sua volta dipende dalla permeabilità e dalla porosità del suolo. Custodio (2005) sottolinea che il tipo di suolo gioca un ruolo cruciale nella regolazione del flusso idrico sotterraneo.

Suoli con maggiore porosità, come quelli ghiaiosi o sabbiosi, facilitano l'infiltrazione, mentre terreni argillosi o poco permeabili rallentano questo processo, riducendo la quantità di acqua che raggiunge gli acquiferi. Il concetto è semplificato nella figura sottostante, che fornisce un esempio schematico di come funziona la permeabilità.

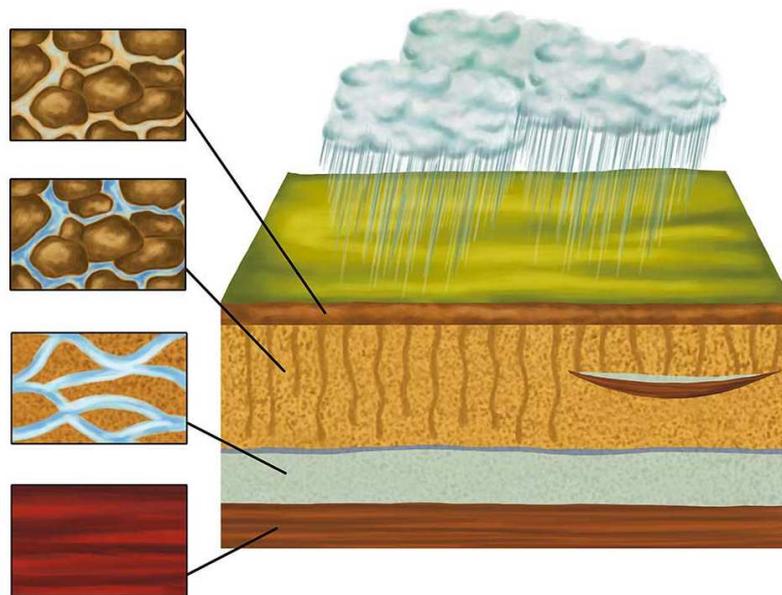


Figura 6: Esempi di diverse permeabilità

Custodio (2005) classifica i suoli in base al loro coefficiente di permeabilità, che rappresenta la velocità con cui l'acqua attraversa il mezzo. Questo coefficiente di permeabilità, misurato in metri al secondo [m/s], varia notevolmente tra diversi tipi di terreno.

Di seguito un breve elenco contenente i coefficienti di permeabilità per i terreni generalmente più presenti:

Grado di permeabilità	Coefficiente di permeabilità [-]	Tipo di roccia
Alto	$K > 10^{-2}$	Ghiaia
Medio	$10^{-2} > K > 10^{-4}$	Sabbia
Basso	$10^{-4} > K > 10^{-9}$	Sabbia fine
Impermeabile	$K < 10^{-9}$	Argilla

Come evidenziato da Custodio (2005), un terreno altamente permeabile permette all'acqua di fluire rapidamente, mentre uno con bassa permeabilità la trattiene, ostacolandone l'infiltrazione. La comprensione di questi parametri è essenziale per determinare la quantità di infiltrazione efficace, che influenza direttamente la disponibilità di acqua nei sistemi idrologici locali.

La stima delle precipitazioni avviene attraverso dati storici raccolti in annali idrologici e stazioni di monitoraggio locali dotate di pluviometri. Questi strumenti forniscono misurazioni dettagliate che permettono di calcolare le quantità d'acqua che raggiungono il terreno in specifici periodi di tempo

(Castany, 1982). L'evapotraspirazione, invece, può essere stimata con modelli basati su fattori ambientali come clima e vegetazione, oppure può essere considerata trascurabile in condizioni specifiche, quando il suo apporto risulta minimale rispetto al bilancio idrico complessivo.

L'acqua che non si infiltra o evapotraspira, si muove lungo i versanti sotto forma di ruscellamento superficiale, un processo che dipende fortemente dalla morfologia del terreno, come pendenza e direzione di flusso. Nel contesto specifico di questo studio, il ruscellamento contribuisce all'alimentazione di bacini idrici locali, come il lago irriguo analizzato, influenzando in modo significativo la gestione delle risorse idriche e i fenomeni erosivi.

La formula del bilancio idrico può essere rappresentata così:

$$R = P + Q_{out} - Q_{in} - I_{eff} - ETR$$

Dove:

- R è il ruscellamento;
- P sono le precipitazioni;
- Q_{out} e Q_{in} sono rispettivamente prelievi e apporti esterni;
- I_{eff} è l'infiltrazione efficace;

- ETR è l'evapotraspirazione.

In definitiva, comprendere e stimare accuratamente questi parametri è fondamentale per la gestione sostenibile delle risorse idriche e per prevenire fenomeni di erosione e dissesto idrogeologico in aree collinari.

3.3 Bacino idrografico

Un bacino idrografico è un'area geografica delimitata da linee di spartiacque che definiscono i confini all'interno dei quali tutte le acque superficiali, generate da fenomeni meteorologici come piogge, nevicate o scioglimento di ghiacciai, convergono verso un unico corso d'acqua principale (D'Agostino et al., 2005). Queste acque, attraverso ruscellamento superficiale, vengono raccolte e canalizzate lungo una rete fluviale che include non solo il fiume principale, ma anche tutte le ramificazioni e corsi d'acqua minori, quali torrenti, ruscelli o affluenti, naturali o artificiali, che vi confluiscono.

La definizione di un bacino idrografico è essenziale per la comprensione della gestione delle risorse idriche in quanto ogni bacino costituisce un sistema idrico interconnesso, dove gli eventi meteorologici e le caratteristiche geomorfologiche locali influenzano il movimento delle acque all'interno di questo sistema complesso. La delimitazione fisica di un bacino, dettata dalle

linee di spartiacque, permette di comprendere meglio come l'acqua scorre in una determinata area e quali territori sono influenzati dal medesimo sistema fluviale (Ward & Robinson, 1990).

Inoltre, il concetto di bacino idrografico è fondamentale per pianificare interventi di gestione delle acque, prevenzione delle alluvioni e valutazione dell'impatto ambientale su un determinato territorio, poiché tutti i fenomeni che accadono in un bacino, come l'erosione del suolo o l'inquinamento, hanno ripercussioni sul fiume e sui suoi affluenti.

In generale è possibile stimare il perimetro di un bacino idrografico preliminarmente con questo procedimento:

1. Studio della cartografia: si ricerca la zona di studio nella cartografia di base IGM 1:25.000. La figura 7 mostra lo stralcio contenente Agugliano ed evidenzia in rosso l'area di interesse. Questa fornisce una rappresentazione dettagliata dell'altitudine grazie alle curve di livello. Queste linee, anche dette isoipse (stessa altezza dal greco), sono l'insieme dei punti a stessa quota sul livello medio del mare. In base alla loro forma, distanza e intersezioni si riesce a risalire all'orientazione e alla pendenza dei versanti;

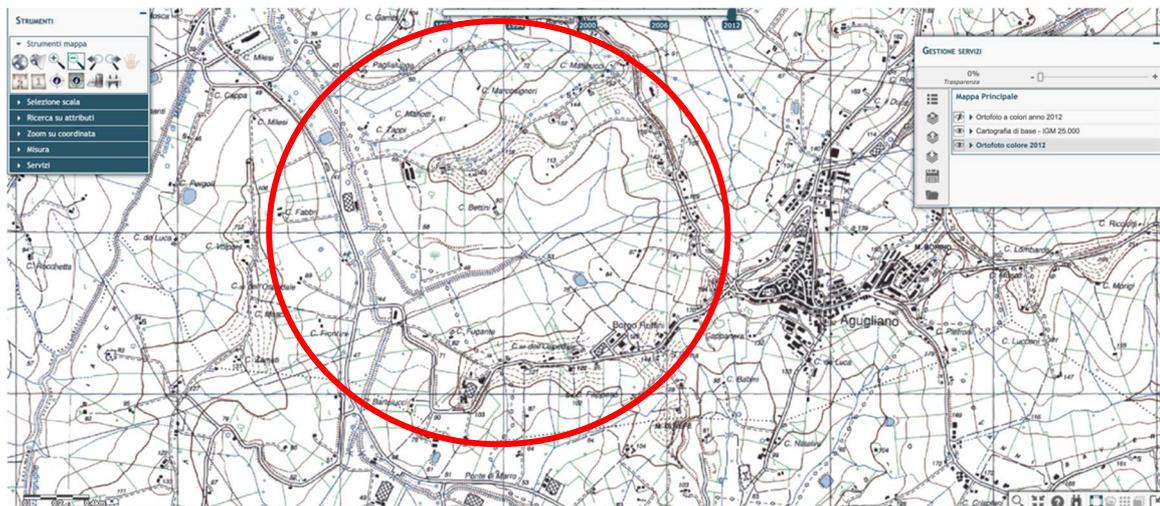


Figura 7: Cartografia di base IGM 1:25.000 zona di Agugliano

2. Determinazione delle linee spartiacque: Le linee spartiacque separano i vari bacini, in particolare corrispondono alle creste del versante, ovvero il punto più elevato tra le due valli. La cresta può presentarsi solitamente in due modi: perpendicolare alla curva di livello e quindi si determina attraverso il punto dove le curve di livello formano “archi” o hanno cambi di direzione molto marcati, oppure sulla curva di livello, che quindi corrisponderà alla linea spartiacque;
3. Tracciamento del perimetro del bacino: collegando le varie linee spartiacque si traccia semplicemente il perimetro del bacino idrografico;

3.4 Reticolo idrografico

All'interno di un bacino idrografico, si sviluppa un complesso sistema di drenaggio superficiale, che viene definito reticolo idrografico. Questo sistema è composto da un insieme di corsi d'acqua, come fiumi, torrenti e ruscelli, sia naturali che artificiali, nonché da specchi d'acqua come laghi e stagni (Gregory & Walling, 1973). Il reticolo idrografico agisce come una rete, in cui i corsi d'acqua minori (affluenti) si uniscono progressivamente ai torrenti di dimensioni maggiori, fino a confluire nel fiume principale o in uno specchio d'acqua (Brierley & Fryirs, 2005).

La struttura e l'organizzazione del reticolo idrografico sono fortemente influenzate da diversi fattori naturali:

- **Morfologia del territorio:** Come si può osservare in figura 9, in aree montuose, i corsi d'acqua sono generalmente più stretti, ripidi e con maggiore velocità di flusso. Al contrario, nelle depressioni, il fiume rallenta, si allarga e tende a formare meandri, modificando il suo percorso (Leopold et al., 1964);
- **Geologia del terreno:** la permeabilità del suolo è un elemento fondamentale per determinare se l'acqua scorrerà in superficie o si infiltrerà nel sottosuolo. Terreni più permeabili favoriscono

l'infiltrazione, riducendo la quantità di acqua che contribuisce al ruscellamento superficiale (Fetter, 2001);

- **Clima locale:** le condizioni climatiche, quali precipitazioni, umidità e temperatura, influenzano la portata e l'estensione del reticolo idrografico. In regioni con forti precipitazioni, ad esempio, il reticolo sarà più sviluppato, con una maggiore quantità di acqua che scorre verso i corsi principali (Thornthwaite, 1948).

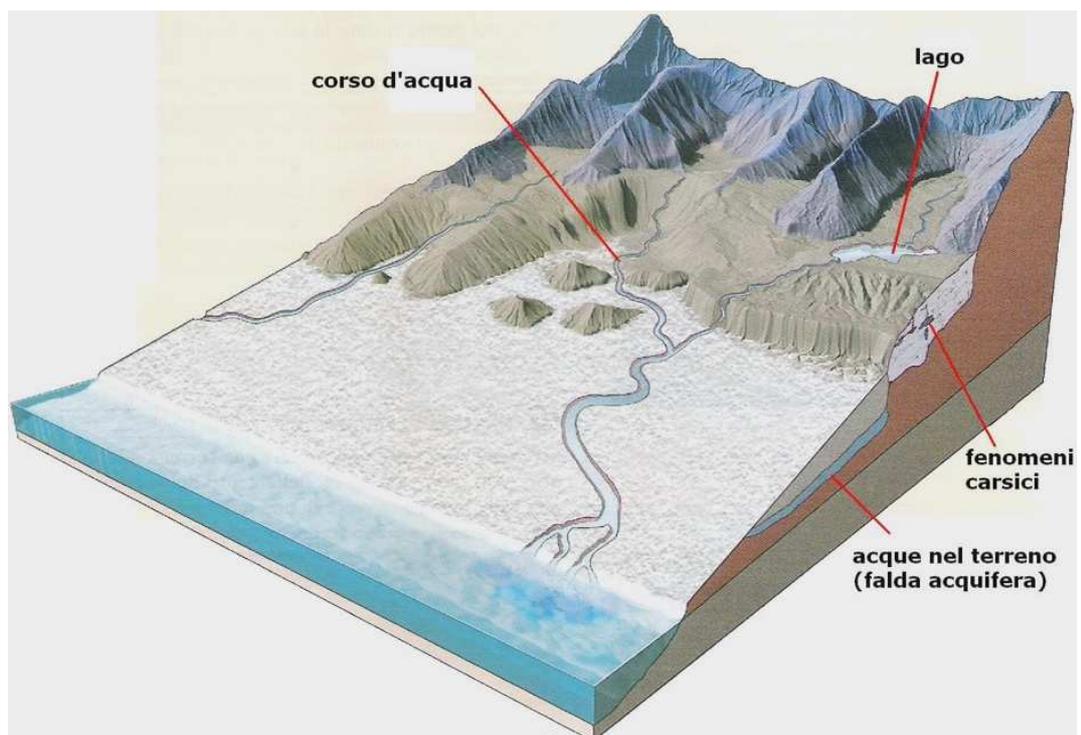


Figura 9: Esempio dell'evoluzione di un corso d'acqua da monte a valle

4. MATERIALI E METODI D'INDAGINE

Essendo i dati a disposizione imprecisi e obsoleti, si è ritenuto necessario procedere con un nuovo rilievo, rielaborando i dati su scala più opportuna e aggiornata, al fine di ottenere una rappresentazione più chiara e dettagliata. Questo è avvenuto grazie alla combinazione di tecnologie avanzate come il rilievo aerofotogrammetrico e LiDAR, che fornisce una visione corrente e accurata del sito di studio e software quali ArcGis Enterprise e WaterbalANce, con tecnologie più tradizionali come cartografia e rilievi in loco. Ad esempio, il reticolo idrografico a disposizione è quello presente sul geoportale nazionale, ma questo è realizzato su una scala talmente ampia da compromettere la precisione necessaria per i fini dello studio.

Come si può vedere dalla figura 10 sottostante, il reticolo è composto pressoché solo dal corso d'acqua principale, trascurando quindi tutti i torrenti ed i ruscelli presenti. Inoltre, essendo datato, non riflette accuratamente le condizioni attuali del territorio. Eventi di pioggia intensa possono influenzare nell'immediato sia corsi d'acqua minori, la cui portata varia notevolmente in base alle precipitazioni, sia il fiume principale, sebbene tenda a rispondere più lentamente.



Figura 10: Reticolo idrografico presente sul geoportale nazionale

La rielaborazione del bacino idrografico a disposizione si baserà su tre fasi:

1. Sopralluogo per verificare quanto il reticolo idrografico disponibile coincida allo stato attuale del territorio;
2. Elaborazione digitale dei dati acquisiti tramite il rilievo aerofotogrammetrico, estrazione del reticolo idrografico aggiornato;
3. Verifica del reticolo ultimato con rilievo manuale.

4.1 Materiali

4.1.1 Cartografia

La cartografia rappresenta uno strumento essenziale per la pianificazione territoriale e l'analisi del paesaggio. La sua importanza deriva dalla capacità di fornire una rappresentazione visiva e analitica delle caratteristiche geografiche e geomorfologiche del territorio, facilitando la comprensione spaziale delle relazioni ambientali e delle dinamiche che lo caratterizzano (Montello, 1993). Nel contesto di questo studio, la cartografia ha svolto un ruolo fondamentale non solo nella progettazione, ma anche nella raccolta e nell'elaborazione dei dati. Attraverso l'uso di mappe topografiche e tematiche, è stato possibile analizzare elementi come la morfologia del territorio e la distribuzione dei corsi d'acqua. Questi strumenti hanno permesso di avere una visione integrata e precisa del contesto territoriale, elemento cruciale per ogni fase della ricerca. In particolare, sono state utilizzate le seguenti mappe:

- Cartografia di base IGM 1:25.000 (Geoportale nazionale);
- Carta geologica regionale 1:10.000;
- Carta delle litologie della regione Marche zona SUD 1:100.000;
- 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).

4.1.2 Drone

Le rilevazioni aeree sono state eseguite utilizzando il drone DJI Matrice 350 (figura 11) , equipaggiato con la fotocamera LiDAR DJI Zenmuse L2 (figura 12).

Il drone è stato messo a disposizione grazie all'accordo di prestito da parte del Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DII) al Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA). In particolare, si ringrazia per questa operazione il professore Pierdicca Roberto e la professoressa Malinverni Eva Savina per il dipartimento DICEA e il professore Mancini Adriano per il dipartimento DII. La combinazione di tecnologie avanzate ha permesso di ottenere dati spaziali di alta precisione e di elevata qualità, indispensabili per una valutazione dettagliata del territorio.



Figura 11: Drone utilizzato nei rilievi

Il DJI Matrice 350 è un drone professionale progettato per applicazioni avanzate nel settore della mappatura e della rilevazione. Le sue caratteristiche principali includono:

- **Capacità di carico e stabilità:** è in grado di supportare carichi utili significativi, garantendo stabilità e precisione durante il volo. Questa capacità è essenziale per trasportare il sensore LiDAR Zenmuse L2 e per mantenere la qualità dei dati raccolti;
- **Autonomia e portata:** Dotato di batterie ad alta capacità, il Matrice 350 offre una notevole autonomia di volo, permettendo missioni estese senza la necessità di frequenti rientri per la sostituzione delle batterie (autonomia di circa 30 minuti). Inoltre, il drone ha una buona portata di controllo e trasmissione dei dati, consentendo di coprire ampie aree di studio;
- **Tecnologie di stabilizzazione e navigazione:** Il sistema di stabilizzazione avanzato del Matrice 350, insieme ai sensori di navigazione di precisione, garantisce un volo stabile e sicuro, riducendo al minimo le vibrazioni e i movimenti indesiderati che potrebbero compromettere la qualità dei dati.

La fotocamera LiDAR DJI Zenmuse L2, montata sul Matrice 350, è un sensore avanzato progettato per la raccolta di dati LIDAR ad alta precisione. Le sue principali caratteristiche sono:

- **Tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging):** La Zenmuse L2 utilizza la tecnologia LiDAR per misurare le distanze tra il sensore e il suolo. Emettendo impulsi laser e rilevando il tempo impiegato dal ritorno di questi impulsi, il sensore è in grado di creare nuvole di punti dettagliate che rappresentano la topografia del terreno con una precisione millimetrica;
- **Integrazione con Fotocamera RGB:** Oltre al sensore LiDAR, la Zenmuse L2 è dotata di una fotocamera RGB ad alta risoluzione. Questa combinazione permette di acquisire sia dati spaziali tridimensionali che immagini fotografiche ad alta qualità, offrendo una visione completa e dettagliata del territorio;
- **Precisione e Risoluzione:** La Zenmuse L2 offre una risoluzione elevata e una precisione accurata nella rilevazione dei dati. Questo è particolarmente utile per la mappatura di dettagli fini e per la creazione

di modelli digitali del terreno, necessari per un'analisi approfondita e per la rappresentazione precisa delle caratteristiche geografiche.



Figura 12: Fotocamera LIDAR DJI Zenmuse L1

Le caratteristiche sopra elencate sono state estratte dal sito del produttore (store.dji.com).

4.1.3 Strumenti informatici

Nel processo di analisi dei dati raccolti durante lo studio, gli strumenti informatici hanno svolto un ruolo cruciale, permettendo di elaborare e analizzare grandi quantità di informazioni in modo accurato e sistematico.

ArcGIS Enterprise

Il software ArcGIS Enterprise è stato utilizzato per la gestione, l'elaborazione e la visualizzazione dei dati spaziali, offrendo una comprensione dettagliata delle caratteristiche territoriali e ambientali.

ArcGIS Enterprise è un software GIS a pagamento ampiamente utilizzato per la gestione e l'analisi dei dati spaziali. È noto per la sua potenza e versatilità, offrendo un'ampia gamma di strumenti avanzati per l'analisi geografica e la creazione di mappe professionali. Le sue principali caratteristiche includono:

- **Gestione avanzata dei dati spaziali:** ArcGIS Enterprise supporta un'ampia varietà di formati, tra cui shapefile, dati raster e vettoriali, oltre a strumenti per l'integrazione di database spaziali complessi. Questa capacità è stata essenziale per visualizzare e analizzare grandi volumi di dati territoriali, consentendo di gestire informazioni su diverse scale spaziali e temporali;

- **Analisi geospaziale avanzata:** Il software offre strumenti di analisi avanzata come la creazione di buffer, analisi di overlay, geoprocessing e modellazione territoriale. Questi strumenti sono fondamentali per esaminare la distribuzione spaziale di fenomeni e per calcolare indicatori territoriali e idrografici, rilevanti per lo studio del bacino idrografico;
- **Interoperabilità e strumenti integrati:** ArcGIS Enterprise consente l'integrazione di dati provenienti da diverse fonti e tecnologie, come i dati LiDAR o i rilievi fotogrammetrici, migliorando la precisione delle analisi.

In sintesi, ArcGIS Enterprise offre una piattaforma robusta e completa per la gestione e l'analisi dei dati spaziali, rendendolo uno strumento indispensabile per lo studio e la pianificazione territoriale.

Le caratteristiche sopra elencate sono state estratte dal sito del produttore (esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/overview).

WaterbalANce

WaterbalANce (Mammoliti et al., 2021), automatizza il processo di Thornthwaite e Mather (1955), un metodo empirico sviluppato per stimare il bilancio idrico mensile a partire da dati climatici essenziali. Questo metodo è

ampiamente utilizzato in idrologia, per la gestione delle risorse idriche, in agricoltura e altre discipline correlate, nonostante sia considerato datato rispetto a tecniche più moderne.

Il bilancio idrico calcolato con il metodo Thornthwaite–Mather si fonda sull'equilibrio tra l'acqua che entra nel sistema tramite le precipitazioni e l'acqua che esce attraverso processi come l'evapotraspirazione, il ruscellamento superficiale (runoff) e la ricarica delle falde (infiltrazione).

Questo approccio utilizza tre parametri principali:

- La temperatura media mensile (T_m);
- Le precipitazioni mensili (P);
- La latitudine (LAT) dell'area di studio, che influenza la radiazione solare disponibile.

(Thornthwaite & Mather, 1955).

A partire da questi dati, il metodo calcola l'evapotraspirazione potenziale (PET), che rappresenta il massimo volume di acqua che può essere trasferito dall'area di studio alla fase gassosa, per evaporazione e traspirazione vegetale.

La formula per il calcolo della PET è data da un'equazione empirica che tiene conto della temperatura e di un fattore correttivo legato alla latitudine (Allen et

al., 1998). Inoltre, il metodo considera l'umidità del suolo (SM), ovvero la capacità del suolo di immagazzinare acqua, un parametro importante per stimare il deflusso e per la gestione delle risorse idriche.

Questo metodo è particolarmente indicato per aree umide, dove i dati climatici in termini di precipitazioni e temperatura, sono sufficienti per ottenere risultati accurati. Tuttavia, presenta alcune limitazioni in regioni aride o climi equatoriali, dove tende a sottostimare la PET, poiché non considera il deficit di saturazione del vapore dell'aria (L'Ecuyer & Lewis, 2019). Anche il fattore di deflusso (β), utilizzato per stimare la quota di surplus idrico che genera il deflusso superficiale, è un valore empirico fisso che potrebbe non rappresentare correttamente le dinamiche idrologiche stagionali o le variabilità geologiche di alcuni bacini (Doorenbos & Pruitt, 1977).

Nonostante queste limitazioni, il metodo è ancora ampiamente utilizzato grazie alla sua semplicità e facilità di implementazione in software come WaterbalANce.

Questa web app, che si basa sul codice originario del metodo Thornthwaite–Mather portato su Python, consente di inserire i dati climatici e ottenere come risultati runoff, PET e bilancio idrico complessivo, in modo rapido e

automatizzato, migliorando l'accessibilità e riducendo i tempi di calcolo per grandi dataset (Elguindi et al., 2016).

L'applicazione pratica di questo strumento è stata testata su due bacini idrografici in Italia (Appennino settentrionale) e Slovenia, mostrando una buona concordanza tra i valori modellati e quelli misurati, con margini d'errore accettabili, soprattutto nelle regioni umide (Zanon et al., 2018).

In generale il modello trova applicazione in settori come l'agricoltura, la gestione forestale e la pianificazione urbana, dove è essenziale monitorare e prevedere l'equilibrio idrico di un territorio (Willmott et al., 1985; Wang et al., 2018).



Thornthwaite-Mather App

Figura 20: <https://thornwaterbalance.com/>

Il programma di calcolo WaterbalANce necessita di alcuni dati di input, nello specifico:

- Mail di riferimento;
- Latitudine del sito di studio;
- Soil moisture storage capacity (SM) [mm];
- Runoff coefficient (β) [%];
- Snowfall rainfall temperature threshold (SRT) [$^{\circ}\text{C}$];
- File MS Excel contenente data, temperature medie mensili [$^{\circ}\text{C}$], piogge cumulate mensili [mm].

I risultati saranno inviati sulla e-mail e saranno divisi in due file, un primo file MS Excel con dati di input, parametri originali della web app (k,I,a) e risultati (PET, P-PET, AET, ST, S, RO, SMRO, tot SO) e un secondo file con i risultati graficati.

4.2 Metodi d'indagine

4.2.1 Rilievo aerofotogrammetrico

Poiché l'ortofoto più recente disponibile risaliva al 2012, si è ritenuto necessario utilizzare un modello più attuale e aggiornato. Per questo motivo, è stato condotto un rilievo aerofotogrammetrico mediante l'impiego del drone DJI Matrice 350, equipaggiato con il sensore DJI Zenmuse L2.

Questa operazione, complessa sia sotto il profilo economico che organizzativo, è stata resa possibile grazie alla collaborazione tra diversi dipartimenti dell'UNIVPM. In particolare, il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione DII, di Ingegneria Civile, Edile e Architettura DICEA e Agraria hanno lavorato sinergicamente per fornire all'azienda agraria dati aggiornati e completi relativi all'area coltivata.

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

La combinazione della potenza e stabilità del drone, con l'alta risoluzione e precisione del sensore ha permesso di ottenere un'ortofoto dettagliata e un modello tridimensionale dell'area, elaborato in tempo reale.

Di seguito il report della missione svolta tra il 10/05/2024 e il 17/05/2024:

1. Pianificazione della missione di volo: Prima di eseguire il rilievo, è avvenuta una fase preliminare di pianificazione per definire gli obiettivi e ottimizzare il percorso di volo: utilizzando dati satellitari (Google Maps), si è identificata l'area di studio valutandone le condizioni geografiche e ambientali, come ostacoli naturali (colline, alberi) o antropici (edifici, infrastrutture). In questo caso erano presenti alcuni casolari e molti alberi. Questo problema è stato semplicemente risolto impostando un'altitudine del volo tale da non interferire con i suddetti ostacoli;

2. Definizione dell'area di interesse: Si sono stabiliti i confini precisi della zona da rilevare. Solitamente si considera un franco di sicurezza per evitare di svolgere un secondo rilievo in caso di dati mancanti ai confini della zona di studio, ma questo va ben calibrato considerando quanto può variare la durata del rilievo;

3. Inserimento di target topografici: I target sono delle tavole gialle e nere ad alta visibilità (figura 13). Sono stati posizionati in punti strategici del terreno, visibili anche nelle immagini acquisite dal drone. Durante la fase di elaborazione, le coordinate di tali target, acquisite tramite GPS, hanno

consentito di calibrare ulteriormente le immagini, riducendo l'errore dovuto alla sovrapposizione delle immagini stesse;



Figura 13: Piazzamento dei target topografici

4. Pianificazione del piano di volo: Utilizzando il software di pianificazione (DJI Pilot 2), dal radiocomando del drone si crea il piano di volo in automatico (figura 14). Il software consente di impostare parametri come altitudine di volo, velocità e distanza tra le traiettorie. L'altitudine, come anticipato

precedentemente, dipende dalla risoluzione desiderata e dalla topografia dell'area. Nel caso di questo rilievo è stata impostata a 10m non variabile, ciò significa che il drone in automatico segue l'andamento altimetrico del terreno mantenendo costante la distanza da esso. La velocità influenza la risoluzione e la durata, di solito si imposta tra i 5 e 6 m/s. La sovrapposizione tra le traiettorie è necessaria alla combinazione dell'ortofoto. In questo caso per garantire un buon risultato si è impostata a 80%;



Figura 14: Piano di volo visibile dal radiocomando

5. Preparazione del drone e del sensore: Prima di decollare, è importante verificare che il drone e i suoi componenti siano pronti per l'operazione:

- Controllo carica delle batterie: Il DJI Matrice 350 richiede batterie completamente cariche per garantire un'autonomia sufficiente. Viene utilizzata una doppia batteria per avere un'autonomia più alta,
- Installazione del sensore DJI Zenmuse L2: Questo sensore combina tecnologia LiDAR, una fotocamera RGB e un'unità IMU (Inertial Measurement Unit). Deve essere per ancorato tramite una vite al gancio apposito sul lato frontale del drone;
- Controllo della connessione RTK: Il DJI Matrice 350 è dotato di una connessione RTK (Real-Time Kinematic), che permette di ottenere una precisione centimetrica nella georeferenziazione dei dati. Si verifica che la base RTK sia correttamente configurata e connessa per ridurre al minimo gli errori di posizionamento.



Figura 15: Assemblaggio del drone

6. Decollo ed esecuzione del volo: Una volta pronti (figura 16), si procede con l'esecuzione del rilievo:

- Decollo automatico: Utilizzando il piano di volo precedentemente impostato, il drone decolla automaticamente e segue le traiettorie

stabilite. Il pilota mantiene comunque il controllo per eventuali aggiustamenti manuali.



Figura 16: Drone pronto al decollo

- La raccolta dei dati da parte della fotocamera avviene in diversi modi in base al tipo di fonte:
 - LiDAR: Durante il volo, il sensore LiDAR emette impulsi laser che misurano la distanza dal terreno e dagli oggetti, creando una nuvola di punti tridimensionale altamente dettagliata. Questo permette di ottenere informazioni precise sulla morfologia del terreno, anche in presenza di vegetazione fitta;

- Fotocamera RGB: Le immagini vengono acquisite simultaneamente e georeferenziate. Queste serviranno per generare un'ortofoto ad alta risoluzione e per colorare la nuvola di punti;
- Dati IMU e GPS: L'unità IMU integrata registra i movimenti del drone per garantire una corretta stabilizzazione delle immagini, mentre i dati GPS vengono usati per la georeferenziazione.

7. Atterraggio e verifica dei dati: Al termine della missione, il drone atterra automaticamente o su comando manuale, come si vede in figura 17. Prima di procedere con l'elaborazione dei dati, è importante verificarne la qualità. Avviene dunque un rapido controllo sul campo per verificare la qualità e la completezza dei dati acquisiti (nuvole di punti, immagini RGB). I dati vengono trasferiti dal drone o dal sensore a un dispositivo di archiviazione esterno per la successiva elaborazione;



Figura 17: Atterraggio del drone

8. Elaborazione dei dati: L'elaborazione dei dati raccolti è avvenuta in laboratorio da parte dell'ingegnere Stefano Chiappini utilizzando specifici software in base al tipo di dati da elaborare:

- **Processamento dei dati LiDAR:** Le nuvole di punti generate dal sensore LiDAR sono state processate con software dedicati, in questo caso DJI Terra e CloudCompare, al fine di creare un modello digitale del terreno

(DTM). Questo processo richiede l'eliminazione di eventuali rumori e la classificazione dei punti del terreno, della vegetazione o degli edifici;

- Generazione dell'ortofoto: Le immagini RGB raccolte dalla fotocamera vengono combinate per creare un'ortofoto ad alta risoluzione. Durante questo processo, le immagini vengono calibrate e georeferenziate utilizzando i dati RTK e i target topografici piazzati sul campo;
- Colorazione della nuvola di punti: Utilizzando le immagini RGB, è possibile colorare la nuvola di punti LIDAR per ottenere una rappresentazione visivamente più ricca e dettagliata del territorio.

I dati, una volta elaborati, sono pronti per essere analizzati con l'ausilio di altri software come Arcgis Enterprise.

4.2.2 Analisi e interpretazione dei dati tramite strumenti informatici

ArcGIS Enterprise

Questi dati, una volta processati dall'ingegnere Chiappini, sono stati importati in ArcGIS Enterprise (figura 18), dove sono stati utilizzati per eseguire varie analisi geospaziali.

In particolare, il DTM è stato impiegato per creare mappe dettagliate che rappresentano la pendenza, l'esposizione (o orientamento) e l'asperità (o rugosità) del terreno. Queste analisi sono essenziali per comprendere la morfologia del territorio e individuare le aree critiche dal punto di vista geomorfologico. Le mappe generate hanno permesso di ottenere una visione completa e approfondita delle caratteristiche del terreno, fornendo un supporto fondamentale per le fasi successive del progetto di ricerca.

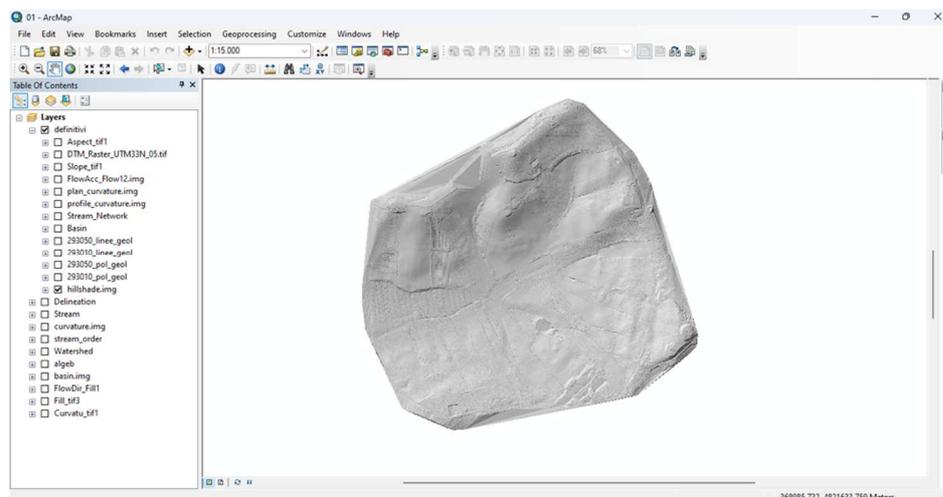


Figura 18: Modello DTM caricato in ARCGIS Enterprise

Una volta caricato il file DTM, la procedura da seguire per estrarre le mappe dei parametri morfologici su ArcGIS Enterprise, è la sottostante.

Ad esempio per la pendenza:

1. Nella barra “Strumenti di processing” si ricerca e si seleziona “Slope”;
2. Nella finestra che appare si seleziona il file DTM come input e si esegue il comando;
3. Verrà creato un nuovo layer raster in cui le pendenze saranno rappresentate da una banda cromatica, con colori più intensi per le pendenze elevate e tonalità più chiare per le pendenze meno accentuate;
4. Eventualmente tramite la tendina “Proprietà” è possibile cambiare la banda cromatica secondo il proprio gradimento. In questo caso la banda va dal verde, che evidenzia pendenze scarse, al rosso per le pendenze elevate.

La procedura è invece differente per ricavare le informazioni legate all'idrologia. La mappa di interesse è principalmente una, quella del reticolo idrografico, ma il procedimento per ottenerla comprende anche altre mappe importanti, come quella dell'accumulo di flusso (Flow accumulation) e quella del bacino idrografico (Basin).

Di seguito è illustrata la procedura per ottenere le mappe di interesse, relative all'idrologia su ArcGIS:

1. Utilizzare lo strumento "Fill" nella barra "Strumenti di processing", impostando come input il DTM. Questo elimina eventuali vuoti nel raster, rendendo la superficie più omogenea;
2. Eseguire "Flow Direction", selezionando il raster "Fill" come input. Questo crea una mappa che mostra la direzione del flusso in base all'altitudine delle celle;
3. Eseguire "Flow Accumulation", usando come input la mappa di direzione del flusso per calcolare l'accumulo di flusso in ciascuna cella;
4. Eseguire "Basin" per generare la mappa dei bacini idrografici, sempre in base alla direzione del flusso;
5. Convertire il bacino idrografico selezionato in formato vettoriale per evidenziarne il perimetro;
6. Utilizzare "Raster Calculator" con il raster "Flow Accumulation" e una soglia definita (in questo caso 15000) per generare il reticolo idrografico, successivamente convertito in polilinea;

7. Eseguire “Stream order” selezionando come input il raster calculator e il flow direction, selezionare il metodo più opportuno, in questo caso Strahler, per ottenere una distinzione dei corsi d’acqua in base alla loro dimensione;
8. Visualizzare la mappa finale mantenendo attivi solo i layer del bacino e della gerarchia dei corsi d’acqua per ottenere un’immagine chiara e dettagliata del reticolo idrografico.

Questa procedura consente di ottenere una rappresentazione accurata della rete idrografica all’interno del bacino idrografico studiato.

WaterbalANce e MS Excel

Per utilizzare la web app, è necessaria una raccolta di dati preliminari. Come già accennato, il software richiede specifici dati di input.

Per raccogliere le informazioni relative a temperatura e precipitazioni, è stata utilizzata la piattaforma SIRMIP, gestita dalla Protezione Civile regione Marche accessibile al link <https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Protezione-Civile/Console-Servizi-Protezione-Civile/SIRMIP-online>.

Questo servizio consente di scaricare dati termopluviometrici relativa alla nostra regione. In questo caso, sono stati selezionati i dati giornalieri di

temperatura e precipitazioni dal 1° gennaio 2009 al 31 dicembre 2023. L'anno 2024 non è stato considerato, poiché essendo ancora in corso, non consentirebbe di calcolare medie annuali significative.

Per quanto riguarda le precipitazioni è stata utilizzata la stazione di Agugliano, mentre per le temperature, è stata utilizzata una stazione situata nei pressi del sito di studio: Monte Polesco, poiché non esiste una stazione in loco in grado di misurare direttamente i dati.

Dopo aver scaricato i dati, è stata effettuata una verifica della loro completezza, uniformità e attendibilità. È fondamentale escludere dati errati, poiché talvolta le stazioni meteorologiche possono presentare problemi tecnici che generano valori anomali. In particolare, la stazione utilizzata per la temperatura ha riscontrato gravi problemi tecnici dal dicembre 2021 al gennaio 2023, registrando temperature massime fino a 55°C e minime fino a -20°C, valori chiaramente inverosimili per il clima dell'area di studio. Tali dati sono stati esclusi mediante l'uso di MS Excel e sostituiti con un'interpolazione delle temperature medie degli anni precedenti.

Successivamente, sono state calcolate le medie mensili per le temperature e le cumulate mensili per le precipitazioni.

Il file di input è stato strutturato con anno, mese, temperatura media mensile e pioggia cumulata mensile, come si vede nella figura 19:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	year	month	Tm	P						
2	2009	1	5,38	55,8						
3	2009	2	5,89	27,2						
4	2009	3	9,42	37,6						
5	2009	4	13,24	64,2						
6	2009	5	18,78	20,4						
7	2009	6	20,23	60,8						
8	2009	7	23,85	5						
9	2009	8	24,26	3,2						
10	2009	9	20,42	13,2						
11	2009	10	13,42	87,6						
12	2009	11	10,23	69						
13	2009	12	6,8	96,4						
14	2010	1	4,57	85,2						

Figura 19: Estratto del file MS Excel di input per WaterbalANce

Da questi dati sono stati sviluppati due grafici, relativamente alle temperature e alle precipitazioni allegati in figura 4.

Una volta completati i dati di input, è possibile caricare il tutto sull'interfaccia di WaterbalANce presente nella figura 20 sottostante:

Let's play

Please follow each step to get the final result.

Step 1 - Get the template and fill it with your data

Get template. Required data are: year, month, T, P

[DOWNLOAD HERE](#) →

Step 2 - Fill the template, complete and submit the form with required data and wait for results...

Email
d.fronzi91@gmail.com

Latitude
43

Soil moisture storage capacity (SM) [mm]
270

Runoff coefficient (beta) [%]
90

Snowfall rainfall temperature threshold (SRT) [°C]
-1

Calculate water balance for the mean hydrological year (original Thornthwaite-Mather method).

[Select Data File and Upload](#)

[Submit Data](#)

Figura 20: Interfaccia di WaterbalANce

I dati sono spiegati in breve di seguito:

- E-mail: necessaria per ricevere i risultati dell'elaborazione;
- Latitudine: Latitudine del sito di studio, necessaria a stimare l'evapotraspirazione potenziale. Agugliano ha latitudine pari a $43,2^\circ$, approssimabile a 43° ;
- Soil moisture storage capacity (SM): Rappresenta la soglia di umidità nel terreno oltre la quale si instaura il fenomeno di infiltrazione o ruscellamento superficiale. In altre parole, è la quantità d'acqua che il terreno può assorbire. Al fine di questo studio è stata rilevata tramite un

senso in loco che esula dalla trattazione di questa tesi, e assunta pari a 270mm;

- Runoff coefficient (β): Rappresenta la percentuale di precipitazione che ruscella superficialmente rispetto a quella che si infiltra. Varia in base alla litologia del sito, per l'area di studio, essendo prevalentemente argille azzurre, si può assumere un 90% di ruscellamento e 10% di infiltrazione (Celico P., 1989);
- Snowfall rainfall temperature threshold (SRT): Rappresenta la soglia di temperatura sotto la quale la precipitazione passa da liquida a solida, quindi da pioggia a neve. Solitamente è assunta come -1°C , in questo caso non è fondamentale, in quanto la temperatura media mensile minima è al di sopra di 1°C , si può quindi considerare che mediamente non siano presenti precipitazioni solide nel sito di studio;
- File MS Excel già spiegato al di sopra.

4.2.3 Uscite in campagna

L'ultimo rilievo sul campo è stato fondamentale per verificarne la corrispondenza tra il reticolo idrografico reale e quello estratto da ArcGIS Enterprise. Questa fase di verifica ha previsto un'accurata ispezione delle aree indicate dalla mappa come punti di accumulo (principalmente il lago illustrato

in figura 21) e canali di deflusso, confrontando le informazioni del modello digitale con la conformazione effettiva del territorio.

Durante il sopralluogo, sono stati presi in esame sia i corsi d'acqua principali che quelli secondari, per accertare che il reticolo ricostruito rispettasse la morfologia idrologica locale. Considerando l'alta definizione del rilievo (0,5 x 0,5 m) il modello digitale include anche i canali artificiali di irrigazione, che di solito sono trascurati. Per questo motivo è stato necessario esaminare e suddividere anche canali artificiali da quelli naturali.

Questo processo ha permesso di validare la precisione del modello, correggendo le discrepanze e confermando l'affidabilità della rappresentazione ottenuta tramite ArcGIS Enterprise.



Figura 21: Lago oggetto di studio

5. RISULTATI

5.1 Modello digitale del terreno

5.1.1 DTM

Il Modello Digitale del Terreno (DTM) è uno strumento essenziale per l'analisi topografica e idrografica di un territorio. Si tratta di una rappresentazione tridimensionale che descrive la morfologia del suolo attraverso dati altimetrici interpolati. Questi modelli si basano su dati precisi, ottenuti da rilievi aerei e tecnologie LiDAR, che forniscono un'accurata misurazione dell'elevazione del terreno (Li et al., 2005).

Nell'analisi idrologica, il DTM è fondamentale per comprendere il comportamento dell'acqua sul territorio. Le informazioni derivanti dall'altitudine di ciascuna cella del DTM vengono utilizzate per calcolare la direzione e l'accumulo del flusso idrico attraverso software, come in questo caso, ArcGIS Enterprise. Questo ci permette di determinare il percorso che l'acqua segue sulla superficie, identificando i canali di drenaggio e le aree dove l'acqua potrebbe accumularsi.

L'elaborazione del DTM non si limita alla modellazione dei flussi idrici, viene utilizzata anche per analizzare la pendenza e la curvatura del terreno, informazioni che sono utili per la valutazione del rischio di erosione e frane.

Nello studio in questione sarà necessaria soltanto la pendenza per studiare l'aspetto idrologico, l'aspetto geotecnico esula dalla trattazione di questa tesi.

L'accuratezza di questi modelli è stata ampiamente dimostrata e validata in numerosi studi, dove il DTM si è rivelato uno strumento insostituibile nella pianificazione territoriale e nella gestione delle risorse naturali (Hutchinson, 1989).

In conclusione, l'uso di un DTM in combinazione con software GIS come ArcGIS Enterprise rappresenta un metodo potente e affidabile per l'analisi dei fenomeni idrografici e geomorfologici, consentendo una gestione precisa e razionale del territorio.

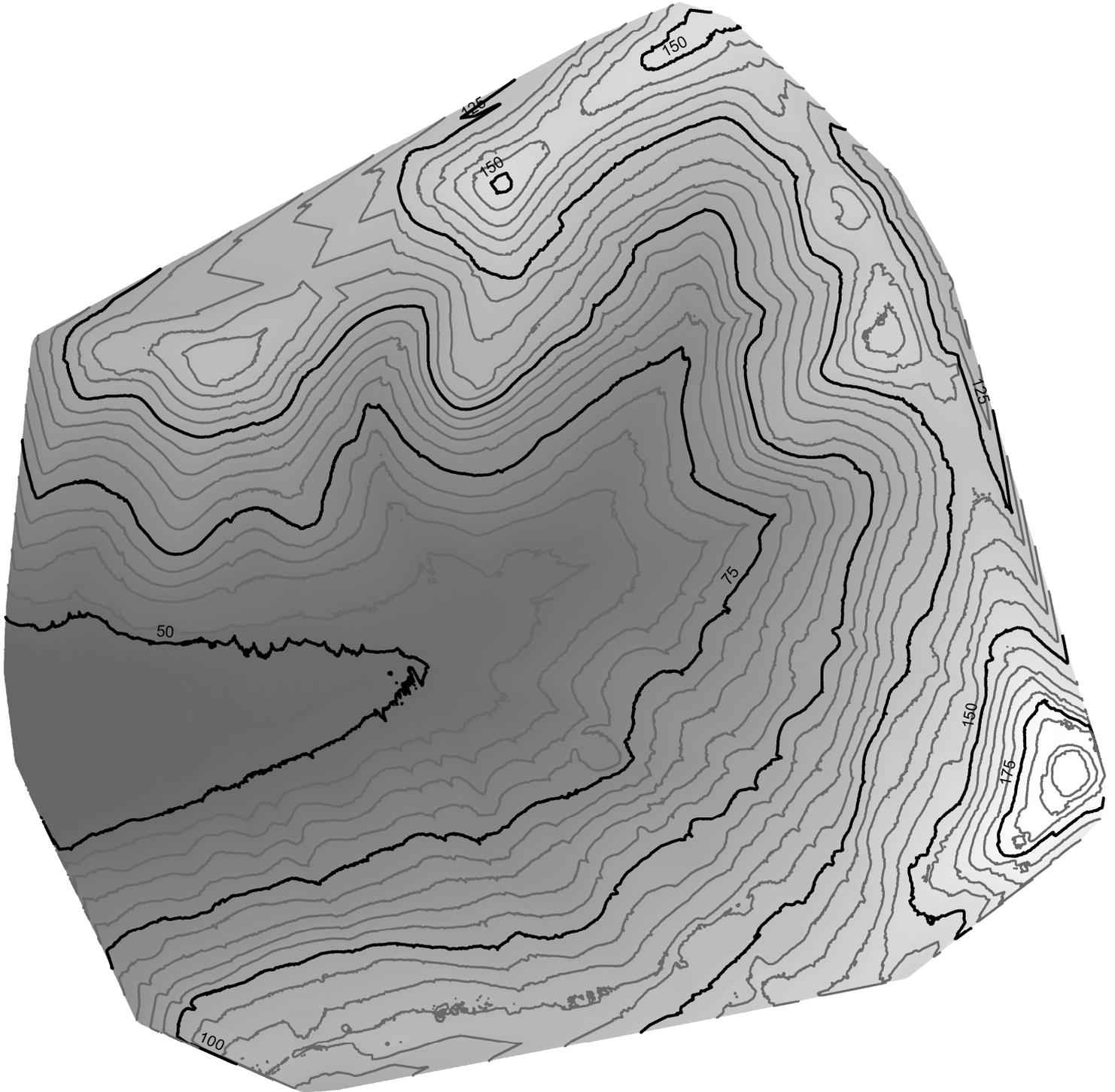
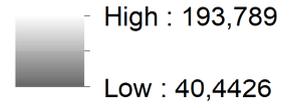
Di seguito è riportato il modello digitale del terreno dell'area di studio estratto da ArcGIS Enterprise in scala 1:10000:



Legenda

DTM (m s.l.m)

Value



5.1.2 Pendenza

Il comando “Slope” di ArcGIS Enterprise permette di calcolare l’inclinazione del terreno per ciascuna cella di un raster, basandosi sulle variazioni di altitudine tra celle adiacenti. Questo strumento fornisce il risultato in due possibili unità di misura: la pendenza espressa in gradi e quella espressa in percentuale. La pendenza in gradi, utilizzata in questo caso, varia da 0° a 90°, dove 0 rappresenta un terreno pianeggiante e 90 un versante verticale (Burrough & McDonnell, 1998).

Per il calcolo, ArcGIS Enterprise utilizza un algoritmo che analizza il gradiente di elevazione attraverso una finestra mobile di 3x3 celle spiegato nella figura 22. L'algoritmo confronta l'elevazione di ogni cella con quella delle celle circostanti, determinando il cambiamento di quota più ripido, che rappresenta la pendenza (esri.com/en-us/arcgis).

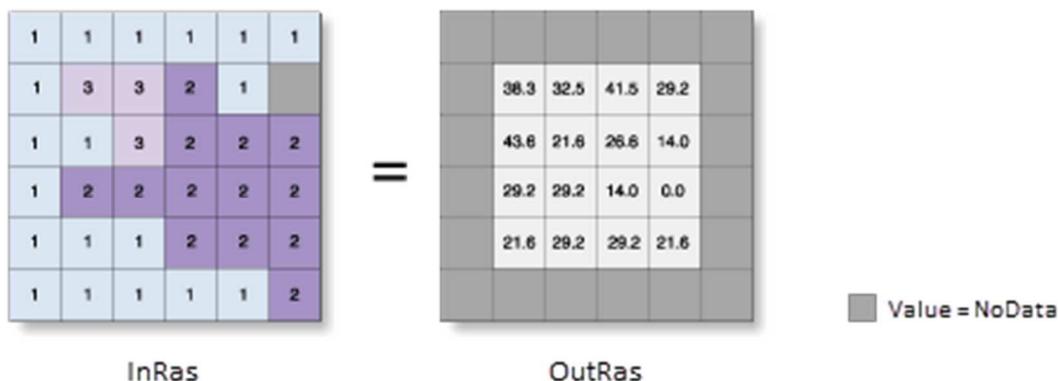


Figura 22: Metodo di calcolo della pendenza utilizzato da ArcGIS Enterprise

Questo approccio aiuta a identificare aree critiche come versanti ripidi o aree considerate più sicure caratterizzate da pendenze dolci. Tale distinzione è fondamentale per le analisi di stabilità dei versanti, di rischio frane o per lo studio della pianificazione territoriale.

Il comando pendenza si rivela particolarmente utile in contesti idrografici, poiché consente di identificare con precisione i gradienti che influenzano la direzione del deflusso delle acque e la velocità di scorrimento nei bacini idrografici. La combinazione con altri strumenti di ArcGIS Enterprise, come Flow Direction e Flow Accumulation, permette di realizzare analisi complete del comportamento idrologico su diverse scale territoriali (Chang, 2016).

I valori della mappa creata sono espressi tramite una scala cromatica che va dal verde chiaro (zone a bassa pendenza) al rosso (zone ad alta pendenza). Nella legenda, il valore massimo di pendenza è di circa $31,59^\circ$, indicando aree con terreni a pendenza elevata, mentre il valore minimo è vicino allo zero, corrispondente a superfici pianeggianti.

I contorni altimetrici sovrapposti alla mappa di pendenza permettono di visualizzare meglio le variazioni topografiche. Le aree con contorni ravvicinati suggeriscono pendii ripidi, confermati dalla colorazione in rosso, e indicano le zone critiche, mentre i contorni più distanti corrispondono ad aree pianeggianti,

evidenziate dal verde chiaro e sono invece zone più stabili, potenzialmente adatte per l'agricoltura.

Nel contesto idrologico, l'analisi della pendenza gioca un ruolo fondamentale per prevedere il comportamento delle acque superficiali. Le zone con pendenza elevata facilitano un rapido deflusso delle acque piovane, mentre le aree pianeggianti, con pendenze ridotte, possono favorire la formazione di zone di ristagno o accumulo d'acqua.

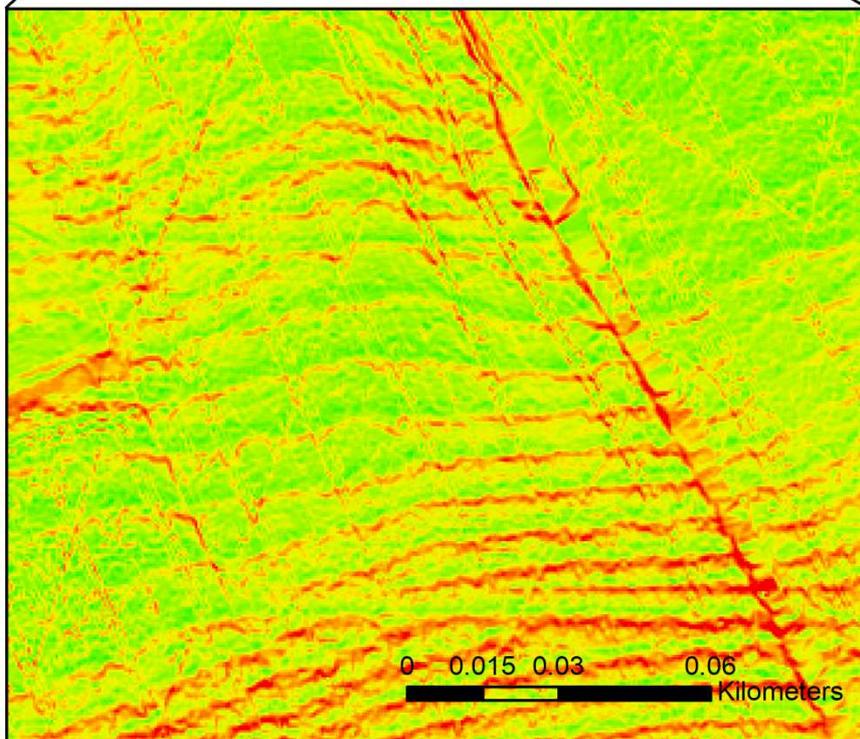
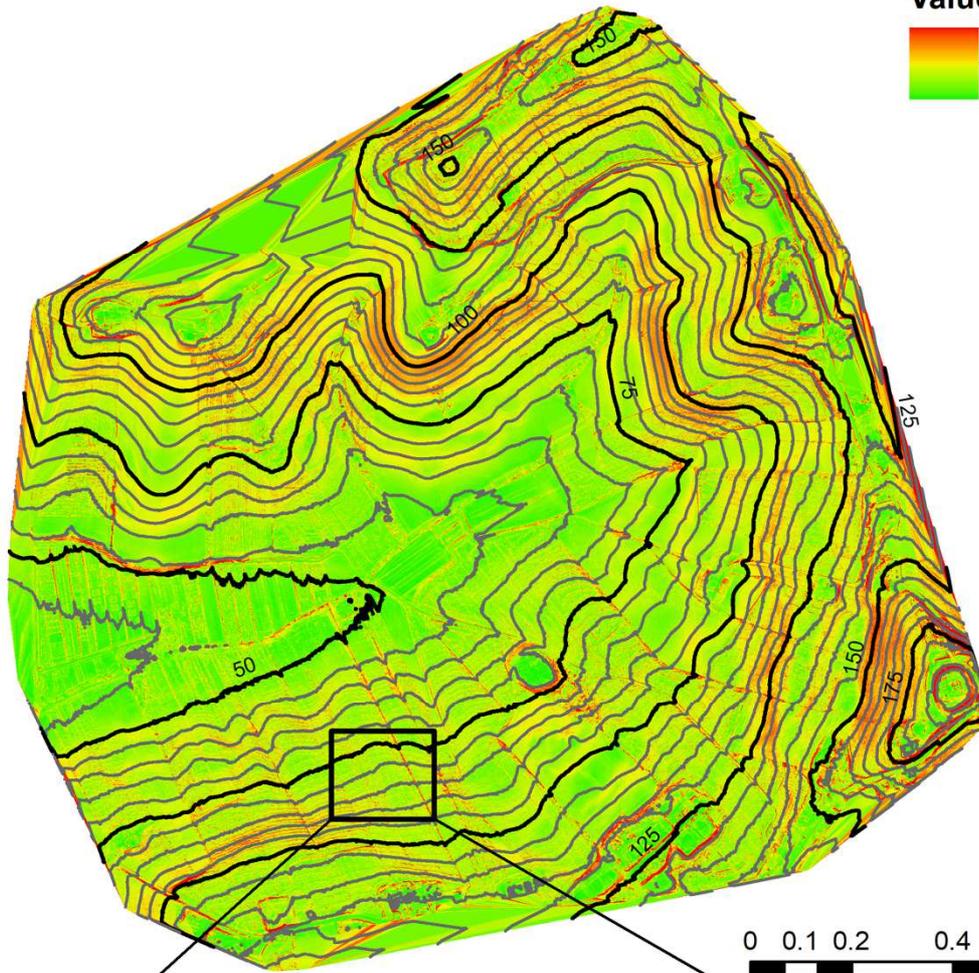
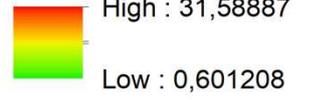
Di seguito è riportata la mappa della pendenza estratta da ArcGIS Enterprise completa in scala 1:15.000, ed uno zoom in scala 1:1.500:



Legenda

Pendenza (°)

Value



5.1.3 Accumulo del flusso

Il comando Flow Accumulation di ArcGIS Enterprise è uno strumento fondamentale nell'analisi idrologica. È utilizzato per calcolare la quantità di acqua che si accumula in ciascuna cella del modello digitale del terreno, sulla base del deflusso proveniente dalle celle circostanti. Esso opera in combinazione con strumenti come il Flow Direction, che determina la direzione del flusso in ogni cella, e utilizza tali informazioni per accumulare i contributi di deflusso da tutte le celle del bacino idrografico.

Il funzionamento della Flow Accumulation si basa sull'algoritmo D8 (detto anche Deterministic 8), il quale stabilisce il percorso dell'acqua attribuendo a ciascuna cella il flusso delle celle situate a monte di essa, secondo una griglia di 8 direzioni possibili (illustrato in figura 23). In questo modo, il comando stima quanta acqua passa attraverso una determinata cella e permette di individuare punti critici, come i canali di scolo e le zone di accumulo di flusso (<https://www.esri.com/>).

Nella figura seguente, l'immagine in alto a sinistra illustra la direzione del flusso per ciascuna cella, mentre quella in alto a destra mostra quante celle confluiscono in ogni punto.

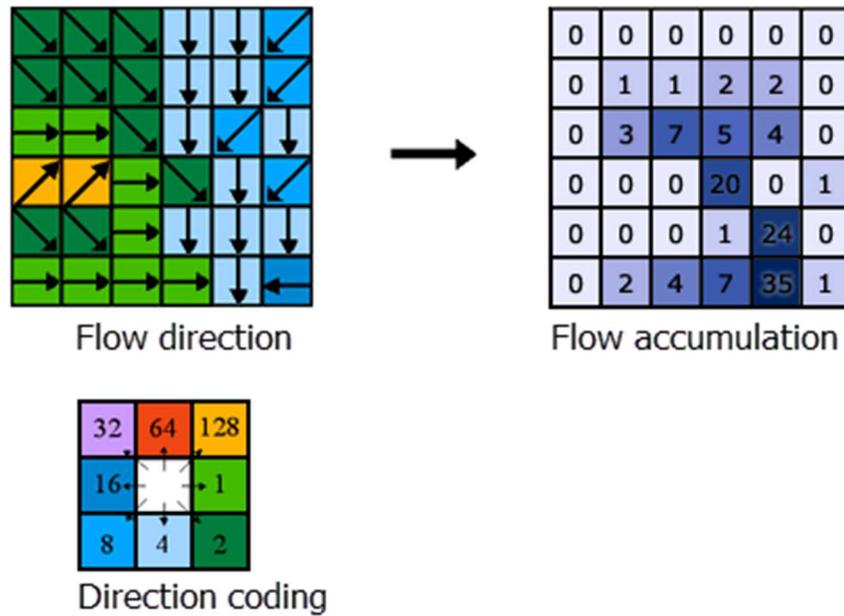


Figura 23: Metodo di calcolo dell'accumulo di flusso utilizzato da ArcGIS Enterprise

Le celle con un accumulo di flusso elevato indicano zone di flusso concentrato, utili per individuare canali di drenaggio. Quelle con accumulo nullo rappresentano punti elevati e possono identificare creste topografiche.

Le applicazioni principali di questo strumento riguardano la modellazione dei corsi d'acqua e l'identificazione delle aree a rischio di erosione o di allagamento. Combinato con altri strumenti di ArcGIS come il comando Slope e Watershed, Flow accumulation permette una comprensione dettagliata della dinamica del deflusso e della morfologia idrologica del territorio (Tarboton, 1997). La mappa dell'accumulo di flusso riportata di seguito sarà utilizzata anche per determinare il bacino dello specchio d'acqua, atta a calcolare il ruscellamento di alimentazione di quest'ultimo.



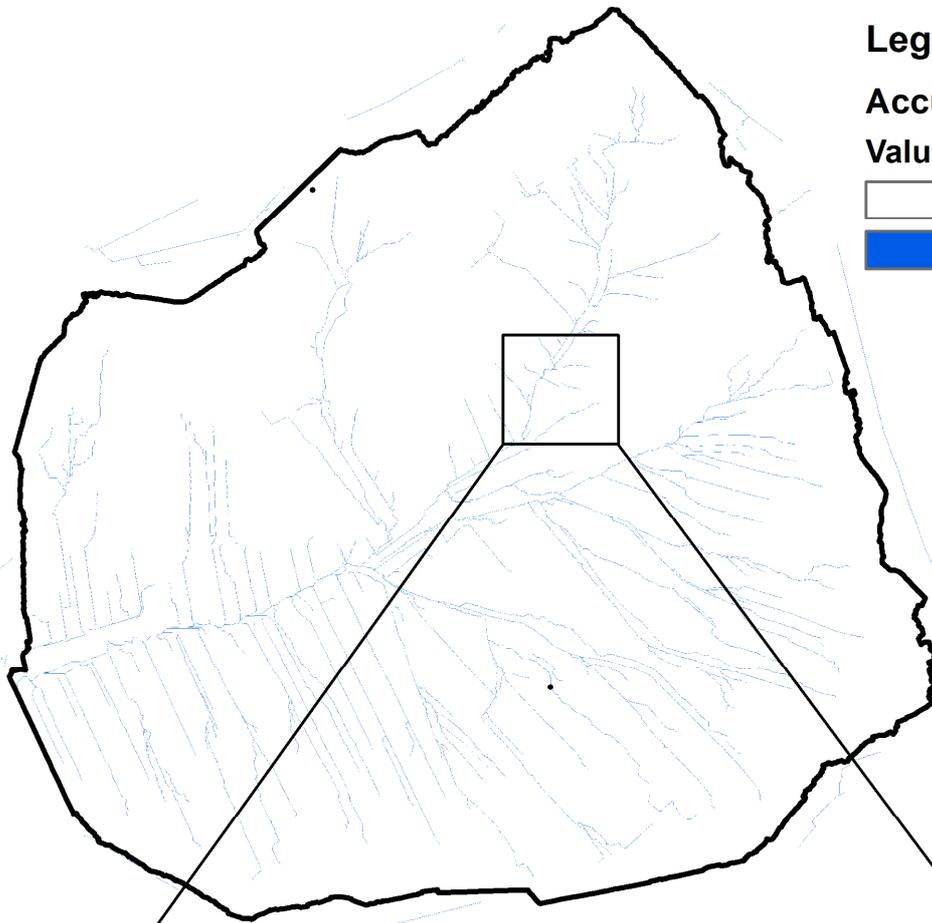
Legenda

Accumulo di flusso

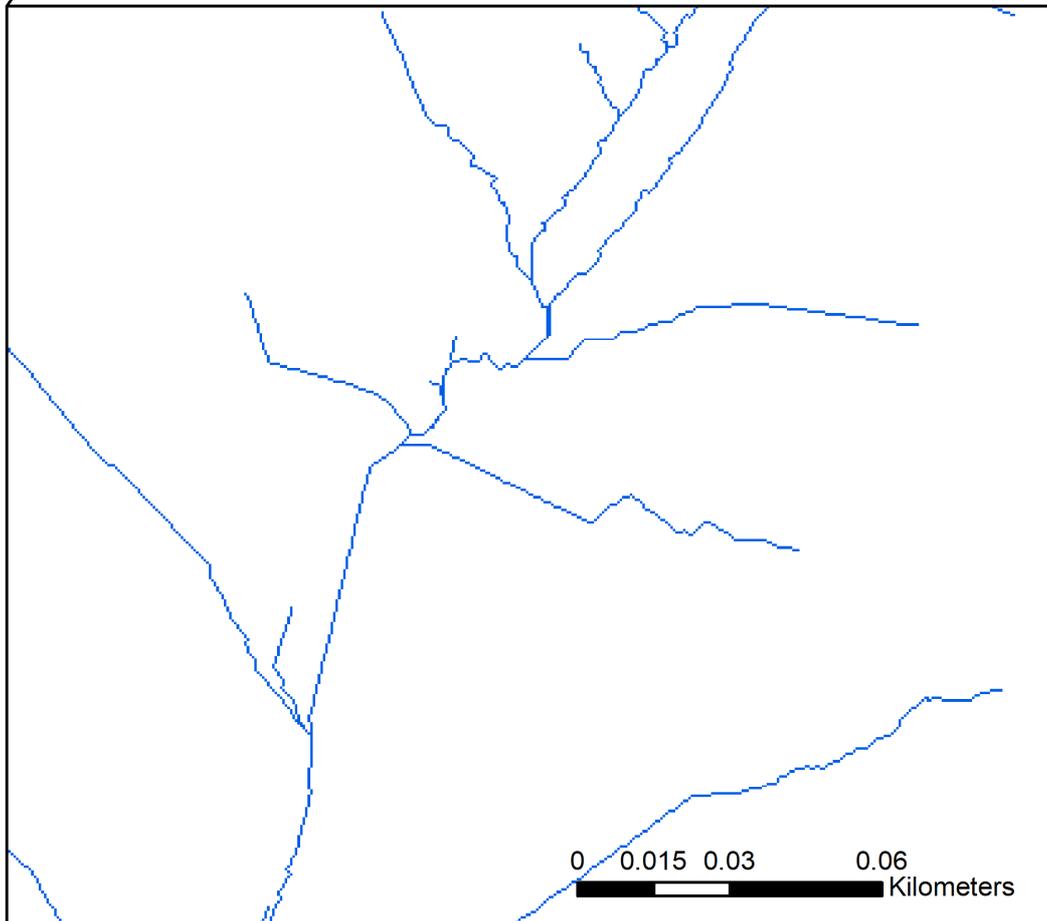
Value

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

5.2 Estrazione del reticolo idrografico

Osservando il reticolo idrografico presentato nella mappa sottostante, possiamo distinguere diversi elementi fondamentali che descrivono la struttura e la complessità del sistema idrografico all'interno del bacino delineato. La mappa include corsi d'acqua naturali come fiumi (in rosso), torrenti (in blu) e ruscelli (in verde), oltre a canali irrigui artificiali, sia primari (in giallo) che secondari (in arancione).

Di seguito l'elenco riportante le caratteristiche principali del reticolo:

1. Gerarchia idrografica: Si nota una chiara distinzione tra i corsi d'acqua principali e secondari. I fiumi naturali sono ben delineati come elementi portanti della rete, seguendo una gerarchia ben definita che parte dalle piccole ramificazioni dei ruscelli fino ai corsi maggiori.

Questa gerarchia, derivata dall'elaborazione del DTM, rispetta la logica dell'accumulo e della direzione del flusso, confermando l'affidabilità dell'estrazione tramite ArcGIS Enterprise;

2. Struttura del bacino idrografico: Il perimetro del bacino (linea nera) è ben definito e riflette l'area di raccolta delle acque superficiali. Questo contorno, permette di individuare chiaramente il territorio in cui avviene

il ruscellamento delle acque e la formazione dei corsi d'acqua, che confluiscono nel fiume principale.

3. Distribuzione dei canali irrigui: I canali irrigui artificiali primari e secondari si sovrappongono al reticolo naturale in alcune aree. Questi elementi sono fondamentali per l'agricoltura o altre attività antropiche e rappresentano l'intervento dell'uomo sul territorio, per regolare e distribuire le risorse idriche.

In conclusione, il reticolo idrografico estratto dal DTM tramite ArcGIS Enterprise fornisce una rappresentazione dettagliata e affidabile del sistema idrografico del bacino.

Sicuramente il solo utilizzo del software non sarebbe sufficiente ad avere una mappa finale precisa, che rifletta il reale stato di fatto. Questo avviene tramite il rilievo in campagna atto a correggere le imprecisioni del software.

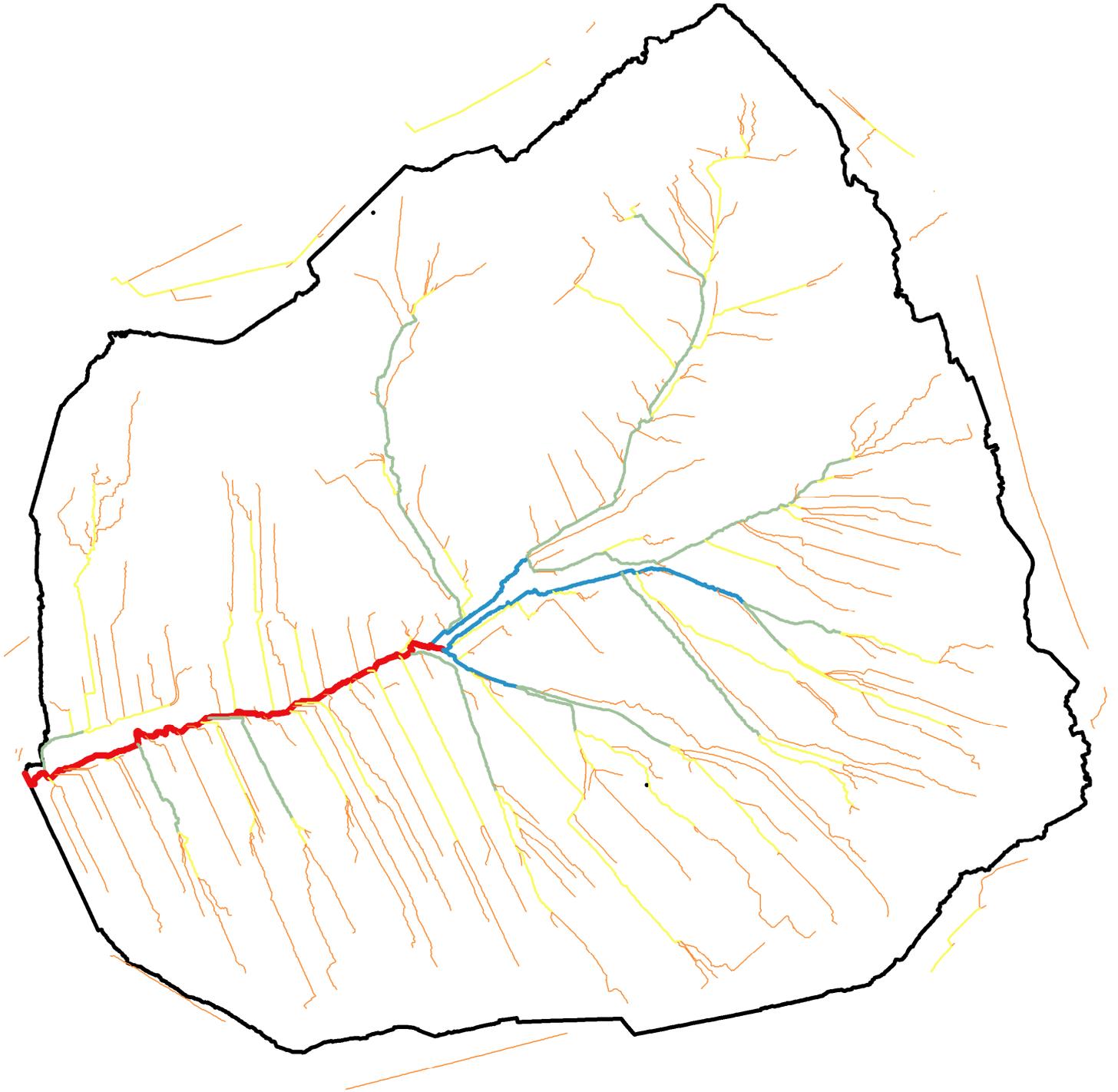
La mappa del reticolo idrografico, riportata di seguito, è essenziale per comprendere il comportamento delle acque superficiali, identificare potenziali aree di accumulo o erosione, e supportare la gestione idrica locale.



Legenda

Reticolo idrografico

-  Canali irrigui artificiali secondari
-  Canali irrigui artificiali primari
-  Ruscelli naturali
-  Torrenti naturali
-  Fiumi naturali
-  Bacino idrografico



0 0,125 0,25 0,5
Kilometers

5.3 Calcolo del ruscellamento superficiale

Osservando i risultati ottenuti attraverso l'utilizzo della web app WaterbalANce (Mammoliti et al., 2021) nella figura 21 sottostante, si nota una prima parte che coincide con il file di input (evidenziata in blu), contenente anno, mese, temperatura media mensile e pioggia cumulata mensile, seguono tre colonne, rispettivamente k, I e a (evidenziate in giallo), che indicano dei parametri originali del software, infine, nelle colonne successive (evidenziate in rosso) si trovano i risultati:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1		year	month	Date	Tm	P	k	I	a	PET	delta	AET	ST	S	RO	RES	SMRO	TOT_RO
2	12	2009	1	01/01/09	5,38	55,8	0,81	64,09012	1,5	10	45,8	10	255,8538	0	0	1,21E-09	0	0
3	13	2009	2	01/02/09	5,89	27,2	0,82	64,09012	1,5	11,6	15,6	11,6	270	1,453839	1,3	0,145384	0	1,3
4	14	2009	3	01/03/09	9,42	37,6	1,02	64,09012	1,5	29,1	8,5	29,1	270	8,5	7,8	0,864538	0	7,8
5	15	2009	4	01/04/09	13,24	64,2	1,12	64,09012	1,5	53,2	11	53,2	270	11	10,7	1,186454	0	10,7
6	16	2009	5	01/05/09	18,78	20,4	1,26	64,09012	1,5	101,1	-80,7	90,15671	200,2433	0	1,1	0,118645	0	1,1
7	17	2009	6	01/06/09	20,23	60,8	1,28	64,09012	1,5	114,9	-54,1	97,15866	163,8846	0	0,1	0,011865	0	0,1
8	18	2009	7	01/07/09	23,85	5	1,29	64,09012	1,5	148,2	-143,2	72,45704	96,42759	0	0	0,001186	0	0
9	19	2009	8	01/08/09	24,26	3,2	1,2	64,09012	1,5	141,4	-138,2	41,83038	57,79721	0	0	0,000119	0	0
10	20	2009	9	01/09/09	20,42	13,2	1,04	64,09012	1,5	94,6	-81,4	28,24337	42,75384	0	0	1,19E-05	0	0
11	21	2009	10	01/10/09	13,42	87,6	0,95	64,09012	1,5	46,1	41,5	46,1	84,25384	0	0	1,19E-06	0	0
12	22	2009	11	01/11/09	10,23	69	0,81	64,09012	1,5	26,1	42,9	26,1	127,1538	0	0	1,19E-07	0	0
13	23	2009	12	01/12/09	6,8	96,4	0,77	64,09012	1,5	13,5	82,9	13,5	210,0538	0	0	1,19E-08	0	0
14	24	2010	1	01/01/10	4,57	85,2	0,81	58,49058	1,41	9,2	76	9,2	270	16,05384	14,4	1,605384	0	14,4
15	25	2010	2	01/02/10	7,22	63,2	0,82	58,49058	1,41	17,7	45,5	17,7	270	45,5	42,4	4,710538	0	42,4
16	26	2010	3	01/03/10	8,35	75,8	1,02	58,49058	1,41	27	48,8	27	270	48,8	48,2	5,351054	0	48,2
17	27	2010	4	01/04/10	11,99	70	1,12	58,49058	1,41	49,3	20,7	49,3	270	20,7	23,4	2,605105	0	23,4
18	28	2010	5	01/05/10	16,21	97,4	1,26	58,49058	1,41	84,9	12,5	84,9	270	12,5	13,6	1,510511	0	13,6
19	29	2010	6	01/06/10	20,3	106,6	1,28	58,49058	1,41	118,4	-11,8	118,1459	258,4541	0	1,4	0,151051	0	1,4
20	30	2010	7	01/07/10	24,17	14,4	1,29	58,49058	1,41	152,6	-138,2	117,9407	154,9134	0	0,1	0,015105	0	0,1
21	31	2010	8	01/08/10	22,59	70,6	1,2	58,49058	1,41	129	-58,4	100,7312	124,7822	0	0	0,001511	0	0
22	32	2010	9	01/09/10	18,3	76,4	1,04	58,49058	1,41	83,1	-6,7	79,45835	121,7239	0	0	0,000151	0	0
23	33	2010	10	01/10/10	12,99	53,2	0,95	58,49058	1,41	46,8	6,4	46,8	128,1239	0	0	1,51E-05	0	0
24	34	2010	11	01/11/10	9,53	125,8	0,81	58,49058	1,41	25,8	100	25,8	228,1239	0	0	1,51E-06	0	0
25	35	2010	12	01/12/10	4,87	59,2	0,77	58,49058	1,41	9,5	49,7	9,5	270	7,823891	7	0,782389	0	7
26	36	2011	1	01/01/11	4,66	78,4	0,81	64,9291	1,52	7,8	70,6	7,8	270	70,6	64,2	7,138239	0	64,2
27	37	2011	2	01/02/11	5,73	28,6	0,82	64,9291	1,52	10,8	17,8	10,8	270	17,8	22,4	2,493824	0	22,4
28	38	2011	3	01/03/11	8,03	169,2	1,02	64,9291	1,52	22,5	146,7	22,5	270	146,7	134,3	14,91938	0	134,3
29	39	2011	4	01/04/11	13,44	25,2	1,12	64,9291	1,52	54,1	-28,9	52,60705	242,5929	0	13,4	1,491938	0	13,4
30	40	2011	5	01/05/11	17,66	12,8	1,26	64,9291	1,52	92,3	-79,5	74,67446	180,7185	0	1,3	0,149194	0	1,3
31	41	2011	6	01/06/11	21,88	25,2	1,28	64,9291	1,52	129,8	-104,6	83,24416	122,6743	0	0,1	0,014919	0	0,1
32	42	2011	7	01/07/11	23,38	59,4	1,29	64,9291	1,52	144,7	-85,3	92,63082	89,4435	0	0	0,001492	0	0
33	43	2011	8	01/08/11	24,64	0,2	1,2	64,9291	1,52	145,8	-145,6	37,48183	52,16167	0	0	0,000149	0	0
34	44	2011	9	01/09/11	22,04	30,4	1,04	64,9291	1,52	106,6	-76,2	43,22624	39,33543	0	0	1,49E-05	0	0
35	45	2011	10	01/10/11	14,07	50,6	0,95	64,9291	1,52	49,2	1,4	49,2	40,73543	0	0	1,49E-06	0	0
36	46	2011	11	01/11/11	9,21	21,2	0,81	64,9291	1,52	22,2	8,2	22,2	48,93543	0	0	1,49E-07	0	0

Figura 24: Estratto del file MS Excel risultato di WaterbalANce

- PET: indica l'evapotraspirazione potenziale, ovvero quella che si svilupperebbe in condizioni ottimali in termini di pioggia e temperatura.

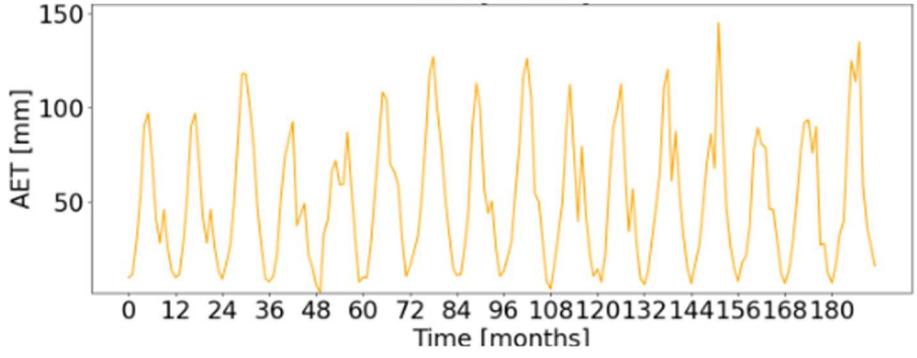
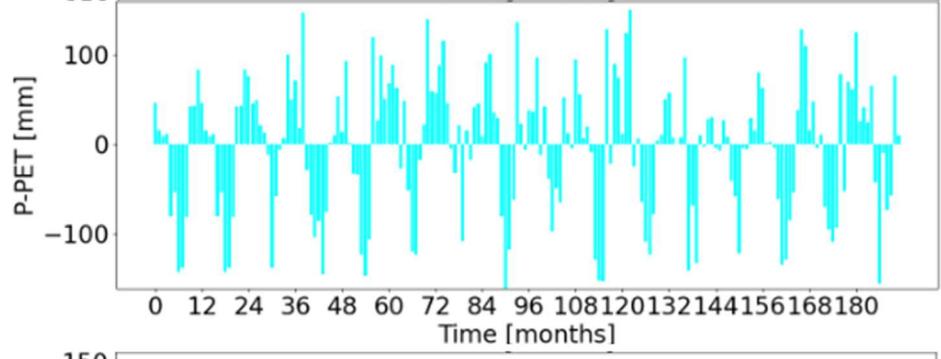
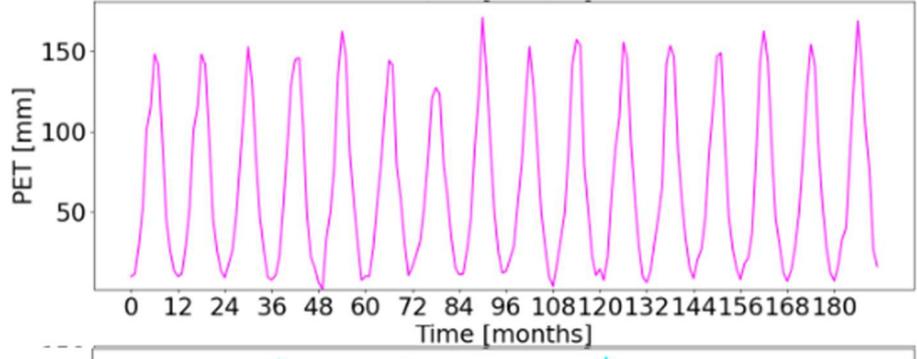
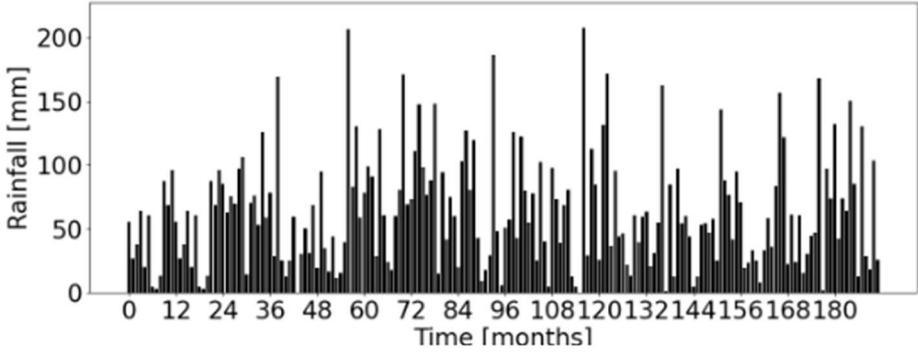
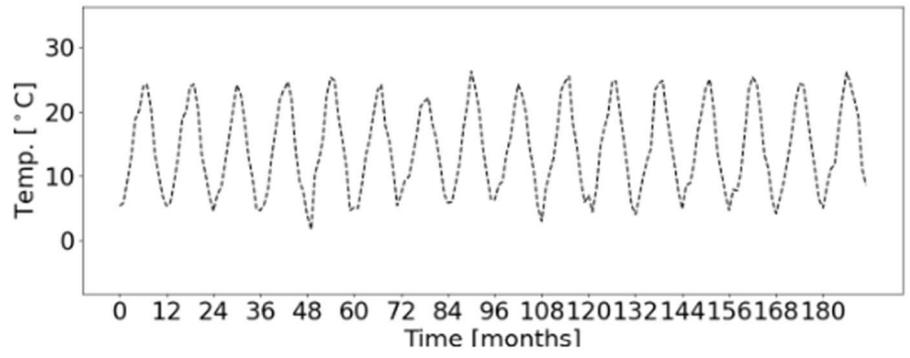
Segue un andamento ciclico, nei mesi più caldi è alta, il che è coerente con una maggiore richiesta di acqua da parte dell'atmosfera in condizioni di temperature elevate;

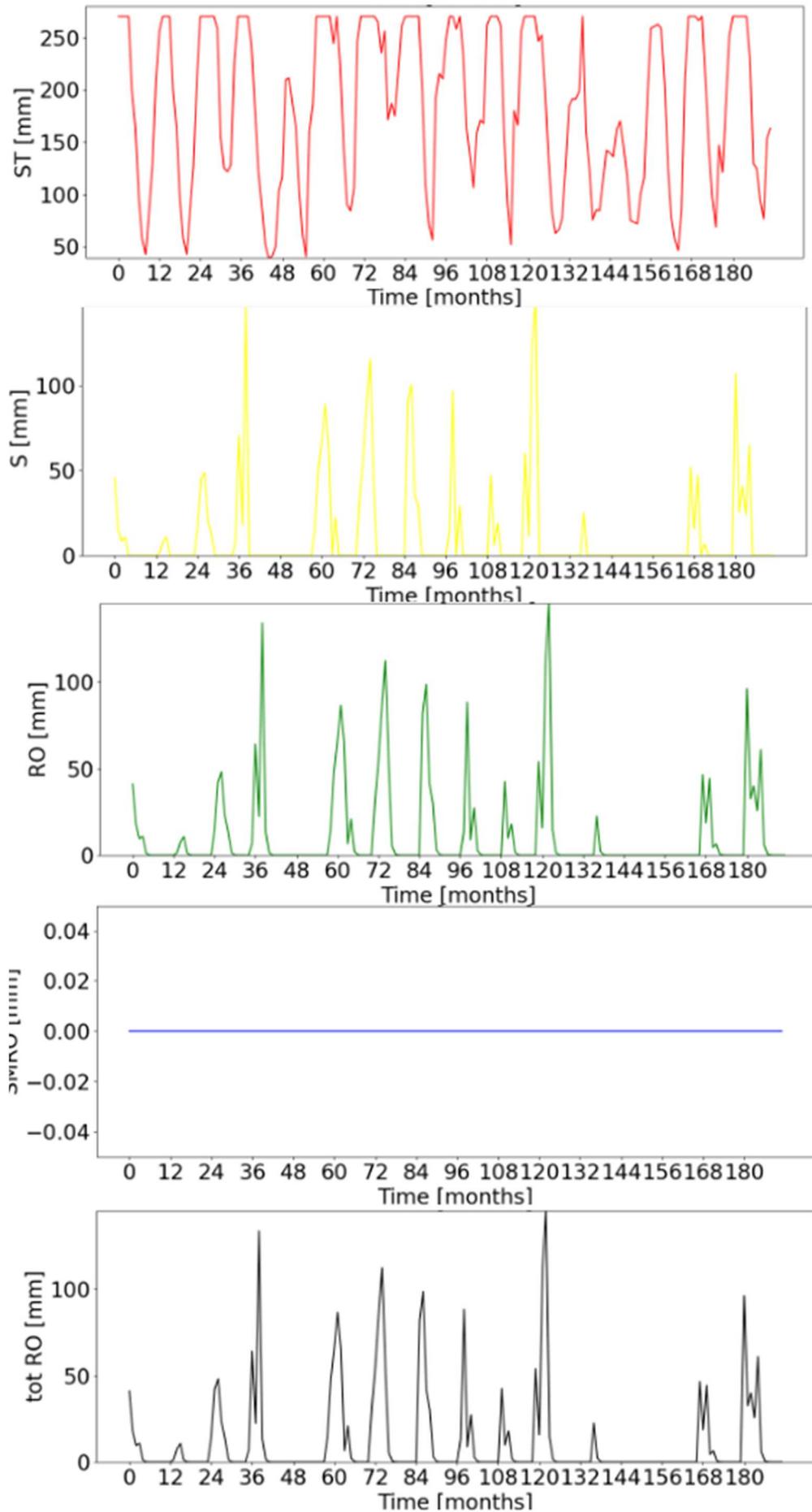
- Delta: Indica la differenza tra precipitazioni e PET, ha un andamento irregolare, con oscillazioni rapide che indicano periodi in cui le precipitazioni superano la PET, generando surplus idrico e altri in cui la PET supera le precipitazioni (deficit idrico);
- AET: indica l'evapotraspirazione reale, ottenuta rettificando quella potenziale con pioggia e temperatura locale, ha anch'essa un andamento ciclico annuale;
- ST: Soil moisture, indica la quantità di acqua assorbita dal terreno, mostra un andamento stagionale. Il terreno funziona come un serbatoio, si riempie (periodo corrispondente ai massimi nel grafico) nei periodi di surplus idrico e si svuota (evidenziato dai minimi nel grafico) nei periodi di deficit;
- S: Surplus, indica l'acqua in eccesso rispetto a quella assorbita dal terreno, è positivo quando la quantità di precipitazioni è superiore alla richiesta idrica dell'ambiente. I picchi si presentano a seguito di eventi di precipitazioni intense o prolungate, che portano a un accumulo di acqua in eccesso rispetto a quanto può essere trattenuto dal suolo;

- RO: Ruscellamento superficiale, indica la quantità d'acqua che non si infiltra e non evapotraspira, non può essere trattenuta dal suolo e defluisce sul terreno. È strettamente legato alle precipitazioni intense che superano la capacità di ritenzione del suolo, i picchi corrispondono a quelli del surplus idrico. Questo deflusso specifico considera solo precipitazioni liquide;
- SMRO: Ruscellamento superficiale dovuto a precipitazioni solide;
- Tot RO: Somma dei due ruscellamenti superficiali.

Lo studio è stato condotto a scala mensile dato che il programma di calcolo è basato su questo ordine. Ciò comporta un approccio semi-statistico, ovvero la perdita di dati apprezzabili a scala giornaliera o addirittura oraria, come piogge estive non prolungate. Queste piogge, soprattutto se molto intense come ultimamente accade sempre più spesso, generano un surplus idrico, e quindi un ruscellamento superficiale, che però, in scala mensile, non è possibile apprezzare.

Di seguito i grafici sviluppati da WaterbalANce (Mammoliti et al., 2021), raffiguranti i risultati ottenuti dall'analisi dei dati termopluviometrici relativi agli anni 2009-2023 nel bacino dell'azienda agraria:





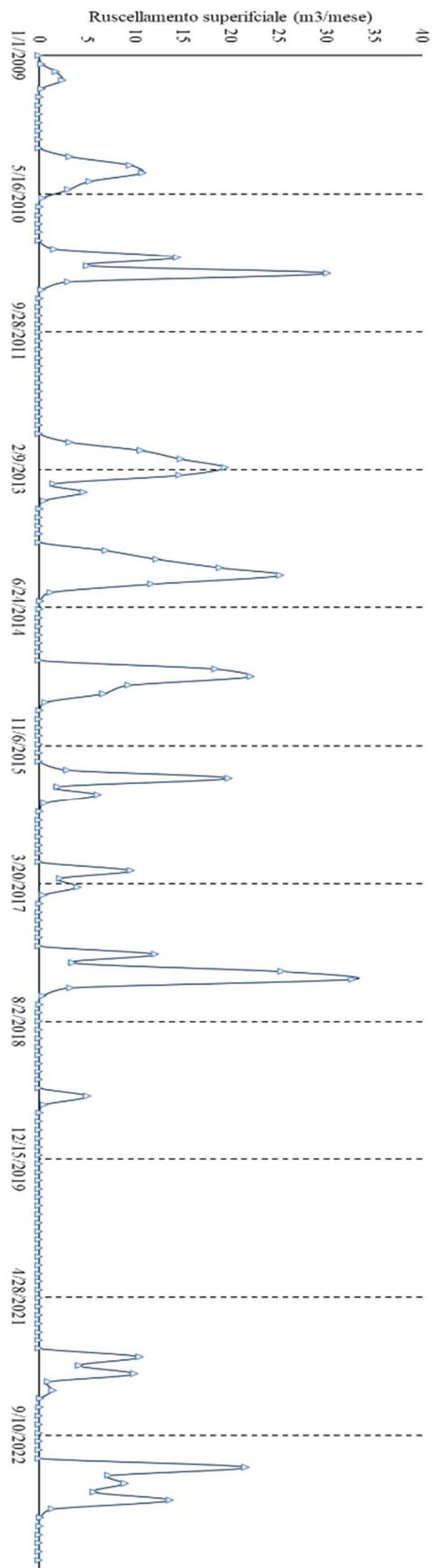
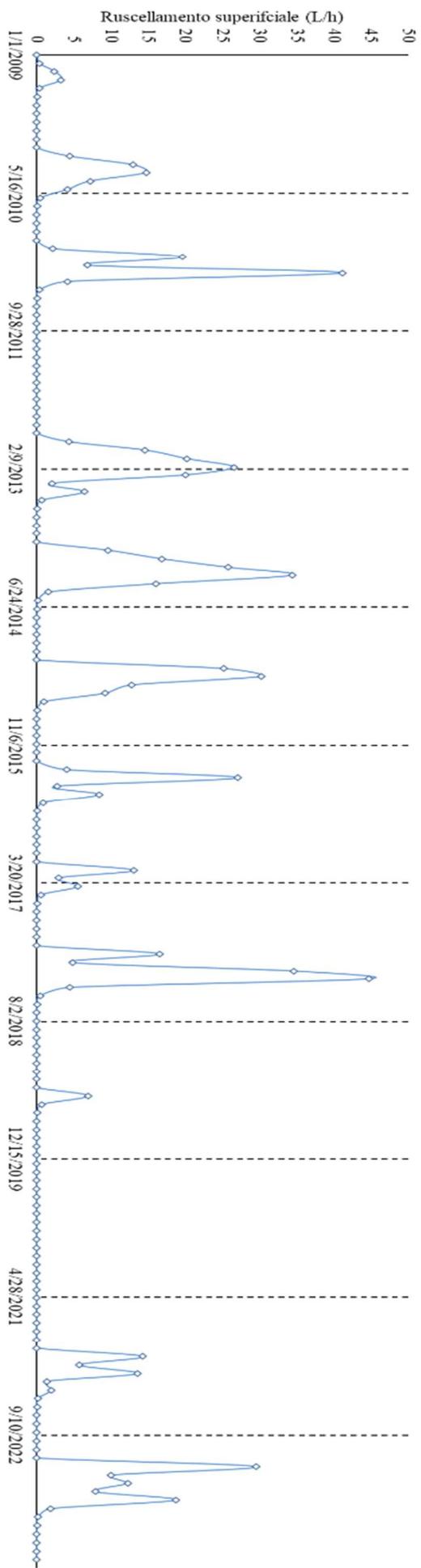
Da questi risultati è possibile risalire alla porzione di ruscellamento superficiale che alimenta lo specchio d'acqua con il seguente procedimento:

1. Si misura l'area del bacino idrografico [m^2] che sottende il lago attraverso la flow accumulation, considerando soltanto l'area che defluisce in quest'ultimo;
2. Si trasforma il ruscellamento superficiale totale medio da mm/mese in m/mese;
3. Si moltiplica l'area del bacino [m^2] (evidenziata nella figura 25) per il ruscellamento [m/mese] e si individuano i metri cubi di acqua che alimentano il lago mensilmente [m^3 /mese];
4. Si può trasformare l'unità di misura da m^3 /mese a L/h per avere una duplice visualizzazione del risultato.



Figura 25: Bacino idrografico sotteso dal lago

Di seguito vengono mostrati i grafici relativi all'andamento del ruscellamento superficiale che alimenta il lago negli anni presi in considerazione, ovvero dal 2009 al 2023:



6. DISCUSSIONI

La mappa della pendenza generata in ArcGIS Enterprise, presentata nel capitolo precedente, mette in luce una morfologia complessa, con valori che oscillano da pendenze molto basse, praticamente piane, fino a zone particolarmente ripide. Questa variabilità topografica esercita un'influenza determinante sulla direzione, velocità e intensità dei flussi d'acqua (Tarboton, 1997).

In primo luogo, le zone caratterizzate da pendenze elevate, segnalate dalle tonalità di rosso e arancio sulla mappa, sono particolarmente vulnerabili a un ruscellamento rapido. In queste aree, la gravità accelera il flusso dell'acqua, riducendo il tempo di contatto con il suolo e ostacolando l'infiltrazione. Questo fenomeno ha due conseguenze principali: da un lato, l'acqua scorre velocemente verso valle, contribuendo al rischio di erosione; dall'altro, la mancata infiltrazione determina una minore ricarica delle falde acquifere, potenzialmente aggravando la vulnerabilità idrica delle aree più basse (Poesen, 2002; Renard et al., 1997).

Le pendenze elevate, quindi, non solo determinano una velocità di flusso maggiore, ma possono anche causare una concentrazione delle acque

meteoriche in punti specifici, accentuando fenomeni di erosione superficiale. L'acqua che scorre rapidamente su un pendio non solo trasporta sedimenti, ma può scavare solchi nel terreno, aumentando il rischio di dissesti idrogeologici (Montgomery & Dietrich, 1994). In questo contesto, risulta fondamentale considerare l'importanza di interventi di gestione del territorio, come la realizzazione di sistemi di drenaggio o l'adozione di misure per ridurre la velocità del flusso. La costruzione di terrazzamenti o la piantumazione di vegetazione arborea e arbustiva lungo le aree più ripide potrebbero, ad esempio, rallentare il ruscellamento e limitare il rischio di erosione (Arnold et al., 1998). Una soluzione compatibile con l'attività dell'azienda agraria UNIVPM, potrebbe essere coltivare nelle zone più pendenti, colture resistenti come lavanda, ginestre o noccioli, con radici tali da stabilizzare il pendio e fogliame da rallentare il ruscellamento superficiale.

Al contrario, nelle aree caratterizzate da pendenze più dolci, rappresentate dalle tonalità di verde e giallo, l'acqua ha maggiori possibilità di infiltrarsi nel suolo. Qui il ruscellamento è meno intenso e più lento, favorendo una ritenzione idrica maggiore. Le curve di livello più distanziate su queste aree suggeriscono una morfologia più piatta, dove il deflusso dell'acqua è ridotto, offrendo maggiori opportunità per l'infiltrazione. Questo processo è cruciale non solo per alimentare le riserve idriche sotterranee, ma anche per mitigare eventuali

fenomeni di sovraccarico idrico che possono verificarsi nelle aree più basse (Dingman, 2002).

La conoscenza di queste dinamiche è essenziale per intervenire in modo strategico nella gestione del territorio, individuando i punti critici dove l'erosione o il deflusso rapido possono creare problemi, e progettando interventi mirati per stabilizzare il terreno e favorire la dispersione delle acque (Pimentel et al., 1995).

Alla luce di queste considerazioni, la pendenza emerge come uno dei fattori chiave nella gestione delle acque meteoriche e nella pianificazione territoriale. L'analisi delle pendenze, come quella fornita dalla mappa, consente non solo di comprendere meglio le dinamiche del ruscellamento, ma anche di prevedere i rischi associati e pianificare interventi correttivi mirati. Nelle zone più ripide, ad esempio, potrebbe essere utile adottare tecniche di ingegneria naturalistica per ridurre il ruscellamento e migliorare l'infiltrazione, mentre nelle aree pianeggianti, l'accento dovrebbe essere posto su una gestione sostenibile delle acque superficiali, garantendo il deflusso dell'acqua anche in condizioni più estreme con un'adeguata sezione del fiume.

Un altro aspetto da considerare è come la morfologia del terreno influisca sulla creazione di vie preferenziali per il ruscellamento. Questo è ben visibile

sovrapponendo il reticolo idrografico alla mappa della pendenza. Nelle zone in cui le curve di livello sono più ravvicinate, la maggiore pendenza determina un flusso più concentrato. In queste aree, l'acqua tende a seguire percorsi precisi, accentuando l'erosione in punti specifici e creando solchi più profondi. Al contrario, nelle zone più pianeggianti, i corsi d'acqua tendono ad allargarsi, i torrenti diventano fiumi.

Proprio questi, segnalati in rosso sul reticolo idrografico, rappresentano le principali arterie di drenaggio del bacino, incanalando grandi volumi d'acqua verso le aree di valle e alimentando, in molti casi, laghi o altri corpi idrici (fuori dall'area di studio). La velocità e l'intensità del deflusso lungo questi fiumi dipendono sia dalle caratteristiche geomorfologiche (quali pendenza e morfologia del terreno) che dalle condizioni meteorologiche stagionali (Beven & Kirkby, 1979).

Oltre ai fiumi, i torrenti (in blu) e i ruscelli (in verde) giocano un ruolo altrettanto importante nella distribuzione delle acque. In particolare, i ruscelli sono fondamentali per il drenaggio delle acque piovane nelle aree più interne del bacino. Essi tendono a raccogliere le acque provenienti dalle zone più elevate e a convogliarle verso i torrenti, che a loro volta alimentano i fiumi principali. La frammentazione del reticolo idrografico mostrata sulla mappa

indica la possibilità di fenomeni di ruscellamento concentrato, che potrebbero contribuire a fenomeni erosivi locali, soprattutto nelle aree con pendenze maggiori (Montgomery, 1994).

Vanno sicuramente considerati anche i canali irrigui artificiali, sia primari (in giallo) che secondari (in arancione). Questi elementi del reticolo idrografico rappresentano un'interazione diretta tra l'attività umana e il sistema naturale di drenaggio. Essi sono progettati per gestire l'acqua a scopo agricolo, favorendo la distribuzione dell'acqua in aree coltivate. Tuttavia, la presenza di canali irrigui può alterare le dinamiche idriche naturali, influenzando sul bilancio idrico complessivo del bacino e, in alcuni casi, contribuendo a fenomeni di sovraccarico idraulico o allagamenti in corrispondenza delle aree più basse (Arnold et al., 1998).

A proposito dei canali irrigui, questi influenzano fortemente la stabilità del versante a monte del lago, che a causa della sua inclinazione, è soggetto a un ruscellamento concentrato durante i periodi di pioggia intensa. L'acqua che scorre rapidamente sulla superficie del terreno non ha il tempo di infiltrarsi, ma si accumula in superficie, incrementando la saturazione del suolo.

Quando il suolo raggiunge il punto di saturazione, l'acqua infiltrata si accumula negli strati più superficiali, riducendo la coesione tra le particelle del terreno e

aumentando la pressione dei pori. Questo fenomeno, noto come riduzione della resistenza al taglio, è un fattore scatenante comune per i movimenti franosi, soprattutto nei terreni argillosi. Il caso di Agugliano, prevalentemente composto da argille azzurre, ricade nelle aree più soggette a colamento (Fredlund et al., 2012), aspetto che concorda in pieno con lo studio svolto da Pierantoni Alberto, il quale ha definito il versante a monte del lago come soggetto a frane per colamento.

Questo offre un'importante occasione per comprendere come il ruscellamento superficiale possa influenzare o aggravare i movimenti franosi. Il deflusso, come osservato nei rilievi idrografici, può giocare un ruolo cruciale in questo processo, specialmente in zone con pendenze elevate, dove la velocità del flusso dell'acqua è maggiore.

Il processo erosivo può creare solchi profondi nel terreno e ridurre ulteriormente la stabilità del pendio, aprendo la strada a frane di maggiori dimensioni, per questo è di fondamentale importanza lo studio e l'organizzazione dei canali utilizzati a scopo agricolo.

Alla luce di queste considerazioni, la gestione del ruscellamento superficiale sul versante a monte del lago è fondamentale per prevenire futuri fenomeni franosi. Interventi come la costruzione di sistemi di drenaggio superficiale, la

piantumazione di vegetazione con radici profonde per stabilizzare il suolo, o la realizzazione di barriere fisiche per deviare i flussi d'acqua possono contribuire a ridurre il rischio di frane per colamento (Montgomery & Dietrich, 1994). Inoltre, la riduzione del deflusso concentrato attraverso la creazione di terrazzamenti o altre forme di ingegneria naturalistica potrebbe rallentare l'erosione superficiale e migliorare la stabilità del pendio a lungo termine.

Le acque superficiali convogliate da questi canali di drenaggio potrebbero alimentare direttamente il lago presente nell'area di studio diventando affluenti del reticolo idrico già esistente.

Il bilancio idrico del lago, attualmente, dipende in larga misura dal contributo dei canali e dei piccoli torrenti nel versante a monte. In periodi di piogge intense, l'aumento del ruscellamento superficiale nelle aree di pendenza più elevata può far crescere rapidamente il volume d'acqua convogliato nel lago, con possibili ripercussioni sull'equilibrio idrico e sul rischio di inondazioni locali (Dingman, 2002).

La stima dell'alimentazione del lago dovuta alle precipitazioni meteoriche è stata possibile grazie all'utilizzo di WaterbANce, in particolare, come illustrato nei risultati, grazie all'analisi combinata dei grafici climatici e idrologici, questa consente di comprendere in modo più approfondito le dinamiche del

ruscellamento superficiale nell'area di studio. Osservando l'andamento dei dati di input, in particolare partendo dalla temperatura, si nota che segue un ciclo stagionale regolare, con picchi nei mesi estivi e minimi in quelli invernali. L'aumento di temperatura coincide con un incremento dell'evapotraspirazione potenziale (PET), ciò significa che durante i periodi più caldi, una quantità significativa d'acqua viene persa a causa dell'evaporazione e della traspirazione vegetale.

Questa osservazione è coerente con la letteratura, che conferma che l'aumento della temperatura porta a un'intensificazione dell'evapotraspirazione, riducendo la quantità di acqua disponibile per il deflusso superficiale (Allen et al., 1998).

La riduzione del ruscellamento può essere dovuta anche alla scarsità di materia prima, infatti osservando l'altro grafico di input, quello relativo alle precipitazioni, si nota una distribuzione irregolare, con piogge quasi nulle in alcuni periodi, seguite nell'immediato da precipitazioni intense, che rappresentano un fattore scatenante per il ruscellamento, soprattutto quando il suolo non è in grado di assorbire l'acqua.

Le piogge intense che eccedono la capacità di infiltrazione del terreno portano all'accumulo di acqua in superficie, generando un rapido ruscellamento superficiale (Beven, 2012).

Questi picchi sono particolarmente significativi in relazione al contenuto idrico del suolo (ST), che mostra una tendenza alla saturazione durante gli stessi periodi. Quando il suolo è già saturo, come indicato nel grafico del surplus (S), l'acqua non riesce a infiltrarsi efficacemente, il che aumenta ulteriormente il deflusso superficiale. Un suolo saturo riduce, fino ad annullare, la capacità di assorbimento dell'acqua, aumentando il rischio di ruscellamento concentrato e movimenti franosi (Shaw et al., 2010).

Avremo dunque picchi di ruscellamento superficiale favoriti da piogge intense, terreno con alto contenuto di umidità, temperature non elevate, quindi scarsa evapotraspirazione, mentre i minimi di ruscellamento saranno causati da scarse precipitazioni, scarso contenuto d'acqua nel terreno, alte temperature e di conseguenza alta evapotraspirazione.

Come esplicito nei risultati, dal ruscellamento superficiale si è calcolata la portata dovuta alle acque meteoriche in ingresso nel lago. Dai grafici che mostrano l'andamento dell'alimentazione dello specchio d'acqua, si osserva una variabilità mensile marcata nel ruscellamento superficiale, in funzione delle condizioni meteorologiche e stagionali. Alcuni periodi mostrano picchi significativi, che coincidono con eventi di pioggia intensa o prolungata, sottolineando l'importanza dei fenomeni intensi per l'alimentazione del lago.

Ad esempio, nel periodo trascorso tra il 2010 e il 2011, come in alcuni mesi dell'anno 2019, si notano picchi pronunciati, indicativi di eventi di precipitazione che hanno generato una grande quantità di ruscellamento. Questo si riflette immediatamente nell'apporto d'acqua al lago, dove periodi di elevato ruscellamento superficiale sviluppano un incremento sostanziale del livello idrico del lago. Al contrario, il periodo di secca osservato dopo il 2019, evidenzia una drastica riduzione del flusso idrico verso il lago. Questo calo è probabilmente legato a una combinazione di fattori climatici, come la diminuzione delle precipitazioni e l'aumento delle temperature globali.

La riduzione del ruscellamento implica che una minore quantità di acqua alimenta il lago. Ciò si traduce in un abbassamento del livello idrico e di conseguenza in difficoltà per l'azienda agraria UNIVPM che utilizza il lago a scopo irriguo.

L'agricoltura, specialmente in contesti dove la disponibilità idrica è strettamente legata ai cicli stagionali e alle risorse locali, come nel caso di studio, dipende in modo critico dall'approvvigionamento costante di acqua. La scarsità d'acqua derivante dalla diminuzione del ruscellamento e dai periodi prolungati di secca, visibile nei grafici dell'alimentazione del lago, tra il 2020 e il 2021, avrà sicuramente causato gravi difficoltà nell'irrigazione delle

colture, con conseguenze negative sulla produzione agricola e, di conseguenza, sull'economia locale.

Come già accennato, uno degli interventi proposti per mitigare i movimenti franosi sul versante a monte del lago è la realizzazione di sistemi di drenaggio superficiale. Sebbene questi sistemi siano primariamente progettati per ridurre il rischio di frane per colamento (Iverson, 1997), essi possono avere anche un ulteriore beneficio: aumentare la quantità di acqua che raggiunge il lago, soprattutto durante i periodi di piogge intense. Migliorando il drenaggio del versante, si potrebbe evitare che l'acqua piovana si accumuli nel terreno e causi frane incanalandone la maggior parte verso il bacino.

In questo modo, la costruzione di un adeguato sistema di drenaggio superficiale non solo contribuirebbe a prevenire movimenti franosi, ma avrebbe anche l'effetto di incrementare la quantità d'acqua disponibile per l'irrigazione, attenuando i problemi legati alla secca. Questo potrebbe fornire una soluzione parziale alla scarsità d'acqua che si è verificata dopo il 2019, aiutando l'azienda agraria a mantenere livelli di irrigazione più stabili durante i periodi critici.

7. CONCLUSIONI

Le precedenti considerazioni chiariscono l'intento di questo lavoro di studiare e mettere in relazione le caratteristiche fisiche, litologiche, idrogeologiche e idrauliche del bacino idrografico esaminato, ponendo particolare attenzione al legame esistente tra il sistema delle precipitazioni meteoriche e quello del drenaggio idrico superficiale, allo scopo di formulare una valutazione del rischio idraulico e una stima dell'alimentazione del lago.

Il lavoro svolto è basato su una metodologia d'indagine articolata e un'ampia e massiccia raccolta di dati. Questa ha consentito di analizzare, sotto diversi punti di vista, le relazioni esistenti tra i diversi assetti del territorio, in questo caso particolare, quello idrogeologico e quello idraulico, di monitorarne l'evoluzione temporale e di osservare, secondo una visione globale, la risposta del bacino alle precipitazioni.

Per concludere, è fondamentale sottolineare l'importanza della gestione integrata delle risorse idriche e della stabilità del versante attraverso un sistema di drenaggio superficiale ben progettato. Come emerso dall'analisi, il drenaggio ha il potenziale di offrire un duplice beneficio: da un lato, contribuisce significativamente alla mitigazione del rischio di frane, particolarmente rilevante per il versante a monte del lago, dall'altro aumenta

l'apporto idrico al lago, fornendo una maggiore risorsa d'acqua utilizzabile per scopi irrigui da parte dell'azienda agraria.

Un'adeguata pianificazione delle opere di drenaggio, in linea con le pratiche di ingegneria naturalistica e i modelli idrologici, rappresenta quindi una strategia vincente per garantire la sicurezza del territorio e allo stesso tempo sostenere le attività locali legate all'uso irriguo del lago. Questa sinergia tra prevenzione dei rischi e ottimizzazione delle risorse idriche dimostra quanto sia cruciale una gestione integrata e multidisciplinare delle risorse del bacino, per affrontare in modo efficace la fragilità idrogeologica del territorio.

8. FONTI

8.1 Bibliografia

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations;
- Arnold, C. L., Boison, P. J., & Patton, P. C. (1988). Slope, aspect, and vegetation influences on geomorphic processes. *Water Resources Research*, 34(1), 78-84;
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & Palutikof, J. P. (2008). Climate change and water. IPCC Technical Paper VI;
- Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. American Elsevier;
- Beven, K., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 24(1), 43-69;
- Borga, M., Boscolo, P., & Zanon, F. (2014). "Hydrological response to extreme rainfall events in the headwaters of the Esino River." *Hydrological Processes*;
- Brierley, G., & Fryirs, K. (2005). *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*. Blackwell;

- Bruno, E., Calcaterra, D., & Parise, M. (2008). "Landslide susceptibility and hazard in a typical Apennine basin." *Engineering Geology*;
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press;
- Cascini, L., Cuomo, S., & Pastor, M. (2010). Modelling of rainfall-induced shallow landslides of the flow-type. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*;
- Cardinali, M., Guzzetti, F., & Ardizzone, F. (2001). "Landslide hazard mapping in the Upper Tiber River basin." *Environmental Geology*;
- Castany, G. (1982). *Hydrogeology: principles and methods*. Dunod;
- Celico, P. (1989). *Prospezioni idrogeologiche*. Liguori Editore.
- Centamore, E., Dramis, F., Napoleoni, A., & Parotto, M. (1996). "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 - Foglio 347." Servizio Geologico Nazionale;
- Chang, K. T. (2016). *Introduction to geographic information systems*. McGraw-Hill Education;
- Crosta, G. B., & Frattini, P. (2008). "Distributed modeling of shallow landslides triggered by intense rainfall." *Natural Hazards and Earth System Sciences*;
- Custodio, E. (2005). *Groundwater Hydrology*;

- D'Agostino, V., Marchi, L., & Borga, M. (2005). *Elementi di Idrologia per la gestione delle risorse idriche*. Edizioni ETS;
- Dingman, S. L. (2002). *Physical Hydrology*. Waveland Press;
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*. Wiley;
- Fanciulli, G., Pieri, M., & Tosatti, G. (2003). "Idrografia e bacini idrografici delle Marche." *Rivista Italiana di Geotecnica*;
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall;
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., ... & Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*;
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall;
- Gregory, K. J., & Walling, D. E. (1973). *Drainage Basin Form and Process*. Edward Arnold;
- Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., & McDonald, M. G. (2000). "MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model." U.S. Geological Survey Open-File Report;
- Hutchinson, M. F. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106(3-4), 211-232;

- Iverson, R. M. (1997). *The physics of debris flows*. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245-296;
- Leopold, L. B., Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. W. H. Freeman;
- Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2005). *Digital terrain modeling: principles and methodology*. CRC Press;
- Mammoliti, E.; Fronzi, D.; Mancini, A.; Valigi, D.; Tazioli, A. WaterbalANce, una WebApp per il calcolo del bilancio idrico di Thornthwaite-Mather: confronto delle applicazioni in due bacini idrografici europei. *Hydrology* **2021** , 8 , 34;
- Marchi, L., & Cavalli, M. (2010). "Hydrological and geomorphological hazards in mountain areas: A review." *Natural Hazards and Earth System Sciences*;
- Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1994). Landscape dissection and drainage density. *Water Resources Research*, 30(7), 1905-1913;
- Montello, D. R. (1993). Scale and Multiple Psychologies of Space. In A. U. Frank & I. Campari (Eds.), *Spatial Information Theory* (pp. 312–321). Springer;

- Neteler, M., Bowman, M. H., Landa, M., & Metz, M. (2012). GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS. *Environmental Modelling & Software*, 31, 124-130;
- Pierantoni, P. P., De Filippis, L., & Basilici, G. (2013). "Stratigraphic and structural settings of the Monte Nerone area: Geological map (1:10,000)." *Italian Journal of Geosciences*;
- Pizzi, A. (2003). "Recent tectonic evolution and seismotectonics of the area between L'Aquila and Sulmona (central Italy)." *Journal of Geodynamics*;
- Poesen, J. (2002). *Soil erosion in Europe*. Wiley-Blackwell;
- Regione Marche, annali pluviometrici 2022;
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., & McCool, D. K. (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. USDA;
- Rulli, M. C., Bozzi, S., Spada, M., Bocchiola, D., & Rosso, R. (2013). Agricultural and environmental risks associated with rainfall-triggered landslides. *Nature Climate Change*;
- Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, F., & Wang, G. (2014). *Progress in Landslide Science*. Springer;
- Shaw, E. M., Beven, K. J., Chappell, N. A., & Lamb, R. (2010). *Hydrology in Practice*. CRC Press;

- Sherman, G. (2008). Desktop GIS: Mapping the planet with Open Source Tools. Pragmatic Bookshelf;
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*;
- Steiniger, S., & Bocher, E. (2009). An overview on current free and open source desktop GIS developments. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(10), 1345-1370;
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), 309-319;
- Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., et al. (2013). "Ground water and climate change." *Nature Climate Change*;
- Tebaldi, G., Carboni, A., & Calzolari, G. (2013). "Effetti del ruscellamento superficiale su aree collinari soggette a dissesto." *Quaderni di Geologia Applicata*;
- Tiede, D. (2014). Geospatial workflows for analyzing remote sensing data. In *Geoinformatics* (pp. 301-317). Springer;
- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *The Geographical Review*;

- Ward, R.C., & Robinson, M. (1990). Principles of Hydrology. McGraw-Hill;
- Wang, S., Chen, J., & Ye, W. (2018). Assessment of drought impacts on agricultural production in Northeast China based on Thornthwaite-Mather water balance model. *Journal of Hydrology*, 559, 282-295;
- Willmott, C. J., Rowe, C. M., & Mintz, Y. (1985). Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. *Journal of Climatology*, 5(6), 589-606;
- Zevenbergen, L. W., & Thorne, C. R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12(1), 47-56.

8.2 Sitografia

- <https://weatherspark.com/>
- <https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Protezione-Civile/Progetti-e-Pubblicazioni/Annali-Idrologici>
- <http://www.pcn.minambiente.it/viewer/>
- <https://www.isprambiente.gov.it/it>
- <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/overview>
- <https://doi.org/10.3390/hydrology8010034>
- <https://www.mdpi.com/2306-5338/8/1/34>
- <https://thornwaterbalance.com/>
- <https://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Protezione-Civile/Console-Servizi-Protezione-Civile/SIRMIP-online>

9. RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il professore Alberto Tazioli, il professore Adriano Mancini e il dottore Davide Fronzi per aver collaborato a questa tesi. Ringrazio l'ingegnere Stefano Chiappini per tutto il supporto.

Ringrazio infinitamente i miei genitori Sonia e Domenico. Gli unici a conoscenza dei sacrifici che compiono ogni giorno per permettermi di realizzare il mio sogno. Senza di voi non sarei mai arrivato a questo obiettivo.

Ringrazio tutta la famiglia, in particolare i miei nonni, Marsilia, Dea, Anastasio e Giuseppe per avermi reso la persona che sono oggi e per non aver mai dubitato di me.

Ringrazio mio fratello Riccardo, mio cugino Alessandro ed uno degli amici a me più cari, Edoardo, per tutte le serate vissute insieme, tutta la leggerezza e la spensieratezza che solo loro sanno regalarmi.

Ringrazio colui che considero come un fratello acquisito, Alberto, un'amicizia nata per caso che è diventata una fratellanza. Grazie per ogni momento passato insieme, per avermi supportato e sopportato, dentro e fuori dall'università.

Ringrazio Edoardo, Domenico, Francesco G., Francesco P., Gabriele, Daniel e Alessandro per aver reso questo percorso molto più leggero, le lezioni più sopportabili e lo studio meno noioso.

Ringrazio Massimo e Patrizia per avermi sostenuto come una seconda famiglia.

Ringrazio Giulia per avermi spinto a credere in me stesso rendendo possibile tutto questo.

Dedico questo traguardo a mio nonno, la persona a me più cara in assoluto. Spero con tutto il cuore che sarai orgoglioso di me. Ti voglio bene, da sempre e per sempre.