



Mitigazione dei Rischi Naturali per la Sicurezza
e la Mobilità nelle Aree Montane del Mezzogiorno

PNR 2015-2020

Area di Specializzazione *Smart, Secure and Inclusive Communities*



Obiettivo Realizzativo 2

Valutazione del Rischio Idrogeologico

ANALISI GEOMORFOLOGICHE NEI COMUNI DI VAGLIO BASILICATA, BRINDISI DI MONTAGNA E TRIVIGNO

Domenico Guida, Mario Valiante

Consorzio inter-Universitario per la previsione e
la prevenzione dei Grandi Rischi – Università degli Studi di Salerno

29/02/2024



INDICE

| | |
|--|----|
| Sommario | 3 |
| 1. Introduzione | 4 |
| 2. Analisi geomorfometriche | 8 |
| 3. Analisi LOOM | 62 |
| Bibliografia | 69 |
| Allegati | 75 |



ANALISI GEOMORFOLOGICHE NEI COMUNI DI VAGLIO BASILICATA, BRINDISI DI MONTAGNA E TRIVIGNO

Domenico guida, Mario Valiante

SOMMARIO

Nel presente elaborato vengono illustrate le attività svolte nell'ambito del progetto Mitigo (ARS ...) dalla sezione geomorfologica del gruppo di lavoro UNISA nell'ambito dell'Obiettivo Realizzativo 2 "Valutazione del Rischio Idrogeologico". Le attività sono state focalizzate nelle aree dei territori comunali di Vaglia Basilicata, Brindisi di Montagna e Trivigno, lungo i versanti che bordano il corso del fiume Basento.

Le analisi si sono articolate secondo due percorsi principali: 1) analisi di tipo geomorfometriche basate su modelli digitali del terreno per il riconoscimento e la mappatura delle forme elementari del paesaggio, l'analisi e la mappatura dei domini di processo superficiale e l'estrazione dello scheletro morfologico; 2) riconoscimento e inventario di dettaglio di fenomeni franosi, inquadrati in una struttura di dati spazio-temporale.

Il riconoscimento delle forme elementari del paesaggio è stato effettuato prendendo a riferimento, quindi come punto di partenza, le Unità Topografiche di Base definite nelle più recenti linee guida per la cartografia geomorfologica d'Italia, e sono state derivate utilizzando la tecnica della differenza dall'elevazione media. I domini di processo superficiale sono stati invece cartografati utilizzando i grafici pendenza – area drenata, applicati però su diversi domini territoriali, oltre l'unità idrografica ampiamente utilizzata in letteratura. Lo scheletro morfologico è stato estratto direttamente dal DTM tramite l'analisi di punti e percorsi critici della superficie topografica.

L'inventario dei fenomeni franosi è stato condotto su base temporale, analizzando materiale proveniente da diverse sorgenti e con diversa collocazione temporale utilizzando un approccio *event-based*. Gli eventi riconosciuti sono stati quindi informatizzati secondo la struttura LOOM (*Landslide Object-Oriented Model*) basata sulla preservazione e caratterizzazione dei rapporti topologici e spazio-temporale tra gli eventi franosi.



1. Introduzione

Al fine di aggiornare le linee guida della cartografia nazionale, nel 2014, è stata costituita una Commissione interistituzionale tra ISPRA, AIGEO e Consiglio Nazionale dei Geologi. I lavori di tale commissione si sono concretizzati dapprima in un aggiornamento delle linee guida per la redazione della Carta Geomorfologica d'Italia (Quaderni Serie III, volume 13, Fascicolo I, ISPRA - Campobasso & *alii*, 2018), e successivamente in una proposta di informatizzazione e sperimentazione (Quaderni Serie III, volume 13, Fascicolo II, ISPRA - Campobasso & *alii*, 2023).

La Commissione ha elaborato la proposta di un modello avanzato di cartografia geomorfologico-applicativa contraddistinto da una rappresentazione delle forme del rilievo oggettivata da procedure geomorfometriche con il supporto dalla tecnologia GIS (Sistemi informativi Geografici). Rispetto alle carte geomorfologiche “tradizionali”, non modificabili dopo la stampa, questa tecnologia, indispensabile strumento per l'archiviazione, l'analisi, la riproduzione su schermo e su carta dei dati geo-spaziali, consente di produrre rappresentazioni cartografiche continuamente aggiornabili, di ottenere suddivisioni e parametri morfometrici, di svolgere analisi numeriche ed estrarre documenti tematici diversi da utilizzare di volta in volta in specifici settori applicativi. Il nuovo modello di cartografia geomorfologica proposto dalla Commissione è del tipo “gerarchico multiscalare e a copertura completa” (con l'intera superficie topografica cartografata in termini di forme e depositi associati), idoneo per essere strutturato in ambiente GIS.

Questo modello cartografico, definito “a oggetti”, entità spazio-temporali che oltre a possedere precisi caratteri di identità e persistenza comprendono attributi che ne caratterizzano lo stato originario e ne determinano il successivo comportamento evolutivo, rappresenta le proprietà spaziali delle forme del rilievo in modo geometricamente ripetibile limitando l'uso dei simboli cartografici adimensionali a favore di entità geometriche correttamente delimitate mediante l'impiego di modelli digitali del terreno (DTM) ad alta risoluzione (Heywood & *alii*, 2006; De Pippo & *alii*, 2008; Dramis & *alii*, 2011; Seijmonsbergen & *alii*, 2011; Guzzetti & *alii*, 2012; Blaschke & *alii*, 2014; Guida & *alii*, 2016).

La metodologia adottata, partendo da un rilevamento geomorfologico “tradizionale”, raffina i risultati della delimitazione delle forme di erosione e di accumulo rilevate sul terreno mediante analisi su un DTM a spaziatura adeguata, controllata step-by-step dal giudizio esperto del geomorfologo. La stessa viene inoltre supportata da un database appositamente dedicato e da una tassonomia gerarchica i cui livelli sono organizzati in termini di “entità topologiche nidificate” (*nested topological entities*), rappresentate da poligoni e linee, simboli puntuali, campiture e annotazioni utilizzabili nelle operazioni di transizione verso l'alto (*upscaling*).

A differenza del modello cartografico “tradizionale”, ampiamente diffuso in Italia e applicato nel Progetto CARG, il nuovo modello di carta geomorfologica proposto non usa come base la litologia del substrato ma rappresenta l'intera superficie cartografata in termini di entità geomorfologiche (forme s.l. e depositi associati). La base litotecnica rilevata alla stessa scala e georeferenziata, è comunque presente nel database e, qualora necessario, visualizzabile e riproducibile. Apposite regole di transizione sono predisposte per i passaggi di scala, così da poter disporre, in ogni caso, di una base litotecnica confrontabile con la rappresentazione geomorfologica.

In particolare, la metodologia proposta per la realizzazione della cartografia geomorfologica “a oggetti” si articola nei seguenti punti:

1. Realizzazione di una carta geomorfologica “tradizionale” e di una carta litotecnica alla stessa scala mediante rilevamento sul terreno supportato e integrato dall'analisi di immagini telerilevate;



2. Inserimento nel database geomorfologico delle primitive grafiche e della tassonomia gerarchica delle forme. Al fine di rendere coerente il processo multiscale della rappresentazione cartografica e della sua relativa strutturazione geo-informatica, vengono utilizzate regole di transizione predefinite tra livelli gerarchici verso l'alto (*upscaling*) e verso il basso (*downscaling*) tra livelli di scala meno dettagliata rispetto alla scala di rilevamento (scala focale), che consentono rispettivamente di generalizzare e decomporre le forme in rapporto alle finalità dello studio;
3. Organizzazione in ambiente GIS degli elementi da rappresentare secondo il criterio "ontologico", cioè all'interno di una struttura contenente tutte le diverse entità geomorfologiche e le loro reciproche relazioni topologiche definite in modo univoco. Uno schema classificatorio di questo tipo, cui fare riferimento, è rappresentato dal Progetto europeo INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in Europe*) (Direttiva 2007/2/CE)
4. Strutturazione informativa in cui le diverse entità geomorfologiche vengono definite secondo le più appropriate relazioni topologiche definite in modo univoco e facilmente implementabili nei più diffusi GIS presenti sul mercato
5. Analisi su DTM volte a suddividere l'area investigata in elementi morfometrici da inserire nel database. Questi elementi costituiranno il punto di partenza per costruire la base cartografica dell'elaborato e per la delimitazione delle forme e per la definizione dei loro rapporti topologici;
6. Qualora richiesti maggiori dettagli in settori particolari dell'area investigata, è possibile decomporre (*downscaling*) le forme rilevate alla scala del rilevamento (scala focale) solo utilizzando nuovi dati ottenuti da rilevamenti supplementari.

Il nuovo modello cartografico trova la sua piena espressione attraverso l'utilizzo di dispositivi informatici mediante i quali è possibile selezionare i dati rappresentati e interrogarli per conoscere gli attributi a essi collegati e ricavarne informazioni supplementari. La sua applicazione comporta:

1. un incremento delle combinazioni dei dati geomorfologici gestibili e rappresentabili;
2. una facile interazione, in fase di rappresentazione e analisi dei dati, con altri settori disciplinari;
3. la conformità con i più accreditati standard internazionali basati sul sistema di metadata, al fine di consentire l'interoperabilità tra sistemi informativi geografici differenti.

Il modello cartografico proposto può essere applicato anche alla cartografia geomorfologica preesistente attraverso la "traduzione" a "oggetti" delle forme ivi rappresentate.

I passaggi di scala dal livello di rilevamento verso rappresentazioni di minore dettaglio comprendono sia la generalizzazione delle forme del rilievo, in funzione delle loro dimensioni reali e della loro riproducibilità su carta alle varie scale mediante poligoni o linee aperte, sia il loro accorpamento in simboli più inclusivi mediante l'uso di appositi codici informatici e di specifiche regole di transizione, sempre con il giudizio esperto del geomorfologo.

I passaggi di scala mediante apposite regole e codici di transizione riguardano anche la base geologica a orientamento litotecnico che si accompagna alla carta geomorfologica. Il tema della multiscale e della transizione tra i diversi livelli gerarchici sono trattati in dettaglio nel fascicolo 2, insieme agli aspetti tecnico-informatici relativi all'inserimento nel database dei dati rilevati, alla loro analisi e alla loro riproduzione sullo schermo e in stampa.

Nel panorama precedentemente descritto, le cartografie dei Piani per l'Assetto Idrogeologico presentano però alcune criticità rispetto alle ultime proposte metodologiche, sia da normativa, che da letteratura specializzata:

- Struttura dei dati basata sul modello relazionale;
- Inconsistenza delle relazioni topologiche tra gli oggetti rappresentati;

- Disomogeneità gerarchica delle forme rappresentate.

In base agli ultimi standard per la gestione e manipolazione dei dati geo-grafici (ISO serie 19100) ed alle direttive della banca dati comunitaria INSPIRE, il modello ottimale per i dati geografici è stato individuato nel modello “ad oggetti”. Rispetto a quest’ultimo, il modello relazionale, che resta ad oggi ancora il più diffuso ed utilizzato, è basato sulla suddivisione dei dati in tabelle, dove ogni entità è rappresentata da una riga di tabella (*record*) e l’identità e la tipologia del dato è espressa solitamente tramite attributi. In un modello di dati ad oggetti, invece, la strutturazione di una banca dati prevede una fase preliminare di modellizzazione dei dati, dove vengono dapprima definite le classi dei dati che si vogliono gestire e le relazioni che intercorrono tra di esse, le entità che popoleranno le classi sono definite oggetti. In questo modo il dato viene classificato “a priori”, a prescindere dai propri attributi, data l’appartenenza ad una classe specifica definita in precedenza, anche le relazioni con oggetti appartenenti ad altre classi sono definite automaticamente. Una banca dati ad oggetti può essere realizzata anche utilizzando formati non tabellari. Ad esempio, uno dei formati che si sta sempre più utilizzando è il formato GML (*Geography Markup Language*), basato sul più celebre e generalizzato XML (*eXtensible Markup Language*). Un esempio di banca dati basata sul modello a oggetti, ma realizzata seguendo un approccio ibrido, cioè, basato su tabelle, è rappresentato dai Database GeoTopografici realizzati o in corso di realizzazione dagli enti Regionali (DM 10/11/2011) e relative Specifiche di contenuto.

Ai fini del Progetto Mitigo, quindi, sono state mantenute le forme ed i morfotipi nella loro struttura originaria e sono state ristrutturate, secondo un modello a oggetti, le sole forme relative ai dissesti ed ai processi gravitativi. Tale modello sarà di-scusso con maggiore dettaglio nei capitoli successivi. Tale scelta è stata dettata dal fatto che non è ancora stata definita in modo univoco, rigoroso e condiviso dalla comunità scientifica geomorfologica, un modello ontologico e semantico, essenziale per una strutturazione ad oggetti, tale da poterlo applicare alla totalità delle forme.

Ai fini della interoperabilità con gli strumenti informatici più diffusi attualmente, il modello a oggetti per le forme legate alla gravità è stato comunque realizzato con un sistema basato su tabelle (SQLite), dove in ogni tabella sono contenuti gli oggetti appartenenti ad una sola classe in forma di records.

La seconda criticità riguarda le relazioni topologiche esistenti tra le entità rappresentate nei prodotti del Piano, difatti, esse si riducono alla sola relazione di adiacenza. Questo deriva dalla consuetudine di rappresentare il dato spaziale areale tramite poligoni giustapposti tra loro con i bordi in condivisione secondo uno schema che potrebbe essere definito “a mattonella” o “a mosaico”. Tale procedura porta alla definizione di un livello informativo che “ammanta” l’area di interesse senza sovrapposizioni tra le entità appartenenti alla stessa tabella. Nonostante questo modello sia utile per numerose applicazioni, come ad esempio i dati catastali, confini amministrativi, copertura del suolo, etc., per la rappresentazione dei dati geomorfologici risulta insufficiente. La mosaicatura delle forme e dei depositi crea una inconsistenza concettuale tra il dato e la realtà che si vuole rappresentare, difatti, molto spesso, in natura si hanno sovrapposizioni di più depositi e forme.



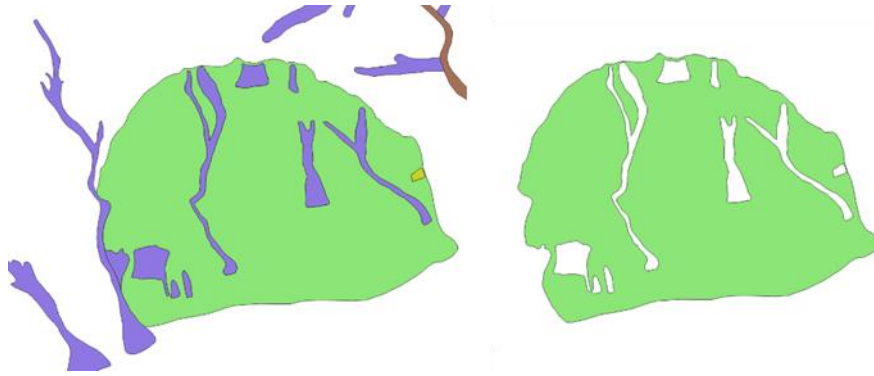


Figura 1 - Esempio di inconsistenza topologica generato dall'utilizzo di un modello di dati "a mosaico".

In tale contesto risulta indispensabile dover strutturare il dato in modo tale da mantenere quelle relazioni topologiche che meglio approssimano la situazione reale. In particolare, risulta essenziale riuscire a mantenere i rapporti di sovrapposizione spaziale secondo un modello che può essere definito 2,5D o addirittura 3D.

In tal senso, risulta emblematico prendere ad esempio i rapporti spaziali che possono intercorrere tra un corso d'acqua ed una infrastruttura che lo attraversa, come un ponte: in una rappresentazione 2D a mosaico, si avrà una intersezione spaziale tra il corso d'acqua e l'infrastruttura, con tutte le relative conseguenze nei contesti di pericolosità e rischio idrogeologico; se invece i due oggetti vengono analizzati in uno scenario 3D o in uno che tenga comunque conto dei rapporti di sovrapposizione, potrebbe addirittura risultare che i due oggetti non vengono affatto in contatto, ovvero sono disgiunti da un punto di vista topologico.

In riferimento al modello a oggetti proposto nelle nuove linee guida geomorfologiche dell'ISPRA, da un punto di vista gerarchico, la legenda utilizzata negli elaborati di Piano, elenca come forme entità che potrebbero costituire sistemi geomorfologici (es. versante fluvio-denudazionale, valle torrentizia, piana costiera), complessi geomorfologici (es. falde detritiche, aree a calanchi) oppure componenti di forme (es. scarpata di terrazzo, orlo di superficie, scarpata di fosso). Questo deriva in parte da quella che era la legenda per la cartografia geomorfologica in vigore ai tempi di redazione del piano, dove qualsiasi entità geomorfologica era riportata genericamente come "forma".

Anche per i suddetti motivi, è stato necessario utilizzare, almeno per le frane, un approccio di gestione del dato capace di conservare le relazioni topologiche tra oggetti nel modo più fedele possibile alla realtà. L'approccio orientato agli oggetti utilizzato (LOOM - *Landslide Object-Oriented Model*, Valiante et al., 2021) è basato sul presupposto che i singoli oggetti (le singole frane) vengano rappresentati interamente, comprese le parti in sovrapposizione con altri oggetti, in modo tale da conservare le relazioni spaziali e, indirettamente, anche quelle temporali. L'ordinamento sopra-sotto, infatti, viene poi effettuato in fase di visualizzazione su base temporale, sia assoluta che relativa.

Nel presente elaborato vengo descritti i metodi geomorfometrici utilizzati per l'elaborazione delle Unità Topografiche di Base (UTB) descritte nel Fascicolo II delle linee guida, La caratterizzazione delle aree in esame in termini di domini di processo superficiale e l'applicazione del metodo LOOM su casi campione. L'area di studio è stata focalizzata sui territori comunali di Vaglio Basilicata, Brindisi di Montagna e Trivigno.

2. Analisi geomorfometriche

2.1 Differenza dall'elevazione media

La differenza dall'elevazione *DIFF* è definita come la differenza tra il valore di elevazione di una cella del DTM z_0 rispetto alla media di elevazione z_{media} di un suo intorno che può avere diverse dimensioni e geometrie, entrambe definite dall'utente:

$$DIFF = z_0 - z_{media}$$

Tale valore è stato utilizzato come punto di partenza per la definizione delle Unità Topografiche di Base descritte dalle Nuove Linee Guida per la Cartografia Geomorfologia (Campobasso & alii, 2018, 2023).

La differenza dall'elevazione media è stata preferita al più noto e diffuso Indice di Posizione Topografica definito da Weiss, 2001:

$$TPI = int((z_0 - z_{media}) + 0,5)$$

La scelta è dovuta al fatto che così com'è definito il *TPI* non valorizza le differenze di elevazione inferiori all'unità (1 m) e, se ciò non costituisce un problema a piccole scale o con DTM poco risolti, lo è dal momento in cui si impiegano dataset ad alta risoluzione come i DTM prodotti da dati Lidar, dove le differenze di quota possono avere anche valori sub-centimetrici.

I valori di *DIFF* restituiscono informazioni circa la posizione relativa di un punto nel territorio. Valori positivi indicano che l'elevazione del punto è maggiore della media del suo intorno, ovvero si trova in posizione prominente o in un'area prevalentemente convessa; valori negativi derivano da punti aventi elevazione inferiore rispetto al suo intorno, ovvero si trova in un'area depressa o prevalentemente concava. Valori intorno allo zero rappresentano quei punti dove l'elevazione è circa pari alla media del suo intorno, tale circostanza può verificarsi solo in aree pianeggianti o versanti rettilinei (Figura 2).

Utilizzando i modelli digitali del terreno (DTM) l'algoritmo confronta l'elevazione di ogni cella con l'elevazione media dell'intorno, all'interno del quale la cella di riferimento è solitamente quella centrale. L'intorno deve essere definito in termini di dimensioni e forma.

Il dataset utilizzato per l'elaborazione è il DTM fornito dalla Regione Basilicata attraverso il Geoportale regionale, con risoluzione di cella pari a 5m.

Ai fini di questo lavoro, facendo riferimento a Valiante, 2020, è stata scelta una geometria di intorno circolare con raggio variabile. Solitamente, la scelta della dimensione dell'intorno è soggettiva e dipende dalle finalità dello studio (Tagil & Jenness, 2008). Per ovviare a questa soggettività nella scelta delle dimensioni dell'intorno, sono stati utilizzati diversi raggi secondo una sequenza esponenziale di 2^n celle dtm, da 2^0 (1 cella = 5m) a 2^{10} (1024 celle = 5120 m). Successivamente, la sequenza di output è stata mediata sia utilizzando i dataset di output diretto sia utilizzando i dataset standardizzati definiti con la formula:

$$DIFF_{std} = \left(\frac{DIFF - media}{deviazione\ standard} \right)$$

In quest'ultima equazione, media e deviazione standard si riferiscono alle statistiche del singolo dataset che viene standardizzato di volta in volta. Il risultato di questa operazione consiste in due stack di 11 dataset raster ognuno, il primo contenente gli output diretti del calcolo di *DIFF* ai diversi raggi, il secondo contenente le rispettive versioni standardizzate (Figura 3). Alla fine, entrambi gli stack sono stati aggregati calcolandone la media (Figura 4).

Utilizzando i valori di *DIFF* effettivi, i risultati calcolati con i raggi maggiori avranno un impatto maggiore sulla media risultante a causa dei loro valori elevati, mentre, utilizzando i valori standardizzati, i diversi livelli sono molto più comparabili dato che tutti i livelli vengono ridotti alla stessa distribuzione. Da un punto di vista morfometrico, ciò vuol dire che la media dei valori effettivi è più rappresentativa delle morfologie a piccola scala, mentre la media dei valori standardizzati enfatizza morfologie a più grande scala (Figura 5).

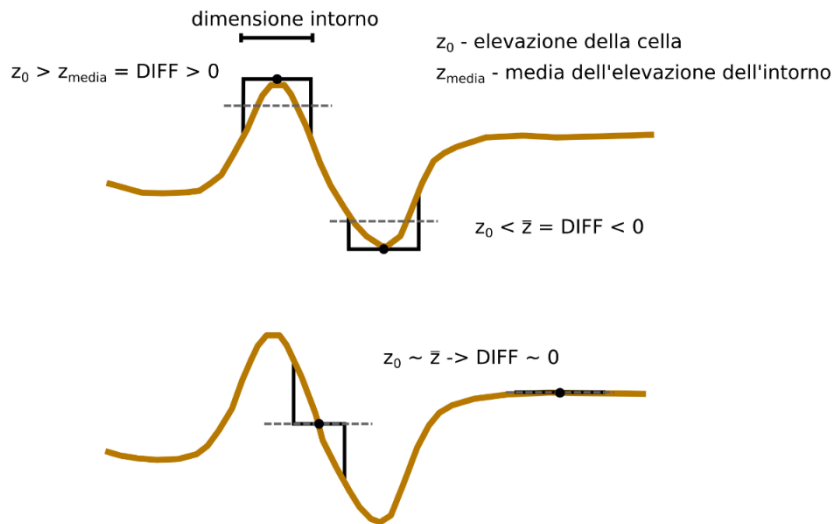


Figura 2 – Variazione dei valori di DIFF.

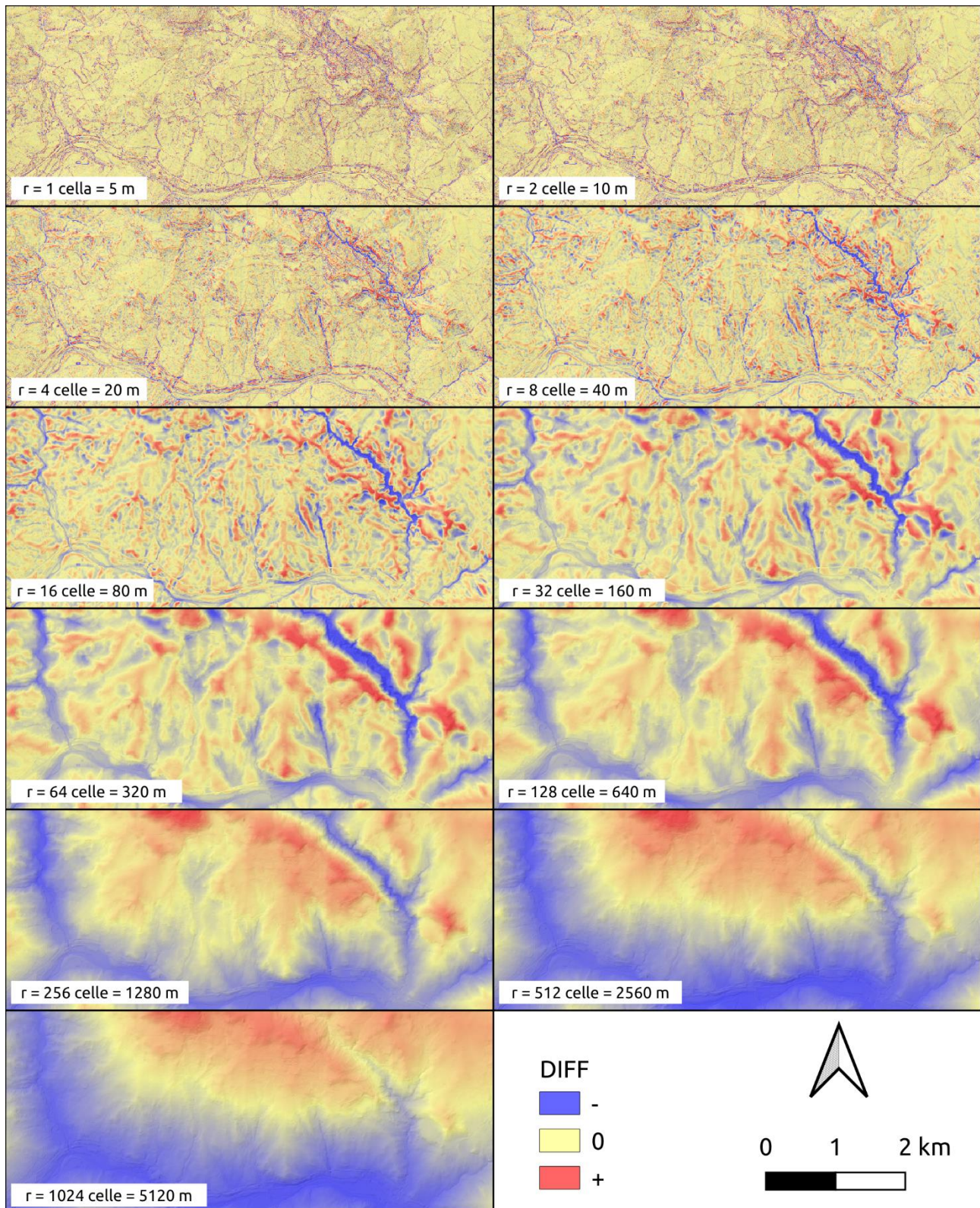


Figura 3 – Mappe di DIFF dell'area meridionale del comune di Vaglio con diversi raggi computazionali

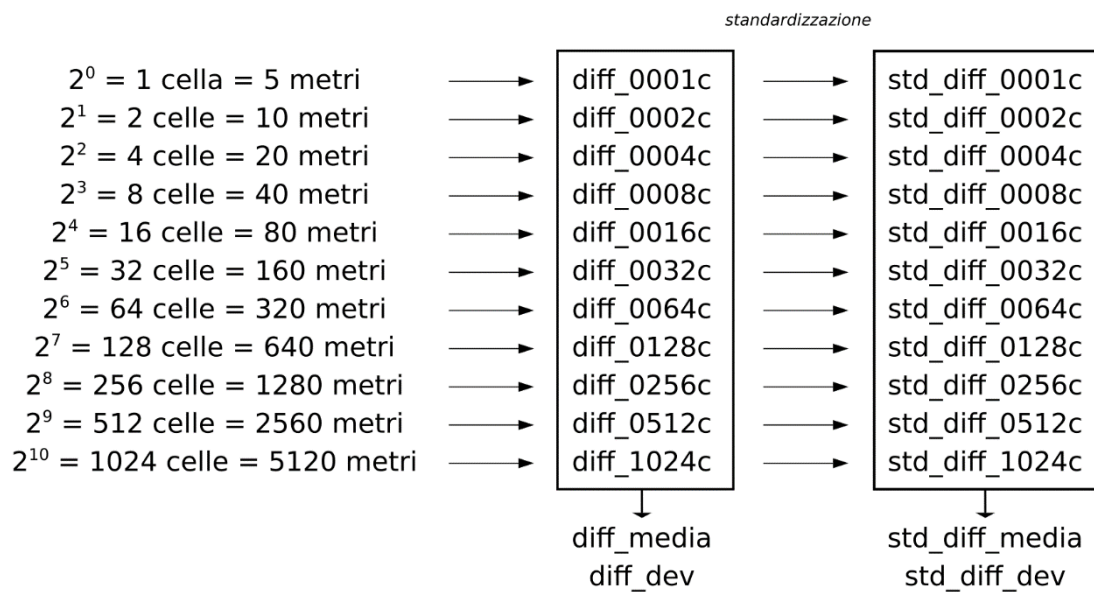


Figura 4 – Dataset DIFF utilizzati per le analisi

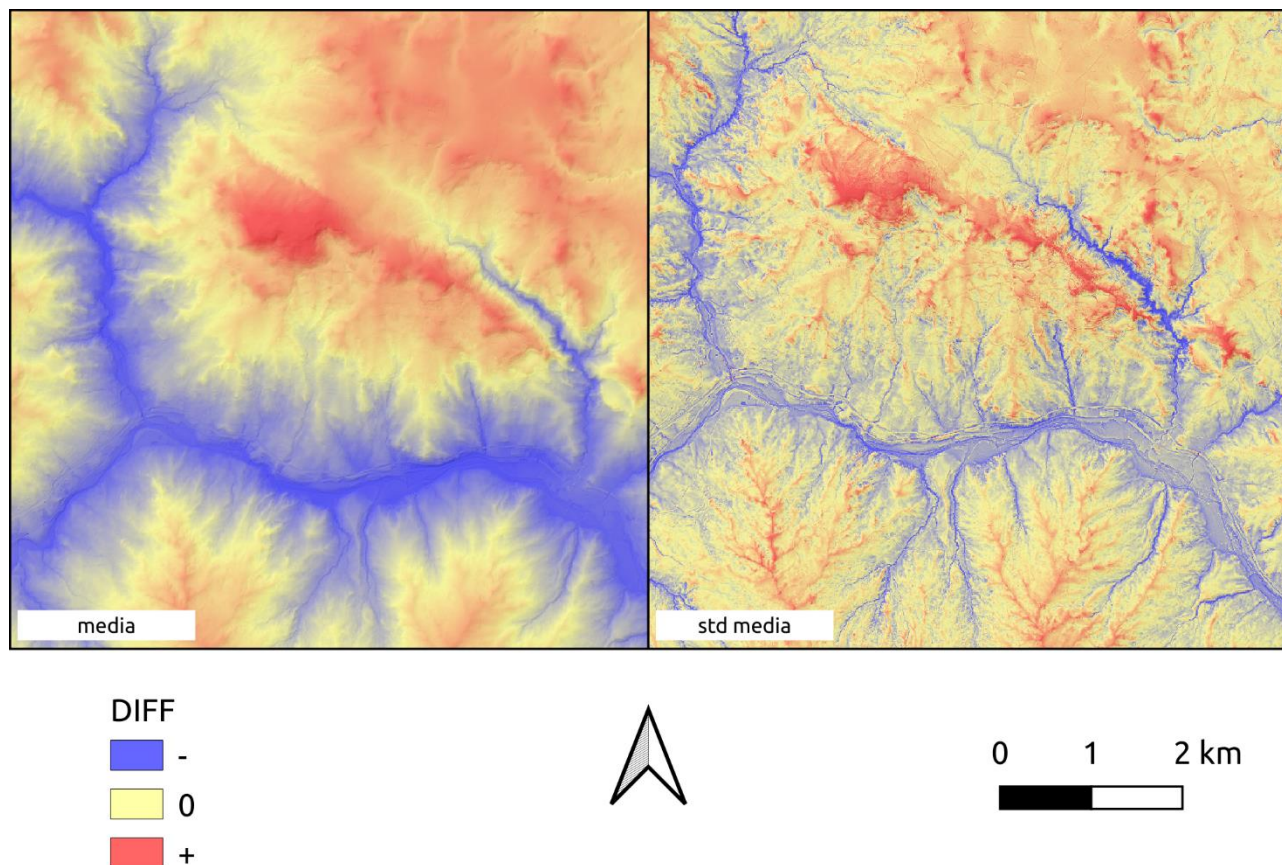


Figura 5 – Mappe dei valori medi di DIFF e di DIFF standardizzati

I valori di **DIFF** sono stati classificati utilizzando 3 livelli gerarchici progressivi: Le Unità Topografiche di Base (UTB) (Campobasso & alii, 2018, 2023), le posizioni di versante (Weiss, 2001) e le forme del rilievo (Dramis & alii, 2022).

Il punto di partenza per la segmentazione è costituito dalla definizione delle posizioni di versante (*Slope Positions - SP*), basate sulla classificazione dei valori di *DIFF* sulla base della sua deviazione standard (Figura 6).

Successivamente, le UTB vengono derivate per aggregazione delle precedenti posizioni di versante, mentre le forme elementari del rilievo (*Landforms - LF*) derivano dalla ulteriore scomposizione dei valori di TPI con l'aggiunta dei valori di pendenza, secondo lo schema mostrato in Tabella 1. In questo modo, a partire dalle 3 Unità Topografiche di Base e passando per 5 Posizioni di Versante, si arriva alla de-finizione di 13 forme del rilievo elementari (Figura 6).

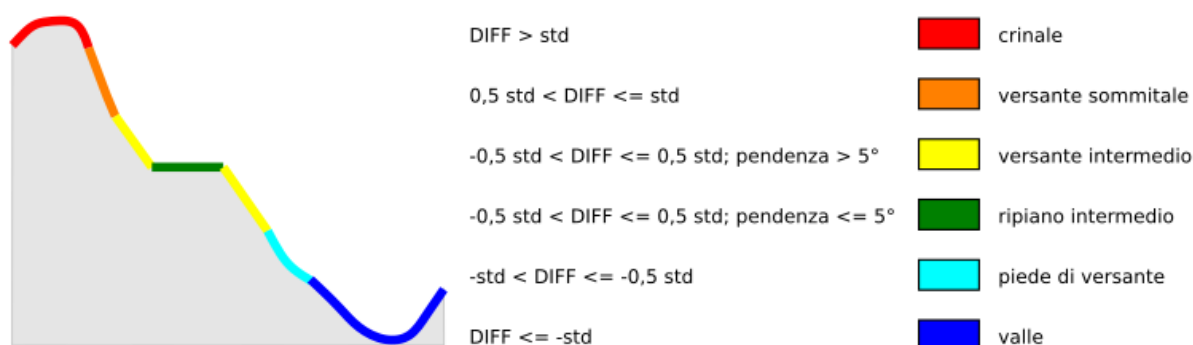


Figura 6 – Classificazione delle Posizioni di Versante.

Tabella 1 - Classificazione gerarchica dei valori di TPI (std = deviazione standard, P = pendenza).

| UTB | Posizioni di Versante (SP) | Forme del rilievo (LF) |
|---|---|--|
| Sommità | TPI > std = Crinale | TPI > std & P > 60° = Scarpata |
| | | TPI > std & 5° < P ≤ 60° = Crinale |
| | | TPI > 2std & P ≤ 5° = Cima, cresta, pinnacolo |
| | | std < TPI ≤ 2std & P ≤ 5° = Ripiano sommitale |
| Versante | 0,5std < TPI ≤ std = Versante sommitale | 0,5std < TPI ≤ std & P > 60° = Scarpata |
| | | 0,5std < TPI ≤ std & P ≤ 60° = Spalla, crinale secondario, sella |
| | -0,5std < TPI ≤ 0,5std = Versante intermedio | -0,5std < TPI ≤ 0,5std & P > 60° = Scarpata |
| | | -0,5std < TPI ≤ 0,5std & 5° < P ≤ 60° = Versante |
| -std < TPI ≤ -0,5std = Piede di versante | -0,5std < TPI ≤ 0,5std & P ≤ 5° = Ripiano intermedio | |
| | -std < TPI ≤ -0,5std & P > 60° = Scarpata erosiva | |
| | -std < TPI ≤ -0,5std & 5° < P ≤ 60° = Piede di versante | |
| Fondovalle | TPI ≤ -std = Fondovalle | -std < TPI ≤ -0,5std & P ≤ 5° = Piana alluvionale |
| | | TPI ≤ -std & P > 60° = Scarpata erosiva |
| | | -2std < TPI ≤ -std & 5° < P ≤ 60° = Valle, vallecola, canale |
| | | -2std < TPI ≤ -std & P ≤ 5° = Piana alluvionale |
| | | TPI ≤ -2std & P ≤ 60° = Fondovalle, canale inciso, forra |

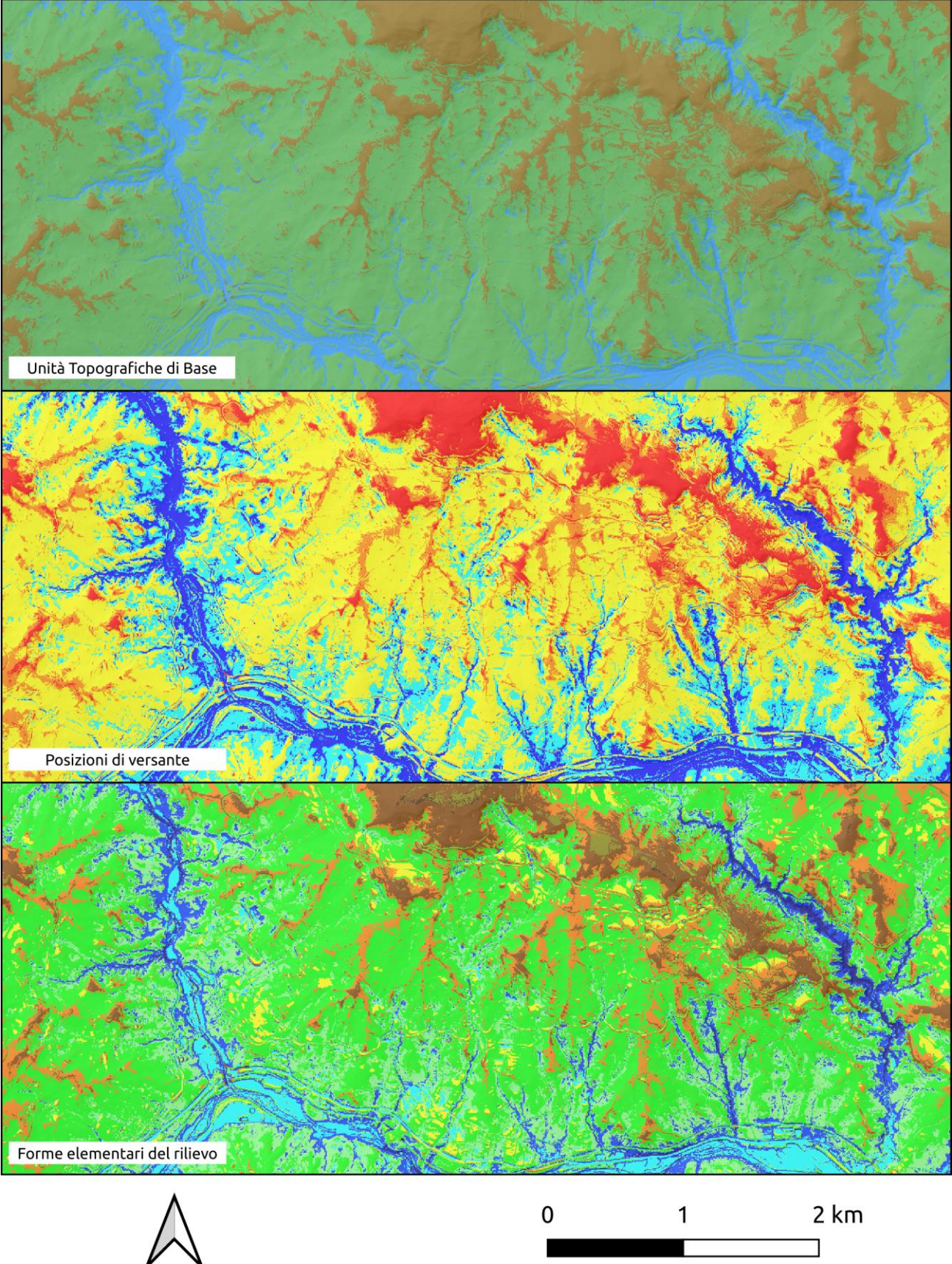


Figura 7 - Confronto tra UTB, Posizioni di versante e forme elementari del rilievo nell'area di esempio di Figura 3, per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

2.2 Forme del paesaggio

La procedura descritta nel paragrafo precedente è stata applicata alle aree dei comuni di Vaglio Basilicata, Brindisi di Montagna e Trivigno. Per ognuna delle 3 aree campione sono stati prodotti 6 elaborati, due per ogni livello gerarchico, di cui uno elaborato a partire dai dati normali e l'altro prodotto a partire dai dati standardizzati.

2.2.1 Unità topografiche di Base

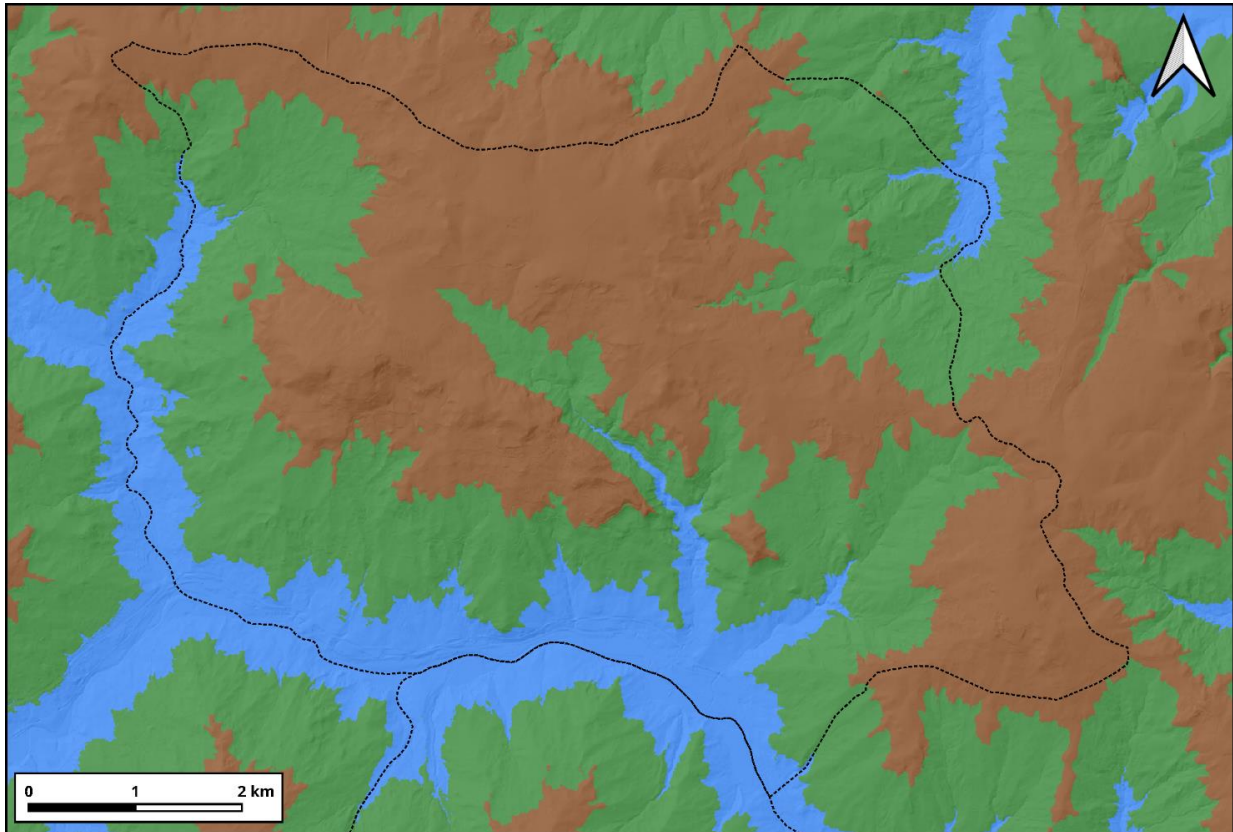


Figura 8 - Unità Topografiche di Base per l'area del comune di Vaglio. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

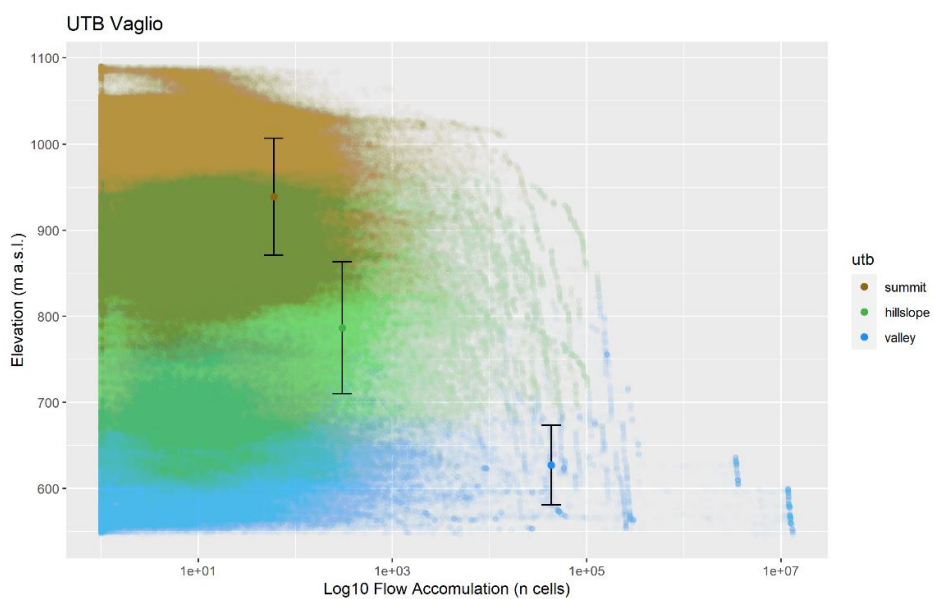


Figura 9 – Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi utb per l'area del comune di Vaglio.

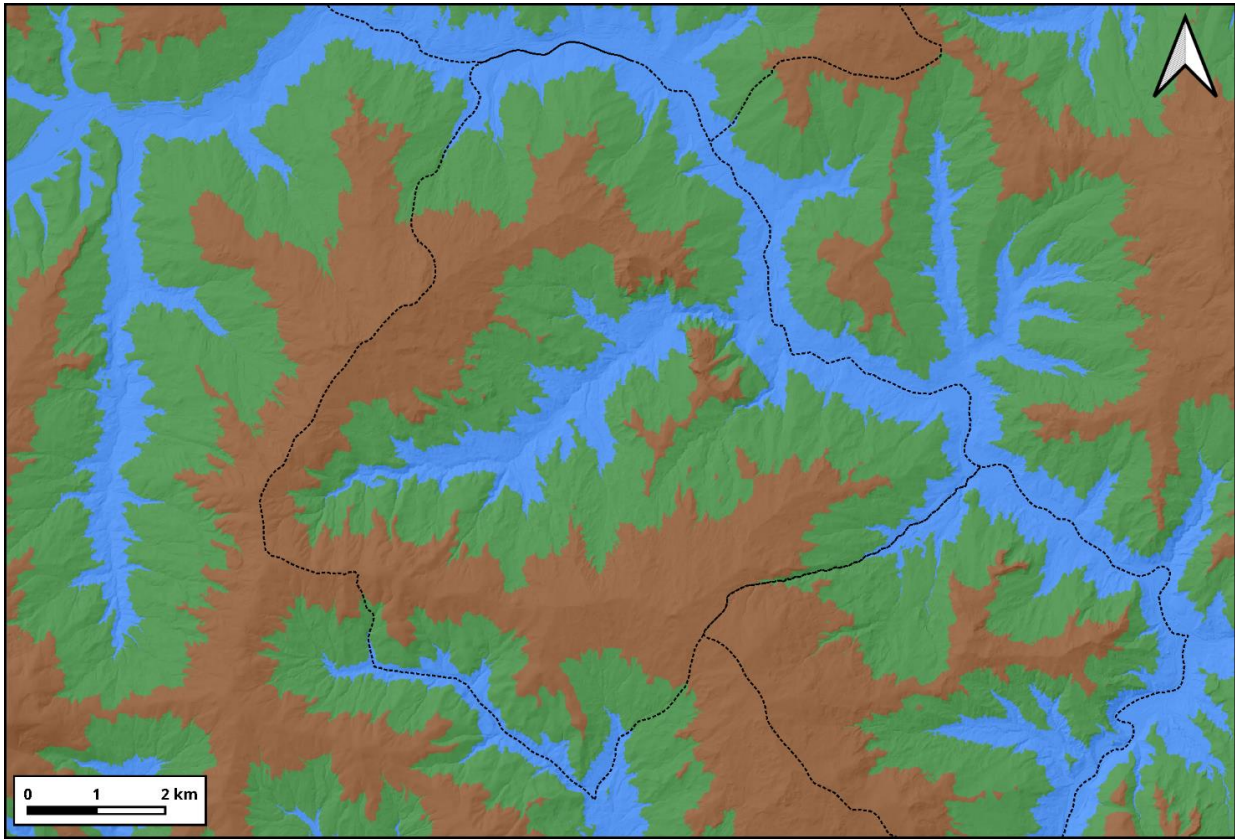


Figura 10 - Unità Topografiche di Base per l'area del comune di Brindisi Montagna. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

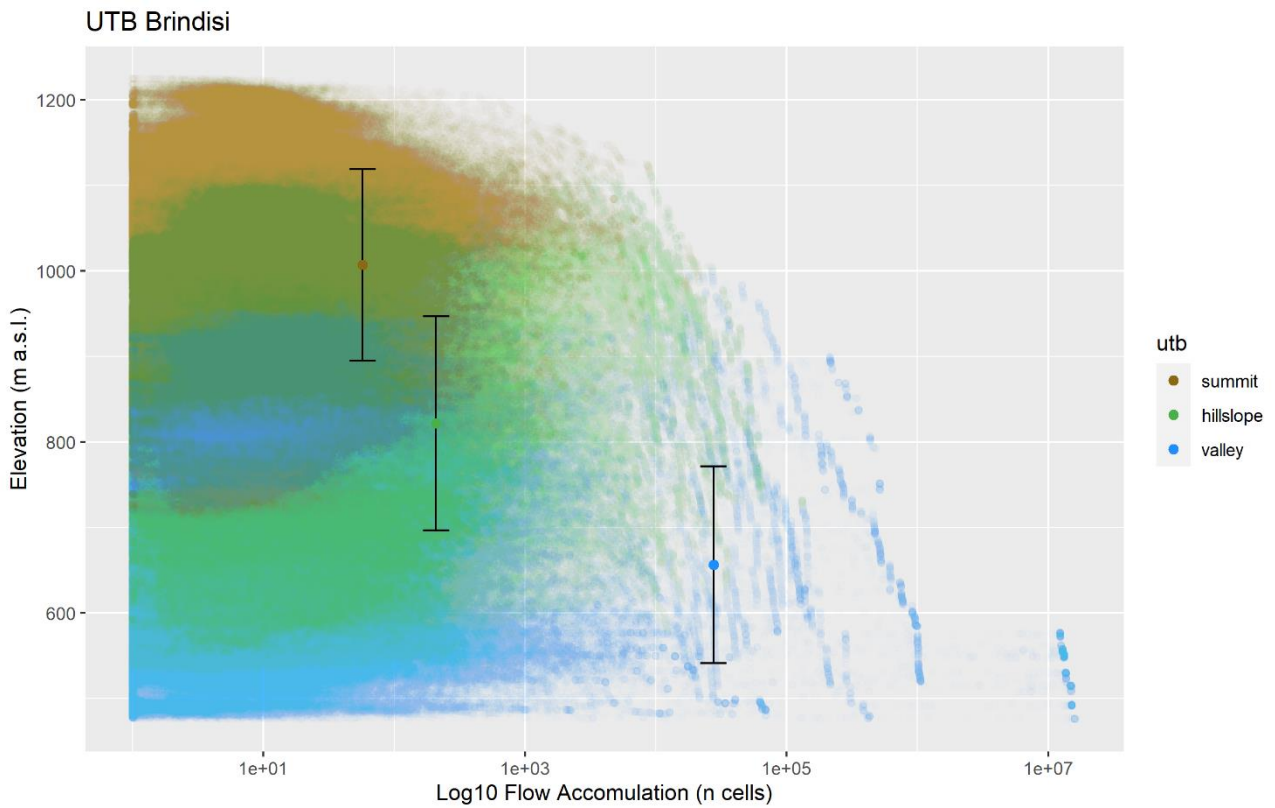


Figura 11 - Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi utb per l'area del comune di Brindisi Montagna.

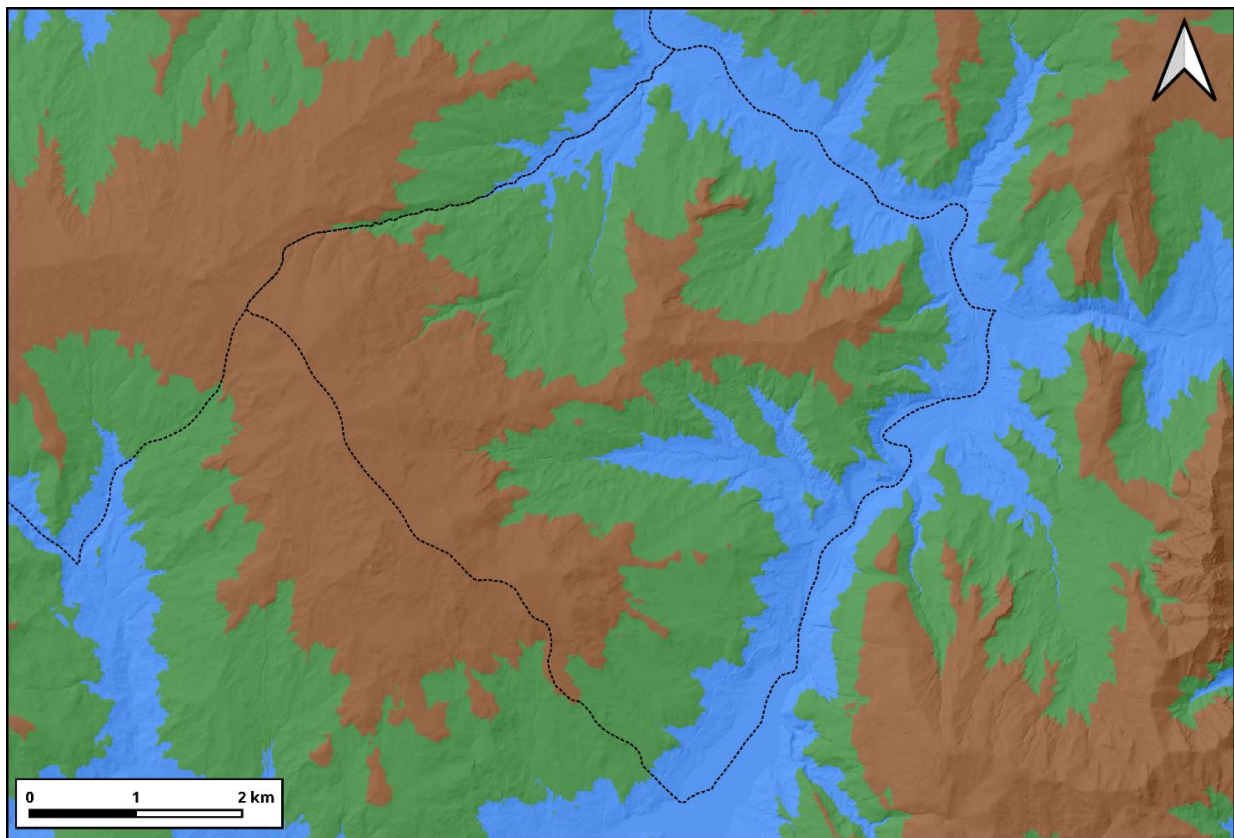


Figura 12 - Unità Topografiche di Base per l'area del comune di Trivigno. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

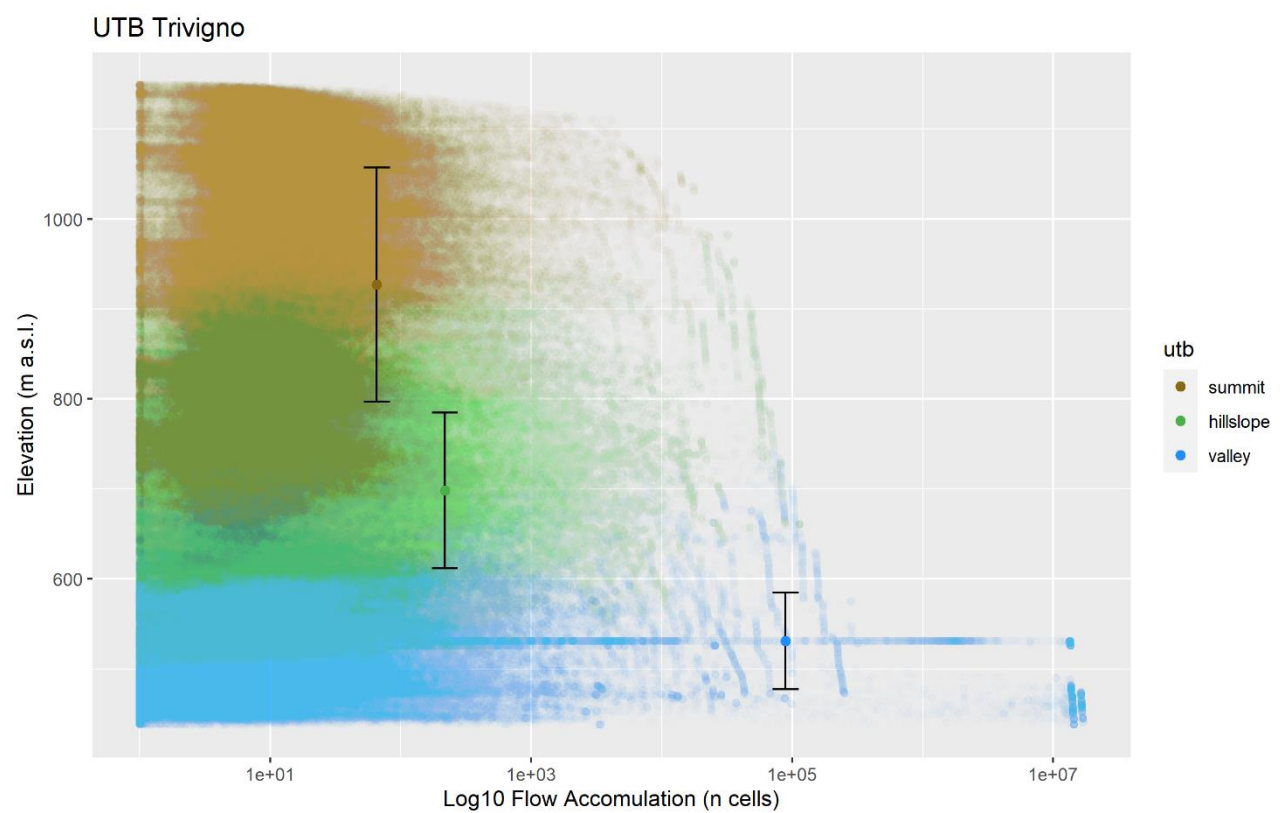


Figura 13 - Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi utb per l'area del comune di Trivigno.

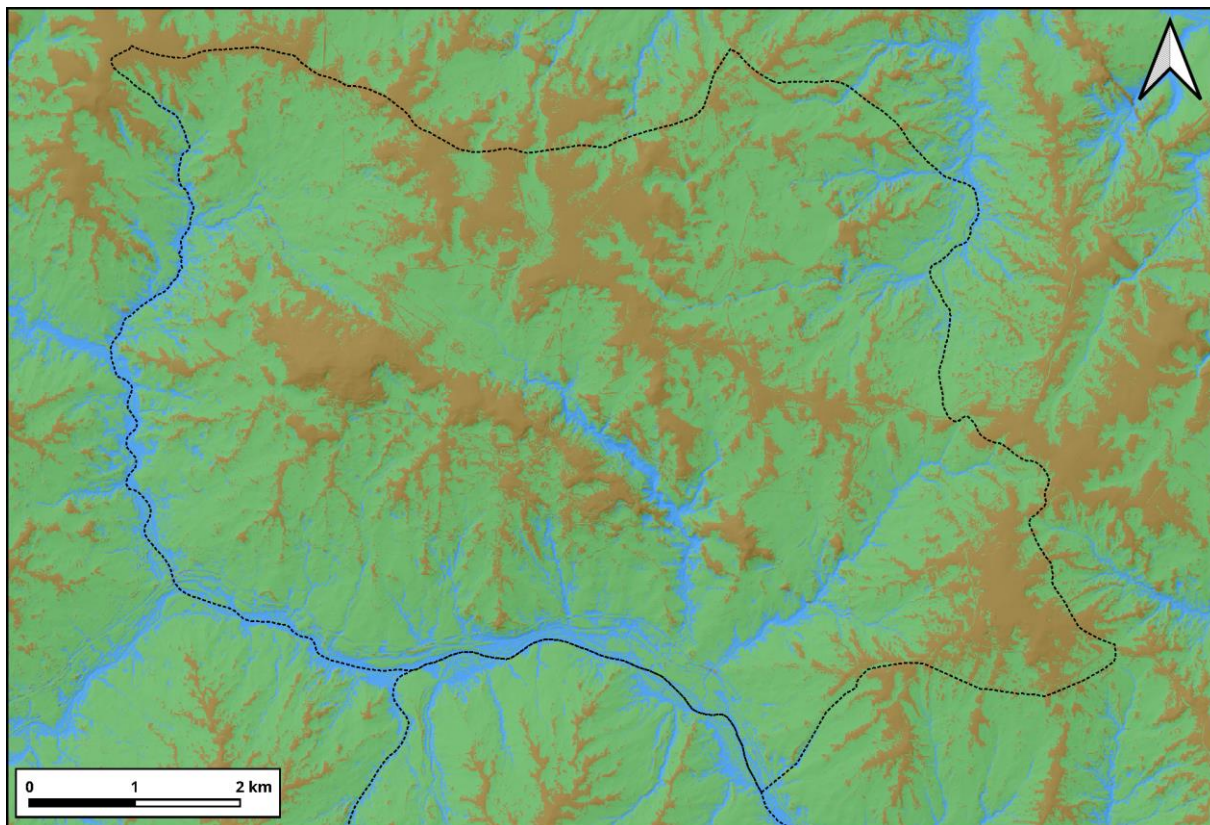


Figura 14 - Unità Topografiche di Base dai dati standardizzati per l'area del comune di Vaglio. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

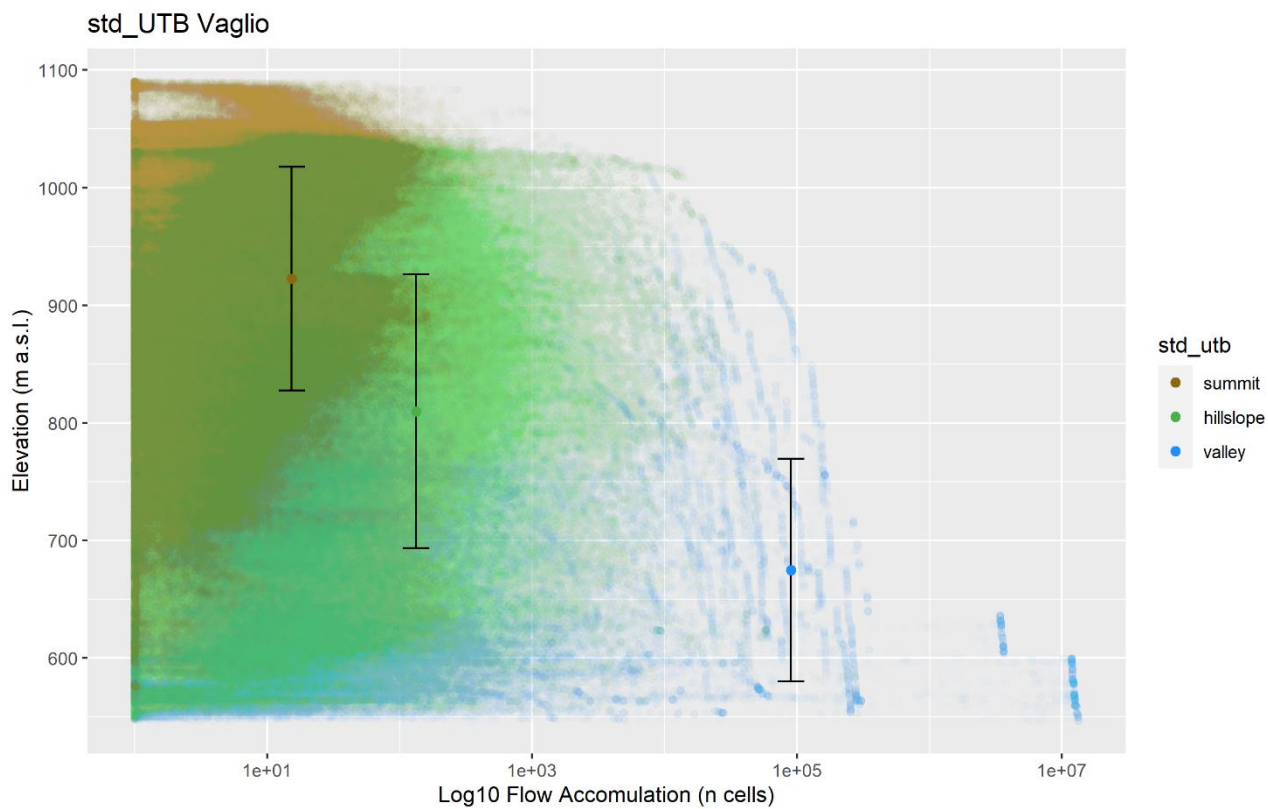


Figura 15 - Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi utb dai dati standardizzati per l'area del comune di Vaglio.

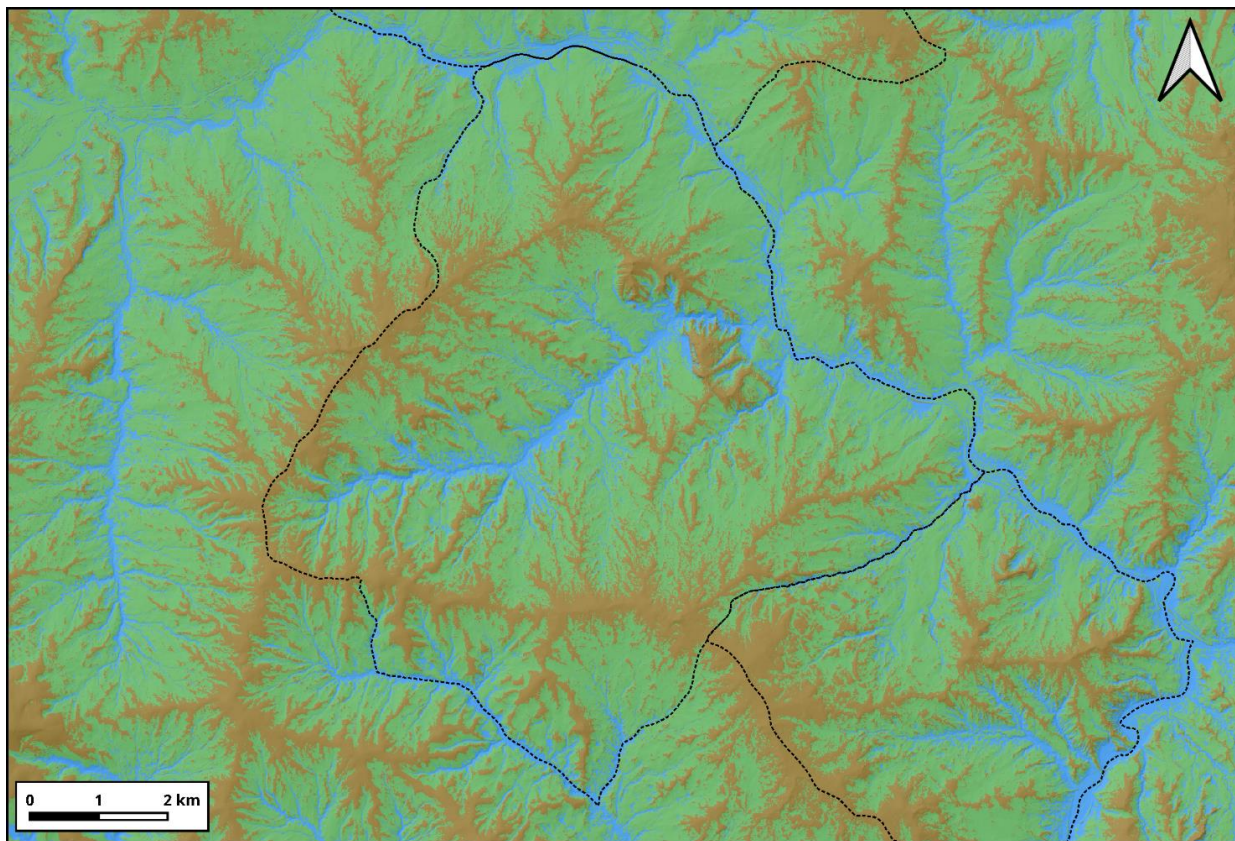


Figura 16 - Unità Topografiche di Base dai dati standardizzati per l'area del comune di Brindisi Montagna. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

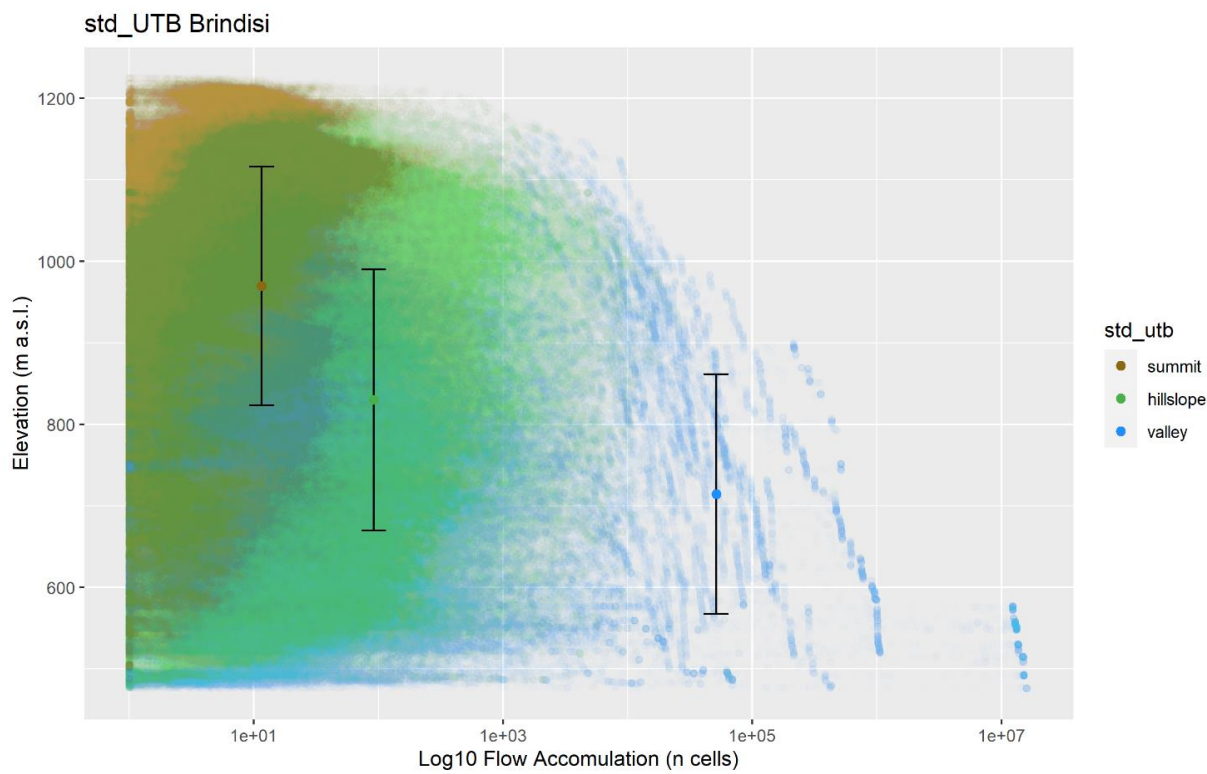


Figura 17 - Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi utb dai dati standardizzati per l'area del comune di Brindisi Montagna.

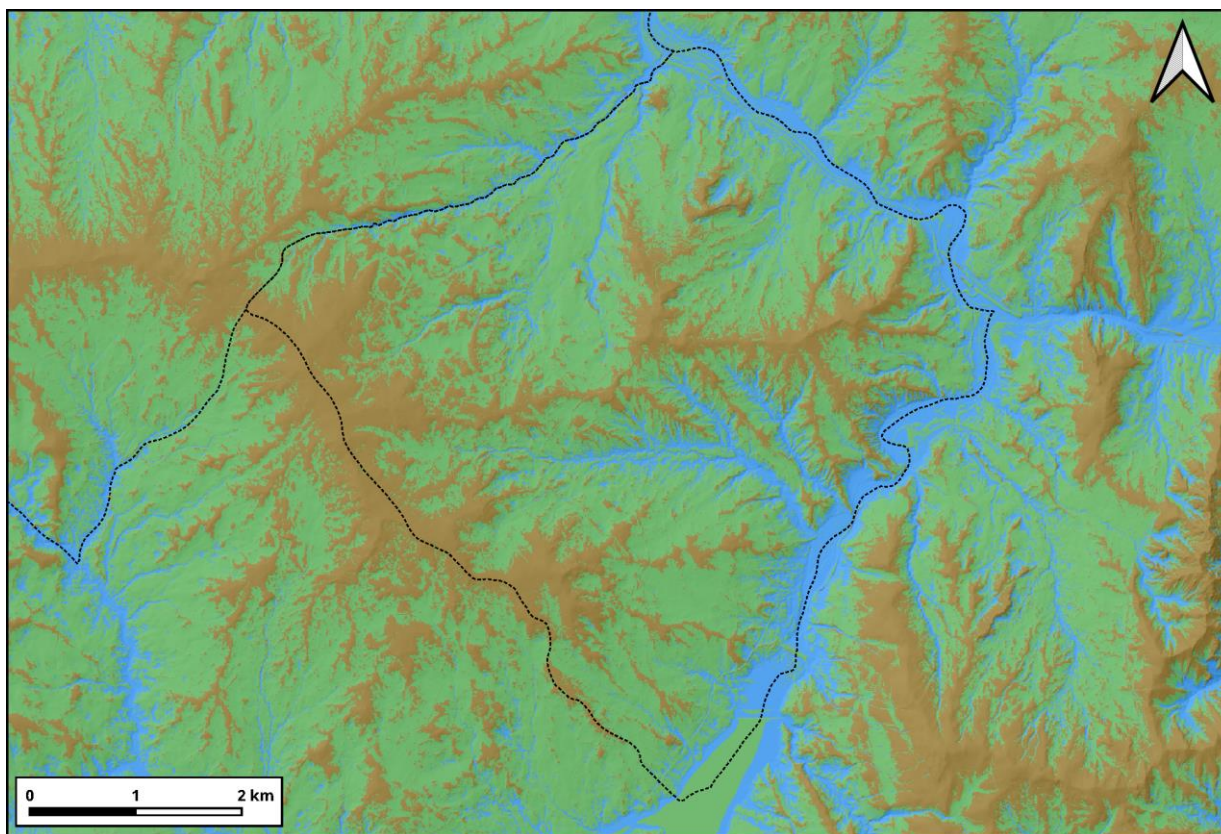


Figura 18 - Unità Topografiche di Base dai dati standardizzati per l'area del comune di Trivigno. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

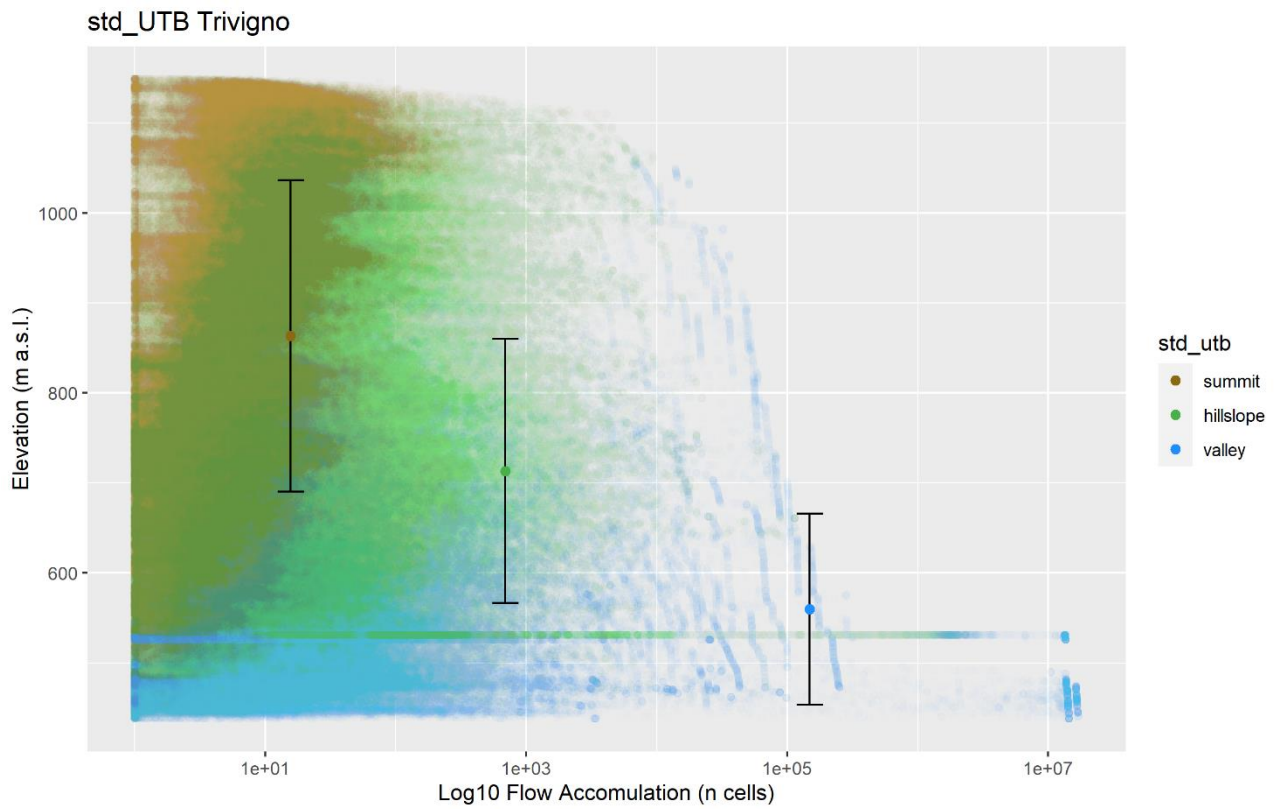


Figura 19 - Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi utb dai dati standardizzati per l'area del comune di Trivigno.

2.2.2 Posizioni di versante

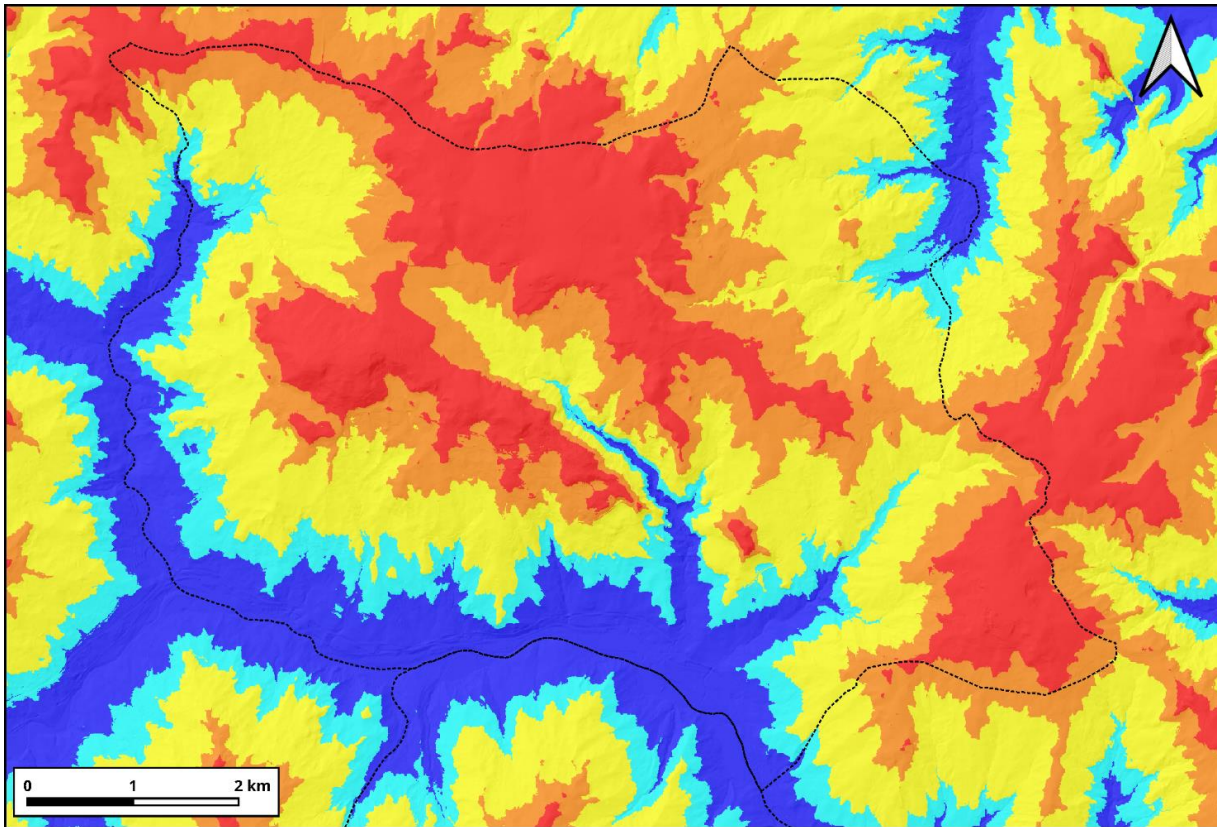


Figura 20 – Posizioni di Versante per l'area del comune di Vaglio. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

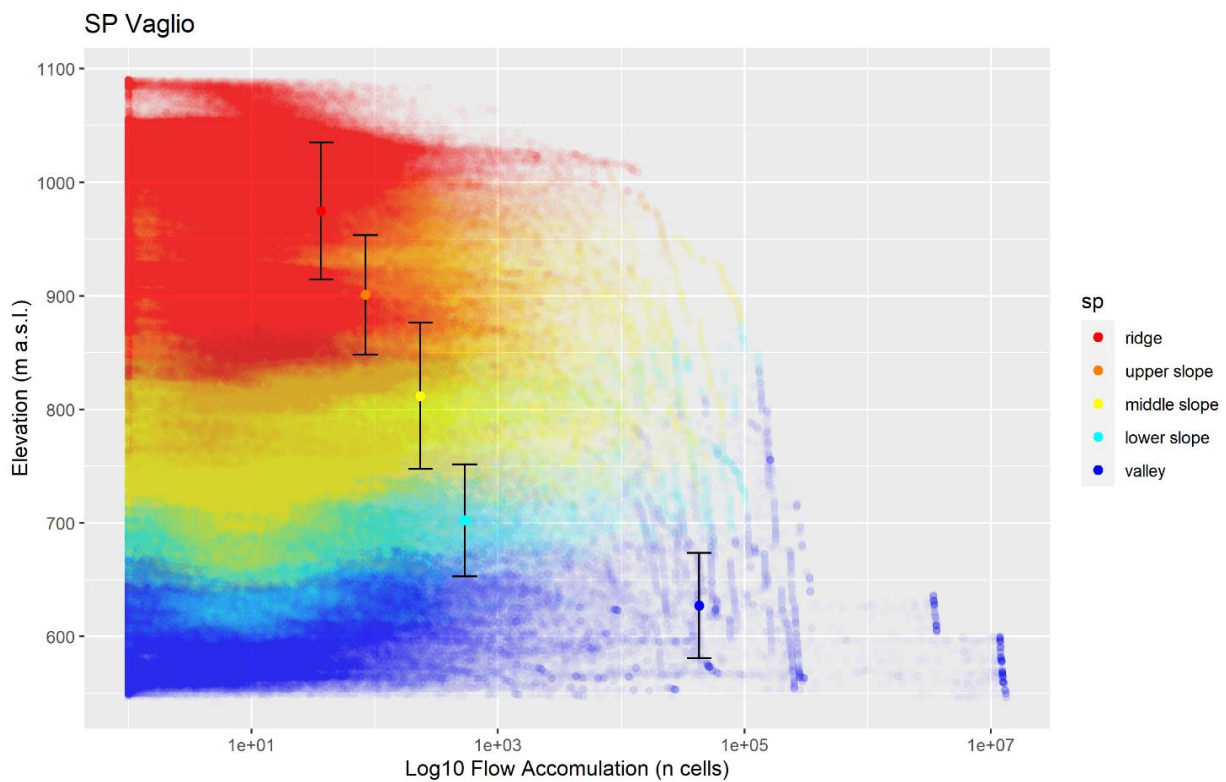


Figura 21 - Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi sp per l'area del comune di Vaglio.

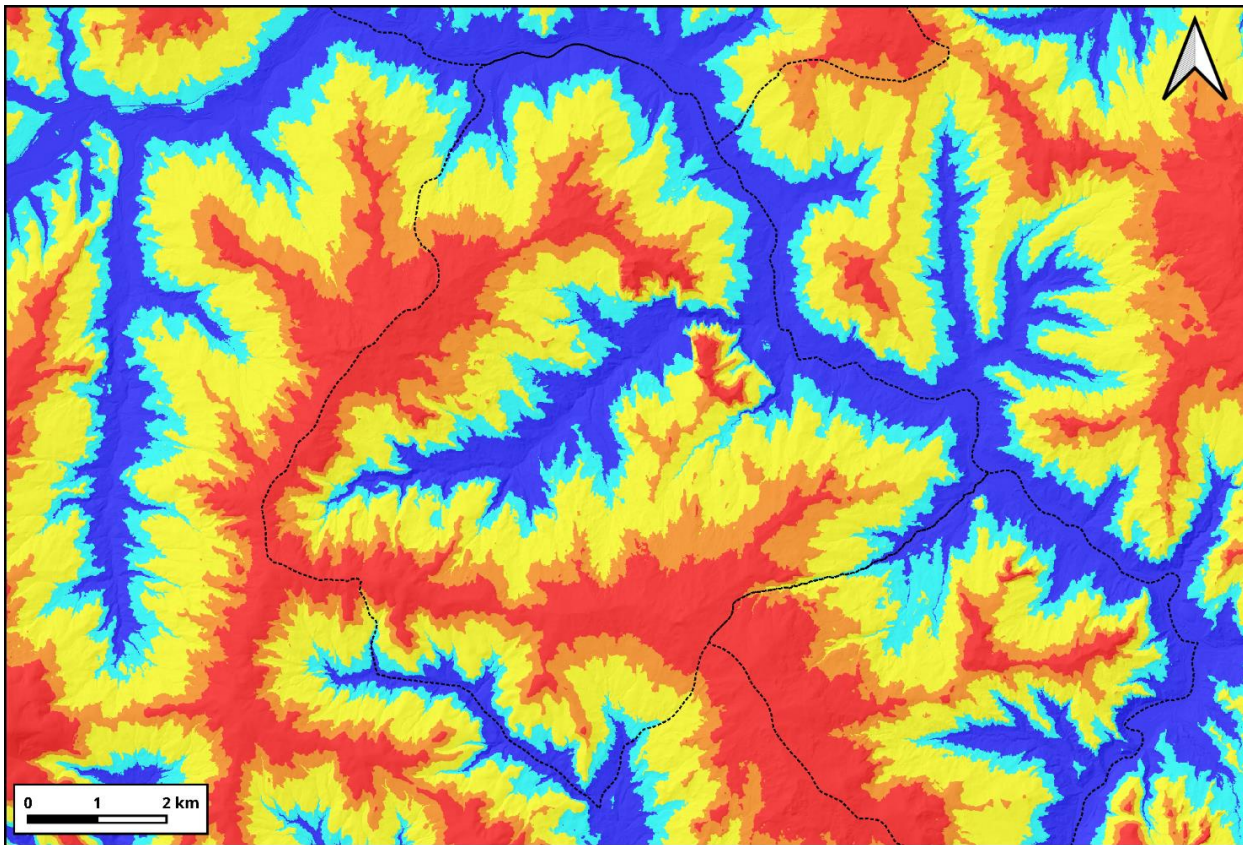


Figura 22 - Posizioni di Versante per l'area del comune di Brindisi Montagna. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

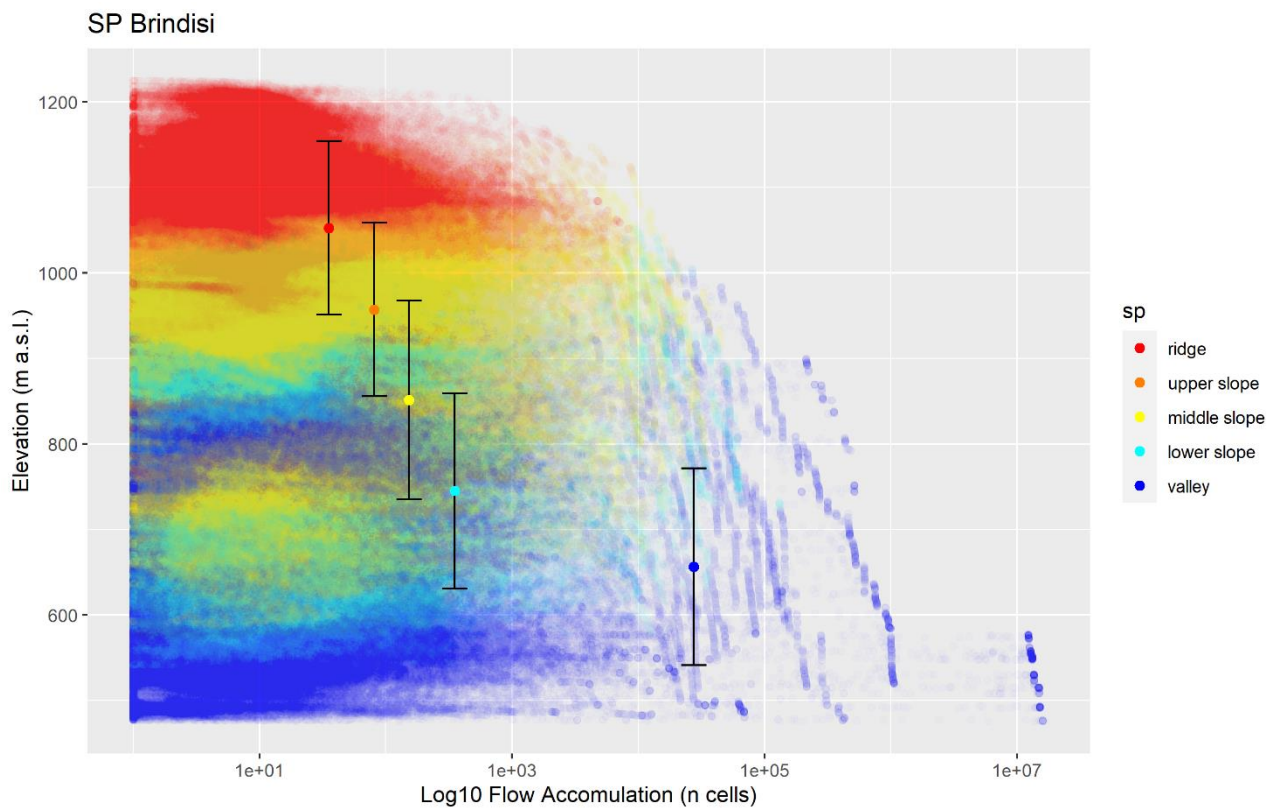


Figura 23 - Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi sp per l'area del comune di Brindisi Montagna.

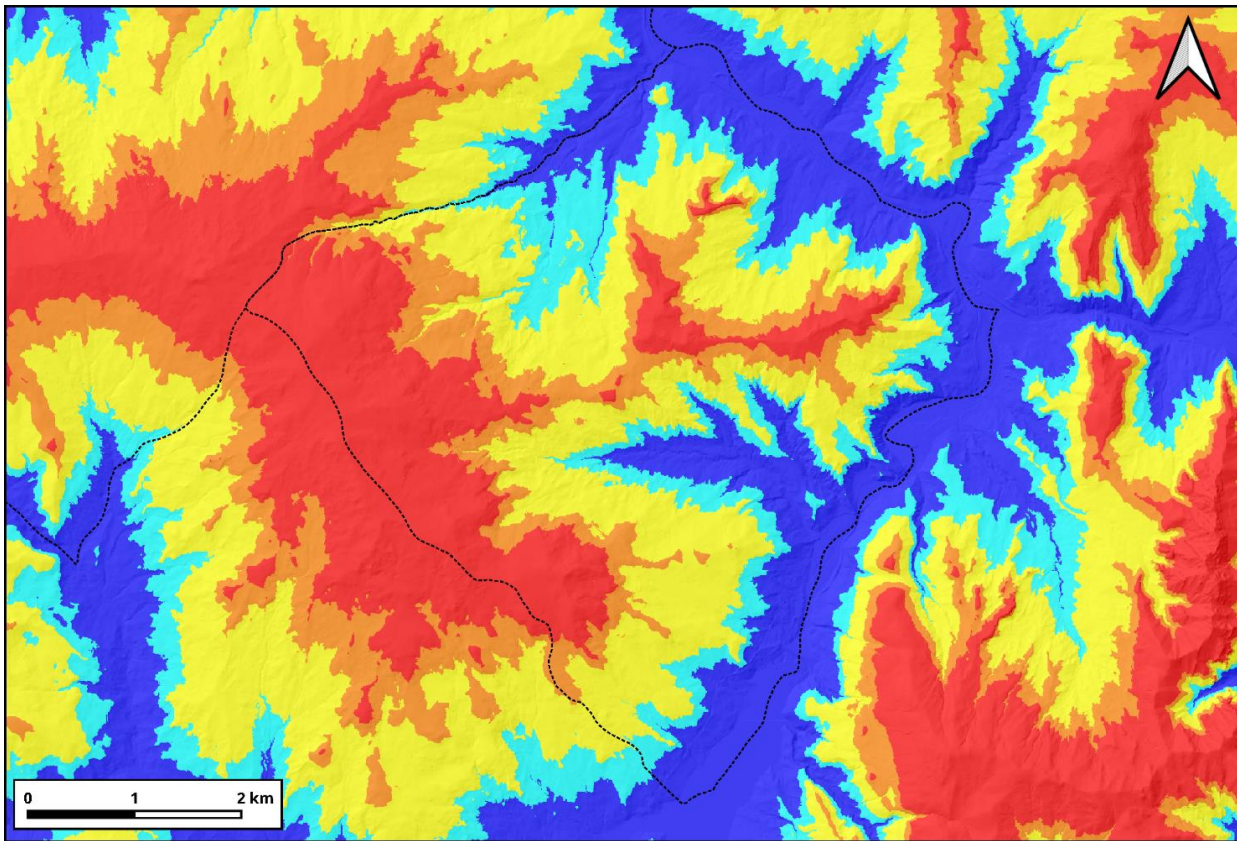


Figura 24 - Posizioni di Versante per l'area del comune di Trivigno. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

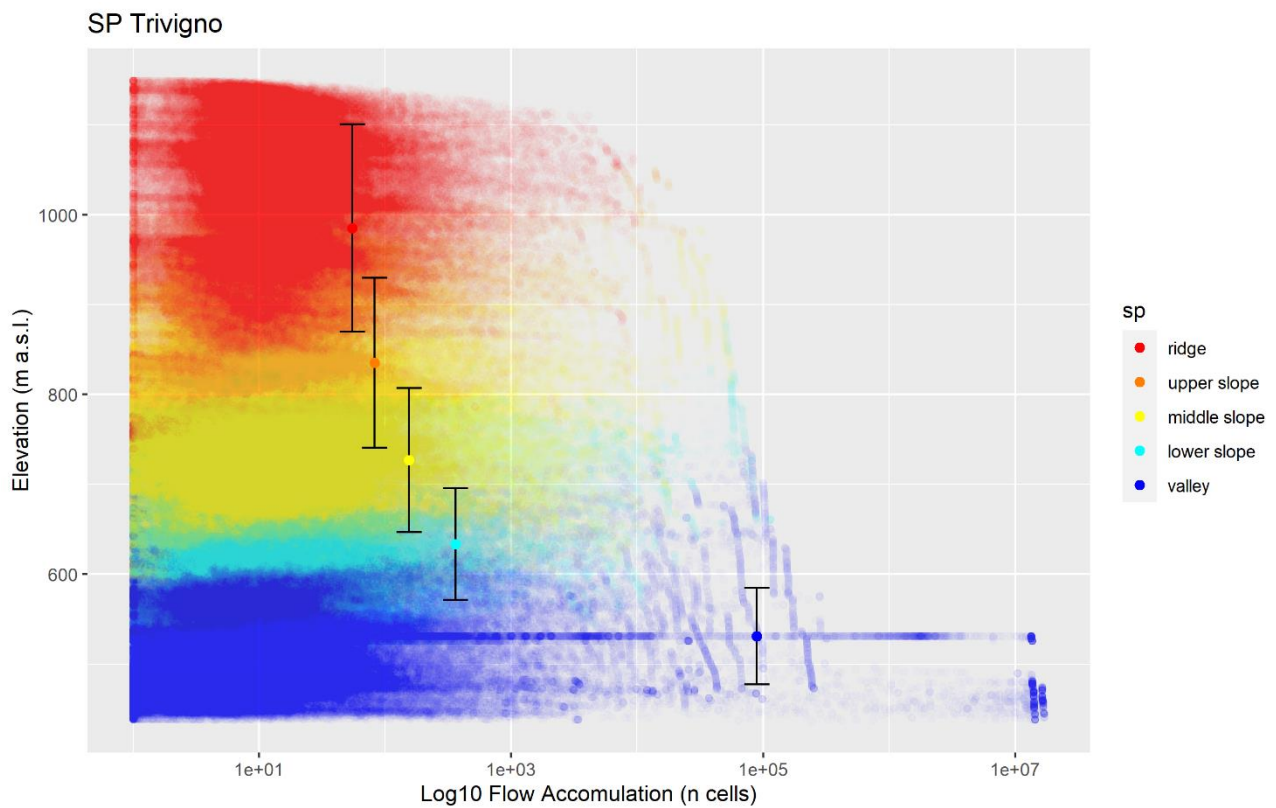


Figura 25 - Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi sp per l'area del comune di Trivigno.

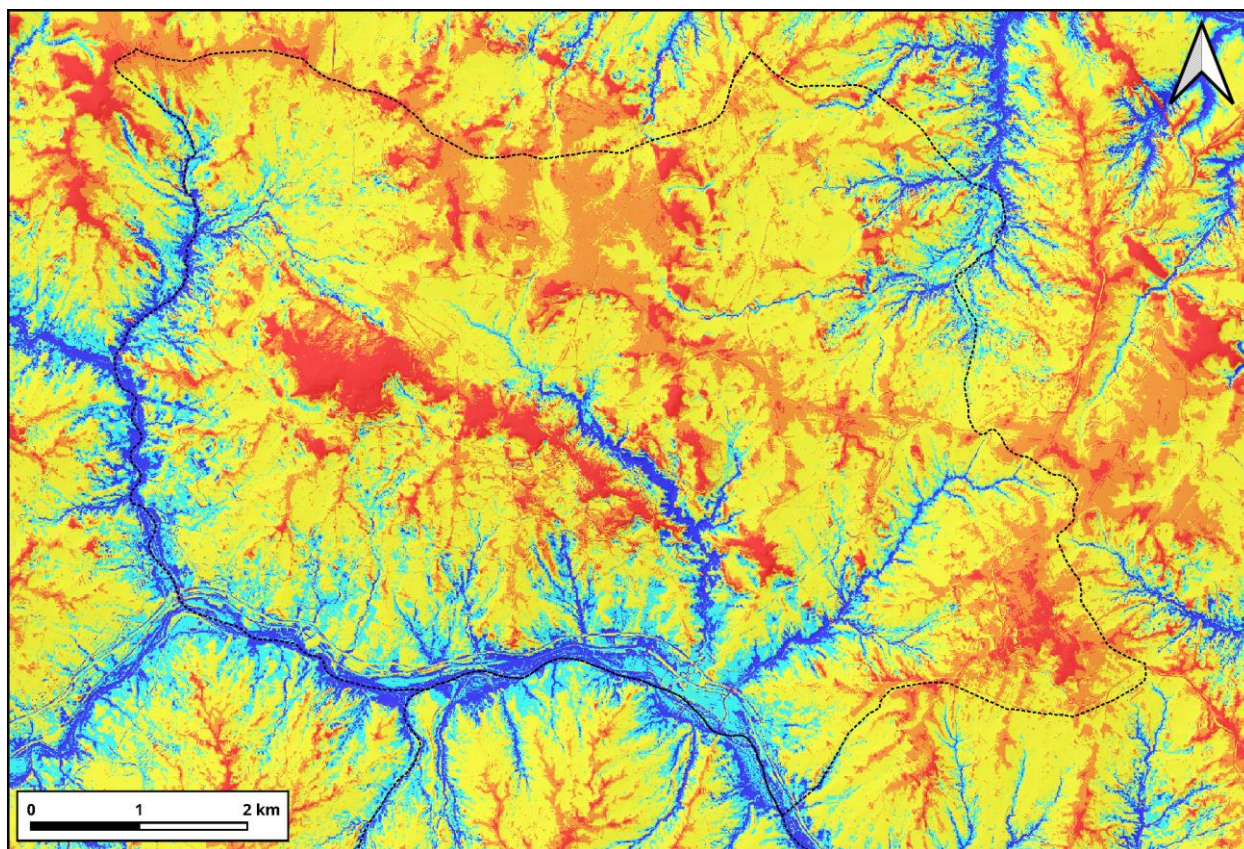


Figura 26 - Posizioni di Versante dai dati standardizzati per l'area del comune di Vaglio. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

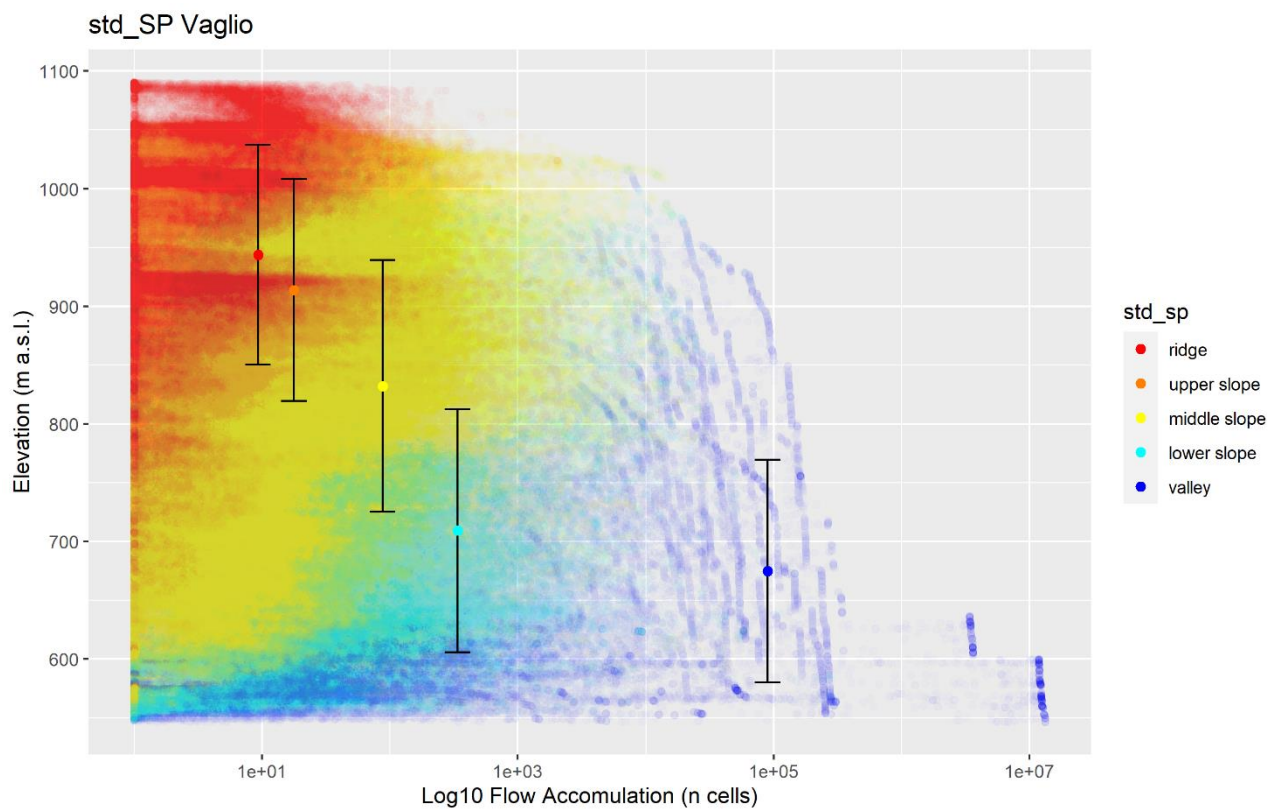


Figura 27 - Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi sp dai dati standardizzati per l'area del comune di Vaglio.

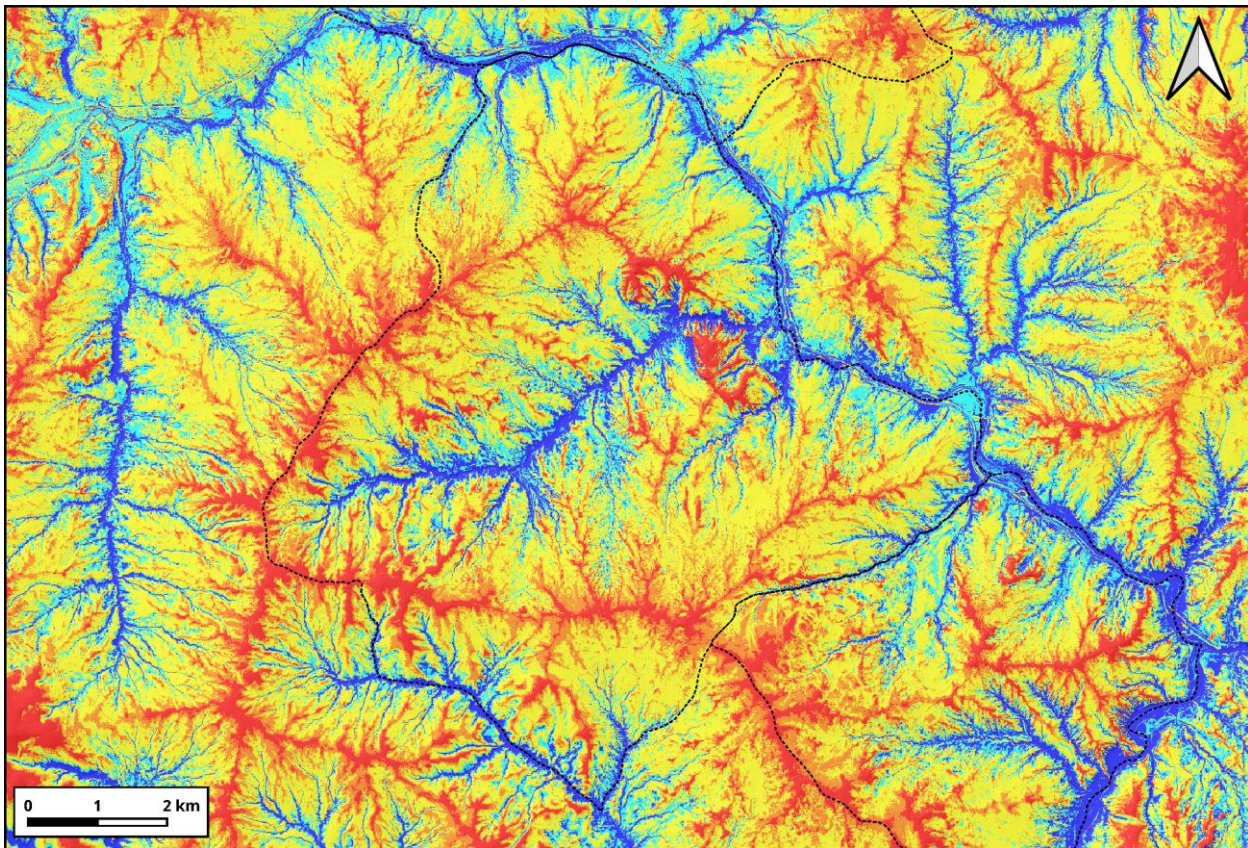


Figura 28 - Posizioni di Versante dai dati standardizzati per l'area del comune di Brindisi Montagna. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

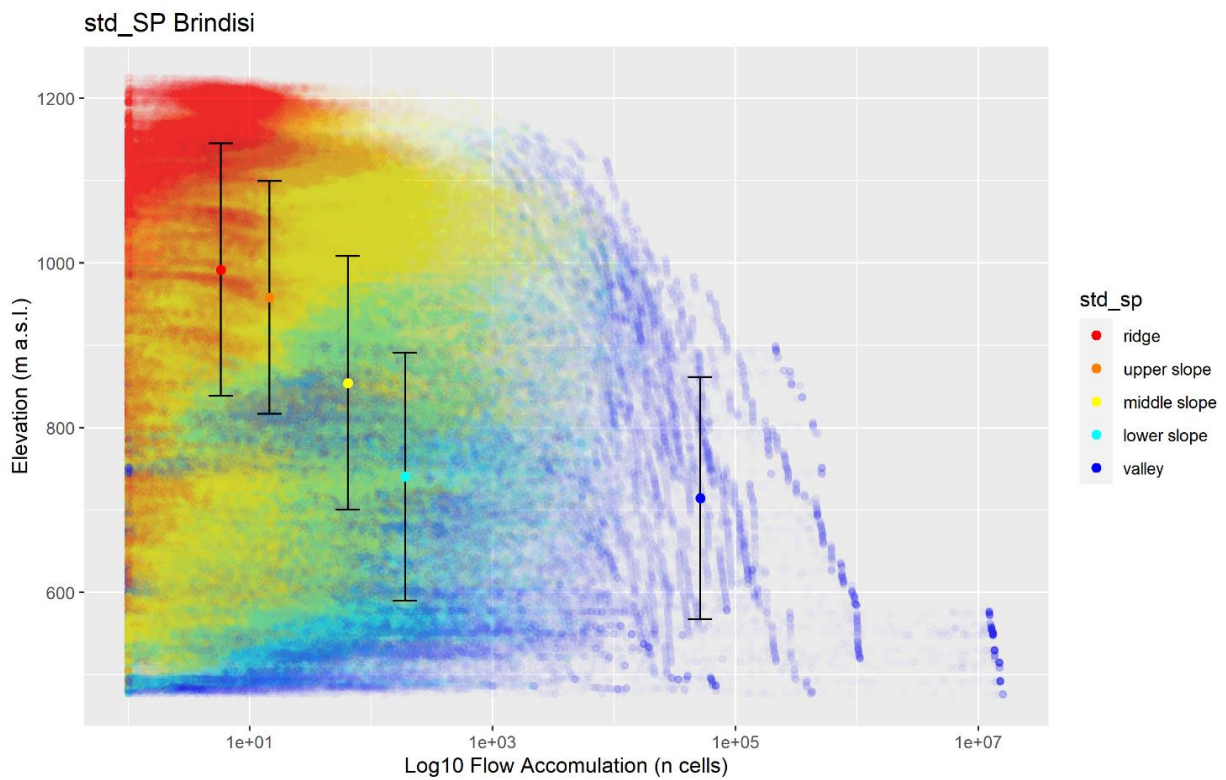


Figura 29 - Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi sp dai dati standardizzati per l'area del comune di Brindisi Montagna.

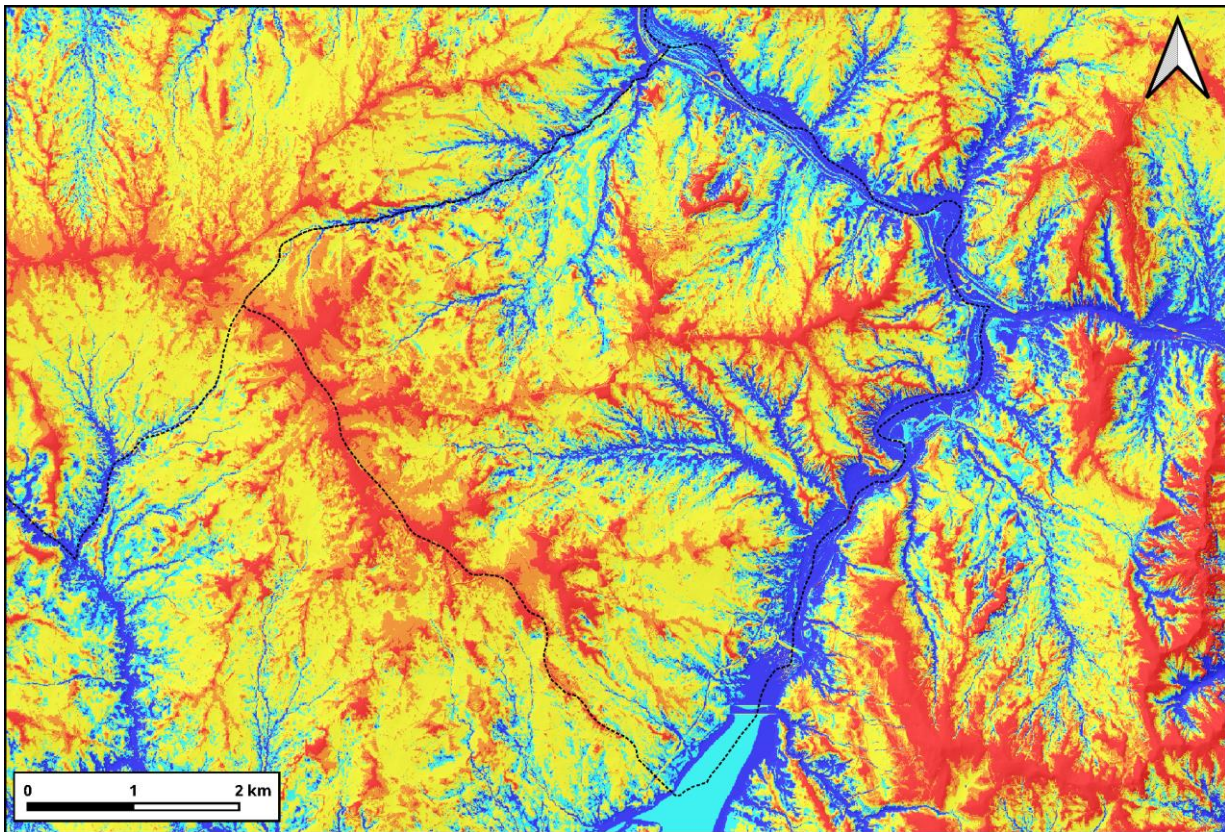


Figura 30 - Posizioni di Versante dai dati standardizzati per l'area del comune di Trivigno. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

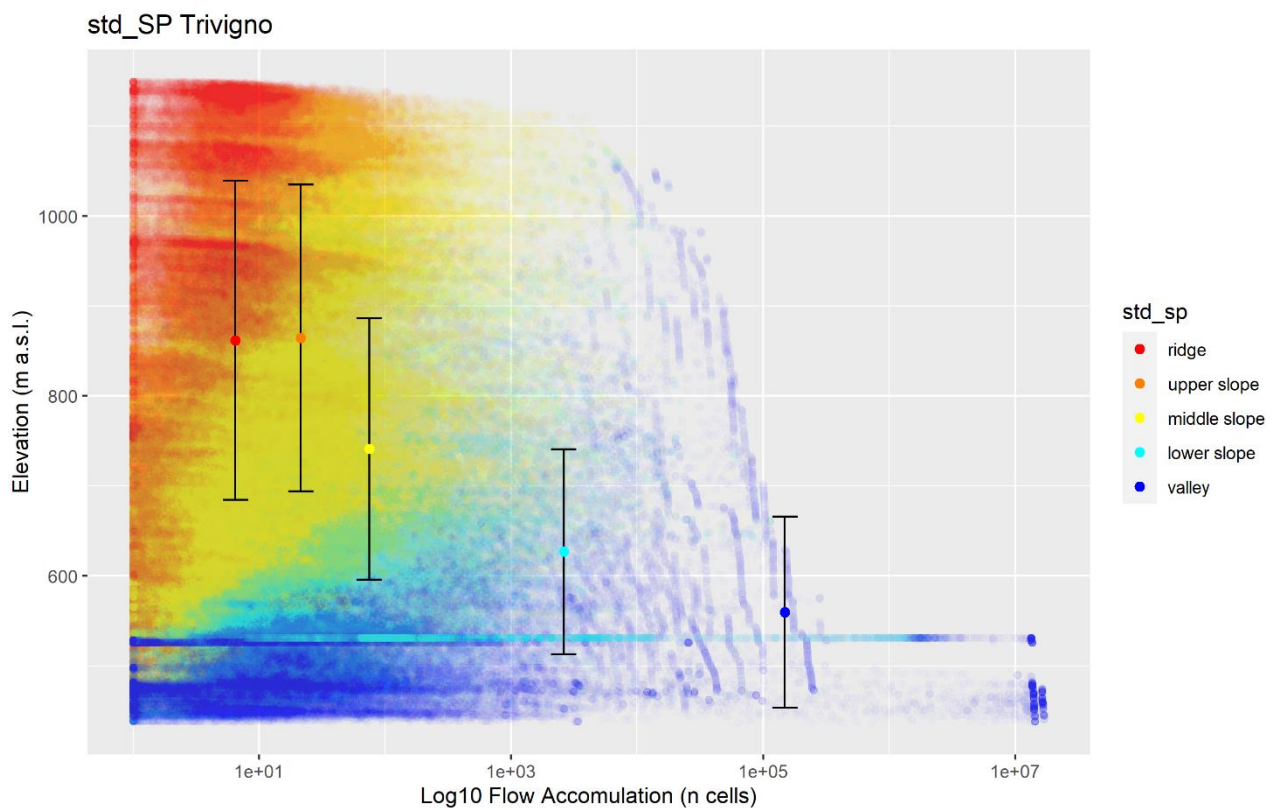


Figura 31 - Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi sp dai dati standardizzati per l'area del comune di Trivigno.

2.2.3 Forme elementari

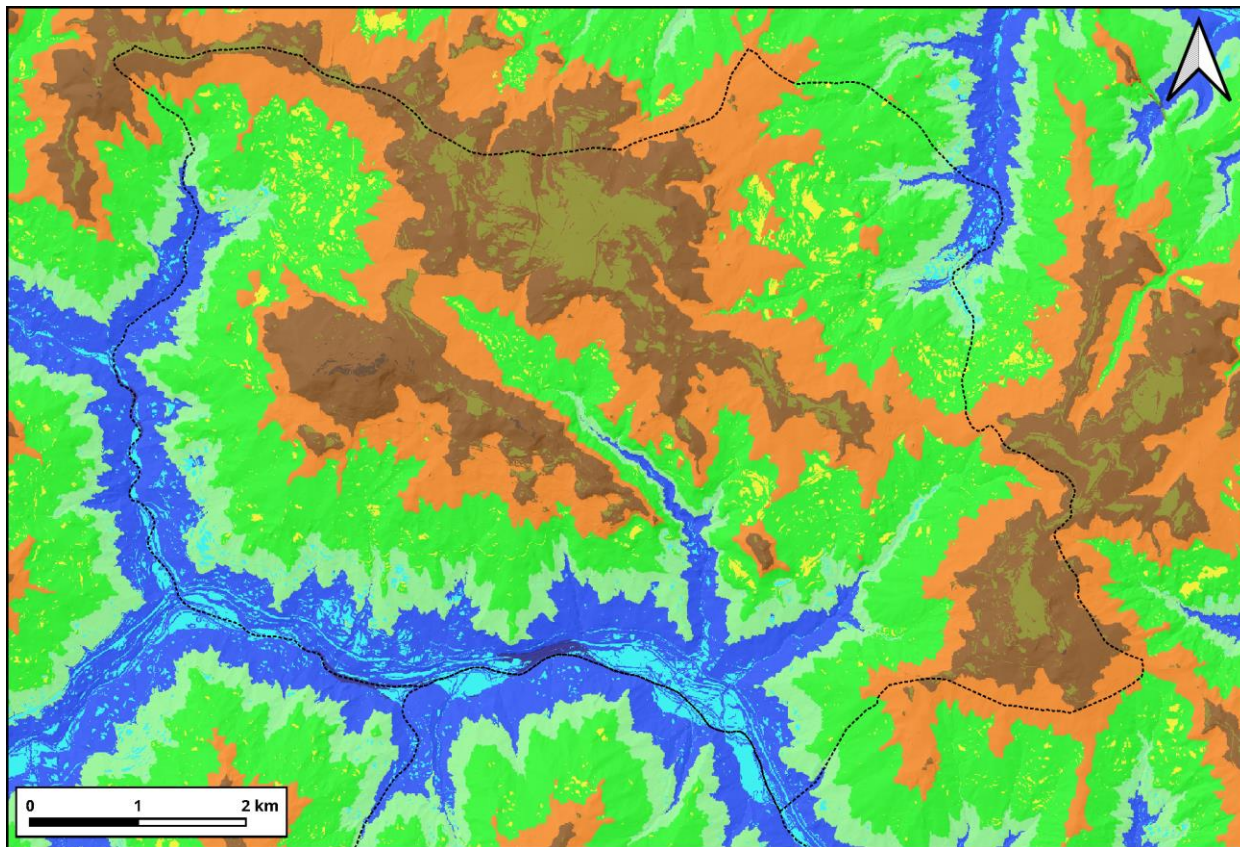


Figura 32 . Forme Elementari per l'area del comune di Vaglio. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

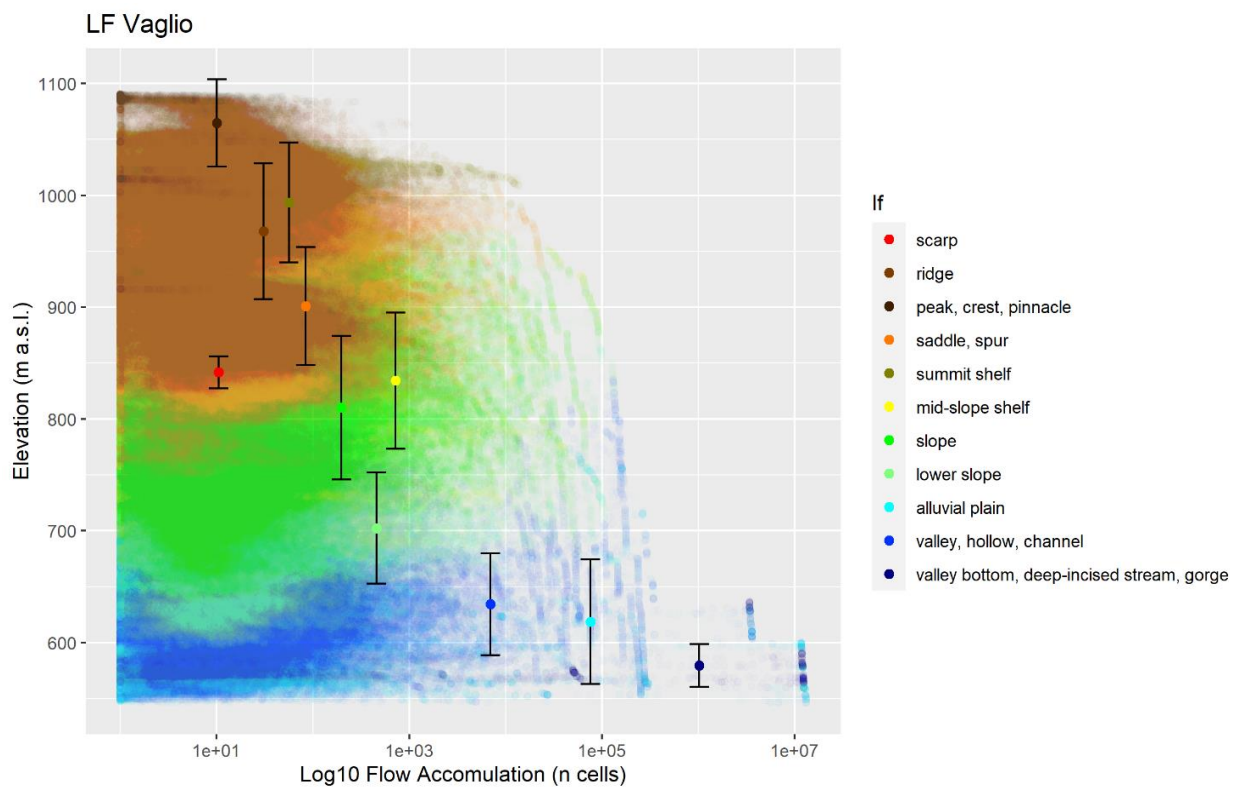


Figura 33 - Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi lf per l'area del comune di Vaglio.

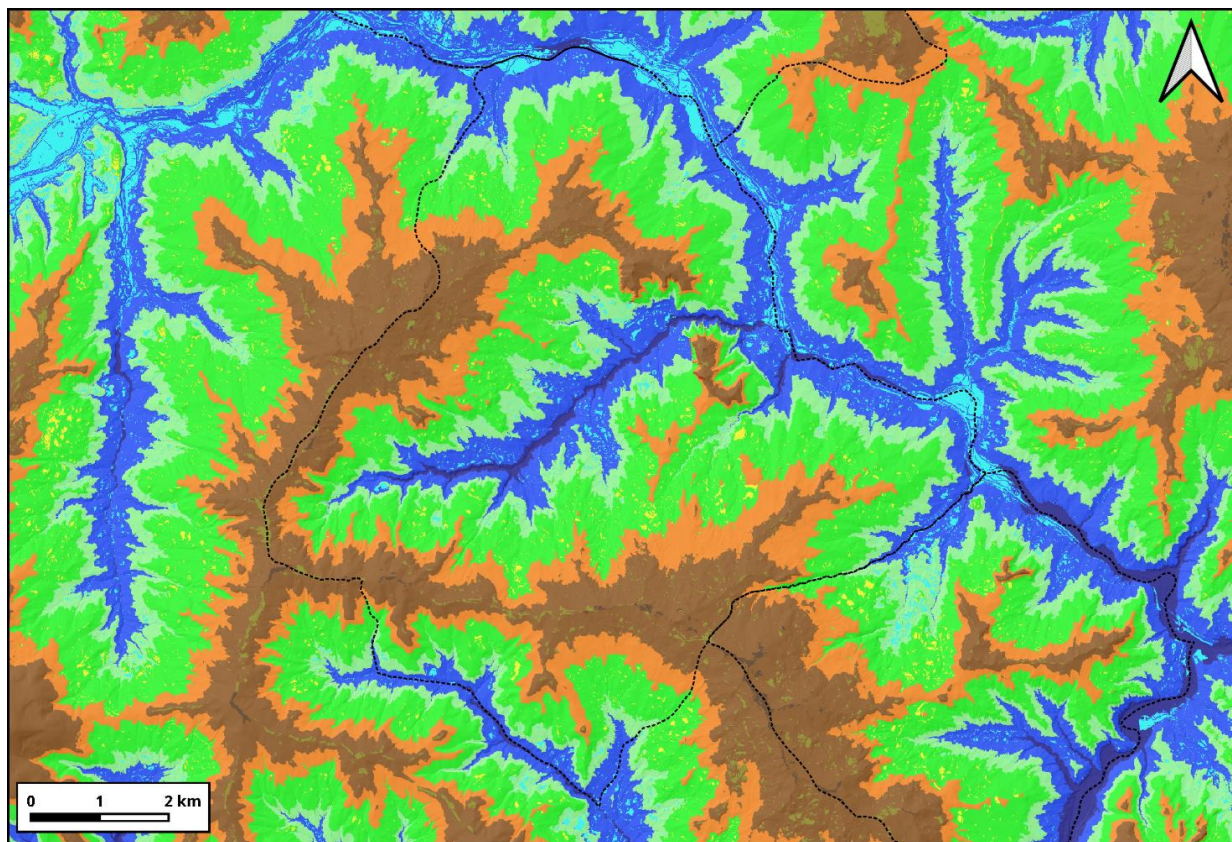


Figura 34 - Forme Elementari per l'area del comune di Brindisi Montagna. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

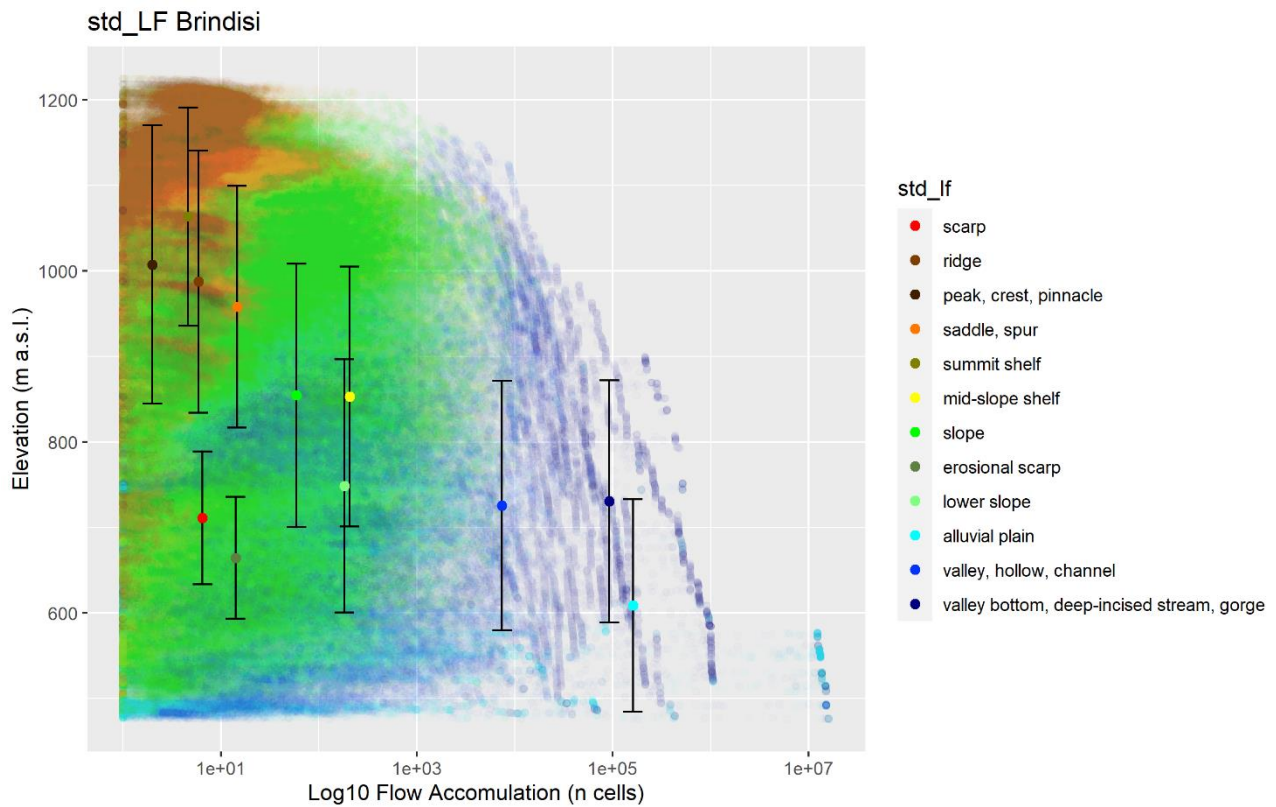


Figura 35 - Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi Lf per l'area del comune di Brindisi Montagna.

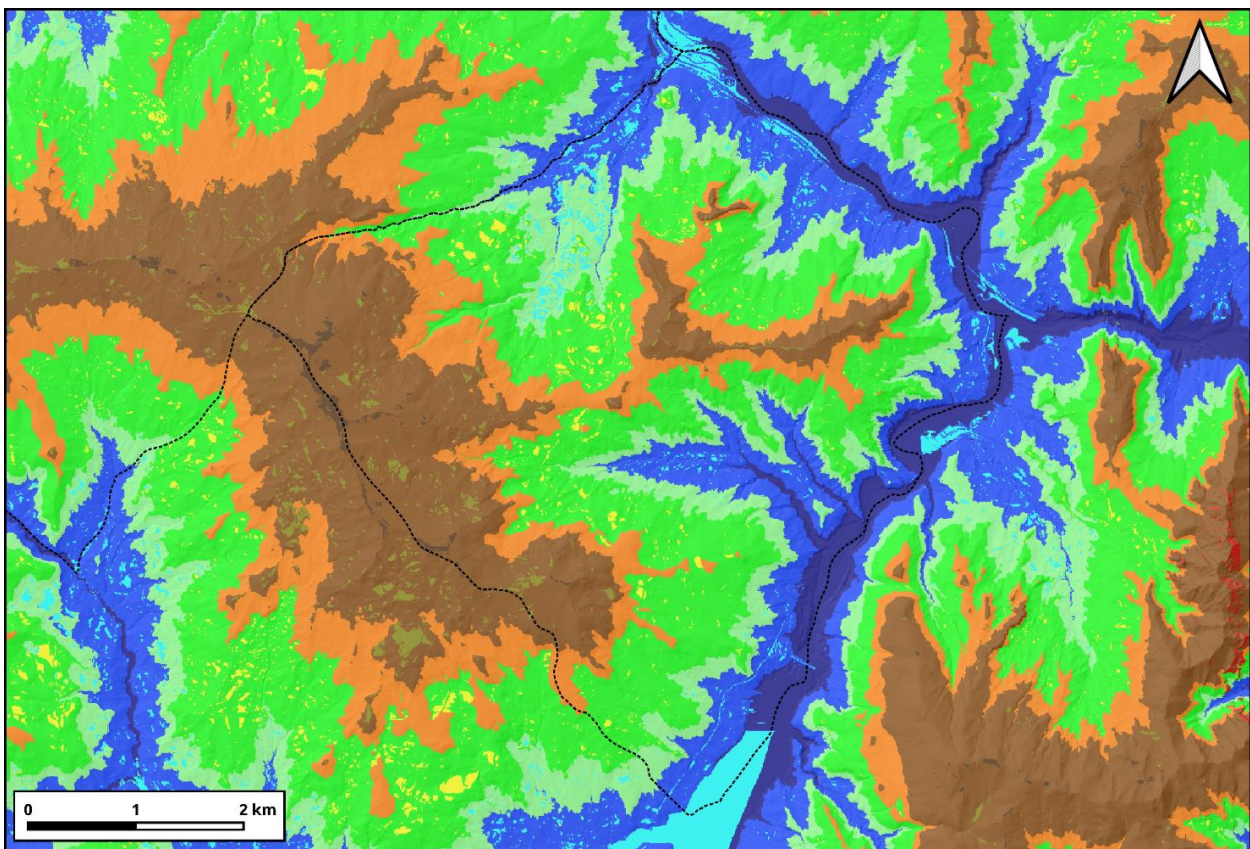


Figura 36 - Forme Elementari per l'area del comune di Trivigno. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

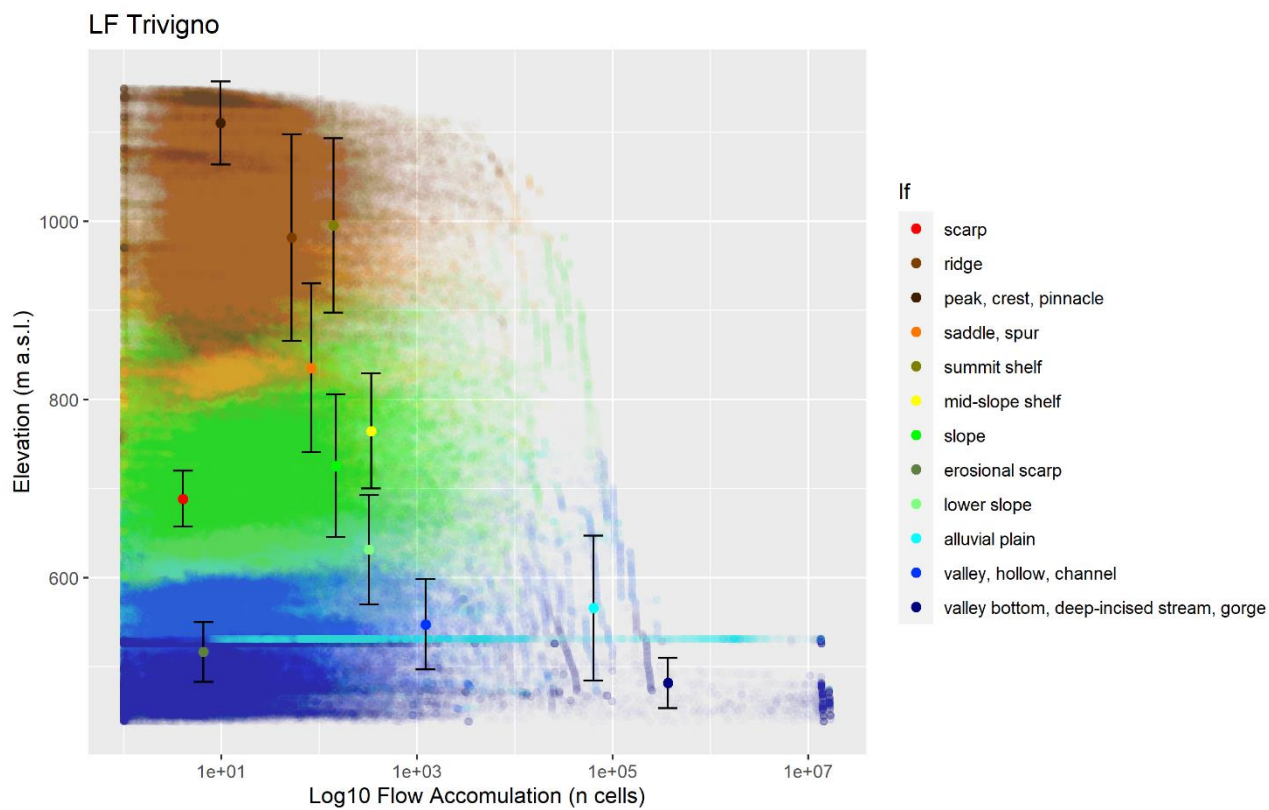


Figura 37 - Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi lf per l'area del comune di Trivigno.

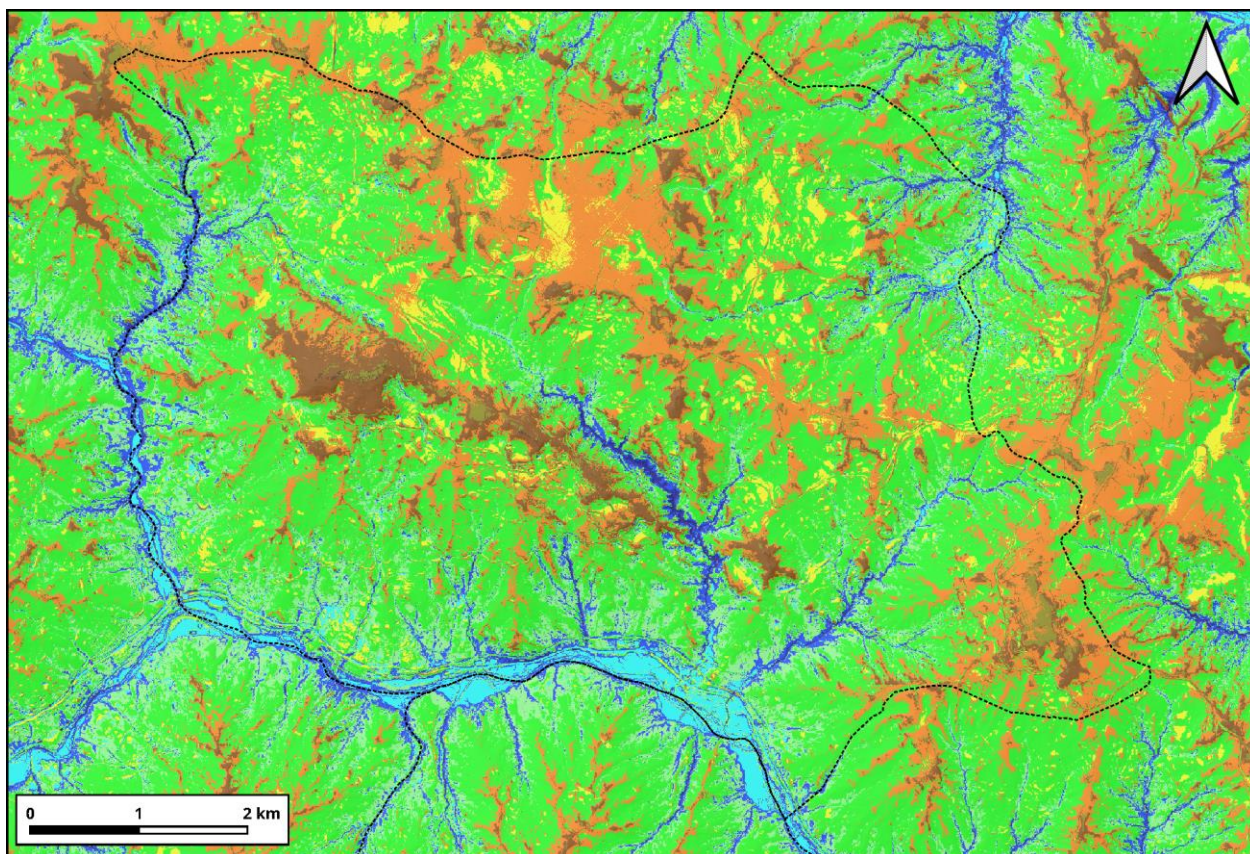


Figura 38 - Forme Elementari dai dati standardizzati per l'area del comune di Vaglio. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

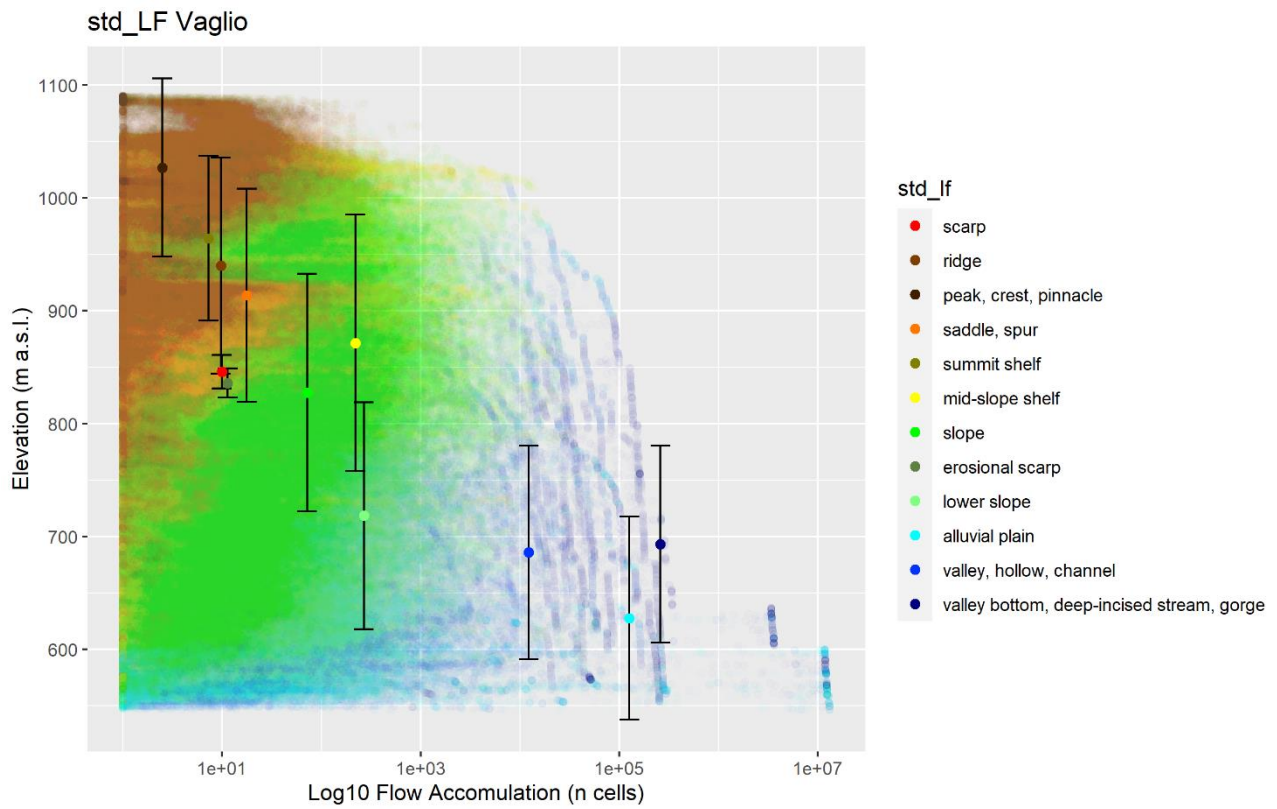


Figura 39 - Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi Lf dai dati standardizzati per l'area del comune di Vaglio.

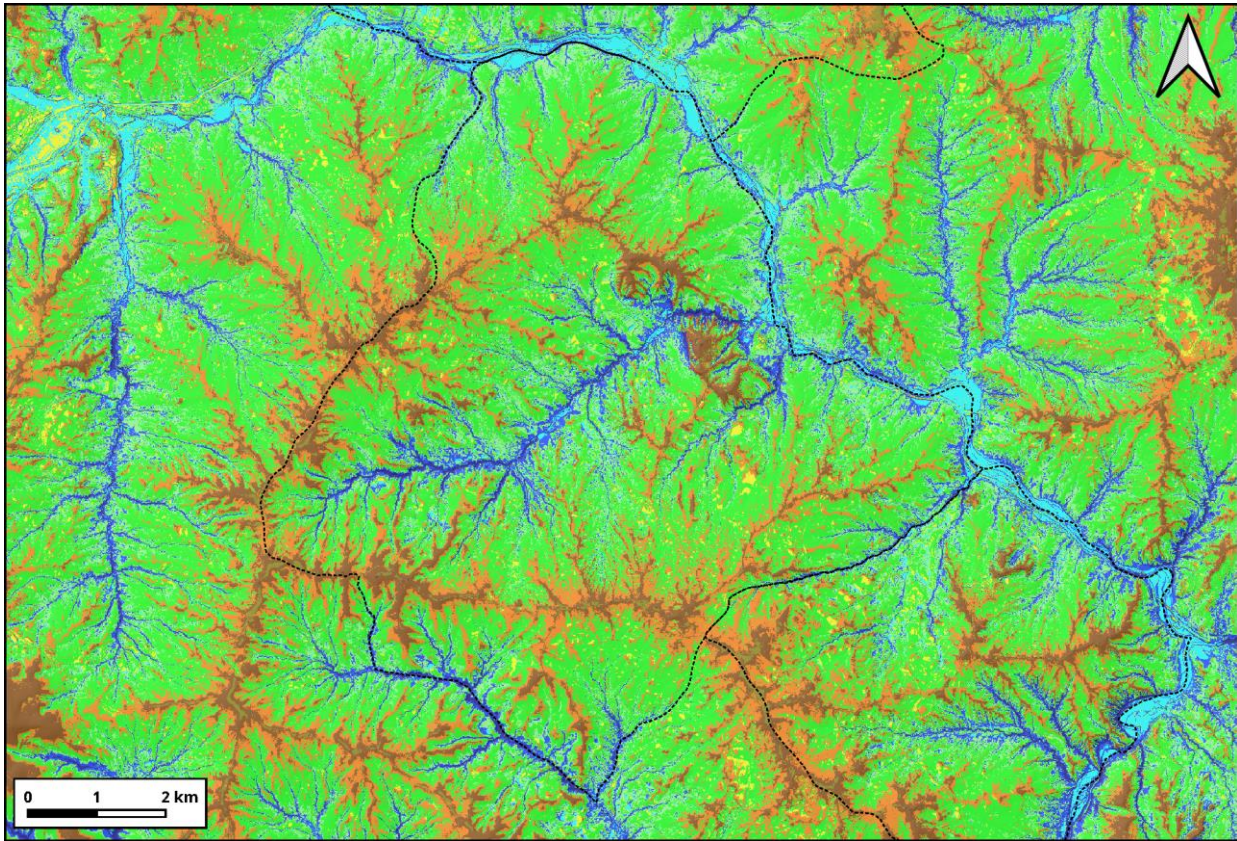


Figura 40 - Forme Elementari dai dati standardizzati per l'area del comune di Brindisi Montagna. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

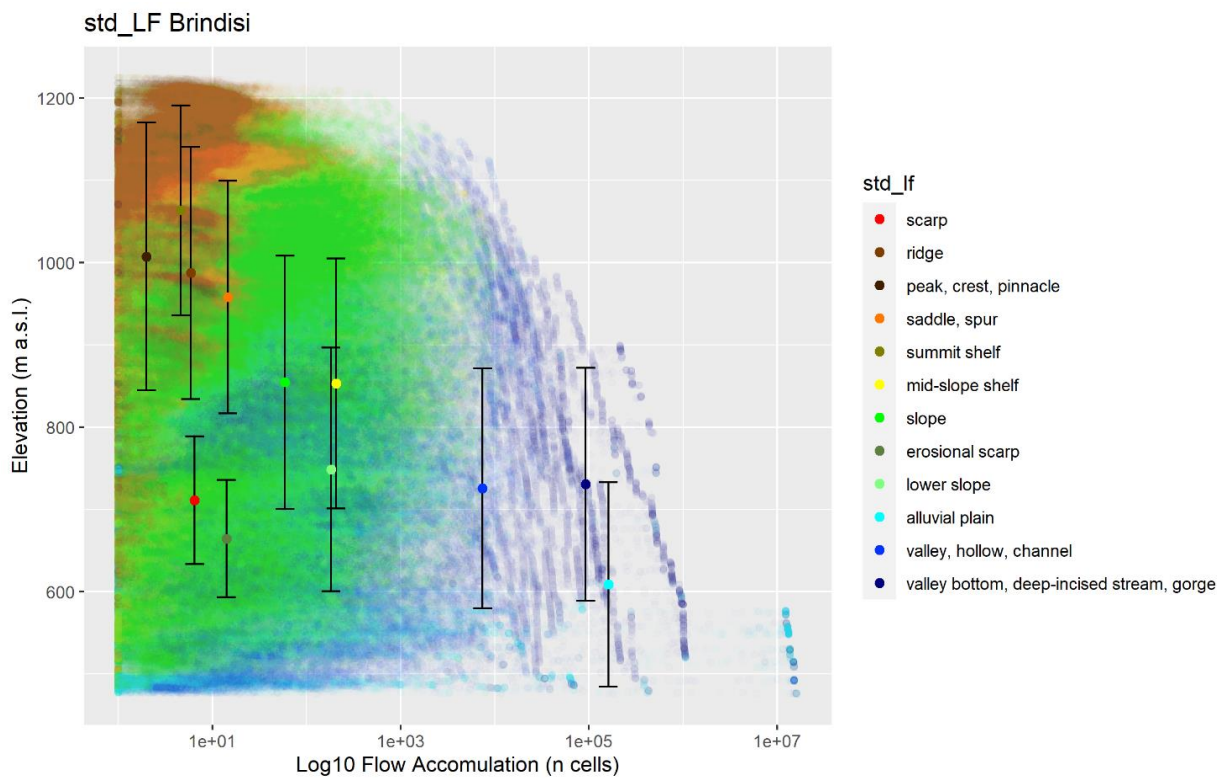


Figura 41 - Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi lf dai dati standardizzati per l'area del comune di Brindisi Montagna.

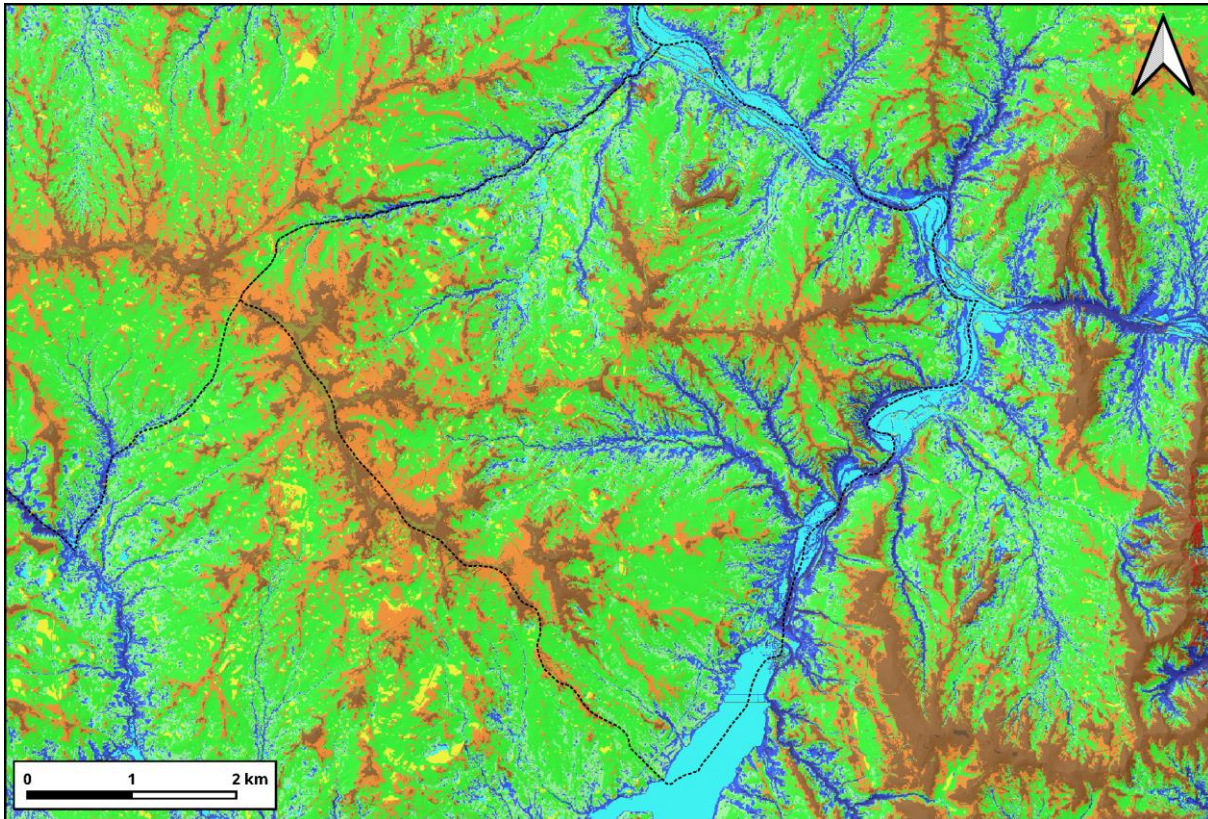


Figura 42 - Forme Elementari dai dati standardizzati per l'area del comune di Trivigno. Per la legenda fare riferimento alla Tabella 1.

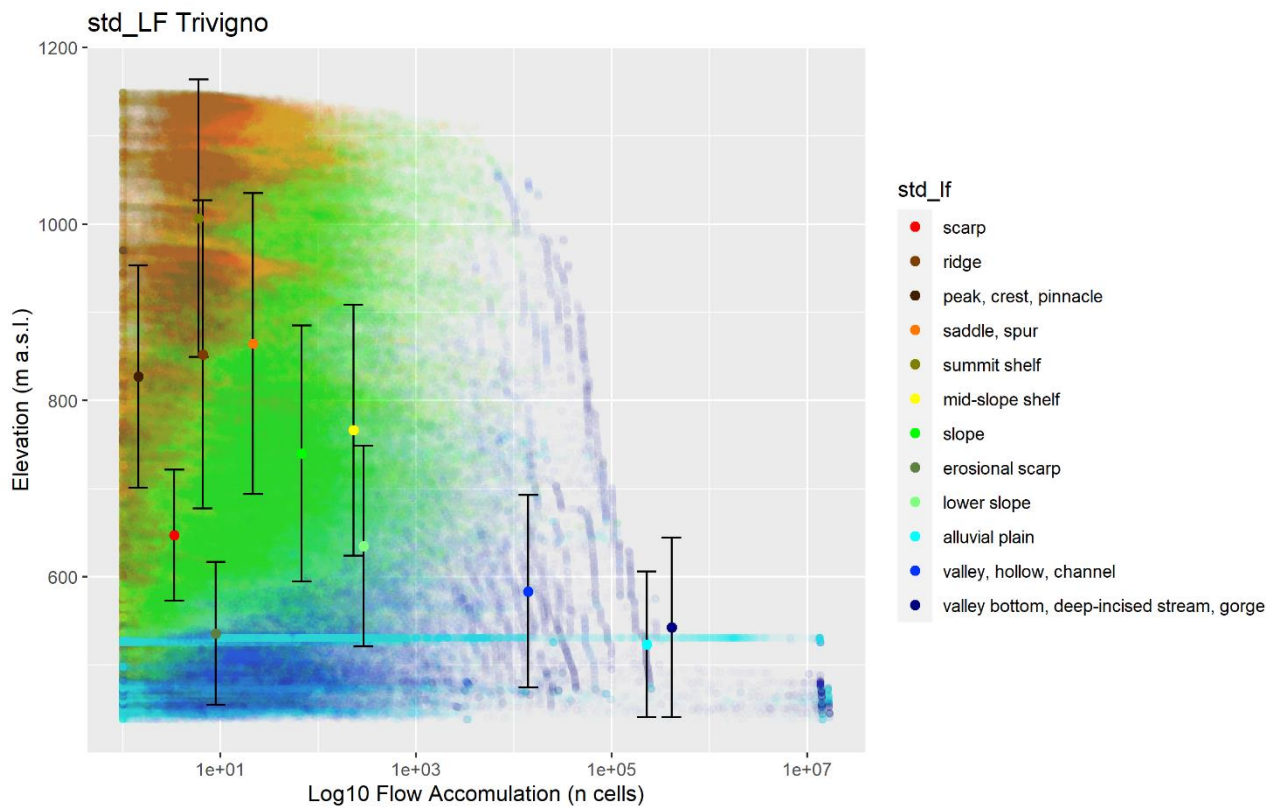


Figura 43 - Distribuzione fluvio-altimetrica delle classi Lf dai dati standardizzati per l'area del comune di Trivigno.

2.3 Domini di processo superficiale

Graficare la Pendenza in funzione dell'Area drenata è una procedura da tempo utilizzata per la stima della tipologia dei processi erosivi agenti sui versanti, incluse le frane (Montgomery & Foufoula-Georgiou, 1993; Booth & alii, 2013; Tseng & alii, 2015; Vergari & alii, 2019; Dramis & alii, 2022).

Sulla base di osservazioni su casi pregressi (Regione Campania, 2021), il dominio Pendenza-Area drenata è stato suddiviso in 6 regioni identificative di diverse tipologie di fenomeni, in particolare, rispetto a quanto riportato in letteratura, le regioni I e III sono state ulteriormente suddivise sulla base delle osservazioni effettuate durante le attività di rilevamento (Figura 44):

- **Ia**, Processi diffusivi - areali su crinale: corrisponde al primo tratto della curva Area/Pendenza, caratterizzata da un iniziale aumento delle pendenze con l'aumentare dell'area drenata a monte fino al picco della funzione;
- **Ib**, Processi diffusivi – areali su versanti sommitali: superato il picco della funzione, la tendenza precedente si inverte e la pendenza comincia a decrescere con l'aumentare dell'area drenata;
- **II**, Processi erosivi – concentrati: la prima soglia è individuata in corrispondenza del primo centro di curvatura della funzione Pendenza-Area, corrispondente al primo massimo-minimo della derivata seconda della pendenza;
- **IIIa**, Processi erosivi – transizionali: la seconda soglia viene individuata al primo punto di flesso della funzione Pendenza, ovvero in corrispondenza del primo zero nella derivata seconda;
- **IIIb**, Processi erosivo-deposizionali – incanalati: la terza soglia viene individuata in corrispondenza del primo cambio di pendenza della funzione individuato dal valore zero della derivata prima;
- **IV**, Processi fluviali: l'ultima soglia viene posta in corrispondenza del tratto terminale della curva che sarà caratterizzato da un andamento sempre decrescente, vie-ne quindi individuato in corrispondenza dell'ultimo punto di flesso della funzione.

A seconda della funzione che si va ad analizzare, non sempre è possibile individuare distintamente tutte e quattro le soglie, può infatti capitare che in alcuni casi un particolare dominio non sia affatto presente.

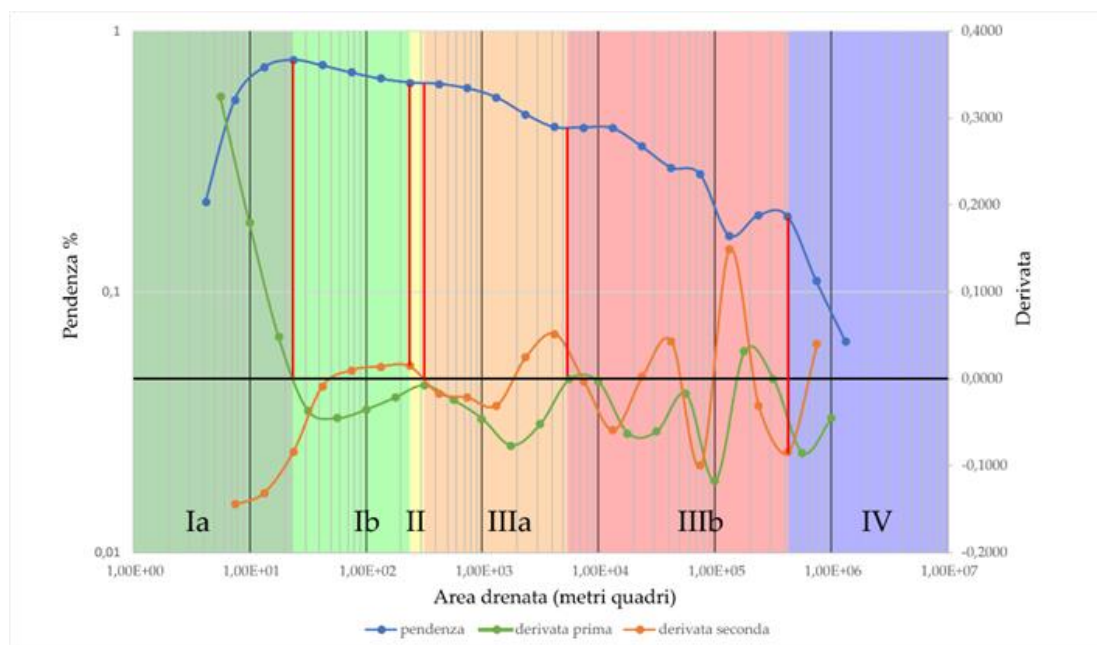


Figura 44 – Esempio di grafico Pendenza – Area drenata e relative soglie (Dramis et alii, 2022).

Anche per questa tipologia di analisi è stato utilizzato un approccio gerarchico per la definizione dell'areale da utilizzare come riferimento per la costruzione del grafico. Solitamente, il bacino idrografico è utilizzato come unità di riferimento ma, anche sulla base di studi precedenti (Regione Campania, 2021), si è scelto di testare il metodo utilizzando diversi criteri per la scelta dell'unità di riferimento. In particolare, oltre ai bacini idrografici, sono state delimitate aree con caratteristiche geologiche e geomorfologiche omogenee (geo-morfoblocchi), e un'area arbitraria di geometria rettangolare che racchiudesse i territori dei tre comuni in esame (area vasta) (Figura 45).

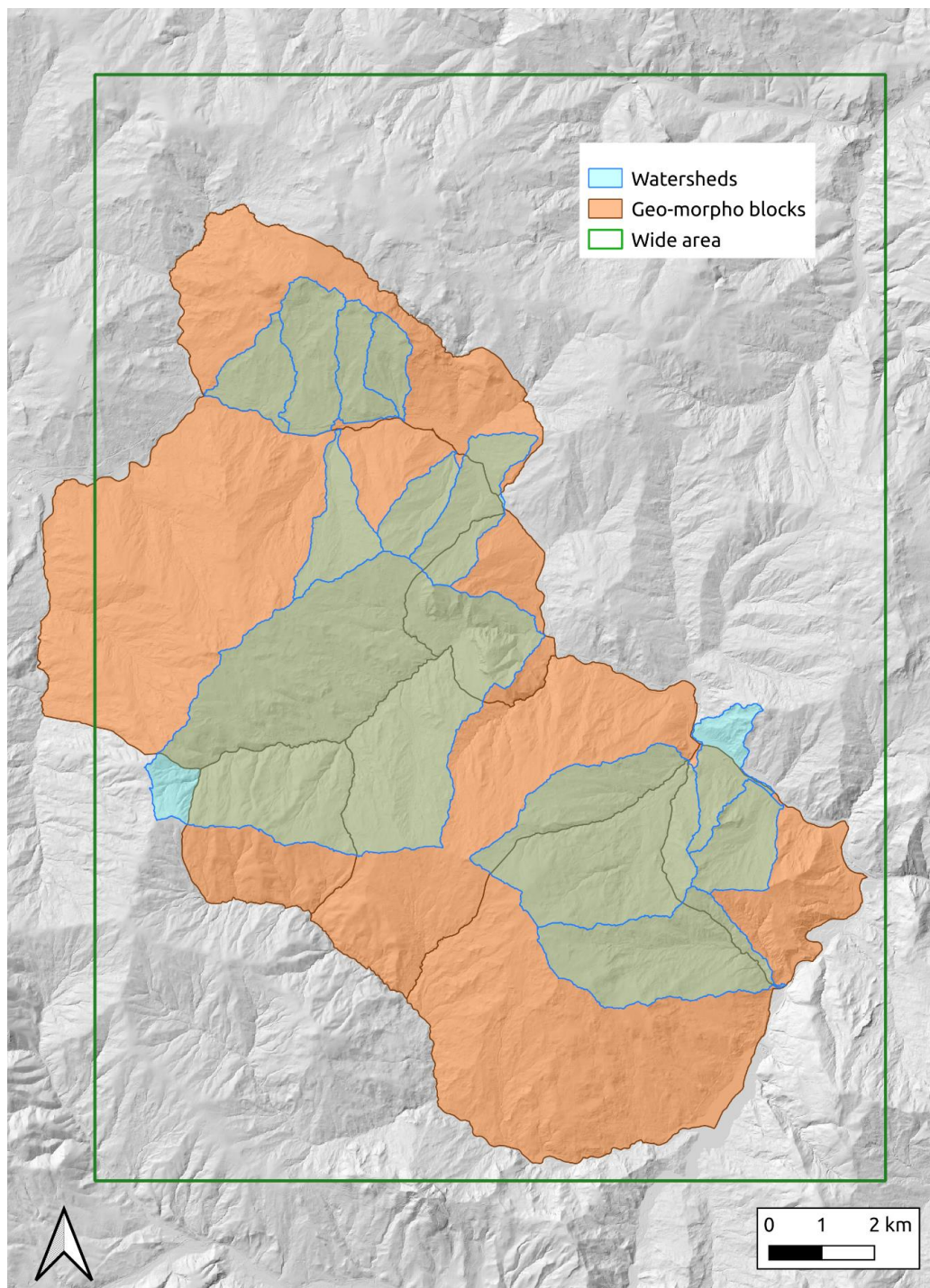


Figura 45 – Unità prese in esame per la costruzione dei grafici pendenza – area drenata.

2.3.1 Area vasta

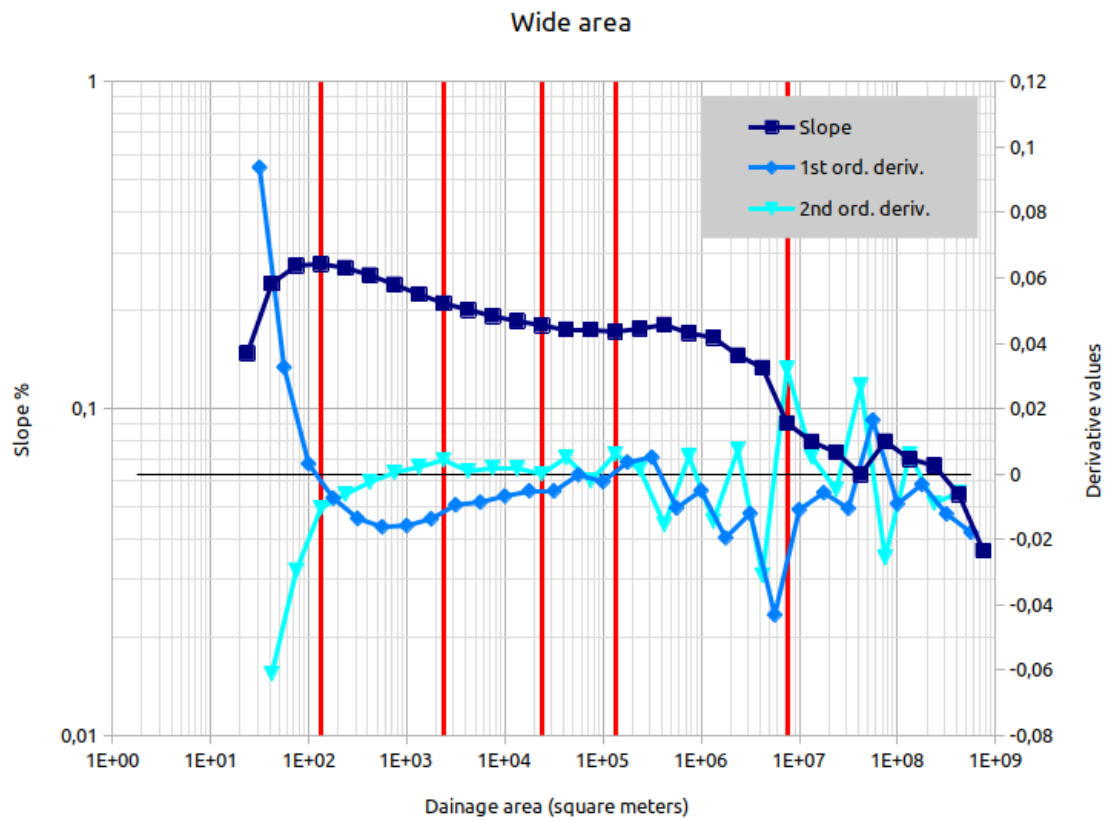


Figura 46 - Grafico pendenza - area drenata relativo all'area vasta.

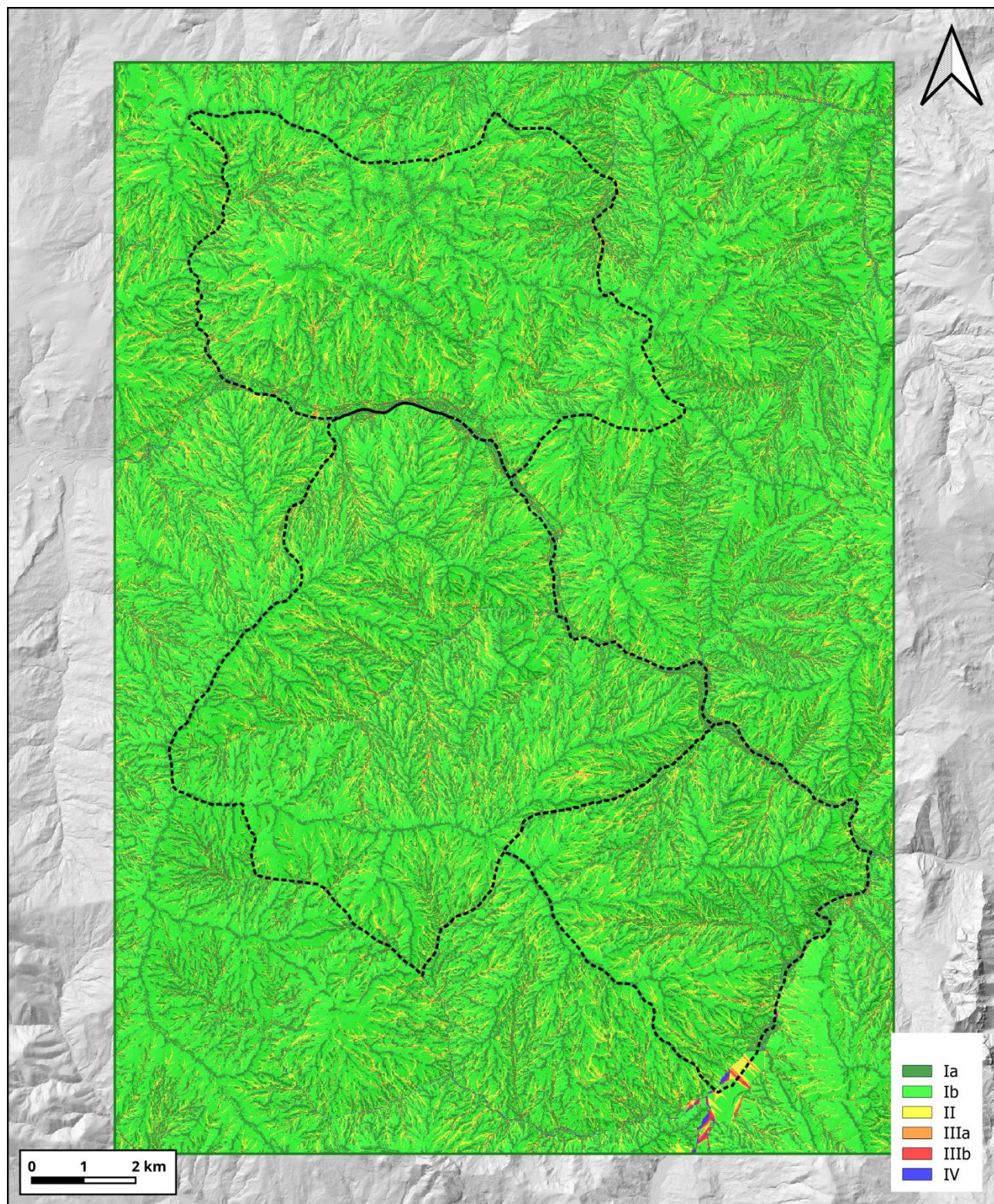


Figura 47 - Carta dei domini di processo relativi all'area vasta.

Morfoblocchi

Per l'area in esame sono stati individuati in totale 7 areali aventi caratteristiche geologiche e geomorfologiche omogenee. In particolare:

1. Serra S. Bernardo – Vaglio SW, Sinistra Basento, prevalenza in affioramenti dell'unità tettonica Groppa d'Anzi;
2. Monte Grosso, Destra Basento, prevalenza in affioramenti dell'unità tettonica Groppa d'Anzi;
3. Brindisi, Monte Romito, prevalenza in affioramento del Flysch di Gorgoglione;
4. Serra la Neviera, prevalenza in affioramento delle Tufiti di Tusa;
5. Monte Cute N, prevalenza in affioramento di Flysch Galestrino e Argille Variegate;
6. Monte Cute S, prevalenza in affioramento della Formazione di Monte Sant'Arcangelo;
7. Colle di Trivigno, prevalenza in affioramento di Flysch di Gorgoglione e Argille Variegate.



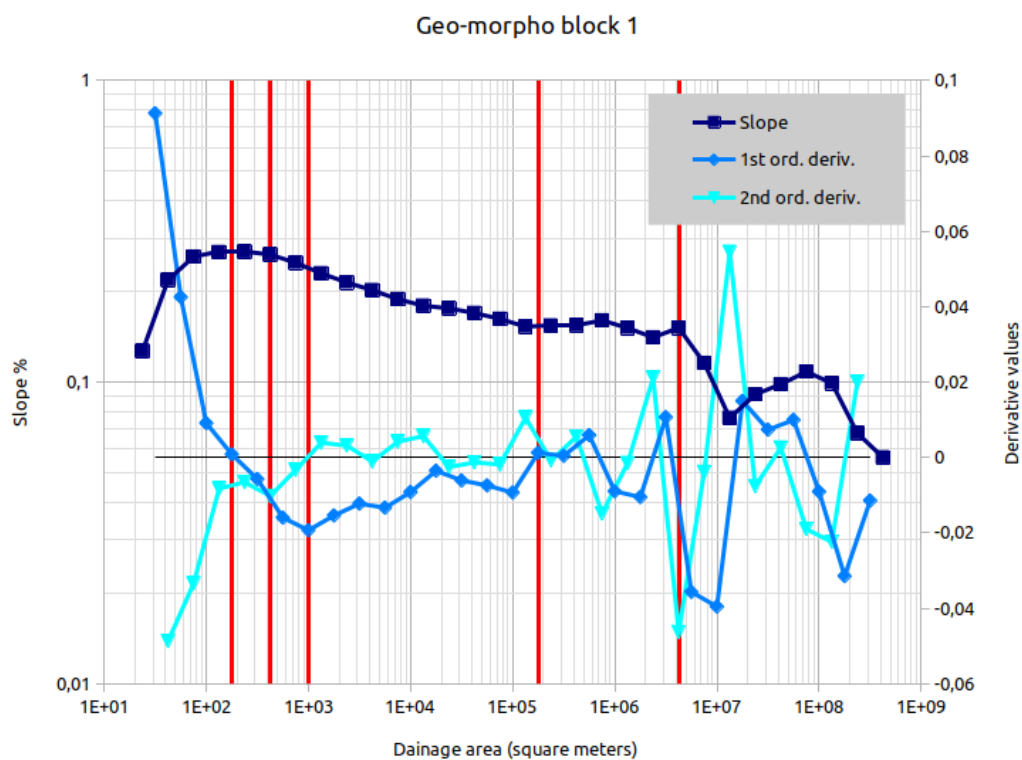


Figura 48 - Grafico pendenza - area drenata relativo al geo-morfoblocco 1.

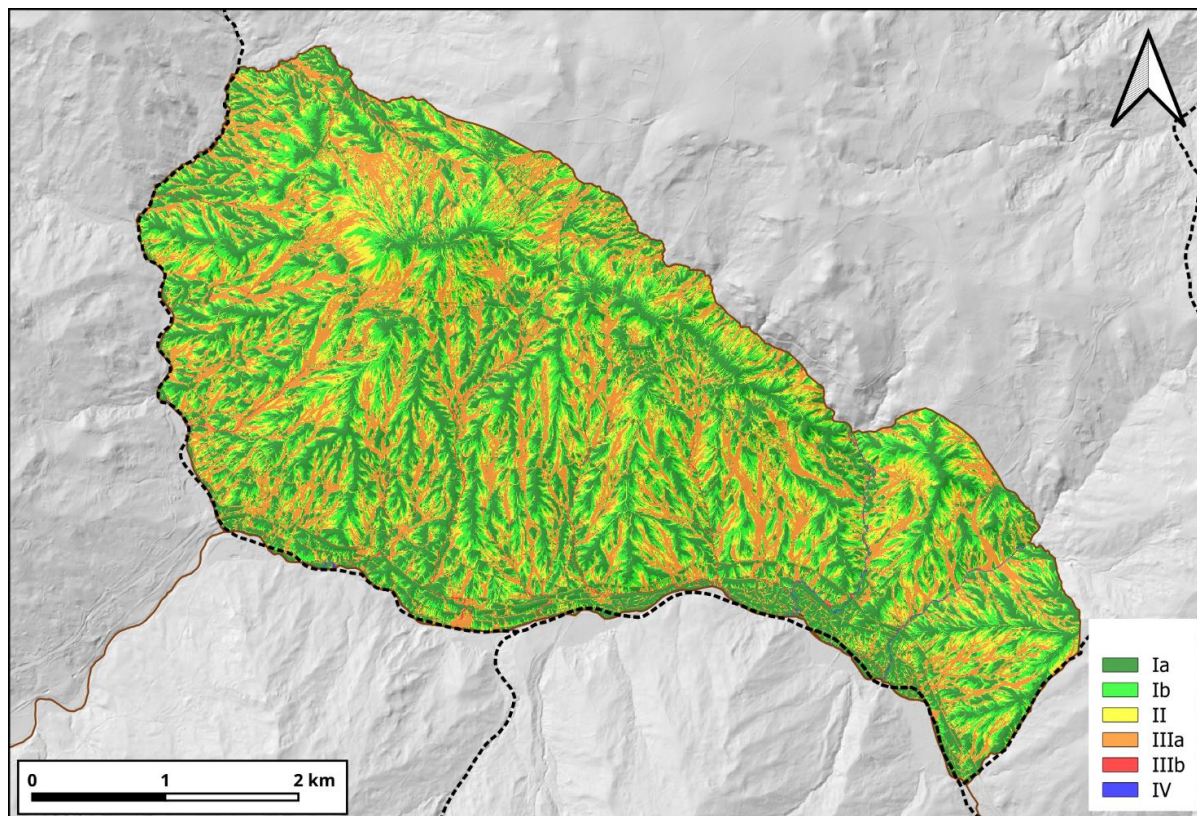


Figura 49 - Carta dei domini di processo relativi al geo-morfoblocco 1.

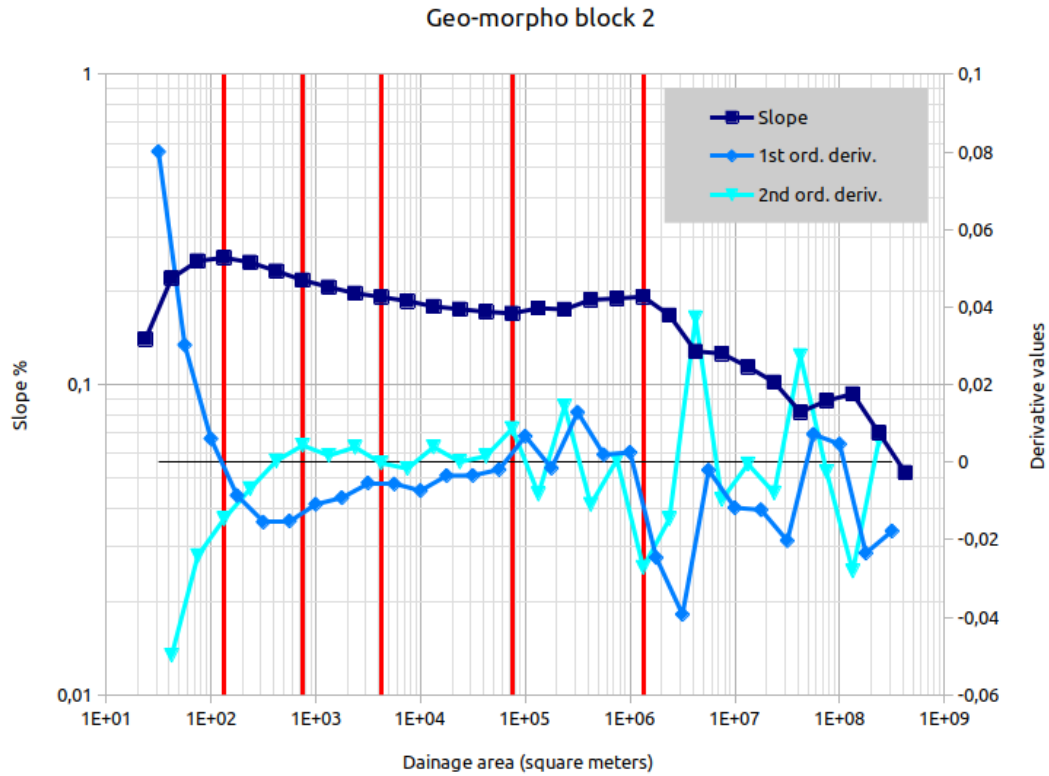


Figura 50 - Grafico pendenza - area drenata relativo al geo-morfoblocco 2.

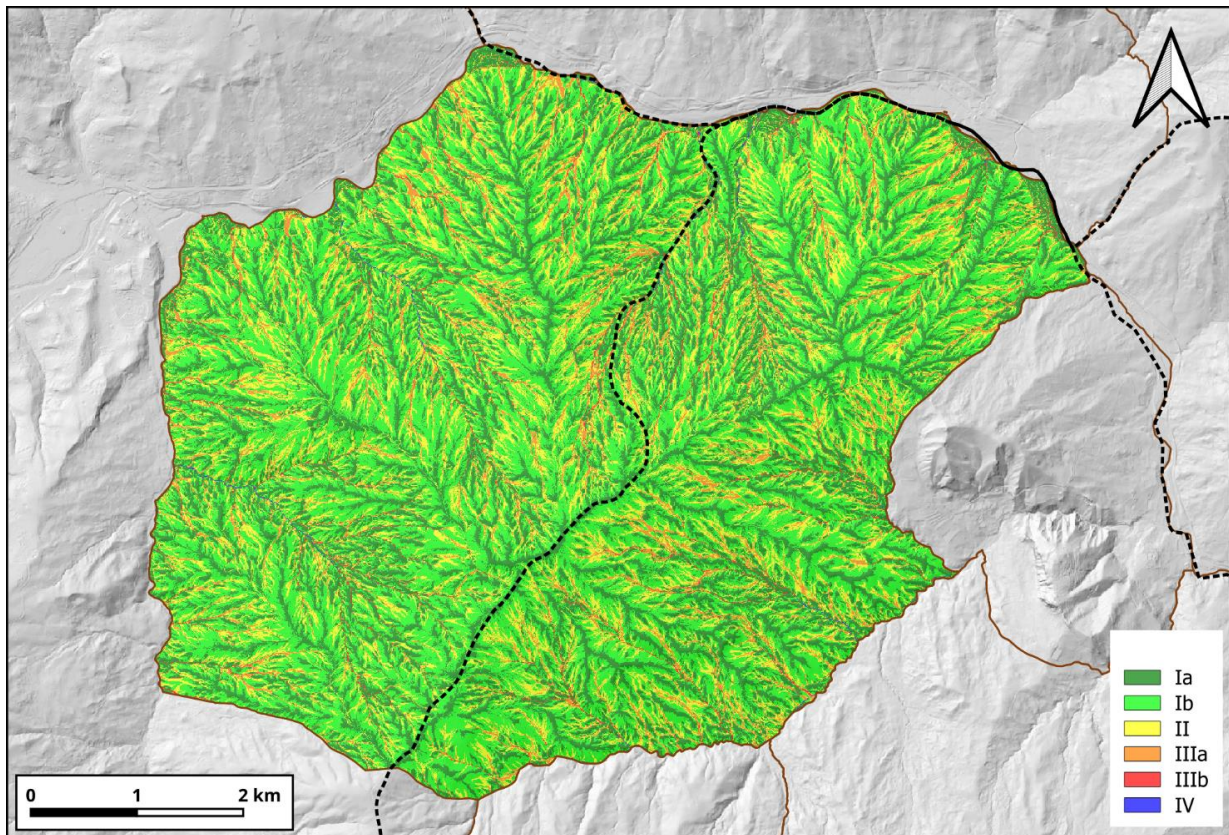


Figura 51 - Carta dei domini di processo relativi al geo-morfoblocco 2.

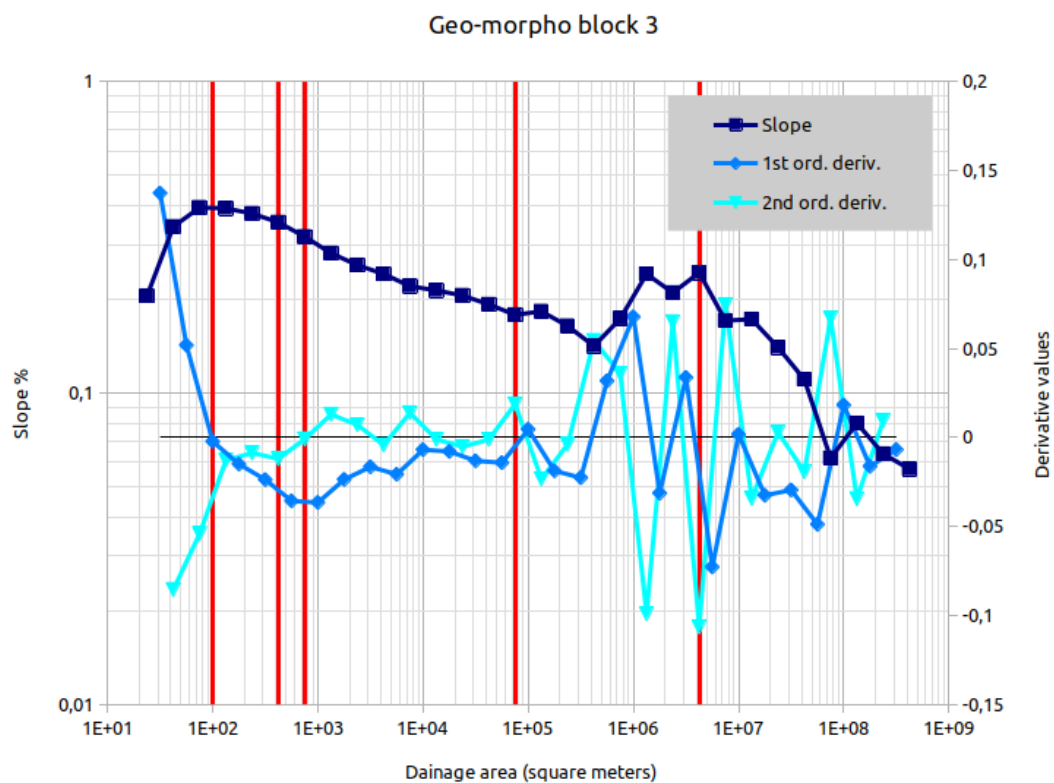


Figura 52 - Grafico pendenza - area drenata relativo al geo-morfoblocco 3.

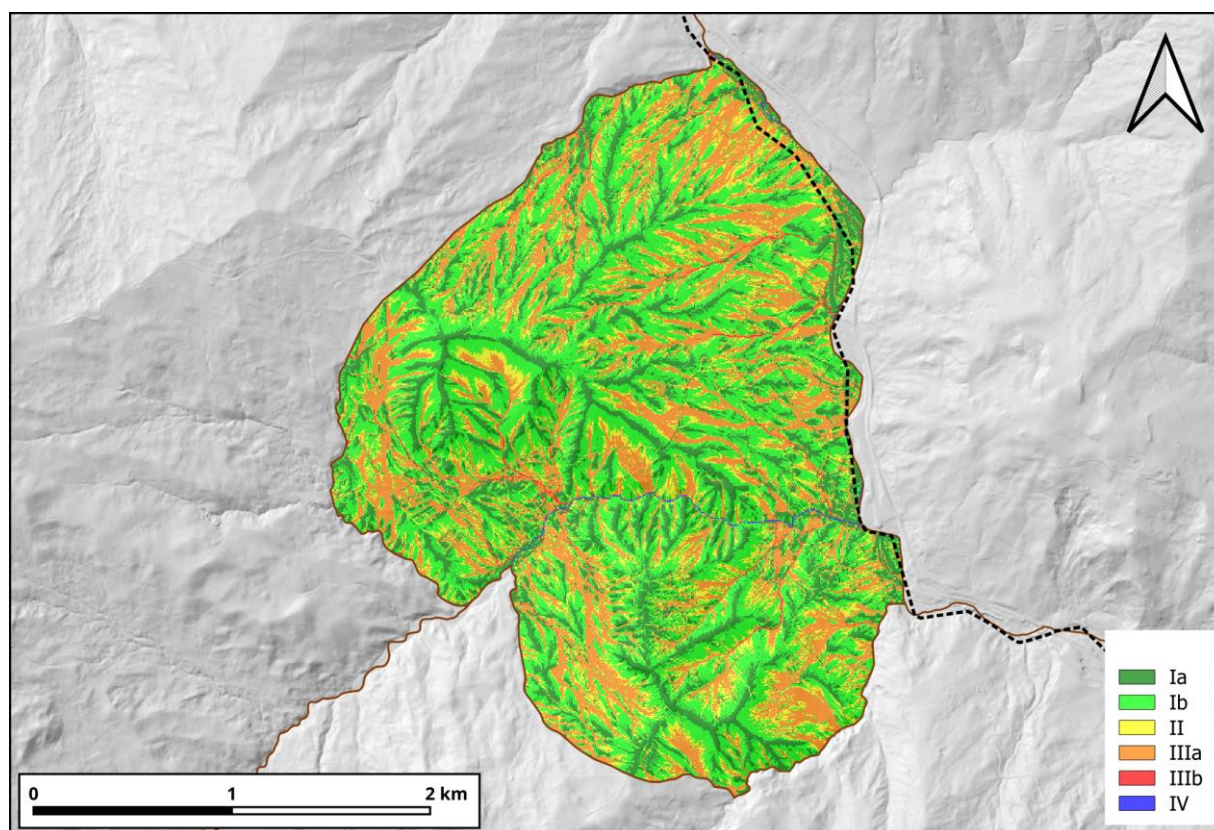


Figura 53 - Carta dei domini di processo relativi al geo-morfoblocco 3.

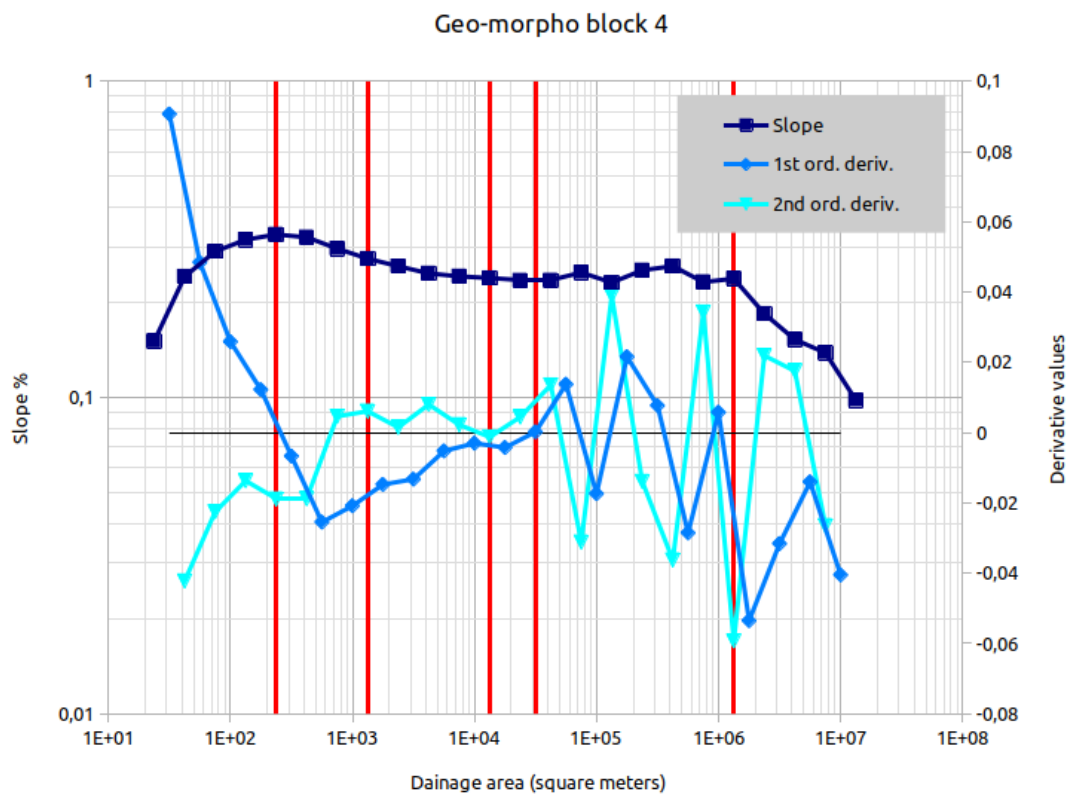


Figura 54 - Grafico pendenza - area drenata relativo al geo-morfoblocco 4.

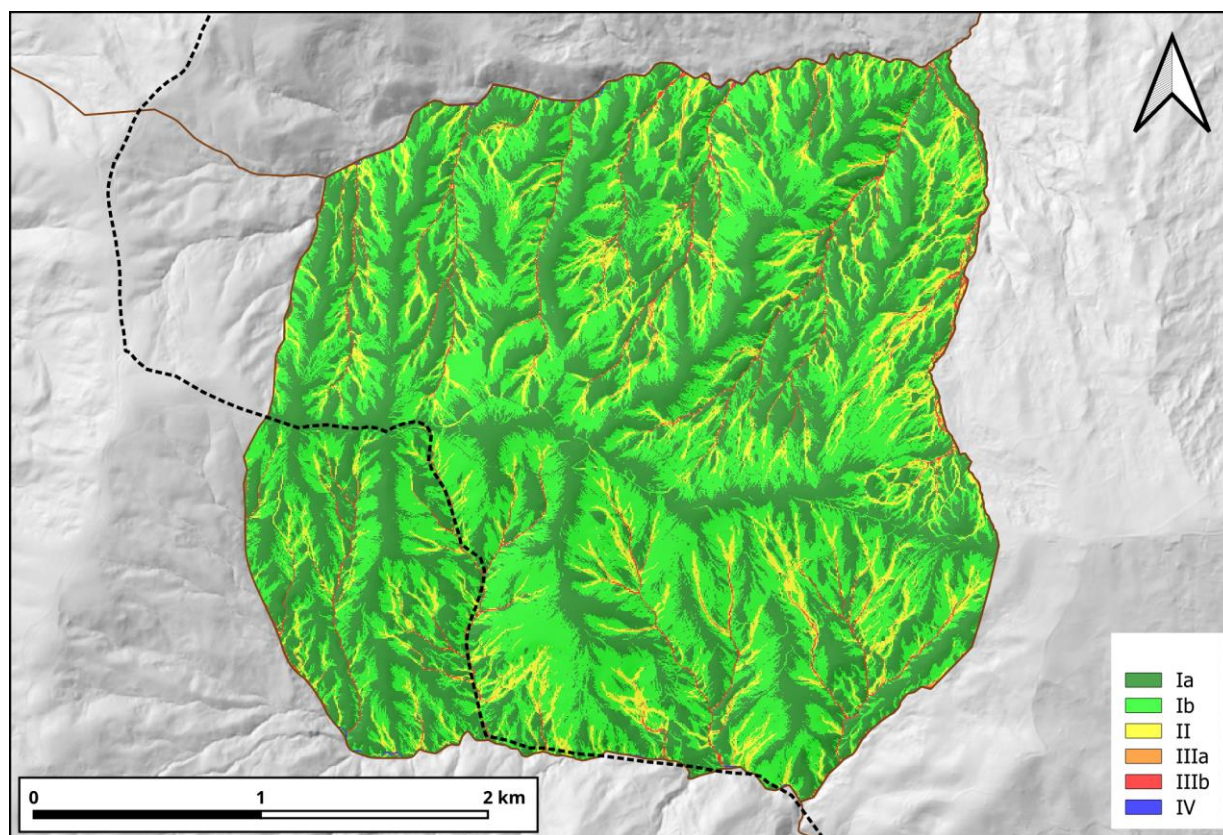


Figura 55 - Carta dei domini di processo relativi al geo-morfoblocco 4.

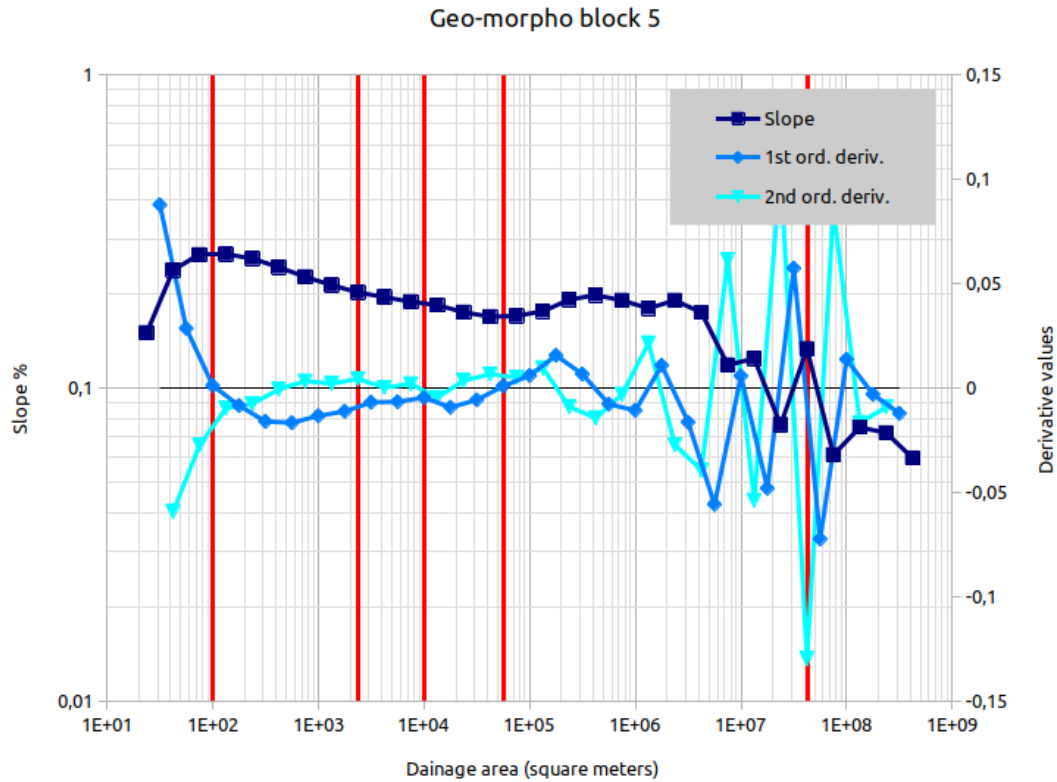


Figura 56 - Grafico pendenza - area drenata relativo al geo-morfoblocco 5.

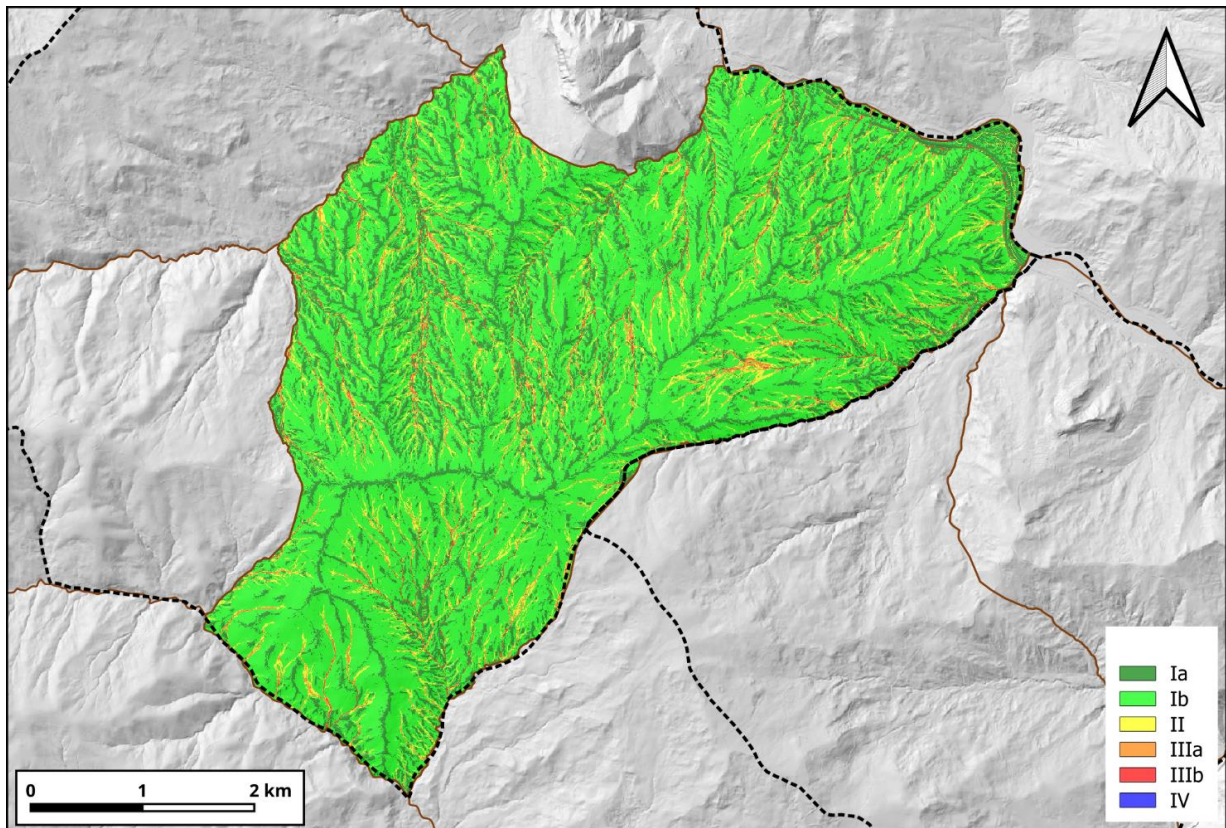


Figura 57 - Carta dei domini di processo relativi al geo-morfoblocco 5.

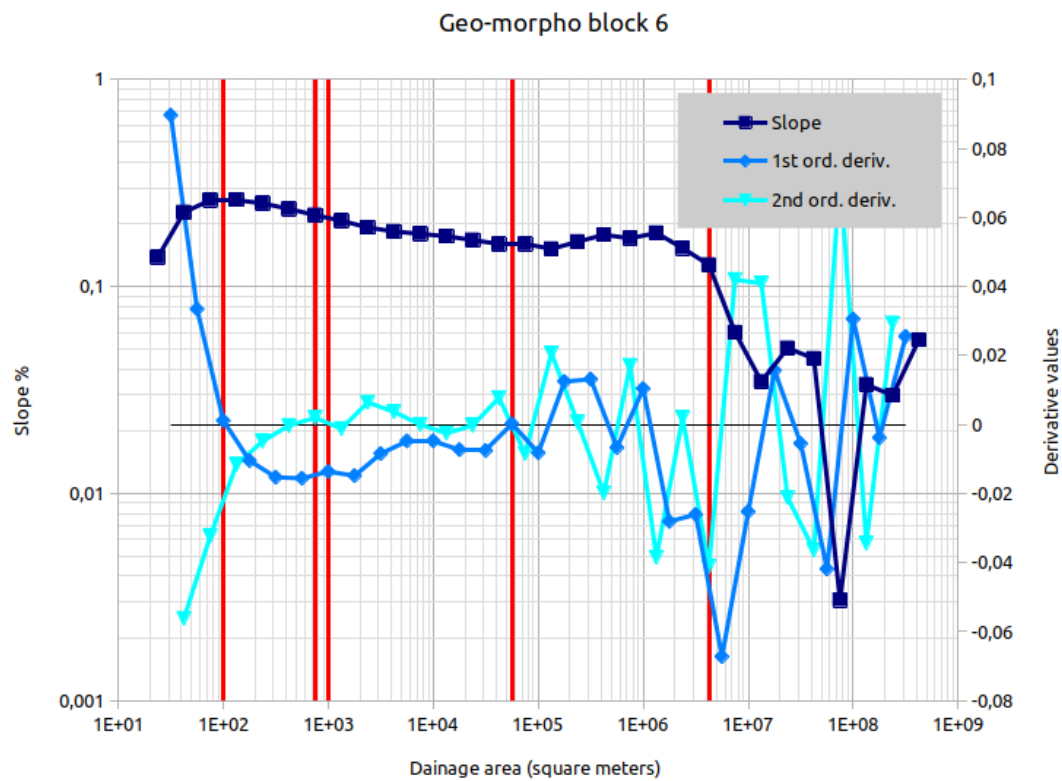


Figura 58 - Grafico pendenza - area drenata relativo al geo-morfoblocco 6.

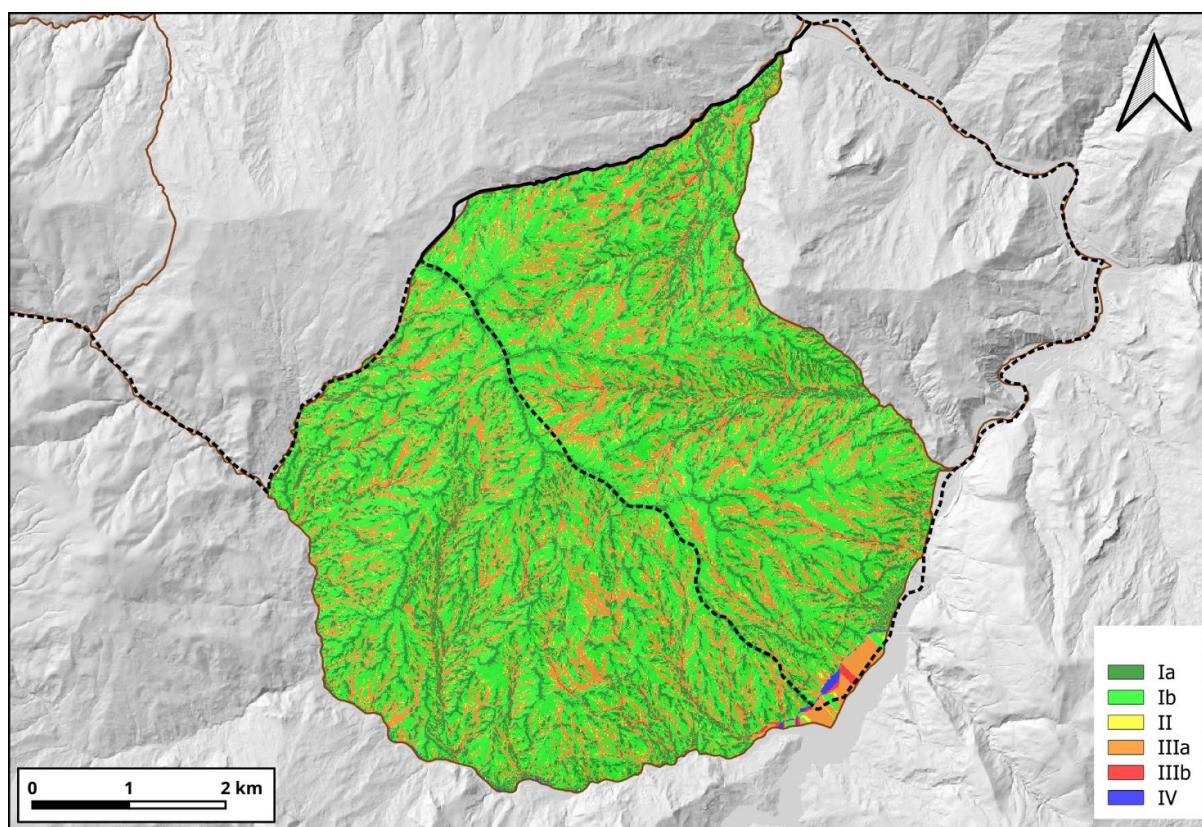


Figura 59 - Carta dei domini di processo relativi al geo-morfoblocco 6.

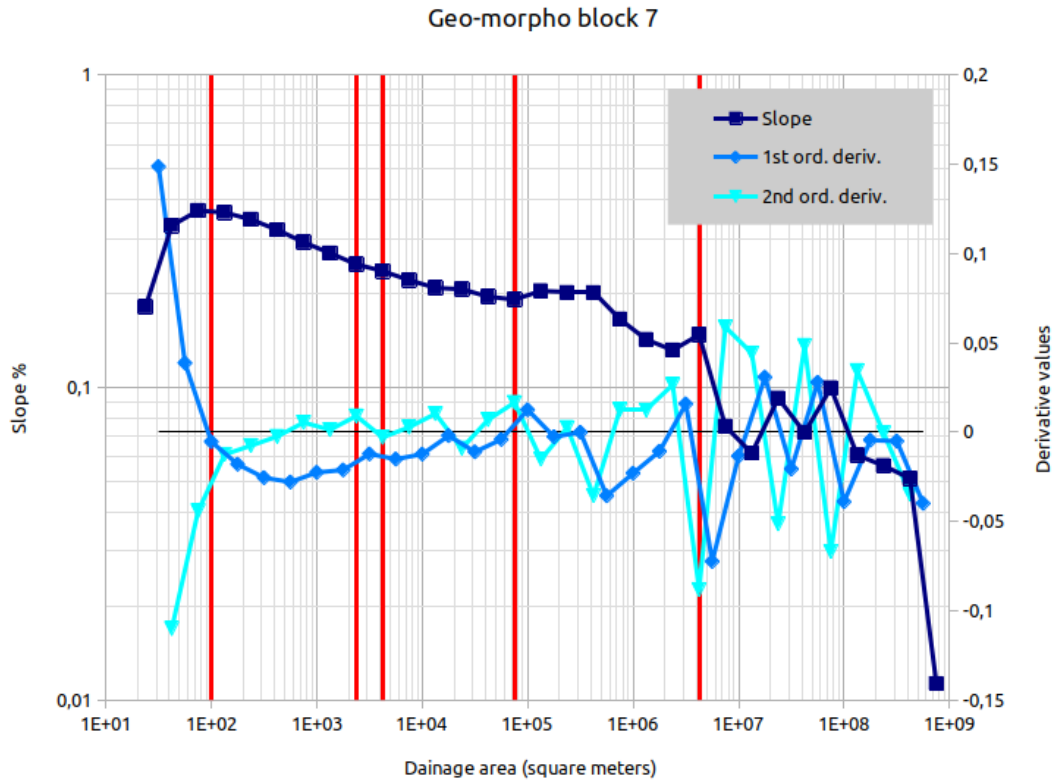


Figura 60 - Grafico pendenza - area drenata relativo al geo-morfoblocco 7.

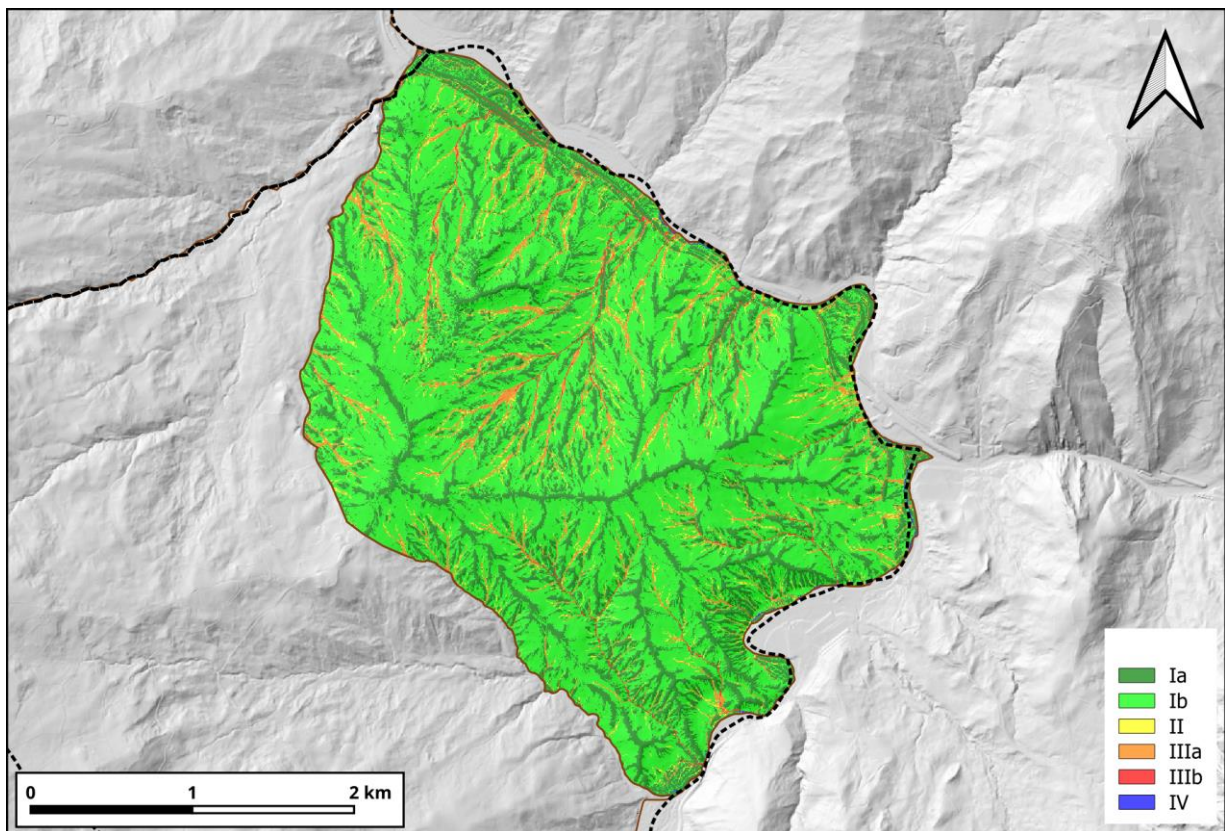


Figura 61 - Carta dei domini di processo relativi al geo-morfoblocco 7.

2.3.2 Bacini idrografici

Sono stati individuati 12 bacini all'interno dell'area di studio, in particolare:

1. Bacino del vallone del Monaco;
2. Bacino di Valle Sativo;
3. Bacino del vallone Lucerna;
4. Bacino del vallone dello Jazzo;
5. Bacini a N di Trivigno;
6. Bacino a S di Trivigno;
7. Bacino di vallone San Leo;
8. Bacino di vallone Brutto
9. Bacini del versante S di Vaglio, area centro-orientale;
10. Bacini del versante a S di Vaglio Sud area centro-occidentale;
11. Bacini del versante a S di Vaglio, area occidentale;
12. Bacini del versante a S di Vaglio, area orientale.



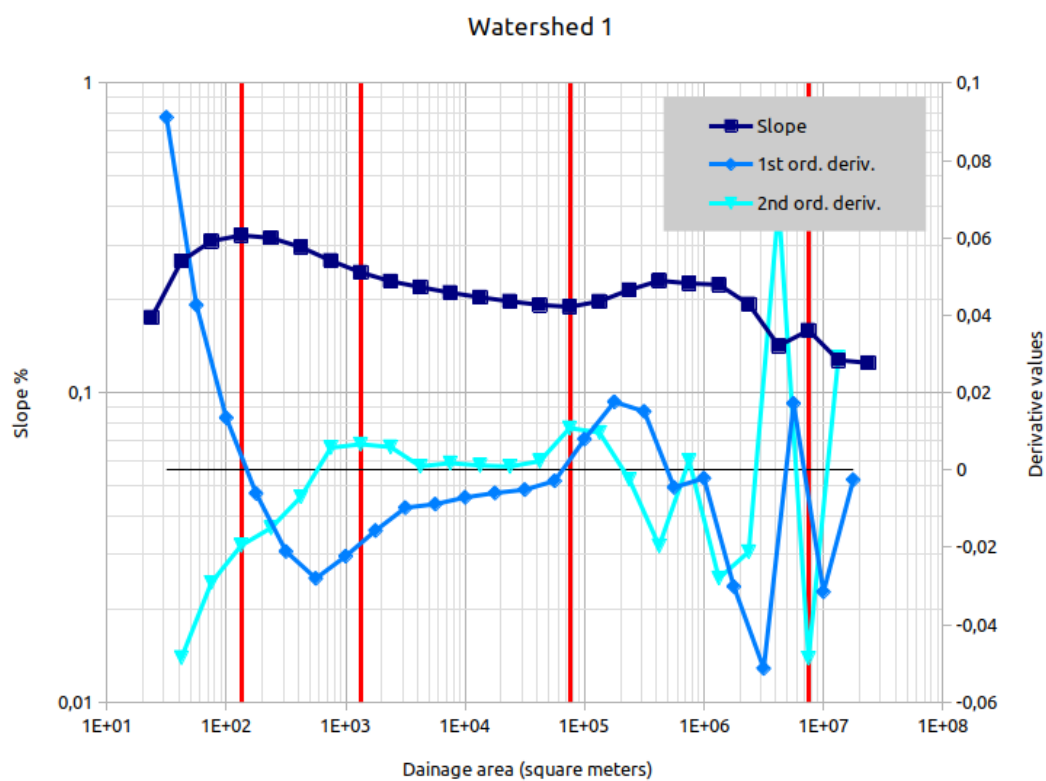


Figura 62 - Grafico pendenza - area drenata relativo al bacino 1.

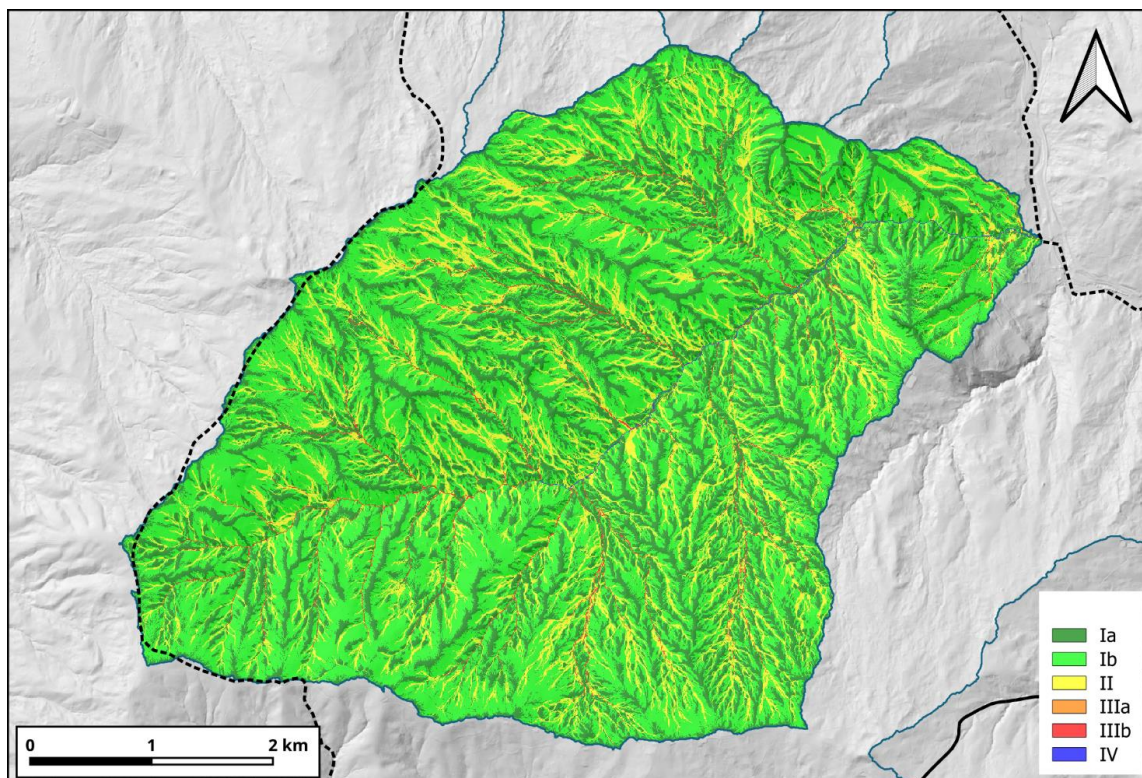


Figura 63 - Carta dei domini di processo relativi al bacino 1.

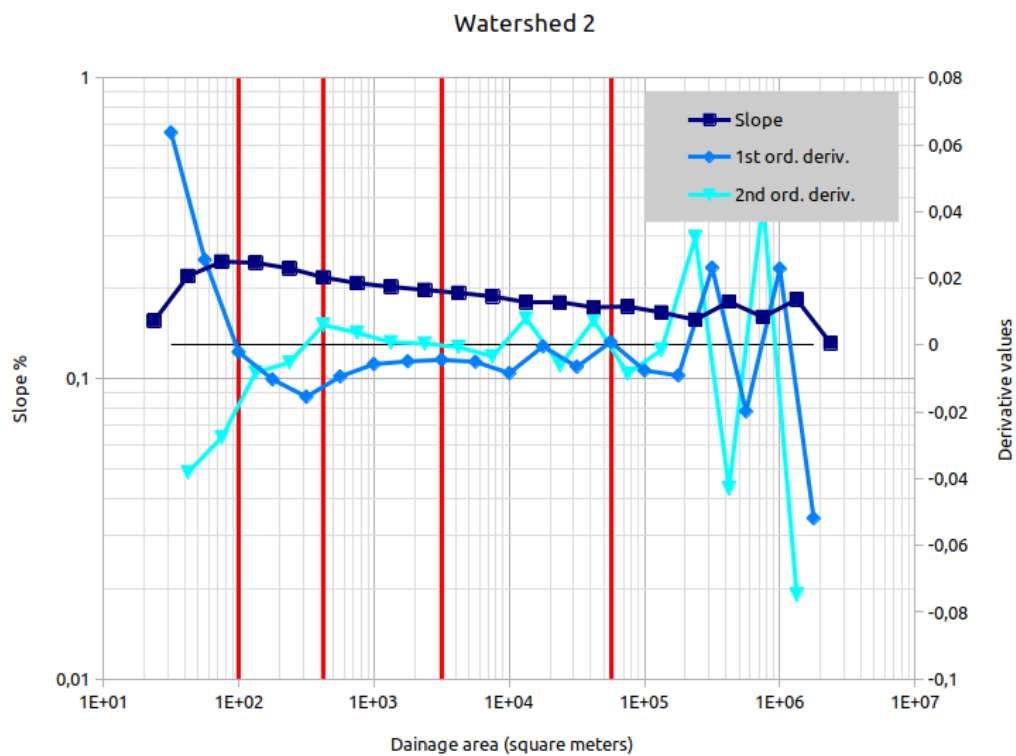


Figura 64 - Grafico pendenza - area drenata relativo al bacino 2.

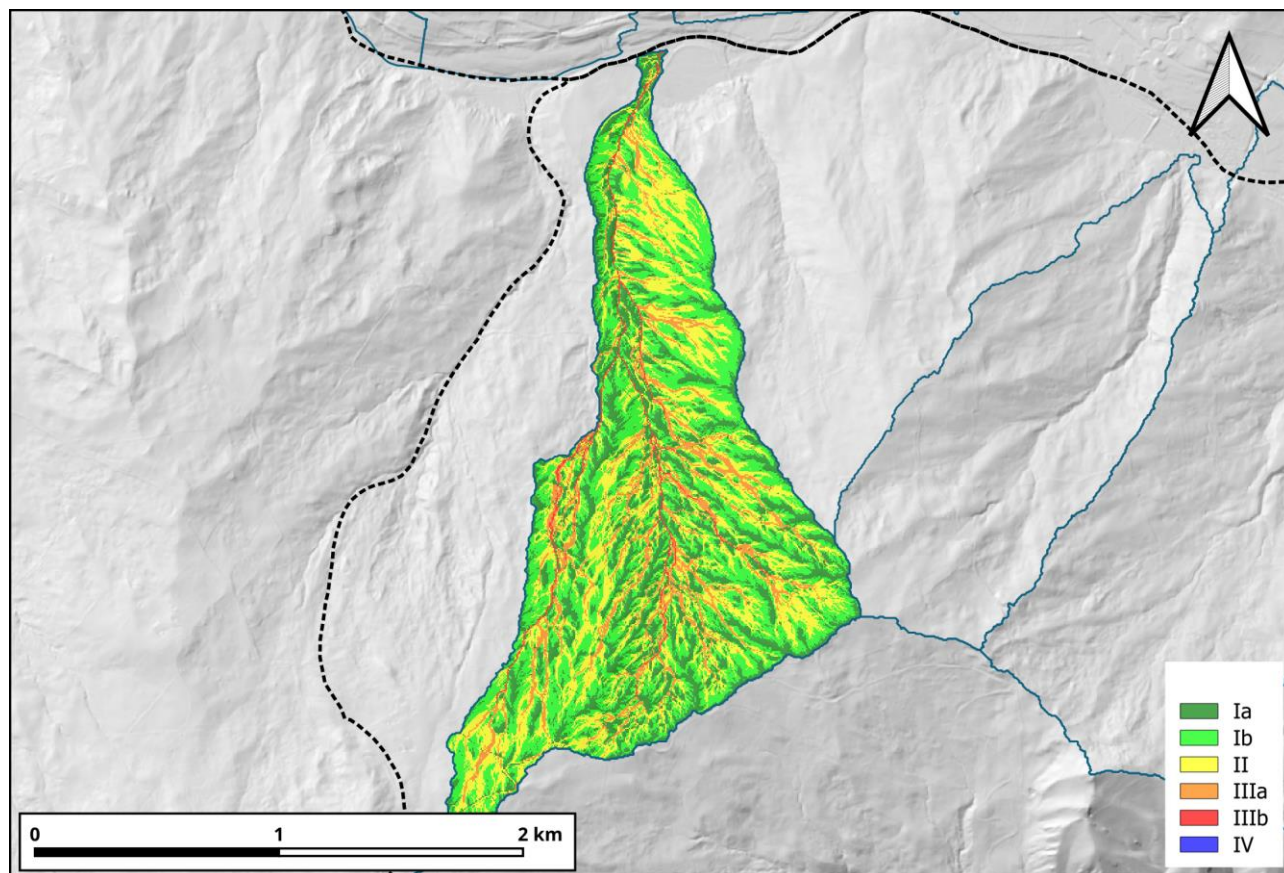


Figura 65 - Carta dei domini di processo relativi al bacino 2.

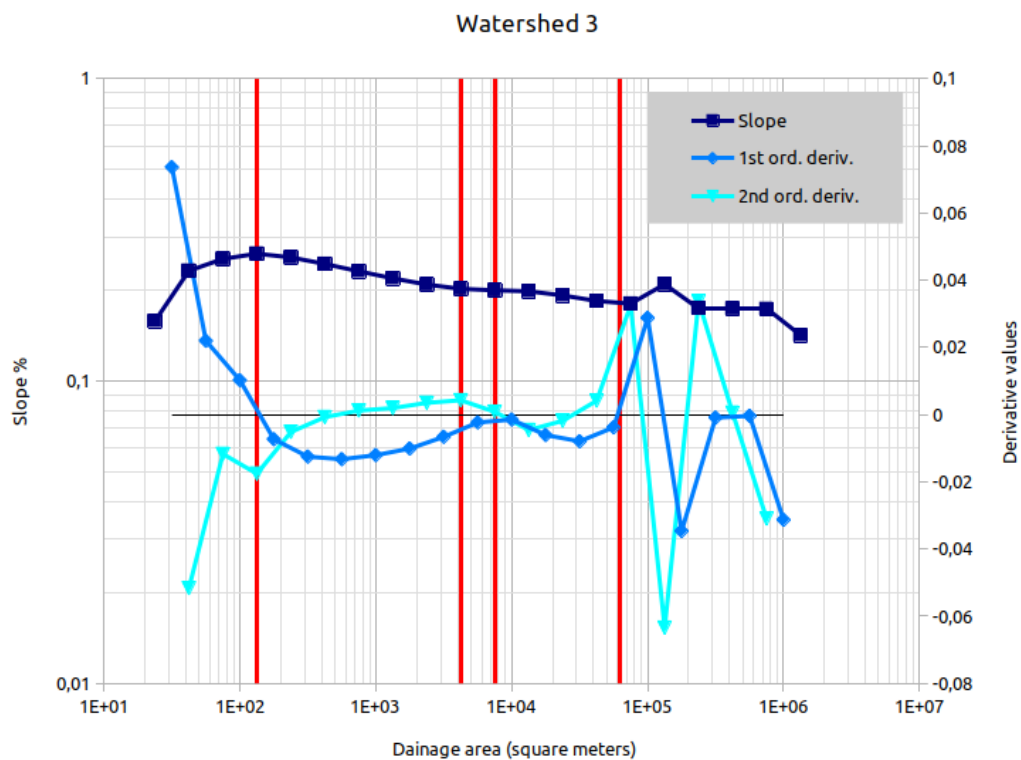


Figura 66 - Grafico pendenza - area drenata relativo al bacino 3.

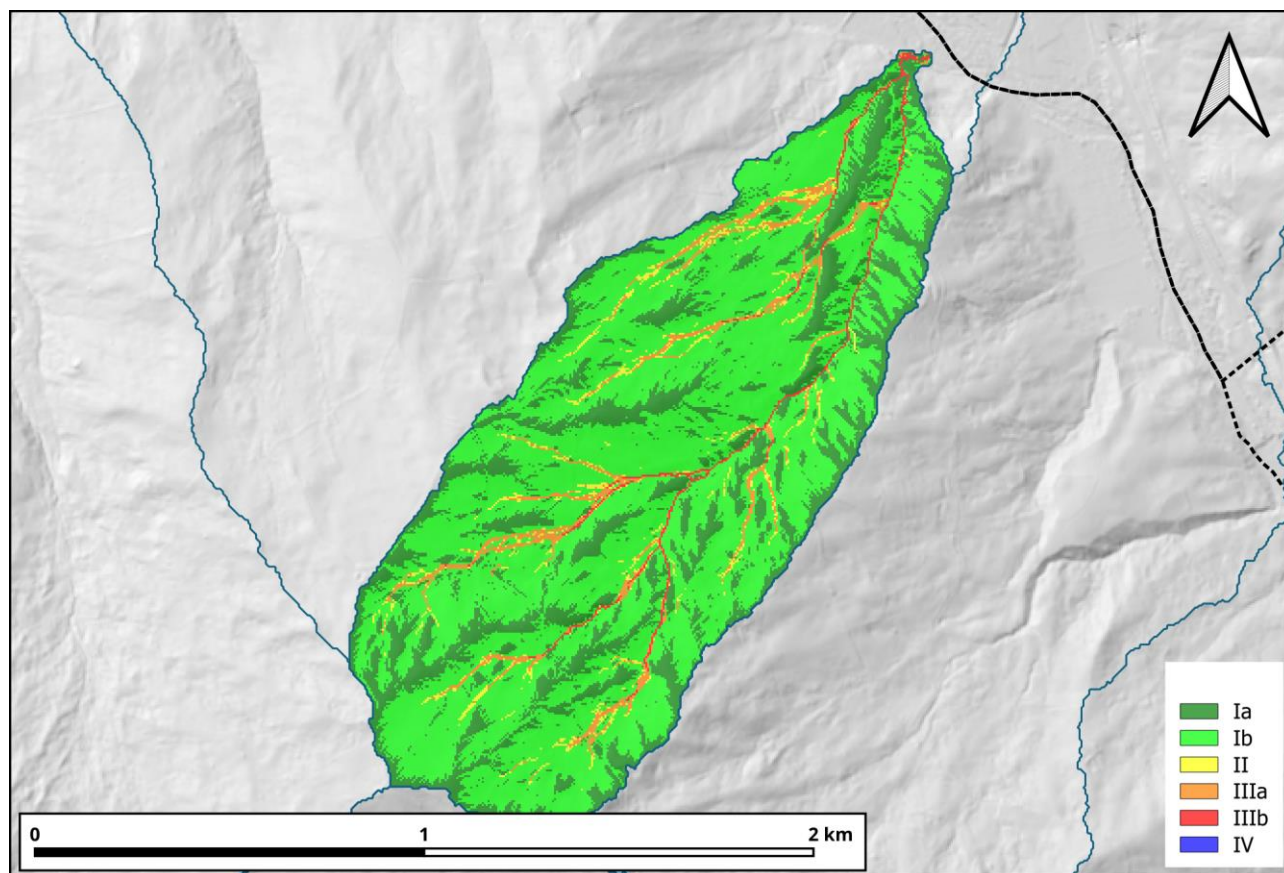


Figura 67 - Carta dei domini di processo relativi al bacino 3.

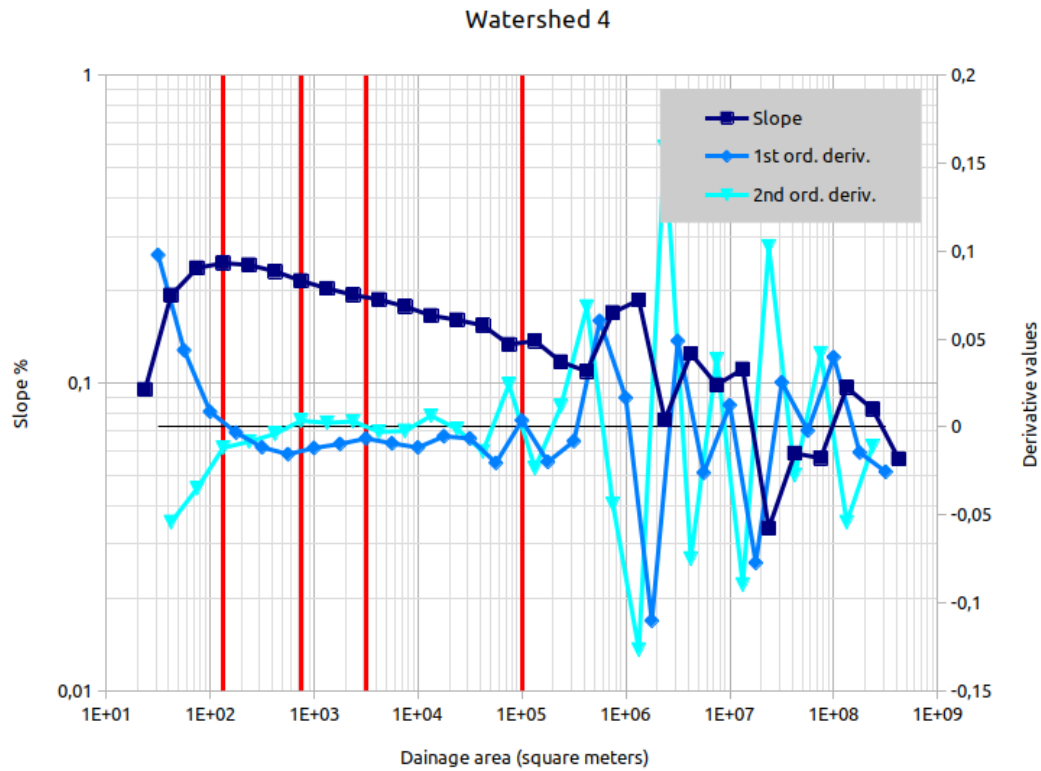


Figura 68 - Grafico pendenza - area drenata relativo al bacino 4.

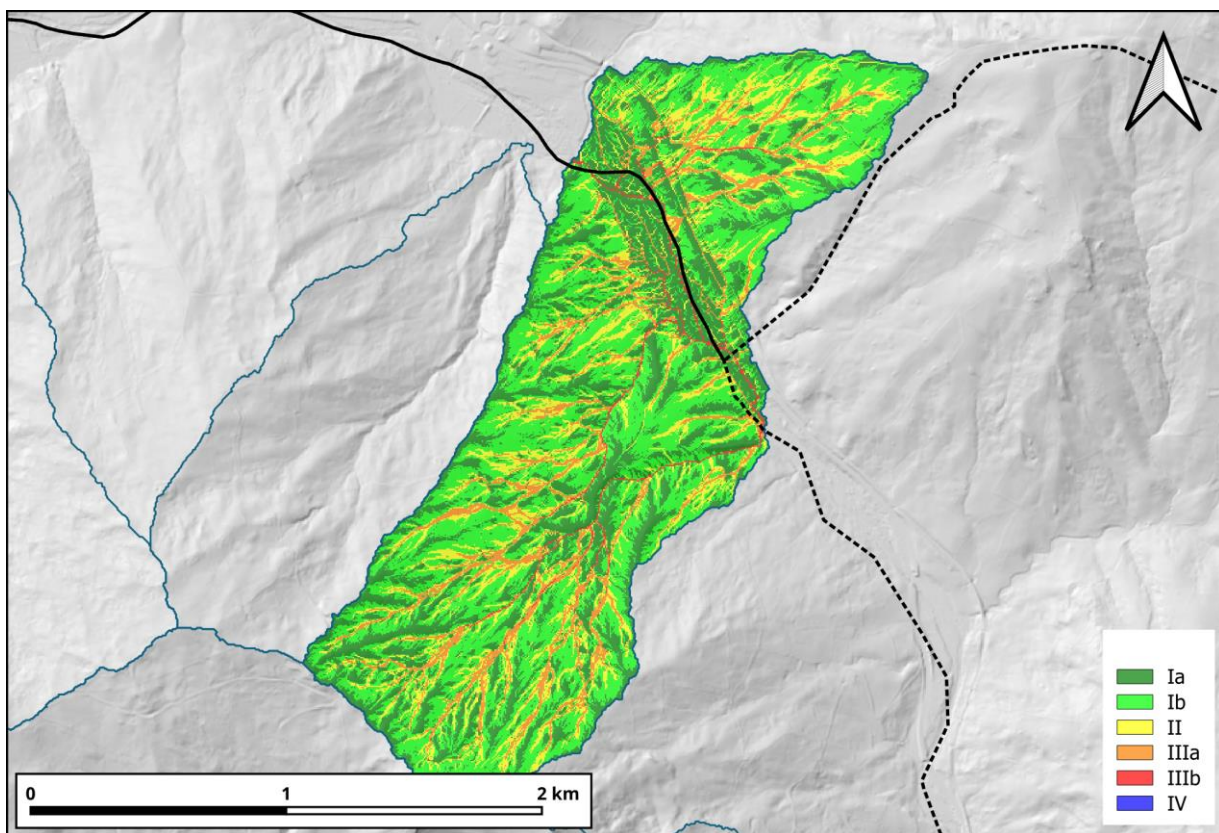


Figura 69 - Carta dei domini di processo relativi al bacino 4.

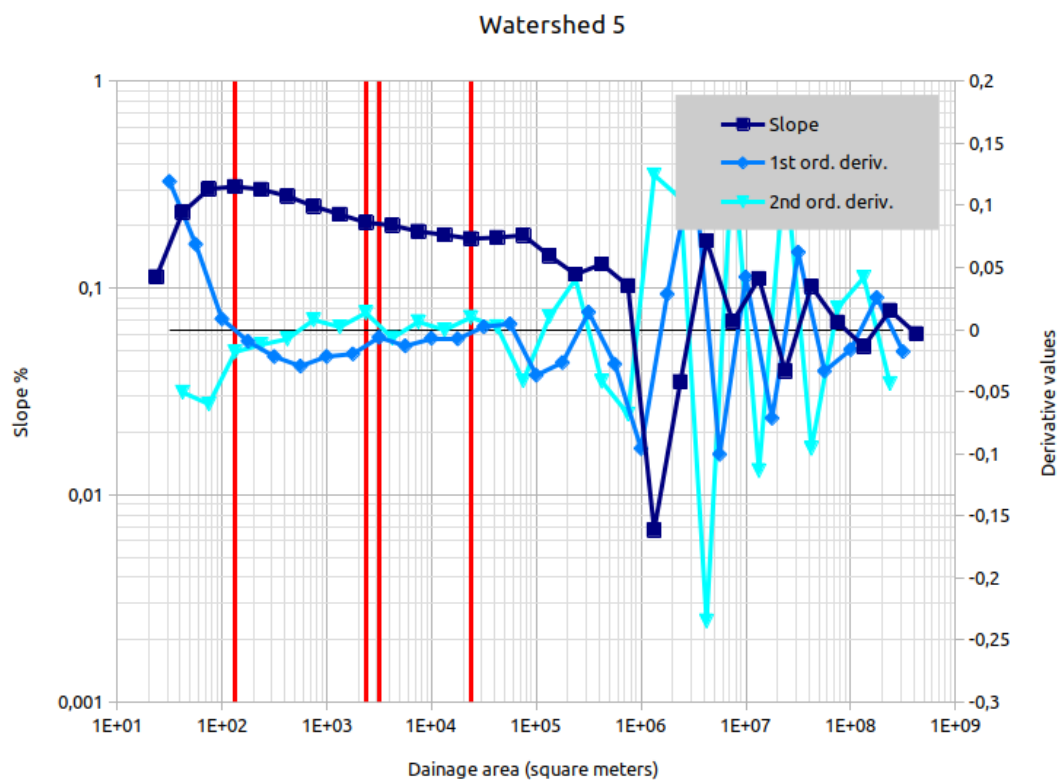


Figura 70 - Grafico pendenza - area drenata relativo al bacino 5.

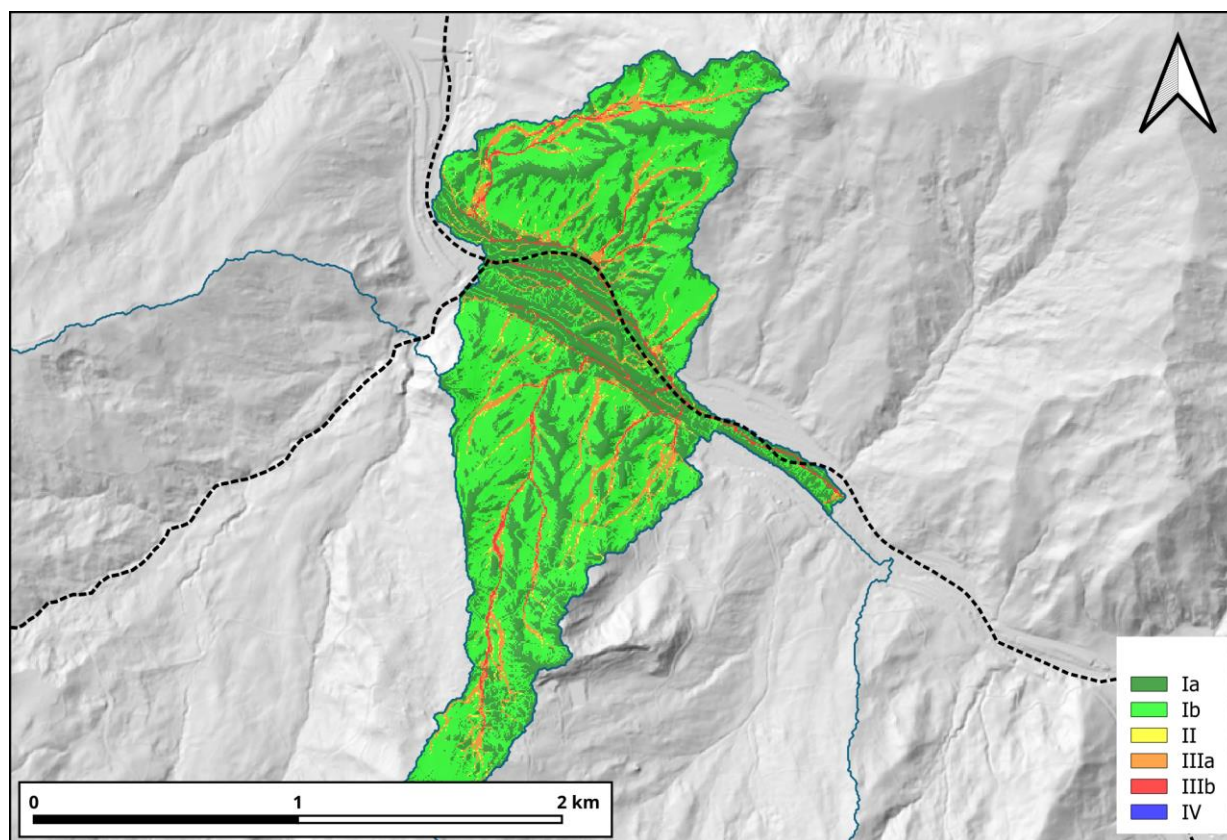


Figura 71 - Carta dei domini di processo relativi al bacino 5.

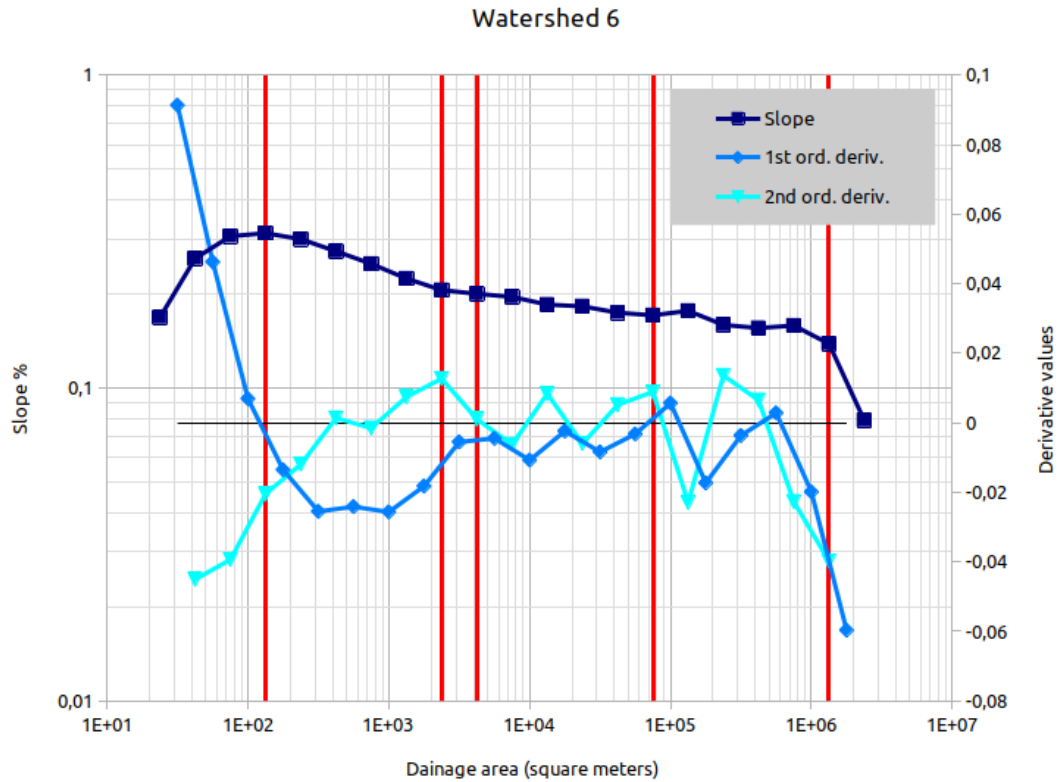


Figura 72 - Grafico pendenza - area drenata relativo al bacino 6.

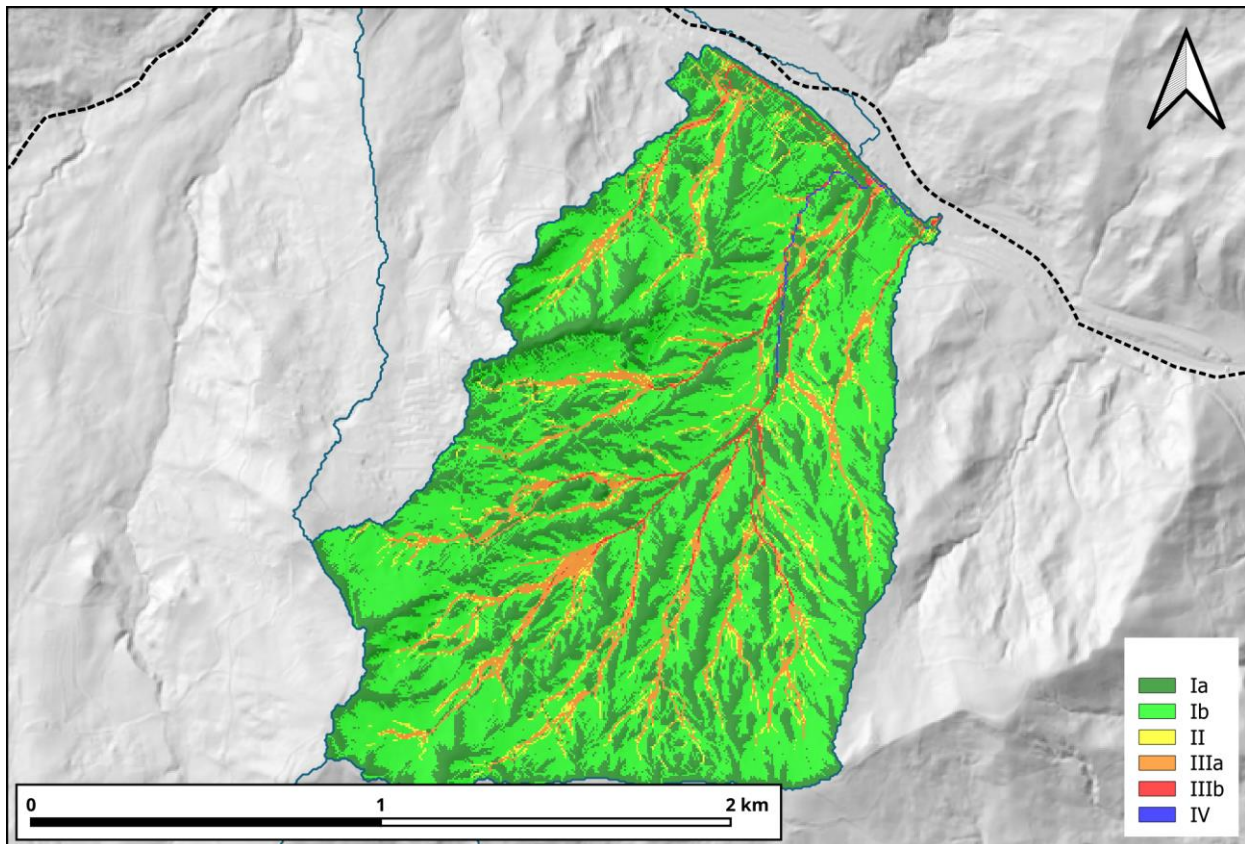


Figura 73 - Carta dei domini di processo relativi al bacino 6.

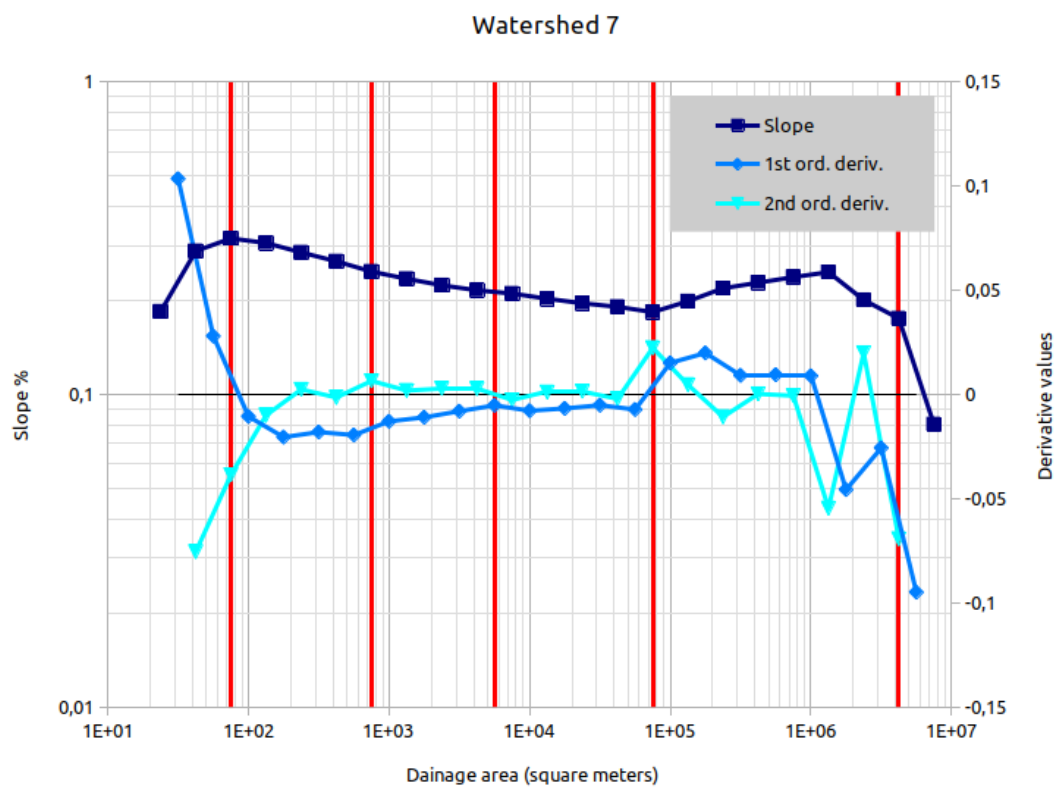


Figura 74 - Grafico pendenza - area drenata relativo al bacino 7.

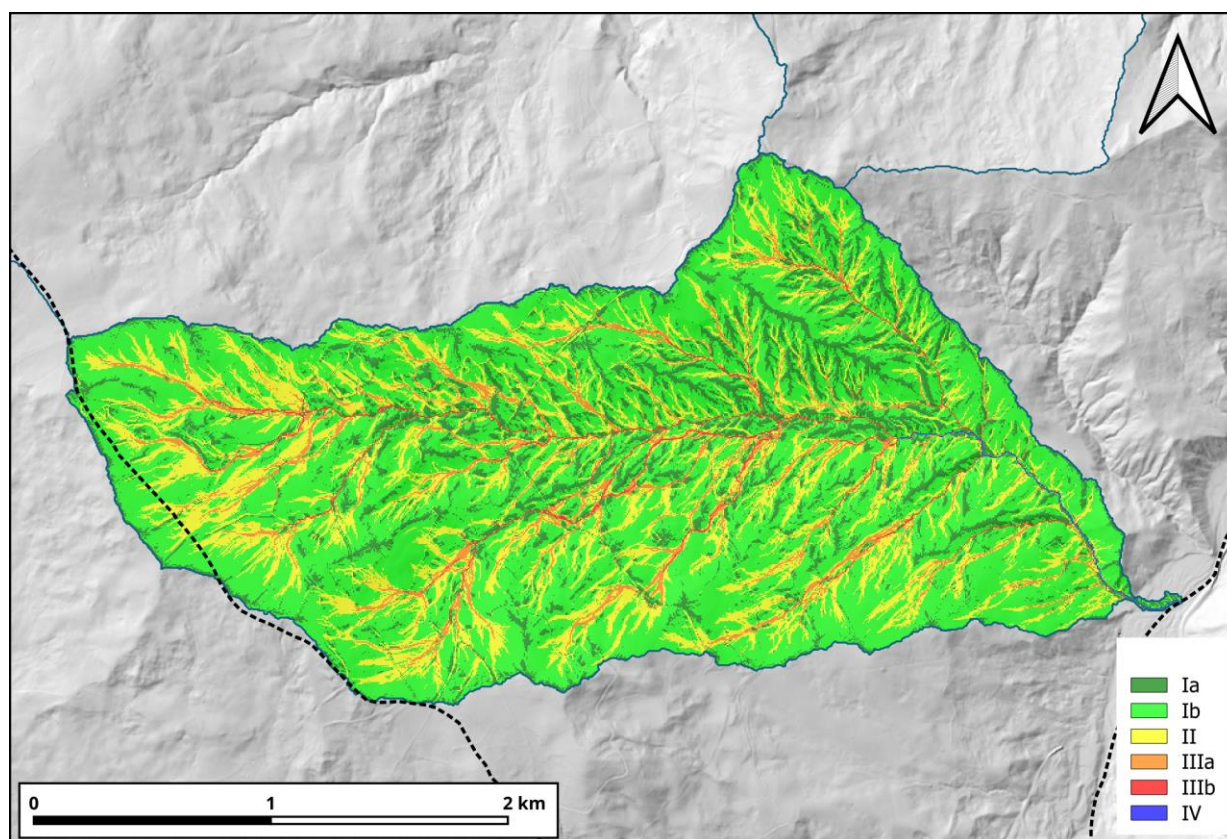


Figura 75 - Carta dei domini di processo relativi al bacino 7.

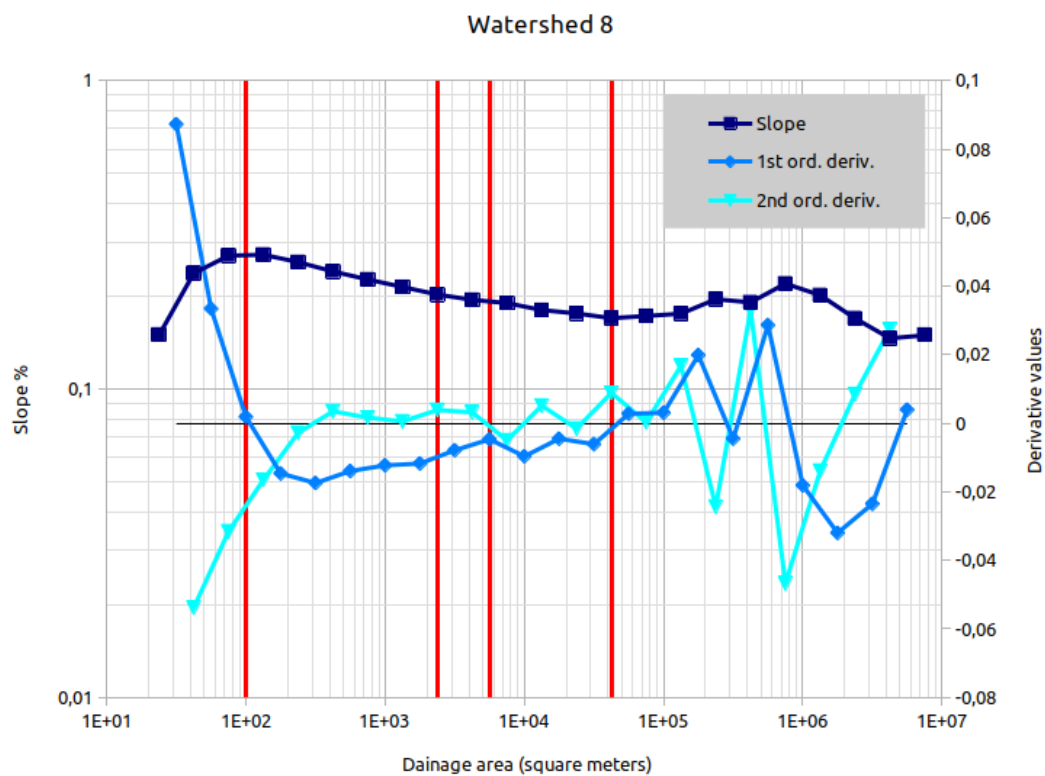


Figura 76 - Grafico pendenza - area drenata relativo al bacino 8.

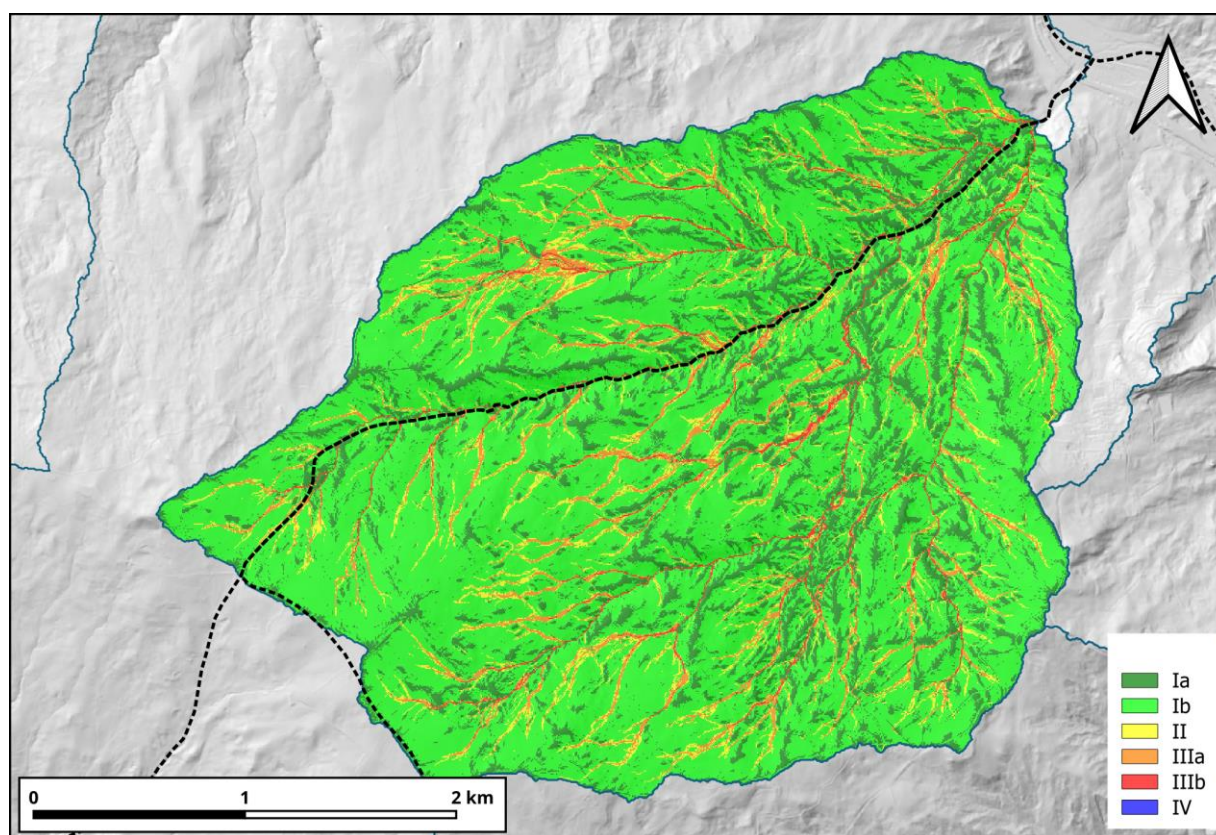


Figura 77 - Carta dei domini di processo relativi al bacino 8.

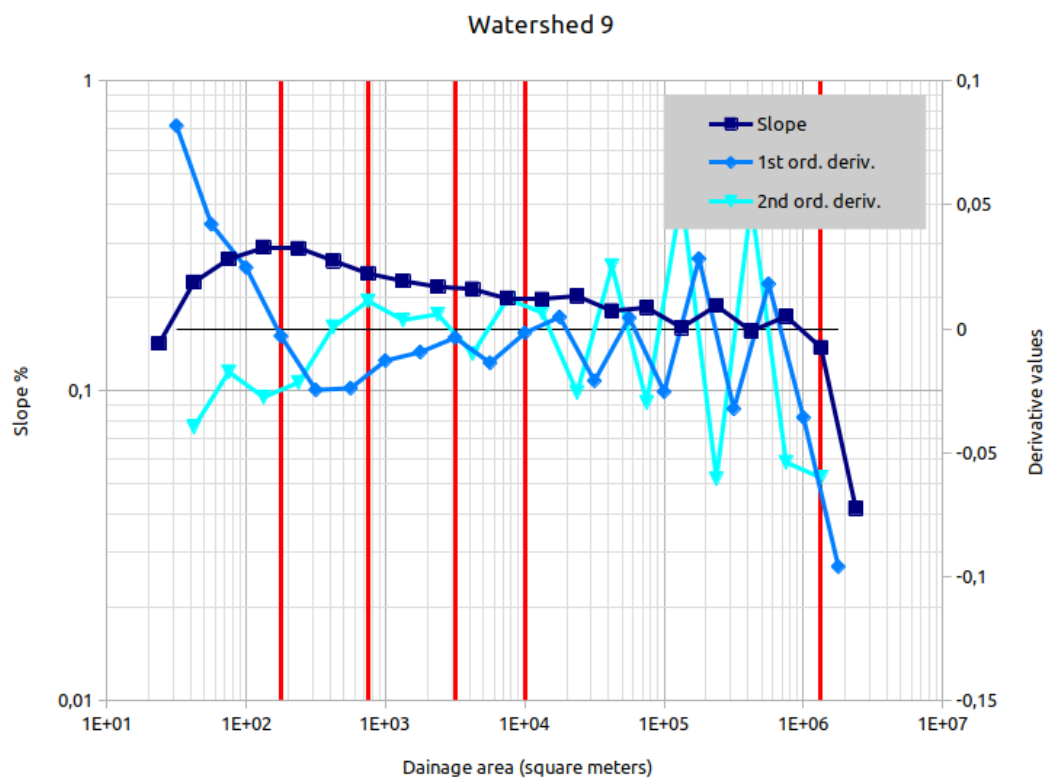


Figura 78 - Grafico pendenza - area drenata relativo al bacino 9.

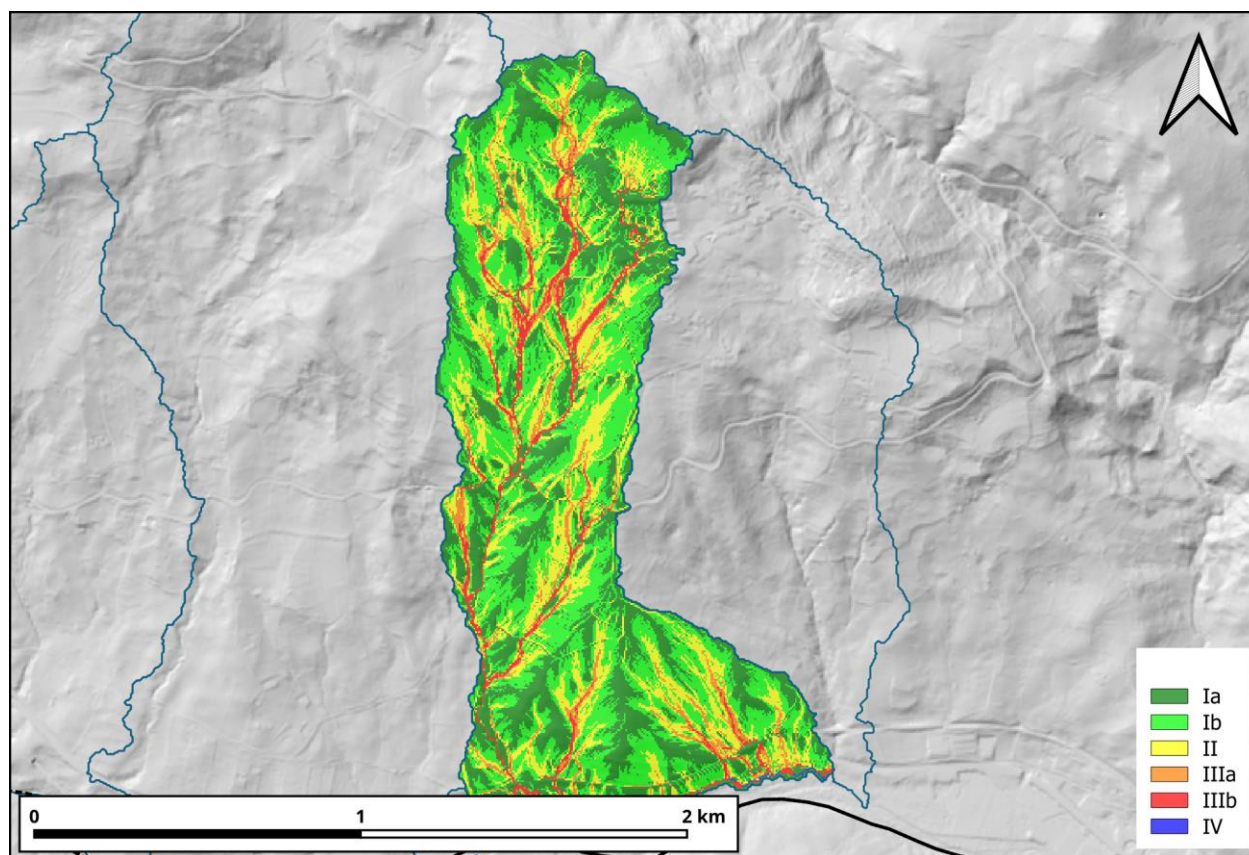


Figura 79 - Carta dei domini di processo relativi al bacino 9.

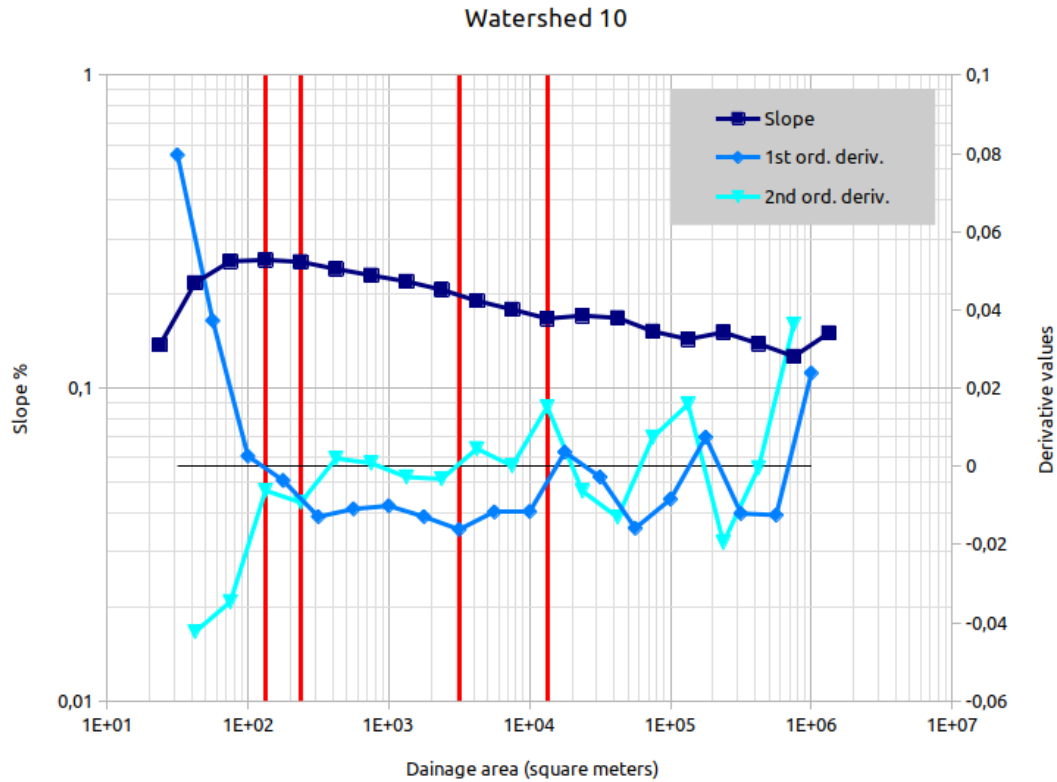


Figura 80 - Grafico pendenza - area drenata relativo al bacino 10.

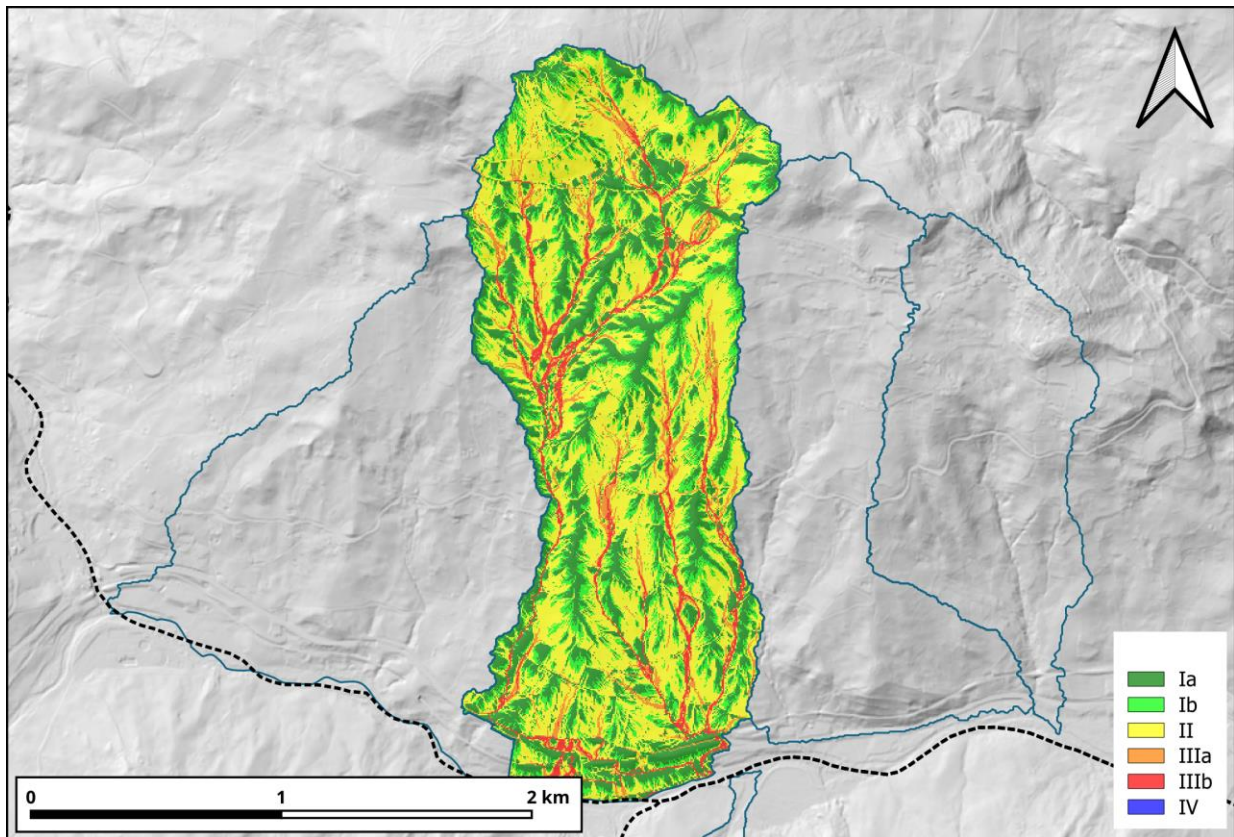


Figura 81 - Carta dei domini di processo relativi al bacino 10.

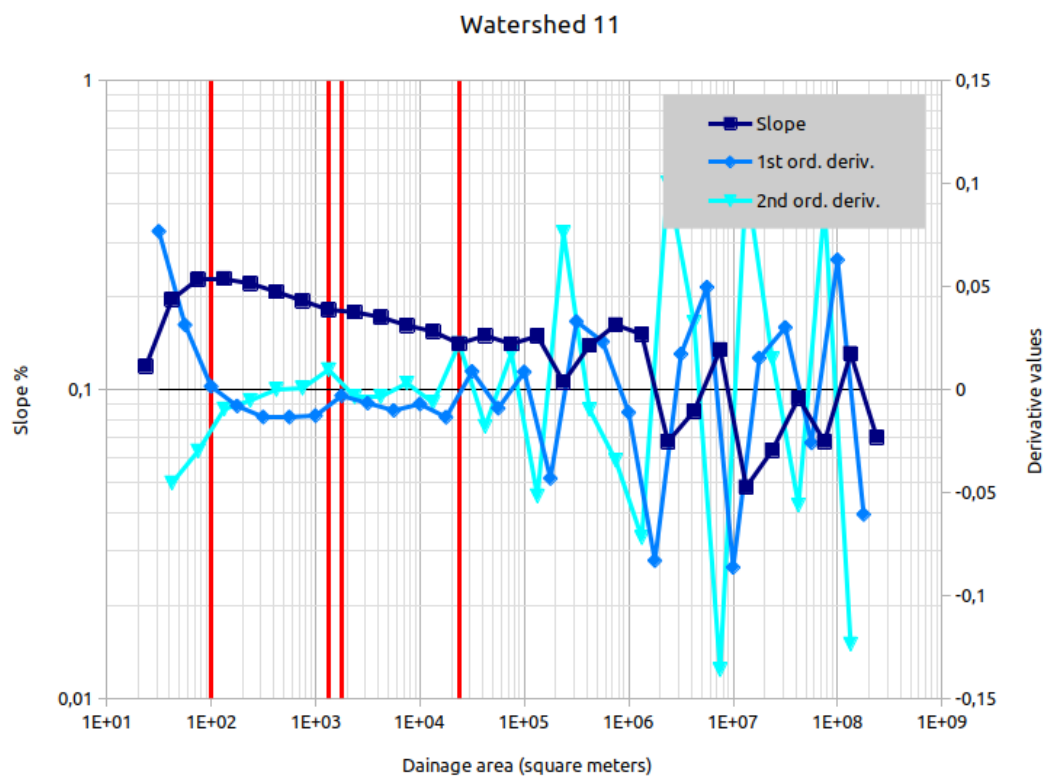


Figura 82 - Grafico pendenza - area drenata relativo al bacino 11.

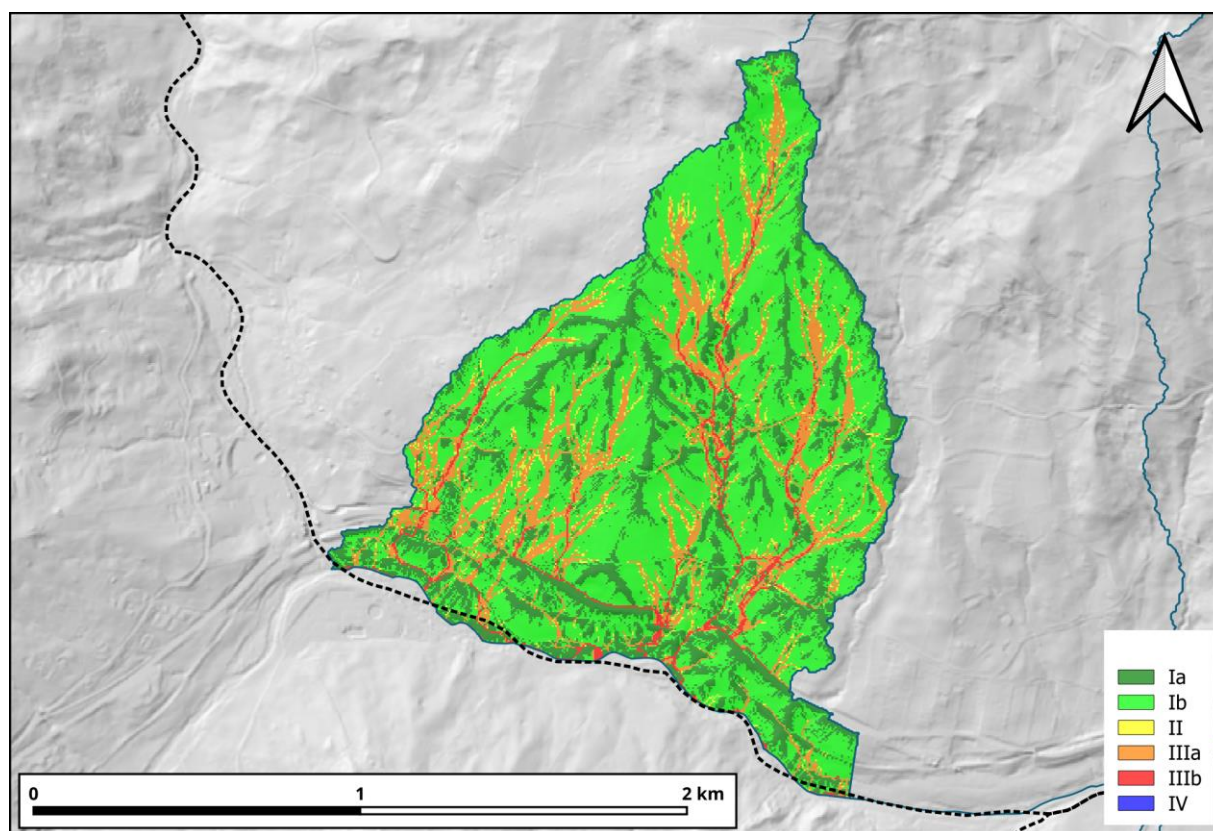


Figura 83 - Carta dei domini di processo relativi al bacino 11.

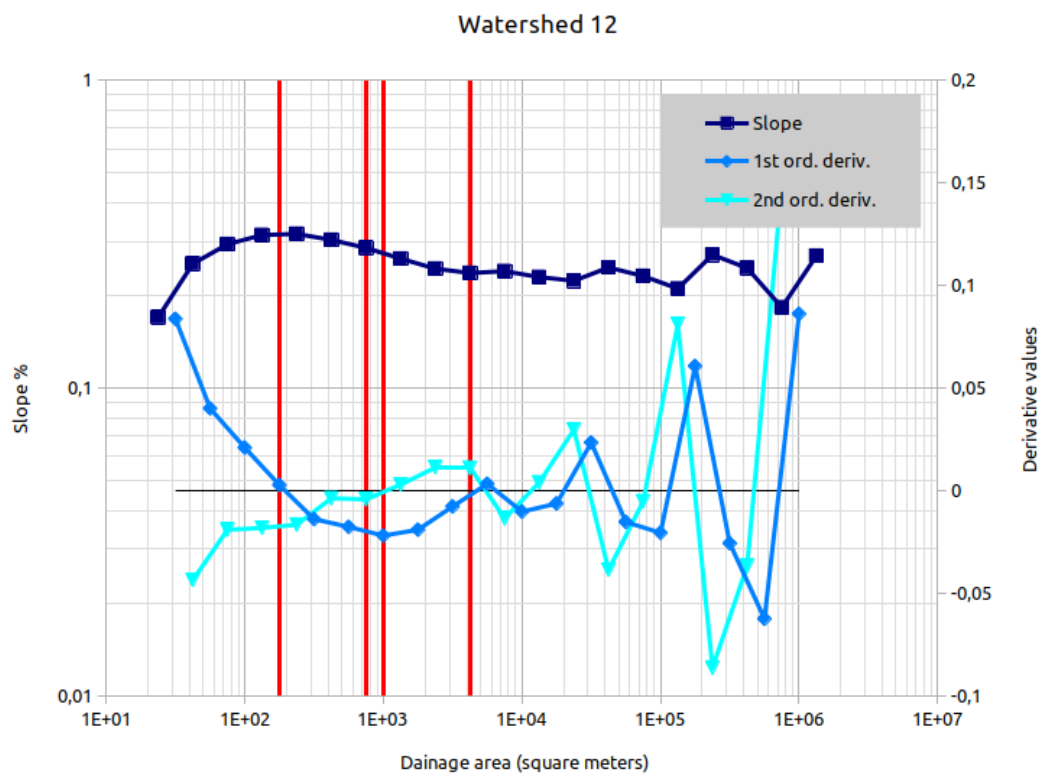


Figura 84 - Grafico pendenza - area drenata relativo al bacino 12.

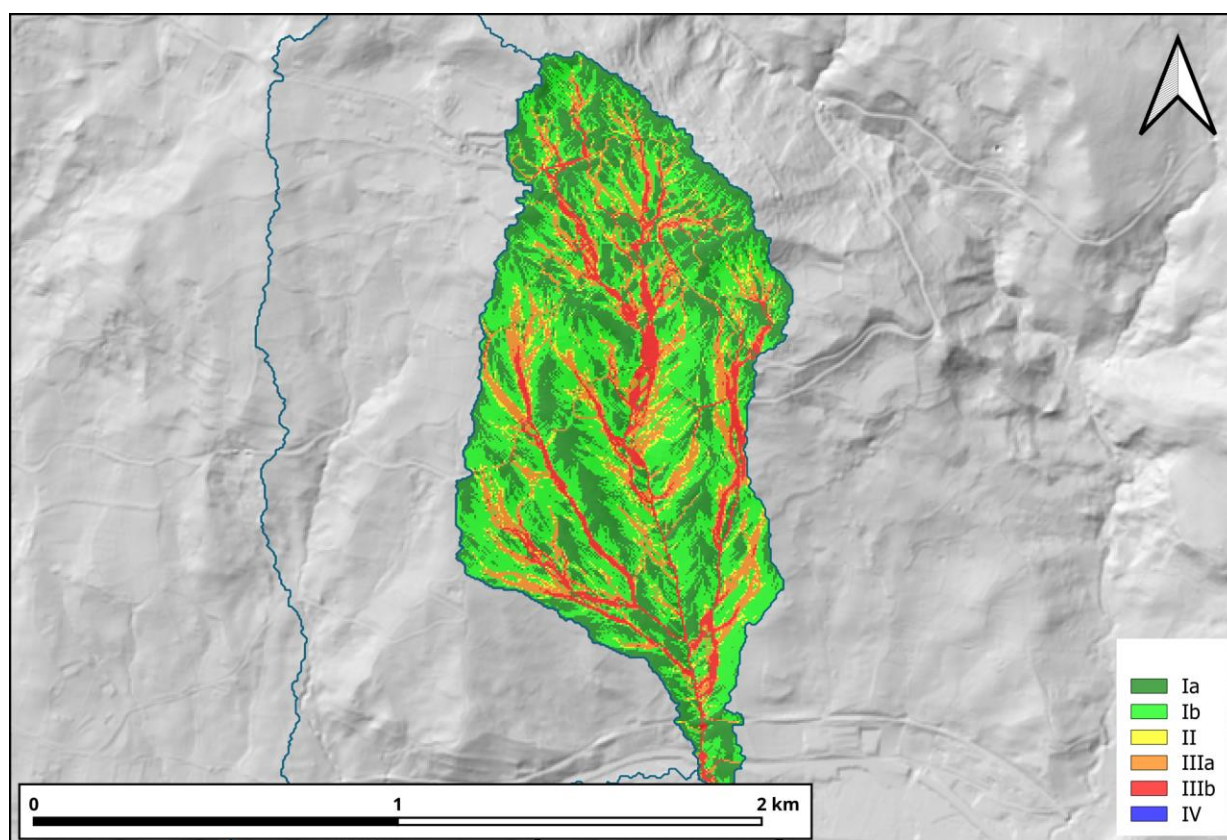


Figura 85 - Carta dei domini di processo relativi al bacino 12.

Successivamente, le classi di domini di processo superficiale sono state confrontate con i dati dell'inventario frane del PAI dell'Autorità di Distretto dell'Appennino Meridionale, Unità di Gestione della Basilicata (ex Autorità di Bacino Basilicata). Il confronto è stato finalizzato alla valutazione dell'incidenza delle varie classi sulla franosità, ovvero nella verifica di eventuale corrispondenza tra determinate classi di processo superficiale e la franosità presente in inventario. Data l'omogeneità delle tipologie di frane (scorrimenti, colate e complesse scorrimenti-colate) presenti in inventario, per il confronto è stato utilizzato l'intero dataset. Per il confronto è stato utilizzato il rapporto di frequenza (Delchiaro & alii, 2021):

$$FR_i = \frac{PL_i}{PF_i} = \frac{\text{the landslide frequency in the } F_i \text{ area}}{\text{the } F_i \text{ area frequency}} = \frac{\frac{\text{the landslide area in the } F_i \text{ area}}{\text{the } F_i \text{ area}}}{\frac{\text{the landslide area in the study area}}{\text{the study area}}}$$

I grafici seguenti mostrano i valori del rapporto di frequenza calcolato per ogni classe di dominio di processo a tutti i livelli gerarchici investigati. Dai risultati si evince che le classi predominanti nelle aree in frana sono la II, la IIIa e la IIIb, dove le ultime due mostrano il rapporto di frequenza maggiore in tutti gli scenari investigati (Figura 89).

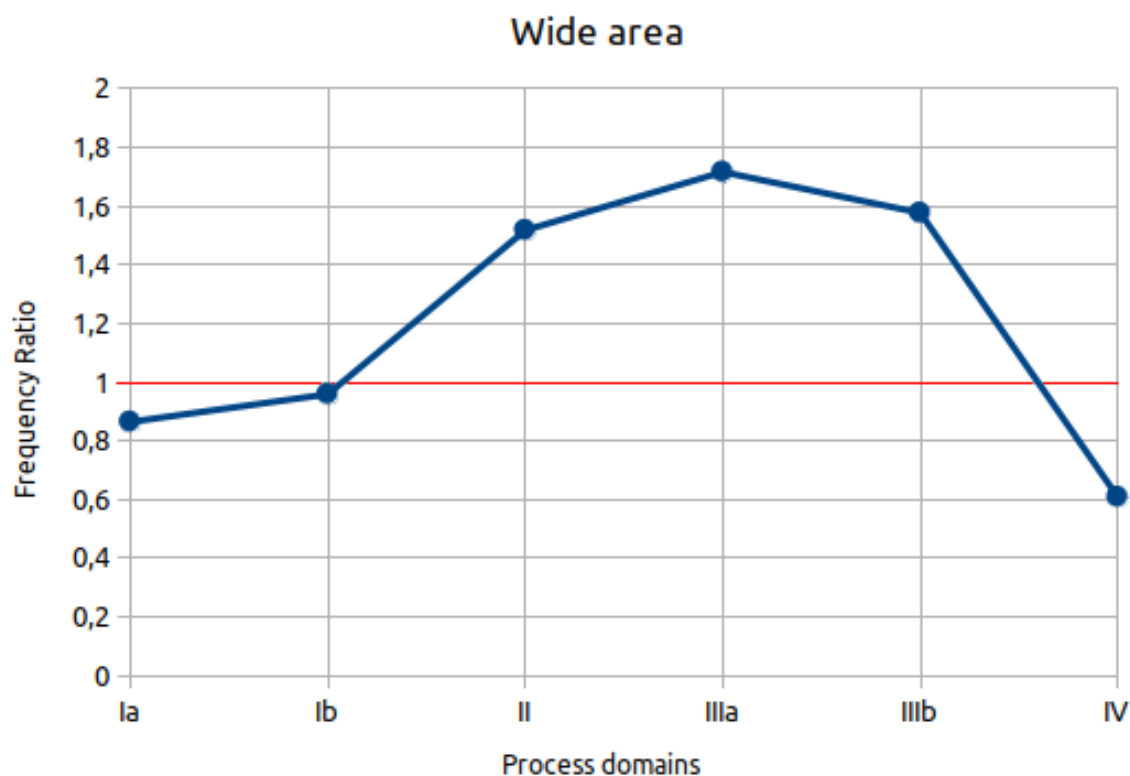


Figura 86 – Rapporto di frequenza per le classi di dominio di processo superficiale elaborati sull'area vasta.

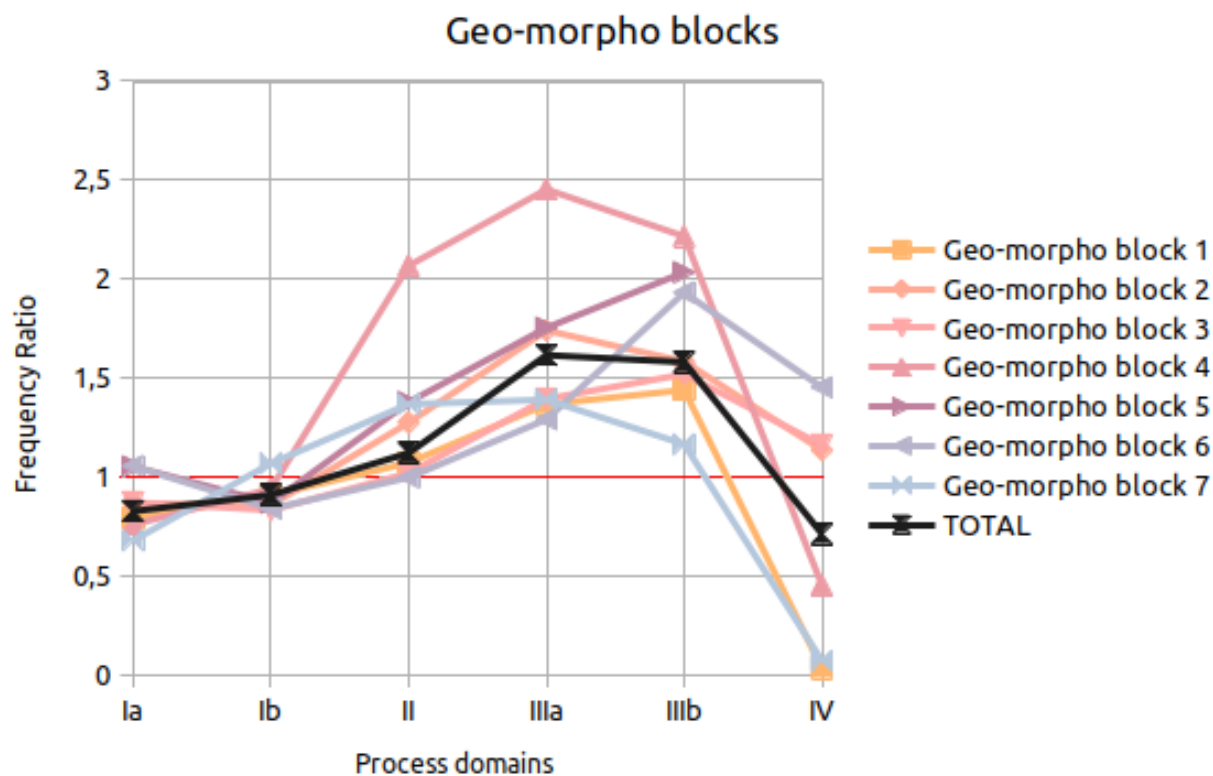


Figura 87 – Rapporto di frequenza per le classi di dominio di processo superficiale elaborati sui geo-morfoblocchi.

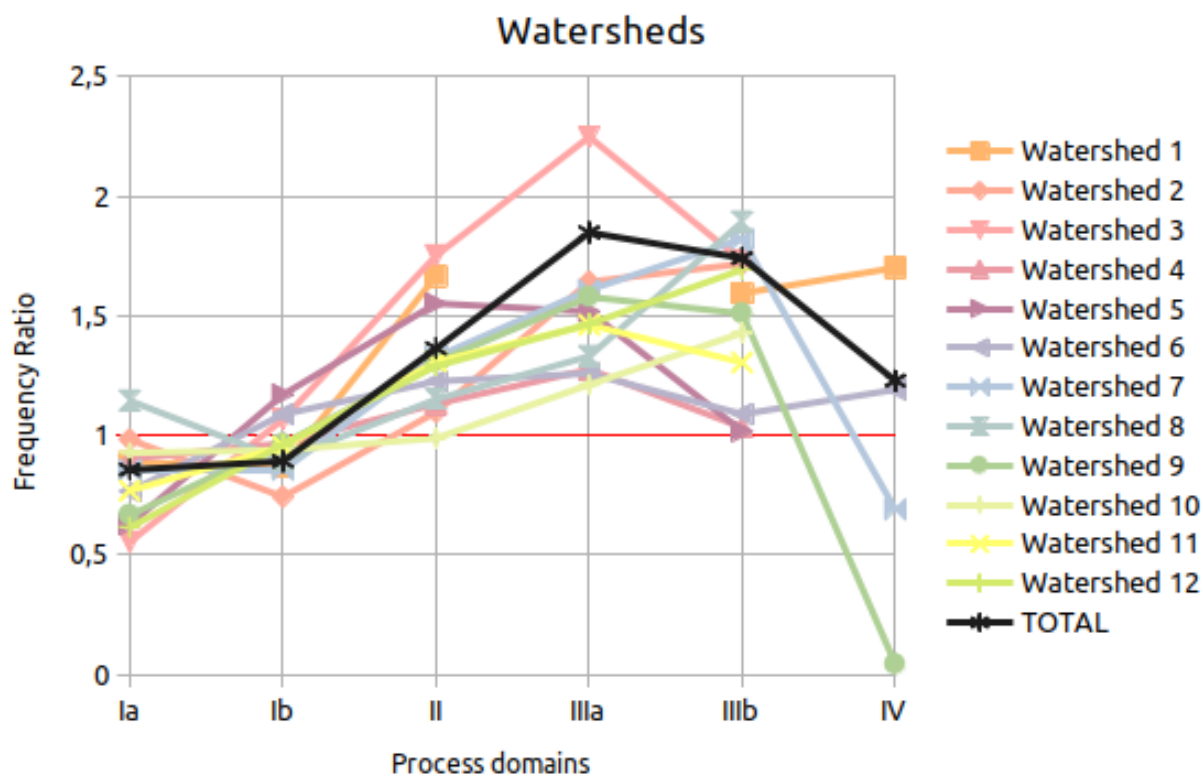


Figura 88 – Rapporto di frequenza per le classi di dominio di processo superficiale elaborati sui bacini idrografici.

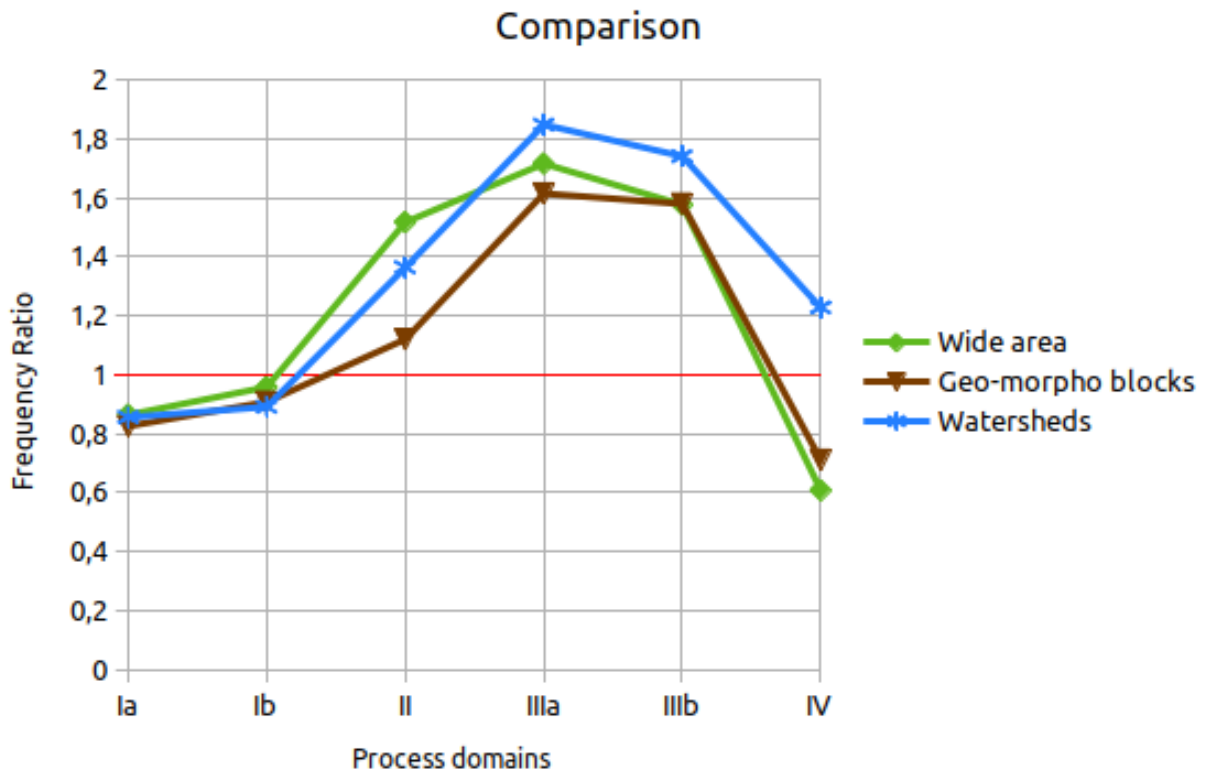


Figura 89 – Confronto tra i rapporti di frequenza per le classi di dominio di processo superficiale per le diverse unità di analisi.

2.4 Scheletro morfologico

Lo scheletro morfologico è un grafo costruito dall'estrazione dello scheletro matematico di una generica superficie (Pfaltz, 1976; Rana, 2004; Guilbert & alii, 2016, 2023; Wolf, 2017; Guilbert, 2021). Questo scheletro consiste di nodi, che rappresentano i punti critici della superficie topografica (massimi locali o picchi, minimi locali o fosse, selle locali o valichi), e archi che collegano le selle ai massimi (*ridgelines*) o le selle ai minimi (*courselines*), definiti anche linee critiche (Figura 90). Questa tipologia di dato è stato utilizzato per la caratterizzazione di superfici in una varietà di campi, tra cui computer grafica (Sahner & alii, 2008), geografia (Hu & alii, 2014), ingegneria dei materiali, elettronica e medicina (Senin & alii, 2013), oltre che per le superfici topografiche (Schneider, 2003; Bremer & alii, 2004; Rana, 2004; Blanc & alii, 2011; Clarke & Romero, 2017; Rocca & alii, 2017; Valiante, 2020). L'insieme di linee e punti critici definisce delle "regioni di versante" equiparabili alle *morse regions* di Pfaltz, 1976. Lo scheletro morfologico è stato utilizzato per l'individuazione di pattern caratteristici legati alle forme e ai processi gravitativi, in modo tale da supportare il riconoscimento di forme che potrebbero essere difficilmente individuabili con le consuete attività di telerilevamento, come l'analisi di immagini ottiche o l'interpretazione di dati topografici, a causa dell'età di determinati processi o della continua azione antropica, o più in generale della scarsa persistenza temporale di alcune forme. Alcuni pattern caratteristici identificati fanno riferimento a forme di accumulo o strutture lungo i crinali tipo *hydro-wedge* (Cascini & alii, 2008; Cuomo & Guida, 2016) (Figura 91). Oltre a queste topologie, sono stati rilevati anche alcuni casi in cui l'estrazione dello scheletro morfologico è disturbato da influenza antropiche, come ad esempio aree urbanizzate, tagli stradali, etc.

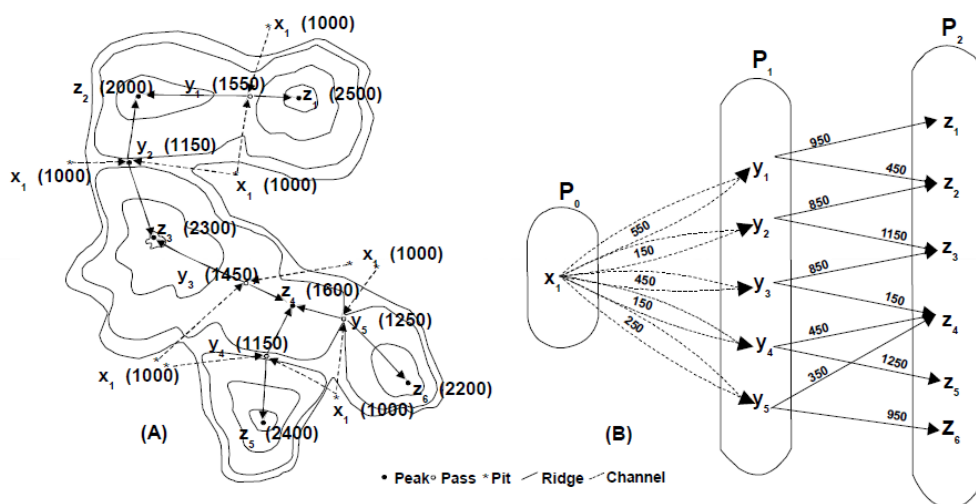


Figura 90 – Schema dello scheletro morfologico (Rana, 2000).

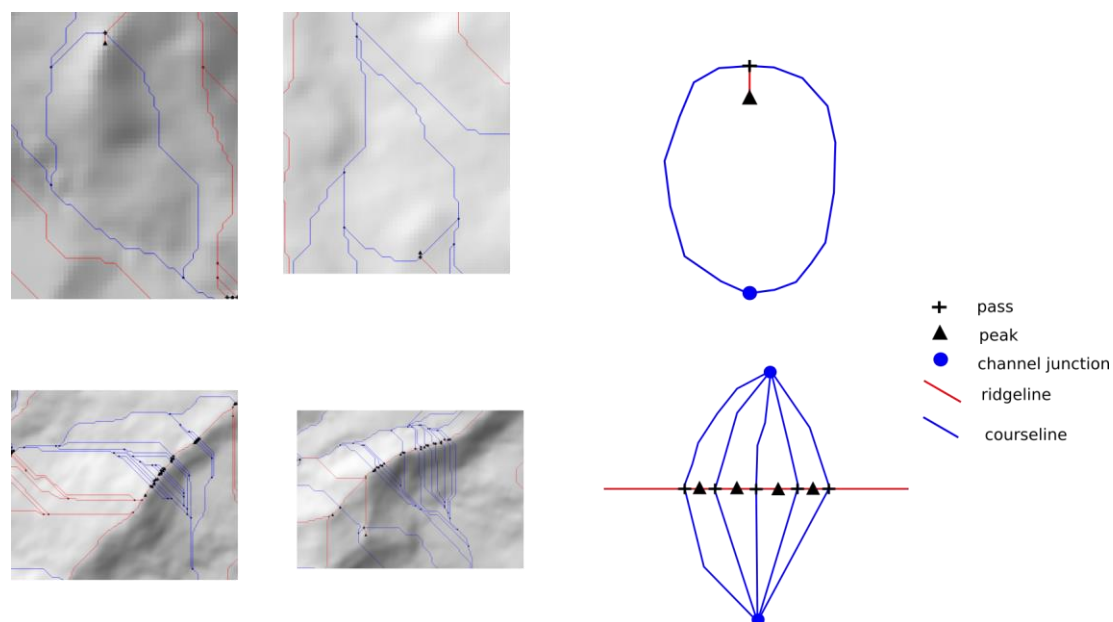


Figura 91 – Pattern caratteristici dello scheletro morfologico per forme di accumulo gravitative (in alto) e hydro-wedge (in basso) (Valiante, 2020).

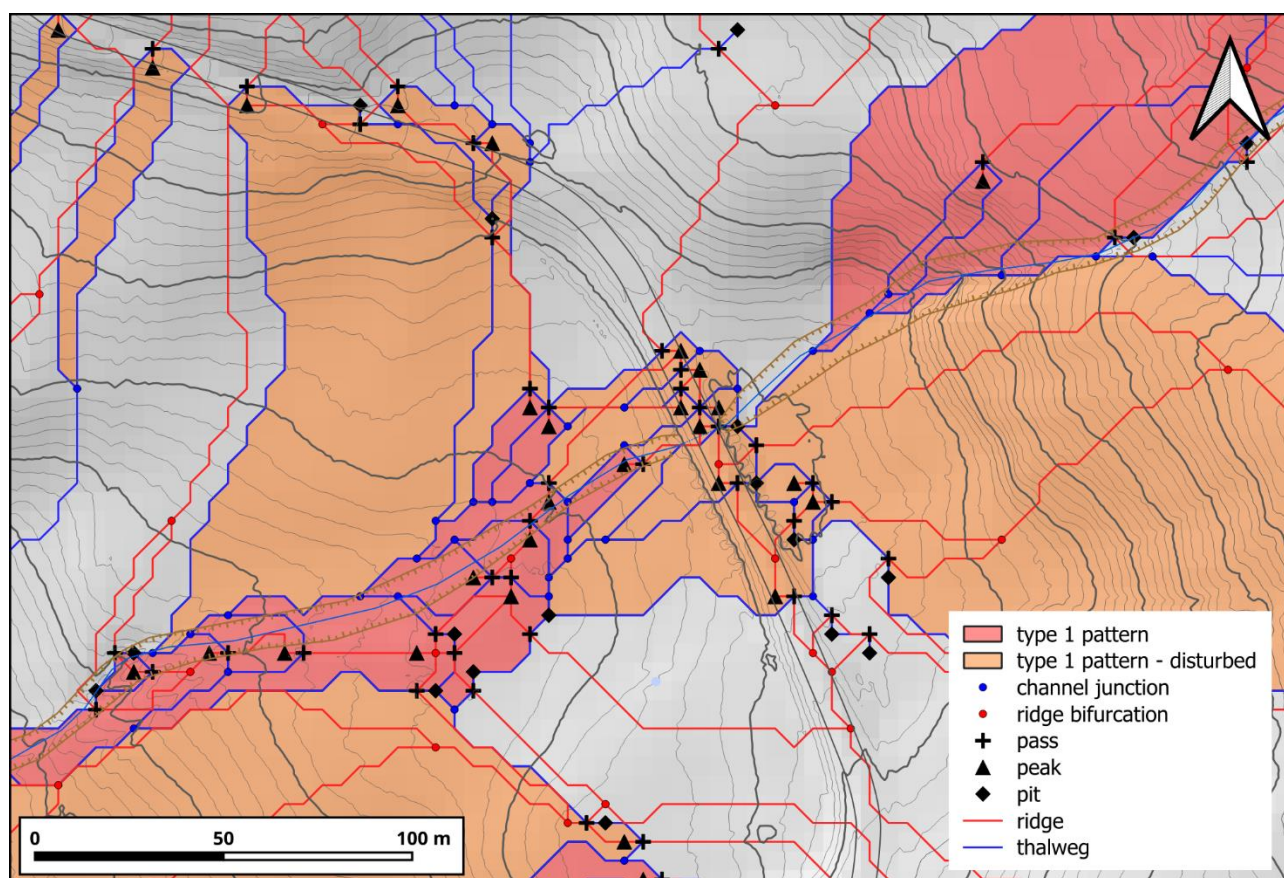


Figura 92 – Esempio di scheletro morfologico e relativi pattern. In rosso i pattern legati all'azione gravitativa, in arancio i pattern simili ai precedenti ma legati al disturbo di forme antropiche, come in questo caso un taglio stradale (dati CTR Basilicata e curve di livello da lidar Progetto MITIGO).

3. Analisi LOOM

Molto spesso le frane interagiscono con attività antropiche impattando su aree urbane, strutture o infrastrutture, come strade, galleria, ponti, viadotti, ferrovie, etc., o aree legate ad altre attività socioeconomiche causando perdite, oltre che umane, economiche (Crosta & alii, 2004; Bozzano & alii, 2017). In questo contesto, a volte, strutture o infrastrutture devono interagire con complesse sovrapposizioni spazio-temporali di frane piuttosto che con un movimento unico (Bozzano & alii, 2016; Valiante & alii, 2020). Tale complessità è dovuta a diverse disposizioni spazio-temporali di frane che deriva essenzialmente dalla successione temporale degli eventi franosi (Guida & alii, 1987, 2006; Corbi & alii, 1996; Cascini & alii, 2008; Valiante & alii, 2016). Oltre alla disposizione spazio-temporale delle frane, bisogna anche affrontare la complessità interna di un singolo movimento, ovvero descrivere quelle che sono le componenti o gli elementi che costituiscono una frana (Parise, 2003; Campobasso & alii, 2018, 2023; Morelli & alii, 2018). I comuni approcci per la costruzione di inventari, solitamente, non sono in grado di gestire questa complessità spazio-temporale sia per ragioni logiche che tecniche. Da un punto di vista logico non è ancora diffuso un modello comune per la descrizione di insiemi di frane, mentre da un punto di vista tecnico i comuni formati di archiviazione di inventari non consentono di gestire sovrapposizioni di oggetti.

Per la descrizione di sovrapposizioni spazio-temporali di insiemi di frane, Guida & alii, 1988 introdussero in concetto di Sistema Franoso, definito come “associazione di frane complesse (*sensu* Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996) riconducibili ad un unico meccanismo di deformazione originario che, nel corso della evoluzione a lungo termine, si concretizza in morfotipi differenziati per tipologia, per età e per grado di attività”. Successivamente, gli Autori hanno esteso la descrizione delle associazioni di frane basata sulla tipologia e sullo stato di attività (Guida & alii, 1995). Da allora, questo schema di classificazione e la relativa terminologia sono state utilizzate per la descrizione di complesse associazioni di frane su aree dell’Italia meridionale, in particolar modo ai fini della gestione delle emergenze e della valutazione della pericolosità da frana (Guida & alii, 2006; Coico, 2010; Autorità di Bacino Sinistra Sele, 2012; Coico & alii, 2013; Valiante & alii, 2016).

Partendo dal tema generale della definizione delle relazioni tra complesse sovrapposizioni/successioni spazio-temporali di frane, ai fini del progetto Mitigo è stato utilizzato un nuovo modello di inventario prototipato in Valiante & alii, 2020 e proposto in Valiante & alii, 2021, ovvero il modello LOOM (Landslide Object-Oriented Model - Modello Orientato agli Oggetti per le Frane). Tale modello definisce una ontologia basata sul concetto di “sistema di frane” per la descrizione delle associazioni di frane e le loro relazioni spazio-temporali e la implementa in una struttura di banca dati capace di immagazzinare sia l’informazione spaziale che temporale in un unico data-set, evitando la frammentazione del dato e l’inconsistenza logico-topologica. Tale struttura permette di derivare rapidamente informazioni circa il numero di fenomeni interagenti, la loro occorrenza relativa (quindi l’evoluzione di un versante), le loro relazioni spaziali e così via.

Il modello LOOM è stato sviluppato sulla base di una originale classificazione gerarchica e orientata agli oggetti definita in Valiante, 2020 a seguito della emanazione delle nuove linee guida per la cartografia geomorfologica (Campobasso & alii, 2018) e sulla base del lavoro prototipale di Dramis & alii, 2011. Il livello focale (livello 0) della gerarchia è composto dalle frane stesse definite dalla classe Frana, la quale a sua volta è specializzata in 21 sottoclassi in base alla tipologia principale di movimento. Due livelli di aggregazione descrivono gli insiemi di frane: i) i complessi di frana risultano dall’aggregazione di frane della stessa tipologia spazialmente connesse e, come per la classe precedente, la classe Complesso di frane è specializzata in 21 sottoclassi (livello +1); ii) i sistemi di frane sono definiti come insiemi di frane di diversa natura spazialmente connesse e sono descritti dalla classe Sistema di frane (livello +2). Due ulteriori livelli di scomposizione, invece, descrivono le componenti di frana, tramite la classe Componente di frana, a

specializzazione variabile in base alla tipologia focale (livello -1), e gli elementi di componenti di frana descritti nella classe Elemento di frana, anch'essi a specializzazione variabile (livello -2) (Figura 93).

Classe Frana (livello 0). In questo livello, le frane sono classificate secondo la classificazione di Hungr & alii, 2014. Le classi sono così definite considerando prima il tipo di movimento, quindi il materiale coinvolto. I 48 tipi originali proposti dagli autori vengono così raggruppati in 21 sottoclassi di frana (Tabella 2). Questa operazione di accorpamento si rende necessaria per i successivi passaggi di aggregazione.

Classe Complesso di frane (livello +1). La definizione di un complesso di frane è basata sul concetto di relazione spaziale tra i vari oggetti. Per generare un complesso di frane, è necessario che due oggetti appartenenti alla stessa classe di frana abbiano un certo grado di sovrapposizione spaziale. Essendo state definite 21 classi di frana, ne deriva lo stesso numero di classi di complessi di frane.

Classe Sistema di frane (livello +2). La classe sistema di frane è costruita dall'aggregazione delle due classi precedenti. Se più frane o complessi di frane appartenenti a classi diverse si ritrovano in sovrapposizione spaziale, l'insieme di oggetti può essere aggregato in un unico sistema di frane.

Classe Componente di frana (livello -1). Le classi di componente di frana descrivono le principali sezioni di cui è composta una frana di qualsiasi tipologia, generalmente zone di distacco, transito e accumulo. Nell'ambito del progetto Mitigo sono state definite le sole componenti necessarie per le classi di frana effettivamente utilizzate.

Classe Elemento di frana (livello -2). Gli elementi di frana scompongono ulteriormente le componenti in una serie di sotto-oggetti utili per una rappresentazione di estremo dettagli ed una ottimale caratterizzazione del fenomeno franoso. Gli elementi di frana, a differenza delle classi gerarchicamente superiori, possono venire rappresentate anche con geometrie di tipo lineare o puntuale. Come per le componenti, anche gli elementi utilizzati in questo lavoro fanno riferimento alle classi effettivamente utilizzate.

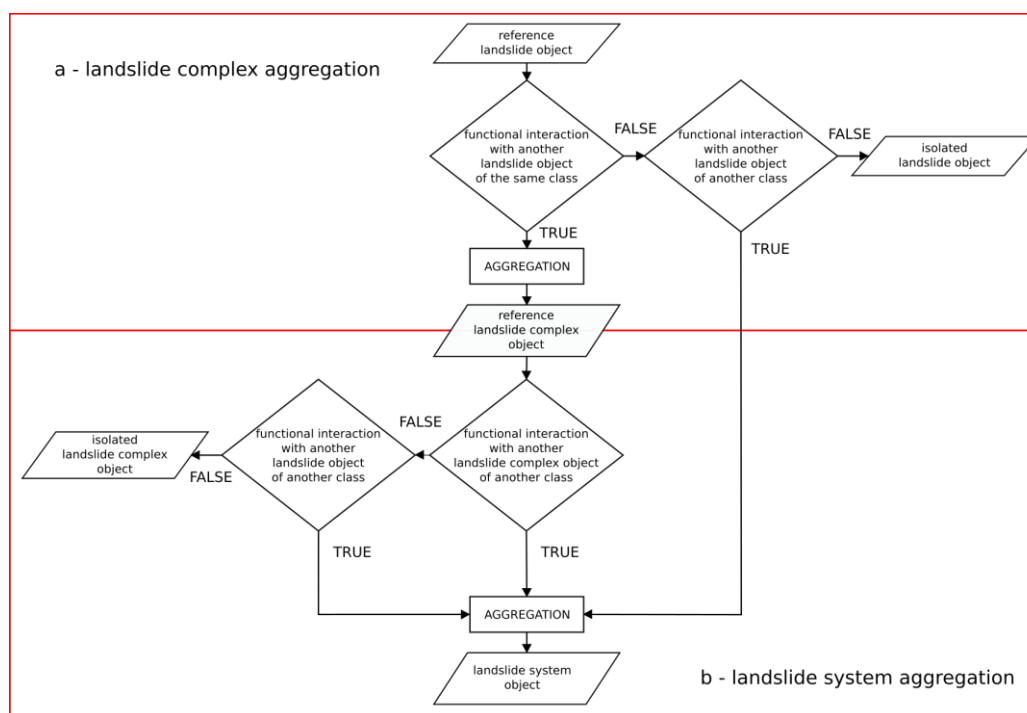


Figura 93 – Procedure di aggregazione del modello LOOM.

Tabella 2 – Classi dei livelli 0, +1 e +2 del modello LOOM.

| Classe Sistema di frane (livello +2) | Classe Complesso di frane (livello +1) | Classe Frana (livello 0) |
|--------------------------------------|--|---|
| | Sottoclasse Complesso di crolli di roccia | Sottoclasse Crollo di roccia |
| | Sottoclasse Complesso di crolli di terra | Sottoclasse Crollo di terra |
| | Sottoclasse Complesso di ribaltamenti di roccia | Sottoclasse Ribaltamento di roccia |
| | Sottoclasse Complesso di ribaltamenti di terra | Sottoclasse Ribaltamento di suolo |
| | Sottoclasse Complesso di scorrimenti rotazionali di roccia | Sottoclasse Scorrimento rotazionale di roccia |
| | Sottoclasse Complesso di scorrimenti planari di roccia | Sottoclasse Scorrimento planare di roccia |
| | Sottoclasse Complesso di scorrimenti di cunei di roccia | Sottoclasse Scorrimento di cuneo di roccia |
| | Sottoclasse Complesso di scorrimenti composti di roccia | Sottoclasse Scorrimento composto di roccia |
| | Sottoclasse Complesso di scorrimenti irregolari di roccia | Sottoclasse Scorrimento irregolare di roccia |
| | Sottoclasse Complesso di scorrimenti rotazionali di terra | Sottoclasse Scorrimento rotazionale di terra |
| | Sottoclasse Complesso di scorrimenti planari di terra | Sottoclasse Scorrimento planare di terra |
| | Sottoclasse Complesso di scorrimenti composti di terra | Sottoclasse Scorrimento composto di terra |
| | Sottoclasse Complesso di espansioni di roccia | Sottoclasse Espansione di roccia |
| | Sottoclasse Complesso di espansioni di terra granulare | Sottoclasse Espansione di terra granulare |
| | Sottoclasse Complesso di espansioni di terra coesiva | Sottoclasse Espansione di terra coesiva |
| | Sottoclasse Complesso di valanghe di roccia | Sottoclasse Valanga di roccia |
| | Sottoclasse Complesso di flussi secchi di terra | Sottoclasse Flusso secco di terra |
| | Sottoclasse Complesso di colate di terra granulare | Sottoclasse Colata di terra granulare |
| | Sottoclasse Complesso di colate di terra coesiva | Sottoclasse Colata di terra coesiva |
| | Sottoclasse Complesso di deformazioni profonde | Sottoclasse Deformazione profonda |
| | Sottoclasse Complesso di deformazioni superficiali di versante | Sottoclasse Deformazione superficiale di versante |

3.1 Fonti multitemporali

Per la ricostruzione degli eventi franosi, seguendo il modello di Dramis & alii, 2011, 2022 (Figura 94) sono state consultate diverse fonti multitemporali, tra cui basi topografiche storiche e recenti (IGN, CASMEZ, CTR), immagini ottiche aeree e satellitari (da volo GAI 1954, fino alle più recenti immagini Google 2021), inventari pubblici pregressi (PAI ex AdB Basilicata, IFFI) e inventari specifici derivati da pubblicazioni scientifiche (Guida & Iaccarino, 1991; Corbi & alii, 1996; Lazzari, 2011).

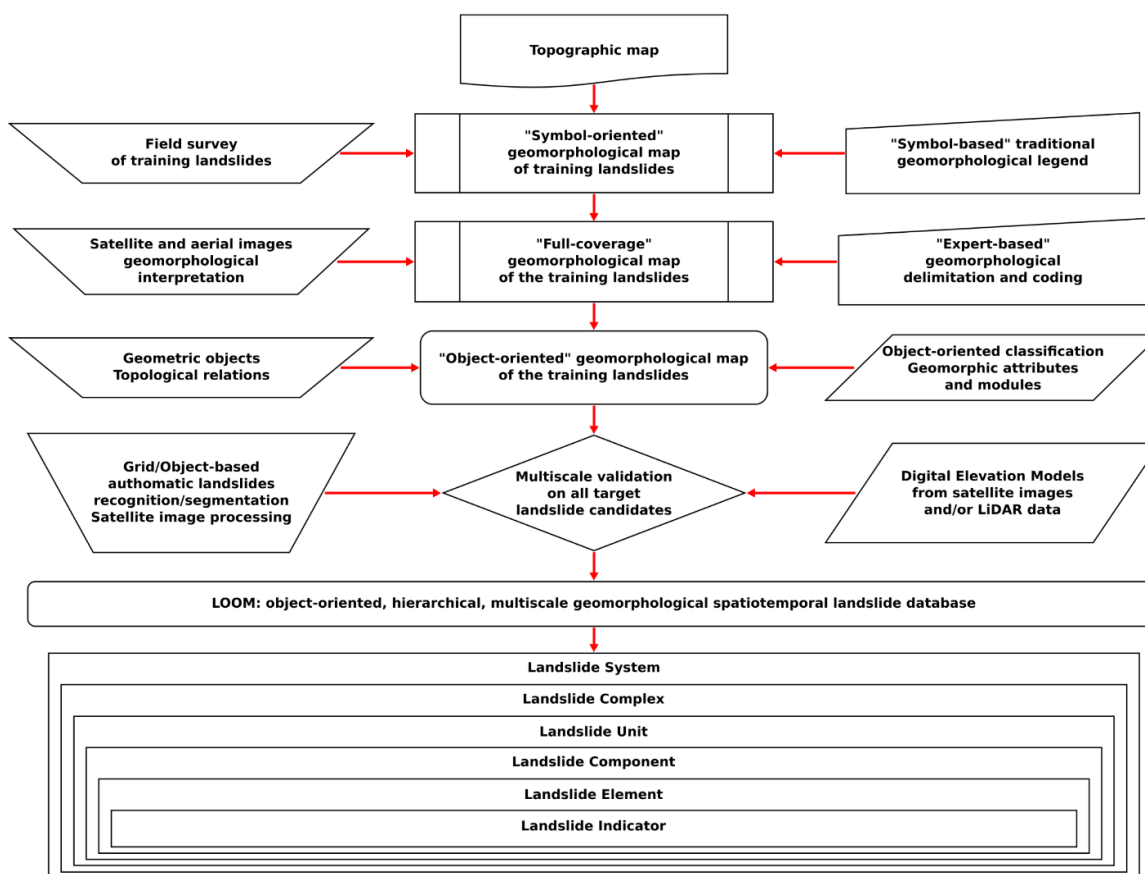


Figura 94 – Procedura di popolamento della banca dati LOOM (Dramis & alii, 2022).

3.2 Ambiti morfologici

Oltre all'individuazione di pattern peculiari, lo scheletro morfologico è stato anche utilizzato per la definizione dell'ambito morfologico degli oggetti LOOM, definito nella sua accezione topologica come l'areale che contiene interamente una forma e il suo intorno vago (*sensu* Clementini, 2004; Guilbert & *alii*, 2016; Guilbert & Moulin, 2017). L'ambito viene così costruito a partire dagli oggetti di riferimento, collezionando tutte quelle regioni individuate dallo scheletro morfologico che hanno una relazione topologica almeno bidimensionale con l'oggetto di riferimento (Figura 95).

3.3 Risultati

3.3.1 Area campione di Vaglio Basilicata

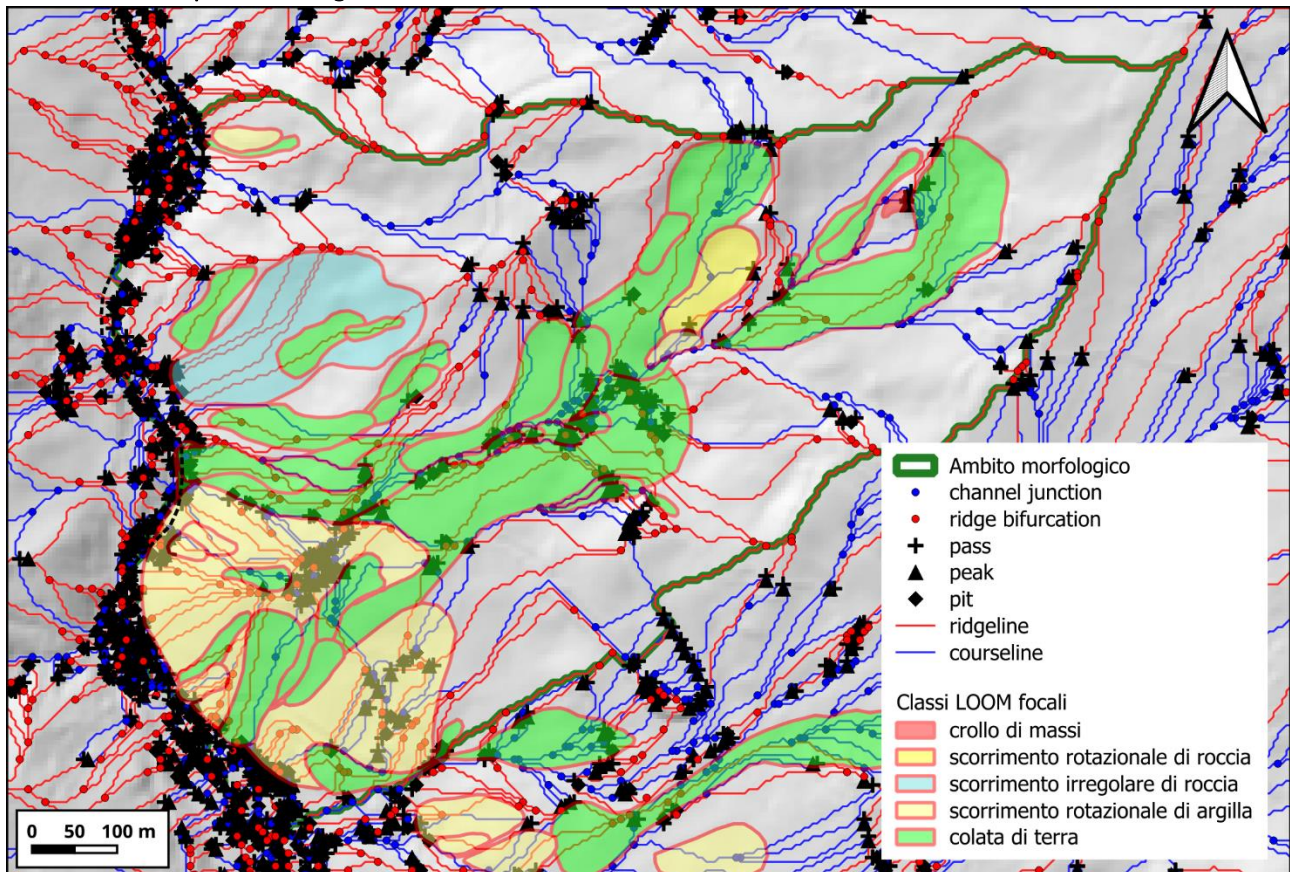


Figura 95 – Esempio di ambito morfologico.

3.3.2 Area campione di Trivigno

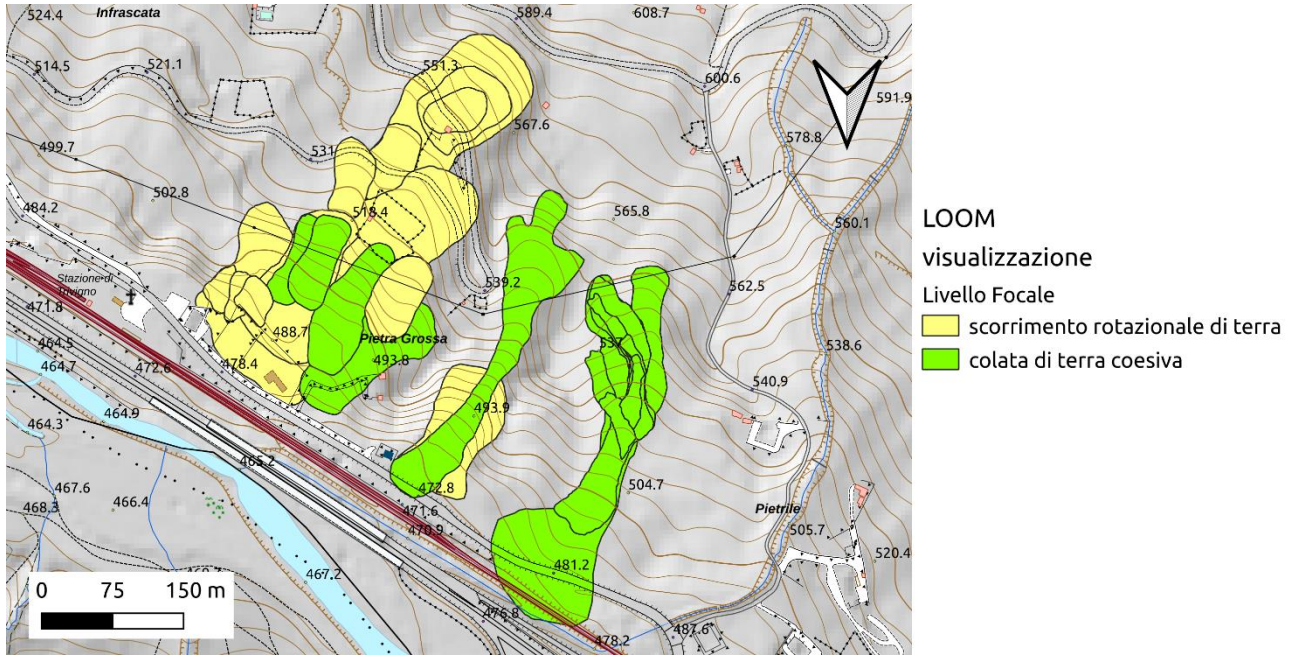


Figura 96 – Livello 0 LOOM per l'area campione di Trivigno.

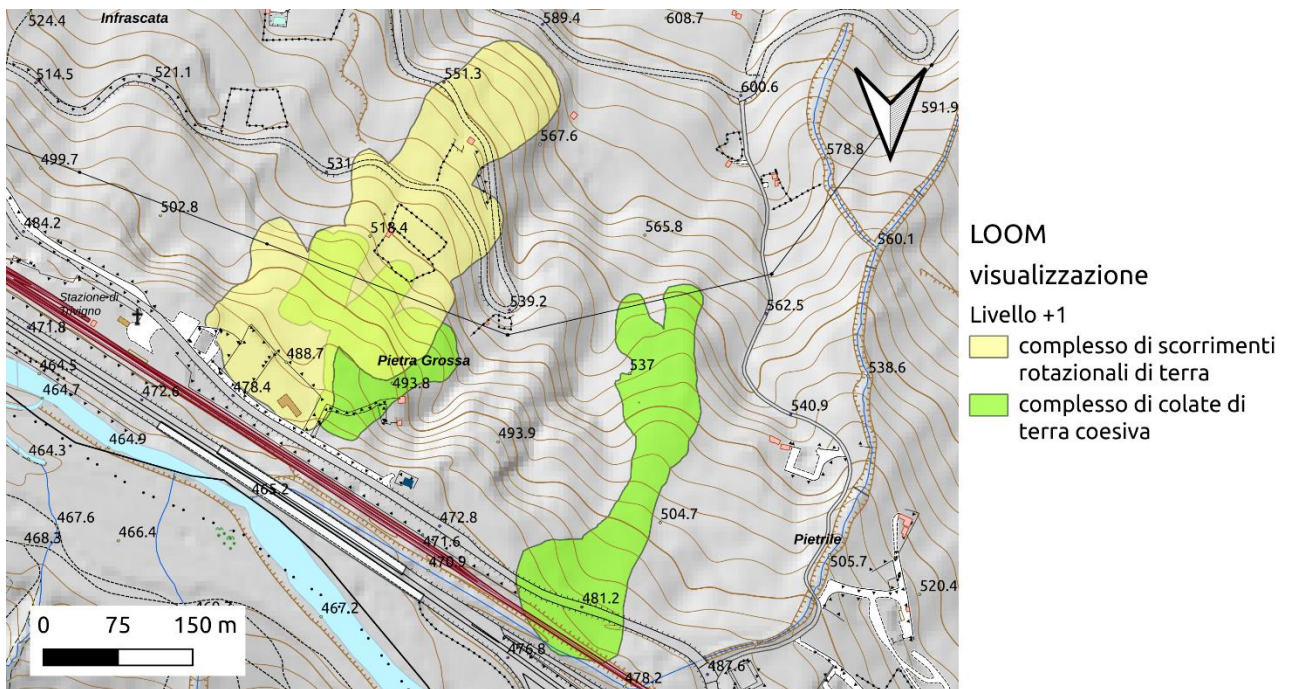
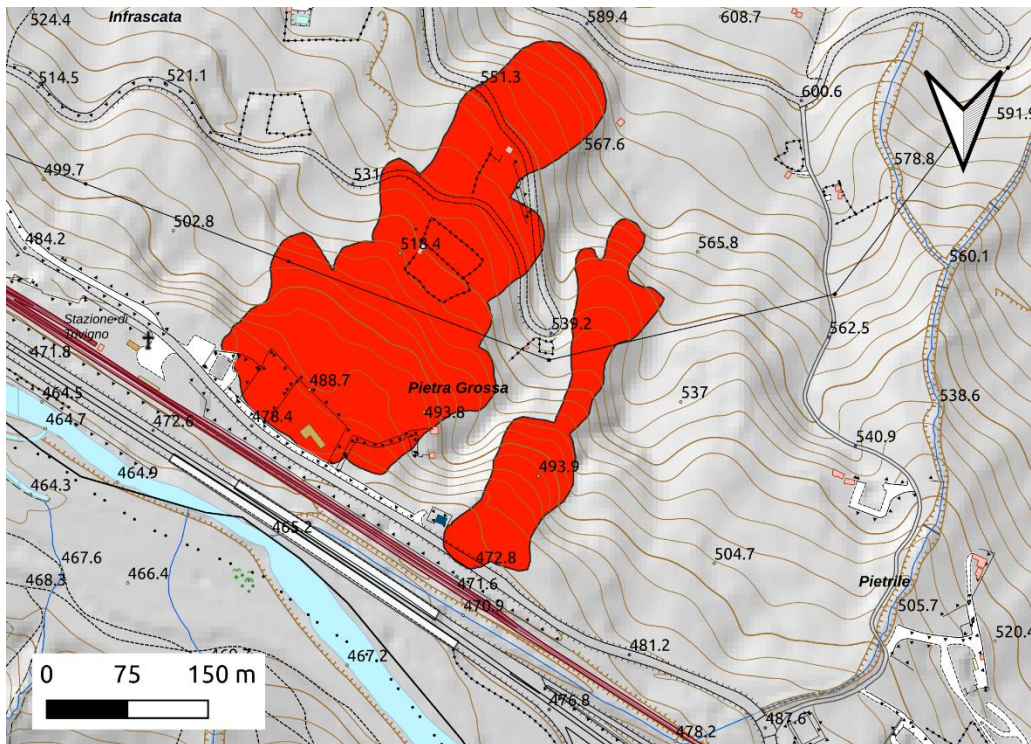
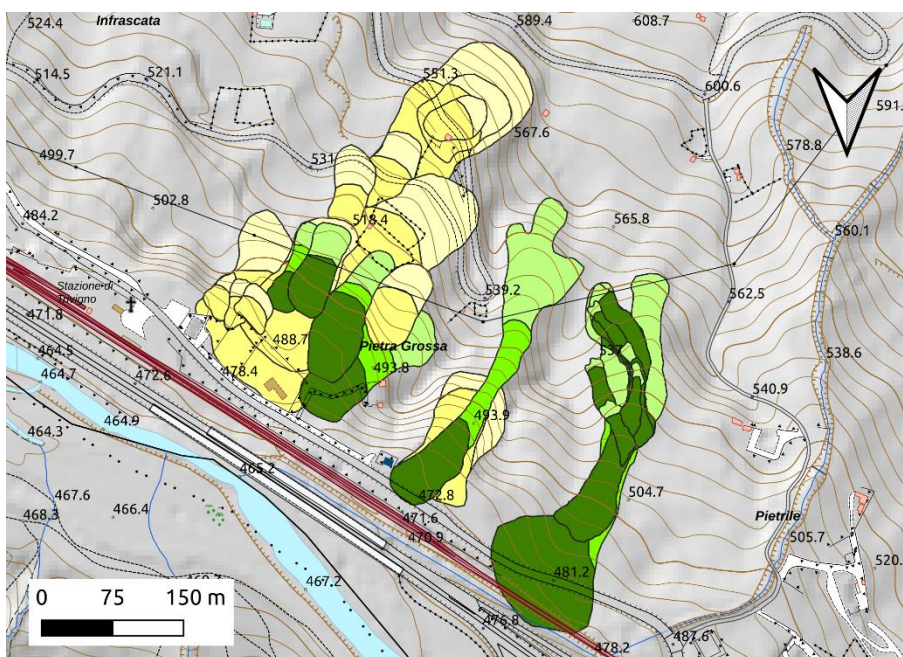


Figura 97 – Livello +1 LOOM per l'area campione di Trivigno.



LOOM
visualizzazione
■ Livello +2
sistema di frane

Figura 98 – Livello +2 LOOM per l'area campione di Trivigno.



LOOM
visualizzazione
Livello -1
■ area di recapito di colata di terra coesiva
■ area sorgente di colata di terra coesiva
■ canale di transito di colata di terra coesiva
■ area di distacco di scorrimento rotazionale di terra
■ accumulo di scorrimento rotazionale di terra

Figura 99 – Livello -1 LOOM per l'area campione di Trivigno.

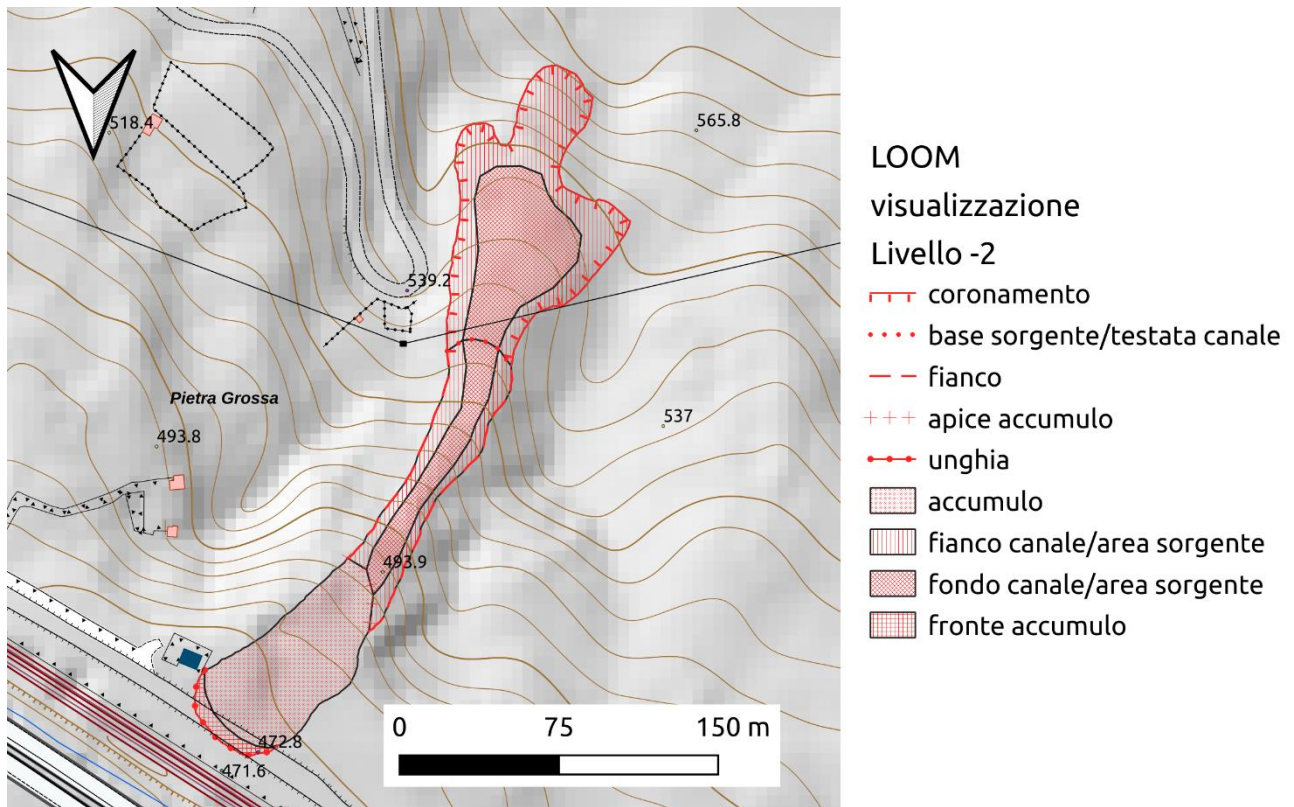


Figura 100 – Livello -2 LOOM per l'area campione di Trivigno relativo ad un singolo evento.

Bibliografia

- AUTORITÀ DI BACINO SINISTRA SELE (2012) - *Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico*. Sinistra Sele River Basin Authority, PSAI.
- BLANC J., GRIME D. & BLATEYRON F. (2011) - *Surface characterization based upon significant topographic features*. Journal of Physics: Conference Series, 311 (1), 6. doi: 10.1088/1742-6596/311/1/012014
- BLASCHKE T., HAY G.J., KELLY M., LANG S., HOFMANN P., ADDINK E., QUEIROZ FEITOSA R., VAN DER MEER F., VAN DER WERFF H., VAN COILLIE F. & TIEDE D. (2014) - *Geographic Object-Based Image Analysis - Towards a new paradigm*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 87, 180–191. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.09.014
- BOOTH A.M., ROERING J.J. & REMPEL A.W. (2013) - *Topographic signatures and a general transport law for deep-seated landslides in a landscape evolution model*. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 118 (2), 603–624. doi: 10.1002/jgrf.20051
- BOZZANO F., DELLA SETA M. & MARTINO S. (2016) - *Time-dependent evolution of rock slopes by a multi-modelling approach*. Geomorphology, 263, 113–131. doi: 10.1016/j.geomorph.2016.03.031
- BOZZANO F., CAPOROSSO P., ESPOSITO C., MARTINO S., MAZZANTI P., MORETTO S., SCARASCIA MUGNOZZA G. & RIZZO A.M. (2017) - *Mechanism of the Montescaglioso Landslide (Southern Italy) Inferred by Geological Survey and Remote Sensing*. In: Advancing Culture of Living with Landslides. Mikos M., Tiwari B., Yin Y. & Sassa K. (A c. di), Springer, Cham, 97–106 pp. doi: 10.1007/978-3-319-53498-5
- BREMER T., EDELSBRUNNER H., HAMANN B. & PASCUCCI V. (2004) - *A Topological Hierarchy for Functions on Triangulated Surfaces*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 10 (4), 385–396.
- CAMPOBASSO C., CARTON A., CHELLI A., D'OREFICE M., DRAMIS F., GRACIOTTI R., GUIDA D., PAMBIANCHI G., PEDUTO F. & PELLEGRINI L. (2018) - *Aggiornamento ed integrazioni delle linee guida della Carta Geomorfologica d'Italia alla scala 1:50.000*. ISPRA,.
- CAMPOBASSO C., PAMBIANCHI G., PEDUTO F., CESTARI A., CHELLI A., CONGI M.P., D'OREFICE M., DE AMICIS M., DRAMIS F., GRACIOTTI R., GUIDA D., PALMIERI V., PELLEGRINI L., VALIANTE M. & VENTURA R. (2023) - *Proposta di un*



nuovo modello di cartografia geomorfologica a indirizzo applicativo - Carta Geomorfologica d'Italia - 1:50.000. ISPRA, Roma,.

- CASCINI L., CUOMO S. & GUIDA D. (2008) - *Typical source areas of May 1998 flow-like mass movements in the Campania region, Southern Italy.* Engineering Geology, 96 (3–4), 107–125. doi: 10.1016/j.enggeo.2007.10.003
- CLARKE K.C. & ROMERO B.E. (2017) - *On the topology of topography: a review.* Cartography and Geographic Information Science, 44 (3), 271–282. doi: 10.1080/15230406.2016.1164625
- CLEMENTINI E. (2004) - *Modeling Spatial Objects affected by Uncertainty.* In: Spatio-Temporal Databases. de Caluwe R., de Tré G. & Bordogna G. (A c. di), Springer, 211–236 pp.
- COICO P. (2010) - *Analisi a scala regionale dei sistemi ambientali interessati da scenari di multirischio idrogeologico.* Università di Napoli Federico II, 210 pp.
- COICO P., CALCATERRA D., DE PIPPO T. & GUIDA D. (2013) - *A Preliminary Perspective on Landslide Dams of Campania Region, Italy.* Landslide Science and Practice, 6, 83–90. doi: 10.1007/978-3-642-31427-8
- CORBI I., GUIDA M., TETAMO G. & VALLARIO A. (1996) - *Considerazioni sul rischio a franare di aree campione nel bacino del Fiume Biferno (Molise).* Memorie della Società Geologica Italiana, 51, 1087–1100.
- CROSTA G.B., CHEN H. & LEE C.F. (2004) - *Replay of the 1987 Val Pola Landslide, Italian Alps.* Geomorphology, 60 (1–2), 127–146. doi: 10.1016/j.geomorph.2003.07.015
- CRUDEN D.M. & VARNES D.J. (1996) - *Landslides Types and Processes.* In: Landslides: Investigation and Mitigation. National Research Council Transportation Research Board, USA, 77 pp.
- CUOMO A. & GUIDA D. (2016) - *Using hydro-chemograph analyses to reveal runoff generation processes in a Mediterranean catchment.* Hydrological Processes, 30 (24), 4462–4476. doi: 10.1002/hyp.10935
- DE PIPPO T., GUIDA D., VALENTE A. & LIMONGI P. (2008) - *Cartografia geomorfologica costiera in ambiente GIS ai fini della pianificazione territoriale nell'area compresa tra Sapri e Maratea.* Atti del Convegno Nazionale di Maratea 15-17 maggio 2008, 595–604.

- DELCHIARO M., ROUHI J., VALIANTE M., DELLA SETA M., ESPOSITO C. & MARTINO S. (2021) - *Bivariate landslide susceptibility analysis in the Lorestan Arc (Zagros Mountains, Iran)*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 1 (Special 1), 53–66. doi: 10.4408/IJEGE.2021-01.S-05
- DRAMIS F., GUIDA D. & CESTARI A. (2011) - *Nature and Aims of Geomorphological Mapping*. In: Geomorphological Mapping: methods and applications. Smith M.J., Paron P. & Griffiths J.S. (A c. di), Elsevier, Oxford, 39–74 pp.
- DRAMIS F., GUIDA D. & VALIANTE M. (2022) - *Object-Oriented Mapping as a Tool for the Assessment of Landslide Hazard in Higly Urbanized Areas*. Frontiers in Earth Science, 10 (February), 1–18. doi: 10.3389/feart.2022.834078
- GUIDA D., GUIDA M., PERRIELLO ZAMPELLI S., VALLARIO A. & VIGGIANI A.S. (1987) - *Deformazioni gravitative al margine di morfostrutture carbonatiche: un esempio nel Monte Bulgheria (Campania)*. Memorie della Società Geologica Italiana, 37, 363–373.
- GUIDA D., IACCARINO G. & PERRONE V. (1988) - *Nuovi dati sulla successione del flysch del cilento nell'area di Monte Centaurino: relazioni tra unità litostratigrafiche, unità litotecniche e principali sistemi franosi*. Memorie della Società Geologica Italiana, 41, 299–310.
- GUIDA D. & IACCARINO G. (1991) - *Geologia e frane e Carta Inventario delle frane dell'Alta Valle del Basento*.
- GUIDA D., IACCARINO G., LANZARA R. & PEDUTO F. (1995) - *Proposta di classificazione tassonomica dei fenomeni franosi*. Giornate poster sulle ricerche del Gruppo Geomineralogico, V Conferenza Scientifica Annuale del Dipartimento di Scienze della Terra, Univ. "Federico II", Napoli.
- GUIDA D., NOCERA N. & SIERVO V. (2006) - *Analisi morfoevolutiva sulla riattivazione di sistemi franosi a cinematismo intermittente in Appennino campano-lucano (Italia meridionale)*. Giornale Di Geologia Applicata, 3, 114–122. doi: 10.1474/GGA.2006-03.0-15.0108
- GUIDA D., CUOMO A. & PALMIERI V. (2016) - *Using object-based geomorphometry for hydro-geomorphological analysis in a Mediterranean research catchment*. Hydrology and Earth System Sciences, 20 (9), 3493–3509. doi: 10.5194/hess-20-3493-2016

- GUILBERT E., MOULIN B. & CORTÉS MURCIA A. (2016) - *a Conceptual Model for the Representation of Landforms Using Ontology Design Patterns*. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, III-2 (July), 15–22. doi: 10.5194/isprsannals-III-2-15-2016
- GUILBERT E. & MOULIN B. (2017) - *Towards a Common Framework for the Identification of Landforms on Terrain Models*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 6 (1), 12. doi: 10.3390/ijgi6010012
- GUILBERT E. (2021) - *Surface network extraction from high resolution digital terrain models*. Journal of Spatial Information Science (22), 33–59. doi: 10.5311/JOSIS.2021.22.681
- GUILBERT E., LESSARD F., PERREAULT N. & JUTRAS S. (2023) - *Surface network and drainage network: towards a common data structure*. Journal of Spatial Information Science (26), 53–77. doi: 10.5311/JOSIS.2023.26.240
- GUZZETTI F., MONDINI A.C., CARDINALI M., FIORUCCI F., SANTANGELO M. & CHANG K.T. (2012) - *Landslide inventory maps: New tools for an old problem*. Earth-Science Reviews, 112 (1–2), 42–66. doi: 10.1016/j.earscirev.2012.02.001
- HEYWOOD I., CORNELIUS S. & CARVER S. (2006) - *An introduction to geographical information systems*. Pearson, 464 pp.
- HU Z., TANG G. & LU G. (2014) - *A new geographical language: A perspective of GIS*. Journal of Geographical Sciences, 24 (3), 560–576. doi: 10.1007/s11442-014-1106-2
- HUNGR O., LEROUEIL S. & PICARELLI L. (2014) - *The Varnes classification of landslide types, an update*. Landslides, 11 (2), 167–194. doi: 10.1007/s10346-013-0436-y
- LAZZARI M. (2011) - *Carta inventario delle frane della Basilicata centro-occidentale*.
- MONTGOMERY D.R. & FOUFOULA-GEORGIU E. (1993) - *Channel Network Source Representation Using Digital Elevation Models*. Water Resources Research, 29 (12), 3925–3934. doi: 10.1029/93WR02463
- MORELLI S., PAZZI V., FRODELLA W. & FANTI R. (2018) - *Kinematic Reconstruction of a Deep-Seated Gravitational Slope Deformation by Geomorphic Analyses*. Geosciences, 8 (1), 26. doi: 10.3390/geosciences8010026

- PARISE M. (2003) - *Observation of surface features on an active landslide , and implications for understanding its history of movement*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3 (6), 569–580.
- PFALTZ J.L. (1976) - *Surface Networks*. *Geographical Analysis*, 8 (1), 77–93. doi: 10.1111/j.1538-4632.1976.tb00530.x
- RANA S.S. (2000) - *Experiments on generalization and visualization of surface networks*. UCL CENTRE FOR ADVANCED SPATIAL ANALYSIS - Working Paper Series.
- RANA S.S. (2004) - *Surface Networks : New techniques for their automated extraction , generalisation and application*. University College of London, 128 pp.
- REGIONE CAMPANIA (2021) - *Metodologie per la valutazione puntuale del rischio idrogeologico in aree fortemente antropizzate e strumenti per le strategie di sviluppo regionale - Applicazioni al caso studio del «Corridoio Infrastrutturale Strategico» (CIS) di livello regionale: tratto autostradale Salerno-Cava de' Tirreni - A3 Napoli-Salerno e delle altre infrastrutture viarie a valle dello stesso*. UniorPress, Napoli, 325 pp.
- ROCCA L., JENNY B. & PUPPO E. (2017) - *A continuous scale-space method for the automated placement of spot heights on maps*. *Computers and Geosciences*, 109 (January), 216–227. doi: 10.1016/j.cageo.2017.09.003
- SAHNER J., WEBER B., PROHASKA S. & LAMECKER H. (2008) - *Extraction of feature lines on surface meshes based on discrete morse theory*. *Computer Graphics Forum*, 27 (3), 735–742. doi: 10.1111/j.1467-8659.2008.01202.x
- SCHNEIDER B. (2003) - *Surface Networks: Extension of the Topology and Extraction from Bilinear Surface Patches*. Proceedings of the 7th International Conference on Geocomputation.
- SEIJMONSBERGEN A.C. (HARRY), HENGL T. & S. A.N. (2011) - *Semi-Automated Identification and Extraction of Geomorphological Features Using Digital Elevation Data*. In: *Geomorphological Mapping: methods and applications*. Smith M.J., Paron P. & Griffiths J.S. (A c. di), Elsevier, 297–335 pp.

- SENIN N., BLUNT L.A., LEACH R.K. & PINI S. (2013) - *Morphologic segmentation algorithms for extracting individual surface features from areal surface topography maps*. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 1 (1), 1–11. doi: 10.1088/2051-672X/1/1/015005
- TAGIL S. & JENNESS J. (2008) - *GIS-based automated landform classification and topographic, landcover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey*. *Journal of Applied Sciences*, 8 (6), 910–921.
- TSENG C.M., LIN C.W., DALLA FONTANA G. & TAROLLI P. (2015) - *The topographic signature of a major typhoon*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40 (8), 1129–1136. doi: 10.1002/esp.3708
- VALIANTE M., BOZZANO F. & GUIDA D. (2016) - *The Sant'Andrea-Molinello landslide system (Mt. Pruno, Roscigno, Italy)*. *Rendiconti Online della Società Geologica Italiana*, 41, 214–217. doi: <https://doi.org/10.3301/ROL.2016.132>
- VALIANTE M., BOZZANO F., DELLA SETA M. & GUIDA D. (2020) - *A Hierarchical Model for the Rocca di Sciara Northeastern Slope Instabilities (Sicily, Italy)*. In: *Applied Geology*. De Maio M. & Kumar Tiwari A. (A c. di), Springer International Publishing, Cham, 131–144 pp. doi: 10.1007/978-3-030-43953-8_8
- VALIANTE M. (2020) - *Integration of object-oriented modelling and geomorphometric methodologies for the analysis of landslide systems*. Sapienza University of Rome,.
- VALIANTE M., GUIDA D., DELLA SETA M. & BOZZANO F. (2021) - *A spatiotemporal object-oriented data model for landslides (LOOM)*. *Landslides*, 18 (4), 1231–1244. doi: 10.1007/s10346-020-01591-4
- VARNES D.J. (1978) - *Slope Movement Types and Processes*. In: *Landslides Analysis and Control - Special Report 176*. Schuster R.L. & Krizek R.J. (A c. di), National Research Council Transportation Research Board, Washington D. C., USA, 11–33 pp. doi: 10.1016/j.mser.2018.11.001
- VERGARI F., TROIANI F., FAULKNER H., DEL MONTE M., DELLA SETA M., CICCACCI S. & FREDI P. (2019) - *The use of the slope–area function to analyse process domains in complex badland landscapes*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44 (1), 273–286. doi: 10.1002/esp.4496

WEISS A.D. (2001) - *Topographic position and landforms analysis*. ESRI User Conference, San Diego, CA, 64.

doi: http://www.jennessent.com/downloads/TPI-poster-TNC_18x22.pdf

WOLF G.W. (2017) - *Scale independent surface characterisation: Geography meets precision surface*

metrology. Precision Engineering, 49, 456–480. doi: 10.1016/j.precisioneng.2016.12.005



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Ministero dell'Università
e della Ricerca



Mitigazione dei Rischi Naturali
per la Sicurezza e la Mobilità nelle
Aree Montane del Mezzogiorno



Allegati

1. Carta delle Unità Topografiche di Base, comune di Vaglio Basilicata
2. Carta delle Unità Topografiche di Base, comune di Brindisi di Montagna
3. Carta delle Unità Topografiche di Base, comune di Trivigno
4. Carta delle posizioni di versante, comune di Vaglio Basilicata
5. Carta delle posizioni di versante, comune di Brindisi di Montagna
6. Carta delle posizioni di versante, comune di Trivigno
7. Carta delle forme elementari, comune di Vaglio Basilicata
8. Carta delle forme elementari, comune di Brindisi di Montagna
9. Carta delle forme elementari, comune di Trivigno
10. Carta dei domini di processo superficiale (area vasta)
11. Carta dei domini di processo superficiale (geo-morfoblocchi)
12. Carta dei domini di processo superficiale (bacini idrografici)
13. Carta dello scheletro morfologico, comune di Vaglio Basilicata
14. Carta dello scheletro morfologico, comune di Brindisi di Montagna
15. Carta dello scheletro morfologico, comune di Trivigno
16. Carta dello scheletro morfologico, versante Vaglio W
17. Carta LOOM, caso studio di Trivigno





www.mitigoinbasilicata.it

Obiettivo Realizzativo n. 2 Valutazione del Rischio Idrogeologico

Questa pubblicazione è stata realizzata con il cofinanziamento dell'Unione Europea - FESR, PON Ricerca e Innovazione 2014-2020.

www.ponricerca.gov.it

Responsabile della pubblicazione:
Università degli Studi della Basilicata
Scuola di Ingegneria
Via dell'Ateneo Lucano 10
85100 Potenza



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Mitigazione dei Rischi Naturali
per la Sicurezza e la Mobilità nelle
Aree Montane del Mezzogiorno

