



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea in Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio

Curriculum: Riassetto e Tutela del Territorio

Analisi pluriennale delle condizioni climatiche e dei flussi liquidi-solidi in un bacino alpino (1987-2002)

Relatore
Prof. Mario Aristide Lenzi

Laureando
Michele De Nato

Correlatore
Dott. Riccardo Rainato

Matricola n. 1228722

Anno Accademico 2021/2022

INDICE

RIASSUNTO	6
ABSTRACT	7
1 INTRODUZIONE	8
1.1 BACINI MONTANI.....	8
1.2 AFFLUSSI DEFLUSSI	10
1.3 TRASPORTO SOLIDO.....	13
1.4 MORFOLOGIA TORRENTI MONTANI.....	15
2 OBIETTIVI	19
3 MATERIALI E METODI.....	20
3.1 AREA DI STUDIO.....	20
3.2 STAZIONE DI MONITORAGGIO RIO CORDON	22
3.3 METODI	24
4 RISULTATI.....	26
4.1 SINTESI VARIABILI	32
4.2 RELAZIONI.....	36
5 DISCUSSIONI	38
6 CONCLUSIONI	43
7 BIBLIOGRAFIA	45

INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 1 esempio di idrogramma di piena</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2 Schema rappresentativo delle varie forme di trasporto (Ferro 2014)</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3 esempio morfologia Cascade (Lenzi 2021)</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4 esempio morfologia Step-Pool (Lenzi 2021)</i>	<i>16</i>
<i>Figura 5 esempio morfologia Plane-Bed (Lenzi 2021)</i>	<i>16</i>
<i>Figura 6 esempio morfologia Riffle-Pool (Pasternack, 2008)</i>	<i>17</i>
<i>Figura 7 esempio morfologia Dune Ripple (Lenzi 2021)</i>	<i>17</i>
<i>Figura 8 area di studio del Rio Cordon (Rainato et al 2017)</i>	<i>20</i>
<i>Figura 9 Box Plot delle Precipitazioni mensili registrate nel periodo 1987-2002</i>	<i>33</i>
<i>Figura 10 Box Plot delle Portate medie rilevate nel periodo 1987-2002</i>	<i>34</i>
<i>Figura 11 Box Plot delle Portate massime rilevate nel periodo 1987-2002.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 12 Box Plot del Runoff rilevato nel periodo 1987-2002</i>	<i>34</i>
<i>Figura 13 Box Plot del Effective runoff rilevato nel periodo 1987-2002</i>	<i>35</i>
<i>Figura 14 Box Plot del Sediment Suspended Load (SSL) rilevato nel periodo 1987-2002.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 15 Grafici relativi alle relazioni tra Effective Runoff ed Precipitazioni.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 16 Grafici relativi alle relazioni tra Sediment Suspended Load ed Portata massima</i>	<i>37</i>

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 1</i> Principali caratteristiche morfometriche, fisiologiche e climatiche del bacino Rio Cordon (D'Agostino et. al. 1996 e Garcia Rama et. al. 2016).....	21
<i>Tabella 2</i> Dati mensili di P, Qm, QM, R, ER, SSL rilevati nell'anno 1987.....	27
<i>Tabella 3</i> Dati mensili di P, Qm, QM, R, ER, SSL rilevati nell'anno 1988.....	27
<i>Tabella 4</i> Dati mensili di P, Qm, QM, R, ER, SSL rilevati nell'anno 1989.....	27
<i>Tabella 5</i> Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1990.....	28
<i>Tabella 6</i> Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1991.....	28
<i>Tabella 7</i> Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1992.....	28
<i>Tabella 8</i> Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1993.....	29
<i>Tabella 9</i> Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1994.....	29
<i>Tabella 10</i> Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1995.....	29
<i>Tabella 11</i> Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1996.....	30
<i>Tabella 12</i> Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1997.....	30
<i>Tabella 13</i> Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1998.....	30
<i>Tabella 14</i> Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1999.....	31
<i>Tabella 15</i> Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 2000.....	31
<i>Tabella 16</i> Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 2001.....	31
<i>Tabella 17</i> Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 2002.....	32
<i>Tabella 18</i> valori di R2 medi dati dalle relazioni tra le variabili P, Qm, QM, Ru, ER, SSL.....	36

RIASSUNTO

Il presente elaborato ha avuto come obiettivo l'analisi delle relazioni tra la mobilità del sedimento solido di sospensione e le condizioni climatiche e idrologiche in un bacino alpino. Il monitoraggio ed analisi del trasporto solido risulta fondamentale al fine di comprendere al meglio i fenomeni erosivi e di trasporto dei sedimenti negli alvei fluviali, che risultano, soprattutto in tempi di cambiamento climatico, rilevanti per la sicurezza e stabilità idrogeologica. Inizialmente, si è proceduto alla presentazione delle caratteristiche dei bacini idrografici, della morfologia dei corsi d'acqua e l'analisi dei processi idrologici e di trasporto solido. Successivamente è stato analizzato il bacino di studio, descrivendo le principali caratteristiche geomorfologiche e presentando la stazione di monitoraggio dei deflussi solidi e liquidi utilizzata. Infatti, il sito di studio è situato nel Comune di Selva di Cadore in provincia di Belluno, esso è un piccolo bacino di 5.07 km² chiamato Rio Cordon, dove in sezione di chiusura è situata una stazione permanente di monitoraggio gestita dall'ente ARPAV (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale Veneta). L'elaborazione dati è stata basata sull'analisi dei parametri quali: precipitazione, portata media, portata massima, *runoff*, *effective runoff* e *sediment suspended load*, nel periodo compreso tra il 1987 ed il 2002. La quantità del sedimento di sospensione è stata analizzata in campo attraverso l'utilizzo di torbidimetri, dispositivi elettronici che monitorano la torbidità delle acque e quantificano la quantità di sedimento in sospensione, mentre le altre variabili sono state rilevate attraverso idrometri e pluviometri installati nella stazione. Le analisi si sono concentrate sull'indagine dei trend temporali, analizzati su base mensile e sulle varie interrelazioni tra condizioni climatiche, idrologiche e sedimentologiche.

ABSTRACT

The purpose of this paper was the analysis of the relationship between suspended sediment transport and climatic and hydrological conditions in an Alpine basin. The monitoring and analysis of sediment transport is fundamental in order to better understand the erosive phenomena and transport of sediments in river beds, which result, especially in times of climate change, relevant for hydrogeological safety. Initially, the characteristics of the river basins, the morphology of the fluvial system and description of the hydrological and solid transport processes were presented. Then, the study basin is analyzed and the main geomorphological characteristics are described, with a description of the monitoring station located in the study basin. Specifically, the study site is located in the municipality of Selva di Cadore, in the province of Belluno, and it is a small basin of 5.07 km² called Rio Cordon, where at the outlet a permanent monitoring station managed by the ARPAV (Regional Agency for Environmental Protection in Veneto) was realized. The data processing was based on the analysis of parameters such as: precipitation, mean discharge, maximum discharge, runoff, effective runoff and suspended sediment load, over the period 1987-2002. The amount of suspended sediment was analyzed through the use of turbidimeters, electronic devices that monitor the turbidity of water and quantify the amount of suspended sediment, while the other variables were measured thanks to the water and rain-gauges installed in the monitoring station. The analysis focused on the investigation of temporal trends, analyzed on a monthly basis, and on the various interrelations between climatic, hydrological and sedimentological conditions.

1 INTRODUZIONE

1.1 BACINI MONTANI

Con il termine bacino idrografico o bacino tributario apparente si intende la superficie dalla quale le acque meteoriche, che si abbattono sul bacino o provenienti dalla fusione delle nevi, scorrono confluendo in uno stesso corso d'acqua, denominato collettore. Esso risulta apparente in quanto considera solo il deflusso delle acque superficiali senza tener conto di formazioni geologiche del sottosuolo che potrebbero provocare il passaggio di volumi idrici da un bacino all'altro. Secondo Puglisi (1977) il bacino idrografico viene definito "come il luogo dei punti da cui le acque superficiali di provenienza meteorica ruscellano verso il medesimo collettore".

Per la delimitazione di un bacino idrografico viene individuata la sezione terminale o di chiusura; in quanto in corrispondenza di essa confluisce la portata complessiva dell'intero bacino; successivamente viene ricercata la linea di displuvio o linea di spartiacque, che rappresenta il perimetro del bacino. Quest'ultima, nei bacini montani è identificabile su carta topografica con il tracciamento di una linea sempre perpendicolare alle curve di livello che collega i picchi di massima altitudine. Un ulteriore distinzione che viene fatta all'interno dei bacini montani è tra rete idrografica, o reticolo fluviale, e versanti. La rete idrografica risulta essere l'insieme dei collettori fluviali che raccolgono i vari deflussi superficiali successivamente recapitati in sezione di chiusura; mentre i versanti vengono identificati come tutte le superfici sulle quale si abbattono le precipitazioni all'interno del bacino.

Il reticolo idrografico può essere scomposto in vari segmenti, ed essi possono essere classificati secondo vari sistemi. Il metodo di classificazione maggiormente usato risulta essere quello di Horton-Strahler (1957), il quale attribuisce il numero di ordine I ai canali di origine, ossia derivanti direttamente dalle sorgenti; quando due canali di primo ordine confluiscono, daranno origine ad un segmento di secondo ordine; mentre due rami di secondo ordine che confluiscono formeranno un segmento di terzo ordine. Questa classificazione raggiunge l'apice all'arrivo nell'asta principale, alla quale verrà attribuita il numero di ordine più elevato, esso viene definito anche ordine del bacino.

Infine, per poter completare un'analisi morfologica del bacino, bisogna comprendere alcune caratteristiche date da elementi di forma del rilievo che vengono classificati sulla base di proprietà lineari, basate sui caratteri della rete fluviale; di quelle areali, utilizzate per definire le superfici di

alimentazione del corso d'acqua; ed infine quelle del rilievo, che caratterizzano il bacino dal punto di vista altimetrico.

Gli elementi fondamentali che caratterizzano un bacino idrografico sono (Benini, 1990):

- Superficie (A): area data dalla proiezione su un piano orizzontale delle linee spartiacque che delimitano il bacino;
- Altezza media, altitudine media (h_m): questo parametro è dato dalla media ponderata delle altezze (h_i), ricavate dalle varie superfici parziali (A_i). Queste vengono ricavate dall'area totale del bacino e sono comprese tipicamente tra due curve di livello;

$$h_m = \frac{\sum h_i * A_i}{\sum A_i} \quad (1)$$

- Pendenza media (i_m): essa viene ricavata tramite la media ponderata delle pendenze medie (i_i), ricavate da ciascuna area parziale (A_i). Le pendenze medie vengono calcolate secondo il rapporto tra differenza di altezza tra le varie isoipse (Δh) e l'area parziale (A_i), il tutto moltiplicato per la lunghezza complessiva delle linee di livello (l_i)

$$i_m = \frac{\sum i_i * A_i}{A} \quad (2)$$

Dove

$$i_i = \frac{\Delta h}{A_i} * l_i \quad (3)$$

- Fattori di forma (F): essi sono indici adimensionali capaci di fornire un quadro generale della forma planimetrica del bacino. Essi sono tipicamente in funzione dell'area (A) e del perimetro (P) del bacino; tra i vari indici ritrovabili in letteratura, uno risulta di facile comprensione, l'indice di Gravelius (Rk), definito come indice di compattezza del bacino,

esso rappresenta il rapporto fra il perimetro e la circonferenza di un cerchio avente la stessa area. Quando questo valore è prossimo all'unità allora la forma del bacino sarà più compatta e tondeggiante indicando tempi di corrivazione minori;

$$R_k = \frac{0,28 * P}{\sqrt{A}} \quad (4)$$

- Densità di drenaggio (D_r): esso rappresenta il rapporto tra la sommatoria della lunghezza totale dei collettori del reticolo idrografico (l) e la superficie del bacino stesso (A). Questo parametro risente del fattore di scala con cui si va ad analizzare il bacino per ricavarne le caratteristiche fisiche e morfologiche; infatti, maggiore è il dettaglio cartografico di riferimento, e maggiore sarà anche il dettaglio con cui vengono individuati tutti i rami drenanti sul territorio.

$$D_r = \frac{\sum l}{A} \quad (5)$$

1.2 AFFLUSSI DEFLUSSI

L'idrologia è la disciplina che studia i processi riguardanti le acque naturali. Essa è composta da molteplici campi di studio scientifico come l'idrografia, l'idrogeologia, l'idrogeochimica e l'idrobiologia, ma in generale si occupa di studiare diversi fenomeni come: la circolazione e distribuzione delle acque sulla superficie terrestre, la fisica e la chimica legati all'acqua e la biologia legata ad essa. Secondo Ferro (2014) uno dei problemi centrali dell'idrologia è certamente quello di determinare i deflussi, che attraversano una data sezione di un corso d'acqua, originati dagli afflussi meteorici che si abbattono sul bacino idrografico sotteso alla sezione in esame. Il processo fisico con maggior impatto sulla trasformazione di afflussi e deflussi è il ciclo idrologico, ovvero la successione di fenomeni di circolazione di masse d'acqua all'interno dell'idrosfera con continui scambi di massa idrica tra atmosfera e crosta terrestre. Le acque che raggiungono il suolo sotto forma di precipitazione possono seguire diversi percorsi. L'acqua può venire intercettata (interamente o parzialmente) dagli apparati fogliari delle piante per poi essere restituita all'atmosfera sotto forma di vapore acqueo in seguito all'evaporazione. L'acqua che non viene intercettata dalla vegetazione e riesce a raggiungere il suolo per scorrimento o gocciolamento può seguire varie vie; una parte scorre superficialmente al terreno e viene intercettata dal reticolo idrografico, la parte restante si infiltra nel terreno e potrà seguire tre vie: essere trattenuta nella rizosfera a disposizione delle piante che la utilizzeranno nei processi vitali di evapotraspirazione, infiltrarsi nella falda acquifera

ed essere recapitata al collettore con tempi più lenti (deflusso ipodermico) ed infine può percolare in profondità alimentando falde sotterranee (deflusso profondo).

Citando Benini (1990), “l’acqua che scorre sulla superficie terrestre torna poi nell’atmosfera tramite l’evaporazione dal suolo o attraverso la traspirazione delle piante in seguito all’assorbimento dell’acqua dal suolo mediante le radici”, per poi continuare il ciclo grazie alle proprietà chimiche fisiche dell’acqua. Per poter comprendere al meglio l’idrologia bisogna prima conoscere le varie misure che gravitano intorno a questa scienza, il primo parametro essenziale è l’altezza di precipitazione, la quale viene definita da D’Agostino (2021) come l’altezza della lama d’acqua, misurata in mm, che coprirebbe una superficie orizzontale nel caso in cui tutta l’acqua raccolta dalla superficie fosse trattenuta così da formare uno strato con spessore uniforme. La misura di questo parametro viene effettuata tramite misure puntuali; ed è quindi necessario disporre di strumenti di misura all’interno del bacino idrografico, per un’analisi più grossolana è possibile stimare le altezze di precipitazione con metodi di interpolazione da diversi strumenti di rilevazione posti in prossimità del bacino. Un altro parametro importante per la stima dei deflussi è l’intensità di pioggia, il rapporto (espresso in millimetri all’ora) tra l’altezza di precipitazione e la durata del fenomeno. Essa viene misurata con strumenti chiamati pluviografi, che misurano le variazioni di intensità durante un fenomeno meteorologico. Il processo che più condiziona i deflussi è quello legato all’infiltrazione, secondo Borga (2020) “l’infiltrazione è il processo di trasferimento dell’acqua dalla superficie del terreno all’interno del suolo” essa è influenzata maggiormente dalle caratteristiche del suolo quali struttura, tessitura, contenuto idrico, uso del suolo, il deflusso superficiale viene generato quando l’intensità di pioggia supera l’infiltrazione potenziale, ed esso viene stimato secondo varie metodologie, la più usata è quella realizzata dalla *Soil Conservation Service* (S.C.S.), ovvero metodo *Curve-Number* (CN), una procedura che consente di relazionare, in bacini idrografici di superficie non superiore a 15-20 km², le precipitazioni e i comportamenti di permeabilità del terreno. Questo criterio permette di analizzare come i suoli reagiscono nel tempo agli afflussi meteorici, determinando le quantità di acqua che si infiltra o che causa deflusso superficiale. La S.C.S. ha voluto basare il tutto sulla conoscenza di un solo parametro il CN, che rappresenta l’attitudine del bacino nel produrre deflusso; esso assume valori compresi tra 0 e 100: 0 per suoli per nulla permeabili e 100 per suoli con un’alta capacità di permeabilità. Questo parametro viene stimato, sulla base di valori riportati in un’apposita tabella redatta dalla SCS, in relazione alle caratteristiche idrologiche dei suoli e di copertura presente nel bacino. Uno dei grafici più importanti in idrologia è l’idrogramma di piena (fig. 1), una rappresentazione grafica dell’andamento della portata nel

tempo; in esso l'area sottesa la curva corrisponde al volume del deflusso, il picco massimo è chiamato anche portata al colmo, esso risulta importante per determinare le portate che dovrebbero essere contenute negli alvei naturali e per migliorare le sistemazioni idrauliche dei corsi d'acqua.

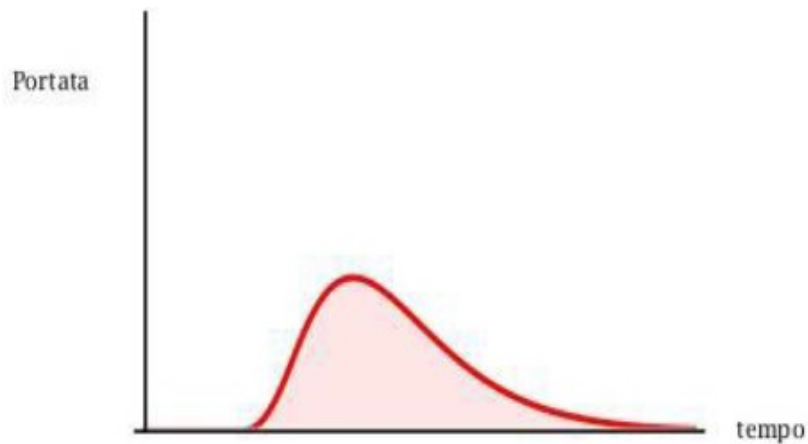


Figura 1 esempio di idrogramma di piena

Per la stima della portata al colmo è possibile avvalersi di diversi metodi matematici come il metodo razionale (eq. 6), questa formula risulta affidabile per bacini di superficie ridotta (< 2-3 km²), ma applicabile a fini progettuali anche a bacini più grandi (< 50 km²). Per la realizzazione di questo metodo ci si basa su tre ipotesi:

- pioggia di intensità costante distribuita uniformemente sul bacino;
- durata critica della precipitazione pari al tempo di corrivazione del bacino (condizione per la quale la precipitazione interessa il bacino con la massima intensità essendo la minima durata di pioggia per la quale tutto il bacino risulta contribuente);
- idrogramma di piena di forma triangolare e durata pari al doppio del tempo di corrivazione.

Per tempo di corrivazione si intende il tempo che impiega una goccia d'acqua, caduta nel punto idraulicamente più lontano del bacino, a raggiungere la sezione di chiusura (Benini, 1990). La formula per il calcolo della portata al colmo (Q_t) richiede la conoscenza della superficie del bacino (A), la pioggia efficace (Pe) cioè la precipitazione depurata dalle perdite iniziali e l'infiltrazione, tempo di corrivazione (T_c), portata di base presente nel reticolo antecedente all'evento meteorico (Q_{base})

$$Q_t = \frac{Pe A}{3.6 T_c} + Q_{base} \quad (6)$$

1.3 TRASPORTO SOLIDO

Gli alvei fluviali, in relazione ai valori di velocità e turbolenza sono in grado di trasportare materiali solidi di varia granulometria, Questo fenomeno fisico viene chiamato anche trasporto solido, secondo Ferro (2014), questo fenomeno “costituisce il punto di unione fra fenomeni di erosione che interessano, prevalentemente, la parte montana del bacino e quelli di deposito che si verificano nella zona valliva e alla foce del corso d’acqua”. La provenienza dei sedimenti è di varia natura, essi giungono al collettore in seguito all’erosione dei versanti per cause legate a frane o erosione atmosferica; ma provengono anche dall’evoluzione dell’alveo, tramite erosione delle sponde e scavo del fondo per questo motivo possono essere intraprese azioni mirate a limitare l’erosione, a garantire la stabilità dei versanti e l’assetto morfologico degli alvei. Nelle zone montuose, la copertura vegetale risulta più importante e diffusa rispetto a zone di pianura, l’erosione quindi è racchiusa soprattutto in aree limitate dove per cause naturali o antropiche la protezione vegetale risulta assente. I versanti montani costituiscono dei veri e propri depositi di materiale che vengono mobilitati dalle acque, influenzando direttamente l’effettiva entità del materiale trasportato. Lo studio del comportamento dei sedimenti all’interno dell’alveo risulta ancora una scienza molto complessa, e solo negli ultimi decenni, grazie al lavoro di numerosi ricercatori si sono potute chiarire alcune dinamiche legate al trasporto solido, ma alcune di esse, come le colate detritiche, sono fenomeni che restano ancora scarsamente compresi. Un altro aspetto importante è la quantificazione del trasporto solido, misurata in m^3/s , pari al volume che passa per una determinata sezione nell’unità di tempo. Secondo Ferro (2014) la meccanica del trasporto solido fluviale si divide in due diversi tipi di trasporto (fig. 2): per trasporto sul fondo e in sospensione. Per quanto riguarda il primo caso il materiale risulta essere grossolano (clasti, ghiaia) ed essi vengono mossi dalla corrente muovendosi per rotolamento o strisciamento sul fondo oppure per saltazione o saltellamento in cui le particelle di diametri modesti si muovono “balzando” tra il fondo e la corrente libera. Questa modalità di trasporto solido risulta essere prevalente nei torrenti montani, dove per le forti pendenze e per il materiale più grossolano tendono ad avere maggiore trasporto di fondo. Per quanto riguarda il trasporto in sospensione le particelle, più fine (argilla, limo, sabbia), vengono trasportate all’interno del flusso idrico, e rese “sospese” grazie alle turbolenze create dalla corrente, questa modalità di trasporto è prevalente nei tratti pedemontani e vallivi, caratterizzati da una minor pendenza ed una sovralimentazione solida.

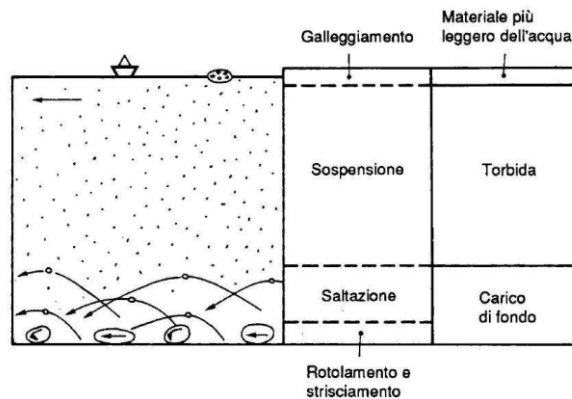


Figura 2 Schema rappresentativo delle varie forme di trasporto (Ferro 2014)

Dopo aver analizzato il trasporto tipico nella dinamica fluviale troviamo altri due tipi di correnti, tipiche dei bacini montani, che rispetto alle sopra citate sono contraddistinte da diverse concentrazioni del materiale solido in seno alla corrente. La prima viene chiamata corrente iperconcentrata o *debris flood*, essa è prevalentemente formata da una miscela bifase composta da acqua e sedimento, quest' ultimo con una percentuale pari al 20-30% rispetto al volume totale. La seconda corrente viene chiamata colata detritica o *debris flow* essa è caratterizzata da una concentrazione solida più importante pari al 30-70% con diametri fino a 4-5m, inoltre la velocità di scorrimento può raggiungere i 20 m/s. La colata ha un aspetto intermedio tra una frana ed una corrente liquida. L' innesco di questo particolare fenomeno fisico deriva da vari fattori come le pendenze elevate, apporti idrici intensi, ma il più rilevante è forse il sedimento mobilizzabile che rende questo fenomeno di facile innesco, la pericolosità legata alle colate detritiche deriva dalla loro periodicità irregolare e tempi di innesco molto rapidi che le rendono uno degli eventi più pericolosi dei bacini montani. Esistono osservazioni in letteratura che suggeriscano l'attitudine di un bacino a generare fenomeni di *debris flow*, una di queste si basa sull' utilizzo del numero di Melton (Me); dove (ΔH) è la differenza tra la quota massima del bacino e quella dell'apice del conoide, mentre (A) l'area totale del bacino posta sotto radice:

$$Me = \frac{\Delta H}{\sqrt{A}} \quad (7)$$

Il valore soglia è pari a 0,5, sotto il quale, si attendono fenomeni di alluvionamento ed al di sopra si prevedono delle vere colate detritiche (*debris flow*). Importante come questo parametro non deve essere preso come una certezza ma un'indicazione sulla probabilità che il bacino possa creare fenomeni di colata o meno.

1.4 MORFOLOGIA TORRENTI MONTANI

La morfologia fluviale è lo studio che indaga la descrizione, la classificazione e l'evoluzione di un tratto fluviale. I corsi d'acqua vengono descritti in base a numerosi parametri (localizzazione all'interno del bacino, geometrici, planimetrici, sedimentologici, evolutivi, forme di fondo e combinati) creando numerose classificazioni.

Una classificazione, molto rilevante quando si parla di torrenti montani risulta essere quella descritta da Montgomery & Buffington (1997), essa si basa essenzialmente sulle forme di fondo e descrive varie tipologie di un alveo al variare della pendenza. Secondo Lenzi (2021), queste si possono elencare in:

Cascade (rapida), tratto caratterizzato da una corrente a velocità sostenuta in cui il flusso presenta un'alternanza di getti in caduta e risalti idraulici (*tumbling flow*) e separazione della corrente sopra o attorno ai grossi clasti disposti in maniera disorganizzata e generalmente immobilizzati durante i deflussi ordinari (fig. 3). Sono presenti in quei tratti con pendenza accentuata (7-20%) e con alvei confinati.



Figura 3 esempio morfologia Cascade (Lenzi 2021)

Step-pool, sono forme di fondo con pendenza comprese tra (5-15%). Il profilo longitudinale del corso d'acqua presenta una forma a gradinata (sequenze a *step-pool*), gli step sono formati da massi incastrati tra di loro che formano un gradino, mentre lo spazio fra uno *step* ed il successivo è occupato da una *pool* (fig. 4). Queste forme sono molto simili a quelle che si ottengono con una serie di briglie di consolidamento.



Figura 4 esempio morfologia Step-Pool (Lenzi 2021)

Plane-bed (letto piano), tratti di alveo con un profilo longitudinale regolare (fig. 5) e senza importanti variazioni altimetriche, con pendenze del 1-3%; una particolarità di questi tratti è l'assenza di barre laterali distinte e risulta possibile osservare questa particolare conformazione, sia nei torrenti montani che nei corsi d'acqua di pianura.

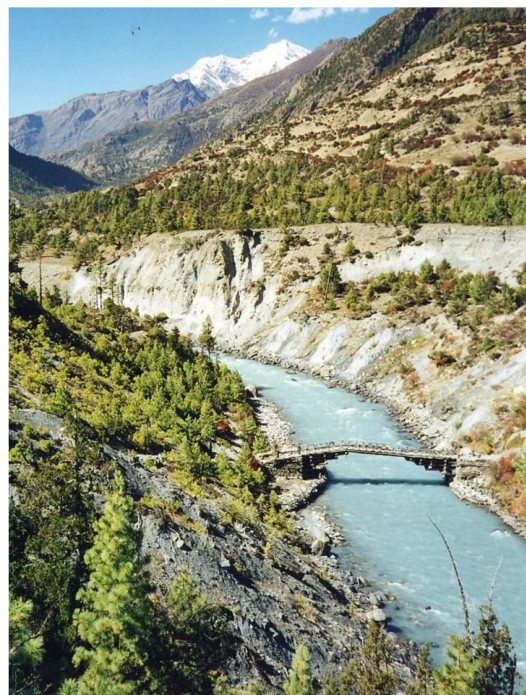


Figura 5 Esempio morfologia Plane-Bed (Lenzi 2021)

Riffle-pool, forma di fondo che presenta una successione di tratti a pendenza più sostenuta e profondità di flusso modeste (*riffle*) con regime subcritico-critico e piccoli risalti idraulici, con tratti a profilo più piatto e tiranti d'acqua più elevati (*pool*) (fig. 6). Essi sono localizzati in corsi d'acqua di fondovalle e pedemontani con pendenze moderate (0.1-2%). Inoltre, presentano un alternarsi di barre longitudinali in corrispondenza dei *riffle*, composte da materiale ghiaioso.



Figura 6 esempio morfologia Riffle-Pool (Pasternack, 2008)

Dune ripple, morfologia di fondo caratterizzata da piccole dune di altezza variabile a seconda della profondità del corso d'acqua, della velocità della corrente e dalla granulometria del materiale. Essi sono localizzati in tratti di alveo con pendenze modeste (<0.5%) e con materiale prevalentemente sabbioso (fig. 7).



Figura 7 Esempio morfologia Dune Ripple (Lenzi 2021)

Le prime due tipologie presentate (*cascade* e *step-pool*) sono tipiche dei tratti *supply-limited* ovvero dove il trasporto solido è limitato dalla poca disponibilità di sedimento ma con un'alta disponibilità di energia della corrente. La terza morfologia (*plane bed*) rappresenta il punto di equilibrio tra limitazioni idraulica e disponibilità di sedimento, mentre per le ultime due (*riffle-pool* e *dune-ripple*) vengono denominate tratti *transport-limited* dove a causa della ridotta pendenza prevale la deposizione con la conseguente deposizione di sedimenti all'interno dell'alveo. Oltre alle precedenti tipologie, Montgomery & Buffington (1997) hanno descritto per i torrenti montani i tratti colluviali, i tratti in roccia e la morfologia imposta.

Seguendo la classificazione di Montgomery e Buffington (1997), Lenzi, D'Agostino e Sonda (2000), hanno ritenuto opportuno introdurre una serie di integrazioni in modo da prevedere una gamma più articolata di tipologie morfologiche che si possono riscontrare nei torrenti alpini, esse infatti sono morfologie intermedie tra quelle sopracitate. Degli esempi di morfologie intermedie sono: rapide a scivolo e rapide a gradino, *log step*, *pool* isolati, *riffle-step pool*, *transverse rib*.

Un'altra classificazione rilevante è quella creata da Billi (1994), essa è basata sull'analisi di diversi fattori, tra cui: trasporto solido totale, granulometria, pendenza, rapporto trasporto al fondo/trasporto totale, rapporto larghezza/profondità e sinuosità; tramite l'interazione di questi parametri appena citati Billi (1994) classifica ben cinque tipologie di corsi d'acqua:

- corso d'acqua rettilineo;
- corso d'acqua a canali intrecciati (*braided*);
- corso d'acqua pseudomendriiformi (*wandering*);
- corsi d'acqua meandriiformi;
- corsi d'acqua anastomizzati.

2 OBIETTIVI

Il seguente studio si prefigge di analizzare le dinamiche climatiche, idrologiche e sedimentologiche in un torrente alpino, in particolare nella relazione tra condizioni idrologiche e sedimentologiche, nel periodo 1987-2002. A tale scopo è stato scelto, come area di studio, il bacino del Rio Cordon, un tipico bacino alpino situato nel Comune di Selva di Cadore (BL), ed avente un'estensione di 5.07 km². Tale analisi è stata eseguita grazie ai dati raccolti dalla stazione di monitoraggio permanente del bacino. Questa, ha permesso di monitorare costantemente le precipitazioni e le portate liquido solide passanti per l'asta principale del torrente. Il Rio Cordon presenta condizioni favorevoli all'analisi del trasporto solido, in quanto, presenta significativi volumi solidi trasportati durante eventi di piena anche modesti, e per questo risulta ottimo per l'analisi del trasporto solido. Inoltre, essendo un torrente appartenente ad un piccolo bacino montano, risulta essere più semplice da analizzare.

Gli obiettivi che tale studio prevede di raggiungere sono:

- Partendo dai dati raccolti nel periodo 1987-2002, analizzare i trend temporali mostrati dalle variabili Precipitazioni (*P*), Portata Media (*Qm*), Portata massima (*QM*), *Runoff* (*Ru*), *Effective Runoff* (*ER*), *Suspended Sediment Load* (*SSL*);
- Valutare le relazioni tra tali variabili;
- Analizzare e ricercare possibili spiegazioni alle relazioni selezionate.

3 MATERIALI E METODI

3.1 AREA DI STUDIO

Le analisi svolte sono localizzate nel bacino del Rio Cordon (Fig.8), esso si trova nel Comune di Selva di Cadore (BL) nelle Alpi italiane orientali, più comunemente chiamate Dolomiti. Il bacino è situato alle pendici del Monte Mondeval e ad Est il bacino idrografico si estende fino al Col delle Stelle, mentre ad Ovest è circoscritto dalla linea di displuvio che scende verso il Monte Mondeval (Pozza, 2019). Il torrente Rio Cordon è un corso d'acqua di terzo ordine che scarica in destra idrografica nel torrente Fiorentina, che attraversando prati e boschi arriva a confluire nel torrente Cordevole per poi immettersi nel Lago di Alleghe.

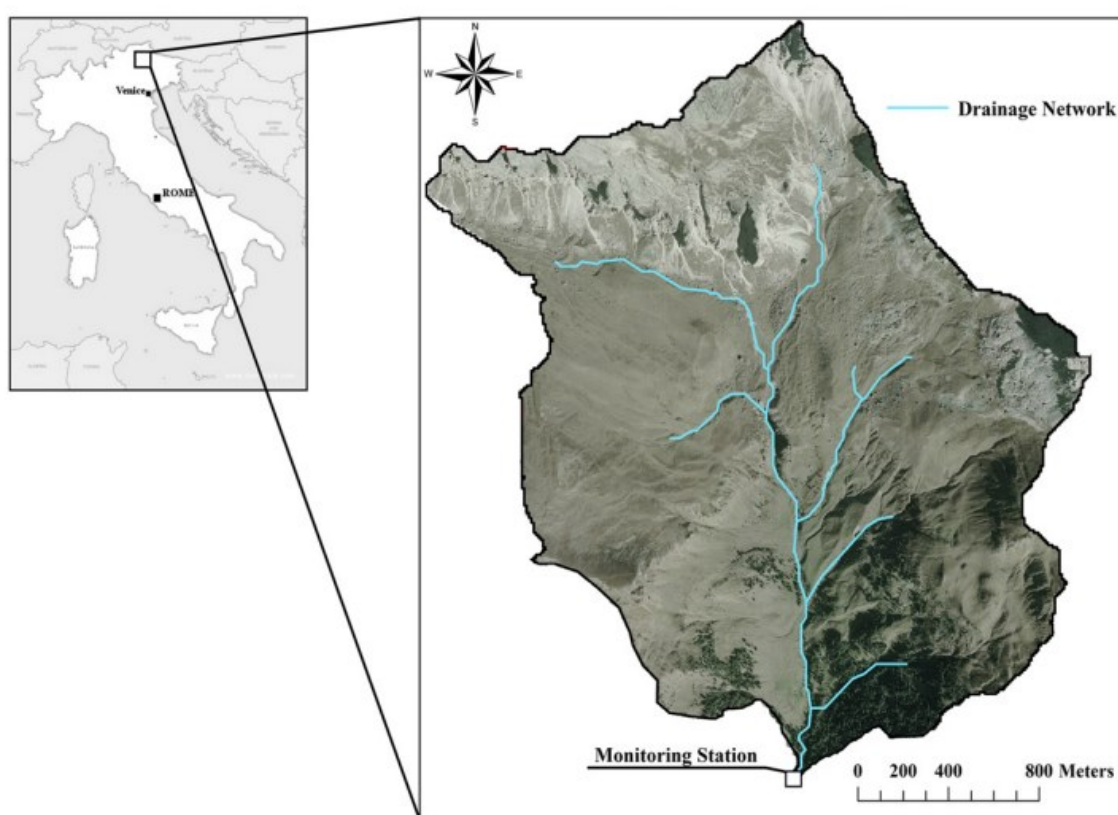


Figura 8 area di studio del Rio Cordon (Rainato et al 2017)

Riguardo all'area del bacino idrografico, se viene analizzato prendendo come sezione di chiusura l'immissione nel Fiorentina allora esso presenta un'area drenata pari a 7,68 km²; mentre se come sezione di chiusura identifichiamo la stazione di monitoraggio permanente per la misura integrale dei deflussi liquidi solidi (vedi sezione 3.2), la superficie risulterà pari ad 5,07 km². In seguito, si riporta una tabella riassuntiva dei parametri climatici, morfometrici e fisiologici caratterizzanti il bacino del Rio Cordon (tabella 1).

AREA BACINO NATURALE	7,68 km ²
AREA BACINO STAZIONE	5,07 km ²
PERIMETRO	10,3 km
QUOTA MASSIMA	2748 m.s.l.m.
QUOTA MINIMA	1763 m.s.l.m.
LUNGHEZZA COLLETTORE	2,84 km
PENDENZA MEDIA	52%
PENDENZA MEDIA DEL COLLETTORE	17%
PORTATA D'ACQUA MASSIMA MISURATA	10,40 m ³ /s (Lenzi, 2000)
PORTATA MINIMA MISURATA	0,050 m ³ /s (Lenzi, 2000)
PRECIPITAZIONE MEDIA ANNUA	1100 mm
TEMPERATURA MEDIA ANNUA	2 °
INDICE DI GRAVELIUS	1,28
QUANTITA DI NEVE CADUTA (Snowfall)	35 %

Tabella 1 Principali caratteristiche morfometriche, fisiologiche e climatiche del bacino Rio Cordon (D'Agostino et. al. 1996 e Garcia Rama et. al. 2016)

Secondo (Rainato, 2017), le principali formazioni litologiche del bacino sono: dolomiti, calcari, conglomerati vulcanici e arenarie di tufo (gruppo di Wengen), ovvero una formazione datata in età del Triassico medio (Ladinico superiore) che tende a formare materiale detritico con granulometria varia, mentre nella parte inferiore del bacino si ha anche una limitata presenza di rocce del Gruppo di Buchenstein, che comprendono diversi litotipi, in prevalenza di natura calcarea, calcareo-marnosa ed arenacea, riconoscibili dal loro colore biancastro. L'area inoltre presenta un'ampia presenza di numerosi depositi morenici (Fattorelli, 1994). Per quanto riguarda le precipitazioni il bacino è caratterizzato da condizioni climatiche tipiche delle regioni alpine, con precipitazioni medie annue che si attestano intorno ad i 1100 mm e che si verificano principalmente con temporali nella stagione estiva e nevicate abbondanti tra novembre e aprile. Il deflusso presenta quindi un regime nivo-pluviale dominato dallo scioglimento delle nevi nei mesi tra maggio e giugno e con significative alluvioni dovute alle piogge persistenti in estate e all'inizio dell'autunno. Secondo Cattaneo e Viola (1992) il bacino è caratterizzato per la maggior parte da praterie alpine (61%) e piccoli arbusti (18%), prevalentemente Rododendro (*Rhododendron Ferrugineum*), mentre le foreste coprono circa il 7% e sono localizzate nella parte basale del bacino, composte principalmente da *Picea abies* e *Larix decidua*. Inoltre, lungo il collettore, si possono trovare alcune specie ripariali del genere *Salix* L. ma anche altre specie come l'Ontano verde (*Alnus viridis*). La restante superficie è composta da terra

nuda e aree origine di sedimenti, composte prevalentemente da ghiaie moreniche nella parte settentrionale, zone in erosione formate dai pendii scoperti, frane superficiali, depositi da debris-flow ed erosioni spondali del collettore. Per quanto riguarda la morfologia fluviale, il torrente presenta vari tratti con differenti morfologie: tratti d'alveo a gradinata (*step pool*), tratti a rapide (*riffle pool*) e tratti misti, ovvero quelli in cui le sequenze a gradinata sono risultate interrotte in modo irregolare da accumuli disordinati di materiale grossolano (D'Agostino, 1996). I tratti a *riffle pool* presentano corpi sedimentari quali barre longitudinali e trasversali, che costituiscono importanti aree di immagazzinamento del sedimento. Inoltre, il Rio Cordon presenta un alveo di piena ben distinto da quello di magra, e non vi sono nell' alveo affioramenti di roccia in quanto il torrente ha scavato il proprio tracciato nei depositi detritico-morenici.

3.2 STAZIONE DI MONITORAGGIO RIO CORDON

Dal 1986 il bacino del Rio Cordon è oggetto di un monitoraggio permanente, attraverso una stazione per la misura integrale dei deflussi liquidi e solidi, realizzata da Regione Veneto in collaborazione con il Dipartimento TeSAF dell'Università degli Studi di Padova, e attualmente gestita dal Agenzia Regionale Protezione Ambientale Veneto (ARPAV). Negli ultimi tre decenni, il programma di monitoraggio ha permesso di indagare gli andamenti climatici, i processi di deflusso, la dinamica dei sedimenti e l'evoluzione morfologica che hanno caratterizzato questo bacino alpino. La stazione è localizzata ad una quota di 1763 m.s.l.m., appena al di sotto del limite superiore del bosco, essa può contare su numerosi dispositivi per il monitoraggio degli scarichi idrici, del trasporto e della concentrazione di sedimenti. In merito all'analisi delle condizioni meteorologiche, la stazione è dotata di due stazioni, poste a quote differenti (1763 e 2130 m.s.l.m.) che permettono di registrare dati riguardanti temperatura dell'aria, pressione atmosferica, umidità relativa, radiazione solare e precipitazioni. Le precipitazioni vengono rilevate tramite dei pluviometri, strumenti utilizzati per la misurazione della precipitazione caduta (mm/h) in un determinato luogo. Nello specifico lo strumento utilizzato è un pluviometro riscaldato, che tramite degli apparati riscaldatori converte le precipitazioni solide in liquide riuscendo quindi a quantificare le precipitazioni nevose, molto frequenti nel bacino del Rio Cordon. Per quanto riguarda l'opera di rilevamento dei flussi idrici e solidi, è costituita da un canale di ingresso asimmetrico che consente ai flussi idrici di poter fluire in qualsiasi condizione di portata; successivamente questi sono imbrigliati su una griglia inclinata che permette di separare il materiale grossolano ($\varnothing > 20$ mm) da quello più fine. Il materiale grossolano viene raccolto in un'area di deposito dove sono presenti 24 sensori ad ultrasuoni che misurano il volume di sedimenti durante le piene, purtroppo dal 2012 questi dispositivi hanno smesso di

funzionare, e sono stati sostituiti da un Laser Scanner Terrestre (TLS) utilizzato per analizzare il volume dei sedimenti depositati da ogni evento (Rainato et al, 2013). Per quanto riguarda il materiale fino, viene depositato in un bacino di deposito di decantazione che può contenere 718 m³ di materiale (area 205 m² e 3,5 m di altezza) dove il sedimento viene misurato da 25 trasduttori di pressione che misurano la pressione esercitata del materiale depositato nella vasca. Per quanto riguarda il monitoraggio dei deflussi liquidi, sono continuamente controllati strumentalmente, tramite tre misuratori del livello idrico che esprimono i dati in l/s ed effettuano le misurazioni ad intervalli di 1 ora in condizioni normali, mentre ogni 5 min durante le piene. I misuratori idrometrici sono composti da due idrometri posti, rispettivamente, all'entrata del canale di ingresso ed a valle della griglia inclinata, ed uno stramazzo a parete sottile posto in prossimità dell'uscita del bacino di decantazione. Per ultima cosa, la stazione presenta dei torbidimetri, che misurano la torbidità delle acque, utilizzati per poter quantificarne il trasporto in sospensione. La torbidità è un parametro ottico che indica il grado di trasparenza di un liquido, essa è causata da singole particelle sospese che ostacolano la trasmissione della luce. In genere, queste particelle sono troppo piccole per essere rilevate ad occhio nudo, pertanto, per misurare la torbidità si ricorre a un torbidimetro o analizzatore di torbidità. In pratica questi strumenti determinano il grado di diffusione della luce attraverso particelle sospese in un mezzo liquido; la diffusione è influenzata dalla concentrazione di particelle nel liquido, dalla forma e dimensioni delle particelle ed infine dalla lunghezza d'onda della luce. Come unità di misura questi torbidimetri utilizzano l'NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*) che significa unità nefelometrica di torbidità ed indica che lo strumento misura la luce diffusa da un campione ad un angolo di 90 gradi rispetto alla luce incidente. I torbidimetri presenti nella stazione per la misurazione del sedimento in sospensione sono di diversi modelli: il primo è un torbidimetro ad assorbimento di luce (modello Partech SDM-10) installato nel canale di uscita nei primi anni di funzionamento della stazione, tra i vari strumenti installati esso risulta riconoscibile tramite il codice di identificazione 923. Il secondo torbidimetro è uno strumento a luce diffusa (Hach SS6) localizzato nell'entrata del canale ed installato nel 1994, identificabile con il codice 950. Entrambi i dispositivi sono collocati in corrispondenza degli idrometri per misurare contemporaneamente sia il livello dell'acqua che la torbidità. L' NTU successivamente viene convertito in concentrazione di sedimento sospeso (*suspended sediment concentration, SSC*), tramite apposite relazioni redatte da Lenzi (2000) sulla base di misurazioni continue di torbidità e valori di concentrazione di sedimenti. Queste misurazioni sono state ottenute da campioni di flusso raccolti durante le inondazioni e nei periodi di scioglimento delle nevi.

3.3 METODI

Con i dati a disposizione relativi alla stazione di monitoraggio del Rio Cordon è iniziata la fase di elaborazione, con lo scopo di analizzare le relazioni tra le variabili quali: Precipitazione (P), Portata Media (Q_m) e Massima (Q_M), *Runoff* (R), *Effective Runoff* (EF) e *Sediment Suspended Load* (SSL), nel periodo intercorso tra il 1997 e il 2002. Per quanto riguarda le condizioni relative alla precipitazione abbattuta nel Rio Cordon è stato necessario analizzare i dati giornalieri di precipitazione ricavati dai pluviometri installati nella stazione, che rilevano la quantità di pioggia e la esprimono in mm/h. La prima elaborazione dati è stata sviluppata proprio sul calcolo delle precipitazioni mensili (P), per ogni anno analizzato, sommando i dati giornalieri di precipitazione al fine di ottenere un valore mensile. Successivamente si è passato al calcolo delle portate medie (Q_m) e massime (Q_M); l'unità di misura con cui le stazioni rilevano le portate è il l/s, si è quindi proceduto alla trasformazione dei dati di portata oraria da l/s in m^3/s , dividendo il valore registrato per 1000, in quanto in un m^3 sono presenti 1000 litri. Quindi, si sono calcolate le portate medie (Q_m) e massime (Q_M) di ogni mese per ogni anno analizzato. In seguito, si è passati al calcolo dei valori mensili di *Runoff* (R), ovvero i volumi liquidi transitati in un'ora, essi vengono calcolati moltiplicando il valore di portata oraria (m^3/s) per 3600 in quanto un'ora è composta da 3600 secondi, ed infine tramite la sommatoria dei dati si sono calcolati i valori di *Runoff* mensili. Lo step di elaborazione successivo si è basato sul calcolo del *Effective Runoff* (EF), ovvero il valore al di sopra del quale inizia il trasporto solido di fondo. Secondo Rainato (2020) l'*Effective Runoff* per il Rio Cordon, si verifica solo con valori di portata (Q) maggiori a $0,44 m^3/s$, si sono quindi estrapolati i valori di *Runoff* orari corrispondenti ad una portata maggiore o uguale a $0,44 m^3/s$, ed infine tramite le sommatorie mensili si sono calcolati i valori relativi ad ogni mese per ogni anno. Infine, l'ultimo parametro calcolato riguarda il trasporto solido di sospensione o *Sediment Suspended Load* (SSL). Per procedere con il calcolo del SSL si è partiti dall'analisi dei valori di *Nephelometric Turbidity Unit* (NTU) rilevata dai torbidimetri, questi valori sono stati convertiti in concentrazioni di solidi in sospensione o *Sedimento Suspended Concentration* (SSC) ed espressa in g/l, utilizzando le seguenti espressioni 8 e 9, a seconda che i dati utilizzati siano stati ricavati dal torbidimetro a monte (950) o a valle della stazione (923); le espressioni vengono riportate di seguito:

$$SSC_{valle} = \frac{NTU_{valle}}{1000} \quad (8)$$

$$SSC_{monte} = 50.119 * \left(\frac{NTU_{monte}}{1000} \right)^{2.457} \quad (9)$$

Dopodichè, i valori di SSC espressi in g/l sono stati utilizzati per il calcolo del *Sediment Suspended Load* (SSL) secondo la relazione:

$$SSL = Q * SSC * 3600 * 1000 \quad (10)$$

Dove Q è la portata oraria che transitava nel torrente, mentre 3600 i secondi in un'ora e 1000 i litri in un m^3 , fattori di conversione utilizzati al fine del calcolo del SSL in grammi. Dopo aver calcolato la SSL espressa in g si è scelto, per comodità, di convertirla in tonnellate, dividendo il valore di SSL per 1000000, in quanto in una tonnellata sono presenti 1 milione di grammi. Dopo aver calcolato i principali parametri appena elencati, si è passati all'identificazione di una possibile relazione tra le variabili prese in considerazione, per questo si è ritenuto utile anche suddividere le serie di dati in base alla stagione, come riportato di seguito:

- Primavera: aprile e maggio
- Estate: giugno luglio e agosto
- Inverno: settembre, ottobre e novembre

4 RISULTATI

In questo capitolo verranno presentati i risultati ottenuti dalle analisi dei dati delle Precipitazioni (P), Portata Media (Q_m), Portata massima (Q_M), *Runoff* (Ru), *Effective Runoff* (ER), *Suspended Sediment Load* (SSL) e le loro interrelazioni. Le analisi sono state svolte nell'arco temporale tra il 1987 ed il 2002. In questo periodo, i mesi con una buona continuità di dati risultano essere compresi nell'arco considerato tra maggio e novembre, per i restanti mesi i dati sono saltuari in quanto il bacino essendo localizzato in zona alpina presenta un regime nivo-pluviale, caratterizzato da precipitazioni nevose che non creano deflussi. Inoltre, si evidenzia come gli anni compresi tra il 1988 e 1991 presentano un'abbondante carenza di dati, con solo un mese all'anno di dati registrati dalla stazione. Per quanto riguarda la precipitazione, il valore massimo lo troviamo nel mese di novembre 2000 con valore pari a 386 mm, mentre il valore minimo risulta pari ad 0,1mm, nel gennaio 2002. La seconda variabile considerata è la portata media mensile, con valore massimo rilevato nel mese di settembre 1994 pari a 1,57 m³/s, e valore minimo di 0,08 m³/s, nel mese di novembre 2001. Per quanto riguarda le portate massime il valore massimo lo troviamo nel mese di settembre 1994 con valori di 10,42 m³/s, mentre il valore minimo risulta pari ad 0,11 m³/s registrato nel mese di settembre 1990. Riguardo ai valori di *Runoff* il massimale è stato toccato nel mese di giugno 1991, con valore di 2155 10³m³ mentre il valore minimo nel novembre 1995 con valori di 0,5 10³m³. Inoltre, risulta interessante sottolineare come per il mese di giugno del 1991 i valori di *Effective Runoff* risulti essere pari al *Runoff* (2155 10³m³) ed anche il valore massimo di *Effective Runoff* rilevato nel periodo 1987-2002; mentre il valore minimo di ER è stato rilevato nel settembre 1997 con valore pari ad 2 10³m³. Infine, l'ultimo parametro analizzato risulta essere il *Suspended Sediment Load* (SSL), il valore massimo rilevato per quanto riguarda SSL è nel settembre 1994 con un valore di 2440,2 t, mentre per quanto riguarda il valore minimo di SSL è stato registrato nell'ottobre 1997 con valore pari a 0,1 t. È possibile visionare i dati appena citati dalle tabelle sotto riportate.

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
1987												
P (mm)	43,6	120,8	26,0	101,2	150,0	106,2	141,0	138,0	87,4	191,4	166,0	9,6
Qm (m ³ /s)					0,37	0,65	0,34	0,16	0,14	0,44	0,11	
QM (m ³ /s)					1,41	2,10	2,28	0,81	0,59	5,05	0,23	
Ru (10 ³ m ³)					789	1687	842	307	284	925	279	
ER (10 ³ m ³)					368	1440	261	66	11	513		
SSL (t)					2,6	9,1	18,2	1,5	1,7	148,7	3,8	

Tabella 2 Dati mensili di P, Qm, QM, R, ER, SSL rilevati nell'anno 1987

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
1988												
P (mm)	59,0	29,0	45,4	50,6	121,4	146,0	157,2	116,8	39,6	100,6	5,0	36,4
Qm (m ³ /s)							0,29					
QM (m ³ /s)							2,43					
Ru (10 ³ m ³)							674					
ER (10 ³ m ³)							236					
SSL (t)							5,4					

Tabella 3 Dati mensili di P, Qm, QM, R, ER, SSL rilevati nell'anno 1988

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
1989												
P (mm)	0,0	115,2	28,6	333,6	14,0	84,2	199,6	134,0	78,8	4,8	113,8	51,6
Qm (m ³ /s)							0,55					
QM (m ³ /s)							4,39					
Ru (10 ³ m ³)							1432					
ER (10 ³ m ³)							1063					
SSL (t)							310,2					

Tabella 4 Dati mensili di P, Qm, QM, R, ER, SSL rilevati nell'anno 1989

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	
1990	P (mm)	15,2	16,4	42,0	60,0	63,0	119,6	91,6	67,0	90,4	84,2	225,8	121,2
	Qm (m ³ /s)								0,08				
	QM (m ³ /s)								0,12				
	Ru (10 ³ m ³)								92				
	ER (10 ³ m ³)												
	SSL (t)								1,8				

Tabella 5 Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1990

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	
1991	P (mm)	16,0	20,6	68,8	51,6	103,0	91,0	182,2	54,2	87,4	105,4	114,8	39,4
	Qm (m ³ /s)					1,10							
	QM (m ³ /s)					2,56							
	Ru (10 ³ m ³)					2155							
	ER (10 ³ m ³)					2155							
	SSL (t)					68,1							

Tabella 6 Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1991

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	
1992	P (mm)	9,8	9,4	70,0	177,2	68,2	138,0	143,2	100,0	81,8	268,2	49,4	79,2
	Qm (m ³ /s)				0,17	0,64	0,36	0,19	0,10	0,11	0,45	0,19	
	QM (m ³ /s)				0,71	1,32	0,77	0,41	0,18	0,21	2,72	0,24	
	Ru (10 ³ m ³)				161	1553	924	459	244	285	1171	481	
	ER (10 ³ m ³)				41	1342	342				719		
	SSL (t)				1,4	12,8	5,9	2,6	2,1	0,4	6,6	2,2	

Tabella 7 Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1992

1993

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
P (mm)	0,2	4,6	31,8	68,0	67,2	119,6	117,4	117,4	138	342,6	31,2	30,2
Qm (m ³ /s)				0,15	0,42	0,31	0,25	0,16	0,28	0,67		
QM (m ³ /s)				0,36	0,63	0,57	0,55	0,47	0,85	1,05		
Ru (10 ³ m ³)				201	1128	807	663	362	550	606		
ER (10 ³ m ³)					593	187	42	2	246	606		
SSL (t)				2,0	8,9	7,0	6,2	2,3	3,1	48,1		

Tabella 8 Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1993

1994

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
P (mm)	72,0	47,0	11,4	77,4	119,6	55,6	215,8	134,4	234,0	63,0	47,2	18,4
Qm (m ³ /s)					0,67		0,25	0,18	1,57		0,12	
QM (m ³ /s)					1,50		0,57	0,44	10,42		0,13	
Ru (10 ³ m ³)					1781		504	478	1869		215	
ER (10 ³ m ³)					1628		4	2	1869			
SSL (t)					25,2		3,4	1,9	2440,2			

Tabella 9 Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1994

1995

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
P (mm)	27,6	37,2	39,8	49,2	147,6	144,4	82,0	77,8	141,0	1,0	22,2	85,8
Qm (m ³ /s)				0,14		0,59	0,23	0,24	0,31	0,16	0,12	
QM (m ³ /s)				0,17		1,10	0,82	3,85	1,01	0,21	0,13	
Ru (10 ³ m ³)				41		1174	3	14	4	1	0,5	
ER (10 ³ m ³)						1034	30	35	255			
SSL (t)						0,9	0,9	99,6	1,5	0,5	0,2	

Tabella 10 Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1995

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	
1996	P (mm)	27,4	12,0	9,0	42,0	145,8	110,8	105,6	204,2	41,6	226,0	239,4	36,6
	Qm (m ³ /s)					0,43	0,35	0,29	0,19	0,44			
	QM (m ³ /s)					0,45	1,26	0,90	0,45	4,32			
	Ru (10 ³ m ³)					131	939	774	490	1024			
	ER (10 ³ m ³)					68	451	272	8	466			
	SSL (t)						0,1			536,5			

Tabella 11 Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1996

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	
1997	P (mm)	53,8	4,4	11,4	26,0	68,4	195,0	147,4	108,8	22,8	2,2	154,0	95,6
	Qm (m ³ /s)				0,12	0,44	0,45	0,38	0,33	0,19	0,10	0,11	
	QM (m ³ /s)				0,14	0,87	1,43	0,92	0,71	0,48	0,13	0,35	
	Ru (10 ³ m ³)				316	1173	1171	1015	844	492	274	292	
	ER (10 ³ m ³)					701	370	317	140	2			
	SSL (t)				0,2	0,5	1,5	1,2	1,7	0,7	0,1	0,1	

Tabella 12 Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1997

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	
1998	P (mm)	17,0	7,0	3,6	160,4	63,0	129,8	142,6	83,6	149,2	195,6	22,4	2,0
	Qm (m ³ /s)					0,63	0,57	0,20	0,20	0,37	0,48	0,18	
	QM (m ³ /s)					1,43	1,03	0,29	0,82	1,28	3,11	0,19	
	Ru (10 ³ m ³)					1438	1479	536	529	947	1277	289	
	ER (10 ³ m ³)					1268	1191		6	404	752		
	SSL (t)						0,2			0,3	590,7	0,4	

Tabella 13 Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1998

		GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
1999	P (mm)	60,0	13,0	102,8	110,8	154,0	149,4	112,0	140,6	185,4	92,0	47,6	32,4
	Qm (m ³ /s)						0,35	0,25	0,30	0,31	0,40		0,16
	QM (m ³ /s)						0,59	0,49	0,61	3,78	0,40		0,55
	Ru (10 ³ m ³)						717	457	785	774	17		286
	ER (10 ³ m ³)						177	2	15	324			4
	SSL (t)						1,0	30,9	80,4	59,8	0,3		

Tabella 14 Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 1999

		GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
2000	P (mm)	5,6	3,0	116,6	66,2	74,4	66,4	107,2	131,2	137,2	284,0	386,0	30,8
	Qm (m ³ /s)				0,60	0,37		0,38	0,33		0,10		
	QM (m ³ /s)				0,69	0,71		0,92	0,71		0,13		
	Ru (10 ³ m ³)				137	547		1015	844		274		
	ER (10 ³ m ³)				137	200		317	140				
	SSL (t)				1,4	3,5		1,2	1,7		142,0		

Tabella 15 Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 2000

		GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
2001	P (mm)	112,9	7,1	101,7	95,3	16,8	104,2	177,9	130,0	130,2	35,0	38,1	
	Qm (m ³ /s)			0,09	0,11	0,36	0,38	0,28	0,15	0,18	0,12	0,08	
	QM (m ³ /s)			0,19	0,21	0,71	0,63	1,909	0,63	0,66	0,26	0,71	
	Ru (10 ³ m ³)			183	290	228	758	736	408	469	317	184	
	ER (10 ³ m ³)					128	289	264	4	83		9	
	SSL (t)			0,1	0,1	1017,6	0,3	120,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabella 16 Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 2001

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	
2002	P (mm)	0,1	59,9	56,8	139,0	249,9	101,3	123,2	154,6	144,2	51,3	179,9	98,0
	Qm (m ³ /s)				0,11	0,77	0,34	0,22	0,16	0,18	0,22	0,58	
	QM (m ³ /s)				0,32	2,23	1,21	0,44	0,42	0,26	0,34	2,46	
	Ru (10 ³ m ³)				273	1777	375	590	441	464	496	1454	
	ER (10 ³ m ³)					1661	92					1215	
	SSL (t)					149,7	0,7			0,2		449,3	

Tabella 17 Dati mensili di P, Qm, QM, Ru, ER, SSL rilevati nell'anno 2002

4.1 SINTESI VARIABILI

Ora verranno sintetizzate e analizzate le varie variabili climatiche, idrologiche e sedimentologiche registrate tra il 1987 ed il 2002, tramite dei grafici Box-Plot, in cui viene indicato il primo e terzo quartile (25 e 75%) nelle estremità del rettangolo, e diviso al suo interno dalla mediana (50%); mentre i segmenti chiamati anche "baffi" sono delimitati dal minimo e dal massimo non anomali dei valori. Questi grafici sono stati costruiti tramite l'utilizzo dell'applicazione Graph Pad Prism 9.

Nel grafico presentato in figura 9 è possibile notare la distribuzione delle precipitazioni mensili, dove è possibile osservare come ci siano dei valori mediani maggiori nei mesi estivi, come nel mese di luglio; mentre per i valori estremi troviamo il massimo nel mese di novembre ed aprile con dati che si attestano a ~ 400 mm. Al contrario nei mesi invernali troviamo valori molto bassi, con massimi che superano di poco i valori di 100 mm, questi dati rispecchiano il clima atteso che caratterizza l'area studio. In figura 10 è possibile notare la portata media, con valori compresi tra aprile e novembre. È possibile notare come il valore mediano maggiore lo troviamo nei mesi di maggio e giugno con valori di ~0,5 m³/s, mentre i valori massimi li troviamo nel mese di settembre che spicca con valori di ~ 1,5 m³/s. In generale riscontriamo una bassa dispersione dei dati in tutti i mesi eccetto settembre. Per quanto riguarda la portata massima, riportata in figura 11, troviamo valori mediani maggiori nei mesi di maggio giugno e luglio con il massimo nel mese di maggio (~ 1,2 m³/s). I dati primaverili/estivi risultano avere una bassa dispersione di dati; mentre nei mesi autunnali troviamo un'elevata dispersione; infatti, nel mese di ottobre troviamo il primo e il terzo quartile con

una variabilità di $\sim 4 \text{ m}^3/\text{s}$. Per quanto riguarda i valori massimi di portata si attestano a $\sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$ nel mese di settembre.

In grafico 12 è possibile osservare i dati relativi al *Runoff*, in questo caso notiamo sempre valori mediani maggiori nel mese di maggio, ma con un'elevata dispersione di dati all'interno del primo e terzo quartile. Inoltre, interessante far notare come i valori massimi siano registrati nel mese di giugno con valori di $\sim 200000 \text{ m}^3/\text{s}$. Nel grafico 13 viene presentato l'*Effective runoff*, in cui notiamo un'elevata dispersione di dati nei mesi di maggio, giugno e settembre, con valori mediani maggiori nel mese di maggio, ottobre e novembre ($\sim 700000 \text{ m}^3$), mentre i valori massimi li ritroviamo nel mese di giugno con *Effective runoff* di $\sim 2200000 \text{ m}^3$. Infine, nel grafico 14 vengono riportati i dati relativi al *Sediment Suspended Load (SSL)*; anche all'interno di questo grafico troviamo un'elevata dispersione di dati soprattutto nei mesi autunnali, i valori mediani maggiori ($\sim 60 \text{ t}$) sono presenti nel mese di ottobre, mentre i valori massimi nel mese di settembre. Risulta importante indicare come la tendenza dei mesi autunnali risulti avere dei massimi maggiori rispetto ai restanti mesi, con l'eccezione del mese di maggio dove riscontriamo valori massimi importanti ($\sim 1000 \text{ t}$).

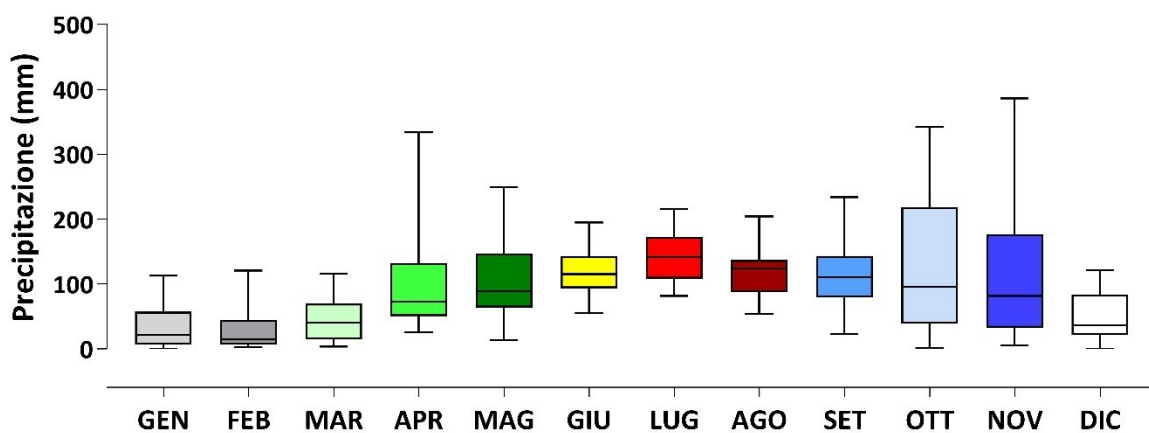


Figura 9 Box Plot delle Precipitazioni mensili registrate nel periodo 1987-2002

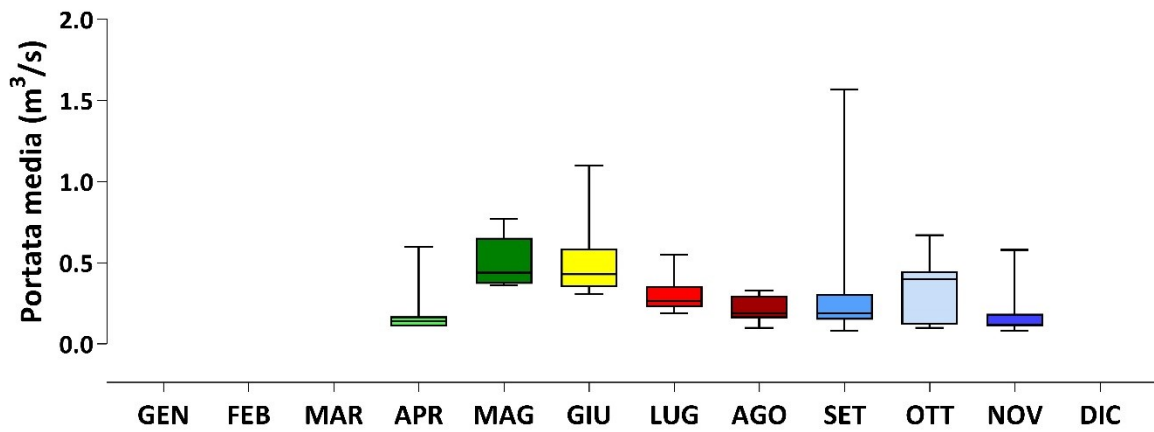


Figura 10 Box Plot delle Portate medie rilevate nel periodo 1987-2002

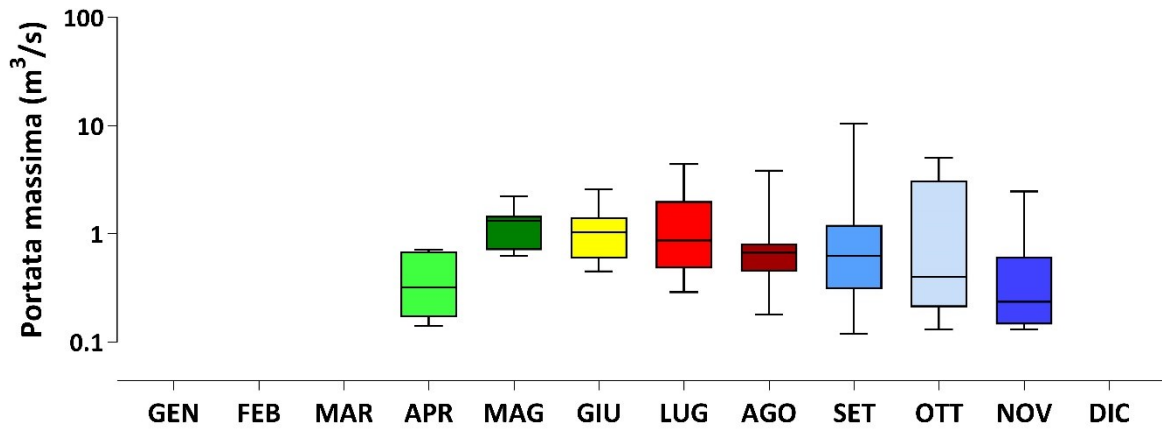


Figura 11 Box Plot delle Portate massime rilevate nel periodo 1987-2002

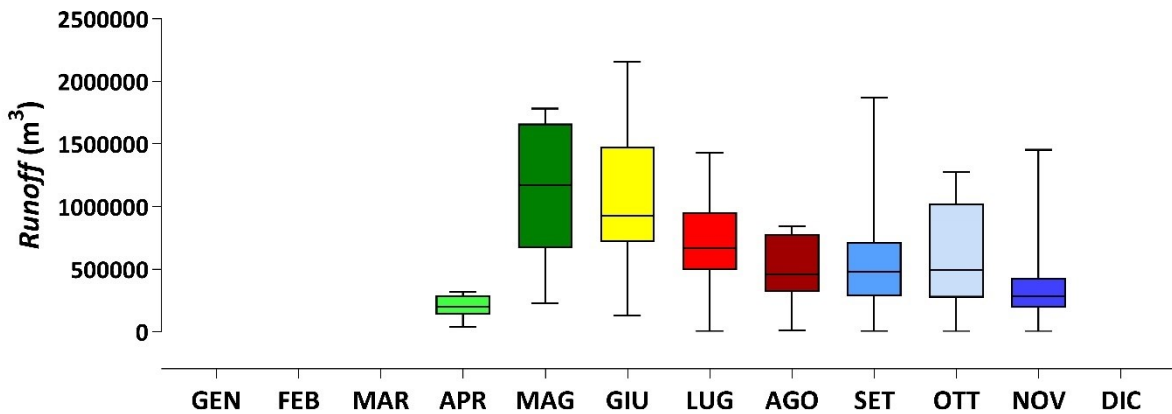


Figura 12 Box Plot del Runoff rilevato nel periodo 1987-2002

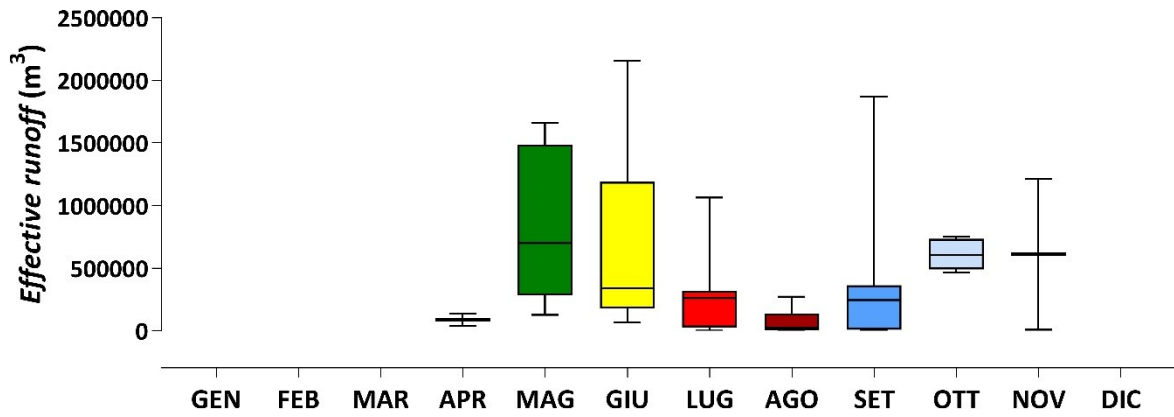


Figura 13 Box Plot del Effective runoff rilevato nel periodo 1987-2002

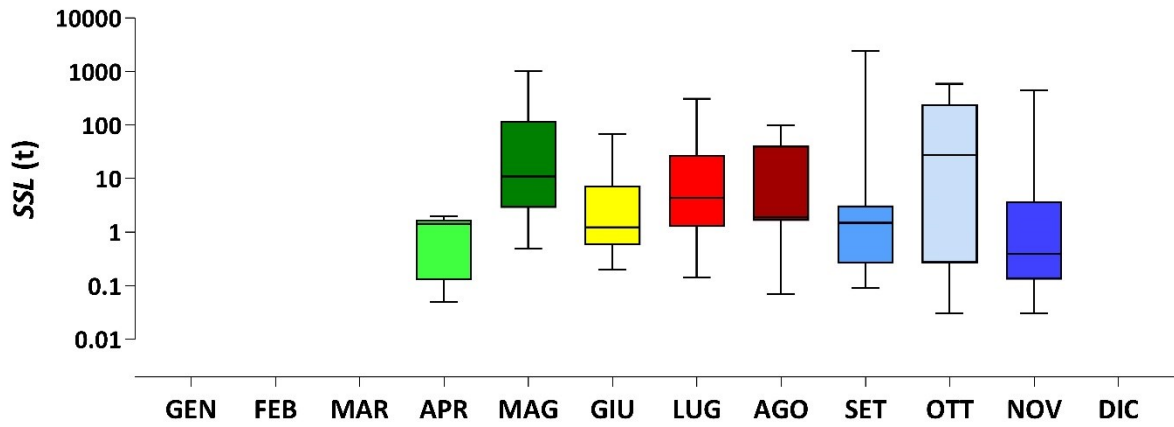


Figura 14 Box Plot del Sediment Suspended Load (SSL) rilevato nel periodo 1987-2002

4.2 RELAZIONI

Successivamente all'analisi dati si è proceduto ad indagare le possibili relazioni tra le variabili, plottandole in grafici ed analizzandole la linea di tendenza della regressione lineare. Infine, è stata analizzata la bontà della regressione tramite il coefficiente di determinazione (R^2). In seguito, è riportata la tabella 18 con i valori medi degli R^2 rilevati.

	P	Qm	QM	Ru	ER	SSL
P		0,21	0,31	0,22	0,43	0,19
SSL	0,19	0,53	0,58	0,44	0,54	

Tabella 18 valori di R^2 medi dati dalle relazioni tra le variabili P, Qm, QM, Ru, ER, SSL

Come è possibile notare dagli R^2 evidenziati, i valori più alti risultano essere quelli dati dalla relazione tra Precipitazioni-*Effective Runoff* e Portata Massima-*Sediment Suspended Load*. Le relazioni con il più alto R^2 sono state selezionate e plottate in un triplice grafico, in cui ogni mese è interpolato con una linea di tendenza. In figura 15 e 16 vengono riportati i grafici con le relazioni appena descritte, essi sono stati divisi in tre grafici per una migliore comprensione ed analisi, ovvero dividendo i grafici in base alla stagionalità:

- Primavera: aprile e maggio
- Estate: giugno, luglio e agosto
- Inverno: settembre, ottobre e novembre

Per quanto riguarda la figura 15, nella quale vengono messi in relazione i valori del *Effective Runoff* con le Precipitazioni, è possibile notare come i valori di giugno abbiano tendenze negative, mentre il restante delle rette di tendenza risulti avere orientamenti positivi. Nel grafico 15 A troviamo valori molto dispersi per il mese di maggio, che inoltre risulta avere una pendenza positiva molto accentuata. Nel grafico 15 B troviamo dati molto raggruppati principalmente nei mesi di luglio ed agosto, invece, come detto precedentemente, risulta interessante richiamare l'attenzione sul mese di giugno che delinea una tendenza negativa con una forte pendenza della retta. Una situazione intermedia di dispersione invece la possiamo notare nel grafico 15 C che presenta la linea di tendenza del mese di ottobre con un'inclinazione poco accentuata, che indica come all'aumentare della Precipitazione i valori di *Effective Runoff* aumentino di poco. Infine, per quanto riguarda il grafico 15, nei mesi di maggio, giugno e settembre sono stati osservati valori di *Effective Runoff* maggiori rispetto ad i restanti mesi.

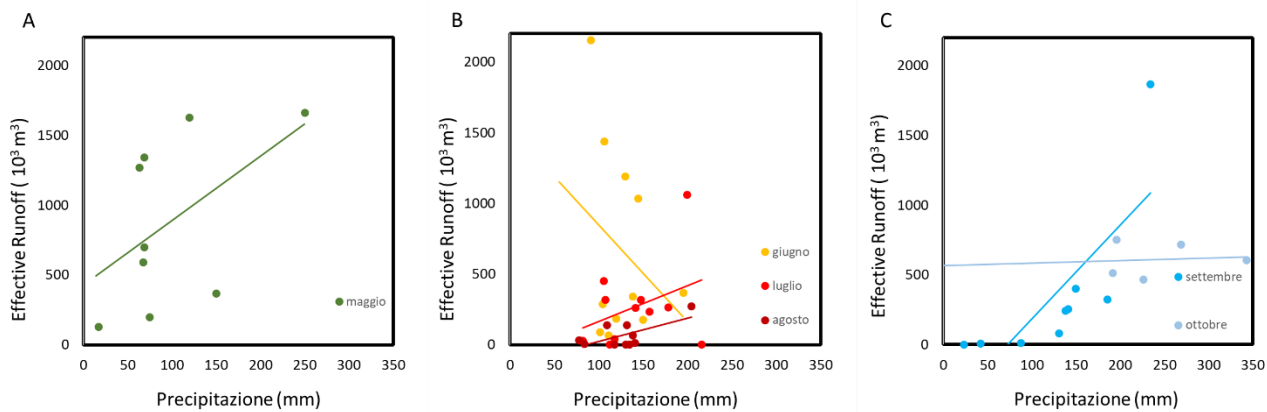


Figura 15 Grafici relativi alle relazioni tra Effective Runoff ed Precipitazioni

Nel grafico 16, che mette in relazione la Portata massima con il *Suspended Sediment Load*, è subito visibile come le tendenze di ogni mese siano tutte positive. Nel grafico 16 A troviamo valori importanti soprattutto nel mese di maggio che presenta valori di SSL rilevanti rispetto al mese di aprile dove troviamo valori nettamente inferiori. Per quanto riguarda il grafico 16 B possiamo notare come le due linee di tendenza di luglio ed agosto siano quasi sovrapposte, mentre i valori di giugno risultino leggermente inferiori rispetto alle altre. Molto interessante risulta essere il grafico 16 C dove è possibile notare come le tre linee di tendenza siano di uguale pendenza, anche se con valori diversi ma poco distanti fra loro. Infine, è possibile notare come nel grafico di settembre sia chiaramente visibile il dato relativo all'evento del 14 settembre del 1994.

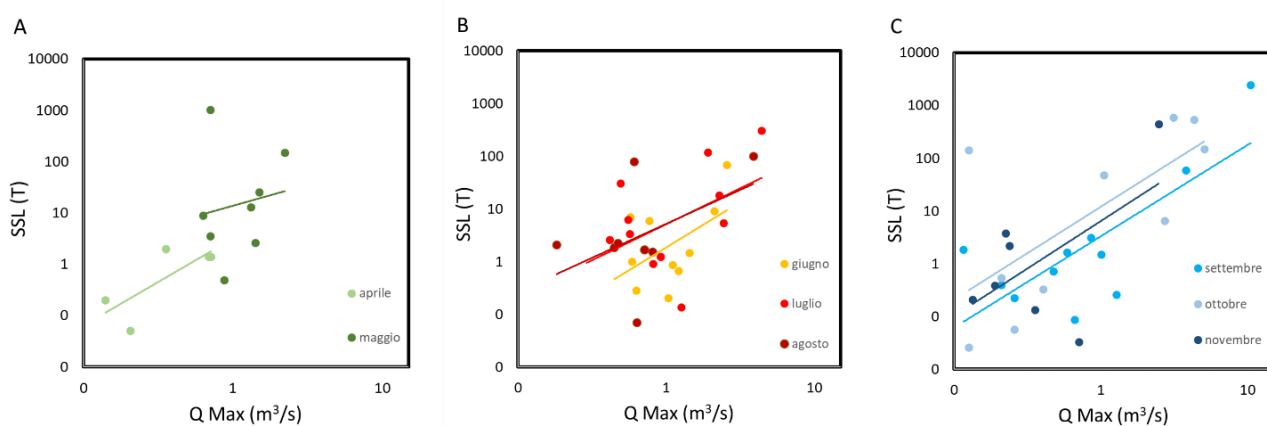


Figura 16 grafici relativi alle relazioni tra Sediment Suspended Load ed Portata massima

5 DISCUSSIONI

Il presente elaborato ha avuto come scopo l'analisi delle condizioni climatiche, idrologiche e sedimentologiche di un bacino montano, per indagare se tra queste variabili ci fosse una relazione. Si è partiti utilizzando i dati rilevati dalle strumentazioni della stazione sperimentale del Rio Cordon e successivamente sono stati elaborati ulteriori variabili riguardanti le condizioni climatiche idrologiche e sedimentarie, ovvero la precipitazione, la portata media e massima, il *runoff* ed *effective runoff*, ed infine il *suspended sediment load*. L'arco di tempo in cui è stato svolto il monitoraggio e su cui si è basata l'analisi va dal 1987 al 2002. Per quanto riguarda gli eventi più intensi abbattutesi sul bacino del Rio Cordon, risultano esserci due di elevata magnitudo nel periodo indagato: il primo evento, uno dei più intensi mai registrato dalla stazione, è stata l'alluvione del 14 settembre 1994. Questa inondazione è stata causata da precipitazioni ad alta intensità con 7,2 mm ogni 5 min, con una portata massima registrata di 10,42 m³/s (Rainato, 2015). Questa portata supera di gran lunga le portate massime registrate durante altri eventi di piena nel bacino. È stato stimato che per un evento di questa intensità si abbiano tempi di ritorno di circa 30-50 anni. Durante questo evento il sedimento sospeso ha raggiunto un picco di 58 gl⁻¹, registrato dal torbidimetro Hach SS6, con una quantità di sedimento sospeso pari a 2435,1 t (Rainato, 2015). L'intensità di questo evento ha distrutto lo strato di corazzamento dell'alveo, formatosi nel corso degli anni, e di conseguenza il letto del canale è diventato la principale fonte di sedimenti mobilizzabili durante gli eventi alluvionali successivi (Rainato, 2015). Il secondo evento, in qualche modo di minore intensità, è stato registrato nel maggio del 2001, più precisamente 11 maggio del 2001, quando in seguito ad una colata di fango durante lo scioglimento nivale si ha avuto il trasporto di 1017,6 t di materiale fine (Rainato, 2015). Per avere una comparazione riguardo la magnitudo di questi eventi, si ricorda che la portata a piene rive nel Rio Cordon è pari a 2,30 m³/s (Bin 2018).

Riguardo le analisi condotte, il primo dato analizzato è stata la precipitazione. Come è stato presentato in figura 9, le precipitazioni registrate seguono il regime nivo-pluviale caratteristico della zona, caratterizzato da due picchi di flusso, il primo pronunciato in primavera, legato allo scioglimento della neve, mentre il secondo in autunno correlato alle precipitazioni. Per quanto riguarda la portata media, rappresentate in figura 10, risulta essere in qualche modo correlata alle precipitazioni, in quanto il grafico ci indica come i valori di mediana massima siano nel periodo primaverile ed estivo. Mentre per quanto riguarda la portata massima (figura 11), troviamo dei valori decrescenti, con la mediana massima nel mese di maggio, che decresce fino ad arrivare al minimo nel mese di novembre. Una possibile spiegazione a questa tendenza potrebbe essere legata

alla saturazione del terreno che risulta maggiore nei mesi successivi allo scioglimento nivale, questo potrebbe comportare un aumento delle portate massime, che successivamente decresce, via via che il terreno risulti meno saturo e quindi rispondendo meglio agli eventi piovosi. I dati relativi al *Runoff* ed *Effective runoff* (figura 12 e 13), risultano essere affini tra di loro, in quanto assumono delle tendenze simili; entrambi seguono un andamento decrescente con un leggero aumento nei mesi autunnali, che risulta più marcato nel *Effective runoff*. Questi andamenti potrebbero essere legati sia al regime pluviometrico sia alla saturazione del terreno, che nei mesi primaverili risulta maggiore, e questo comporterebbe valori di *runoff* maggiori.

Infine, l'ultima variabile analizzata risulta essere il *Sediment Suspended Load* (Figura 14), nel grafico troviamo un'alta variabilità mensile, con tre picchi nei mesi di maggio, luglio ed ottobre, rispettivamente. Questa alta variabilità evidenzia la complessità dei fenomeni di trasporto.

Partendo da questi risultati si è andato a ricercare le migliori relazioni tra variabili climatiche (precipitazioni), idrologiche (portata media, portata massima, *runoff*, *effective runoff*) e sedimentologiche (*SSL*) per identificare eventuali relazioni di causa-effetto. Tramite una regressione lineare sono state verificate le bontà degli adattamenti (tabella 17), ed i risultati ottenuti hanno dimostrato come le migliori relazioni siano nella relazione tra Precipitazione-*Effective runoff* con un R^2 di 0,43, e nella relazione Portata Massima-*Sediment Suspended Load*, con un R^2 di 0,58. Quest'ultima relazione descrive con una certa bontà la variabile sedimentologica. In questo senso, in ulteriori studi (Pagano et. al. 2019) condotti nel bacino del Rio Cordon la dinamica dei sedimenti sospesi osservata durante gli eventi alluvionali è risultata fortemente legata alla portata massima registrata, suggerendo che, in piccoli bacini montani, il picco di portata può rappresentare un buon descrittore dell'entità dell'evento. Ed inoltre questo risultato è coerente con le osservazioni fatte da Duvert et al. (2012), che ha analizzato otto bacini idrografici situati nella cintura vulcanica messicana, nei Pirenei spagnoli e nelle Alpi francesi meridionali, che ha dimostrato come il picco di portata dell'evento risulti essere la variabile migliore per descrivere le rese di sedimenti sospesi osservate. Successivamente le relazioni scelte sono state indagate con maggior precisione analizzando, tramite regressioni lineari, la tendenza di ogni mese; come è possibile notare dai grafici 15 e 16. Nel grafico 15 possiamo notare delle tendenze positive in tutti i mesi analizzati, tranne il mese di giugno, che risulta possedere una pendenza negativa. Essa indica come all'aumentare della precipitazione, l'*effective runoff* diminuisce; questa inversione di tendenza potrebbe essere interpretata in quanto nel mese di giugno le precipitazioni risultano essere caratterizzati soprattutto

da eventi intensi ma di breve durata (temporali estivi). Questi temporali estivi apporterebbero un modesto quantitativo di precipitazione che però concentrato in un breve arco di tempo da origine ad importanti deflussi superficiali, e portate maggiori all' interno dell'alveo, che comporterebbero valori di *effective runoff* maggiori. Come è possibile notare nel grafico 15B, possiamo notare outliers con valori importanti, legati a precipitazioni inferiori ai 100 mm. La tendenza negativa, quindi, potrebbe essere data da eventi con caratteristiche non temporalesche che danno un maggior apporto di precipitazione ma dilazionato in maggior tempo, e quindi creando minor deflusso e minor portate che comporterebbero valori di *effective runoff* minori.

Per quanto riguarda il secondo grafico (figura 16), riguardante la relazione tra Portata massima ed *Sediment Suspended Load (SSL)*, ritroviamo delle tendenze positive per tutti i mesi analizzati. Questo suggerisce come, all' aumentare della portata massima siano legati valori di SSL maggiori. Risulta interessante notare come le pendenze delle rette siano molto simili in tutti i mesi analizzati, quasi come se ci fosse una univoca correlazione tra la portata massima ed il SSL. Il fenomeno potrebbe essere interpretato seguendo il ragionamento che lega le portate maggiori, create da precipitazioni intense, con maggiore erosione dell'alveo che comporterebbero un maggior sedimento mobilizzabile dal corso d' acqua e quindi un aumento dei valori di SSL. A tal proposito, in uno studio di Pagano et. al. (2019), viene messo a confronto il bacino del Rio Cordon con il bacino del Carapelle, situato nel sud Italia. All' interno dello studio viene evidenziato come in entrambi i siti di studio, le variabili legate alla precipitazione, tra cui l'intensità massima oraria (I_{max}) e l'intensità media oraria delle precipitazioni (I_{av}), sono apparse fortemente correlate alle concentrazioni dei solidi sospesi e alla quantità di materiale trasportato dagli eventi, sottolineando il ruolo svolto dalle precipitazioni. Tale dinamica è stata osservata nonostante la diversità dei climi e delle dimensioni dei bacini. In altri studi riguardanti il trasporto solido nel bacino del Rio Cordon (Pagano et. al. 2019, Garcia Rama 2016) viene evidenziato come volumi di trasporto elevati siano legati a portate idriche notevoli; ed inoltre viene richiamato un particolare aspetto riguardante le sorgenti di detrito. In particolare, l'impostazione geomorfologica del bacino alpino del Rio Cordon è caratterizzata dall'evidente disconnessione che interessa il bacino. A causa di ciò si verificano fenomeni di bassa magnitudo con precipitazioni modeste (condizioni ordinarie) in cui solo le aree sorgente a valle forniscono materiale fine, mentre le sorgenti a monte non contribuiscono (Pagano et. al. 2019). Inoltre, queste aree sorgenti di sedimenti risultano essere legate principalmente alle zone interne all'alveo e non alle zone di versante, spesso inattive (Rainato, 2020). Secondo (Mao, 2004), le sorgenti di sedimento coprono un'area di 0.262 Km^2 , che costituiscono il 5.2 % della superficie totale del bacino. Un altro

aspetto interessante da riportare è un particolare fenomeno, denominato “memory effect” (Rainato, 2015). Esso è legato all’alluvione del settembre 1994 che ha causato un cambiamento nella dinamica di spostamento dei sedimenti, con un periodo successivo di alta efficienza nel trasporto, in quanto l’eccezionalità del fenomeno ha alterato i flussi osservati fino ad allora. Esso ha intensificato la disponibilità dei sedimenti, riattivando diverse vecchie aree sorgenti e creandone di nuove tramite la rottura del corazzamento dell’alveo e delle morfologie a *step-pool*, che rendono l’alveo stabile. È stato stimato che questo effetto memoria, causato da eventi eccezionali, ha influenzato la dinamica dei sedimenti per i 10 anni successivi (Rainato, 2015).

Un altro aspetto interessante da analizzare riguardo al grafico 16A risulta essere quello legato al mese di maggio. Come è possibile notare dal grafico precedentemente riportato, il valore risulta essere nettamente maggiore rispetto ai restanti mesi. Questo dato potrebbe essere interpretato seguendo la teoria legata al regime nivo-pluviale che caratterizza l’area; in quanto oltre all’apporto dato dallo scioglimento nivale, viene considerato anche l’apporto di precipitazione, che come è possibile notare nel grafico 9 risulta essere maggiore nel mese di maggio rispetto al mese di aprile. È bene indicare come i dati del mese di maggio (grafico 16A) si caratterizzino per una dispersione molto alta, ciò indica una bassa affidabilità della regressione lineare. Un ulteriore aspetto da analizzare risulta essere legato agli eventi intensi precedentemente riportati, l’evento del settembre 1994 e del maggio 2001. Essi sono presentati nel grafico 16A e 16C con due outliers ben visibili. Entrambi gli eventi presentano caratteristiche di portata solida molto superiori al normale, ben 2435 t per l’evento del 1994 e 1017 t per l’evento del 2001. Essi però risultano essere legati a portate molto differenti tra loro; infatti, nell’evento del 1994 il trasporto è legato ad una portata di oltre 10 m³/s, mentre per quanto riguarda il dato del 2001 esso risulta essere associato ad una portata molto inferiore (~1m³/s). La spiegazione potrebbe essere legata alla differenza di innesco dei fenomeni. Più precisamente l’evento del 2001 è stato caratterizzato da una fornitura quasi illimitata di sedimenti a seguito di un flusso di fango verificatosi durante lo scioglimento nivale. La saturazione del suolo ha innescato una frana superficiale che si è spostata lungo un piccolo affluente (Rainato, 2015), ed il conoide detritico creatosi a seguito di questo evento ha fornito al Rio Cordon del sedimento facilmente trasportabile a valle. Ed è per questo che l’evento del 2001 è legato ad una portata modesta, in quanto il sedimento era facilmente mobilizzabile della corrente, rispetto all’evento del 1994, legato principalmente ad un evento temporalesco estivo caratterizzato da precipitazioni intense, che hanno creato una delle portate più importanti mai registrate nel sito (~10m³/s). Nonostante il ruolo del trasporto solido in sospensione nei torrenti montani sia spesso

sottovalutato, secondo (Mao, 2004) nel Rio Cordon esso rappresenta il 74 % della produzione totale di sedimenti su scala media interannuale. Risulta quindi una componente di grande interesse per la quantificazione totale dei sedimenti, che scorrono annualmente lungo l'asta fluviale

6 CONCLUSIONI

Questo elaborato ha avuto come scopo l'analisi delle condizioni climatiche, idrologiche e sedimentologiche di un bacino montano, per indagare se tra queste variabili ci fossero delle relazioni. L'arco di tempo in cui è stato svolto il monitoraggio e su cui si è basata l'analisi va dal 1987 al 2002. Il bacino oggetto di studio è quello del Rio Cordon, un piccolo bacino del Comune di Selva di Cadore (BL). Il Rio Cordon esprime le caratteristiche tipiche di un bacino montano alpino, mostrando un regime nivo-pluviale, ovvero legato soprattutto ad eventi meteorici autunnali ed al fenomeno di scioglimento nivale primaverile. I dati che sono stati utilizzati derivano dalla stazione di monitoraggio permanente situata alla sezione di chiusura del bacino ad un'altitudine di 1763 m s.l.m. La stazione è provvista di tre idrometri che hanno misurato il deflusso liquido in modo continuo, e di una stazione meteorologica che permette di raccogliere dati relativi a temperatura e precipitazione. Infine, la stazione presenta due torbidimetri per misurare il trasporto solido in sospensione.

Prima di indagare le relazioni tra condizioni idrologiche-climatiche e sedimentologiche, si sono svolte due fasi preliminari: la prima incentrata sull'estrapolazione dei dati "grezzi" rilevati dalla stazione sperimentale, tra i quali, la precipitazione, la portata media e massima, il *runoff* ed *effective runoff*, ed infine il *suspended sediment load*. La seconda fase si è incentrata sulla ricerca delle possibili relazioni tra le variabili, lavorando su scala mensile, plottandole in grafici ed analizzando le varie linee di tendenza, e valutandone la bontà, tramite il coefficiente R^2 . Le relazioni migliori osservate tramite questa analisi sono quelle date dalla relazione tra Precipitazioni-*Effective Runoff* ($R^2=0,43$) e Portata Massima-*Sediment Suspended Load* ($R^2=0,58$).

La prima relazione, tra Precipitazioni-*Effective Runoff*, indica una tendenza del torrente ad avere un aumento dell'*Effective Runoff* all'aumentare delle precipitazioni, questa tendenza risulta esserci in quasi tutti i mesi, anche se con pendenze diverse; eccetto il mese di giugno che risulta avere una tendenza opposta. Questa inversione di tendenza potrebbe essere data da temporali estivi, caratterizzati da forti precipitazioni in brevi archi di tempo.

La seconda relazione è stata Portata Massima-*Sediment Suspended Load*. In essa ritroviamo delle tendenze positive per tutti i mesi analizzati. Questo suggerisce quindi, come all'aumentare della portata massima siano legati valori di *SSL* maggiori. La relazione positiva potrebbe essere legata al fatto che portate maggiori provocano una maggiore erosione dell'alveo che comporterebbe un maggior sedimento mobilizzabile dal corso d'acqua e quindi un aumento dei valori di *SSL*.

Effettivamente in altri studi riguardanti il trasporto solido nel bacino del Rio Cordon viene evidenziato come volumi di trasporto elevati siano legati a portate idriche notevoli (Rainato, 2020). Possiamo però affermare che nessuna delle variabili idrologiche indagate abbia descritto appieno la componente sedimentologica, mettendo in evidenza l'elevata complessità che contraddistingue i processi di trasporto solido.

7 BIBLIOGRAFIA

- Benini G., 1990. Sistemazioni Idraulico-forestali, ed. UTET, Torino.
- Billi P., 1994. L'impatto degli interventi antropici sulla dinamica fluviale e possibilità di recupero ambientale. Ordine Regionale dei Geologi dell'Abruzzo
- Bin A., 2018. Tempesta Vaia nel bacino del Rio Cordon (BL): effetti su aree sorgenti di sedimentazione e alveo attivo. Tesi triennale. Relatore Lenzi M.A., Correlatore Rainato R. Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova, Legnaro.
- Borga M., 2020. Materiale didattico del corso di Idraulica e Idrologia, Corso di Laurea Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio, Dipartimento Territorio Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova, Legnaro.
- Cattaneo D, Viola F., 1992: Assetti climatologici, vegetazionali e pedologici. In: Il bacino attrezzato del Rio Cordon. Ragione Veneto, Quaderni di Ricerca.
- D'Agostino V., 2021. Materiale didattico del corso di Sistemazione dei Bacini Idrografici, Corso di Laurea Riassetto del Territorio e Tutela del Paesaggio, Dipartimento Territorio Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova, Legnaro.
- D'Agostino V., Lenzi M.A. 1996. La valutazione del trasporto solido di fondo nel bacino attrezzato del Rio Cordon. Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova, Legnaro
- D'Agostino V., Lenzi M.A., 1996. La valutazione del trasporto solido di fondo nel bacino attrezzato del Rio Cordon
- Duvert, C., et al., 2012. Towards prediction of suspended sediment yield from peak discharge in small erodible mountainous catchments (0.45–22 km²) of France, Mexico and Spain. *Journal of Hydrology*
- Fattorelli S., 1994. Sintesi delle ricerche sull'idrologia e sul trasporto dei sedimenti nel bacino attrezzato del Rio Cordon
- Fattorelli S., Cazorzi F., Dalla Fontana G., Lenzi M.A., Luchetta A., Scussel R., Marchi L. 1994. Sintesi delle ricerche sull'idrologia e sul trasporto dei sedimenti nel bacino attrezzato del Rio Cordon
- Fattorelli S., Keller H.M., Lenzi M.A., Marchi L., 1988. An experimental station for the automatic recording of water and sediment discharge in a small alpine watershed. *Hydrological Sciences Journal*

- Ferro V., Opere di sistemazione idraulico-forestale, Milano McGraw-Hill, 2014
- Lenzi M. A., D'Agostino V., Sonda D., 2000. Ricostruzione morfologica e recupero ambientale dei torrenti: criteri metodologici ed esecutivi.
- Lenzi M.A., 2021, Materiale didattico del corso di Idrologia e Sistemazioni Idraulico-Forestali, Corso di Laurea Tecnologie Forestali e Ambientali, Dipartimento Territorio Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova, Legnaro.
- Mao L., 2004. Analisi comparativa del trasporto solido di corsi torrentizi in diversi ambiti geografici Tesi di Dottorato. Supervisore Lenzi M.A., Co- Supervisore Aguirre M.A.J., Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova, Legnaro
- Montgomery, D.R., Buffington, J.M., 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. Bull.Geol.Soc.Am. 109(5), 596-611.
- Pagano S.G., Rainato R., García-Rama A., Gentile F., Lenzi M.A. 2019. Analysis of suspended sediment dynamics at event scale: comparison between a Mediterranean and an Alpine basin, Hydrological Sciences Journal
- Pozza E., 2019. Trasporto solido di fondo in un torrente alpino: relazione tra condizioni idrologiche e mobilità del sedimento. Tesi triennale. Relatore Lenzi M.A., Correlatore Rainato R. Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova, Legnaro.
- Rainato R., 2015. Sediment Dynamics in high gradient stream: bedload investigation in two study areas located in alpine and andine environments. Tesi di Dottorato. Supervisore Lenzi M.A., Co- Supervisore Mao, L., Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova, Legnaro
- Rainato R., Mao L., García-Rama A., Picco L., Cesca M., Vianello A., Preciso E., Scussel G.R., Lenzi M.A., 2017. Three decades of monitoring in the Rio Cordon instrumented basin: Sediment budget and temporal trend of sediment yield. Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova, Legnaro
- Rainato R., Mao L., Picco L., 2020. The effects of low-magnitude flow conditions on bedload mobility in a steep mountain stream. Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova, Legnaro.
- Rainato R., Picco L., Lenzi M.A., Mao L., Delai F., Rigon E., Moretto J., Cesca M., Vianello A., García-Rama A., 2012 Monitoring and analysis of the sediment transport event of november 2012 in the Rio Cordon station. Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova, Legnaro

- Strahler A. N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology", Transactions of the American Geophysical Union, 38 (6): 913–920