



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali**

**Corso di laurea magistrale in Scienze Forestali e Ambientali**

# **Analisi dei trend idrometeorologici del torrente Cordevole a La Vizza**

*Relatrice:*

Dott.ssa Eleonora Dallan

*Correlatori:*

Dott.ssa Ylenia Gelmini

Prof. Marco Borga

*Laureanda:*

Miscel Marcon

Matricola n.2057909

**Anno accademico 2022-2023**



# Indice:

<b>Riassunto</b> .....	10
<b>Abstract</b> .....	12
<b>Introduzione e obiettivi</b> .....	14
<b>Il bacino idrografico del torrente Cordevole</b> .....	18
1.1 Inquadramento del bacino sperimentale del Cordevole chiuso in località La Vizza .....	18
1.2 Inquadramento geomorfologico e geo-litologico.....	25
1.3 Inquadramento vegetazionale.....	27
1.4 Climatologia.....	29
<b>Materiali e metodi</b> .....	32
2.1 Eventi di deflusso .....	32
2.2 Dati idrometeorologici .....	32
2.3 Analisi dati .....	36
2.3.1 Estrazione caratteristiche degli eventi di deflusso .....	36
2.3.2 Test di Mann - Kendall.....	36
2.3.3 Sen's slope estimator.....	38
2.3.4 Effetto di correlazione seriale .....	38
2.3.5 Analisi trend idrometeorologici .....	40
2.3.6 Analisi trend degli eventi selezionati.....	41
<b>Risultati</b> .....	42
3.1 Trend annuale delle precipitazioni .....	42
3.2 Trend mensile delle precipitazioni.....	44
3.3 Trend annuale delle temperature .....	54
3.4 Trend mensile della temperatura .....	55
3.4.1 Trend temperatura massima.....	55
3.4.2 Trend temperatura minima.....	59
3.4.3 Trend temperatura media.....	64
3.4.4 Trend temperatura massima confronto stazioni .....	69

3.4.5 Trend temperatura minima confronto stazioni .....	70
3.4.6 Trend temperatura media confronto stazioni .....	71
3.5 Trend portata .....	72
3.5.1 Trend portata massimi annuali e media annua.....	75
3.6.1 Trend degli eventi.....	85
<b>Discussione dei risultati.....</b>	<b>90</b>
<b>Conclusioni.....</b>	<b>96</b>
<b>Ringraziamenti.....</b>	<b>100</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>102</b>
<b>Sitografia.....</b>	<b>107</b>
<b>Software.....</b>	<b>107</b>

# Indice delle figure:

<b>Figura 1:</b> Bacino idrografico del fiume Cordevole e sottobacino chiuso in località La Vizza	19
<b>Figura 2:</b> Curva ipsometrica della quota per il bacino in studio	20
<b>Figura 3:</b> DTM bacino del Cordevole a La Vizza	20
<b>Figura 4:</b> Istogramma quota bacino del Cordevole a La Vizza	21
<b>Figura 5:</b> Grafico a radar che mostra l'esposizione del bacino in studio, i numeri da 0 a 1.2 rappresentano frazioni della superficie del bacino idrografico in studio	22
<b>Figura 6:</b> La mappa mostra l'esposizione del bacino in studio	22
<b>Figura 7:</b> Istogramma della pendenza per il bacino in studio	23
<b>Figura 8:</b> La mappa mostra la pendenza espressa in percentuale del bacino del Cordevole chiuso a La Vizza	23
<b>Figura 9:</b> Mappa litologica bacino del Cordevole chiuso a La Vizza (fonte GeoPortale regione Veneto)	26
<b>Figura 10:</b> Uso del suolo bacino del Cordevole con sezione di chiusura a La Vizza (fonte GeoPortale regione Veneto)	27
<b>Figura 11:</b> Tipologie forestali presenti nell'area di studio (fonte GeoPortale regione Veneto)	28
<b>Figura 12:</b> La mappa mostra dove sono poste le stazioni di misura della precipitazione	33
<b>Figura 13:</b> La mappa mostra dove sono poste le stazioni di misura della temperatura	34
<b>Figura 14:</b> La mappa mostra dove sono poste le stazioni di misura della portata	34
<b>Figura 15:</b> Trend annuali per le precipitazioni cumulate annuali delle stazioni considerate, il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente	43
<b>Figura 16:</b> Trend mensile per le precipitazioni della stazione di Arabba (BL), il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente	44
<b>Figura 17:</b> Trend mensile per le precipitazioni della stazione di Caprile (BL), il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente	45
<b>Figura 18:</b> Trend mensile per le precipitazioni della stazione di Malga Ciapela (BL), il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente	47
<b>Figura 19:</b> Trend mensile per le precipitazioni della stazione di Biois a Cencenighe (BL), il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente	48
<b>Figura 20:</b> Trend mensile per le precipitazioni della stazione di Passo Falzarego (BL), il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente	50

<b>Figura 21:</b> Trend mensile per le precipitazioni della stazione di Passo Pordoi (BL) , il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente .....	51
<b>Figura 22:</b> Trend mensile per le precipitazioni della stazione di Passo Valles (BL) , il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente .....	52
<b>Figura 23:</b> Trend annuale delle temperature per le stazioni considerate, il colore verde mostra un trend in crescita .....	54
<b>Figura 24:</b> Trend mensile della temperatura massima per la stazione di Pian Fedaia (BL) , il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente .....	55
<b>Figura 25:</b> Trend mensile della temperatura massima per la stazione di Arabba (BL) , il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente .....	56
<b>Figura 26:</b> Trend mensile della temperatura massima per la stazione di Passo Pordoi (BL, il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente) .....	58
<b>Figura 27:</b> Trend mensile della temperatura minima per la stazione di Pian Fedaia (BL) , il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente .....	59
<b>Figura 28:</b> Trend mensile della temperatura minima per la stazione di Arabba (BL) , il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente .....	60
<b>Figura 29:</b> Trend mensile della temperatura minima per la stazione di Passo Pordoi (BL) , il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente .....	62
<b>Figura 30:</b> Trend mensile della temperatura media per la stazione di Pian Fedaia (BL) , il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente .....	64
<b>Figura 31:</b> Trend mensile della temperatura media per la stazione di Arabba (BL) , il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente .....	65
<b>Figura 32:</b> Trend mensile della temperatura media per la stazione di Passo Pordoi (BL) , il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente .....	67
<b>Figura 33:</b> Confronto del trend mensile temperatura massima per le stazioni considerate, il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente .....	69

<b>Figura 34:</b> Confronto del trend mensile temperatura minima per le stazioni considerate, il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente .....	70
<b>Figura 35:</b> Confronto del trend mensile temperatura media per le stazioni considerate, il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente .....	71
<b>Figura 36:</b> Quantili di portata e rispettivi trend per la stazione di La Vizza, il colore verde mostra un trend in crescita, il colore rosso mostra un trend decrescente mentre il colore giallo evidenzia l'assenza del trend .....	72
<b>Figura 37:</b> Quantili di portata e rispettivi trend per la stazione di Saviner, il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente .....	73
<b>Figura 38:</b> Massimi annuali di portata per le due sezioni di chiusura analizzate, il colore rosso mostra un trend decrescente.....	75
<b>Figura 39:</b> Portata media annua per le due sezioni di chiusura analizzate, il colore verde mostra un trend in crescita .....	76
<b>Figura 40:</b> Box plot durata di precipitazione degli eventi selezionati .....	77
<b>Figura 41:</b> Box plot intensità massima di precipitazione degli eventi selezionati.....	78
<b>Figura 42:</b> Box plot intensità media di precipitazione degli eventi selezionati .....	79
<b>Figura 43:</b> Box plot precipitazione cumulata degli eventi selezionati.....	80
<b>Figura 44:</b> Box plot portata massima degli eventi selezionati .....	81
<b>Figura 45:</b> Box plot volume di deflusso [m <sup>3</sup> ] degli eventi selezionati .....	82
<b>Figura 46:</b> Box plot volume di deflusso [mm] degli eventi selezionati.....	82
<b>Figura 47:</b> Box plot coefficiente di deflusso degli eventi selezionati .....	83
<b>Figura 48:</b> Box plot rapporto portata al picco/ volume di deflusso degli eventi selezionati...	84
<b>Figura 49:</b> Trend della precipitazione cumulata per gli eventi selezionati, sen slope in mm/anno.....	85
<b>Figura 50:</b> Trend dell'intensità media di precipitazione per gli eventi selezionati, sen slope in [mm/ora]/ anno .....	86
<b>Figura 51:</b> Trend della portata al picco per gli eventi selezionati, sen slope in [m <sup>3</sup> /s]/anno .	87
<b>Figura 52:</b> Trend del coefficiente di deflusso per gli eventi selezionati.....	88
<b>Figura 53:</b> Istogramma stagionalità degli eventi selezionati .....	89



# Indice delle tabelle:

<b>Tabella 1:</b> Caratteristiche del bacino in studio .....	24
<b>Tabella 2:</b> Caratteristiche delle stazioni di misura, quota, coordinate sistema di riferimento Gauss Boaga Roma 40 fuso ovest la colonna “variabile” indica la misurazione svolta ovvero temperatura (T), precipitazione (P) e portata (Q).....	35
<b>Tabella 3:</b> Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della precipitazione annua per le stazioni analizzate .....	43
<b>Tabella 4:</b> Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della precipitazione mensile per la stazione di Arabba (BL), in grassetto i trend con significatività (p-value < 0.05) .....	45
<b>Tabella 5:</b> Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della precipitazione mensile per la stazione di Caprile (BL).....	46
<b>Tabella 6:</b> Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della precipitazione mensile per la stazione di Malga Ciapela (BL).....	48
<b>Tabella 7:</b> Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della precipitazione mensile per la stazione di Biois a Cencenighe (BL).....	49
<b>Tabella 8:</b> Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della precipitazione mensile per la stazione di Passo Falzarego (BL).....	50
<b>Tabella 9:</b> Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della precipitazione mensile per la stazione di Passo Pordoi (BL) , in grassetto i trend con significatività (p-value < 0.05) .....	52
<b>Tabella 10:</b> Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della precipitazione mensile per la stazione di Passo Valles (BL).....	53
<b>Tabella 11:</b> Mostra la quantificazione dei trend di temperatura annuale per le stazioni considerate, in grassetto i trend con significatività (p-value < 0.05) .....	54
<b>Tabella 12:</b> Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura massima mensile per la stazione di Pian Fedaia (BL) , in grassetto i trend con significatività (p-value < 0.05) .....	56
<b>Tabella 13:</b> Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura massima mensile per la stazione di Arabba (BL) , in grassetto i trend con significatività (p-value < 0.05).....	57
<b>Tabella 14:</b> Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura massima mensile per la stazione di Passo Pordoi (BL).....	58

<b>Tabella 15:</b> Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura minima mensile per la stazione di Pian Fedaia (BL) , in grassetto i trend con significatività (p-value < 0.05).....	60
<b>Tabella 16:</b> Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura minima mensile per la stazione di Arabba (BL) .....	61
<b>Tabella 17:</b> Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura minima mensile per la stazione di Passo Pordoi (BL).....	63
<b>Tabella 18:</b> Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura media mensile per la stazione di Pian Fedaia (BL) , in grassetto i trend con significatività (p-value < 0.05).....	65
<b>Tabella 19:</b> Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura media mensile per la stazione di Arabba (BL) , in grassetto i trend con significatività (p-value < 0.05) .....	66
<b>Tabella 20:</b> Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura media mensile per la stazione di Passo Pordoi (BL) , in grassetto i trend con significatività (p-value < 0.05).....	68
<b>Tabella 21:</b> Quantificazione dei trend e variabili statistiche per la stazione di La Vizza, in grassetto i trend con significatività (p-value < 0.05).....	73
<b>Tabella 22:</b> Quantificazione dei trend e variabili statistiche per la stazione di Saviner .....	74
<b>Tabella 23:</b> Quantificazione dei trend e variabili statistiche delle portate massime annuali per le stazioni in analisi .....	75
<b>Tabella 24:</b> Quantificazione dei trend e variabili statistiche delle portate medie annuali per le stazioni in analisi .....	76

## Riassunto

L'identificazione delle tendenze idro-meteorologiche è fondamentale per valutare il cambiamento climatico e la variabilità a livello di bacino. Questo studio ha esaminato le tendenze a lungo termine dai dati sulla portata del corso d'acqua, sulla temperatura e sulle precipitazioni intorno al sottobacino del Cordevole con sezione di chiusura in località La Vizza.

I dati sono stati sottoposti all'applicazione del test non parametrico di Mann-Kendall al livello di significatività del 5% e dello stimatore di pendenza Sen, sono state identificate le tendenze della temperatura, delle precipitazioni e delle portate a intervalli di tempo annuali e mensili.

Questo studio ha rivelato una combinazione di tendenze al rialzo e al ribasso nei dati di temperatura e precipitazioni per le fasi temporali osservate. Per le precipitazioni su base annua, non sono state rilevate tendenze statisticamente significative, sebbene predominassero trend al rialzo. Tuttavia, presso la stazione di Arabba (BL) nei mesi di marzo, maggio e agosto, sono state osservate significative tendenze all'aumento delle precipitazioni. Al contrario, tutte le stazioni hanno registrato per i mesi di aprile e ottobre e per la maggior parte delle stazioni anche il mese di settembre, tendenze al ribasso, seppur non statisticamente significative.

In particolare, le tendenze in aumento interessano la stagione invernale, facendo presupporre che vi sia un cambiamento negli attuali pattern temporali di precipitazione dell'area, poiché l'aumento è stato più elevato rispetto alla stagione estiva che di norma presenta il picco.

Per la temperatura media su base annua, sono state rilevate tendenze statisticamente significative al rialzo per tutte le stazioni con un aumento medio di  $0.50^{\circ}\text{C}$  in dieci anni. Mentre i risultati ottenuti su scala mensile hanno mostrato una dominanza di trend positivi, tra cui sono risultati significativi i mesi di aprile, luglio e novembre.

L'analisi delle portate ha rivelato trend al rialzo per le portate medie annue, e trend al ribasso per le portate massime annue, mentre lo studio di sette quantili di portata ha evidenziato un aumento statisticamente significativo per il 10° e 50° percentile con un aumento pari al 13.43% e al 14.29% rispettivamente; al contrario per il massimo annuale vediamo una tendenza decrescente.

I risultati ottenuti per questa parte di analisi mostrano che le tendenze in aumento delle precipitazioni non portano ad un conseguente aumento delle portate, ed evidenziano quanto siano importanti anche altri fattori da tenere in considerazione, come l'umidità del suolo antecedente all'evento di precipitazione, la topografia e la litologia della zona. Inoltre, anche

le temperature giocano un ruolo chiave in questi processi, in quanto influenzano non solo le precipitazioni stesse, in particolare durante la stagione invernale, ma portano anche ad aumentare i processi di evaporazione al suolo andando poi a condizionare i processi di genesi dei deflussi.

Infine le quattro caratteristiche analizzate sui 912 eventi di deflusso selezionati mostrano coerenza con i dati esaminati nella prima parte dello studio; infatti vediamo come sia la precipitazione cumulata che l'intensità media di precipitazione abbiano un trend positivo (quest'ultima risulta anche statisticamente significativa), al contrario invece la portata al picco e il coefficiente di deflusso evidenziano un trend al ribasso, dove il coefficiente di deflusso risulta statisticamente significativo.

## Abstract

The recognition of hydro-meteorological patterns is vital for evaluating climate fluctuations and changes at the basin level. This analysis investigated the long-term developments of stream flow, temperature, and precipitation data in and around the Cordevole subbasin, concluding at La Vizza.

The data underwent the non-parametric Mann-Kendall test at the 5% significance level and the Sen slope estimator. Subsequently, trends in temperature, precipitation, and flow rates were identified at annual and monthly time intervals.

The study revealed a combination of upward and downward trends in the temperature and precipitation data for the observed periods. There were no statistically significant trends found in annual precipitation, but upward trends were more prevalent. However, in March, May and August, there were significant upward trends in precipitation observed at the Arabba (BL) station. Conversely, for the months of April and October, and for most stations, the month of September also recorded downward trends, although not statistically significant.

The winter season is notably affected by the rising trends, indicating a modification in current precipitation patterns in the area, as the incline surpasses that of the typical summer peak.

With regard to yearly temperatures, all stations show a statistically significant upward trend, with an average increase of 0.50°C over the span of ten years. Among the positive trends identified on a monthly basis, April, July and November were particularly significant.

The analysis of flow rates indicates an upward trend for mean annual flow rates and a downward trend for maximum annual flow rates. The study of seven flow rate quantiles shows a statistically significant increase of 13.43% and 14.29% for the 10th and 50th percentiles, respectively. Conversely, there is a decreasing trend observed for annual maximum flow rates.

The analysis findings indicate that rising precipitation trends do not necessarily result in increased flow rates. The results emphasise the importance of considering additional factors, including soil moisture before the precipitation event, topography and lithology of the area. Temperatures have a significant impact on these processes, affecting both the precipitation itself, especially during winter, and the ground evaporation processes, which in turn affect runoff genesis.

The 912 selected runoff events were analysed, and it was found that four characteristics displayed consistency with the data examined in the first part of the study. Both cumulative precipitation and the average precipitation intensity have a positive trend, with the latter being statistically significant. Additionally, an observable downward trend was detected in the peak flow rate and the runoff coefficient, with the latter displaying statistical significance.

## Introduzione e obiettivi

Il clima sulla Terra sta subendo dei cambiamenti evidenti, si sta assistendo ad un riscaldamento climatico, che comporta anche delle conseguenze a livello del ciclo idrologico. Il cambiamento climatico ha un impatto significativo sulla società principalmente attraverso gli effetti legati all'acqua, ad esempio, colpendo settori come l'energia, l'agricoltura, le infrastrutture e i trasporti (IPCC 2014a). In particolare, il cambiamento climatico pare avere effetto nell'intensificazione di eventi siccitosi ma anche di eventi estremi di precipitazione.

Nel sud Europa il numero di giorni dominati da insufficienti risorse idriche (disponibilità inferiore alla richiesta) e siccità aumenta in tutti gli scenari di riscaldamento globale. Nelle prospettive di un aumento della temperatura globale di 1,5°C e 2°C la scarsità idrica riguarda, rispettivamente, il 18% e il 54% della popolazione. Analogamente, l'aridità del suolo aumenta con l'aumentare del riscaldamento globale: in uno scenario di innalzamento della temperatura di 3°C l'aridità del suolo risulta del 40% superiore rispetto a uno scenario con innalzamento della temperatura a 1,5°C (IPCC 2022).

L'Italia non è immune da fenomeni di estremi di pioggia. Basti pensare all'evento alluvionale che la scorsa primavera ha interessato la regione Emilia-Romagna, l'evento dal 15 maggio al 17 maggio ha causato l'esondazione di 21 fiumi e allagamenti diffusi in 37 comuni (ISPRA). Il territorio nazionale e, in particolare il Nord-Est, è più esposto della maggior parte dei Paesi globali ai disastri causati dalle tempeste, le quali hanno rappresentato, secondo la Protezione civile nazionale, il 75% delle richieste di stato di emergenza degli enti locali in Italia nel periodo 2012-2018 (Salvati et al., 2018).

Anche i dati ISPRA del Rapporto "Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio" del 2018 confermano l'elevato livello di rischio a scala nazionale; si legge infatti che oltre 6 milioni di abitanti sono a rischio alluvioni, con un incremento del 4,4% rispetto a quanto si registrava nel 2015 (Tranchida G., 2021).

Sebbene i cambiamenti climatici siano a scala globale i loro impatti spesso variano da zona a zona, ed è per questo che l'analisi dei cambiamenti nelle variabili idrometeorologiche rappresenta una parte importante per comprendere e rilevare i cambiamenti climatici.

Negli ultimi anni sono stati condotti molti studi per rilevare possibili tendenze e cambiamenti climatici.

In Svizzera, Ceppi et al. (2012), hanno svolto un'analisi sull'andamento delle temperature dal 1959 al 2008, scoprendo che le tendenze sono tutte positive e per la maggior parte risultano statisticamente significative.

Nella Cina nord-occidentale, nella regione dello Xinjiang, Tao et al. (2011), hanno analizzato le tendenze del deflusso nel bacino del fiume Tarim, e i risultati ottenuti mostrano tendenze positive per le temperature, le precipitazioni, la pressione effettiva del vapore acqueo e dell'umidità relativa; al contrario l'evapotraspirazione potenziale, velocità del vento e la durata del soleggiamento hanno tendenze negative.

Ad Istanbul, Karaburnu et al. (2011), hanno analizzato l'andamento delle temperature a scala annuale, stagionale e mensile, analizzando le temperature minime, medie e massime, dal 1975 al 2006 utilizzando la metodologia del test non parametrico di Mann-Kendall e il metodo della Sen Slope. I risultati che hanno ottenuto evidenziano tendenze positive nelle temperature, ipotizzando in futuro di avere anni con periodi estivi, primaverili e autunnali più caldi e inverni leggermente più freddi.

In Iran, più precisamente nella provincia di Qom, Forootan (2019), ha analizzato l'andamento delle tendenze delle variabili idrologiche, e i risultati a scala annuale ottenuti mostrano l'aumento dell'evaporazione e la diminuzione delle portate dei corsi d'acqua, tendenze che si sono osservate nella maggior parte delle stazioni.

Hussein et al. (2021) hanno utilizzato il metodo di Mann-Kendall e Sen per rilevare le tendenze delle precipitazioni per un periodo che va dal 1981 al 2016, nel bacino del fiume Soan in Pakistan, i risultati che hanno ottenuto mostrano tendenze decrescenti negli altopiani mentre nelle zone centrali e di pianura sono state rilevate tendenze in aumento.

Il Gruppo di lavoro EDW dell'Iniziativa di ricerca sulla montagna nel 2015 tramite uno studio ha mostrato che il tasso di riscaldamento climatico è amplificato con l'altitudine, tanto che negli ambienti di alta montagna si sperimentano cambiamenti di temperatura più rapidi rispetto agli ambienti posti a quote più basse; le variabili analizzate sono l'albedo della neve, la presenza di variazioni del vapore acqueo e rilascio di calore latente; variazioni del vapore acqueo superficiale e del flusso radiativo; perdita di calore superficiale e variazione di temperatura; e aerosol.

Madsen et al. (2014), hanno svolto una revisione delle analisi delle tendenze delle precipitazioni estreme e delle inondazioni idrologiche in Europa sulla base di osservazioni e proiezioni climatiche future.

Le analisi sulle precipitazioni estreme osservate e sui dati relativi alle inondazioni mostrano che vi è un aumento generale delle precipitazioni estreme.

Lo scopo di questa tesi è valutare l'impatto dei cambiamenti climatici in un piccolo bacino posto a nord della provincia di Belluno in Veneto, tramite l'analisi di dieci variabili idrometeorologiche in 7 stazioni pluviometriche, in 3 stazioni per il rilevamento della temperatura e in 2 stazioni per la misurazione della portata. Inoltre, sono stati selezionati 912 eventi di deflusso per un periodo che va dal 1° ottobre 1985 al 1° ottobre 2018, da cui poi si sono determinate sette caratteristiche, per poi estrapolarne quattro di queste e analizzare la loro tendenza; si è scelto di analizzare solamente quattro caratteristiche per mantenere un filo conduttore con le analisi di inquadramento meteo dell'area in studio.

Nello specifico si andranno ad analizzare le precipitazioni a scala annuale e mensile, avendo a disposizione sette stazioni con un dataset che va dal 1985 al 2018; successivamente si analizzano le temperature medie, massime e minime a scala annuale e mensile per un periodo che va dal 1985 al 2018, utilizzando i dati di tre stazioni di misura; infine, si analizzano le portate e i quantili di portata, avendo a disposizione due stazioni di misurazione e un dataset che va dal 1985 al 2018.

Infine, gli obiettivi di questo studio sono:

1. Analizzare e discutere le caratteristiche di tendenza delle variabili idrometeorologiche;
2. Quantificare la significatività dei cambiamenti utilizzando il test di Mann-Kendall e lo stimatore della pendenza di Sen;
3. Analizzare e discutere le caratteristiche di tendenza delle principali caratteristiche degli eventi di deflusso selezionati.



# Capitolo 1

## Il bacino idrografico del torrente Cordevole

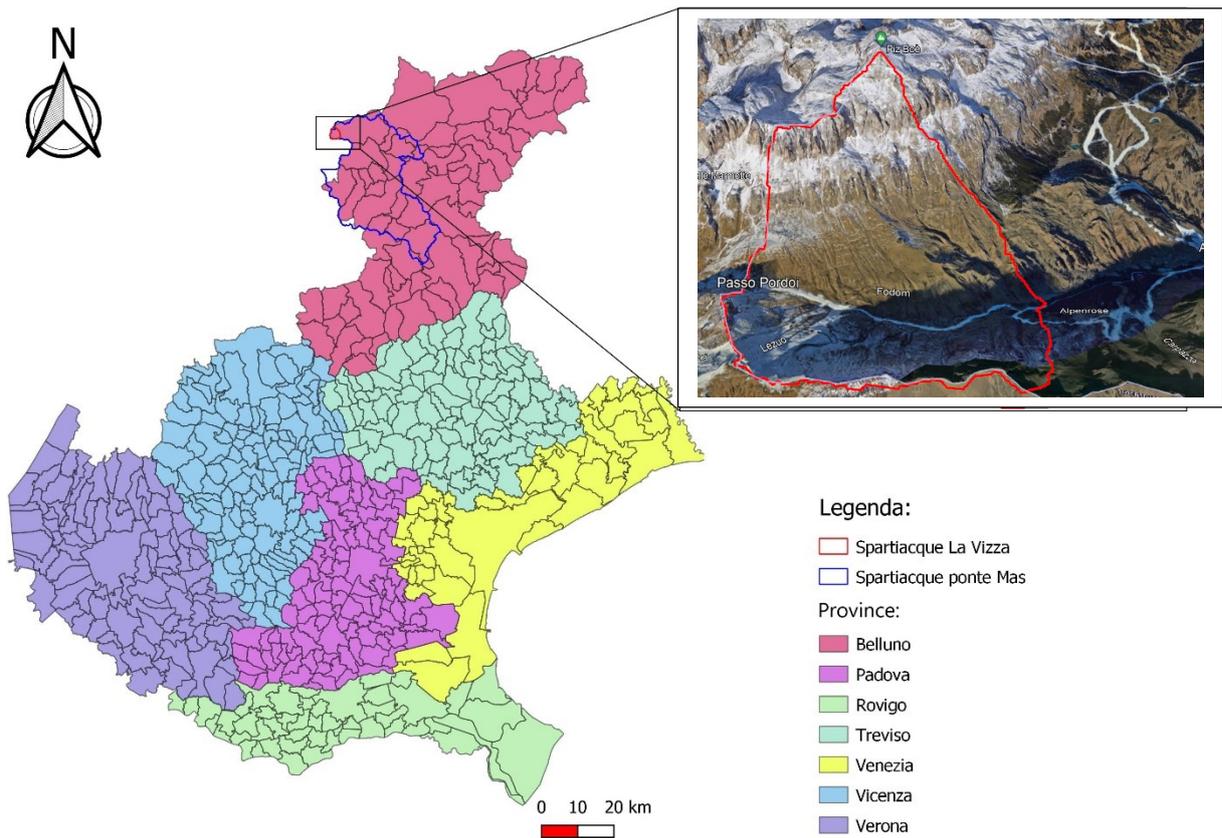
In questo capitolo verrà descritto dal punto di vista geomorfologico, geo litologico, vegetazionale e climatico, l'area su cui si sono svolte le analisi contenute in questo lavoro.

### 1.1 Inquadramento del bacino sperimentale del Cordevole chiuso in località La Vizza

Il bacino idrografico del torrente Cordevole (*Figura 1*) si trova a nord della regione Veneto, precisamente, ad est della provincia di Belluno. È il principale affluente del fiume Piave, e il più lungo corso d'acqua fra quelli interamente compresi nella provincia di Belluno.

Piave e Cordevole costituiscono i due corsi d'acqua più importanti delle Dolomiti ed il secondo ne separa per definizione la porzione occidentale da quella orientale. Il torrente Cordevole nasce presso il Passo Pordoi, nel comune di Livinallongo del Col di Lana a circa 2237 m di quota e, dopo un percorso di circa 75 km, s'immette nel fiume Piave all'altezza di Sedico, ad un'altitudine di 275 m s.l.m.

La superficie del suo bacino idrografico con sezione di chiusura di Ponte Mas (BL) a 373 m s.l.m. è di circa 695 km<sup>2</sup> mentre l'intero bacino chiuso nella confluenza con il Piave ha una superficie pari ha 853 km<sup>2</sup>; l'area di studio invece è situata all'interno del bacino idrografico del Cordevole Superiore, presso Arabba in comune di Livinallongo del Col di Lana, la superficie del suo bacino idrografico afferente alla sezione in esame (La Vizza 1810 metri s.l.m.) è di circa 7.3 km<sup>2</sup>.

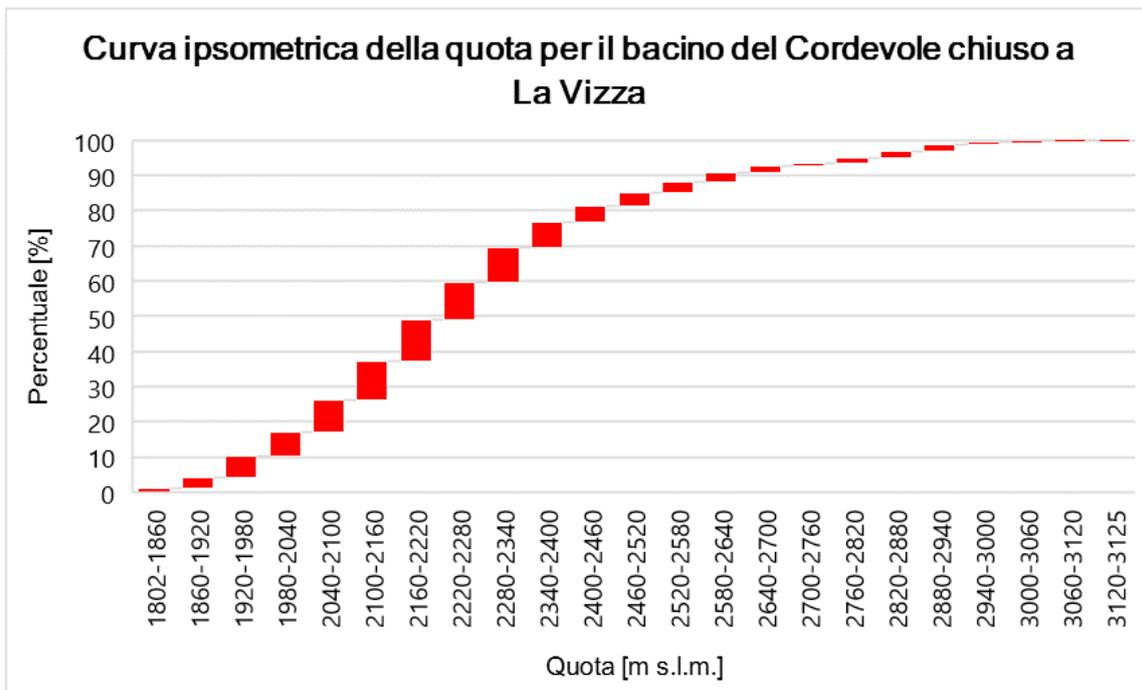


**Figura 1:** Bacino idrografico del fiume Cordevole e sottobacino chiuso in località La Vizza

Come detto in precedenza, la sezione di chiusura è posta in corrispondenza della stazione idrometrica presso località La Vizza, ad una quota pari a 1810 metri sul livello del mare, ciò permette di conoscere l'entità dei deflussi dal bacino.

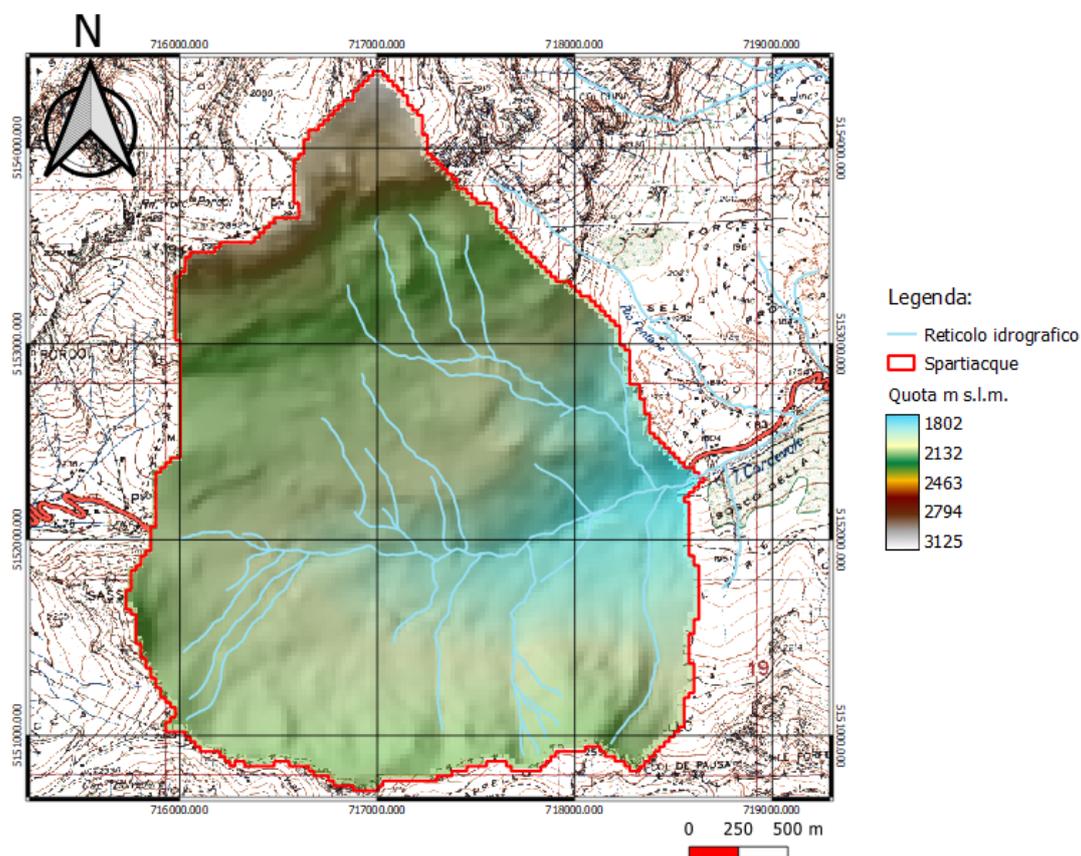
A nord il bacino culmina nella cima del Piz Boè con una quota di 3152 metri sul livello del mare, verso ovest, fino al Passo Pardo (2239 metri s.l.m.), dove nasce il fiume Cordevole. Mentre a sud il limite del bacino è segnato dalla catena Sass Ciapèl, alto 2557 metri.

Il bacino idrografico del Cordevole chiuso a La Vizza è caratterizzato da un 25% dell'area sopra i 2500 metri sul livello del mare e più del 90% è sopra i 2000 metri sul livello del mare (Figura 2).



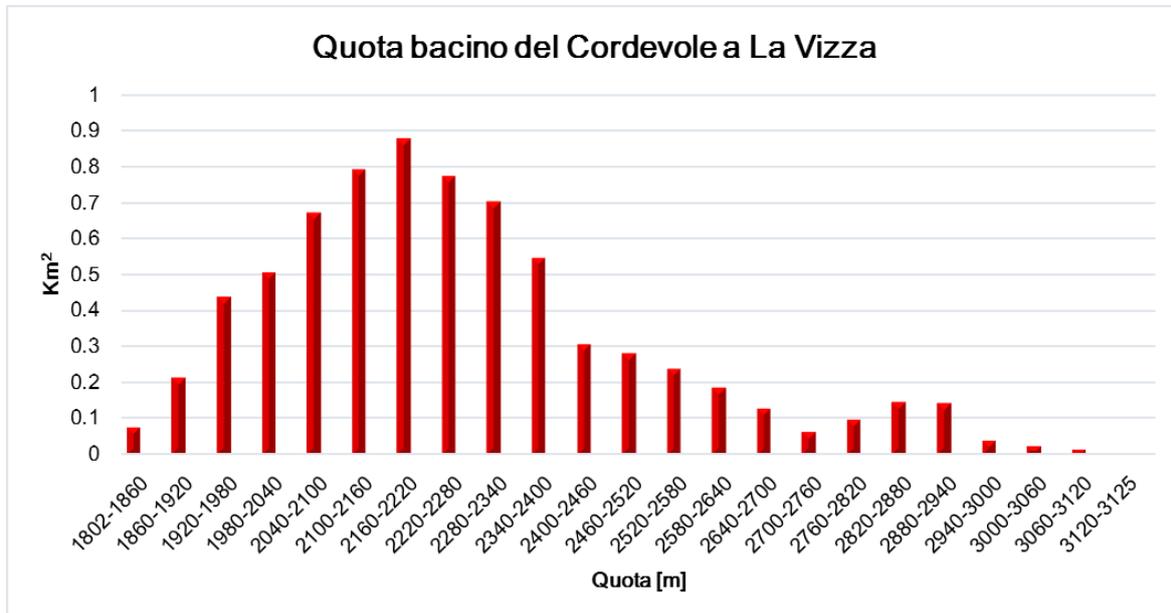
*Figura 2: Curva ipsometrica della quota per il bacino in studio*

Il bacino del Cordevole con sezione di chiusura a La Vizza è caratterizzato da una quota minima di 1802 metri sul livello del mare, una quota massima di 3125 metri sul livello del mare, e da una quota media di 2342 metri sul livello del mare (*Figura 3*).



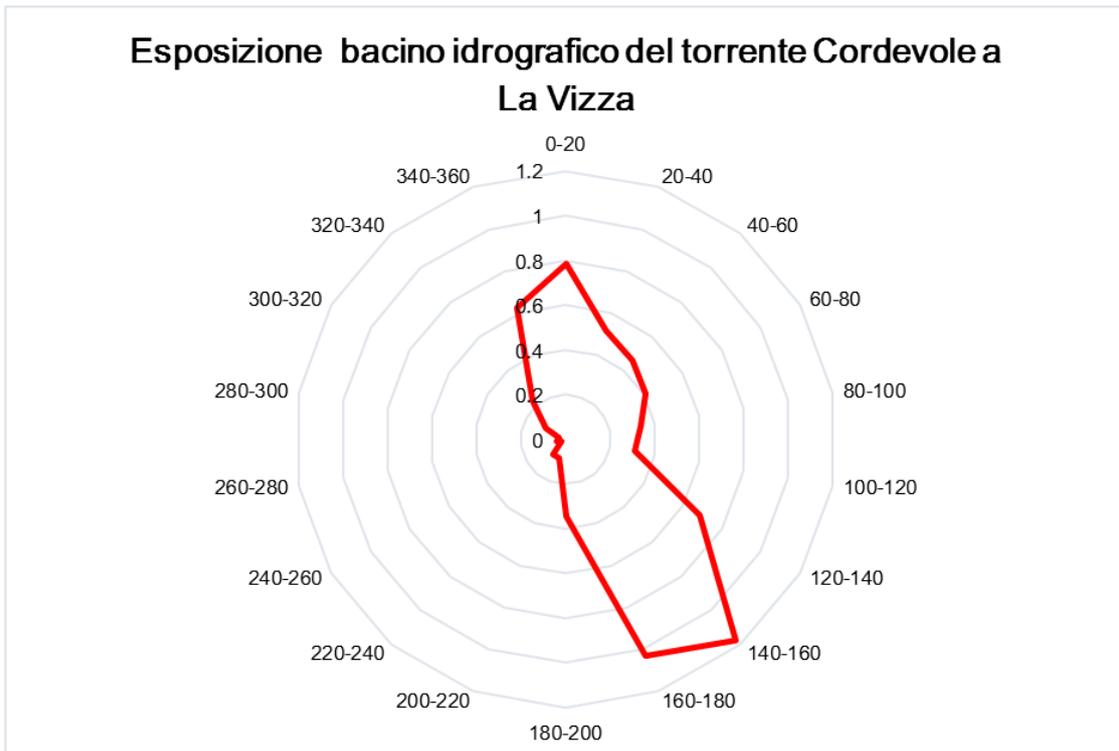
*Figura 3: DTM bacino del Cordevole a La Vizza*

Da questo istogramma (*Figura 4*) possiamo notare come la frequenza delle quote evidenzia un picco tra la fascia che va dai 2160 metri sul livello del mare ai 2220 metri sul livello del mare, per poi decrescere in modo abbastanza lineare nelle classi di quota più elevata.

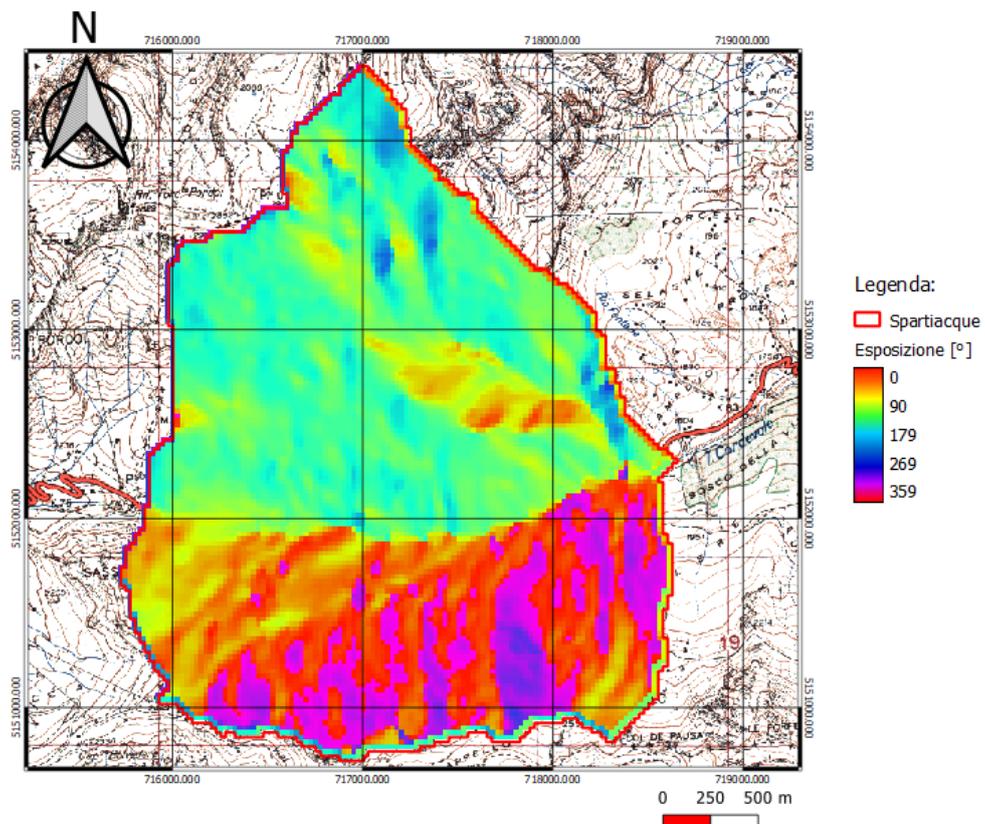


**Figura 4:** Istogramma quota bacino del Cordevole a La Vizza

Per quanto riguarda l'esposizione, fattore molto importante per la permanenza del manto nevoso, che specie nelle quote più elevate e nei versanti esposti a nord si traduce in un prolungamento della stagione invernale ed un conseguente ritardo delle condizioni primaverili; il bacino in esame (*Figura 6*) è caratterizzato da un'esposizione prevalente a Sud – Est, quindi non soggetto a inverni prolungati a causa della permanenza del manto nevoso, condizione ben visibile anche dal grafico radar sottostante (*Figura 5*).



*Figura 5: Grafico a radar che mostra l'esposizione del bacino in studio, i numeri da 0 a 1.2 rappresentano frazioni della superficie del bacino idrografico in studio*



*Figura 6: La mappa mostra l'esposizione del bacino in studio*

Le pendenze sono generalmente piuttosto accentuate, per la maggior parte comprese tra il 20% e l'80%, con una media del 28% circa (Figura 7).

Caratteristica è la presenza, nella parte centrale del bacino, di alcuni ripiani pianeggianti di estensione ragguardevole visibili nella mappa riportata di seguito (Figura 8).

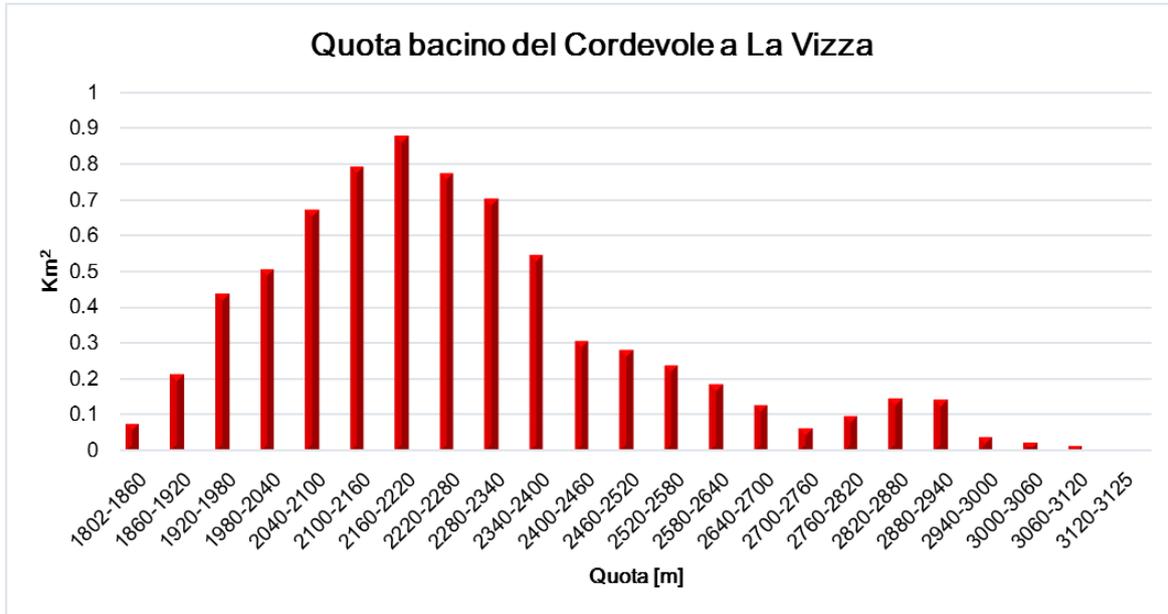


Figura 7: Istogramma della pendenza per il bacino in studio

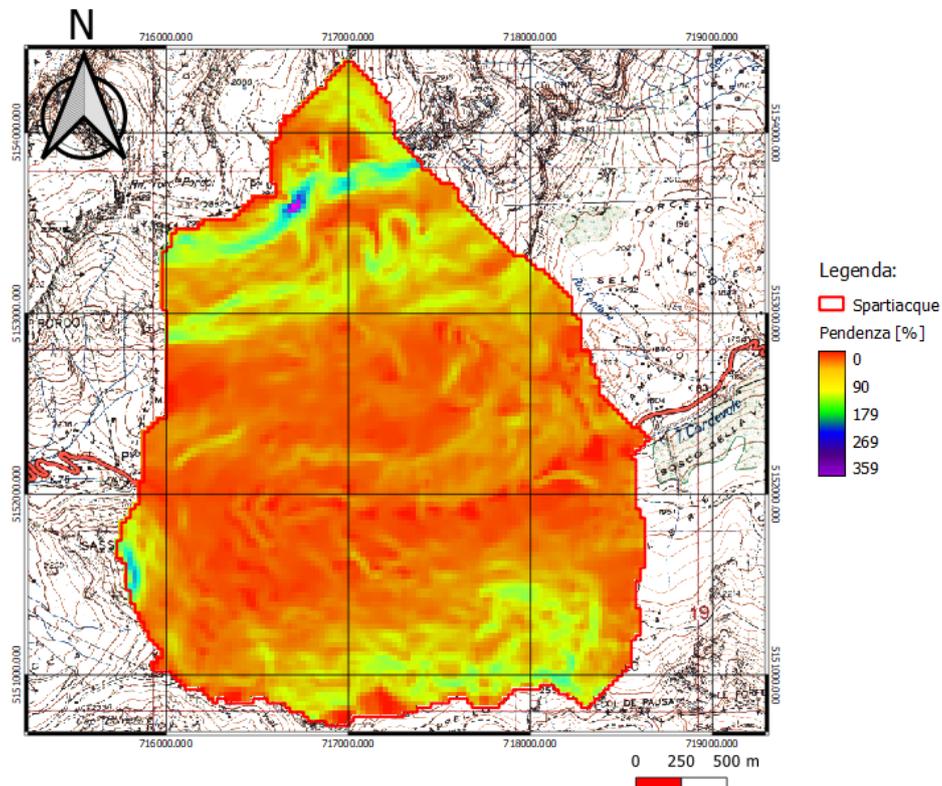


Figura 8: La mappa mostra la pendenza espressa in percentuale del bacino del Cordevole chiuso a La Vizza

Per riassumere di seguito troviamo le principali caratteristiche morfometriche riportate in *Tabella 1*.

<b>Bacino idrografico del Cordevole chiuso a La Vizza</b>	
Area [Km <sup>2</sup> ]	7.3
Dislivello [m s.l.m.]	1843-3152
Altitudine media [m s.l.m.]	2342
Pendenza media [%]	28.0
Esposizione	SE
Copertura del suolo [%]	Prateria (74%), arbusti (14%), roccia (12%)

*Tabella 1: Caratteristiche del bacino in studio*

## 1.2 Inquadramento geomorfologico e geo-litologico

Dal punto di vista tettonico, il bacino del Cordevole è caratterizzato da una serie di strutture caratterizzate da un andamento trasversale. La sinclinale di Belluno, il cui fianco settentrionale è interessato dall'omonima linea, coincide con l'ampia conca della Val Belluna, lungo cui scorre il fiume Piave.

Più a nord vi è la linea della Valsugana che attraversa l'agordino in direzione NE-SW. Si tratta di una struttura di particolare importanza, la quale ha portato ad un innalzamento della parte settentrionale del bacino.

Si succedono, ancora più a nord, una serie di sinclinali ed anticlinali minori più o meno parallele fra loro. La struttura all'estremo settentrione del bacino è l'anticlinale del Cordevole, il cui asse segue il corso del torrente.

La litologia dei terreni presente (*Figura 9*) è delle più varie, ed è possibile suddividerla nei seguenti complessi:

### **Complesso gessoso**

Generalmente calcari micritici bituminosi, calcari marnosi, dolomie evaporitiche e gessi. Si tratta di rocce facilmente erodibili caratterizzate da estesi fenomeni franosi. Sono diffuse prevalentemente lungo la valle del Biois, ma affiorano anche nei pressi di Selva di Cadore, Avoscan, San Tomaso, Agordo e Voltago. Questo complesso lo possiamo trovare nella parte a nord del bacino in esame.

### **Complesso calcareo-dolomitico**

Costituito da successioni di dolomie e calcari massicci, poco stratificati, di varia natura e di colore generalmente chiaro. Hanno quasi sempre buone caratteristiche meccaniche e notevole resistenza ai processi di alterazione ma in presenza di discontinuità molto sviluppate possono dar luogo a fenomeni di crollo anche di notevole entità. Questo complesso affiora nella parte apicale a nord del bacino è dominata dalla presenza di dolomia, la quale è particolarmente resistente all'erosione, essa è infatti una roccia molto permeabile così da permettere all'acqua di infiltrarsi con facilità generando importanti acquiferi.

### **Complesso arenaceo-argilloso e calcareo-marnoso**

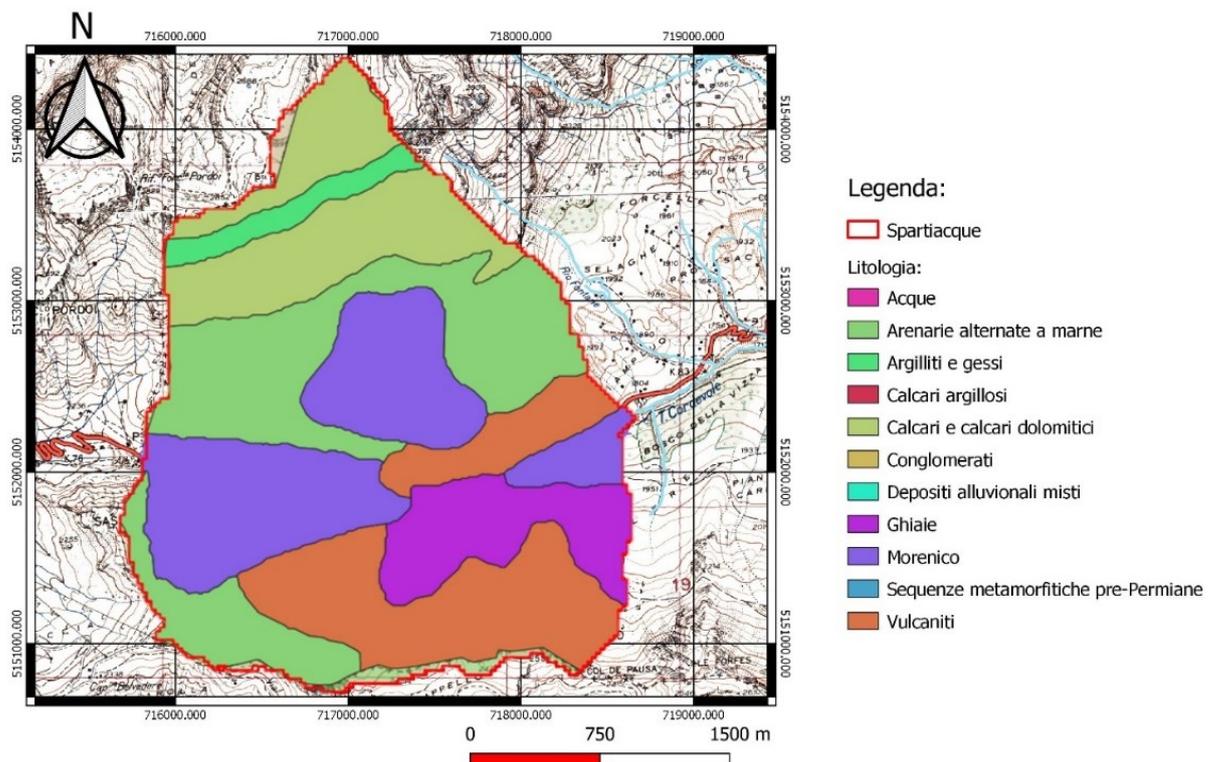
Comprende calcari, calcari marnosi, arenarie, marne, fitte alternanze di arenarie e argille, siltiti e argilliti. Queste formazioni sono caratterizzate da estesi fenomeni franosi e di erosione accelerata. Questo complesso è spesso caratterizzato da morfologie poco acclivi, sede di insediamenti urbani; infatti, i maggiori affioramenti si hanno nell'alto bacino in corrispondenza dei comuni di Livinallongo.

### Complesso arenaceo-conglomeratico-tufaceo

Appartengono a questo complesso litotipo arenaceo-quarzosi, calcari nodulari selciferi, tuffiti e vulcaniti. Sono tutti materiali altamente degradabili che presentano qualità geomeccaniche scadenti, ciò causa frequenti fenomeni di scivolamento superficiale. Affioramenti di questo tipo sono riscontrabili nella parte a sud del bacino.

I depositi morenici, abbondanti in tutto il bacino, sono costituiti da materiale eterogeneo e di composizione variabile e possono dare luogo a fenomeni franosi anche estesi; inoltre, questi depositi morenici danno vita ad altipiani dalle dolci pendenze mentre a sud risaltano gli effetti dell'erosione glaciale: dando origine a numerose piccole, strette e profonde valli.

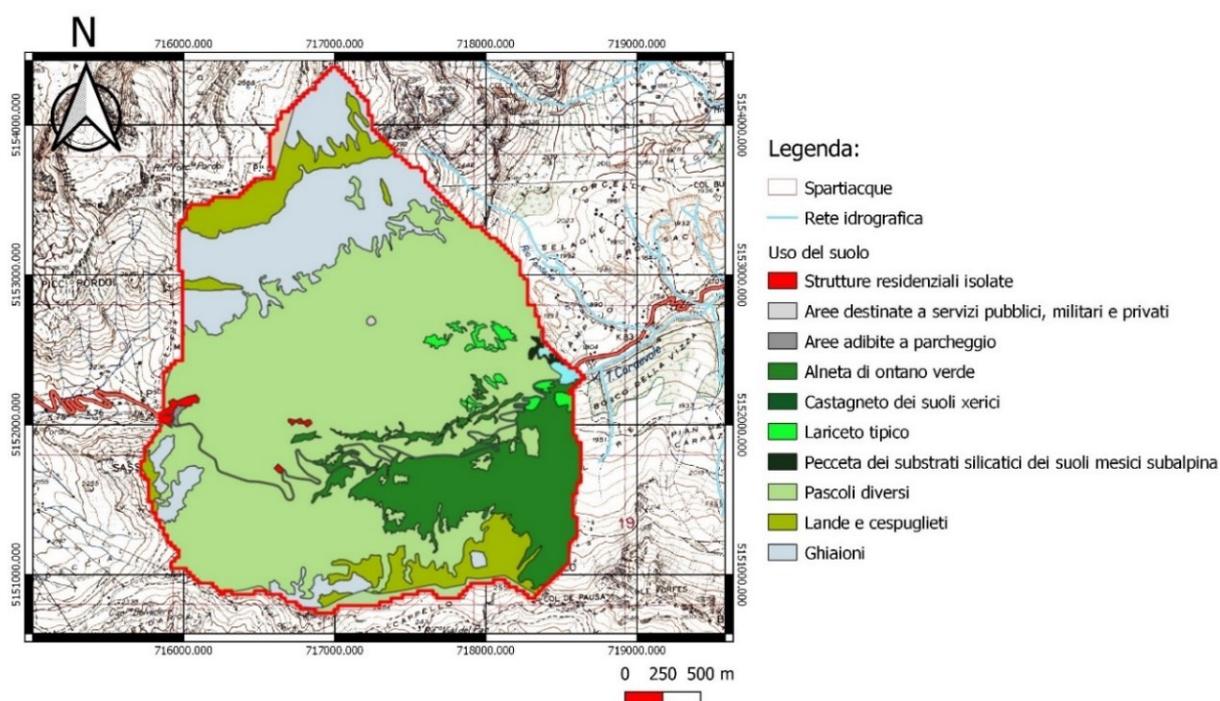
I depositi alluvionali sono costituiti da detriti di rocce, i cui frammenti più grossolani favoriscono ampie zone di infiltrazione e la formazione di acquiferi. La permeabilità dei depositi morenici dipende sostanzialmente dal consolidamento del substrato e dalla distribuzione della granulometria: a volte, infatti, i depositi morenici hanno una buona capacità di accumulo delle acque sotterranee.



*Figura 9: Mapa litologica bacino del Cordevole chiuso a La Vizza (fonte GeoPortale regione Veneto)*

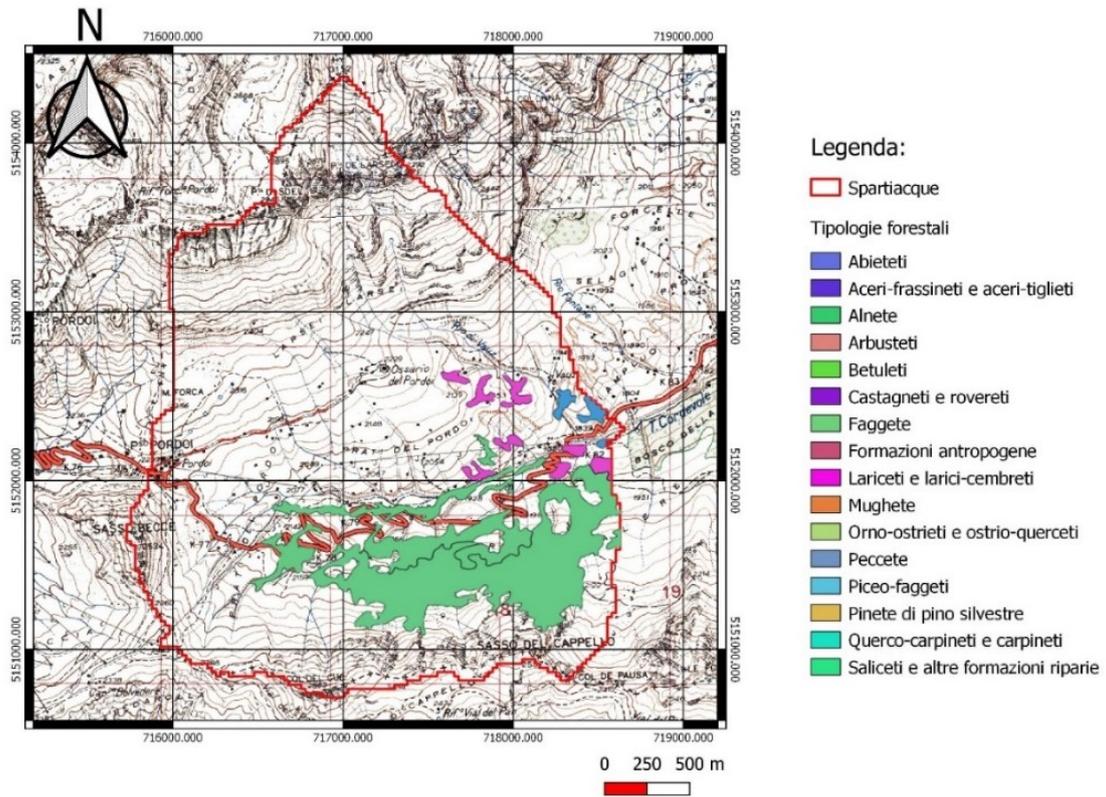
### 1.3 Inquadramento vegetazionale

Per quanto riguarda la vegetazione, nella gran parte della superficie del bacino vi è vegetazione erbacea, occupata da pascoli, o lande e cespuglieti ad eccezione dei ripidi pendii posti ai lati della vallata, mentre nella parte settentrionale abbiamo una grand parte della superficie occupata da ghiaioni, prive di vegetazione (*Figura 10*). Un altro dettaglio che possiamo notare è la limitata presenza antropica nel bacino; infatti, vi sono molte poche strutture residenziali e di conseguenza parcheggi ecc. Questo dettaglio diventa importante nel momento in cui andremo ad analizzare il comportamento dell'acqua con, ad esempio, il coefficiente di deflusso.



*Figura 10: Uso del suolo bacino del Cordevole con sezione di chiusura a La Vizza (fonte GeoPortale regione Veneto)*

Mentre per la vegetazione arborea (*Figura 11*) è presente solamente in piccole aree vicine alla sezione di chiusura del bacino ed in gran parte è costituita da alnete, di laricete e larico-cembrete e infine peccete.



*Figura 11: Tipologie forestali presenti nell'area di studio (fonte GeoPortale regione Veneto)*

## 1.4 Climatologia

Il Veneto presenta particolari caratteristiche climatiche derivanti dall'azione combinata di un insieme di fattori che agiscono a diverse scale.

Da una visione a macroscale, il primo fattore importante è la posizione geografica a livello continentale, in quanto il Veneto è situato in una zona di transizione tra l'area continentale centro europea e quella mediterranea.

A livello di mesoscale e microscale vediamo come diversi fattori vanno ad influenzare il clima del Veneto.

Primo fra questi è la presenza delle grandi masse d'acqua, come il mar Adriatico e il lago di Garda, che vanno ad agire ad esempio sulle temperature mitigandole e sulla genesi dei venti generando le brezze.

Un altro fattore importante è la copertura del suolo, ad esempio un suolo nudo rispetto a uno coperto da vegetazione si riscalda molto di più durante il giorno e si raffredda più velocemente di notte.

La parte settentrionale del Veneto presenta un'orografia complessa dove i diversi fattori topografici (esposizione, altitudine, pendenza) hanno un ruolo importante nella modifica della circolazione atmosferica, di conseguenza modificano le diverse variabili atmosferiche in particolare:

- Radiazione solare (esposizione e orografia);
- Temperatura (inversione termica);
- L'umidità relativa (ad esempio i fondovalle presentano valori più elevati);
- Precipitazioni (l'orografia ne determina un'intensificazione);
- Venti (presenza di brezze di monte e valle)

Le Alpi, infatti, intercettano l'umidità dando luogo a intensificazioni orografiche sui versanti sopravvento, originando così l'effetto Stau<sup>1</sup> e ad attenuazione delle precipitazioni sottovento (effetto "föhn"). Per questo motivo le zone prealpine rappresentano le aree mediamente più piovose del Veneto nelle quali, soprattutto in occasione di forti flussi perturbati di provenienza

---

<sup>1</sup> Lo Stau è un vento di risalita che si presenta quando una corrente d'aria, nel superare un ostacolo montuoso, perde parte della sua umidità condensando sotto forma di precipitazioni.

meridionale, le precipitazioni si intensificano e divengono più persistenti dando luogo, specie nel periodo autunnale, a eventi pluviometrici abbondanti (Barbi et al., 2018).

Dal punto di vista climatico, la zona dell'alto Cordevole è classificata come regione climatica di tipo alpino con caratteristiche sub-oceaniche. Questa tipologia di clima è fortemente influenzata dall'altitudine e dall'esposizione, le quali variano notevolmente in base alla località e comportano situazioni differenti sia per le temperature che le precipitazioni.

La parte interna dell'arco alpino italiano è caratterizzata da temperature medie annue non particolarmente basse (7-10°C), ma presenta forti escursioni termiche giornaliere e annue. Per quanto riguarda le precipitazioni queste oscillano tra i 700 e 1000 mm annui, e presentano un solo massimo durante la stagione estiva. Di rilevante importanza sono le gelate primaverili, che, come abbiamo visto nell'inquadramento vegetativo, determinano una predominanza di conifere.



# Capitolo 2

## Materiali e metodi

In questo capitolo vengono presentati i materiali utilizzati per eseguire le analisi contenute in questo lavoro, verranno inoltre spiegate le metodologie applicate per l'analisi dei dati che abbiamo a disposizione.

### 2.1 Eventi di deflusso

Gli eventi di afflusso- deflusso che sono stati inclusi nell'analisi si sono verificati nel periodo dal 1° ottobre 1985 al 1° ottobre 2018, e sono stati selezionati in base alle seguenti condizioni:

- a) Una precipitazione totale dell'evento uguale o superiore a 5 millimetri;
- b) Due eventi sono stati separati da almeno sei ore senza precipitazioni;
- c) Una differenza minima di 0.01mm/h tra la portata dell'evento e la portata pre-evento alla sezione di chiusura;

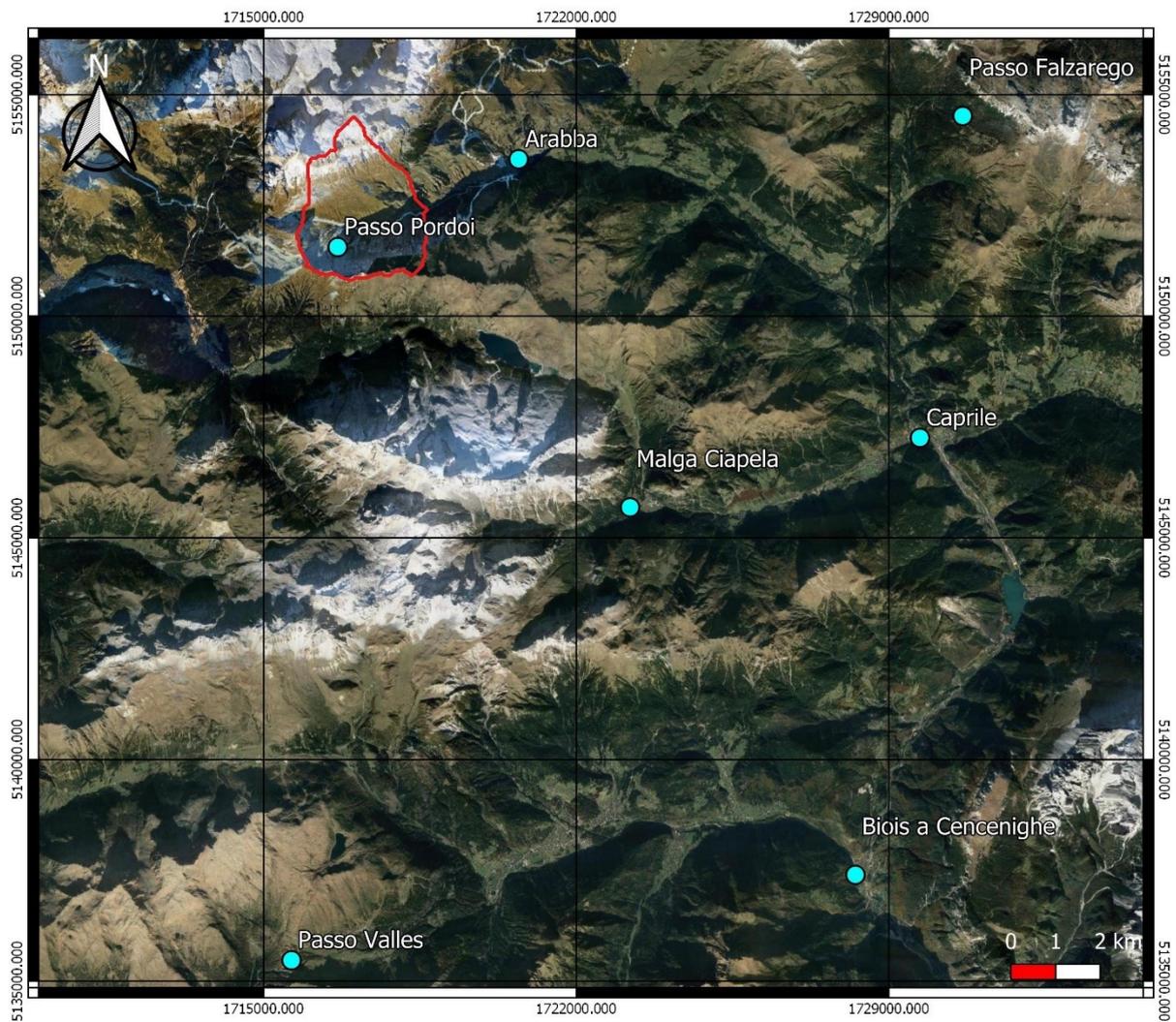
Da questa selezione sono stati estrapolati 912 eventi, che sono stati oggetto delle analisi riportate in seguito.

### 2.2 Dati idrometeorologici

I dati idrometeorologici analizzati riguardano la precipitazione, la temperatura e la portata; dove rispettivamente per le precipitazioni è stato analizzato il periodo in comune alla maggior parte delle stazioni che va dal 01 gennaio 1992 al 31 dicembre 2011, per le temperature il periodo analizzato va dal 01 gennaio 1992 al 31 dicembre 2018. Mentre per le portate abbiamo due periodi diversi a seconda della sezione analizzata, la prima sezione è a La Vizza dove sono state tenute le serie complete dal 1985 al 2018, mentre per la sezione di chiusura a Saviner le serie complete vanno dal 1992 al 2013.

Le precipitazioni (*Figura 12*), la temperatura dell'aria (*Figura 13*) e la portata (*Figura 14*) sono state misurate per tutto l'anno da sensori posti in varie stazioni attorno al bacino idrografico del Cordevole con sezione di chiusura in località La Vizza.

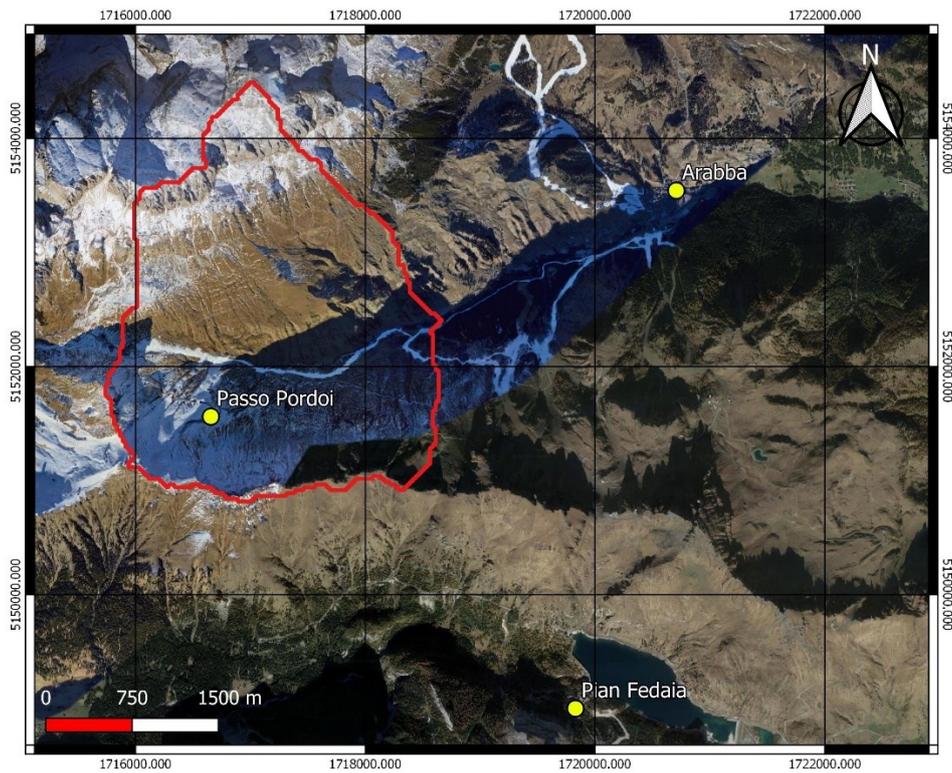
Per la portata sono a disposizione misuratori continui, nella stazione a La Vizza il livello dell'acqua è misurato da un trasduttore installato dietro uno stramazzo a V, mentre nella sezione di Saviner viene utilizzato un sistema di misurazione ad ultrasuoni; tutte le stazioni sono gestite dall'Agenzia per la Protezione Ambientale della Regione Veneto (ARPAV).



**Legenda:**

- Stazioni di misura della precipitazione
- Bacino idrografico del torrente Cordevole a La Vizza

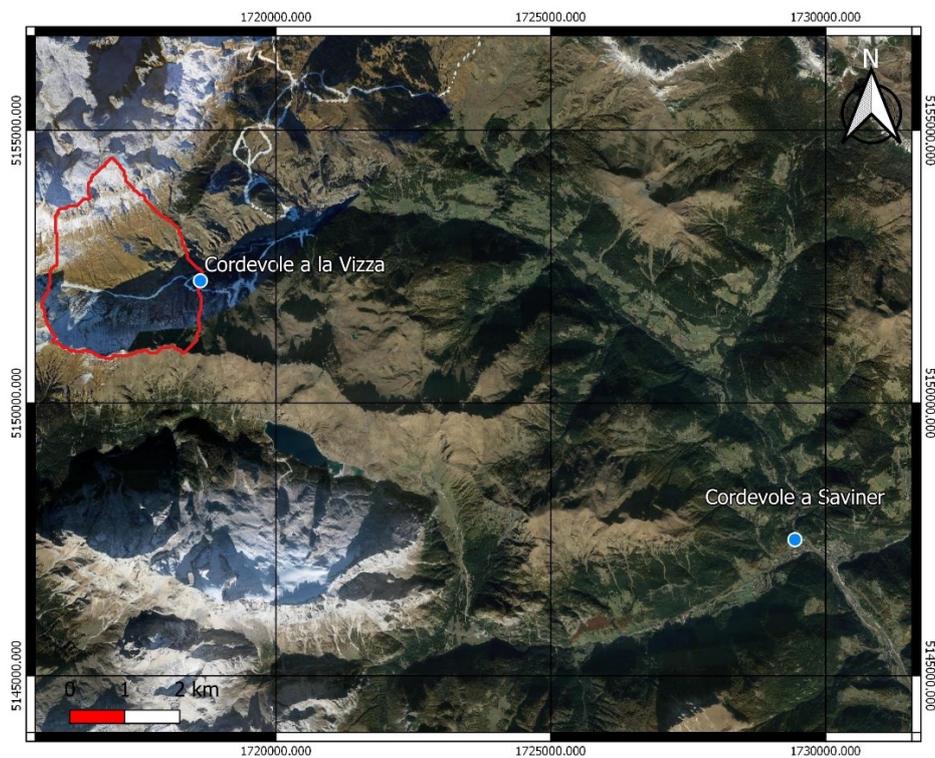
*Figura 12: La mappa mostra dove sono poste le stazioni di misura della precipitazione*



Legenda:

- Stazioni di misura della temperatura
- Bacino idrografico del torrente Cordevole a La Vizza

**Figura 13:** La mappa mostra dove sono poste le stazioni di misura della temperatura



Legenda:

- Stazioni di misura della portata
- Bacino idrografico del torrente Cordevole a La Vizza

**Figura 14:** La mappa mostra dove sono poste le stazioni di misura della portata

Le stazioni che sono state utilizzate per l'analisi sono 12 (*Tabella 2*); suddivise in tre gruppi per tipo di misurazione. Abbiamo tre stazioni per la misura delle temperature poste ad una quota media di 1 954 metri sul livello del mare, sette per la misura delle precipitazioni poste ad una quota media di 1 955 metri sul livello del mare e due per la misura delle portate.

Nome	Quota m.s.l.m.	Coordinate stazione		Periodo di raccolta dati		Variabile
		Est	Nord	Inizio	Fine	
Arabba	1645	1720708	5153542	01/10/1985	30/09/2018	T
Passo Pordoi	2155	1716656	5151560	01/10/1985	30/09/2018	T
Pian Fedaia	2063	1719830	5149000	23/09/1991	05/06/2019	T
Arabba	1645	1720708	5153542	01/10/1985	30/09/2018	P
Caprile	1008	1729697	5147256	01/01/1992	29/02/2012	P
Biois a Cencenighe	770	1728252	5137397	01/01/1992	29/02/2012	P
Malga Ciapela	1475	1723204	5145688	01/01/1992	29/02/2012	P
Passo Falzarego	2090	1730654	5156004	01/01/1992	29/02/2012	P
Passo Pordoi	2155	1716656	5151560	01/10/1985	30/09/2018	P
Passo Valles	2020	1715621	5135470	01/01/1992	29/02/2012	P
Cordevole a La Vizza	1810	1718625	5152241	01/10/1985	30/09/2018	Q
Cordevole a Saviner	1025	1729444	5147492	04/03/1992	31/12/2012	Q

*Tabella 2: Caratteristiche delle stazioni di misura, quota, coordinate sistema di riferimento Gauss Boaga Roma 40 fuso ovest la colonna "variabile" indica la misurazione svolta ovvero temperatura (T), precipitazione (P) e portata (Q)*

## 2.3 Analisi dati

### 2.3.1 Estrazione caratteristiche degli eventi di deflusso

Il primo passaggio di analisi che è stato svolto interessava l'estrazione delle caratteristiche di ogni singolo evento di deflusso selezionato in precedenza; il tutto svolto grazie all'ausilio di Matlab.

Le caratteristiche che sono state estrapolate per ogni evento sono:

- Precipitazione cumulata [mm];
- Durata di precipitazione[h];
- L'intensità massima di pioggia[mm/h];
- L'intensità media di pioggia [mm/h];
- Coefficiente di deflusso [-];
- Volume di deflusso [mm];
- Portata al picco [ $m^3/s$ ];
- Rapporto picco-volume [ $m^3/sm^3$ ].

Di queste ne sono state analizzate quattro, andando ad individuarne le tendenze:

- Precipitazione cumulata [mm];
- L'intensità media di pioggia [mm/h];
- Coefficiente di deflusso [-];
- Portata al picco [ $m^3/s$ ];

Si è scelto di analizzare solamente queste quattro caratteristiche per mantenere un filo conduttore con le analisi di inquadramento meteo dell'area del bacino, in quanto strettamente correlate alle variabili idrometeorologiche analizzate.

### 2.3.2 Test di Mann - Kendall

I test utilizzati per l'individuazione delle tendenze nei periodi climatologici possono essere divisi in due categorie come metodi parametrici e non parametrici. I test di tendenza parametrici necessitano che i dati siano indipendenti e seguano una distribuzione normale, mentre i test non parametrici richiedono solo che i dati siano indipendenti.

Per questo studio sono stati utilizzati due metodi non parametrici, il Mann – Kendall e lo stimatore di pendenza di Sen per rilevare le tendenze delle variabili meteorologiche.

Siano  $x_1, x_2, \dots, x_n$  una serie di osservazioni, Mann (1945) propose di testare l'ipotesi nulla,  $H_0$ , cioè che i dati provenissero da una popolazione di variabili aleatorie indipendenti e identicamente distribuite. L'ipotesi alternativa,  $H_1$ , è quella che i dati seguano invece una tendenza monotona.

La statistica del Mann – Kendall test è calcolata come:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

Dove  $n$  rappresenta il numero di dati,  $x_j$  e  $x_i$  sono i valori dei dati delle serie temporali  $i$  e  $j$  ( $j > i$ ), rispettivamente e  $\text{sgn}(x_j - x_i)$  è il segno con funzione:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{se } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{se } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{se } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Kendall nel 1975 ha dimostrato che  $S$  si distribuisce asintoticamente come una variabile aleatoria normale di parametri. La varianza è calcolata come:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (3)$$

Dove  $n$  è il numero di dati,  $m$  è il numero di gruppi legati e  $t_i$  indica il rispettivo numero di ripetizioni della misura  $i$ . Un gruppo legato è formato da un insieme di dati del campione che hanno lo stesso valore.

Nel caso in cui la dimensione del campione  $n > 10$ , la statistica normale  $Z_s$  viene calcolata:

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Se  $Z_s$  assume valori positivi sta ad indicare una tendenza in aumento, al contrario, se assume valori negativi mostra un trend in decrescita.

Il test delle tendenze viene effettuato ad un livello di significatività  $\alpha$  specifico. Quando  $|Z_s| > Z_{1-\alpha/2}$ , l'ipotesi nulla viene rifiutata e la serie temporale presenta un trend significativo.  $Z_{1-\alpha/2}$  è ottenuto dalla tabella di distribuzione normale standard.

### 2.3.3 Sen's slope estimator

Lo stimatore della pendenza di Sen è anch'essa una stima non parametrica; anch'esso, viene molto utilizzato nelle serie idro- meteorologiche, generalmente insieme al test di Mann – Kendall. Sen nel 1968 propose la seguente procedura:

Dove si considera un campione  $x$  di  $n$  dati, e come prima cosa viene calcolato il vettore di pendenza:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \text{ per } i = 1, \dots, N, \quad (5)$$

Dove  $x_j$  e  $x_k$  sono valori dei dati al tempo  $j$  e  $k$  ( $j > k$ ), rispettivamente e  $Q_i$  è il  $i$ -esimo valore di pendenza.

Se c'è un solo dato in ogni periodo di tempo, allora  $N = \frac{n(n-1)}{2}$  dove  $n$  è il numero di periodi di tempo. Se ci sono più osservazioni in uno o più periodi di tempo, allora  $N < \frac{n(n-1)}{2}$  dove  $n$  è il numero totale di osservazioni.

Gli  $N$  valori di  $Q_i$  sono classificati dal più piccolo al più grande e il mediano di partenza e lo stimatore di pendenza è calcolato come segue:

$$Q_{med} = \begin{cases} Q_{[(N+1)/2]}, & \text{se } N \text{ è dispari} \\ \frac{Q_{[N/2]} + Q_{[(N/2)+1]} }{2}, & \text{se } N \text{ è pari} \end{cases} \quad (6)$$

Il segno di  $Q_{med}$  indica il trend dei dati (crescente o decrescente), mentre il suo valore indica la pendenza della tendenza.

Dopo aver ottenuto la sen slope si è andati a stimare come questa si modifica in un arco temporale di dieci anni, valutando anche le variazioni percentuali, ottenute considerando il valore medio della serie analizzata.

### 2.3.4 Effetto di correlazione seriale

Per preparare le serie temporali all'analisi delle tendenze, quindi all'applicazione del test di Mann-Kendall, Von Storch e Navarra proposero nel 1995 di "sbiancare" le serie. Questo consiste nel rimuovere la correlazione tra le osservazioni di una serie temporale, rendendola indipendente ("bianca"). Questo passaggio è importante perché la correlazione tra le osservazioni può influenzare negativamente l'analisi e portare a risultati fuorvianti.

Le possibili tendenze statisticamente significative dei dati del campione vengono esaminate utilizzando le seguenti procedure:

1. Calcolare il coefficiente di correlazione seriale lag-1 (determinato da  $r_1$ ). Tale coefficiente può essere calcolato da:

$$r_1 = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (x_i - E(x_i)) \cdot (x_{i+1} - E(x_{i+1}))}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - E(x_i))^2} \quad (7)$$

$$E(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

Dove  $E(x_i)$  rappresenta la media dei dati del campione ed  $n$  è la dimensione del campione.

2. Se  $r_1$  calcolato non è significativo al livello del 5%, si applica il test di Mann-Kendall e lo stimatore di pendenza di Sen ai valori originari della serie temporale.
3. Se invece,  $r_1$  calcolato risulta significativo, prima dell'applicazione del test di Mann-Kendall e dello stimatore di pendenza di Sen, allora le serie temporali "pre-sbiancate" possono essere ottenute come  $(x_2 - r_1 x_1, x_3 - r_1 x_2, \dots, x_n - r_1 x_{n-1})$ .

Il valore critico di  $r_1$  per un determinato livello di significatività dipende dal fatto se il test sia ad una o due code.

Per l'ipotesi ad una coda è che il vero  $r_1$  sia maggiore di zero, mentre per il test a due code, l'ipotesi alternativa è che il vero  $r_1$  sia diverso da zero senza specificare se in positivo o negativo.

Secondo Anderson (1942) e Salas et al. (1980), i limiti di probabilità sul correlogramma di una serie indipendente per  $r_1$  possono essere collegati da:

$$r_1 = \begin{cases} \frac{-1 + 1.645\sqrt{n-2}}{n-1}, & \text{test a una coda} \\ \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{n-2}}{n-1}, & \text{test a due code} \end{cases} \quad (9)$$

Dove  $n$  è la dimensione del campione.

La scelta dell'alternativa da utilizzare dipende dal problema. Se c'è qualche ragione per aspettarsi un'autocorrelazione positiva, il test migliore da utilizzare risulta quello ad una coda; altrimenti il test a due code è il migliore.

### **2.3.5 Analisi trend idrometeorologici**

Per la prima analisi sono state utilizzate sette stazioni pluviometriche, il periodo di dati che avevamo a disposizione variava da stazione a stazione, i dati meno recenti partivano dal 1985, i più recenti arrivavano al 2018; ma l'analisi sarà fatta a partire dal 01/01/1992 fino al 31/12/2011 per allineare temporalmente le stazioni con almeno 10 anni di dati.

Il primo passaggio consiste nell'individuare le tendenze a scala annuale, si inizia con l'individuazione dei dati mancanti nella serie originale (oraria), si procede aggregando a scala annuale, facendo la somma dei valori per ogni anno, tenendo conto che, se il dataset inizia da febbraio in poi (anno non completo), il primo anno non viene considerato. Successivamente si è proceduto all'analisi delle tendenze utilizzando il Mann-Kendall test e il Sen slope descritti in precedenza; le stesse operazioni si sono ripetute per le tendenze a scala mensile.

In seguito si è passati all'analisi delle temperature, annuali, mensili (minima, media e massima), avendo a disposizione tre stazioni per un periodo che va dal 01/01/1992 al 31/12/2018; anche qui si procede individuando i dati mancanti nella serie originale, successivamente vengono aggregati a scala annuale, eliminando sempre gli anni non completi dall'analisi, a seguire si è proceduto all'individuazione e alla quantificazione dei trend utilizzando il test non parametrico di Mann-Kendall e il Sen slope descritti in precedenza.

Infine, si sono analizzate le portate, utilizzando due stazioni di misura situate a La Vizza e a Saviner, gli anni di dati che avevamo a disposizione erano rispettivamente dal 1985 al 2018 e dal 1992 al 2013.

Il primo passaggio consiste nell'analisi dei dati a scala annuale; per prima cosa si va ad individuare i dati mancanti nella serie oraria originale; una volta individuati tali dati si procede con la somma dei valori per ogni anno (Se il dataset inizia da febbraio in poi (anno non completo), il primo anno non viene considerato, se il dataset finisce prima di dicembre, l'ultimo anno non viene considerato). Da questa prima analisi sono stati ottenuti i massimi annuali di portata e la portata media annuale per le due stazioni.

Successivamente si è proceduto all'analisi delle tendenze utilizzando il Mann-Kendall test e il Sen slope descritti in precedenza.

Innanzitutto, è stata testata la tendenza in sette quantili della distribuzione dei deflussi, dal minimo annuale ( $Q_0$ ) al massimo annuale ( $Q_{100}$ ), perciò andiamo ad includere il  $90^\circ$  ( $Q_{90}$ ),  $70^\circ$  ( $Q_{70}$ ),  $50^\circ$  ( $Q_{50}$ ),  $30^\circ$  ( $Q_{30}$ ) e  $10^\circ$  ( $Q_{10}$ ); in questo modo si ottiene un quadro completo su come sta cambiando il regime di deflusso sull'intero spettro di portata.

### **2.3.6 Analisi trend degli eventi selezionati**

L'analisi delle tendenze degli eventi si basava sull'analisi di alcune variabili quali:

- Precipitazione cumulata [mm];
- Intensità media di precipitazione [mm/h];
- Coefficiente di deflusso [-];
- Portata al picco [ $m^3/s$ ].

La precipitazione cumulata in un determinato intervallo di tempo rappresenta la quantità di pioggia caduta in quel determinato intervallo di tempo.

L'intensità media di precipitazione è un parametro che rappresenta la quantità di pioggia che in media cade in un giorno piovoso, e lo si ottiene dividendo il valore di precipitazione totale per la durata dell'evento.

Il coefficiente di deflusso pari al volume d'acqua defluito alla sezione di chiusura del bacino, e afflusso, cioè la precipitazione caduta sul bacino.

Infine, abbiamo la portata al picco, che non è altro che il valore massimo di portata raggiunto durante un evento di piena.

Ed anche qui come per l'analisi delle variabili idrometeorologiche si è proceduto all'analisi delle tendenze utilizzando il test non parametrico di Mann-Kendall e il Sen Slope descritti in precedenza, per calcolare la significatività dei rispettivi trend.

# Capitolo 3

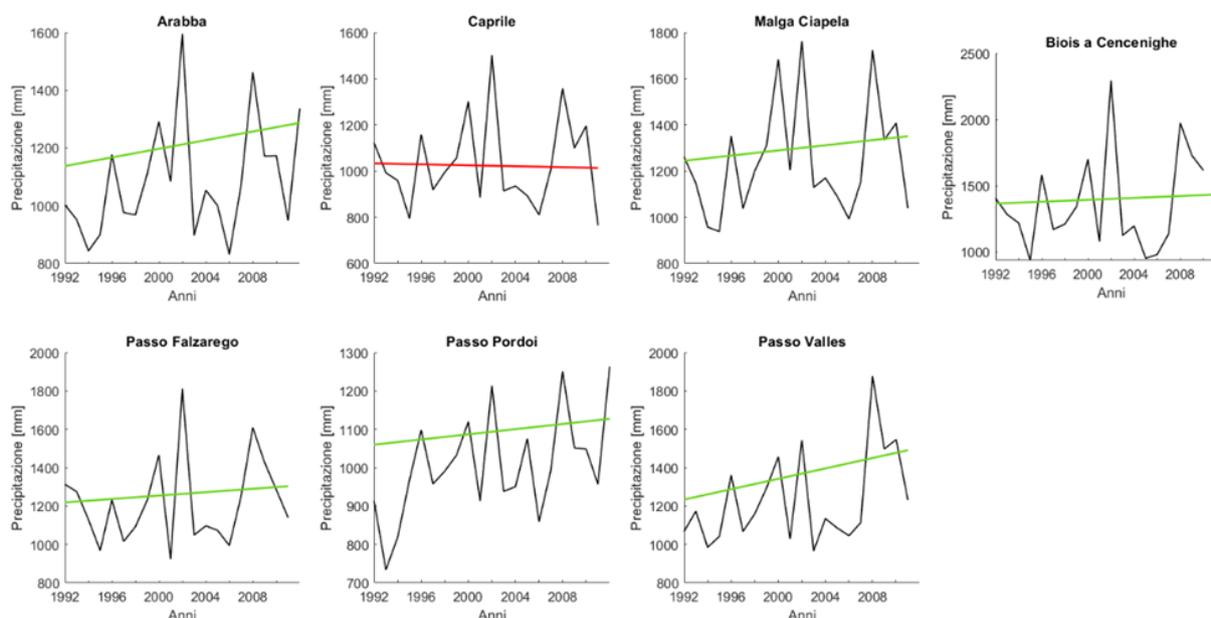
## Risultati

In questa sezione vengo presentati i risultati del lavoro di tesi. In primo luogo si è svolta l'analisi dei trend annuali e mensili delle precipitazioni, utilizzando dati osservati di sette stazioni pluviometriche della rete di stazioni ARPAV, successivamente si è svolta l'analisi dei trend mensili e annuali delle temperature, per poi passare ad un confronto delle temperature massime, minime e medie delle tre stazioni analizzate, utilizzando sempre dati osservati reperiti dall'ARPAV, come ultima analisi dei trend idrometeorologici si è valutata la portata, andando a definire i quantili per vari tempi di ritorno e confrontando la portata media annuale e il massimo annuale di portata, utilizzando sempre dati osservati di due stazioni ARPAV. Infine, si sono analizzate le caratteristiche per ogni singolo evento e le rispettive tendenze.

### 3.1 Trend annuale delle precipitazioni

In questa sezione vediamo i risultati ottenuti analizzando la precipitazione cumulata annuale. L'analisi svolta è stata fatta per un periodo di 19 anni, dal 01/01/1992 al 31/12/2011 per allineare temporalmente le stazioni con almeno 10 anni di dati, inoltre per quest'analisi abbiamo il 10% circa di dati mancanti (la percentuale fa riferimento alla media dei dati mancanti di tutte le stazioni).

E come vediamo, la *Figura 15* mostra un trend in crescita per 86% delle stazioni analizzate; infatti, vediamo come solamente una stazione mostra un trend in leggermente in decrescita (Stazione di Caprile).



**Figura 15:** Trend annuali per le precipitazioni cumulate annuali delle stazioni considerate, il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

Inoltre, di seguito (*Tabella 3*) vediamo come in generale l'area di studio è caratterizzata dalla presenza di andamenti pluviometrici in aumento e in diminuzione non statisticamente significativi.

In particolare, si evidenzia come la stazione a Passo Valles sia quella che subisce un incremento maggiore delle precipitazioni, infatti vediamo come la Sen slope a 10 anni prevede un incremento delle precipitazioni pari a 135.32 mm, seguita dalla stazione di Arabba con 74.80 mm. Mentre vediamo la stazione di Caprile, che, come detto in precedenza, mostra una tendenza in decrescita arrivando a -10.31 mm.

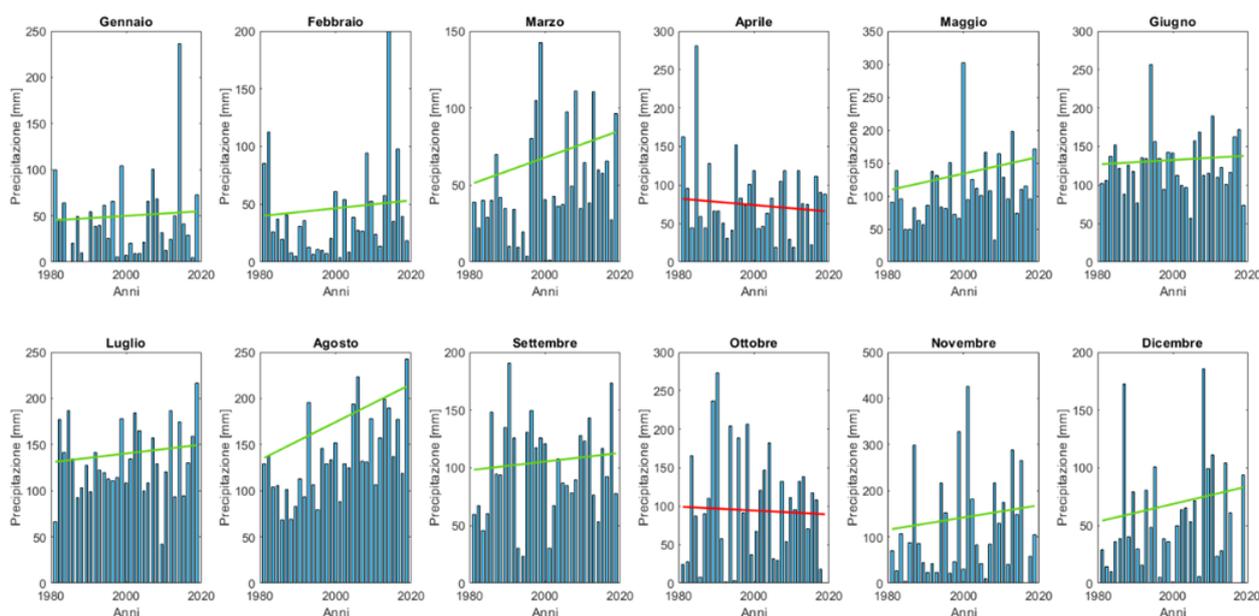
Stazione	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Sen_10y_%	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	mm/giorno	-	mm/10anni	%/10 anni	mm	mm	mm	-
Arabba	0.0204	0.077	74.7909	6.8485	827	1092.06	1595	207.56
Caprile	-0.0028	0.974	-10.3067	-0.9979	764	1032.83	1502	194.45
Malga Ciapela	0.0152	0.495	55.8367	4.4875	938	1244.25	1762	243.90
Biois a Cencenighe	0.0098	0.833	35.9753	2.6380	936	1363.71	2295	365.84
Passo Falzarego	0.0121	0.626	44.3298	3.6354	924	1219.38	1812	225.13
Passo Pordoi	0.0092	0.223	33.6769	3.2380	734	1040.03	1306	138.52
Passo Valles	0.0370	0.085	135.3226	10.965	966	1234.07	1877	241.20

**Tabella 3:** Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della precipitazione annua per le stazioni analizzate

## 3.2 Trend mensile delle precipitazioni

La *Figura 16* mostra l'andamento della tendenza a scala mensile per le precipitazioni della stazione di Arabba (BL).

E vediamo come l'83.33% dei mesi mostra un trend in crescita, mentre solamente due mesi ovvero il mese di aprile e il mese di ottobre mostrano una tendenza in decrescita, questo sta a significare che in questi mesi le precipitazioni sono diminuite, mentre nella maggior parte dei mesi le precipitazioni sono aumentate.



**Figura 16:** Trend mensile per le precipitazioni della stazione di Arabba (BL), il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

Di seguito (*Tabella 4*) mostra la quantificazione dei trend riportati nella *Figura 16*.

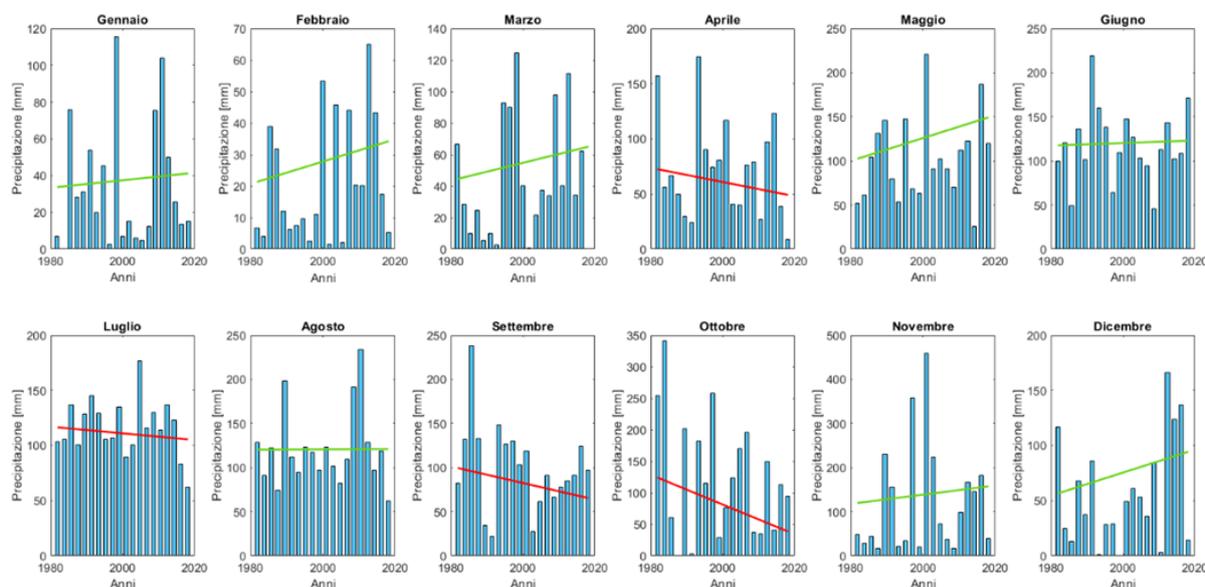
Innanzitutto, vediamo come tre mesi (marzo, maggio e agosto) abbiano un p-value inferiore a 0.05 e quindi siano statisticamente significativi, evidenziano una tendenza positiva.

Inoltre, vediamo che il mese di agosto risulta essere il mese che presenta l'incremento di precipitazione più importante, pari a 24.15 mm in dieci anni ovvero il 17.80% in più, seguito da novembre con 15.64 mm. Mentre vediamo come in particolare il mese di aprile mostra una diminuzione delle precipitazioni pari a 5 mm e al 6% mentre il mese di ottobre mostra una diminuzione di 3 mm e del 3%.

Mese	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Sen_10y_%	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	mm/giorno	-	mm/10anni	%/10 anni	mm	mm	mm	-
Gennaio	0.0008	0.5876	2.9645	6.5490	0	45.27	236.8	45.32
Febbraio	0.0011	0.3606	4.0302	10.0436	3.8	40.13	199.8	40.46
<b>Marzo</b>	<b>0.0028</b>	<b>0.0491</b>	<b>10.3407</b>	<b>20.1560</b>	<b>1.2</b>	<b>51.30</b>	<b>142.2</b>	<b>34.11</b>
Aprile	-0.0014	0.6310	-4.9737	-6.0632	19.2	82.03	280.6	51.68
<b>Maggio</b>	<b>0.0041</b>	<b>0.0473</b>	<b>14.9678</b>	<b>13.6078</b>	<b>33.4</b>	<b>109.99</b>	<b>302</b>	<b>51.83</b>
Giugno	0.0009	0.6757	3.3630	2.6450	57.2	127.15	256.6	38.00
Luglio	0.0015	0.5253	5.6318	4.2862	42.2	131.39	216.6	38.30
<b>Agosto</b>	<b>0.0066</b>	<b>0.0009</b>	<b>24.1584</b>	<b>17.8048</b>	<b>68.6</b>	<b>135.68</b>	<b>242.6</b>	<b>44.04</b>
Settembre	0.0012	0.6644	4.4073	4.4848	23.2	98.27	190.8	41.14
Ottobre	-0.0008	0.8356	-2.9012	-2.9239	0	99.22	273.2	72.02
Novembre	0.0043	0.3771	15.6417	13.3496	1.2	117.17	425.4	107.63
Dicembre	0.0025	0.3445	8.9735	16.5545	0	54.21	185.8	45.91

**Tabella 4:** Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della precipitazione mensile per la stazione di Arabba (BL), in grassetto i trend con significatività ( $p\text{-value} < 0.05$ )

Dalla *Figura 17* vediamo come la stazione di Caprile (BL), evidenzia un trend in crescita per il 66.6% dei mesi, mentre il restante 33.3% mostra una tendenza in decrescita; i mesi che seguono un andamento decrescente sono aprile, luglio, settembre e ottobre; quest'ultimi, di conseguenza, evidenziano una diminuzione delle precipitazioni.



**Figura 17:** Trend mensile per le precipitazioni della stazione di Caprile (BL), il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

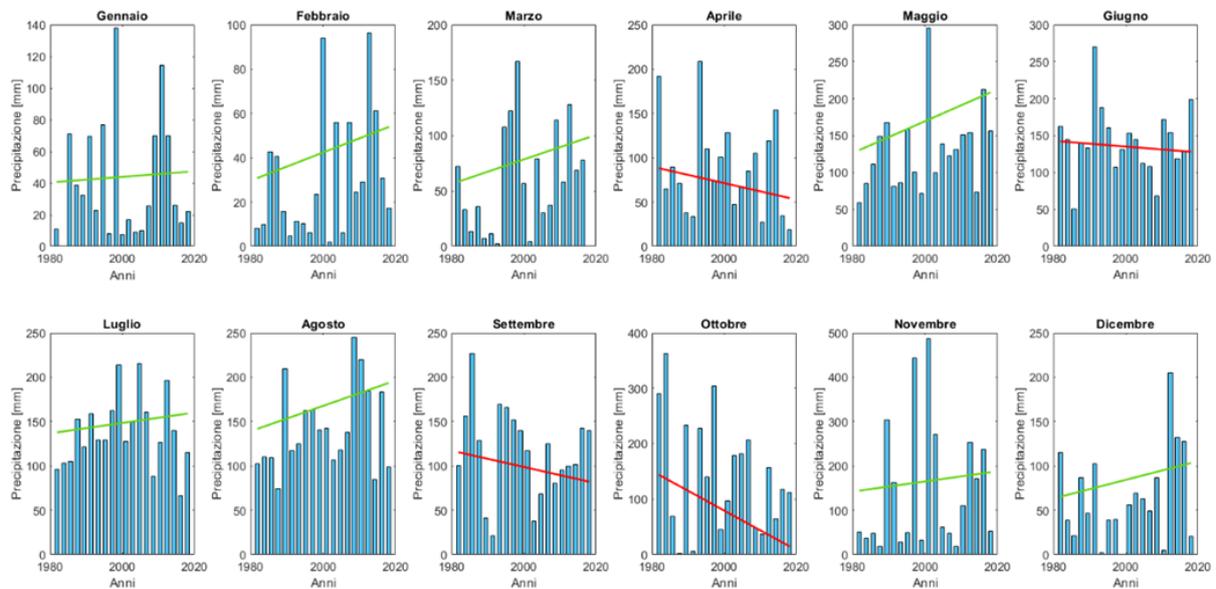
La *Tabella 5* mostra le variabili statistiche delle precipitazioni, e vediamo come nessun trend risulti significativo, in quanto nessun valore di  $p\text{-value}$  è inferiore a 0.05. Possiamo anche notare come il mese di ottobre sia quello con una diminuzione delle precipitazioni più marcata; infatti, il Sen a 10 anni mostra una diminuzione di 45 mm pari al 36.25%, nonostante sia il

mese con la precipitazione media maggiore, pari a 124.11 mm; al contrario il mese di dicembre mostra un maggior incremento delle precipitazioni rispetto agli altri mesi, infatti vediamo un aumento di 19.8 mm dal Sen 10, pari al 35.14%.

Mese	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Sen_10y_%	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	mm/giorno	-	mm/10anni	%/10 anni	mm	mm	mm	-
Gennaio	0.0010	0.8090	3.7134	11.0018	0	33.75	115.8	33.87
Febbraio	0.0018	0.4149	6.4460	30.2022	1.6	21.34	65	19.50
Marzo	0.0028	0.6077	10.2317	22.9655	0	44.55	124.6	38.72
Aprile	-0.0034	0.4957	-12.2342	-16.8748	9	72.50	174.6	44.42
Maggio	0.0068	0.2561	24.7011	24.1269	26	102.38	220.4	47.92
Giugno	0.0008	0.8203	2.7481	2.3360	46	117.64	219.4	40.98
Luglio	-0.0016	0.7212	-5.7307	-4.9199	62.2	116.48	176.8	25.08
Agosto	0.0001	0.9741	0.3330	0.2767	62.6	120.37	233.8	42.37
Settembre	-0.0049	0.3145	-17.9051	-17.9915	22.4	99.52	238.2	48.93
Ottobre	-0.0123	0.3810	-45.0011	-36.2591	1	124.11	340.4	94.06
Novembre	0.0054	0.4751	19.8855	16.6183	16	119.66	459.6	122.94
Dicembre	0.0054	0.3145	19.8835	35.1484	0	56.57	166.2	48.50

**Tabella 5:** Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della precipitazione mensile per la stazione di Caprile (BL)

Di seguito (*Figura 18*) inerente alla stazione situata in località Malga Ciapela (BL), si evidenzia una diminuzione delle precipitazioni per il 33.3% dei mesi (aprile, giugno, settembre e ottobre); mentre il 66.6% dei mesi mostra un trend in crescita quindi un aumento delle precipitazioni.



**Figura 18:** Trend mensile per le precipitazioni della stazione di Malga Ciapela (BL) , il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

Di seguito (*Tabella 6*) mostra la quantificazione dei trend riportati nella *Figura 18*.

Anche qui come per la stazione di Caprile vediamo come nessun trend risulta essere significativo, in quanto nessun mese ha un valore di p-value inferiore allo 0.05.

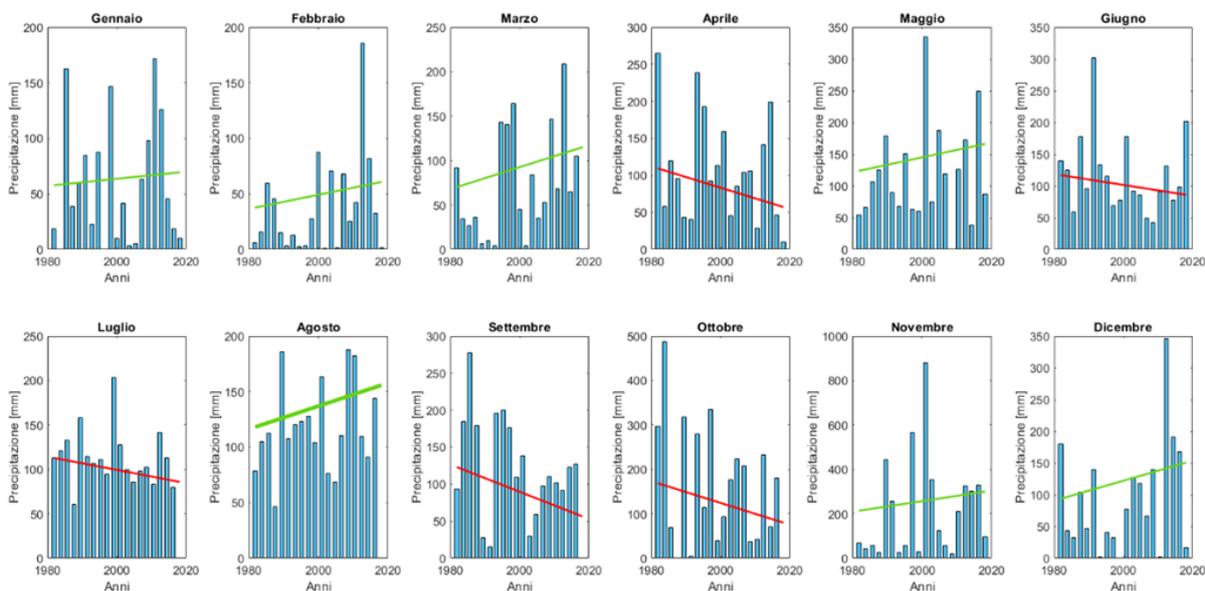
Dalla *Tabella 6* possiamo vedere come anche in questa stazione sia il mese di ottobre a evidenziare il trend maggiore; infatti, vediamo come vi è una diminuzione di 68 mm pari al 47.16% (questo lo vediamo dalla colonna Sen\_10y e Sen\_10y\_%, che mostra come variano i valori in un arco temporale di 10 anni).

Al contrario il mese che evidenzia il maggior incremento delle precipitazioni è maggio con 41.13 mm pari al 31.55%.

Mese	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Sen_10y_%	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	mm/giorno	-	mm/10anni	%/10 anni	mm	mm	mm	-
Gennaio	0.0009	0.6946	3.2061	7.8729	0	40.72	137.8	37.86
Febbraio	0.0032	0.1162	11.5758	37.5955	1.8	30.79	96.4	27.99
Marzo	0.0055	0.4149	20.1181	34.4657	0	58.37	166.6	47.94
Aprile	-0.0048	0.4957	-17.6894	-20.0515	18.4	88.22	208.2	52.96
Maggio	0.0113	0.0644	41.1390	31.5580	59.4	130.36	294.8	55.48
Giugno	-0.0020	0.6732	-7.4605	-5.2439	50.8	142.27	269.8	46.75
Luglio	0.0031	0.5162	11.1590	8.0921	66.8	137.9	216	39.60
Agosto	0.0075	0.2058	27.2801	19.2357	74.6	141.82	245.6	46.95
Settembre	-0.0048	0.4957	-17.4863	-15.1370	21.6	115.52	227.2	50.23
Ottobre	-0.0186	0.2843	-67.9736	-47.1646	2.2	144.12	363.6	103.16
Novembre	0.0060	0.3145	21.8490	15.1424	18.2	144.29	486.8	143.71
Dicembre	0.0055	0.3810	19.9882	30.5817	0	65.36	205.2	52.03

**Tabella 6:** Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della precipitazione mensile per la stazione di Malga Ciapela (BL)

La stazione di Biois a Cencenighe (BL), come riportato di seguito (*Figura 19*) mostra come il 41.66% dei mesi ha registrato una diminuzione delle precipitazioni che hanno interessato cinque mesi, quello di aprile, giugno, luglio, settembre e ottobre; mentre i restanti mesi mostrano un trend in crescita, quindi un aumento delle precipitazioni.



**Figura 19:** Trend mensile per le precipitazioni della stazione di Biois a Cencenighe (BL), il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

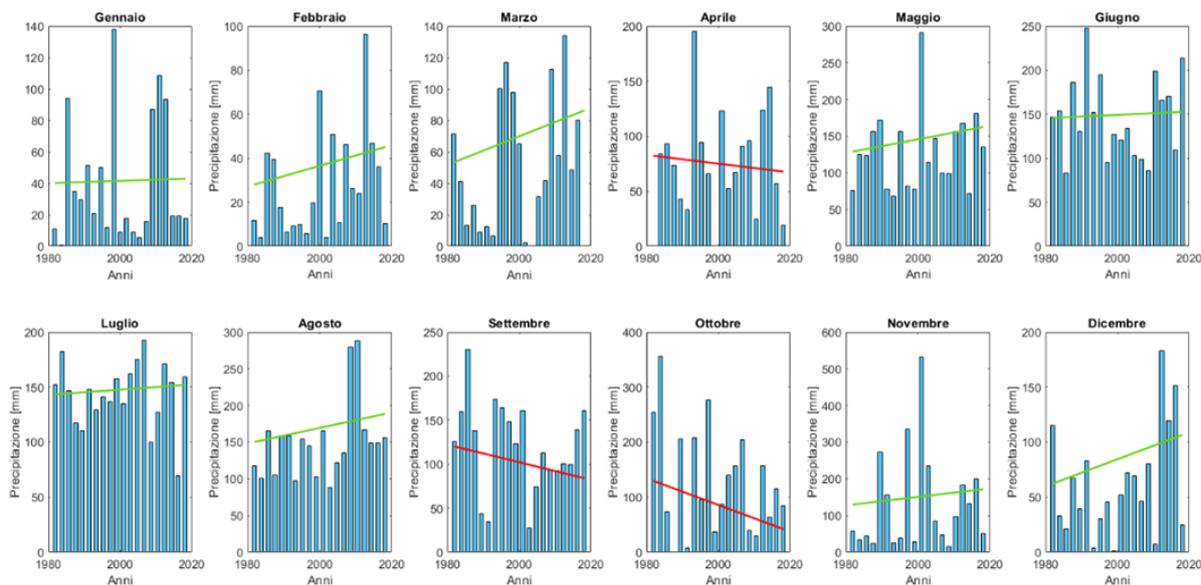
Di seguito (*Tabella 7*) vediamo la quantificazione delle tendenze mostrate nel *Figura 18*; e vediamo come anche qui come nei casi precedenti nessun mese risulta essere statisticamente significativo.

Inoltre, dalla colonna del Sen\_10y vediamo come aumenta o diminuisce la precipitazione in dieci anni, e vediamo che il mese di ottobre subisce una maggior diminuzione, rispetto agli altri mesi con un trend in diminuzione, pari a 46.76 mm ovvero il 27.7 % in meno; al contrario il mese di novembre risulta essere il mese che registra l'aumento delle precipitazioni più marcato pari a 45.28 mm ovvero il 21.17% in più, ma se guardiamo solo il termine percentuale, è il mese di marzo ad evidenziare un maggior incremento pari al 32.10%.

Mese	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Sen_10y_%	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	mm/giorno	-	mm/10anni	%/10 anni	mm	mm	mm	-
Gennaio	0.0016	0.6946	5.8231	10.0778	0	57.78	171.6	55.57
Febbraio	0.0032	0.5063	11.5905	30.8414	0.8	37.58	185.4	44.29
Marzo	0.0062	0.3492	22.5007	32.1090	0	70.08	208.6	60.79
Aprile	-0.0075	0.3145	-27.4234	-25.0740	10.4	109.37	264.8	71.46
Maggio	0.0061	0.2939	22.3231	18.0301	38.6	123.81	334.6	75.36
Giugno	-0.0045	0.3468	-16.3584	-13.9673	42.2	117.12	302	61.43
Luglio	-0.0039	0.1837	-14.1922	-12.5724	60.2	112.88	203.2	31.63
Agosto	0.0054	0.3273	19.8198	16.7784	46.6	118.13	188	39.89
Settembre	-0.0096	0.4011	-35.0411	-28.4862	15.2	123.01	277.4	67.48
Ottobre	-0.0128	0.5756	-46.7616	-27.7023	0	168.80	487	134.05
Novembre	0.0124	0.3810	45.2815	21.1784	19.2	213.81	881.2	225.29
Dicembre	0.0082	0.4359	29.9331	31.9491	0	93.69	346	85.78

*Tabella 7: Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della precipitazione mensile per la stazione di Biois a Cencenighe (BL)*

La stazione di Passo Falzarego (BL), come vediamo dalla figura riportata di seguito (*Figura 20*), evidenzia una diminuzione delle precipitazioni in tre mesi, quello di aprile, settembre e ottobre, pari al 25% mentre il restante 75% mostra una tendenza in crescita, ovvero un aumento delle precipitazioni.



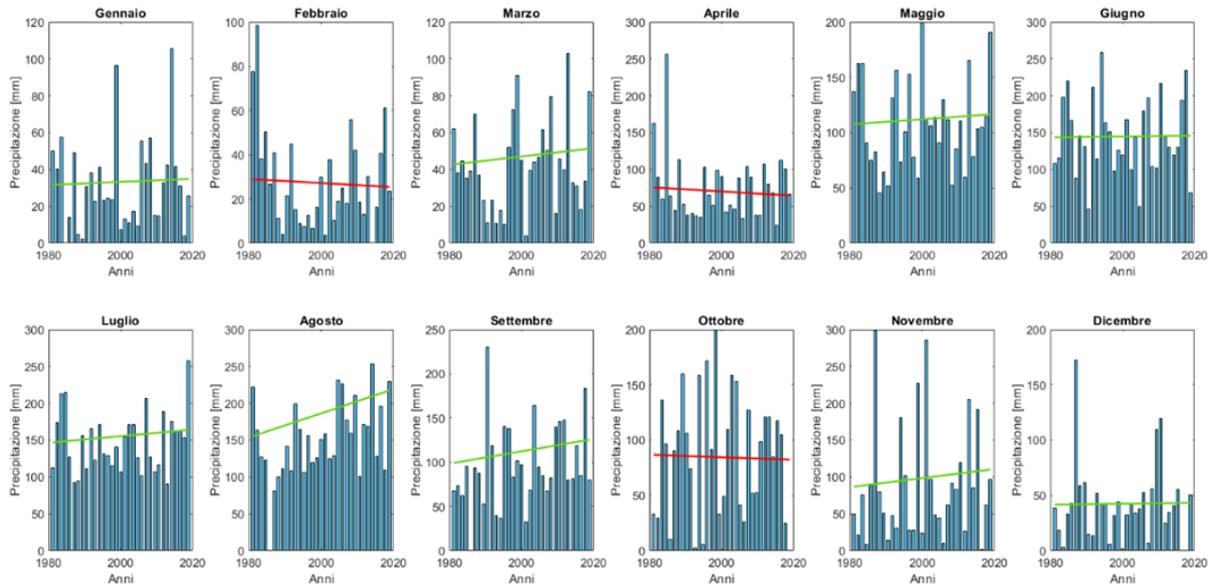
**Figura 20:** Trend mensile per le precipitazioni della stazione di Passo Falzarego (BL) , il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

Nella *Tabella 8* viene riportata la quantificazione dei trend mostrati nella *Figura 20*, e vediamo come il mese che segna il maggior trend decrescente sia ottobre, con una riduzione percentuale delle precipitazioni pari al 35.56 % ovvero 46.11 mm in dieci anni; al contrario vediamo come sia il mese di dicembre ad evidenziare un maggior incremento percentuale delle precipitazioni, pari al 37.42 % vale a dire 23.32 mm.

Mese	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Sen_10y_ %	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	mm/giorno	-	mm/10anni	%/10 anni	mm	mm	mm	-
Gennaio	0.0004	0.9278	1.3741	3.4172	0.8	40.21	137.8	39.84
Febbraio	0.0023	0.1470	8.5381	30.5037	4	27.99	96.4	24.42
Marzo	0.0045	0.5813	16.5040	30.9121	0	53.39	133.8	42.20
Aprile	-0.0021	0.8796	-7.5487	-9.1833	19.4	82.2	195.8	44.75
Maggio	0.0048	0.3468	17.6547	13.6879	68.6	128.98	291.4	53.47
Giugno	0.0010	0.9741	3.5577	2.4400	82.8	145.81	248	45.80
Luglio	0.0012	0.8711	4.5585	3.1791	69.2	143.39	192.4	29.47
Agosto	0.0055	0.2058	20.1429	13.4063	88.4	150.25	288	52.42
Settembre	-0.0052	0.4173	-18.9972	-15.7955	27.6	120.27	230.4	51.00
Ottobre	-0.0126	0.3810	-46.1149	-35.5605	0.2	129.68	356.2	97.01
Novembre	0.0061	0.3810	22.0850	17.0133	16.2	129.81	532	132.70
Dicembre	0.0064	0.2300	23.3213	37.4218	1	62.32	182.6	49.09

**Tabella 8:** Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della precipitazione mensile per la stazione di Passo Falzarego (BL)

Osservando la figura riportata di seguito (*Figura 21*), relativo alla stazione di Passo Pordoi (BL), vediamo come per tre mesi vi sia una tendenza in decrescita, quindi una diminuzione delle precipitazioni, precisamente per il mese di febbraio, aprile ed ottobre.



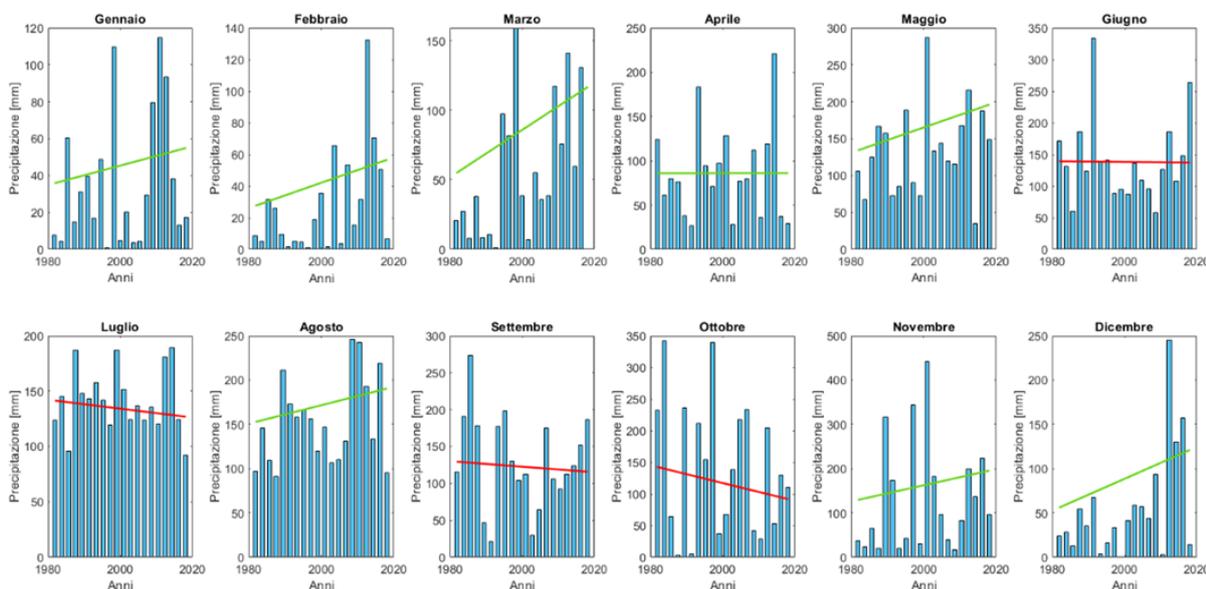
**Figura 21:** Trend mensile per le precipitazioni della stazione di Passo Pordoi (BL) , il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

Dalla quantificazione dei trend (*Tabella 9*), vediamo come a differenza delle stazioni precedenti in cui era ottobre il mese che registrava il trend in decrescita maggiore, per la stazione di Passo Pordoi il mese che segna il trend di diminuzione delle precipitazioni maggiore sia aprile con una diminuzione percentuale pari al 4.5 % ovvero 3.38 mm in dieci anni, al contrario il mese che segna il più alto incremento delle precipitazioni è agosto, con un incremento percentuale del 12.44 % ossia 19.33 mm, inoltre agosto risulta essere l'unico mese con un trend statisticamente significativo.

Mese	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Sen_10y_%	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	mm/giorno	-	mm/10anni	%/10 anni	mm	mm	mm	-
Gennaio	0.0003	0.7685	0.9993	3.15320	0	31.69	105.6	24.58
Febbraio	-0.0003	0.8330	-1.0804	-3.73355	3.8	28.94	98.6	22.01
Marzo	0.0007	0.6310	2.6642	6.22396	3.8	42.81	103	24.46
Aprile	-0.0009	0.6532	-3.3845	-4.47465	24.4	75.64	256.4	45.27
Maggio	0.0007	0.6756	2.7314	2.53531	45.4	107.73	199.8	40.93
Giugno	0.0002	0.9629	0.6589	0.45820	46.8	143.79	258.4	52.30
Luglio	0.0014	0.5354	5.2461	3.56846	90.8	147.01	258	40.25
<b>Agosto</b>	<b>0.0053</b>	<b>0.0394</b>	<b>19.3381</b>	<b>12.44706</b>	<b>81</b>	<b>155.36</b>	<b>253.2</b>	<b>45.73</b>
Settembre	0.0023	0.2496	8.2207	8.28908	32.8	99.18	230	43.98
Ottobre	-0.0004	0.9527	-1.3324	-1.53692	0	86.69	199.4	54.77
Novembre	0.0020	0.4115	7.2380	8.33400	1.4	86.85	298.4	78.02
Dicembre	0.0001	0.9382	0.4997	1.19900	0	41.67	172.2	35.77

**Tabella 9:** Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della precipitazione mensile per la stazione di Passo Pordoi (BL), in grassetto i trend con significatività ( $p\text{-value} < 0.05$ )

Dalla figura riportata di seguito (Figura 22), inerente alla stazione situata a Passo Valles (BL) osserviamo come il 33.33 % delle stazioni evidenzia un trend in decrescita, ossia vi è una diminuzione delle precipitazioni, in particolare per i mesi di giugno, luglio, settembre e ottobre; al contrario gli altri mesi segnano un trend in crescita; quindi, assistiamo ad un aumento delle precipitazioni.



**Figura 22:** Trend mensile per le precipitazioni della stazione di Passo Valles (BL), il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

Nello specifico, nella Tabella 10 vediamo come le tendenze riportate nel Figura 22 vengono quantificate.

In particolare, vediamo che, come trend negativo, abbiamo ottobre che segna una maggior evidenza pari ad una diminuzione di 26.76 mm in dieci anni, vale a dire il 18.75% in meno di precipitazioni. Al contrario il mese che mostra un maggior aumento delle precipitazioni è dicembre con un aumento percentuale molto marcato, pari al 61.31% ovvero 34.30 mm.

Mese	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Sen_10y_%	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	mm/giorno	-	mm/10anni	%/10 anni	mm	mm	mm	-
Gennaio	0.0026	0.3492	9.5391	26.6031	1	35.86	114.6	35.82
Febbraio	0.0040	0.0907	14.5784	52.9664	1.4	27.52	132.2	32.39
Marzo	0.0085	0.0748	30.9244	56.3042	0	54.92	159.2	49.25
Aprile	0.0000	0.9741	0.0792	0.0921	26.8	86.01	221.2	51.96
Maggio	0.0089	0.2300	32.6472	24.3418	34.8	134.12	287.4	59.22
Giugno	-0.0003	0.9741	-1.0505	-0.7542	58.4	139.29	333.6	66.22
Luglio	-0.0021	0.5162	-7.6591	-5.4139	92.4	141.47	189.4	28.24
Agosto	0.0054	0.4173	19.8267	12.9815	91	152.73	246.4	48.59
Settembre	-0.0020	0.6265	-7.1624	-5.5334	21.6	129.44	273.4	63.21
Ottobre	-0.0073	0.4173	-26.7644	-18.7597	2.6	142.67	342.4	105.56
Novembre	0.0095	0.2058	34.7721	26.8760	15.8	129.38	442.2	123.03
Dicembre	0.0094	0.0644	34.3060	61.3155	0.2	55.95	245.2	60.67

*Tabella 10: Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della precipitazione mensile per la stazione di Passo Valles (BL)*

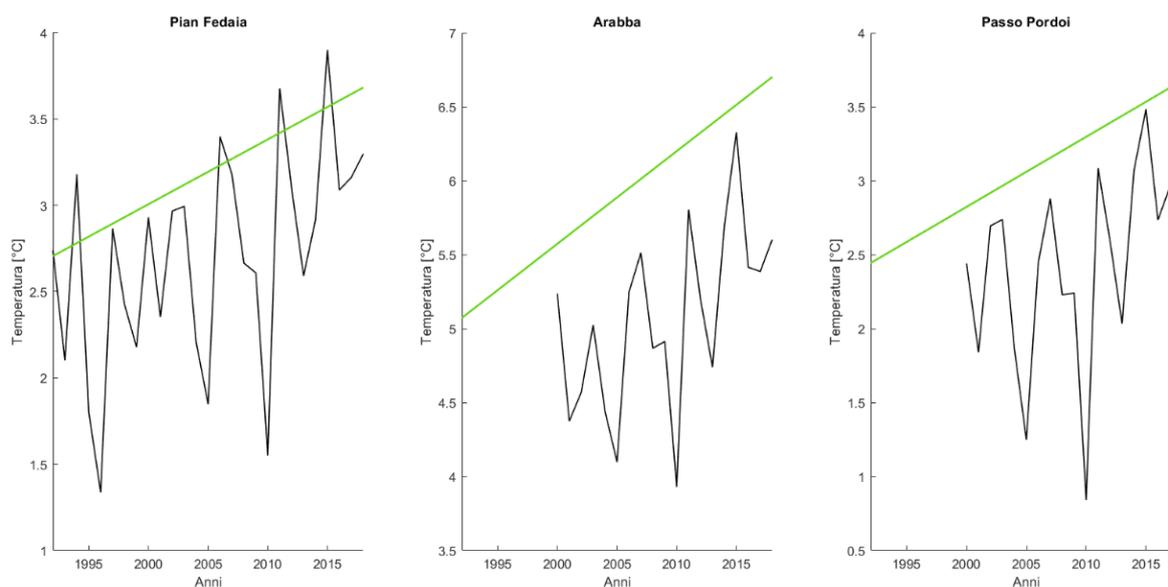
### 3.3 Trend annuale delle temperature

Allo stesso modo dei dati sulle precipitazioni, lo stimatore della pendenza di Mann-Kendall e Sen è stato utilizzato per valutare le tendenze di temperatura massima e minima per le serie temporali annuali e mensili.

In questa sezione vediamo i risultati che sono stati ottenuti dall'analisi delle temperature annuali di tre stazioni situate nei pressi del bacino.

Per l'analisi delle temperature il periodo preso in considerazione è pari a 26 anni e va dal 01 gennaio 1992 al 31 dicembre 2018.

Dalle stazioni analizzate, le temperature annuali sono state dominate da tendenze positive (al rialzo) per tutte le stazioni (*Figura 23*), inoltre risultano tutte statisticamente significative, come vediamo dalla *Tabella 11* che riporta la quantificazione dei trend della *Figura 23*, tutte le stazioni hanno un p-value inferiore allo 0.05 e quindi sono significative al 95%.



**Figura 23:** Trend annuale delle temperature per le stazioni considerate, il colore verde mostra un trend in crescita

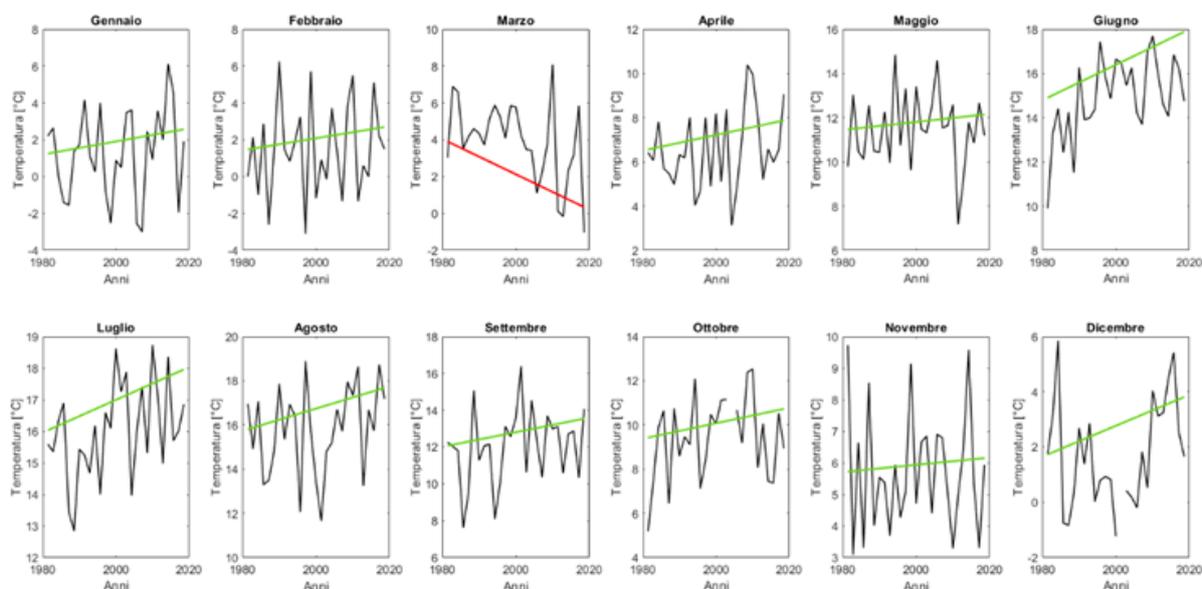
Stazione	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	°C/giorno	-	°C/ 10 anni	°C	°C	°C	-
<b>Pian Fedaia</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0156</b>	<b>0.3752</b>	<b>1.33</b>	<b>2.71</b>	<b>3.90</b>	<b>0.63</b>
<b>Arabba</b>	<b>0.0002</b>	<b>0.0301</b>	<b>0.6258</b>	<b>3.93</b>	<b>5.07</b>	<b>6.33</b>	<b>0.62</b>
<b>Passo Pordoi</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0424</b>	<b>0.4734</b>	<b>0.84</b>	<b>2.44</b>	<b>3.48</b>	<b>0.66</b>

**Tabella 11:** Mostra la quantificazione dei trend di temperatura annuale per le stazioni considerate, in grassetto i trend con significatività (p-value < 0.05)

## 3.4 Trend mensile della temperatura

### 3.4.1 Trend temperatura massima

Le temperature massime mensili per i dati disponibili per la stazione di Pian Fedai (BL) indicano una dominanza di tendenze positive in quasi tutti i mesi, tranne per il mese di marzo dove le temperature mostrano un trend negativo (Figura 24).



**Figura 24:** Trend mensile della temperatura massima per la stazione di Pian Fedai (BL), il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

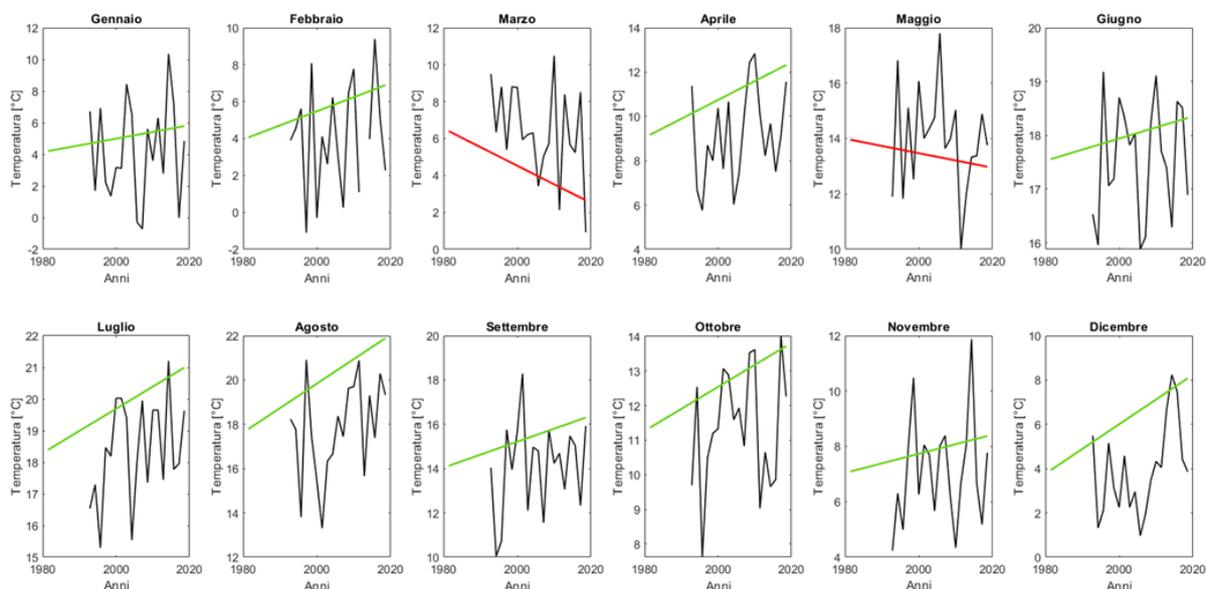
Di seguito (Tabella 12), vediamo la quantificazione dei trend riportati nella Figura 24.

Dalla tabella riportata di seguito possiamo osservare, come detto in precedenza, che il mese di marzo è l'unico con una tendenza negativa, mostrando una diminuzione della temperatura pari a  $1.36\text{ }^{\circ}\text{C}$  in dieci anni; al contrario il mese di giugno è quello che subisce un maggior incremento delle temperature massime, ossia  $1.14\text{ }^{\circ}\text{C}$  sempre in un arco temporale decennale, seguito dal mese di dicembre con un incremento di  $0.79\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Mese	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	°C/giorno	-	°C/ 10 anni	°C	°C	°C	-
Gennaio	0.0001	0.5317	0.5049	-2.99	1.26	6.12	2.41
Febbraio	0.0001	0.5878	0.4679	-3.11	1.48	6.26	2.50
<b>Marzo</b>	<b>-0.0004</b>	<b>0.0218</b>	<b>-1.3697</b>	<b>-1.03</b>	<b>3.91</b>	<b>8.09</b>	<b>2.18</b>
Aprile	0.0001	0.2430	0.5056	3.14	6.56	10.39	1.79
Maggio	0.0001	0.5878	0.2591	7.18	11.47	14.85	1.69
<b>Giugno</b>	<b>0.0003</b>	<b>0.0139</b>	<b>1.1477</b>	<b>9.90</b>	<b>14.91</b>	<b>17.70</b>	<b>1.82</b>
Luglio	0.0002	0.0954	0.7403	12.84	16.03	18.73	1.52
Agosto	0.0002	0.1689	0.7192	11.65	15.81	18.90	2.00
Settembre	0.0002	0.1563	0.5662	7.63	12.07	16.39	2.00
Ottobre	0.0001	0.2901	0.4994	5.18	9.43	12.53	1.87
Novembre	0.0000	0.8025	0.1633	3.08	5.72	9.73	1.91
Dicembre	0.0002	0.2011	0.7996	-1.23	1.73	5.85	1.91

**Tabella 12:** Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura massima mensile per la stazione di Pian Fedaja (BL), in grassetto i trend con significatività ( $p\text{-value} < 0.05$ )

Per la stazione di Arabba (BL) possiamo vedere come via via una dominanza di trend in crescita (quindi un aumento delle temperature massime) solo il 16.66% dei mesi mostra un trend negativo; quindi, una diminuzione delle precipitazioni e sono principalmente i mesi primaverili ovvero sia quelli di marzo e maggio (Figura 25).



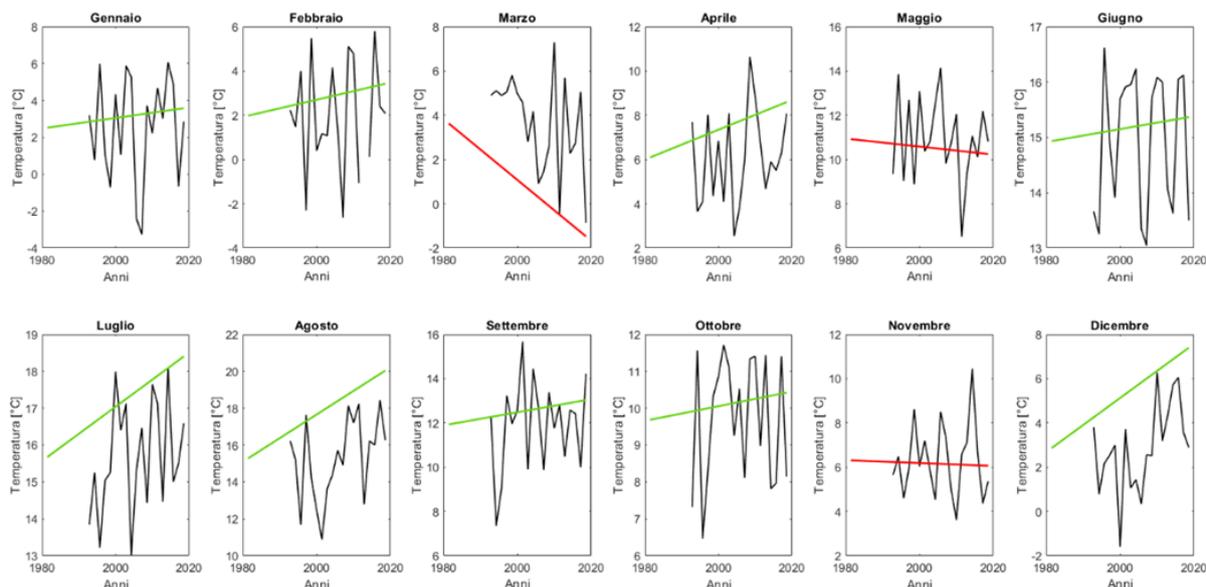
**Figura 25:** Trend mensile della temperatura massima per la stazione di Arabba (BL), il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

La *Tabella 13* riporta la quantificazione dei trend delle temperature massime per la stazione di Arabba (BL) e possiamo vedere come dei due mesi che segnano un trend negativo, il mese di marzo presenta una Sen slope maggiore, che possiamo poi tradurre in una diminuzione delle temperature pari a 1.44°C, al contrario, come nel caso precedente, è il mese di dicembre ad evidenziare un maggior scostamento subendo un incremento delle temperature massime pari a 1.59°C, seguito da agosto con un incremento di 1.57°C, il tutto in scala decennale.

Mese	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	°C/giorno	-	°C/ 10 anni	°C	°C	°C	-
Gennaio	0.0002	0.7796	0.6069	-0.71	4.20	10.35	3.12
Febbraio	0.0003	0.5445	1.0895	-1.10	4.06	9.39	2.95
<b>Marzo</b>	<b>-0.0004</b>	<b>0.0424</b>	<b>-1.4409</b>	<b>0.93</b>	<b>6.40</b>	<b>10.49</b>	<b>2.52</b>
Aprile	0.0003	0.2939	1.2144	5.76	9.16	12.84	2.09
Maggio	-0.0001	0.6746	-0.3750	10.02	13.96	17.80	1.87
Giugno	0.0001	0.7264	0.2956	15.88	17.56	19.18	1.07
Luglio	0.0003	0.2480	0.9991	15.30	18.39	21.20	1.61
Agosto	0.0004	0.1417	1.5770	13.31	17.78	20.91	2.21
Settembre	0.0002	0.3630	0.8375	10.05	14.13	18.29	2.05
Ottobre	0.0002	0.3630	0.9078	7.62	11.36	14.02	1.73
Novembre	0.0001	0.4841	0.4937	4.24	7.09	11.88	1.95
Dicembre	0.0004	0.0999	1.5958	0.97	3.93	8.24	2.02

*Tabella 13: Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura massima mensile per la stazione di Arabba (BL), in grassetto i trend con significatività (p-value < 0.05)*

La stazione situata presso Passo Pordoi (BL), anch'essa come le precedenti è dominata da tendenze positive; quindi, vediamo che per la maggior parte dei mesi vi è un aumento delle temperature massime, però il 25% dei mesi evidenzia trend negativi, in particolare i mesi primaverili ovvero marzo e maggio, ma anche novembre segna una lieve diminuzione delle temperature massime (*Figura 26*).



**Figura 26:** Trend mensile della temperatura massima per la stazione di Passo Pordoi (BL, il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente)

La *Tabella 14* riporta la quantificazione dei trend per la stazione di Passo Pordoi (BL), e come nei casi precedenti anche qui il mese di marzo e il mese di dicembre sono i mesi che segnano un maggior variazione percentuale negativa e positiva rispettivamente.

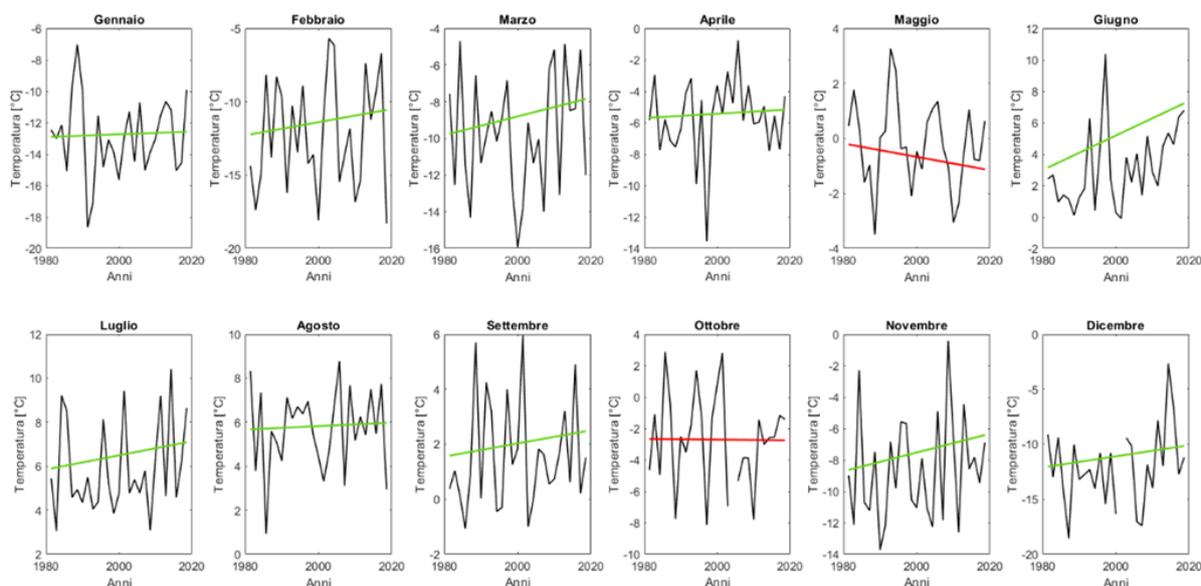
Il mese di marzo presenta un trend negativo, infatti vediamo che a livello decennale vi è una diminuzione delle temperature massime pari a 1.96° C, mentre il mese che segna un maggior incremento delle temperature massime è agosto con 1.83°C, seguito dal mese di dicembre, anch'esso con un trend positivo, con un aumento delle temperature massime di 1.74°C, il tutto sempre in ottica decennale.

Mese	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	°C/giorno	-	°C/ 10 anni	°C	°C	°C	-
Gennaio	0.0001	0.7796	0.4060	-3.26	2.53	6.07	2.84
Febbraio	0.0002	0.7619	0.5550	-2.63	1.98	5.80	2.55
Marzo	-0.0005	0.0501	-1.9618	-0.85	3.63	7.29	2.22
Aprile	0.0003	0.3630	0.9611	2.55	6.10	10.64	2.12
Maggio	-0.0001	0.8887	-0.2581	6.52	10.92	14.14	1.92
Giugno	0.0000	0.5289	0.1665	13.05	14.93	16.62	1.27
Luglio	0.0003	0.1237	1.0489	13.02	15.67	18.11	1.53
Agosto	0.0005	0.0589	1.8317	10.88	15.27	18.44	2.25
Settembre	0.0001	0.4841	0.4228	7.35	11.93	15.68	2.05
Ottobre	0.0001	0.7796	0.2831	6.47	9.69	11.71	1.73
Novembre	0.0000	0.9721	-0.0937	3.61	6.31	10.45	1.68
Dicembre	0.0005	0.0501	1.7449	-1.60	2.86	6.27	1.99

**Tabella 14:** Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura massima mensile per la stazione di Passo Pordoi (BL)

### 3.4.2 Trend temperatura minima

Le temperature minime mensili con i dati a disposizione per la stazione situata a Pian Fedaia (BL) mostrano una dominanza positiva per 83.33% dei mesi, mentre per il restante 16.66% pari a due mesi vediamo un trend negativo, rispettivamente per maggio e ottobre dove assistiamo ad una diminuzione delle temperature minime (Figura 27).



**Figura 27:** Trend mensile della temperatura minima per la stazione di Pian Fedaia (BL), il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

Di seguito (Tabella 15), abbiamo la quantificazione delle tendenze riportate nel Figura 27.

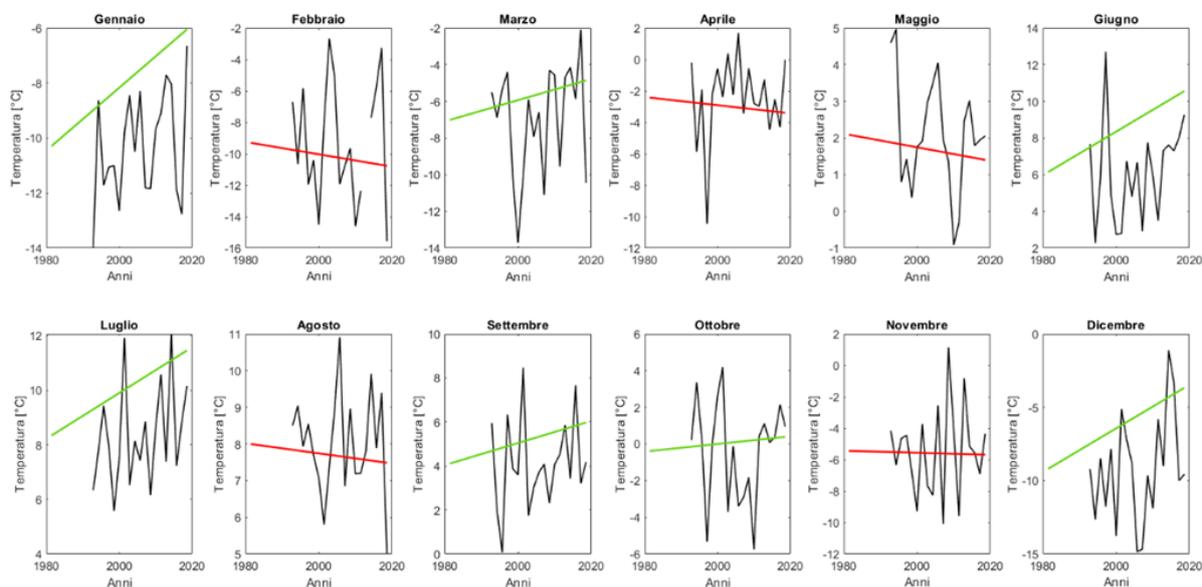
Per i dati che abbiamo a disposizione vi sono per la maggior parte tendenze positive che però, tranne per il mese di giugno, le altre non risultano statisticamente significative.

Possiamo dire però che il mese di giugno, oltre ad essere statisticamente significativo, è il mese che registra un incremento maggiore di temperatura in dieci anni, pari a  $1.57^{\circ}\text{C}$  seguito poi da dicembre con un aumento di  $0.85^{\circ}\text{C}$  in dieci anni, al contrario maggio subisce una diminuzione delle temperature minime pari a  $0.34^{\circ}\text{C}$  in dieci anni, anche il mese di ottobre registra un trend negativo, ma meno importante rispetto a quello di maggio, infatti in dieci anni assistiamo ad una diminuzione di  $0.03^{\circ}\text{C}$ .

Mese	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	°C/giorno	-	°C/ 10 anni	°C	°C	°C	-
Gennaio	3.4037E-05	0.7704	0.1242	-18.65	-12.90	-7.03	2.52
Febbraio	1.7570E-04	0.6465	0.6413	-18.30	-12.22	-5.69	3.81
Marzo	1.9998E-04	0.5047	0.7299	-15.90	-9.75	-4.69	3.21
Aprile	5.3272E-05	0.8349	0.1944	-13.56	-5.68	-0.75	2.49
Maggio	-9.5220E-05	0.4283	-0.3476	-3.50	-0.22	3.27	1.56
<b>Giugno</b>	<b>4.3063E-04</b>	<b>0.0086</b>	<b>1.5718</b>	<b>-0.09</b>	<b>3.14</b>	<b>10.37</b>	<b>2.49</b>
Luglio	1.2588E-04	0.2603	0.4595	3.06	5.90	10.41	2.09
Agosto	3.0827E-05	0.8025	0.1125	0.93	5.68	8.78	1.85
Settembre	9.3539E-05	0.4530	0.3414	-1.06	1.59	5.97	1.97
Ottobre	-8.5558E-06	0.9297	-0.0312	-8.13	-2.66	2.89	3.03
Novembre	2.3308E-04	0.4283	0.8507	-13.73	-8.63	-0.42	3.33
Dicembre	1.9807E-04	0.4536	0.7229	-18.56	-12.04	-2.66	3.53

**Tabella 15:** Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura minima mensile per la stazione di Pian Fedai (BL), in grassetto i trend con significatività ( $p\text{-value} < 0.05$ )

La stazione di Arabba (BL) al contrario della precedente evidenzia molte più tendenze negative, infatti il 41.66% dei mesi è dominato da trend in decrescita, rispettivamente febbraio, aprile, maggio, agosto e novembre; i restanti mesi vedono trend positivi, quindi una crescita delle temperature minime (Figura 28).



**Figura 28:** Trend mensile della temperatura minima per la stazione di Arabba (BL), il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

Dalla quantificazione dei trend mensili di temperatura minima riportati di seguito (Tabella 16), confermiamo che quasi la metà dei mesi ha un trend negativo, mentre i restanti sette hanno un trend positivo in crescita, però nessuno di loro mostra una significatività statistica; ciò nonostante vediamo come il mese di dicembre sia quello che subisce un maggior incremento

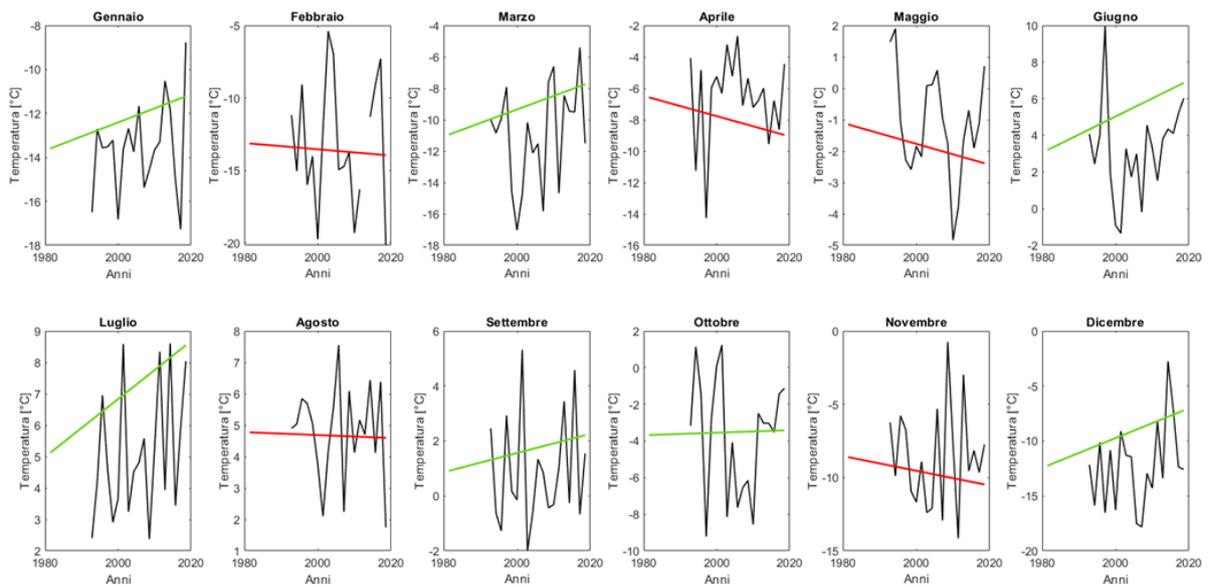
sulla temperatura minima, pari a 2.12°C in dieci anni, seguito da giugno con un incremento pari a 1.69°C sempre in dieci anni.

Al contrario è il mese di febbraio che evidenzia una diminuzione maggiore delle temperature minime pari a 0.56°C in dieci anni, seguito da aprile con una diminuzione di 0.26°C sempre in dieci anni, mentre il mese di novembre segna una diminuzione più lieve, pari a 0.09°C in dieci anni.

Mese	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	°C/giorno	-	°C/ 10 anni	°C	°C	°C	-
Gennaio	0.0004	0.1617	1.6314	-14.00	-10.29	-6.65	2.02
Febbraio	-0.0002	0.8202	-0.5620	-15.58	-9.30	-2.67	3.89
Marzo	0.0002	0.3630	0.8276	-13.70	-7.01	-2.09	3.03
Aprile	-0.0001	0.7264	-0.3695	-10.45	-2.43	1.70	2.68
Maggio	-0.0001	0.8337	-0.2636	-0.92	2.09	4.97	1.54
Giugno	0.0005	0.0589	1.6968	2.27	6.15	12.71	2.64
Luglio	0.0003	0.2079	1.1983	5.58	8.34	12.06	1.83
Agosto	-0.0001	0.8337	-0.1963	5.00	8.00	10.91	1.40
Settembre	0.0002	0.4011	0.7172	0.07	4.11	8.48	2.05
Ottobre	0.0001	0.6746	0.2975	-5.76	-0.39	4.20	2.77
Novembre	0.0000	0.9721	-0.0929	-10.09	-5.44	1.14	2.92
Dicembre	0.0006	0.4415	2.1231	-14.84	-9.20	-1.11	3.69

**Tabella 16:** Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura minima mensile per la stazione di Arabba (BL)

Anche la stazione di Passo Pordoi (BL), come quella di Arabba (BL), mostra un'elevata presenza di trend negativi, pari al 41.66%, dove in questi mesi vi è una diminuzione delle temperature minime; al contrario il restante 58.33% mostra una dominanza di tendenze positive, quindi una crescita delle temperature minime. I mesi che presentano un trend in decrescita sono rispettivamente febbraio, aprile, maggio, agosto e novembre (*Figura 29*).



**Figura 29:** Trend mensile della temperatura minima per la stazione di *Passo Pordoi (BL)*, il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

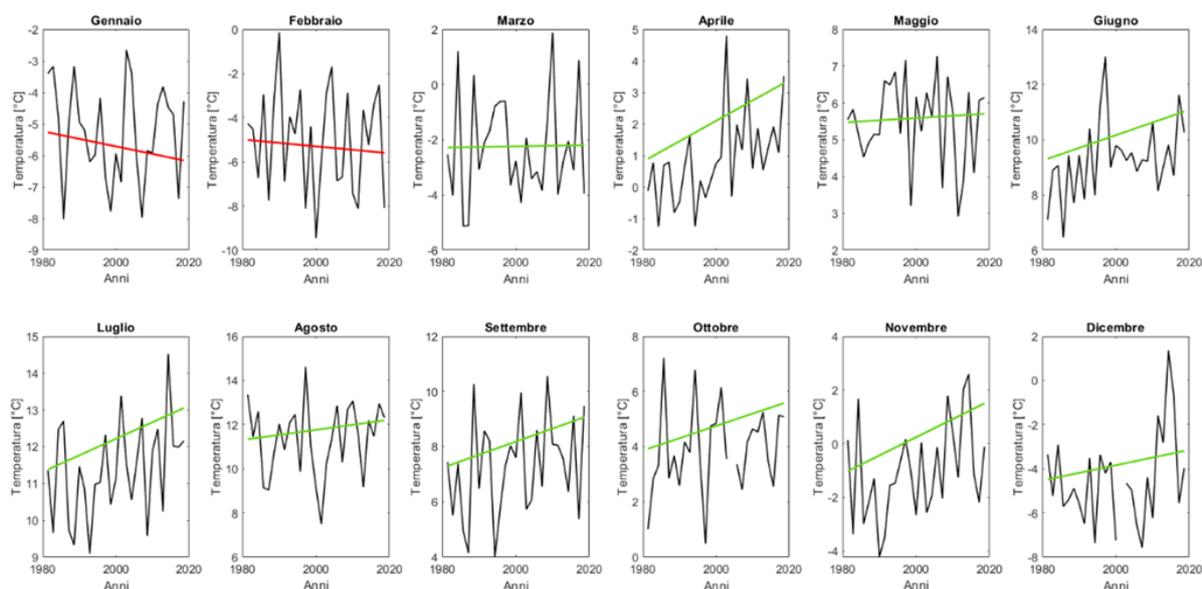
Nella tabella riportata di seguito (*Tabella 17*), vediamo la quantificazione dei trend rappresentati nel *Figura 29*, innanzitutto vediamo che anche qui, come nei casi precedenti, non vi è nessuna significatività statistica dei trend; ma possiamo comunque vedere come anche in questo caso il mese di dicembre sia quello che mostra il maggior incremento delle temperature minime in dieci anni, pari a  $1.93^{\circ}\text{C}$ , seguito da giugno e luglio con un aumento di  $1.40^{\circ}\text{C}$  e  $1.31^{\circ}\text{C}$  rispettivamente, sempre in dieci anni. Diverso è il trend dei mesi di febbraio, aprile, maggio, agosto e novembre, dove vediamo, come detto in precedenza, un trend negativo, che implica una diminuzione delle temperature minime. Il mese che mostra una maggior diminuzione è aprile con un calo pari a  $0.92^{\circ}\text{C}$  in dieci anni, seguito da novembre con una riduzione di  $0.71^{\circ}\text{C}$  sempre in prospettiva decennale, mentre è il mese di agosto che mostra una diminuzione minore, pari a  $0.06^{\circ}\text{C}$  in dieci anni.

Mese	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	°C/giorno	-	°C/ 10 anni	°C	°C	°C	-
Gennaio	0.0003	0.5756	0.9134	-17.28	-13.60	-8.77	2.11
Febbraio	-0.0001	0.8796	-0.3081	-20.17	-13.14	-5.40	4.43
Marzo	0.0003	0.2939	1.2318	-17.03	-10.95	-5.40	3.23
Aprile	-0.0003	0.4011	-0.9207	-14.28	-6.58	-2.67	2.80
Maggio	-0.0001	0.7264	-0.4754	-4.83	-1.15	1.90	1.71
Giugno	0.0004	0.1417	1.4091	-1.34	3.20	9.98	2.58
Luglio	0.0004	0.1075	1.3159	2.38	5.12	8.60	2.09
Agosto	0.0000	0.8887	-0.0666	1.75	4.77	7.55	1.54
Settembre	0.0001	0.5289	0.4998	-2.00	0.91	5.32	2.02
Ottobre	0.0000	0.8337	0.0982	-9.21	-3.68	1.23	3.22
Novembre	-0.0002	0.7796	-0.7172	-14.15	-8.60	-0.74	3.48
Dicembre	0.0005	0.5289	1.9326	-17.82	-12.25	-2.76	3.82

**Tabella 17:** Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura minima mensile per la stazione di Passo Pordoi (BL)

### 3.4.3 Trend temperatura media

Le temperature medie mensili, ottenute con i dati a disposizione per la stazione di Pian Fedaia (BL) sono dominate da tendenze positive per l' 83.33% dei mesi, questo sta a significare che le temperature medie in questi mesi stanno aumentando. Questa tendenza però non è confermata in tutti i mesi, infatti, nei mesi di gennaio e febbraio assistiamo ad un trend negativo, ovvero ad una diminuzione delle temperature medie (*Figura 30*).



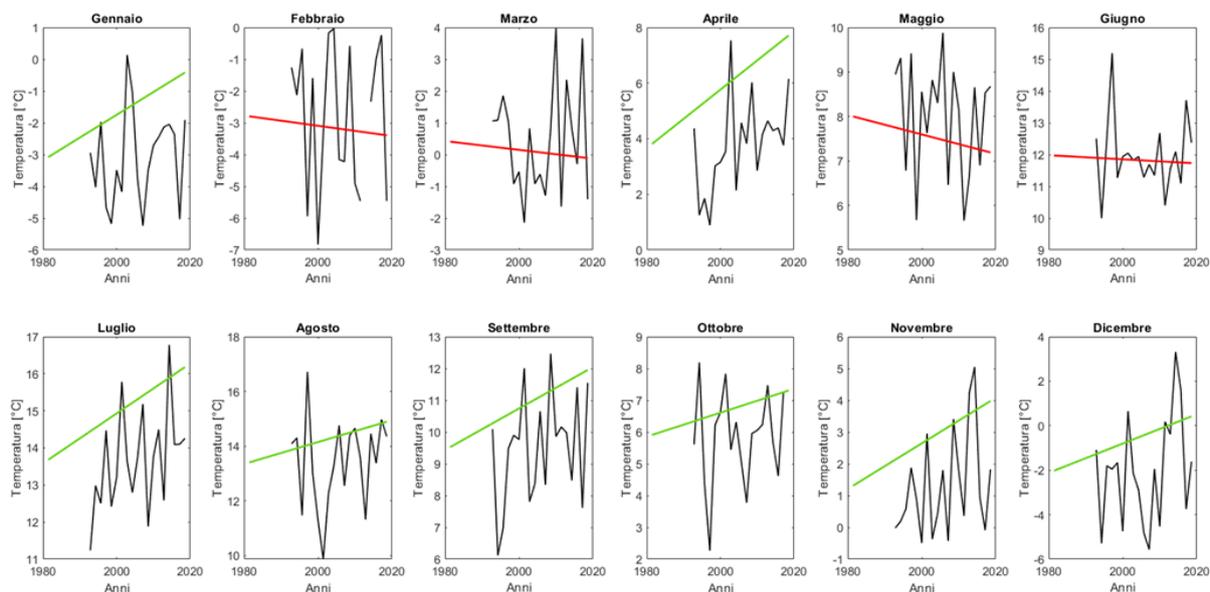
**Figura 30:** Trend mensile della temperatura media per la stazione di Pian Fedaia (BL) , il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

Nella tabella riportata di seguito (*Tabella 18*), possiamo osservare la quantificazione dei trend rappresentati nella *Figura 30*. Innanzitutto, vediamo come due mesi risultino statisticamente significativi, e sono il mese di aprile e il mese di novembre, entrambi con un trend positivo, dove segnano un aumento della temperatura media rispettivamente di  $0.92^{\circ}\text{C}$  e  $0.97^{\circ}\text{C}$  in dieci anni. Al contrario, come detto in precedenza sono i mesi di gennaio e febbraio che presentano trend negativi, ovvero una diminuzione delle precipitazioni pari a  $0.34^{\circ}\text{C}$  per il mese di gennaio e  $0.22^{\circ}\text{C}$  per il mese di febbraio, queste temperature fanno riferimento ad un periodo decennale.

Mese	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	°C/giorno	-	°C/ 10 anni	°C	°C	°C	-
Gennaio	-9.356E-05	0.6767	-0.3415	-8.02	-5.27	-2.65	1.55
Febbraio	-6.128E-05	0.7387	-0.2237	-9.45	-5.01	-0.14	2.37
Marzo	9.053E-06	0.9335	0.0330	-5.12	-2.28	1.88	1.89
<b>Aprile</b>	<b>2.528E-04</b>	<b>0.0027</b>	<b>0.9228</b>	<b>-1.25</b>	<b>0.90</b>	<b>4.80</b>	<b>1.41</b>
Maggio	2.414E-05	0.7704	0.0881	2.92	5.48	7.27	1.17
Giugno	1.804E-04	0.0666	0.6584	6.47	9.31	13.01	1.37
Luglio	1.759E-04	0.0606	0.6421	9.09	11.38	14.52	1.31
Agosto	8.980E-05	0.4044	0.3278	7.50	11.34	14.62	1.64
Settembre	1.859E-04	0.1689	0.6786	3.99	7.30	10.57	1.79
Ottobre	1.743E-04	0.1339	0.6361	0.49	3.93	7.22	1.56
Novembre	2.658E-04	0.0454	0.9701	-4.22	-1.02	2.59	1.77
Dicembre	1.360E-04	0.4806	0.4963	-7.57	-4.48	1.37	2.09

**Tabella 18:** Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura media mensile per la stazione di Pian Fedai (BL), in grassetto i trend con significatività ( $p\text{-value} < 0.05$ )

Per la stazione situata ad Arabba (BL), vediamo che le temperature medie mensili che abbiamo ottenuto con i dati a disposizione mostrano una dominanza di trend positivi per il 66.66%, dove le temperature medie sono in aumento, i restanti mesi invece mostrano un trend in decrescita, registrando una diminuzione delle temperature medie mensili, questi mesi sono febbraio, marzo, maggio e giugno (Figura 31).



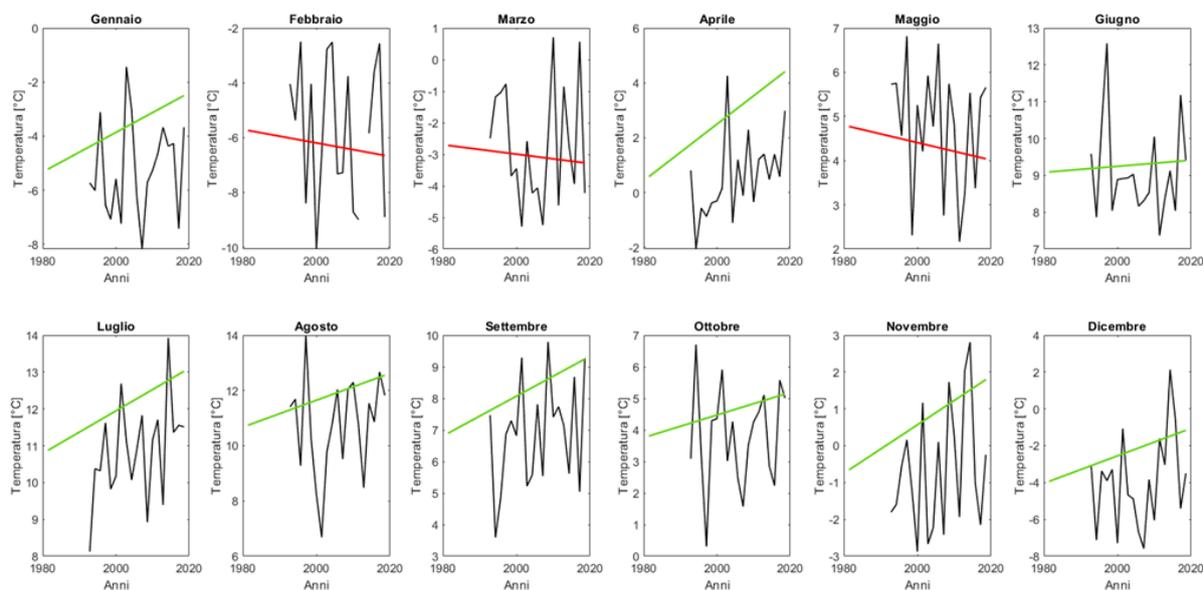
**Figura 31:** Trend mensile della temperatura media per la stazione di Arabba (BL), il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

Dalla quantificazione dei trend riportati nella tabella di seguito (*Tabella 19*), possiamo notare che due mesi risultano essere statisticamente significativi, e sono il mese di aprile e il mese di luglio, dove in dieci anni vediamo un incremento delle temperature medie pari a 1.5°C e 0.96°C rispettivamente. Al contrario, come detto in precedenza ci sono quattro mesi che seppur non siano statisticamente significativi segnano una tendenza in decrescita; il mese con una maggior diminuzione delle temperature medie è maggio con una riduzione pari a 0.31°C in dieci anni, seguito da febbraio con un calo di 0.22°C sempre in dieci anni.

Mese	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	°C/giorno	-	°C/ 10 anni	°C	°C	°C	-
Gennaio	2.805E-04	0.2629	1.0238	-5.24	-3.08	0.13	1.46
Febbraio	-6.281E-05	0.7619	-0.2292	-6.83	-2.80	-0.04	2.27
Marzo	-5.419E-05	0.6243	-0.1978	-2.14	0.41	3.98	1.73
<b>Aprile</b>	<b>4.111E-04</b>	<b>0.0174</b>	<b>1.5004</b>	<b>0.89</b>	<b>3.81</b>	<b>7.54</b>	<b>1.67</b>
Maggio	-8.525E-05	0.4841	-0.3112	5.66	8.00	9.88	1.28
Giugno	-2.510E-05	0.9442	-0.0916	9.99	11.97	15.19	1.14
<b>Luglio</b>	<b>2.633E-04</b>	<b>0.0358</b>	<b>0.9612</b>	<b>11.24</b>	<b>13.68</b>	<b>16.78</b>	<b>1.36</b>
Agosto	1.565E-04	0.2939	0.5713	9.87	13.41	16.72	1.64
Settembre	2.555E-04	0.1837	0.9326	6.12	9.53	12.47	1.73
Ottobre	1.474E-04	0.5289	0.5379	2.27	5.91	8.19	1.47
Novembre	2.808E-04	0.1617	1.0248	-0.49	1.31	5.05	1.62
Dicembre	2.573E-04	0.3630	0.9390	-5.57	-2.02	3.32	2.43

*Tabella 19: Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura media mensile per la stazione di Arabba (BL) , in grassetto i trend con significatività (p-value < 0.05)*

Le temperature medie mensile ottenute con i dati a disposizione per la stazione situata a Passo Pordoi (BL) evidenziano una dominanza di tendenze positive, quindi un aumento delle temperature medie per il 75% delle stazioni; il restante 25% formato da tre mesi, quali febbraio, marzo e maggio, presentano trend negativi, vale a dire che abbiamo una diminuzione delle temperature medie (*Figura 32*).



**Figura 32:** Trend mensile della temperatura media per la stazione di Passo Pordoi (BL) , il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

Nella tabella riportata di seguito (*Tabella 20*), vediamo la quantificazione dei trend rappresentati nel *Figura 32*, in particolare si evidenzia la significatività del trend per il mese di aprile, che è un trend positivo che registra un incremento della temperatura media pari a  $1.47^{\circ}\text{C}$  in dieci anni; il mese di aprile oltre ad essere statisticamente significativo è il mese che registra l'incremento maggiore di temperatura, seguito da dicembre con un aumento di  $1.06^{\circ}\text{C}$  in dieci anni, che però non è statisticamente significativo.

Oltre a trend positivo assistiamo anche a trend negativi, dove le temperature medie sono in calo, questa tendenza si può notare per il mese di febbraio, marzo e maggio, dove le temperature medie calano rispettivamente di  $0.35^{\circ}\text{C}$ ,  $0.21^{\circ}\text{C}$  e  $0.28^{\circ}\text{C}$  in dieci anni.

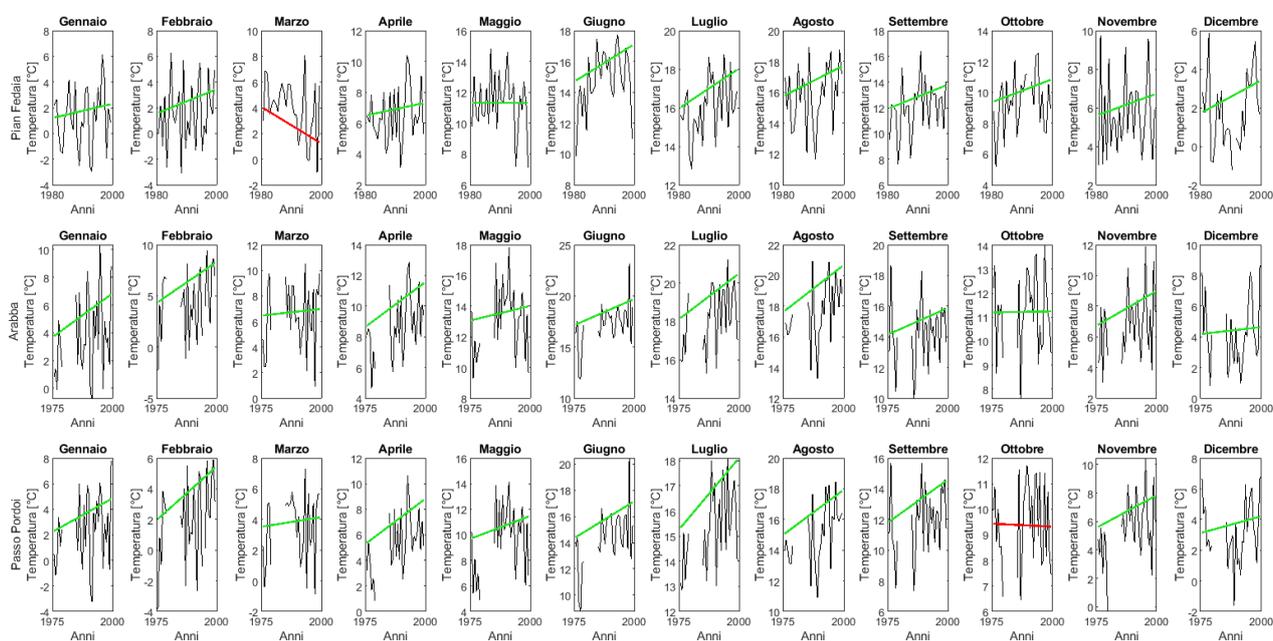
Mese	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	°C/giorno	-	°C/ 10 anni	°C	°C	°C	-
Gennaio	2.870E-04	0.3630	1.0475	-8.18	-5.22	-1.44	1.76
Febbraio	-9.627E-05	0.6494	-0.3514	-10.07	-5.74	-2.50	2.60
Marzo	-5.833E-05	0.6243	-0.2129	-5.29	-2.72	0.71	1.84
<b>Aprile</b>	<b>4.037E-04</b>	<b>0.0096</b>	<b>1.4734</b>	<b>-2.06</b>	<b>0.58</b>	<b>4.26</b>	<b>1.51</b>
Maggio	-7.714E-05	0.4841	-0.2816	2.17	4.77	6.82	1.40
Giugno	3.236E-05	0.9721	0.1181	7.37	9.09	12.59	1.26
Luglio	2.263E-04	0.1075	0.8262	8.12	10.87	13.93	1.34
Agosto	1.906E-04	0.2939	0.6955	6.69	10.74	13.98	1.76
Settembre	2.477E-04	0.2342	0.9041	3.59	6.90	9.79	1.70
Ottobre	1.402E-04	0.7264	0.5118	0.31	3.81	6.71	1.57
Novembre	2.582E-04	0.2342	0.9425	-2.88	-0.66	2.81	1.69
Dicembre	2.923E-04	0.4415	1.0669	-7.58	-3.94	2.13	2.53

***Tabella 20:** Quantificazione delle tendenze e relative variabili statistiche della temperatura media mensile per la stazione di Passo Pordoi (BL) , in grassetto i trend con significatività (p-value < 0.05)*

### 3.4.4 Trend temperatura massima confronto stazioni

Le tendenze per le temperature massime mensili messe a confronto con le tre stazioni, possiamo vedere che vi è una dominanza di trend positivi per il 94.44% dei mesi; ad eccezione del mese di marzo nella stazione situata a Pian Fedaia (BL) e per il mese di ottobre per la stazione situata a Passo Pordoi (BL), nei quali vediamo un trend negativo, che indica una diminuzione delle temperature massime in quel mese.

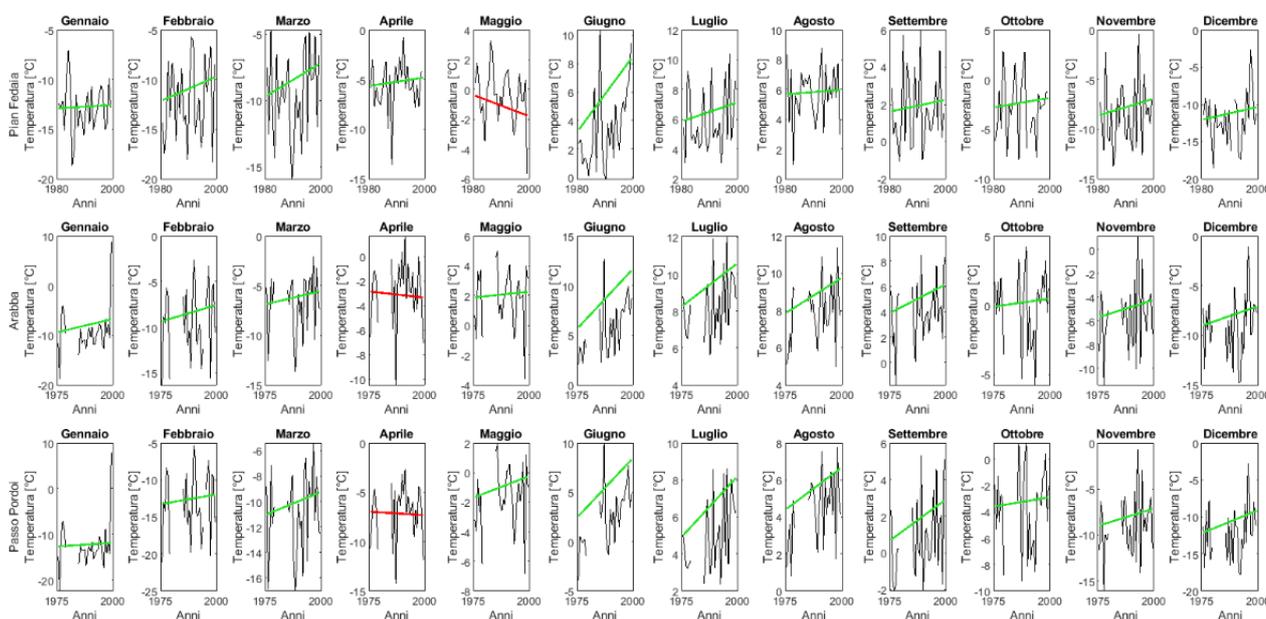
In particolare, possiamo vedere come la stazione di Arabba (BL) sia l'unica che presenta solo trend positivi per tutti i mesi, questo significa che assistiamo ad un aumento delle temperature massime (*Figura 33*).



**Figura 33:** Confronto del trend mensile temperatura massima per le stazioni considerate, il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

### 3.4.5 Trend temperatura minima confronto stazioni

Le temperature minime mensili messe a confronto per le tre stazioni in studio per il 91.66% dei mesi mostrano una tendenza in crescita, ovvero vi è un incremento delle temperature minime. Seppur questa tendenza sia dominante nelle varie stazioni vi sono comunque delle eccezioni, per la stazione situata a Pian Fedaia (BL) il mese di aprile segna un trend in negativo per il mese di maggio; la stazione di Arabba (BL) e la stazione di Passo Pordoi (BL) presentano un trend negativo entrambe per il mese di aprile, ciò sta a significare che in questi mesi dove il trend è in decrescita vi è una diminuzione delle temperature minime (*Figura 34*).



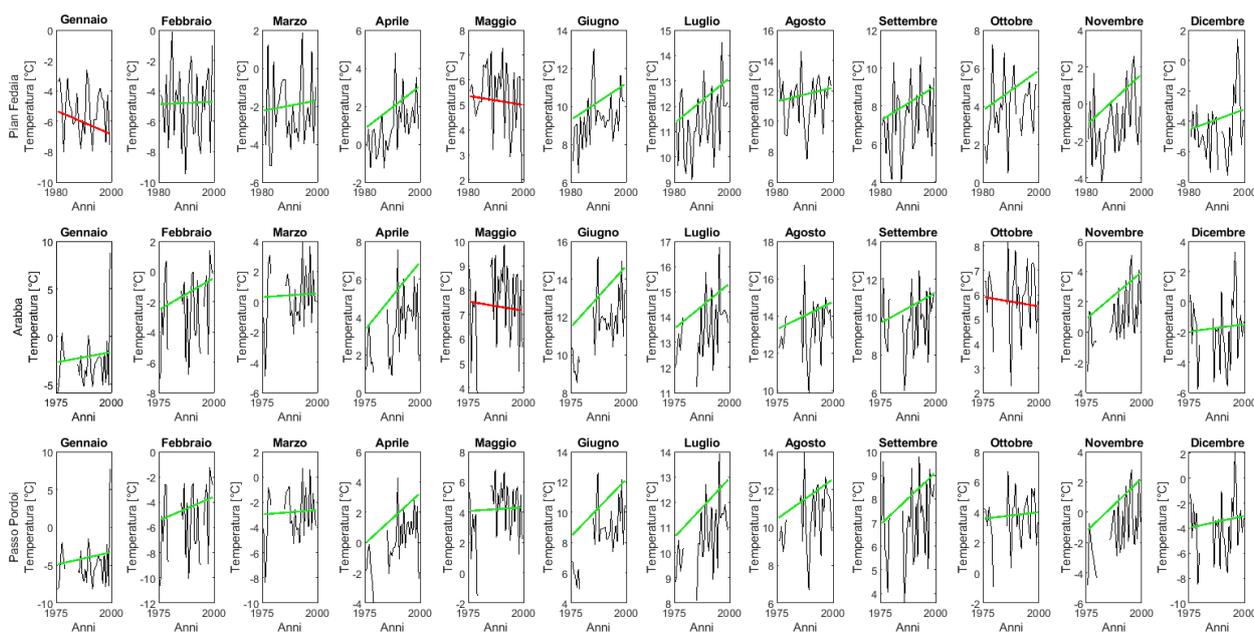
*Figura 34: Confronto del trend mensile temperatura minima per le stazioni considerate, il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente*

### 3.4.6 Trend temperatura media confronto stazioni

Le temperature medie mensili messe a confronto tra le tre stazioni utilizzate vedono una dominanza di trend positivi; infatti, l'88.88% dei mesi delle varie stazioni mostra un trend al rialzo, questo significa che per questi mesi vi è un aumento delle temperature medie.

Seppur per la maggior parte dei mesi vi sia una tendenza crescente bisogna comunque tener conto che per il restante 11.11% il trend è decrescente quindi assistiamo ad una diminuzione delle temperature medie; nella stazione di Pian Fedaia (BL) i mesi di gennaio e maggio segnano un trend negativo, mentre per la stazione di Arabba (BL) sono i mesi di maggio e ottobre ad avere un trend decrescente.

Inoltre, possiamo notare come la stazione situata a Passo Pordoi (BL) presenti un trend positivo per tutti i mesi, traducendosi in un aumento delle temperature medie per tutto il periodo dell'anno per gli anni presi in considerazione (*Figura 35*).



**Figura 35:** Confronto del trend mensile temperatura media per le stazioni considerate, il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

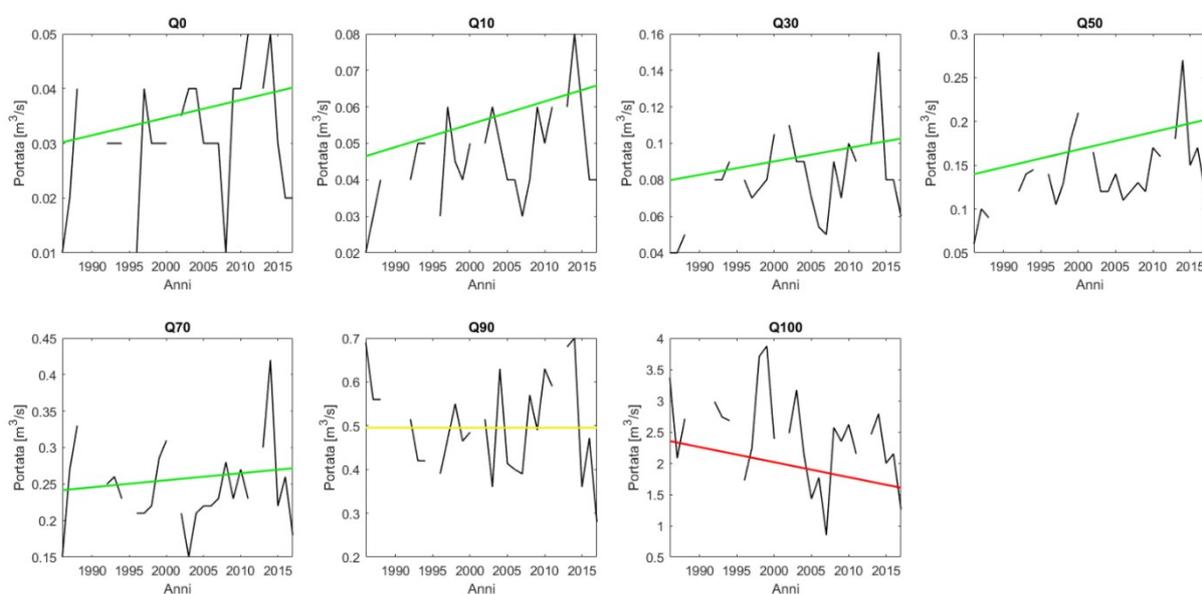
### 3.5 Trend portata

La portata integra l'influenza delle variabili atmosferiche su un bacino idrografico. Presumibilmente, se si osservassero cambiamenti consistenti nelle misurazioni puntuali delle precipitazioni e della temperatura, questi dovrebbero riflettersi in una certa misura anche sui deflussi. Allo stesso modo dei dati sulle precipitazioni e delle temperature, si è utilizzato lo stimatore della pendenza di Mann-Kendall e Sen è stato utilizzato per valutare le tendenze delle portate, analizzando i quantili di portata, i massimi annuali di portata e le medie annuali di portata.

In questa sezione vediamo i risultati che sono stati ottenuti dall'analisi dei quantili di portata per le due stazioni situate nei pressi del bacino.

I dati di flusso utilizzati in questa parte di studio erano registrazioni provenienti da due stazioni; La Vizza e Saviner, dalle quali avevamo a disposizione i seguenti anni dal 1985-2018 per La Vizza e 1992-2013 per Saviner.

Per la stazione situata a La Vizza, i risultati mostrano che le tendenze sono in aumento per quasi tutti i quantili di portata, ad eccezione del Q<sub>90</sub> e del Q<sub>100</sub>, dove rispettivamente assistiamo ad un trend nullo e ad un trend decrescente (Figura 36).



**Figura 36:** Quantili di portata e rispettivi trend per la stazione di La Vizza, il colore verde mostra un trend in crescita, il colore rosso mostra un trend decrescente mentre il colore giallo evidenzia l'assenza del trend

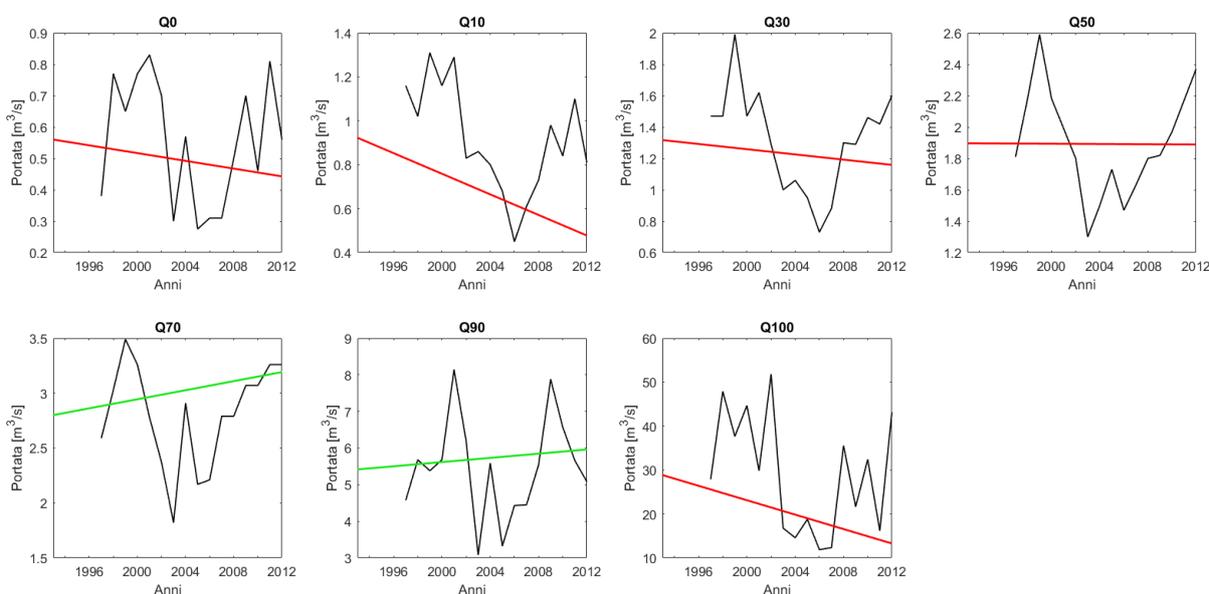
Come riportato di seguito (Tabella 21), abbiamo la quantificazione delle tendenze riportate in Figura 36.

Quello che vediamo è innanzitutto la significatività statistica della tendenza per i Q<sub>10</sub> e Q<sub>50</sub>, dove il trend è in crescita, ed assistiamo ad un aumento percentuale pari a 13.43% e 14.29% rispettivamente; al contrario per la portata massima (Q<sub>100</sub>) vediamo che, come detto in precedenza, nonostante non sia statisticamente significativo è l'unico quantile con trend negativo in decrescita con una decrescita percentuale pari al 10.22%.

Quantili	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Sen_10y_%	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	m <sup>3</sup> /s	-	(m <sup>3</sup> /s)/10 anni	%/10 anni	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	-
Q <sub>0</sub>	8.83158E-07	0.0988	0.0032	10.6792	0.01	0.030	0.05	0.011
<b>Q<sub>10</sub></b>	<b>1.71116E-06</b>	<b>0.0187</b>	<b>0.0062</b>	<b>13.4370</b>	<b>0.02</b>	<b>0.046</b>	<b>0.08</b>	<b>0.013</b>
Q <sub>30</sub>	2.01729E-06	0.0865	0.0074	9.2295	0.04	0.080	0.15	0.023
<b>Q<sub>50</sub></b>	<b>5.47645E-06</b>	<b>0.0055</b>	<b>0.0200</b>	<b>14.2968</b>	<b>0.06</b>	<b>0.140</b>	<b>0.27</b>	<b>0.041</b>
Q <sub>70</sub>	2.64947E-06	0.3897	0.0097	4.0016	0.15	0.242	0.42	0.057
Q <sub>90</sub>	0	0.9335	0.0000	0.0000	0.28	0.495	0.70	0.112
Q <sub>100</sub>	-6.59614E-05	0.1388	-0.2408	-10.2281	0.85	2.354	3.87	0.748

**Tabella 21:** Quantificazione dei trend e variabili statistiche per la stazione di La Vizza, in grassetto i trend con significatività ( $p\text{-value} < 0.05$ )

La stazione situata a Saviner, al contrario della precedente (La Vizza), mostra una dominanza di trend negativi pari al 71.42% dei quantili analizzati, il restante 14.28%, nel dettaglio Q<sub>70</sub> e il Q<sub>90</sub>, il trend è in crescita (Figura 37).



**Figura 37:** Quantili di portata e rispettivi trend per la stazione di Saviner, il colore verde mostra un trend in crescita mentre il colore rosso mostra un trend decrescente

Dalla tabella riportata di seguito (Tabella 22), abbiamo la quantificazione dei trend delle Figura 37, dove possiamo notare che nessun trend risulta statisticamente significativo; ciò

nonostante, possiamo vedere come sia Q<sub>100</sub> il quantile che subisce un maggior scostamento percentuale, avendo una riduzione delle portate pari al 28.41%, seguito da Q<sub>10</sub> con una riduzione del 25.39%. Al contrario è il Q<sub>70</sub> il quantile che subisce un maggior incremento percentuale, pari al 7.39%.

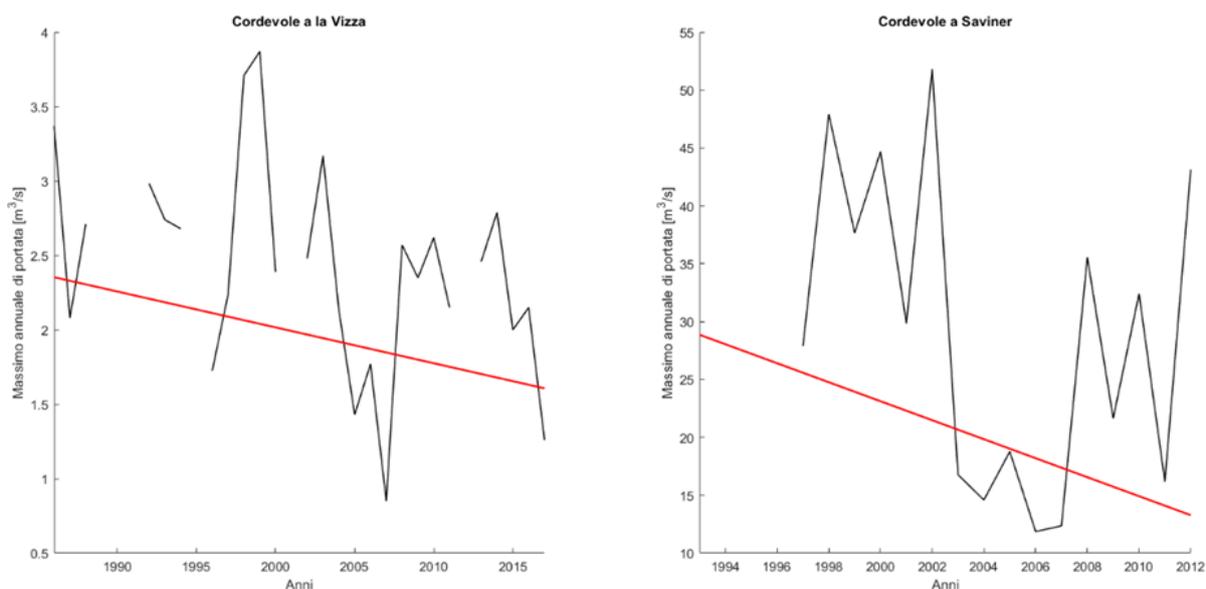
Quantili	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Sen_10y_%	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	m <sup>3</sup> /s	-	(m <sup>3</sup> /s)/10 anni	%/10 anni	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	-
Q <sub>0</sub>	-1.69E-05	0.6796	-0.0618	-11.0260	0.28	0.56	0.83	0.193
Q <sub>10</sub>	-6.42E-05	0.0579	-0.2344	-25.3961	0.45	0.92	1.31	0.240
Q <sub>30</sub>	-2.28E-05	0.3851	-0.0832	-6.3144	0.73	1.31	1.99	0.313
Q <sub>50</sub>	-1.05E-06	0.9671	-0.0038	-0.2027	1.3	1.89	2.59	0.334
Q <sub>70</sub>	5.65E-05	0.2465	0.2061	7.3615	1.82	2.80	3.49	0.451
Q <sub>90</sub>	7.85E-05	0.6801	0.2865	5.2896	3.08	5.41	8.14	1.338
Q <sub>100</sub>	-0.002247	0.3870	-8.1997	-28.4104	11.9	28.86	51.82	13.013

**Tabella 22:** Quantificazione dei trend e variabili statistiche per la stazione di Saviner

### 3.5.1 Trend portata massimi annuali e media annua

In questa sezione vediamo il confronto tra i massimi annuali di portata e tra la portata media annua delle due stazioni utilizzate, ovvero la stazione situata in località La Vizza e la stazione situata a Saviner.

Innanzitutto, quello che vediamo è un trend negativo, ovvero una diminuzione dei massimi annuali di portata per entrambe le stazioni (*Figura 38*).



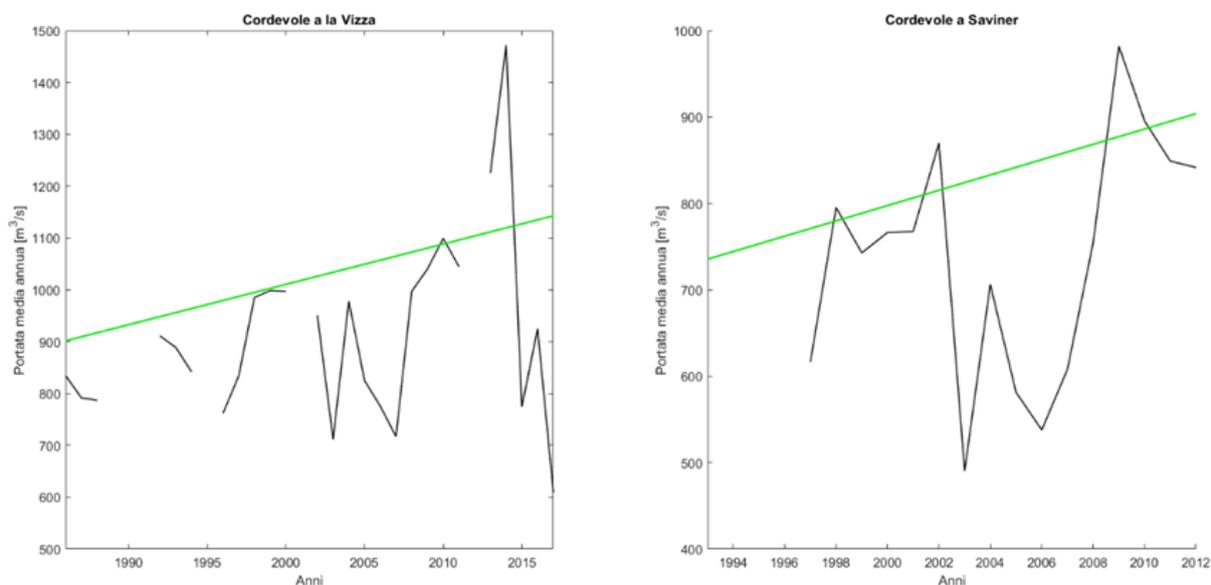
**Figura 38:** Massimi annuali di portata per le due sezioni di chiusura analizzate, il colore rosso mostra un trend decrescente

Dalla quantificazione dei trend riportati di seguito (*Tabella 23*), vediamo come innanzitutto nessuno dei trend è statisticamente significativo, ciò nonostante, possiamo comunque osservare come per la stazione posta in località La Vizza vi sia una diminuzione delle portate massime annuali pari al 10.22% in dieci anni, mentre risulta molto più elevato il calo per la stazione posta a Saviner, dove vi è una riduzione del 28.41% delle portate massime annuali in dieci anni.

Stazione	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Sen_10y_%	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	m <sup>3</sup> /s	-	(m <sup>3</sup> /s)/10 anni	%/10 anni	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	-
Cordevole a La Vizza	-6.5961e-05	0.1387	-0.2407	-10.2281	0.85	2.35	3.87	0.75
Cordevole a Saviner	-0.0022	0.3871	-8.1997	-28.4103	11.86	28.86	51.82	13.01

**Tabella 23:** Quantificazione dei trend e variabili statistiche delle portate massime annuali per le stazioni in analisi

Per quanto riguarda la portata media annua, vediamo come, al contrario della situazione precedente, vi sia un trend positivo per entrambe le stazioni, questo sta a significare che la portata media annua è in aumento (*Figura 39*).



**Figura 39:** Portata media annua per le due sezioni di chiusura analizzate, il colore verde mostra un trend in crescita

Dalla quantificazione dei trend (*Tabella 24*), vediamo come nessuna delle due stazioni risulti statisticamente significativa, ciò nonostante, possiamo vedere come la stazione di Saviner segna un incremento percentuale maggiore delle portate medie annue, pari al 12.04% mentre la stazione posta in località La Vizza segna un incremento dell'8.62%, pari a 77.74 m<sup>3</sup>/s.

Stazione	Sen_slope	p_value	Sen_10y	Sen_10y_%	Min	Media	Max	Deviazione standard
-	m <sup>3</sup> /s	-	(m <sup>3</sup> /s)/10 anni	%/10 anni	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	-
Cordevole a La Vizza	0.0213	0.0954	77.7478	8.6236	567.34	901.57	1471.90	187.63
Cordevole a Saviner	0.0243	0.2322	88.5938	12.0467	490.48	735.42	981.94	134.66

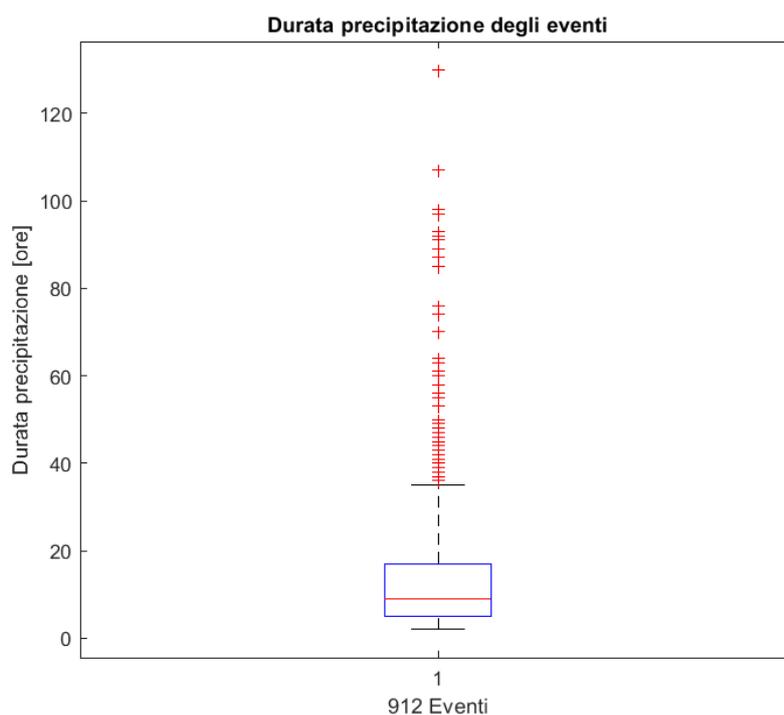
**Tabella 24:** Quantificazione dei trend e variabili statistiche delle portate medie annuali per le stazioni in analisi

### 3.6 Risultati caratteristiche eventi

In questa sezione andremo ad analizzare alcune caratteristiche degli eventi selezionati in precedenza, quali:

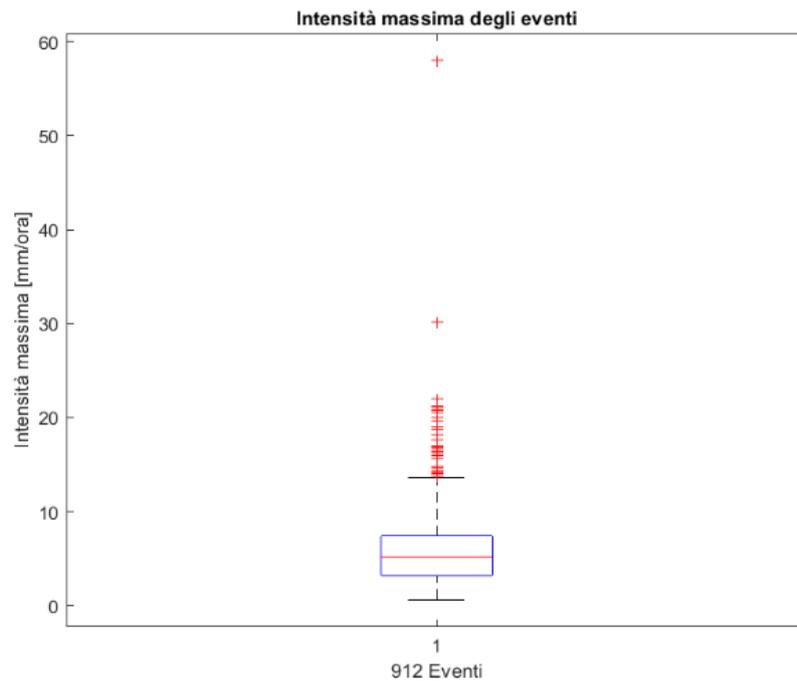
- Durata di precipitazione degli eventi [ore];
- Intensità massima di precipitazione degli eventi [mm/ora];
- Intensità media di precipitazione degli eventi [mm/ora];
- Precipitazione cumulata degli eventi [mm];
- Portata massima degli eventi [m<sup>3</sup>/s];
- Volume di deflusso [m<sup>3</sup>] e [mm];
- Coefficiente di deflusso [-];
- Rapporto portata al picco/volume di deflusso [(m<sup>3</sup>/s)/m<sup>3</sup>].

Come possiamo vedere dalla figura riportata di seguito (*Figura 40*), che non è altro che la rappresentazione grafica (box plot) della durata di precipitazione degli eventi selezionati, questa caratteristica non mostra grandi differenze. Infatti, il box plot della durata di precipitazione presenta un range interquartile abbastanza stretto. Ciò nonostante, bisogna tener conto dell'elevata presenza di outliers al di sopra del baffo superiore, questo sta ad indicare che vi sono valori estremi, ovvero eventi in cui la durata di precipitazione è decisamente superiore alla norma.



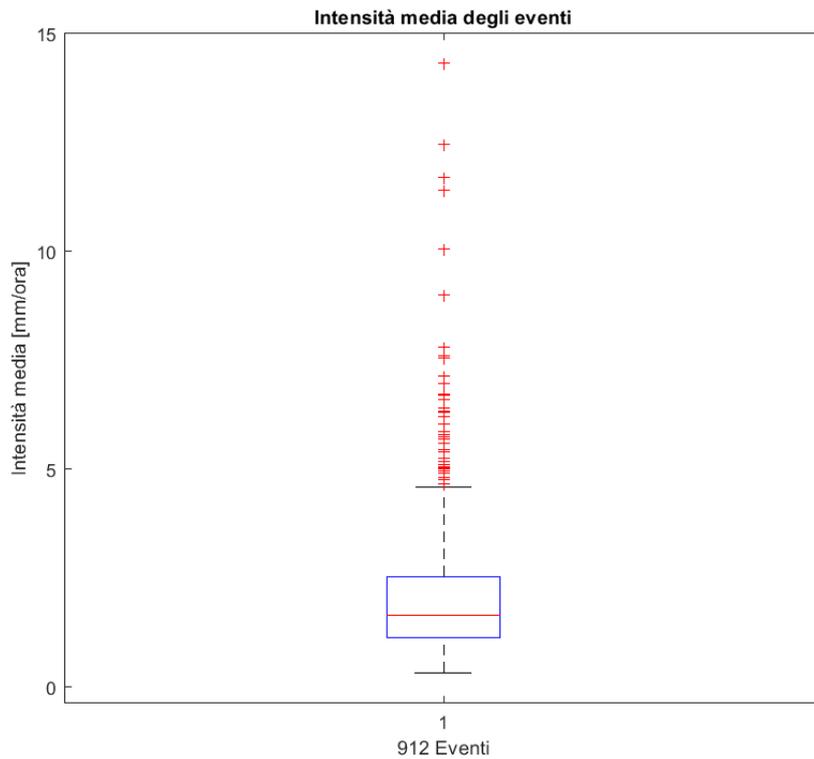
*Figura 40: Box plot durata di precipitazione degli eventi selezionati*

Dalla *Figura 41* possiamo vedere le caratteristiche di intensità massima di precipitazione degli eventi, ed anche qui vediamo che il range interquartile è abbastanza stretto, tuttavia vediamo che c'è un'abbondante quantità di outliers che indicano dei valori estremi, in quanto sono situati al disopra del baffo superiore; di conseguenza abbiamo un elevato numero di eventi che presenta intensità massime di precipitazione al di sopra della norma, possiamo comunque notare che questi outliers, per la maggior parte, sono contenuti in un range che va da 15 mm/ora a 25 mm/ora; lasciando solo due outliers al di sopra dei 25 mm/ora.



*Figura 41: Box plot intensità massima di precipitazione degli eventi selezionati*

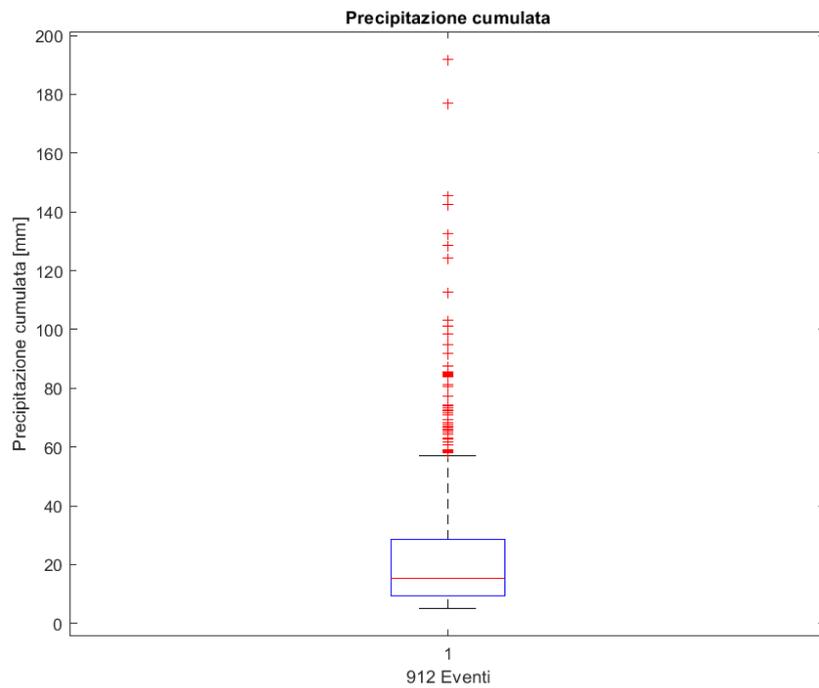
Come possiamo vedere dalla figura riportata di seguito (*Figura 42*), vediamo l'intensità media di precipitazione degli eventi; e anche qui come per l'intensità massima di precipitazione, vediamo che il range interquartile è abbastanza stretto; la differenza principale che vediamo sull'intensità media rispetto all'intensità massima è la distribuzione degli outliers, dove nel caso dell'intensità media li vediamo distribuiti in modo più "uniforme" lungo la verticale, quindi abbiamo eventi estremi che non sono raggruppati in un range.



**Figura 42:** Box plot intensità media di precipitazione degli eventi selezionati

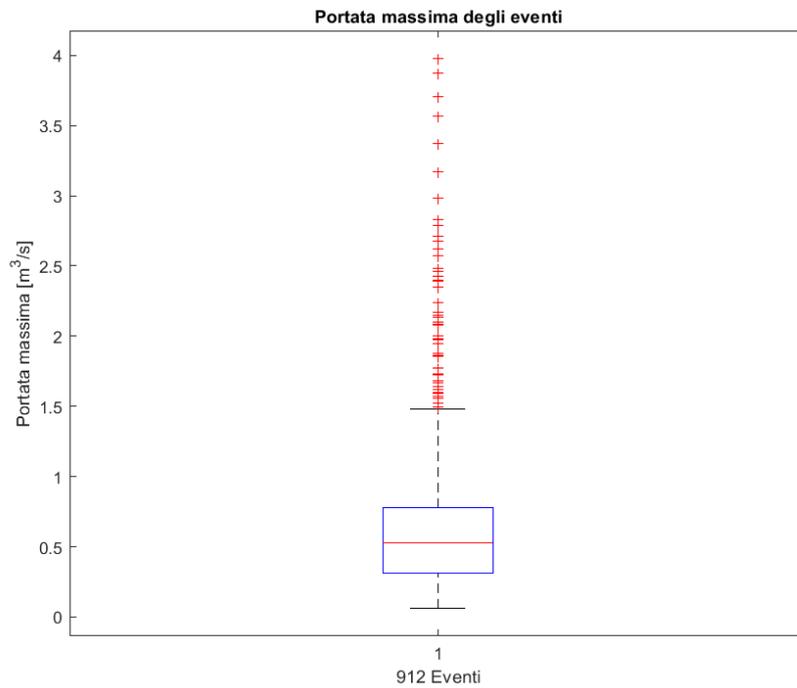
Come vediamo dalla *Figura 43*, che riporta il box plot della precipitazione cumulata degli eventi selezionati, vediamo come anche qui il range interquartile è abbastanza stretto.

Ciò nonostante, anche qui come nei casi precedenti, abbiamo un elevato numero di outliers, che indicano dei valori estremi perché sono situati al di sopra del baffo superiore, e possiamo vedere, dall'intensità degli outliers che per la maggior parte, gli eventi estremi sono concentrati in un range tra i 60 mm e i 110 mm.



**Figura 43:** Box plot precipitazione cumulata degli eventi selezionati

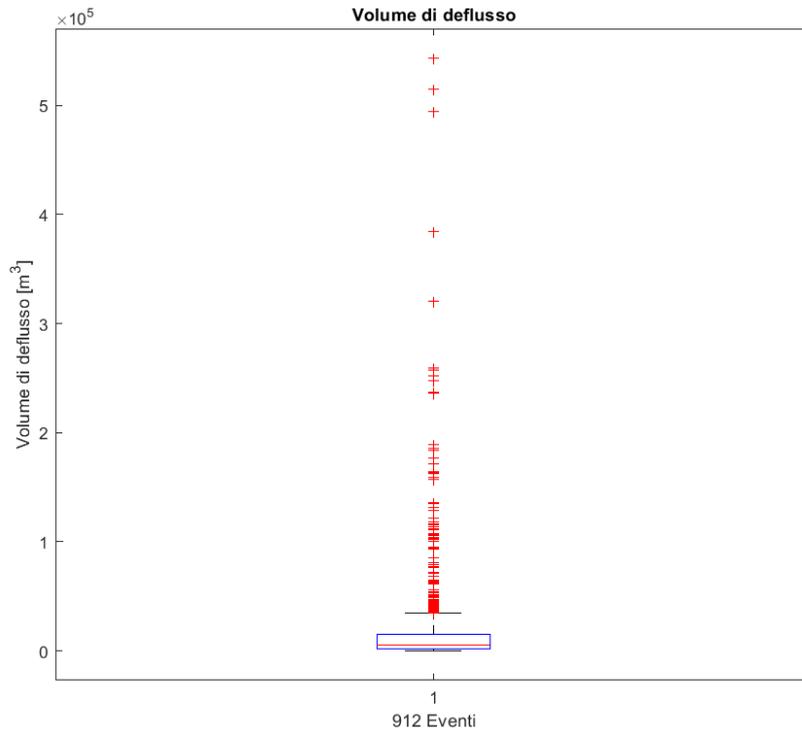
Dalla figura riportata di seguito (*Figura 44*), vediamo la portata massima degli eventi riportata in un box plot. In particolare, vediamo che il range interquartile è abbastanza stretto. Anche in questo caso abbiamo la presenza di outliers al di sopra del baffo superiore, questo sta a significare che sono tutti eventi che hanno un valore estremo, o comunque fuori dalla norma, di portata massima, in particolare vediamo che tra questi valori estremi la maggior parte sono racchiusi in un range che va da 1.75 m<sup>3</sup>/s a 3 m<sup>3</sup>/s circa.



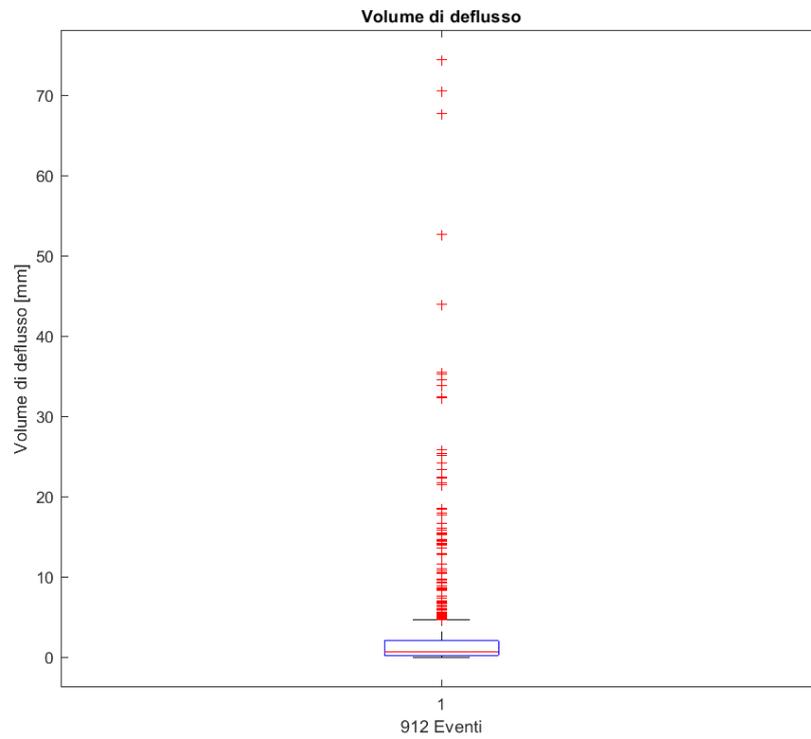
**Figura 44:** Box plot portata massima degli eventi selezionati

Per quanto riguarda l'andamento del volume di deflusso, riportato in  $\text{m}^3$  in *Figura 45* e in mm in *Figura 46*, vediamo che per entrambi abbiamo un range interquartile molto stretto.

Inoltre, possiamo vedere, anche qui, una grande abbondanza di outliers al di sopra del baffo superiore, possiamo notare che nella maggior parte sono raggruppati in tre gruppi quello più numeroso che va dai  $0.5 \text{ m}^3$  e agli  $1.5 \text{ m}^3$  circa, seguito da  $1.7 \text{ m}^3$  fino ai  $2 \text{ m}^3$  ed infine dai  $2.2 \text{ m}^3$  ai  $2.6 \text{ m}^3$ . Tutti questo sono eventi estremi, o al di fuori della norma.

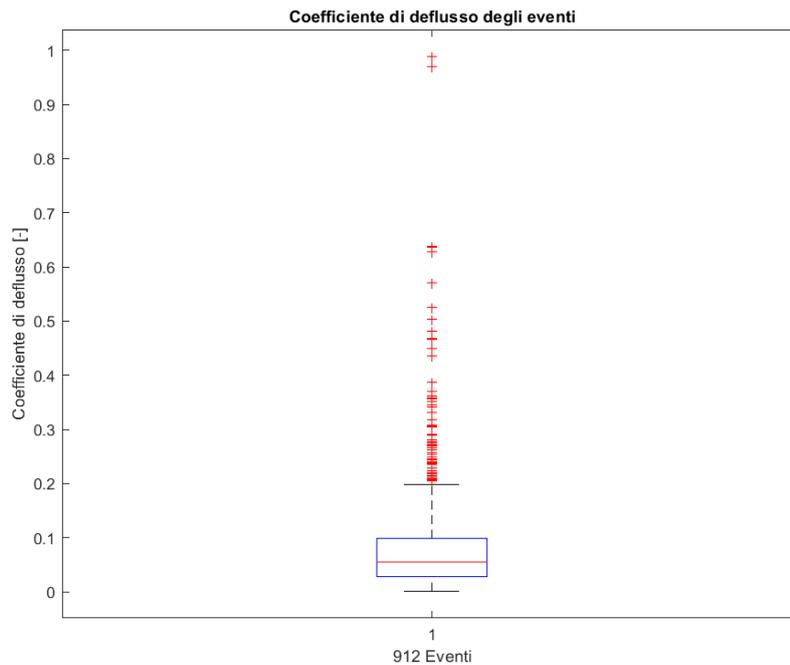


**Figura 45:** Box plot volume di deflusso [ $m^3$ ] degli eventi selezionati



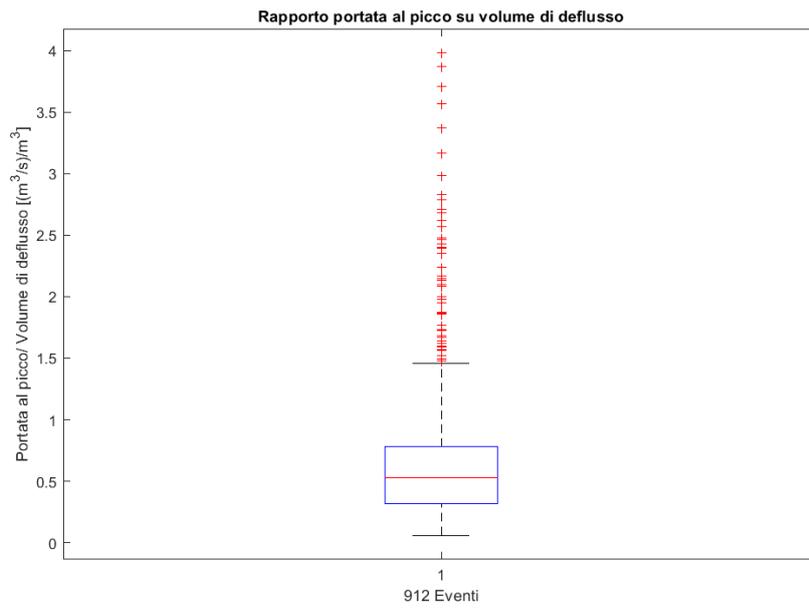
**Figura 46:** Box plot volume di deflusso [mm] degli eventi selezionati

Dalla figura riportata di seguito (*Figura 47*), che riporta i valori di coefficiente di deflusso degli eventi selezionati, possiamo osservare un range interquartile abbastanza stretto; ciò nonostante abbiamo un'elevata presenza di outliers al di sopra del baffo superiore, questo significa che si sono registrati dei valori anomali del coefficiente di deflusso, in particolare vediamo che il maggior numero è racchiuso in un range di 0.2 e 0.65, con due eventi che sono di molto al di sopra di questo range, infatti entrambi presentano valori superiori a 0.9.



**Figura 47:** Box plot coefficiente di deflusso degli eventi selezionati

Per quanto riguarda il rapporto tra la portata al picco e il volume di deflusso (*Figura 48*), vediamo come qui abbiamo un range interquartile più ampio rispetto alle caratteristiche precedentemente analizzate. Anche in questo caso come nei precedenti vediamo che vi è un'elevata quantità di outliers al di sopra del baffo superiore, questo significa che abbiamo molti valori al di fuori della norma, in particolare al di sopra del baffo superiore vediamo che è concentrata una maggior quantità di outliers.



**Figura 48:** Box plot rapporto portata al picco/ volume di deflusso degli eventi selezionati

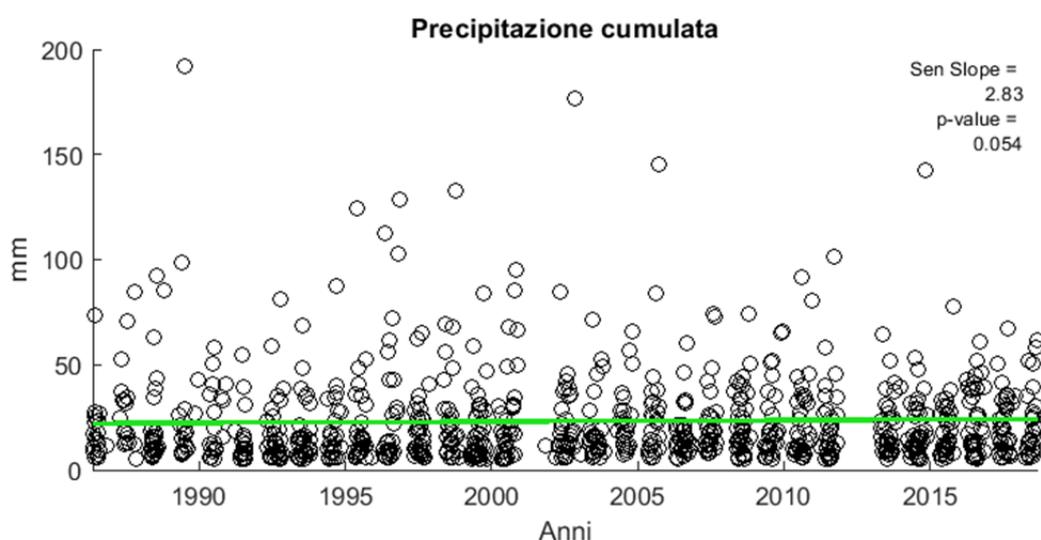
### 3.6.1 Trend degli eventi

In questa sezione si riportano i risultati ottenuti dall'analisi statistica di quattro caratteristiche degli eventi selezionati con le rispettive tendenze, ovvero:

- Precipitazione cumulata [mm];
- Intensità media di precipitazione [mm/ora];
- Portata al picco [m<sup>3</sup>];
- Coefficiente di deflusso [-].

Per quest'analisi delle tendenze sono sempre stati utilizzati i due metodi non parametrici, ovvero il Mann – Kendall e lo stimatore di pendenza di Sen già descritti nel *Capitolo 2*.

Come prima caratteristica analizziamo la precipitazione cumulata che rappresenta la quantità di pioggia caduta in un determinato intervallo di tempo (*Figura 49*). Quello che possiamo notare è che innanzitutto il trend è positivo, ovvero vi è un aumento della precipitazione cumulata negli anni, ma non è statisticamente significativo, seppur il suo valore si avvicina molto alla soglia di significatività  $< 0.05$ ;, inoltre vediamo che la maggior parte degli eventi è raggruppata nella parte inferiore del grafico, quindi con precipitazioni cumulate che vanno da sopra i 5 mm (valore minimo utilizzato per la selezione degli eventi), ai 50 mm circa; vediamo comunque degli eventi in cui vi sono stati valori superiori ai 150 mm.



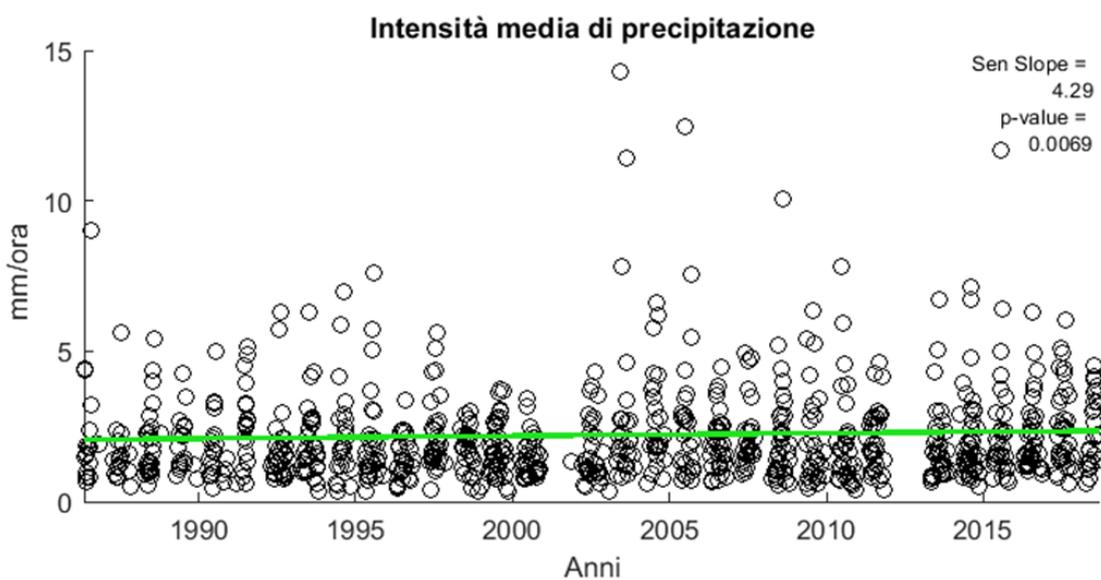
**Figura 49:** Trend della precipitazione cumulata per gli eventi selezionati, sen slope in mm/anno

Successivamente è stata analizzata l'intensità media di precipitazione degli eventi (*Figura 50*). L'intensità media di precipitazione è un parametro che viene utilizzato per caratterizzare le

proprietà pluviometriche di un anno, e rappresenta la quantità di pioggia che in media cade in un giorno piovoso.

Quello che osserviamo è che la maggior parte degli eventi presentano un'intensità media di precipitazione inferiore ai 5 mm/ora, anche se sono presenti delle eccezioni in cui gli eventi hanno raggiunto delle intensità medie di precipitazione superiori ai 10 mm/ora.

Dal punto di vista della tendenza, vediamo che il trend è positivo ed è anche statisticamente significativo. Questo sta a significare che nel corso degli anni l'intensità media delle precipitazioni sta aumentando.

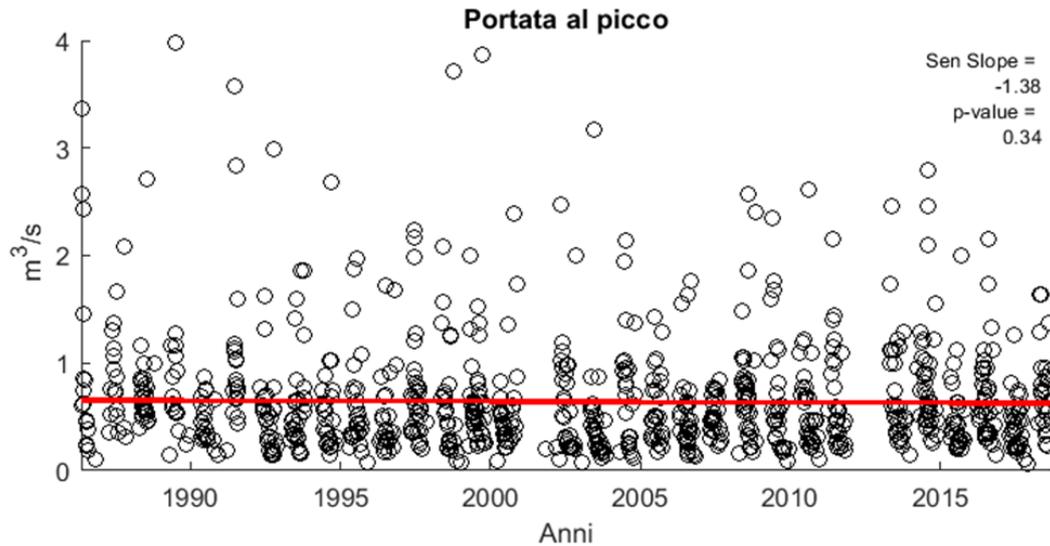


*Figura 50: Trend dell'intensità media di precipitazione per gli eventi selezionati, sen slope in [mm/ora]/anno*

In seguito, è stata analizzata la portata al picco (Figura 51), ovvero il valore massimo di portata raggiunto in un evento di piena.

Quello che possiamo vedere è che la maggior parte degli eventi è al di sotto dei 2 m<sup>3</sup>/s, ciò nonostante, abbiamo eventi con portate al picco superiori ai 3 m<sup>3</sup>/s.

Dal punto di vista dell'analisi del trend vediamo che il parametro della Sen Slope è negativo, questo sta a significare la tendenza in decrescita, ovvero vi è un calo delle portate al picco negli anni; ma dal punto di vista statistico questo non è un trend significativo.

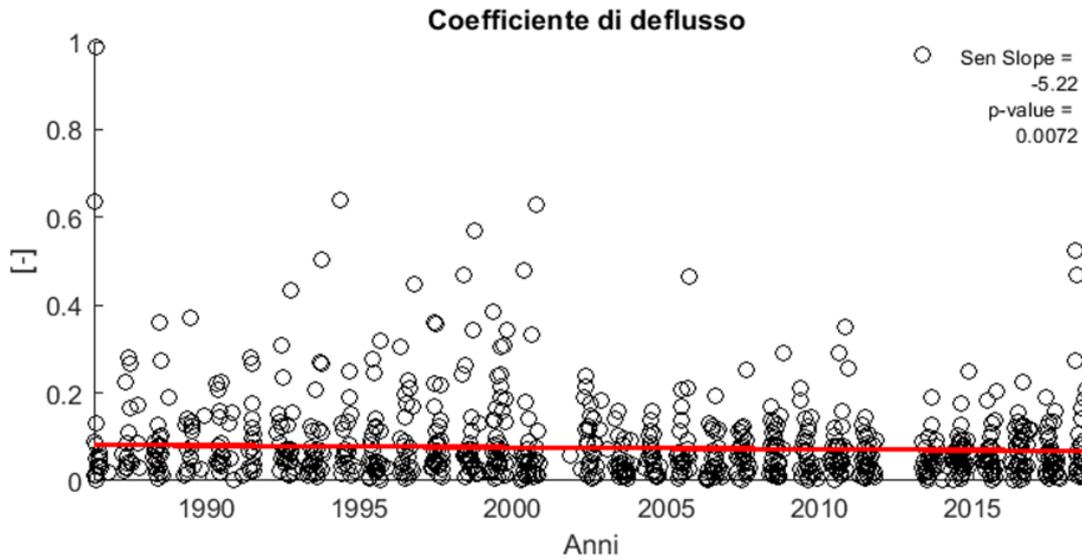


**Figura 51:** Trend della portata al picco per gli eventi selezionati, sen slope in [m<sup>3</sup>/s]/anno

L'ultimo parametro analizzato è il coefficiente di deflusso (*Figura 52*); ovvero il rapporto fra il volume di deflusso, cioè il volume d'acqua defluito alla sezione di chiusura del bacino, e afflusso, ovvero il volume di precipitazione caduta sul bacino.

L'analisi del coefficiente di deflusso risulta particolarmente importante in quanto fornisce informazioni sulla risposta del bacino. Quello che vediamo dalla figura 51 è che la maggior parte degli eventi presenta coefficienti di deflusso inferiori a 0.4; ciò nonostante abbiamo valori anche pari ad 1, questo sottolinea la grande variabilità della risposta idrologica nell'area di studio.

Dal punto di vista statistico osserviamo una pendenza dello stimatore della Sen Slope risulta negativo, ovvero assistiamo ad una diminuzione del coefficiente di deflusso, inoltre risulta essere un parametro statisticamente significativo.

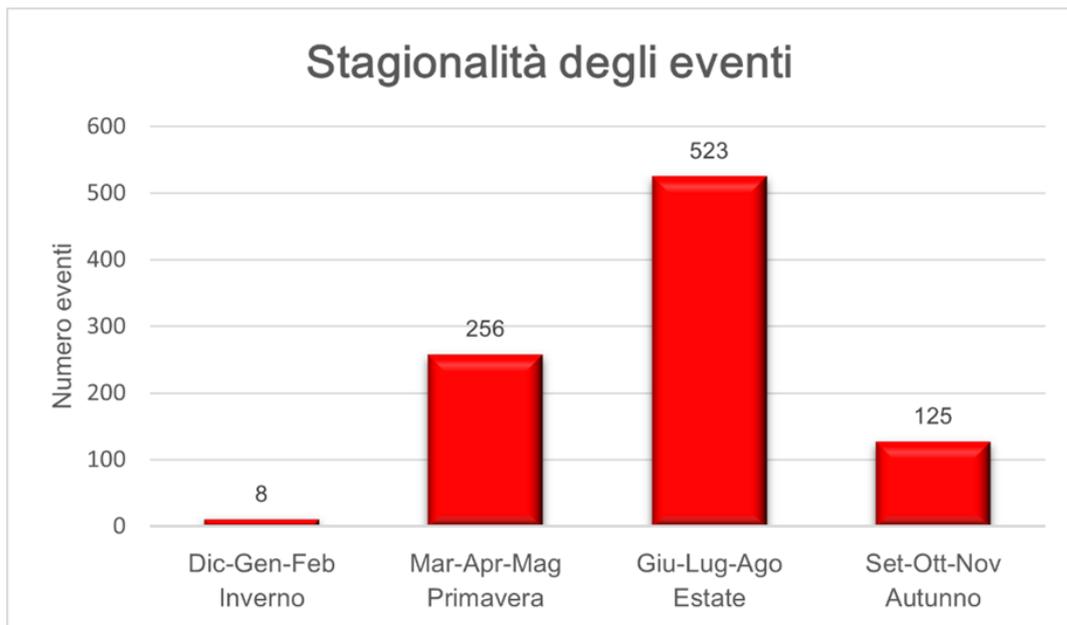


*Figura 52: Trend del coefficiente di deflusso per gli eventi selezionati*

Infine, è stata valutata la stagionalità degli eventi selezionati, ovvero sono stati suddivisi in base alla stagione in cui sono avvenuti.

Dalla figura riportata di seguito (*Figura 53*) possiamo notare come siano i mesi estivi, ovvero giugno, luglio e agosto ad avere il maggior numero di eventi, probabilmente questo è dovuto dai frequenti temporali estivi.

Al contrario sono i mesi invernali a registrare il minor numero di eventi. Questo potrebbe essere causato dalle nevicate che non contribuiscono in maniera immediata sulla formazione dei deflussi, a causa delle basse temperature che in media sono sotto lo zero e di conseguenza non portano allo scioglimento del manto nevoso; nei mesi primaverili, dove vi è un aumento delle temperature, abbiamo un incremento della numerosità degli eventi, dove vi è anche l'influenza dei fenomeni di ablazione. Infine, del periodo autunnale vediamo ancora una diminuzione degli eventi, probabilmente dovuta al fatto che da settembre in quota si iniziano ad avere le prime nevicate, che col passare dei mesi e il conseguente abbassamento delle temperature si riduce la formazione di deflusso dovuta allo scioglimento della neve.



**Figura 53:** *Istogramma stagionalità degli eventi selezionati*

# Capitolo 4

In questo capitolo verranno discussi i risultati esposti in precedenza.

## Discussione dei risultati

Precedenti studi sull'argomento evidenziano tendenze positive per la temperatura (Gocic et al., 2013, Ceppi et al., 2012, Karaburnu et al., 2011), infatti sono state rilevate forti tendenze al riscaldamento con aumenti della temperatura di circa 2,2 °C (Banda et al., 2021). Inoltre, è stato scoperto che le temperature hanno un'influenza sostanziale su un grand numero di variabili idrometeorologiche, come le precipitazioni e i deflussi (Hu et al., 2012). Si sono osservate tendenze positive per le precipitazioni (Tao et al., 2011, Hussein et al., 2012), per esempio, Min et al. (2011) hanno scoperto che il 65% delle aree del globo coperte da dati mostravano tendenze in aumento per le precipitazioni massime annuali, Lehmann et al. (2015) hanno anche riscontrato un aumento su larga scala delle precipitazioni estreme, con il 12% in più di eventi piovosi da record nel periodo 1981-2010, ma nonostante l'aumento dei fenomeni estremi non si assiste ad un conseguente aumento delle portate, come invece ci si aspetterebbe (Madsen et al., 2014); successivamente è stata scoperta l'influenza di molte variabili sulla genesi dei deflussi con conseguente risposta delle portate. In particolare, rispetto alle variabili atmosferiche quali temperatura, pressione e precipitazioni, le misurazioni dei deflussi sono più suscettibili alle influenze antropiche locali (Do et al., 2017), è stato riscontrato come i cambiamenti di umidità del suolo, la topografia, come la lunghezza dei percorsi dei flussi lungo i pendii (Asano et al. 2018) e l'uso del suolo siano fattori che esercitano un forte controllo sulla formazione dei deflussi (Penna et al., 2011, Norbiato et al. 2008). È stato osservato che piccole tempeste in condizioni di siccità hanno prodotto basse quantità di deflussi. Al contrario, per gli eventi piovosi in condizioni umide, sono stati osservati valori di deflusso delle tempeste più elevati e i pendii delle colline devono aver contribuito al deflusso dei corsi d'acqua (Penna et al., 2011).

### *Precipitazioni:*

I risultati ottenuti dall'analisi delle precipitazioni a scala annuale hanno mostrato una dominanza di tendenza positiva per sei stazioni sulle sette totali, avendo appunto un'unica eccezione in cui un'unica stazione presenta un trend negativo, ciò nonostante, nessuna delle stazioni mostrava un trend statisticamente significativo.

Le tendenze delle precipitazioni mensili per le sette stazioni analizzate evidenziano una dominanza di trend positivi che però solo per la stazione di Arabba (BL) sono statisticamente significativi, nello specifico per i mesi di marzo, maggio e agosto.

Al contrario in tutte le stazioni i mesi di aprile e ottobre, e per la maggior parte delle stazioni anche il mese di settembre, hanno mostrato tendenze negative seppur non statisticamente significative.

Inoltre, una tendenza all'aumento delle precipitazioni invernali sembra indicare un possibile cambiamento negli attuali patterns di precipitazioni nell'area, poiché l'aumento è stato molto più elevato rispetto alla stagione estiva che tradizionalmente presenta il picco delle precipitazioni, infatti i mesi di dicembre, gennaio e febbraio registrano un trend positivo in tutte le stazioni, in particolare dicembre è il mese che presenta il maggior incremento percentuale, arrivando anche ad un picco del 61.31% di precipitazioni in più, non essendo comunque statisticamente significativo.

#### ***Temperature:***

In questo studio, l'analisi delle tendenze delle temperature per rilevare potenziali cambiamenti climatici si è concentrata su tre stazioni poiché questi siti dispongono di dati a lungo termine sufficienti per rilevare potenziali tendenze dovute ai cambiamenti climatici; i risultati che abbiamo ottenuto a scala annuale mostrano per tutte le stazioni un trend positivo, quindi vediamo un aumento delle temperature, inoltre i risultati sono statisticamente significativi per tutte le stazioni.

Per le serie temporali mensili delle temperature massime, le tendenze al ribasso statisticamente significative sono state osservate in marzo in tutte e tre le stazioni.

Nel frattempo, nella stazione di Passo Pordoi (BL) e nella stazione di Pian Fedaia (BL), rispettivamente a dicembre e a giugno è stata osservata una tendenza al rialzo statisticamente significativa. Negli altri mesi non sono stati riscontrati tendenze statisticamente significative.

Al contrario, le temperature minime mensili hanno mostrato una combinazione di tendenze al ribasso in particolare nei mesi primaverili e autunnali, ma nessuna è risultata statisticamente significativa. Negli altri mesi non sono stati riscontrati trend statisticamente significativi, nonostante mostrino tendenze al rialzo.

Per quanto riguarda le temperature medie mensili, le tendenze positive e quindi in aumento statisticamente significative sono state osservate nel mese di aprile per tutte e tre le stazioni, mentre nelle stazioni di Pian Fedaia (BL) e Arabba (BL) anche i mesi di novembre e luglio, rispettivamente, sono risultati statisticamente significativi con un trend crescente. Nel frattempo, anche la maggior parte degli altri mesi mostrava tendenze al rialzo ma non statisticamente significative.

I risultati ottenuti mostrano un aumento generale delle temperature in particolare nei mesi primaverili e autunnali, il che risulta importante per la comprensione e l'interpretazione delle variazioni climatiche. Dai risultati ottenuti dall'analisi delle temperature possiamo stabilire che è probabile che a causa di questo aumento la probabilità degli eventi di siccità si intensifichino man mano che le temperature aumentano; quindi, risulta necessario continuare con il monitoraggio delle temperature per la previsione e pianificazione di eventi climatici estremi come la siccità.

#### ***Portate:***

L'analisi delle portate integra l'influenza delle variabili atmosferiche su un bacino idrografico. Presumibilmente, se si osservassero cambiamenti consistenti nelle misurazioni delle precipitazioni e della temperatura dell'aria, questi dovrebbero riflettersi in una certa misura anche nel deflusso dei corsi d'acqua.

L'analisi dei quantili di portata mostra, per la sezione di chiusura di La Vizza una dominanza di trend positivi per cinque quantili sui sette analizzati, dove due di questi presentano una significatività statistica ovvero  $Q_{10}$  e  $Q_{50}$ , dove il trend è in crescita, ed assistiamo ad un aumento percentuale pari a 13.43% e 14.29%. Al contrario la sezione di chiusura posta a Saviner presenta cinque quantili su sette con tendenza negativa ma nessuno di loro con una significatività statistica. Successivamente si sono analizzate le portate massime annuali che mostrano per entrambi le sezioni di chiusura tendenze negative, ma non statisticamente significativi. Al contrario invece le portate medie annue mostrano un trend in aumento, ma come per i massimi di portata, non risultano statisticamente significativi.

I risultati ottenuti evidenziano che ci troviamo di fronte a condizioni in cui le portate medie aumentano, probabilmente questo fenomeno è dovuto al fatto che con l'aumento delle temperature nei mesi invernali i deflussi aumentano in quanto i fenomeni di ablazione si intensificano.

Le analisi dei quantili di portata e delle precipitazioni non hanno rivelato alcuna chiara connessione con le tendenze osservate nel deflusso; questo è probabilmente dovuto alla grande variabilità spaziale delle precipitazioni, all'inadeguata rappresentatività delle misurazioni puntuali e alla natura intrinsecamente non lineare della trasformazione delle precipitazioni in deflussi. Infatti, molti studi hanno confermato che la topografia del pendio e la litologia della zona sono una parte fondamentale per lo studio dei deflussi e dei tempi di risposta della falda, i quali dipendevano principalmente dalla profondità del suolo e dalla posizione topografica.

I risultati ottenuti mostrano che le tendenze delle precipitazioni e delle portate non sono strettamente correlate e che i cambiamenti nelle precipitazioni invernali e primaverili misurate dalle stazioni pluviometriche possono spiegare solo in parte le tendenze osservate nelle portate.

La temperatura dell'aria svolge un ruolo chiave nel ciclo dell'acqua, a causa degli impatti che ha sul verificarsi di nevicate e scioglimento della neve.

I risultati suggeriscono che in generale potrebbero essere cadute più precipitazioni sotto forma di pioggia nelle stagioni invernali e primaverili, il che, insieme al maggiore scioglimento della neve dovuto alle temperature più elevate in primavera, può spiegare gli aumenti osservati nel deflusso dei corsi d'acqua per i quantili più piccoli.

#### ***Trend degli eventi:***

Per quanto riguarda le quattro caratteristiche analizzate dei 912 eventi selezionati per un periodo che va dal 1985 al 2018, osserviamo che la precipitazione cumulata segna un trend positivo ma non statisticamente significativo, ciò nonostante, il suo andamento è in linea con l'analisi delle precipitazioni condotte sulle sette stazioni adiacenti al bacino.

Anche l'intensità media di precipitazione mostra un trend in crescita, inoltre è anche statisticamente significativo, questo significa che vi è un aumento dell'intensità media di precipitazione degli eventi; questo andamento è stato riscontrato in altri studi a scala nazionale come quello svolto da Brunetti et al., 2001, dove afferma che nel Nord Italia l'aumento dell'intensità di precipitazione è dovuto principalmente ad un forte aumento degli eventi più pesanti iniziato a partire dagli anni '70, così come quello negativo degli eventi più leggeri.

Al contrario, come è stato visto dalle analisi precedenti la portata al picco mostra una tendenza negativa non statisticamente significativa. I risultati ottenuti mostrano anche in

questo caso che ad un aumento delle precipitazioni e dell'intensità media non vi è una correlazione con le portate, in particolare con i massimi di portata.

Infine, è stato analizzato il coefficiente di deflusso che mostra una tendenza in decrescita e statisticamente significativa.

Questi risultati rafforzano l'apparente dicotomia osservata nella maggior parte del mondo dove all'aumento delle precipitazioni ha coinciso con un mancato aumento delle inondazioni. Penna et al. (2011) hanno evidenziato l'importanza di considerare i cambiamenti nell'umidità antecedente del suolo per spiegare questa apparente disconnessione, il loro lavoro ha evidenziato come l'umidità del suolo esercita un forte controllo sul deflusso, mostrando come piccoli eventi in condizioni di siccità producevano basse quantità di deflussi, al contrario eventi piovosi in condizioni umide producevano valori di deflusso più elevati.



## Conclusioni

Questo elaborato ha analizzato le tendenze della portata del corso d'acqua, delle precipitazioni e della temperatura massima, media e minima per l'alto bacino del Cordevole con sezione di chiusura a La Vizza. Inoltre, sono stati selezionati 912 eventi di deflusso di cui sono state analizzate le seguenti caratteristiche:

- Durata di precipitazione degli eventi [ore];
- Intensità massima di precipitazione degli eventi [mm/ora];
- Intensità media di precipitazione degli eventi [mm/ora];
- Precipitazione cumulata degli eventi [mm];
- Portata massima degli eventi [ $m^3/s$ ];
- Volume di deflusso [ $m^3$ ] e [mm];
- Coefficiente di deflusso [-];
- Rapporto portata al picco/volume di deflusso [ $(m^3/s)/m^3$ ].

Infine, si sono analizzate le tendenze per quattro delle caratteristiche precedenti, ovvero:

- Precipitazione cumulata degli eventi [mm];
- Intensità media di precipitazione degli eventi [mm/ora];
- Portata al picco degli eventi [ $m^3$ ];
- Coefficiente di deflusso degli eventi [-].

La presenza e l'entità delle tendenze nel tempo sono state determinate rispettivamente utilizzando il test non parametrico di Mann-Kendall e lo stimatore della pendenza di Sen.

Dall'analisi delle tendenze, ad un livello di significatività del 5%, le precipitazioni hanno mostrato trend in aumento e in diminuzione su base annua non significativi in tutte le stazioni. I risultati a scala mensile rivelano anche che le tendenze decrescenti erano dominanti nella stagione autunnale, mentre la stagione invernale era dominata da tendenze positive.

I dati sulla temperatura a scala annuale hanno mostrato tendenze positive per tutte le stazioni oltretutto sono risultate anche statisticamente significative, con un aumento medio della temperatura di  $0.50^\circ C$  in dieci anni. Mentre per quanto riguarda le temperature massime, in tutte le stazioni è stato osservato una tendenza al ribasso statisticamente significativo nel mese di marzo, al contrario la stazione di Passo Pordoi (BL) ha evidenziato un trend al rialzo

statisticamente significativo nel mese di dicembre, mentre la stazione di Passo Pordoi (BL) evidenzia un trend positivo statisticamente significativo nel mese di giugno.

Al contrario le temperature minime mensili non hanno mostrato trend statisticamente significativi, ciò nonostante, i trend negativi erano presenti nei mesi primaverili e autunnali.

Per quanto riguarda le temperature medie mensili hanno mostrato una dominanza di tendenze al rialzo, in particolare sono risultati statisticamente significativi per tutte le stazioni nel mese di aprile, per la stazione di Pian Fedai (BL) e Arabba (BL) anche i mesi di novembre e luglio, rispettivamente, sono risultati statisticamente significativi.

Successivamente si è analizzato l'andamento delle portate medie, massime e di sette quantili di portata. I risultati ottenuti mostrano che le portate medie sono in aumento, aumento che probabilmente è dovuto al deflusso generato nei mesi invernali a causa dell'intensificazione dei processi di ablazione. Al contrario le portate massime sono in diminuzione, fenomeno dovuto probabilmente alla variazione dell'umidità del suolo in condizioni antecedenti gli eventi di deflusso.

L'analisi dei quantili di portata non ha rivelato alcuna connessione con le precipitazioni, questo potrebbe essere dovuto dalla grande variabilità delle precipitazioni e alla non linearità della trasformazione in deflussi delle precipitazioni.

Infine, le quattro caratteristiche analizzate sui 912 eventi selezionati mostrano una coerenza tra la precipitazione cumulata e l'analisi delle precipitazioni, evidenziando un trend in crescita che però non risulta statisticamente significativo. Anche l'intensità media di precipitazione mostra una tendenza positiva che risulta anche statisticamente significativo.

Nonostante i trend positivi di precipitazione cumulata e intensità media di precipitazione non assistiamo ad una tendenza in crescita delle portate al picco, come invece ci si aspetterebbe. Questo andamento viene confermato anche dal coefficiente di deflusso, anch'esso negativo.

Questi risultati confermano la discrepanza tra l'aumento delle precipitazioni e il mancato aumento delle portate, che, come detto in precedenza, alcuni studi hanno evidenziato questa dicotomia e spiegato il ruolo fondamentale dell'umidità del suolo antecedente agli eventi di precipitazione influenzata anche alla topografia e litologia della zona.

In conclusione, possiamo affermare quanto la comprensione della variabilità idro-meteorologica è fondamentale, in particolare per migliorare la futura pianificazione, gestione

e sostegno non solo delle risorse idriche, fondamentali nella vita quotidiana ma anche per la progettazione e ideazione di future opere idrauliche.

La temperatura e le precipitazioni sono considerati parametri meteorologici vitali per descrivere il cambiamento climatico e come la loro entità influenza la disponibilità delle risorse idriche naturali.

L'effetto dell'aumento delle temperature può influenzare sia la quantità che la qualità dell'acqua, il che ha il potenziale di migliorare l'evapotraspirazione e ridurre il deflusso nelle stesse condizioni di pioggia.

L'aumento delle precipitazioni, come detto in precedenza non si traduce in un corrispondente aumento delle portate. Tra i possibili meccanismi responsabili, altri studi identificano le condizioni dell'umidità del suolo antecedente gli eventi, evento di pioggia totale, durata della tempesta e la topografia. Infatti, gli eventi di piena dipendono non solo dalle precipitazioni ma anche dalle condizioni e dai processi specifici del bacino.



## Ringraziamenti

Vorrei riservare questo spazio finale della mia tesi di laurea ai ringraziamenti verso tutti coloro che mi hanno sempre sostenuto e dato forza nei momenti difficili in questi due anni.

Comincerei dai miei genitori, colonne portanti della mia vita, per avermi permesso di realizzare uno dei miei sogni.

Ringrazio mio padre Giuseppe, per i sacrifici che quotidianamente sostieni per la tua famiglia, tutto l'impegno che ho messo, le rinunce fatte, e i risultati raggiunti sono stati traguardi che in qualche modo mi hanno permesso di dirti grazie papà.

Ringrazio mia mamma Susi, nessuna parola potrà mai eguagliare il senso di gratitudine che provo nei tuoi confronti, tu che vivi ogni giorno con il solo obiettivo di portare la luce, amore e serenità nella vita di chi ti circonda. Durante questo percorso mi hai sempre supportata, gioito ad ogni obiettivo raggiunto e dato forza nelle difficoltà, grazie mamma.

Ringrazio mio zio Vittorino, se sono arrivata fin qui è grazie all'importanza che mi hai trasmesso fin da quando ero piccola riguardo lo studio, ricordandomi sempre, con la solita similitudine che con una Ferrari posso fare sia i 300 km/h che i 50km/h, mentre con una cinquecento non arrivo ai 300 km/h. Grazie zio.

Ringrazio mia sorella Leanne, suo marito Mauro e le mie due nipotine, Melissa e Alice, innanzitutto per avermi ospitato durante i mesi di lezione in università mettendo da parte la vostra quotidianità e facendomi sentire come se fossi a casa; e per avermi sempre sostenuto nella realizzazione di questo obiettivo così importante per la mia vita e carriera futura.

Ringrazio tutti i miei amici e compagni di corso per aver reso unici questi due anni e per il costante supporto e aiuto che ci siamo dati durante le interminabili sessioni di esami e non solo, con voi ho condiviso momenti indimenticabili insieme. Grazie.

Un grazie lo rivolgo anche alla mia relatrice la professoressa Eleonora Dallan e ai miei correlatori, la dottoressa Ylenia Gelmini e il professor Marco Borga per il costante aiuto fornitomi nella realizzazione di questa tesi.

Vorrei dedicare anche dure righe ad un mio compagno a quattro zampe, il mio gatto Cocco, per alcuni potrà sembrare stupido, ma merita di essere ringraziato, per essere sempre stato accanto a me durante le mie sessioni di studio, per aver reso più leggere le lezioni online, e per essere sempre stato presente nei momenti belli e brutti fin dai tempi delle elementari. Non ti dimenticherò mai, grazie.

Infine, ma non per importanza ringrazio il mio fidanzato Thomas, comincio col dirti grazie per essere sempre stato presente, come sai quest'anno è stato il più difficile della mia vita finora, dove sono successe molte cose brutte, forse solo tu sai realmente cos'ho provato. Forse solamente tu sai dei miei pensieri tormentati. Grazie per tutto il tempo che mi dedichi per ascoltare le mie paure, le mie ansie e per assecondare le mie richieste. Non basterebbe un'intera pagina per ringraziarti, ma spero di poterti dare almeno la metà di quanto tu dia a me. Sei stato un pilastro fondamentale durante questo percorso, hai sempre creduto in me anche quando io stessa non ci credevo, mi hai sempre aiutato non solo emotivamente, ma anche "fisicamente" quando ogni fine settimana prima di un esame, non lo passavamo a fare passeggiate in centro o in montagna o al mare come le coppie normali, ma lo passavamo in casa con tu che pazientemente mi interrogavi e aiutavi ad imparare i concetti più difficili. Non hai mai messo in dubbio le mie capacità, non hai mai smesso di credere in me, non mi hai mai lasciato sola anche quando ero io stessa ad allontanarti, è grazie a te se ho capito che gli ostacoli esistono e sono fatti per essere superati, insieme. Infinitamente grazie.

## Bibliografia

- Abbas, M., Zhao, L., Wang, Y., 2022. *Perspective Impact on Water Environment and Hydrological Regime Owing to Climate Change: A Review*. Hydrology 9, 203.
- Asano, Y., Uchida, T., 2018. *The roles of channels and hillslopes in rainfall/run-off lag times during intense storms in a steep catchment*.
- Atilgan Atilgan, Ali Yücel, Joanna Kocięcka, Roman Rolbiecki, Ulaş Şenyiğit, İsmail Taş, Monika Marković, Daniel Liberacki, *The effect of climate change on stream basin hydrometeorological variables: The example of Dim Stream (Turkey)*, Ecohydrology & Hydrobiology, 2023.
- Banda, V.D.; Dzwaïro, R.B.; Singh, S.K.; Kanyerere, T. *Trend analysis of selected hydro-meteorological variables for the Rietspruit sub-basin, South Africa*. *J. Water Clim. Chang.* 2021, *12*, 3099–3123.
- Barbi A., Cola G. e Marani L., (2018), *Inquadramento climatico del Veneto*.
- Barry, Roger G., *Mountain Climatology and Past and Potential Future Climatic Changes in Mountain Regions: A Review*. Mountain Research and Development, vol. 12, no. 1, 1992, pp. 71–86. *JSTOR*, <https://doi.org/10.2307/3673749>. Accessed 12 Sept. 2023.
- Birsan M.-V., Molnar P., Burlando P., Pfaundler M., 2005, *Streamflow trends in Switzerland*.
- Bronstert, A., Niehoff, D., Bürger, G., 2002. *Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities*. Hydrological Processes 16 (2), 509–529.
- Brunetti, M., Colacino, M., Maugeri, M. & Nanni, T. *Trends in the daily intensity of precipitation in Italy from 1951 to 1996*. *Int. J. Climatol.* 21, 299–316 (2001).
- Caloiero T., Filice E., Coscarelli R. & Pellicone G. 2020. *A homogeneous dataset for rainfall trend analysis in the Calabria region (Southern Italy)*. *Water* 12 (9), 2541.
- Ceppi, P., Scherrer, S.C., Fischer, A.M., Appenzeller, C., 2012. *Revisiting Swiss temperature trends 1959–2008*. *International Journal of Climatology* 32 (2), 203–213

- Dallan, E., Roghani, B., Fosser, G., Schaer, C., Marani, M., Borga, M., and Marra, F.: *Projected changes in subdaily extreme precipitation over an alpine transect, at convection-permitting scale*, EMS Annual Meeting 2022, Bonn, Germany, 5–9 Sep 2022, EMS2022-510, <https://doi.org/10.5194/ems2022-510>, 2022.
- Del Favero R. 2004, *I boschi delle regioni alpine italiane*. CLEUP, Padova.
- Diaz, H.F., Bradley, R.S. *Temperature variations during the last century at high elevation sites. Climatic Change* 36, 253–279 (1997).
- Do X., Westra H., Leonard S., *A global-scale investigation of trends in annual maximum streamflow, Journal of Hydrology*, Volume 552, 2017, pp 28-43.
- Fiorentino, M., Iacobellis, V., 2001. *New insights into the climatic and geologic controls on the probability distribution of floods. Water Resources Research* 37 (3), 721–730.
- Forootan E. *Analysis of trends of hydrologic and climatic variables. Soil & Water Res.* 2019;14(3):163-171.
- Gelmini, Y., Zuecco, G., Zaramella, M., Penna, D., & Borga, M. (2022). *Hysteresis in streamflow-water table relation provides a new classification system of rainfall-runoff events. Hydrological Processes*, 36(9), e14685.
- Gocic M. & Trajkovic S., 2013, *Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. Global and Planetary Change* 100, 172–182.
- Gregoretti, C., Degetto, M., Bernard, M., Crucil, G., Pimazzoni, A., De Vido, G., Berti, M., Simoni, A., Lanzoni, S. *Runoff of small rocky headwater catchments: Field observations and hydrological modelling* (2016) *Ricerca sulle risorse idriche*, 52 (10), pag. 8138-8158
- Guastinini E., Zucco G., Errico A., Castelli G., Bresci E., Preti F., Penna D., (2019), *How does streamflow response vary with spatial scale? Analysis of controls in three nested Alpine catchments.*
- Hamed, K. H. 2008 *Trend detection in hydrologic data: the Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis. Journal of Hydrology* 349 (3–4), 350–363.

- Harry F. Lins and James R. Slack, *Streamflow trends in the United States*.
- Hu Y., Maskey S., Uhlenbrook S., *Trends in temperature and rainfall extremes in the Yellow River source region China Clim. Change*, 110 (1–2) (2012), pp. 403-429
- Hussain F., Nabi G., Wu R.-S. & Gimeno L. 2021 *Spatiotemporal rainfall distribution of Soan River Basin, Pothwar Region, Pakistan*. *Advances in Meteorology* 2021, 1–24.
- HX Do , S Westra , M Leonard, *A global-scale investigation of trends in annual maximum streamflow*.
- Jaiswal, R.K., Lohani, A.K., Tiwari, H.L. *Statistical Analysis for Change Detection and Trend Assessment in Climatological Parameters*. (2015) *Environmental Processes*, 2 (4), pp. 729-749
- Karaburun, A., Demirci, A., Kara, F., 2011. *Analysis of spatially distributed annual, seasonal and monthly temperatures in Istanbul from 1975 to 2006*. *World Applied Sciences Journal* 12 (10), 1662–1675.
- Lehmann, J., Coumou, D., Frieler, K., 2015. *Increased record-breaking precipitation events under global warming*. *Climatic Change* 1–15.
- Madsen H., Lawrence D., Lang M., Martinkova M., Kjeldsen T.R., *Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe*, *Journal of Hydrology*, Volume 519, Part D, 2014, Pages 3634-3650
- Merz R., Blöschl G., Parajka J. *Spatio-temporal variability of event runoff coefficients* - *Journal of Hydrology*, 2006 - Elsevier
- Michelle Ho, Rory Nathan, Conrad Wasko, Elisabeth Vogel, Ashish Sharma, *Projecting changes in flood event runoff coefficients under climate change*, *Journal of Hydrology*, Volume 615, Part A, 2022.
- Min, S.-K., Zhang, X., Zwiers, F.W., Hegerl, G.C., 2011. *Human contribution to more intense precipitation extremes*. *Nature* 470 (7334), 378–381.
- Mountain Research Initiative EDW Working Group. *Elevation-dependent warming in mountain regions of the world*. *Nature Clim Change* 5, 424–430 (2015).

- Norbiato D., Borga M., Merz R., Blöschl G., Carton A., *Controls on event runoff coefficients in the eastern Italian Alps*.
- Norbiato, D., Borga, M., Degli Esposti, S., Gaume, E., Anquetin, S., 2008. *Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins*. *Journal of Hydrology* 362 (3-4), 274–290.
- Pawar U, Hire P, Gunathilake MB, Rathnayake U. *Spatiotemporal Rainfall Variability and Trends over the Mahi Basin, India*. *Clima*. 2023; 11(8).
- Penna, D., Mantese, N., Hopp, L., Dalla Fontana, G., Borga, M., 2015. *Spatio-temporal variability of piezometric response on two steep alpine hillslopes*. *Hydrol. Processes* 29, 198–211.
- Penna, D., Tromp-van Meerveld, H.J., Gobbi, A., Borga, M., Dalla Fontana, G., 2011. *The influence of soil moisture on threshold runoff generation processes in an alpine headwater catchment*. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 689–702.
- Penna, D., van Meerveld, H.J., Oliviero, O., Zuecco, G., Assendelft, R.S., Dalla Fontana, G., Borga, M., 2015. *Seasonal changes in runoff generation in a small forested mountain catchment*. *Hydrol. Processes* 29, 2027–2042.
- Penna, D., Zuecco, G., Crema, S., Trevisani, S., Cavalli, M., Pianezzola, L., Marchi, L., Borga, M., 2017. *Response time and water origin in a steep nested catchment in the Italian Dolomites: response time and water origin in a nested catchment*. *Hydrol. Processes* 31, 768–782.
- Rosmann, T., Domínguez, E., Chavarro, J., *Comparing trends in hydrometeorological average and extreme data sets around the world at different time scales*, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volume 5, 2016, pp. 200-212.
- Salvati P., Petrucci O., Rossi M., Bianchi C., Pasqua A.A., Guzzetti F. (2018), *Gender, age and circumstances analysis of flood and landslide fatalities in Italy*. *Sci. Total Environ.*, 610–611 (2018), pp. 867-879.
- Sharma A., Wasko C., Lettenmaier D.P. *If precipitation extremes are increasing, why aren't floods?* *Water Resour. Res.*, 54 (2018), pp. 8545-8551.

- Singh V. P., Mishra A. K., Chowdhary H. & Khedun C. P. 2014 *Climate change and its impact on water resources*. Modern Water Resources Engineering 15, 525–569.
- Stephens C.M., Johnson F.M., Marshall L.A. *Implications of future climate change for event-based hydrologic models*. Water Resour., 119 (2018), pp. 95-110.
- Tao, H., Gemmer, M., Bai, Y., Su, B., Mao, W., 2011. *Trends of streamflow in the Tarim River Basin during the past 50 years: human impact or climate change?* Journal of Hydrology 400 (1–2), 1–9
- Tranchida G., (2021), *Analisi spaziale dell'andamento delle precipitazioni estreme in Italia su base morfologica e geomorfologica tramite metodologie GIS-base*, relatore Claps. P. e Mazzoglio P., Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Politecnico di Torino.
- Uber, M., Vandervaere, J.-P., Zin, I., Braud, I., Heistermann, M., Legout, C., Molinie, G., Nord, G., 2018. *How does initial soil moisture influence the hydrological response? A case study from southern France*. Hydrol. Earth Syst. Sci. 22, 6127–6146
- Yücel, A., Atılgan, A., Öz, H., 2019. *Trend Analysis in Temperature, Precipitation and Humidity: The Case of Mediterranean Region, Scientific Papers, Series E, Land Reclamation, Earth Observation & Surveying*. Environmental Engineering 8, 91–98.
- Zarenistanak M., Dhorde A. G. & Kripalani R. H. 2014 *Trend analysis and change point detection of annual and seasonal precipitation and temperature series over southwest Iran*. Journal of Earth System Science 123 (2), 281–295.
- Zhang, Q., Xu, C.Y., Zhang, Z., Ren, G., Chen, Y.D., 2008. *Climate Change or Variability? The Case of Yellow River as Indicated by Extrem Maximum and Minimum Air Temperature During 1960-2004. Theoretical and Applied Climatology*.

## Sitografia

<https://www.isprambiente.gov.it/it>

<https://www.ipcc.ch/>

<https://idt2.regione.veneto.it/>

## Software

Per la selezione degli eventi è stato utilizzato **Microsoft Excel 2022**.

Per l'elaborazione e la creazione delle mappe in ambiente GIS è stato utilizzato **Quantum GIS** e **OpenJUMP**.

Per l'analisi delle variabili idro-metereologiche è stato utilizzato **MATLAB R2022b**.