UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE CHIMICHE

DIPARTIMENTO DI GEOSCIENZE

CORSO DI LAUREA IN SCIENZE E TECNOLOGIE PER L'AMBIENTE

STUDIO IDROGEOLOGICO DELLE SORGENTI CARSICHE DEL MONTELLO IN PROVINCIA DI TREVISO DENOMINATE TAVARAN LONGO, FORAME E CASSELON

Relatore: Prof. Paolo Fabbri

Laureando: Nicola Ornella
2075996

Anno Accademico 2024/2025

INDICE

INTRODUZIONE 1
1. IL CARSISMO 2
1.1 Il fenomeno carsico 2
1.2 Acquiferi e sistemi carsici 4
2. DESCRIZIONE DEL SITO DI STUDIO 6
2.1 Il Montello 6
2.2 Il Piave 8
2.3 Geologia e Geomorfologia 10
2.4 Il Sistema Carsico 12
3. STRUMENTI E METODOLOGIE 14
3.1 Descrizione operazioni 14
3.2 Curva di durata del flusso (FDC 16
3.3 Istogrammi delle piogge e box plot 17
3.4 Funzione di autocorrelazione (ACF) 18
3.5 Funzione di cross-correlazione (CCF 19
3.6 Fattore di correlazione e coefficiente di correlazione 20
4. DISCUSSIONE DEI DATI 22
4.1 Le piogge 22
4.2 Sorgente del Casselon 25
4.3 Sorgente del Tavaran Longo 32
4.4 Sorgente del Forame 39
4.5 Confronto tra le sorgenti 46
5. CONCLUSIONI 49
6. BIBLIOGRAFIA 51

INTRODUZIONE

L'obiettivo di questa tesi consiste nell'analisi e nel confronto di una serie di dati raccolti sul campo durante un periodo che va da novembre 2024 a settembre 2025, riguardanti 3 sorgenti carsiche. Questi sono poi stati integrati in database contenenti valori continuamente raccolti a partire da giugno 2019, permettendoci di eseguire indagini più complete. Tali sorgenti, denominate Tavaran Longo, Forame e Casselon, sono dislocate nei pressi del rilievo del Montello, in provincia di Treviso. Questo studio è stato possibile grazie all'utilizzo di strumenti di misurazione digitali (CTD-Diver), associati a metodi di rilevazione analogica (mulinelli e aste graduate), utili ad ottenere informazioni su temperatura (T), livello dell'acqua, conducibilità elettrica (EC) e portata (Q) delle sorgenti. L'interpolazione e la gestione dei dati, oltre alla formazione di grafici e tabelle, sono state possibili grazie all'uso di software di analisi statistica (RStudio).

1.IL CARSISMO

1.1 Il fenomeno carsico

Il carsismo ha caratteri geochimici e idrogeologici unici che caratterizzano molte zone del nostro paese e della nostra area, tra cui il rilievo del Montello preso in considerazione da questo studio.
Tale processo è considerabile come un modellamento della roccia superficiale e sotterranea causato dall'azione delle acque, siano queste di origine meteorica o di origine profonda.

Da un punto di vista chimico le principali interazioni che si creano tra lo strato roccioso superficiale e l'acqua corrispondono alla dissoluzione e alla precipitazione del carbonato di calcio ($CaCO_3$).

Dissoluzione del carbonato di calcio

$$CaCO_3\ (s) + CO_2\ (aq) + H_2O\ (l) \rightarrow Ca^{2+}\ (aq) + 2\ HCO_3^-\ (aq)$$

Tale reazione avviene grazie alla presenza in acqua di una pressione parziale elevata di CO_2 che reagisce con il calcare ($CaCO_3$) sciogliendolo e rilasciando in soluzione ioni calcio (Ca^{2+}) e bicarbonato (HCO_3^-).
(Ford D.C., Williams P. 2007)
La dissoluzione avviene naturalmente solo dove è presente acqua in forma liquida, e quindi in zone temperate, tropicali ecc., attuali o passate. In aree in cui piove pochissimo, oppure in cui predomina il ghiaccio, il processo carsico tenderà ad avere scarsa efficacia rispetto ad altri processi morfogenetici essenzialmente di tipo meccanico (erosione fluviale, eolica, glaciale, ecc.). (De Waele J., Piccinini L. 2008)

Dove invece la soluzione appena vista si deposita e quando questa è ricca di ioni disciolti assistiamo alla precipitazione del carbonato, che di fatto è il semplice processo inverso del precedente.

Precipitazione del carbonato di calcio

$$Ca^{2+}\ (aq) + 2\ HCO_3^-\ (aq) \rightarrow CaCO_3\ (s) + CO_2\ (g) + H_2O\ (l)$$

Assistiamo quindi solitamente alla formazione di costruzioni calcaree quali stalagmiti e stalattiti all'interno delle aree caratterizzate da precipitazione, tipicamente rocce o cavità in precedenza formate proprio dal fenomeno carsico.
(Ford, D.C., Williams, P., 2007)

Esistono poi una serie di fattori che favoriscono a livello chimico il presentarsi del modellamento carsico quali:
- Pressioni elevate di CO_2 nell'acqua, che favorisce la solubilità dei carbonati
- Temperature fredde sciolgono maggiormente CO_2
- Maggiore è la circolazione idrica maggiore sarà la presenza di dissoluzione

Il processo di carsificazione comincia quindi con l'acqua ricca di CO_2 che si immette dapprima in fratture sottili nate in seguito a fenomeni tettonici, dissolvendo velocemente lo strato roccioso nei primi metri, fino a quando non raggiunge una saturazione del 75% in calcite. Da questo punto in poi il processo di erosione avviene lentamente, aumentando la sua velocità nel momento in cui si vengono a formare delle fratture di dimensioni maggiori in cui scorre una maggiore quantità di acqua, motivo per cui gli acquiferi carsici sono composti da una rete di canali, fratture e cavità tra loro connessi e spesso caratterizzati dalla presenza di una unica grande sorgente. (Boano F., Viglione A., Vigna B. 2020)

1.2 Acquiferi e sistemi carsici

Gli acquiferi carsici sono frutto di una porosità secondaria ovvero porosità per fratturazione, tipica delle rocce sottoposte a sforzo, ossia zone tettonicamente disturbate che presentano delle fatture in cui può essere stipata dell'acqua.

Le rocce principali ritrovate in luoghi caratterizzati da carsismo sono:

- Rocce calcaree: anche se possono essere più o meno resistenti;
- Gessi: formati da solfati di calcio idrati;
- Dolomite: bicarbonato di calcio e magnesio, in cui un atomo di calcio viene sostituito da uno di magnesio;

In realtà va ricordato che tutte le rocce, in una certa misura, sono solubili in acqua, ma solo alcune portano, in certe condizioni morfo climatiche, allo sviluppo del tipico assetto idrologico e di forme carsiche. Queste rocce sono, in ordine d'importanza, quelle carbonatiche (composte da calcite, dolomite, ecc.), quelle evaporitiche (composte da salgemma, gesso, anidrite, ecc.) e le quarziti (composte da quarzo). (De Waele J., Piccinini L. 2008)

Un sistema carsico è l'insieme delle forme geologiche e morfologiche associate al carsismo che possono formarsi a livello superficiale e sotterraneo; lo possiamo quindi definire come un bacino idrogeologico in cui il deflusso di acqua sotterraneo è di rilevanza maggiore rispetto alla circolazione sulla superficie.
Durante la sua formazione il sistema risulta costituire verticalmente delle zone differenziate tra di loro da caratteristiche sulla base della dinamica degli spostamenti idrici. (Fig. 1)

- L'epicarso rappresenta la parte più superficiale, con uno spessore variabile da pochi fino a qualche decina di metri. All'interno della massa rocciosa si trova una quantità rilevante di vuoti diffusi, formatisi per effetto dell'azione corrosiva delle acque arricchite di anidride carbonica provenienti dal suolo. In occasione di precipitazioni intense, questa zona si satura temporaneamente d'acqua, che successivamente defluisce rapidamente verso i livelli più profondi;
- La zona vadosa è caratterizzata dalla presenza di cavità, talvolta di dimensioni tali da poter essere esplorate dall'uomo, che non risultano mai completamente riempite d'acqua; al loro interno convivono infatti aria e acqua;
- La zona satura è quella in cui tutte le cavità presenti nella roccia risultano costantemente riempite d'acqua. Superiormente essa è delimitata dalla cosiddetta "tavola d'acqua", il cui livello varia in funzione dell'andamento

delle precipitazioni: tende a innalzarsi durante i periodi più piovosi e ad abbassarsi nelle stagioni più secche. (Zampieri D. 2005)

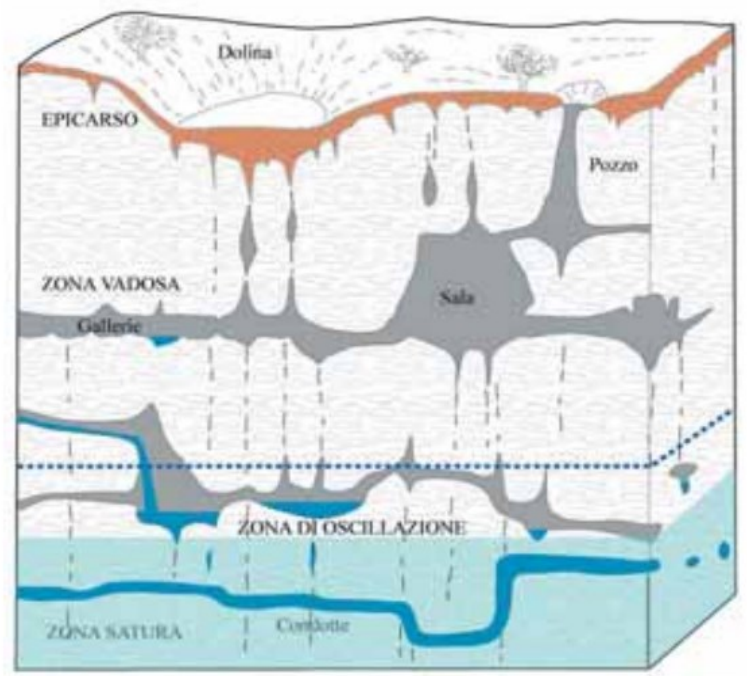

Fig. 1. Rappresentazione grafica della stratificazione di un sistema carsico
(Zampieri e Sauro - Aspetti della speleogenesi del Montello, 2005)

2. DESCRIZIONE DEL SITO DI STUDIO

2.1 Il Montello

Il rilievo del Montello è una formazione unica situata tra l'area delle Prealpi costituita da colli subalpini e l'alta Pianura Veneta, in provincia di Treviso. Non si tratta infatti di un colle simile a quelli a lui vicini né di una vera e propria montagna, date le quote limitate che raggiunge (massimo 369 m s.l.m.). (Ferrarese F., Sauro U. 2005)
La sua forma è stata paragonata a un dorso di balena, evidenziando una struttura ellittica che si estende per circa 13 km da sud-ovest verso nord-est e una larghezza di approssimativamente 5 km. La sua superficie è di circa 60 km² e ha un'altezza media che supera di 100 m quella della pianura circostante, presentando un volume di più di 6 miliardi di m³. (Fig. 2) (Ferrarese F., Sauro U. 2005)

Fig. 2 Foto satellitare del Montello. Giugno 2025

La genesi di questa morfounità risulta il prodotto di un insieme di fattori in relazione tra loro. Il Montello è infatti un esempio marginale di orogenesi alpina, in cui a nord vediamo un'espressione più accentuata con le Alpi.
Formatesi dallo scontro continuo nel tempo delle placche tettoniche di Africa e Europa, hanno portato alla piegatura e all'impilarsi di pezzi di crosta terrestre.
Il nostro rilievo è considerabile come una morfostruttura di origine tettonica di tipo "pop up", ovvero una sorta di cumulo delimitato sia nella parte settentrionale che nella parte meridionale da faglie convergenti verso il basso, le quali fanno alzare il rilievo con il tempo. (Fig. 3) (Ferrarese F.,Sauro U. 2005)

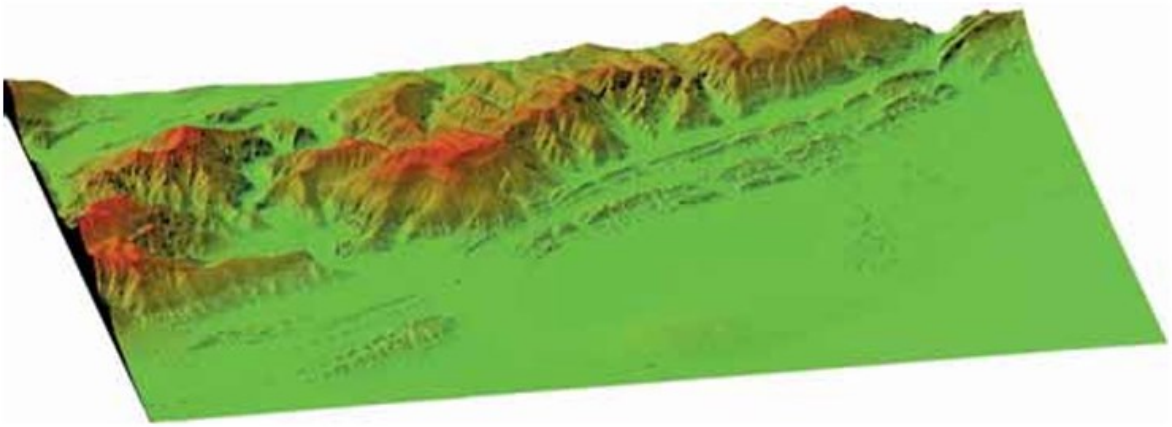

Fig. 3 Il Montello, in basso al centro, nel contesto dell'alta Pianura Veneta e dei gruppi alpini e prealpini. (Ferrarese F., Sauro U. 2005)

2.2 Il Piave

Il fiume Piave delimita col suo bacino idrografico tutta la parte nord-orientale del Montello ed è il secondo elemento che nel corso dei secoli ha modificato e influenzato la costituzione dell'area circostante.
La crescita in altezza del rilievo è assimilabile ai movimenti tettonici e si trova a competere con l'azione fluviale, che agisce con un'aggressione e uno spianamento dove questo scorre. Si tratta infatti di un processo abrasivo che si occupa di consumare la roccia e i pendii del Montello durante le piene, le quali muovono le masse sabbiose e ciottolose con energia e velocità considerevoli.
Allo stesso modo il fiume provoca fenomeni di deposizione di questi materiali nelle zone dove la velocità del flusso diminuisce. Nella sua azione il fiume è stato ostacolato dal Montello. (Fig. 4)

Fig. 4. Foto del fiume Piave il 23/09/2025 a Nervesa della Battaglia

Sono presenti molte forme che ci forniscono una prova dell'azione del fiume, le quali sono state rese visibili dal contrasto continuo tra il corso d'acqua e il sollevamento di origine endogena del Montello. Tra queste abbiamo: altopiani e terrazzi di spianamento, valli incastrate o "antecedenti" di origine fluviale e alvei attivi di spianamento. (Fig. 5) (Ferrarese F., Sauro U. 2005)

È importante sottolineare come il corso d'acqua abbia un impatto rilevante a livello chimico sul territorio, attaccando la componente carbonatica e sciogliendo le componenti di matrice calcarea e i ciottoli che formano la struttura di questo conglomerato. (Zampieri D. 2005)

Fig. 5 Profilo longitudinale dei terrazzi di spianamento rispetto agli altri riferimenti del Montello. (Ferrarese F., Sauro U. 2005)

2.3 Geologia e geomorfologia

Ci troviamo ad analizzare un colle composto principalmente da rocce conglomeratiche, soprattutto a nord e ad ovest. In quest'area del cuneo si è formata una piega d'anticlinale costituita prevalentemente da una serie di strati conglomeratici interrotti da lenti di arenaria, marne e argilla. Tali strati presentano ciottoli carbonatici legati da un cemento calcitico.
È stato osservato che nella zona sud-orientale del Montello è presente un'unità conglomeratica diversa, di età pleistocenica e quindi più recente di quella superiore di età miocenica. (Ferrarese F., Sauro U. 2005)
All'analisi del profilo longitudinale osserviamo come la relazione tra l'attività fluviale nel corso dei secoli ha agito su questo territorio e l'orogenesi influendo l'una sull'altra causando variazioni di massa rilevanti. (Fig. 7)
Nell'area occidentale osserviamo la presenza di una serie di 7 terrazzi fluviali, preceduti a loro volta da una valle spianata, detta valle morta del Biadene, che divide il Montello dalla collina di Montebelluna. Questa valle larga circa 1 km è figlia del vecchio alveo del Piave che nel corso degli anni ha cambiato il suo corso. (Fig. 6 e Fig. 7).

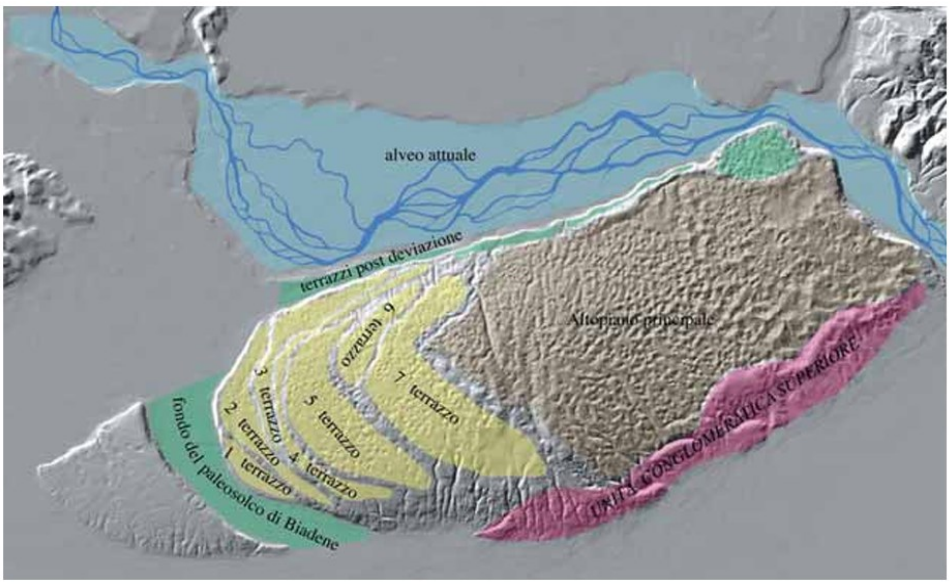

Fig. 6 Modello digitale del rilievo del Montello con evidenziati gli elementi geomorfologici principali

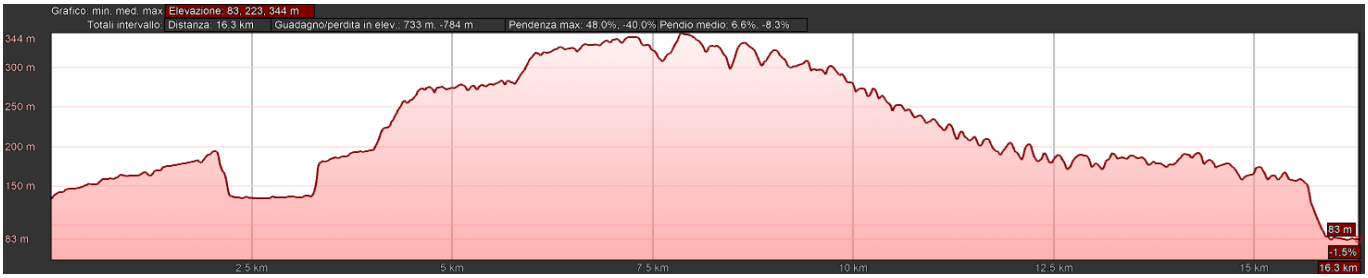

Fig. 7 Profilo di elevazione sviluppato con Google Earth Pro che evidenzia le differenze di quota da colle di Montebelluna a sinistra fino all'alveo del Piave a destra

Il passaggio dei corsi d'acqua in questa zona ha provocato la deposizione e il trasporto di sabbia e ciottoli che ora formano il "Conglomerato del Montello".
Per comprendere la storia morfologica del Montello è necessario conoscere due elementi:
- L'innalzamento del rilievo nel corso del tempo non è mai stato costante, alternando fasi di quiete a fasi di intenso movimento, facendo prevalere forze differenti col corso degli anni;
- Le variazioni climatiche presentatesi nel corso del Pleistocene hanno influito sull'attività erosiva, favorendo un'azione di matrice fluviale rispetto a quella carsica soprattutto nei periodi freddi. (Ferrarese F., Sauro U. 2005)

2.4 Il sistema carsico

Il carsismo del Montello è il più rappresentativo dei sistemi formatisi su conglomerati ed è in molto simile al carsismo classico dei calcari, tipico del Carso Triestino. (Ferrarese F., Sauro U. 2005)
Il processo ha inizio con l'infiltrazione dell'acqua meteorica nella porosità primaria presente nel cemento cristallino e nei ciottoli. Con il discioglimento della matrice micritica si ha il rilascio dei ciottoli poligenici, che assieme al fluido contribuiscono all'erosione chimica con un'abrasione. Tali fenomeni provocano la formazione di fessure o pori che man mano tendono ad aumentare di misura diventando strutture simili a gallerie, abbastanza larghe da permettere lo scorrimento continuo di acqua. (Ferrarese F., Sauro U. 2005)

La divisione che possiamo osservare in questo ambiente è quella che tra le forme geologiche di endocarso ed epicarso.
Se parliamo di forme carsiche endogene questo produce un numero molto rilevante di grotte, fratture e gallerie sotterranee che nei punti a quote più basse portano l'acqua a fuoriuscire in sorgenti carsiche.
La creazione di questi elementi è data dal lavoro comune dell'infiltrazione dell'acqua del fiume Piave, che da nord verso sud ha pendenza minore via via minore, e dal drenaggio delle acque meteoriche, il quale ha direzione radiale, dalla zona assiale della brachianticlinale verso l'esterno lungo la direzione E-O. (Fig. 8) (Zampieri D. 2005)
Le forme superficiali di carsismo caratteristiche del Montello sono le oltre 2000 doline, che si formano in seguito al drenaggio sotterraneo veloce delle acque che trasportano ciottoli e materiale, aumentando la circolazione ipogea, trascinando un'area sempre maggiore verso il basso, creando una depressione superficiale.
La gran parte di queste strutture sono doline di abbassamento, ma sono presenti anche doline di ricarica puntuale e possono variare in base a posizione ed età. (Ferrarese F., Sauro U. 2005)
Esistono altre tre forme fluviocarsiche rilevanti in quest'area ovvero:

- valli secche: un fenomeno di corrosione accelerata del fondovalle, generalmente poco profonda e priva di un flusso d'acqua sul fondo, tipico della zona meridionale del Montello
- valle cieca: solco percorso da un corso d'acqua di carattere anche temporaneo che si conclude in un inghiottitoio, tipico della zona centro-orientale del nostro rilievo.
- Valle chiusa: solco che presenta un gradino piuttosto accentuato alla cui base nasce una sorgente che alimenta un corso d'acqua che scorre a

fondovalle, un esempio di questo è la sorgente del Forame. (Ferrarese F., Sauro U. 2005) (Fig. 8.)

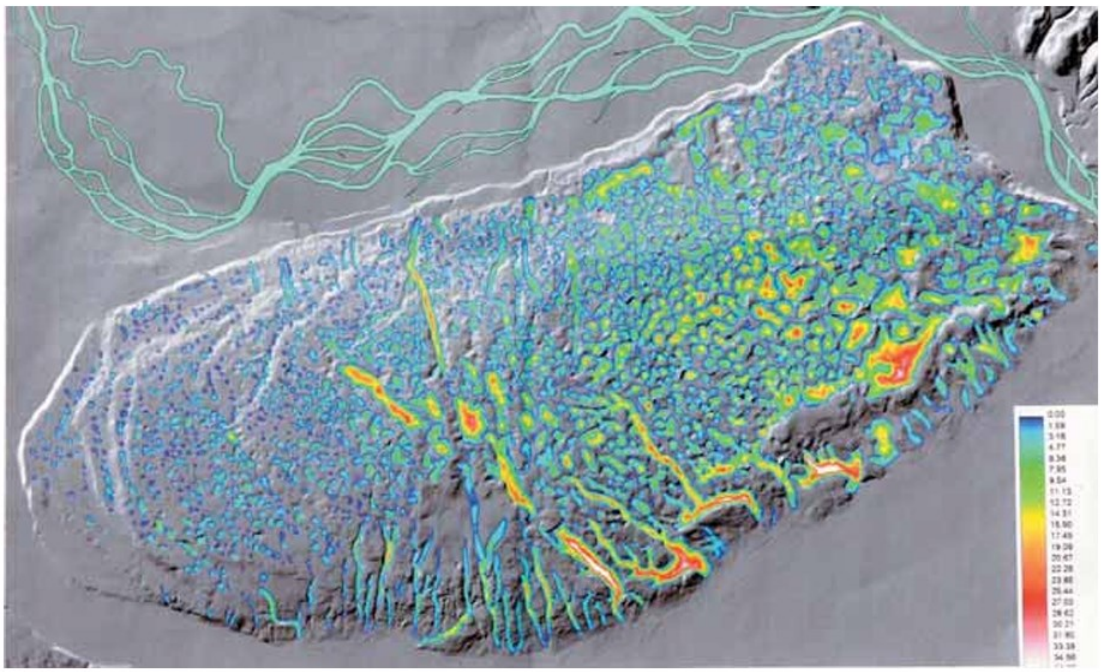

Fig. 8 Mappa con forme carsiche e fluviocarsiche con annessa profondità. (Ferrarese F.,Sauro U. 2005)

3. STRUMENTI E METODOLOGIE

3.1 Descrizione operazioni

I dati raccolti consistono nelle misure delle portate tramite mulinello idrometrico ed asta idrometrica e nella determinazione dei parametri chimico fisici dal monitoraggio delle tre sorgenti tramite uno strumento di acquisizione automatica dei dati (CTD_Diver) ed un barometro (BARO). (Fig. 9)
Il CTD_Diver è uno strumento di misura automatico di pochi centimetri, che immerso in acqua misura con frequenza oraria una serie di parametri, quali:

- Conducibilità elettrica a 25° cioè, il quantitativo di ioni presenti in acqua espressa in mS/cm; con un range 0-30 mS/cm, precisione ± 1% e accuratezza di lettura ± 0.1%.
- Temperatura espressa in °C con range di valori tra -20° a 100°, con precisione ± 0.1°C e la risoluzione di 0.01°C.
- Livello dell'acqua ovvero il valore in cm che sta tra il pelo libero dell'acqua e la base dello strumento non compensato, con range 0-1000 cm, accuratezza ± 0.5 cm e risoluzione 0.2 cm.

I dati sulle piogge e sulla pressione atmosferica sono stati ricavati dall'archivio web dell'ARPA Veneto e dal BARO. Sono stati scaricati e utilizzati i dati di alcune stazioni metereologiche vicine all'area di nostra competenza, come Nervesa della Battaglia (620), Volpago del Montello (183), Conegliano (100), Treporti (160) e Castelfranco Veneto (102).
Per quanto riguarda la pressione, i valori raccolti della pressione atmosferica vanno a compensare quelli che il CTD-Diver registra; infatti, lo strumento è capace di misurare la pressione della colonna d'acqua, alla quale però si aggiunge il valore barometrico.
È stato quindi necessario correggere i risultati raccolti sottraendo dai valori di livello del CTD_Diver i valori barometrici.

$$P_{IDROSTATICA} = P_{CTD\text{-}DIVER} - P_{ATMOSFERICA}$$

Gli strumenti di monitoraggio sono stati posti all'interno di un contenitore di plastica rigida che li protegge dagli eventi atmosferici esterni al corso d'acqua e limita l'influenza della temperatura esterna, tale struttura è aperta sul fondo così da permettere la loro immersione in acqua.
Per l'analisi dei dati raccolti è stato utilizzato il software statistico open source RStudio (RStudio Team, 2025), un ambiente di sviluppo integrato (IDE) per il linguaggio di programmazione R (R Core Team, 2025).

Questo è utile per la creazione di grafici e all'interpolazione di un gran quantitativo di informazioni numeriche e non solo. La versione desktop di questo software ci ha permesso di creare diagrammi grazie alla sua funzione di Data Analist, per verificare le statistiche nel tempo, la presenza di autocorrelazione nelle singole serie di dati (ACF), la cross-correlazione tra le diverse serie di dati (CCF) e la curva di durata del flusso (FDC).

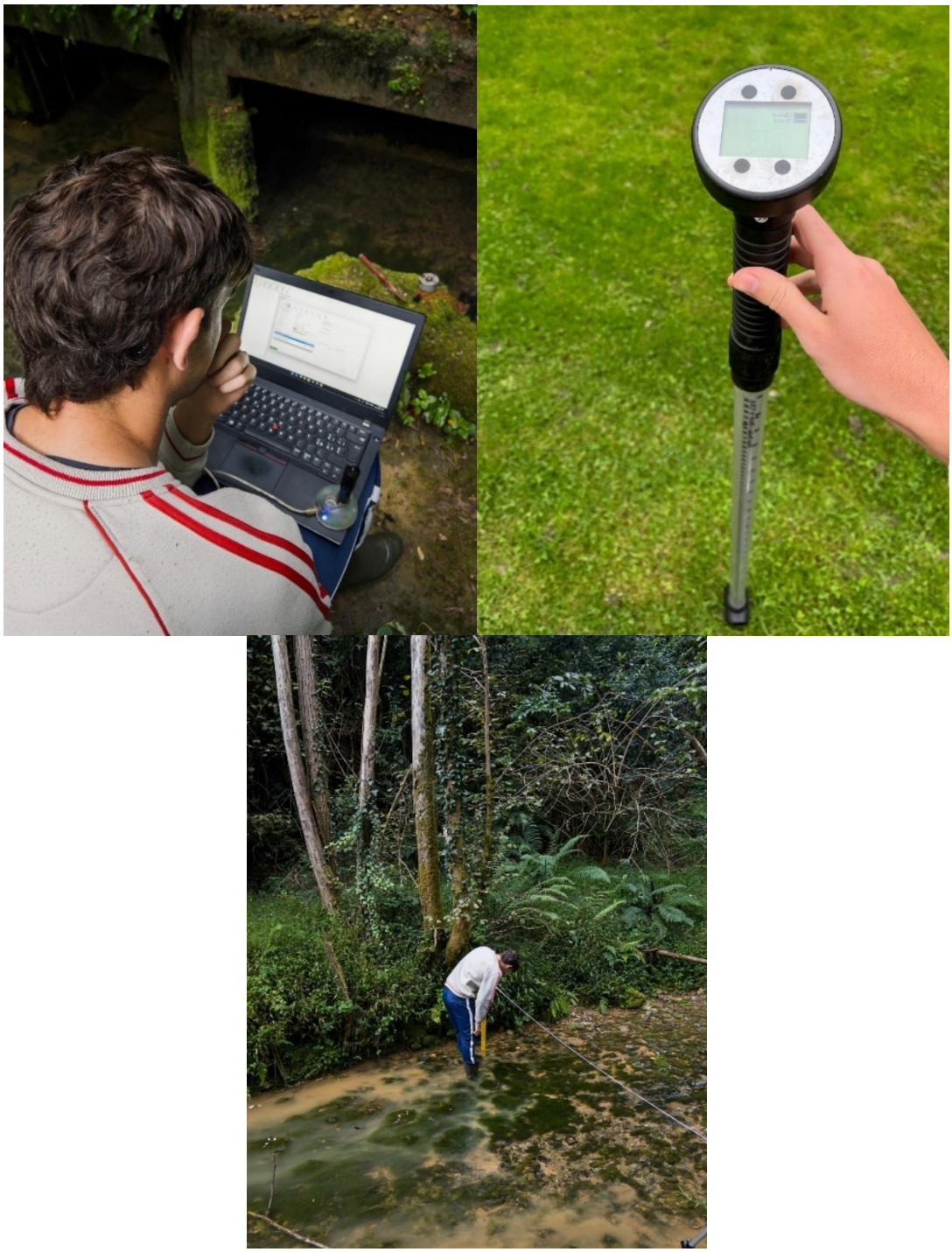

Fig. 9. Foto che mostrano la raccolta dati con il CTD_Diver (in alto a sx), il mulinello da noi utilizzato (in alto a dx) e una misurazione con asta idrometrica (in basso al centro)

3.2 Curva di durata del flusso (FDC)

L'FDC (Flow Duration Curve) ovvero curva di durata delle portate è un grafico di frequenza cumulata, che pone in relazione la portata di un corso d'acqua o di una sorgente con la percentuale di frequenza a cui tale flusso è uguale o inferiore. Questa viene costruita cumulando tutte le misure di portata raccolte e ponendole in ordine decrescente. (Searcy K. J. 1959)
Osservando la curva possiamo capire alcune caratteristiche della sorgente, infatti una pendenza della curva particolarmente ripida è legata alla presenza di poche portate molto elevate. Ci potremmo trovare in una situazione di comportamento carsico sporadico nel quale l'aumento della portata è legato a forti piogge o a singoli eventi temporaleschi, mentre mediamente prevalgono i valori di portata bassi.
Contrariamente, invece, se il grafico vede una curva meno ripida e con una discesa più graduale, significa che mediamente le portate hanno valori più simili tra loro e sono meno influenzate dalle precipitazioni, tipico di sorgenti con serbatoi con minore grado di carsismo. (Torresan et al., 2020)

3.3 Istogrammi delle piogge e box plot

Per analizzare in maniera più efficace il quantitativo di pioggia caduta durante il periodo di tempo del nostro studio, sono stati utilizzati degli istogrammi. Sull'asse delle ordinate è indicata la frequenza di una determinata precipitazione, mentre su quello delle ascisse compare il valore della pioggia in mm. Maggiore è il valore delle ordinate a un determinato valore della pioggia, vuol dire che tale intensità è stata la più frequente.
I dati numerici riportati sono stati ricavati dalle stazioni meteo ARPA citate in precedenza
Altra tipologia di diagramma particolarmente utile e rilevante è il cosiddetto box-plot, noto anche come diagramma a scatola o a baffi. (Spitzer M., Wildenhain J. 2014)
La tipica struttura del box plot suddivide una distribuzione di dati in quartili. I lati inferiori e superiori del rettangolo indicano il primo quartile (25% della distribuzione dati) ed il terzo quartile (75% della distribuzione dati); l'interno di questo riquadro indica la mediana e costituisce dal 50% della distribuzione dei valori.
Le linee più esterne (chiamate anche baffi) vengono estese fino agli estremi della distribuzione, ovvero al valore a +-1,5 volte l'interquartile (3 quartile – 1 quartile) I valori oltre i baffi sono chiamati valori estremi. (Fig 10.)

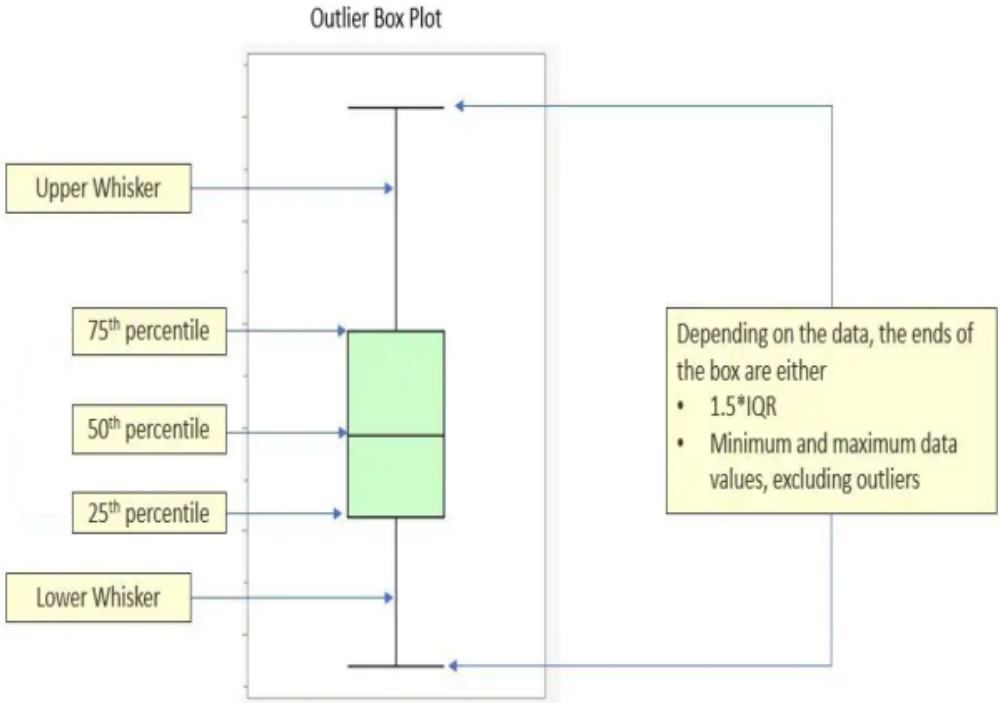

Fig. 10. Descrizione box plot

3.4 Funzione di autocorrelazione (ACF)

Per identificare delle relazioni tra le caratteristiche di queste sorgenti è stata utilizzata la funzione di autocorrelazione.
Statisticamente, l'autocorrelazione di un processo casuale descrive la correlazione tra i valori del processo in diversi istanti temporali, in funzione di due tempi o della differenza di tempo. (Fiorillo F., Doglioni A. 2010)
L'ACF può essere definito come una misura normalizzata, r(k) della dipendenza lineare tra valori successivi di una serie di dati, nel nostro caso i valori di portata, ed è descritta come:

$$r(k) = \frac{C(k)}{C(0)}$$

Dove:

$$C(k) = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n-k}(x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \qquad [k = 0, 1, 2 \ldots., (n-1)]$$

$$C(0) = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}(x_t - \bar{x})^2$$

- k è il ritardo temporale detto lag,
- N è la lunghezza della serie temporale,
- t è il tempo,
- x_t è la misurazione di un singolo evento,
- $\bar{x}$ è la media delle misurazioni dell'evento

È possibile definire la memoria di un sistema carsico analizzando i termini di variazione della portata grazie a questa funzione statistica e quindi le sue caratteristiche carsiche. (Torresan et al., 2020)
Quando si utilizza l'ACF sui dati idrogeologici e si nota un lento declino della curva ci troviamo in presenza di un acquifero o un sistema idrogeologico caratterizzato da scarse proprietà drenanti, bassa permeabilità e di conseguenza notevole capacità di stoccaggio delle acque sotterranee, quindi a scarso comportamento carsico. Al contrario, se notiamo un rapido declino nei grafici si assiste ad un flusso d'acqua più rapido attraverso entro il serbatoio con una capacità di stoccaggio limitata; questo ci suggerisce un sistema marcatamente carsico. (Lo Russo et al., 2021)

3.5 Funzione di cross-correlazione (CCF)

Come per l'ACF, la CCF è una tecnica consolidata che viene solitamente applicata ai set di dati di portata e precipitazione, ma anche di temperatura e conducibilità elettrica. (Torresan F. et al., 2020)
La CCF rappresenta le correlazioni tra due diverse serie di dati rispetto ai tempi di ritardo.
In questo caso u e y sono due variabili che distinguono due serie temporali, mentre n è il numero di coppie confrontate rispetto da un ritardo (k) nella CCF.

$C_{uy} = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n-k}(u_t - \bar{u})(y_{t+k} - \bar{y})$ [k=0, 1, 2, …, (n-1)]

$C_{uy} = \frac{1}{n}\sum_{t=1-k}^{n}(u_t - \bar{u})(y_{t+k} - \bar{y})$ [k=-1, -2, …, -(n-1)]

La CCF è definita come:

$$r_{uy}(k) = \frac{C_{uy}(k)}{\sqrt{C_{uu}(0)C_{yy}(0)}}$$

I valori di $r_{uy}(k)$ hanno un range di variazioni che ha valori limite -1 e 1, portando con sé significati differenti:

- -1, la correlazione tra due serie di dati è perfettamente negativa; quindi, reagiscono in modalità opposta i due parametri;
- +1, la correlazione tra due serie di dati è perfettamente positiva, quindi alla modificazione di un parametro anche l'altro varia allo stesso modo;
- 0, non vi è correlazione tra le serie di dati, al variare di una non si implica un cambiamento sull'altra.

Questo tipo di analisi potrebbe essere utilizzata per convalidare considerazioni idrogeologiche riguardanti la risposta temporale di un corso d'acqua o di una o più sorgenti come nel nostro caso. (Lo Russo et al., 2021)
Per esempio, la portata confrontata con le piogge consente di valutare il tempo minimo di percorrenza dell'acqua neo-infiltrata per attraversare il sistema di condotti e raggiungere il punto di emersione presso le sorgenti. Di conseguenza, è possibile ottenere informazioni sulle dimensioni del sistema carsico. Inoltre, T vs EC è stato analizzato per valutare se questi due parametri fossero sincroni. I risultati della CCF sono stati rappresentati in grafici bidimensionali, noti come cross-correlogrammi, in cui il valore di correlazione è riportato sull'asse y e il ritardo è mostrato sull'asse x. (Torresan F. et al., 2020)

3.6 Fattore di correlazione e coefficiente di correlazione

Il fattore di correlazione e coefficiente di correlazione sono elementi facenti parte del Vespa index che è necessario per definire la vulnerabilità di una sorgente così da poterla inserire all'interno di classi discrete basate sull'utilizzo dei principali elementi idrofisici monitorati.
Le misure di questi, che sono portata, temperatura e conducibilità; devono essere state raccolte per un lungo periodo di tempo e con una frequenza oraria o bioraria così da poter formare una serie di dati. (D'Alberto L., 2022)
Gli elementi che a noi interessano sono:

- c(ρ) è il fattore di correlazione, che varia da 1 a 0, definito come:

$$c(\rho) = [u(-\rho) + \alpha u(\rho)] \mid \rho \mid$$

$$\rho = \frac{\int_0^{t_0} Q\,(t)\sigma(t)\,dt}{\sqrt{\int_0^{t_0} Q^2\,(t)\,dt \;\int_0^{t_0} \quad \sigma^2(t)\,dt}}$$

- ρ è il coefficiente di correlazione tra Q ed EC, compreso tra -1 e 1, calcolato anch'esso su dati orari continui per periodi prolungati (almeno un anno), mentre u(ρ) è la funzione a gradino di Heavside:

$$u(\rho) = \begin{cases} 1, & \rho \geq 0 \\ 0, & \rho < 0 \end{cases}$$

- dove α è un coefficiente di scala compreso tra 0 e 1, che normalmente si presume sia 0,5. (Torresan F. et al. 2020)

Mediante l'analisi di ρ e c(ρ), è possibile individuare tre diversi tipi di acquiferi e di sorgenti ad essi legate, alcune particolarmente legate al fenomeno carsico: (TAB 1.)

- Tipo A: di spiazzamento, che rappresenta un sistema di deflusso carsico ben sviluppato. L'effetto di sostituzione produce un aumento di Q, una diminuzione di T in base alle temperature delle precipitazioni stagionali e una diminuzione della CE. È tipico dei sistemi carsici e ha un coefficiente di correlazione negativo compreso tra -1 e -0,2.
- Tipo B: a pistone, che rappresenta un sistema di drenaggio moderato in cui la risposta idrodinamica può mostrare un comportamento impulsivo. Questo fenomeno è tipico degli acquiferi calcarei leggermente carsificati con un significativo accumulo idrico. L'effetto pistone produce aumenti di Q, T ed EC e presentano un coefficiente di correlazione positivo che è compreso tra 0,2 e 1.

- Tipo C: di omogeneizzazione che è caratterizzato da un sistema di drenaggio poco sviluppato, in cui la risposta idrica alle precipitazioni è quasi assente. L'andamento di Q presenta fluttuazioni lente e modeste, non correlate con la CE. Osserviamo un coefficiente di correlazione che va da –0,2 a +0,2. (Torresan F. et al., 2020)

Tipo di sorgente e fenomeno prevalente	**Coefficiente di correlazione (ρ)**	**Fattore di correlazione (c(ρ))**
Tipo A – Sostituzione	$-1.0 \leq \rho \leq -0.2$	$0.2 \leq c(\rho) \leq 1.0$
Tipo B – Pistone	$0.2 \leq \rho \leq 1.0$	$0.1 \leq c(\rho) \leq 0.5$
Tipo C – Omogeneizzazione	$-0.2 \leq \rho \leq 0.2$	$0 \leq c(\rho) \leq 0.2$

TAB 1.

4. DISCUSSIONE DEI DATI

4.1 Le piogge

I dati riferiti alle piogge sono stati raccolti comprendendo sia il periodo in cui è stato svolto il nostro studio, sia un range temporale precedente. I primi valori per la pressione atmosferica e per le stazioni meteorologiche di Castelfranco Veneto, Conegliano e Volpago del Montello risalgono al 6 giugno 2019 (TAB 2.), mentre quelli di Nervesa della Battaglia al 15 dicembre 2020, concludendo per ogni stazione il 23 settembre 2025. I risultati sono quelli che seguono (valori delle piogge in mm, valori della P atm in cm di H_2O):

	Min	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max
Castelfranco	0	0	0	0.1323	0	53.2
Conegliano	0	0	0	0.1451	0	67.2
Volpago	0	0	0	0.1445	0	48.8
Nervesa	0	0	0	0.1422	0	70.2
P atm (TrePorti)	1003	1032	1036	1036	1041	1065

TAB 2. Dati statistici riguardanti la pressione e le precipitazioni.

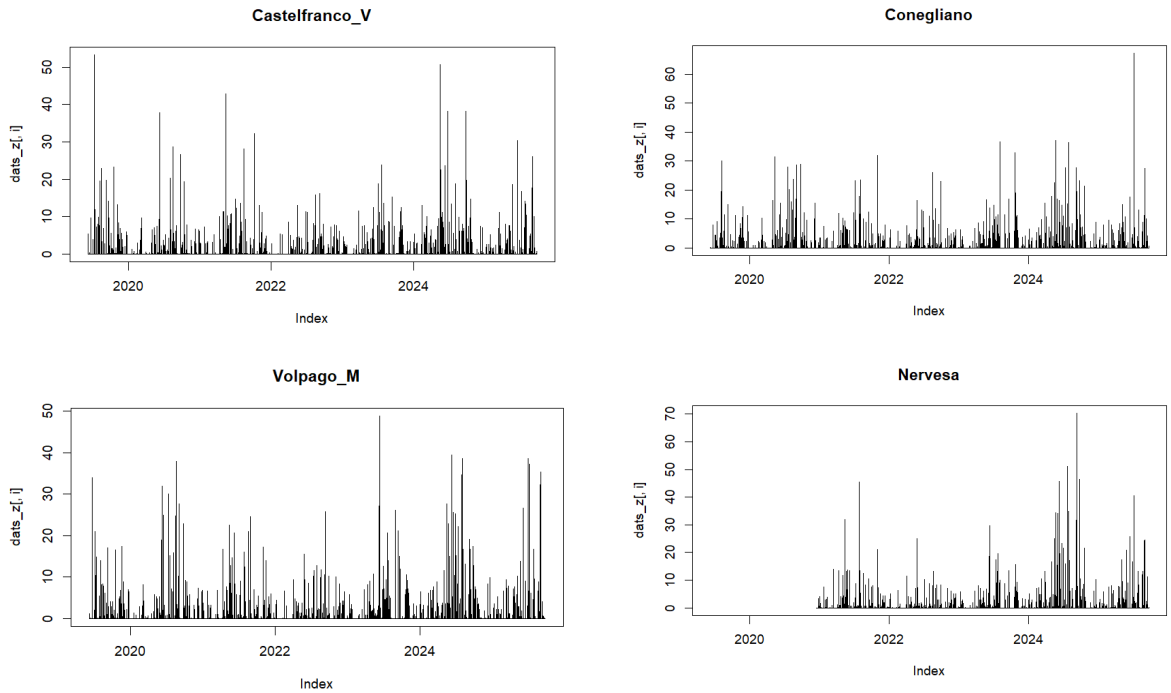

Fig.11: piogge nel tempo registrate dalle stazioni pluviometriche, in ascissa i dati temporali in ordine cronologico, in ordinata i valori registrati

Il quantitativo medio delle precipitazioni è molto simile tra le stazioni e segue un pattern annuale piuttosto regolare. Le stazioni di Conegliano e Nervesa vedono massimi più alti delle altre postazioni. (Fig.11) Spostandoci sugli istogrammi è evidente la prevalenza di piogge di dimensioni limitate. Tutti i grafici sono accomunati da una colonna iniziale (0-5 mm) particolarmente alta rispetto alle altre. Deduciamo che la frequenza delle piogge leggere risulta maggiore degli eventi più estremi. (Fig. 12).

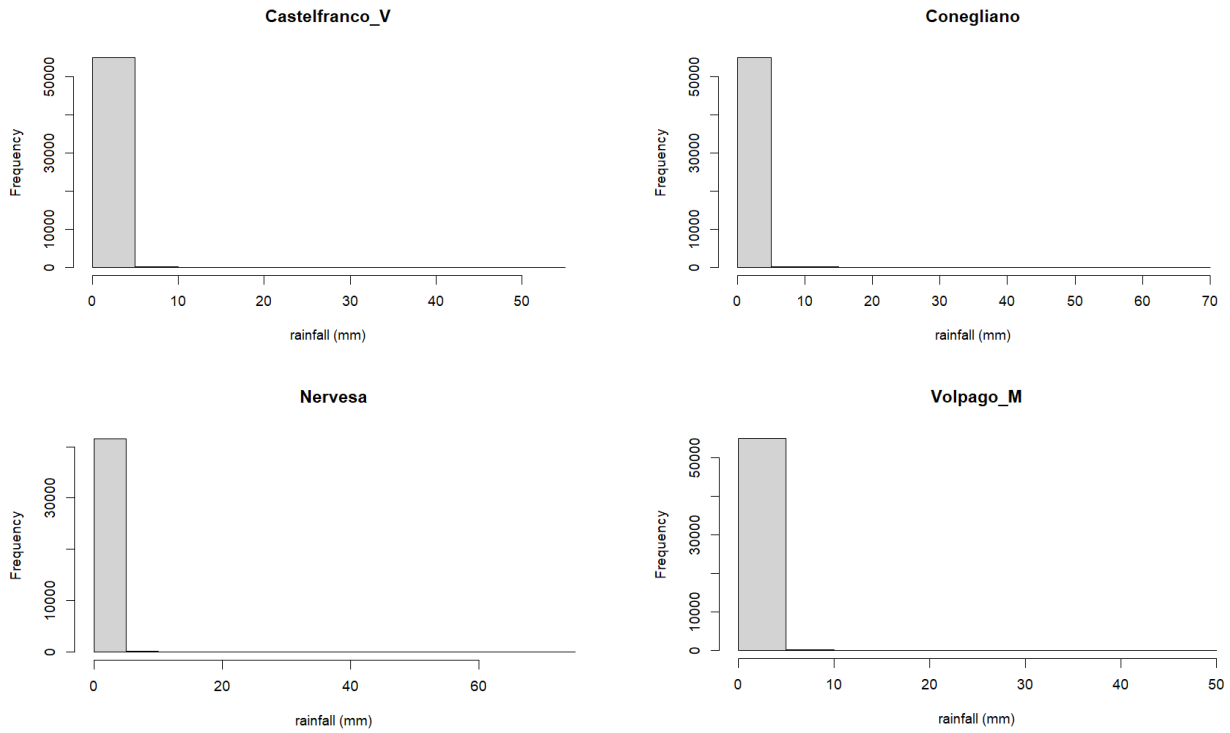

Fig. 12: istogrammi delle piogge, in ascissa il valore rilevato (mm), in ordinata la densità del dato nell'intero periodo saggiato

Di seguito in tabella sono invece state riportate le temperature con i rispettivi valori statistici più rilevanti (TAB. 3):

	Min	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max
T Castelfranco	-6.7	7.7	14.5	14.67	21.3	38.1
T_Conegliano	-3.3	9.1	15.30	15.76	22.2	37.3
T_Volpago	-4.9	8.4	14.60	14.93	21.10	37
T_Nervesa	-4.8	8	14.5	14.97	21.5	38.2

TAB. 3. valori statistici delle temperature espressi in °C.

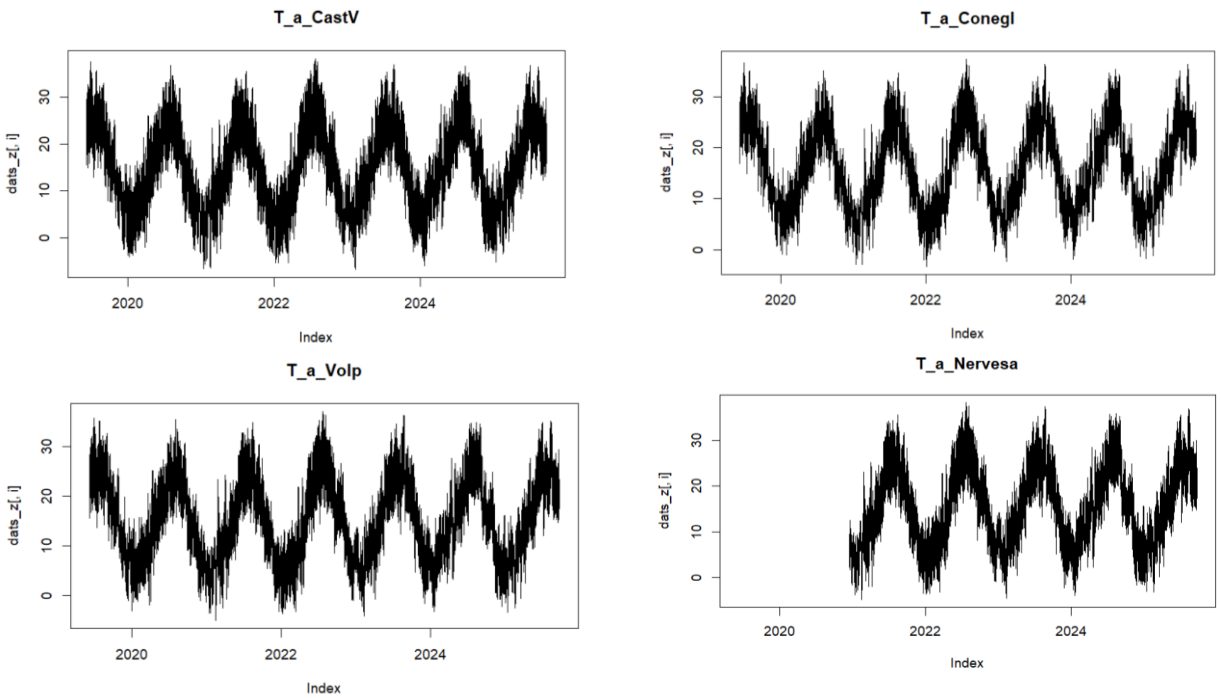

Fig 13. grafici delle temperature con scala temporale nelle ascisse e temperatura in °C nelle ordinate.

I valori delle temperature sono piuttosto simili tra le varie stazioni meteo, con variazioni che vanno da pochi gradi sottozero di minimo ai 37/38°C di massimo. Questo ovviamente è legato alla vicinanza di pochi chilometri tra le stazioni. (Fig. 13).

4.2 Sorgente del Casselon

La sorgente del Casselon è posta sul lato orientale del rilievo del Montello ed è molto vicina al fiume Piave.
Il CTD-Diver è posizionato in corrispondenza della fuoriuscita dell'acqua, così da permettere un'immersione continua dello strumento nel tempo. (Fig. 14). Fino al 19/06/2024 questo era situato in una posizione differente, più esposto all'influenza dei fattori meteorologici esterni.

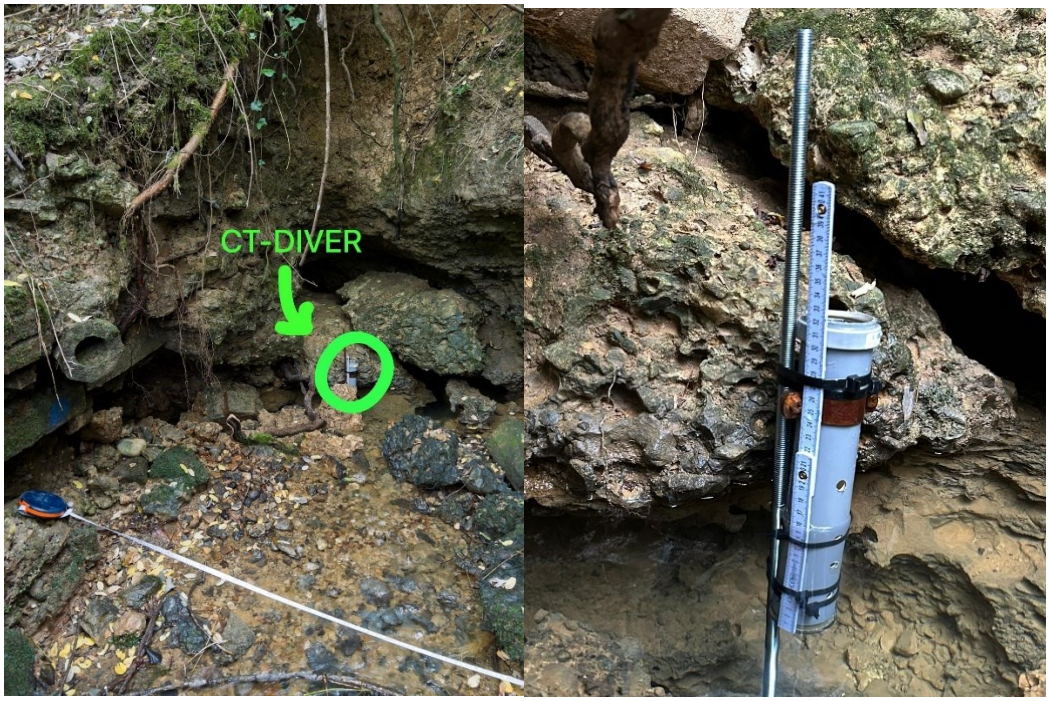

Fig. 14. Foto scattate sul campo nella sorgente del Casselon, con evidenziate la posizione del tubo contenente il CTD-Diver e uno zoom di quest'ultimo.

I dati statistici (TAB 4) e i grafici (Fig. 15) relativi al livello idrico, alla temperatura e alla conducibilità della sorgente sono posti di seguito:

Sorgente	Minimo	Primo Quartile	Media	Mediana	Terzo Quartile	Massimo
EC Cass	0.005	0.599	0.649433	0.673	0.718	0.855
T Cass	0	12.793	12.9273	12.937	13.057	19.73
Cass liv	0.0015	7.1035	13.9430	9.8564	17.1438	121.567

TAB. 4. Statistica delle temperature espressi in °C, della conducibilità elettrica in mS/cm e del livello in cm della sorgente Casselon.

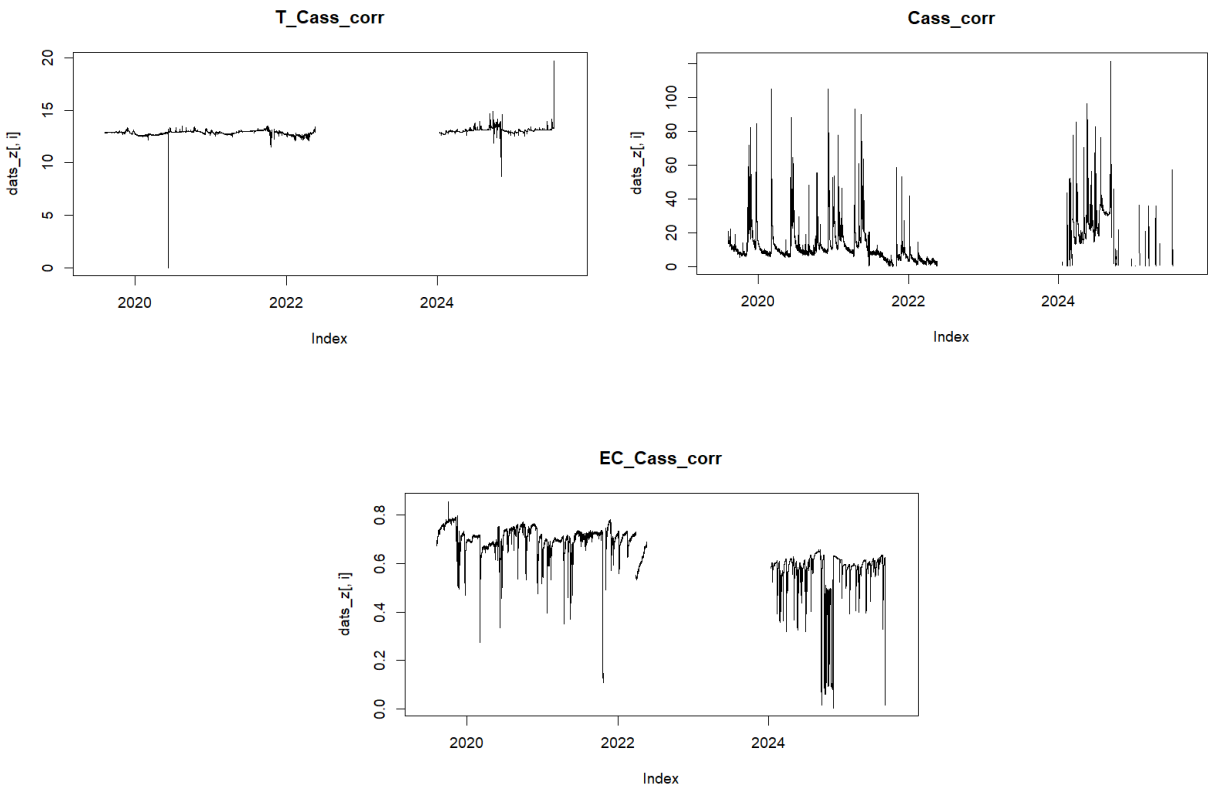

Fig. 15. I grafici rappresentano nell'ordine temperatura, livello e conducibilità elettrica delle acque della sorgente del Casselon, posti sulla scala temporale.

La sorgente del Casselon risulta molto problematica da studiare, sia per il cambiamento recente di posizione degli strumenti che ha influenzato gli ultimi dati, sia per quanto riguarda il funzionamento stesso della strumentazione. I grafici, come possiamo notare, non presentano informazioni sui periodi compresi tra il 21/05/2022 e il 12/01/2024, in quanto una forte piena ha portato via il CTD-Diver e la sua struttura.
Allo stesso modo dopo il 15/09/2025 i valori del livello dati dagli strumenti hanno iniziato a risultare particolarmente anomali e spesso di valore negativo per un malfunzionamento. I valori di livello sono stati corretti eliminando quelli inferiori a 0. Lo strumento è stato poi ritrovato rotto all'ultima misurazione causando la mancanza di dati dal 17/07/2025 in poi.
I valori dell'inizio 2022 di EC e T evidenziano una probabile secca, con valori paragonabili all'aria. Al contrario, l'elevata T e il livello dell'acqua nel 2024 (soprattutto negli ultimi mesi) e nel periodo autunno-invernale del 2025, associati a un basso valore di conducibilità dell'acqua, ci portano a pensare a periodi di forti piene.

Infatti, la correlazione tra temperatura e conducibilità elettrica, affiancata da variazioni elevate e rapide di portata e livello dell'acqua, è il classico segnale di un sistema carsico ben sviluppato.
Altro elemento fondamentale è la portata della sorgente, che è stata ricavata tramite la costruzione di una scala delle portate, nel nostro caso effettuando misurazioni con il mulinello sul campo. Una volta trovata la relazione tra portata e livello, ovvero $Q = 0.1194l^2 + 6.5109l + 81.58$, (Fig.16) è stato possibile ricavare la portata oraria della sorgente applicando questa a tutti i dati provenienti dal CTD-Diver.

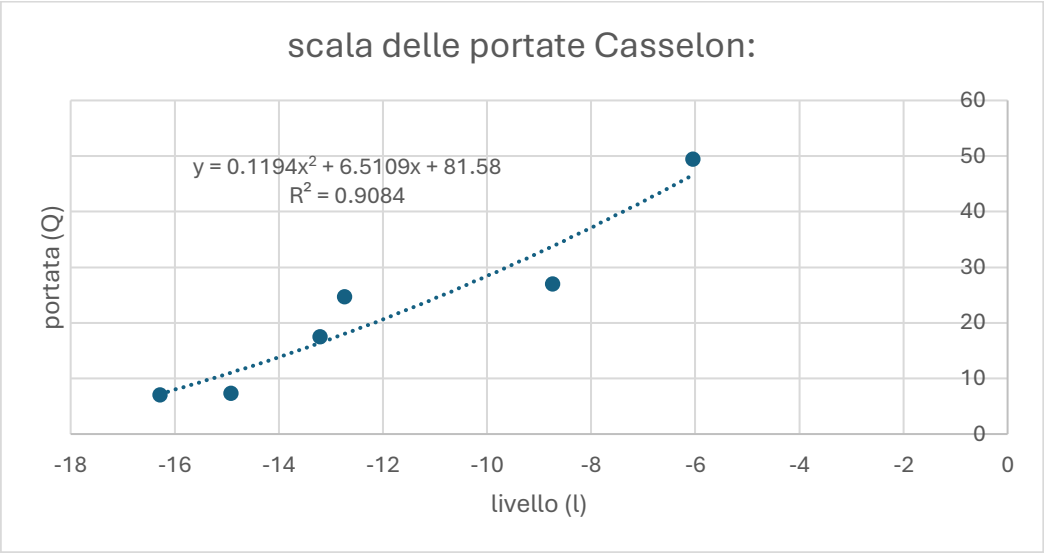

Fig. 16. Scala delle portate con i valori del livello (l) sulle ascisse e la portata (Q) sulle ordinate

I valori del livello nella scala delle portate sono negativi per le problematiche citate in precedenza. Osservando bene il grafico, si vedono dei valori che si discostano dalla curva con errori più o meno evidenti, i quali sono dovuti all'assenza di una sezione fissa e la variabilità delle condizioni della sorgente.

Di seguito (TAB 5) osserviamo i valori statistici che abbiamo ricavato con un grafico (Fig. 17) associato che illustra nel tempo le variazioni.

	Minimo	**Primo Quartile**	**Media**	**Mediana**	**Terzo Quartile**	**Massimo**
Q (L/s)	0	3.761	47.851	7.877	28.322	2639.126

TAB. 5. Statistica delle portate Q in L/s della sorgente Casselon.

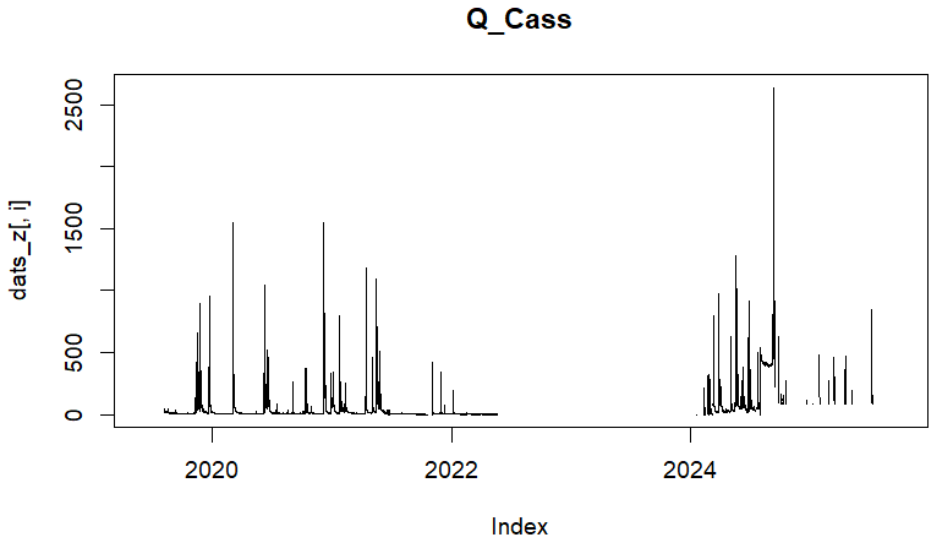

Fig. 17. Grafico delle portate Q di Casselon

Sono evidenti le correlazioni con il livello, con picchi coincidenti soprattutto nel periodo del 2024 precedentemente nominato, ma meno per i valori del 2025.

Il grafico della curva di durata (Fig. 18) delle portate della sorgente del Casselon ci indica la percentuale delle portate superiori ad un certo valore. Si deduce quindi che circa il 22% delle portate supera i 500 L/s; perciò, la caratteristica dominante di questa sorgente è l'elevata variabilità delle portate.

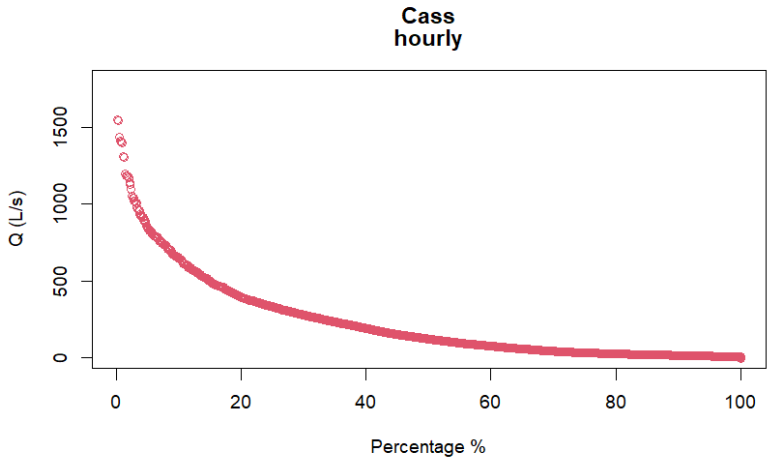

Fig. 18. Grafico della FDC

La funzione di autocorrelazione (Fig. 19) del Casselon è indicativa del carsismo che caratterizza l'acquifero e la sorgente. La discesa iniziale è rapida, indicando una iniziale veloce circolazione carsica entro il serbatoio. Nonostante ciò, l'assestarsi del

grafico in modo regolare ci fa supporre la presenza di un certo grado di immagazzinamento sotterraneo, che rifornisce la sorgente nel tempo.

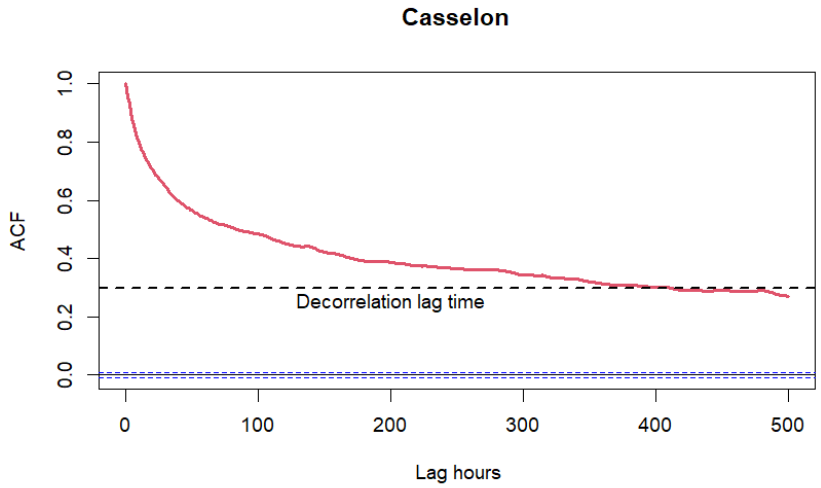

Fig. 19. Grafico dell'ACF

I grafici di cross-correlazione (Fig. 20) tra i valori delle piogge di alcune stazioni vicine al luogo della sorgente e le portate risultano importanti per capire il tempo di corrivazione della sorgente, ovvero il tempo impiegato dall'acqua piovana ad attraversare il sistema.

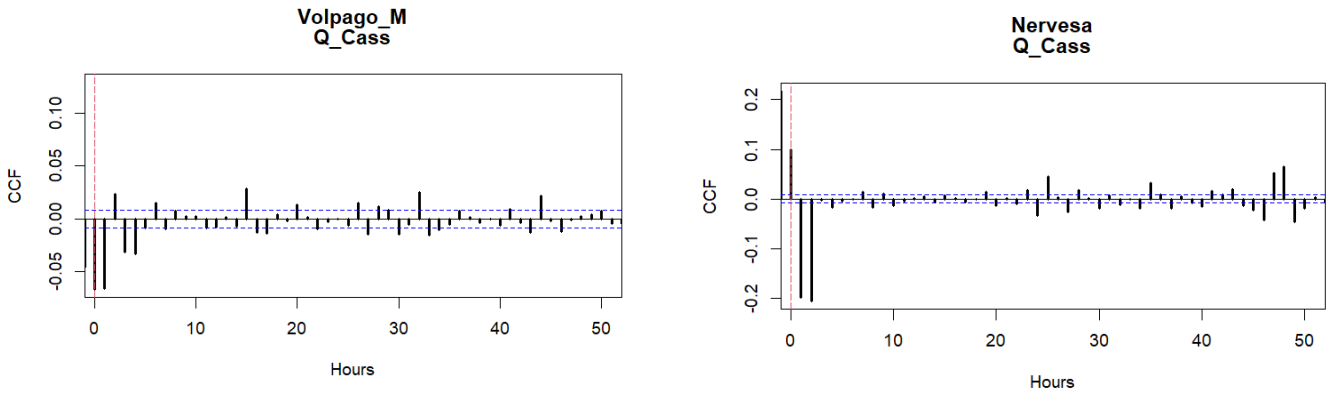

Fig. 20. Correlogrammi piogge vs portate del Casselon

I dati di nostro interesse sono nel grafico di Volpago a lag 2 e lag 15 dove iniziamo a registrare valori di correlazione positivi, indicando che 2 ore dopo la precipitazione la sorgente reagisce con un aumento della portata. Invece nel grafico di Nervesa si ha un valore importante già a lag 0, evidenziando una risposta iniziale istantanea, mentre segnali significativi a lag 25.

Altri cross-correlogrammi di interesse li ricaviamo ponendo a confronto i valori di portata (Q), temperatura (T) e conducibilità elettrica (EC) della sorgente.

- Q vs EC: (Fig. 21) evidenzia una correlazione negativa iniziale, legata all'entrata in circolo di acqua piovana. Dopo il secondo lag questa torna ad aumentare con la portata, indicando l'arrivo di acqua da zone di immagazzinamento.

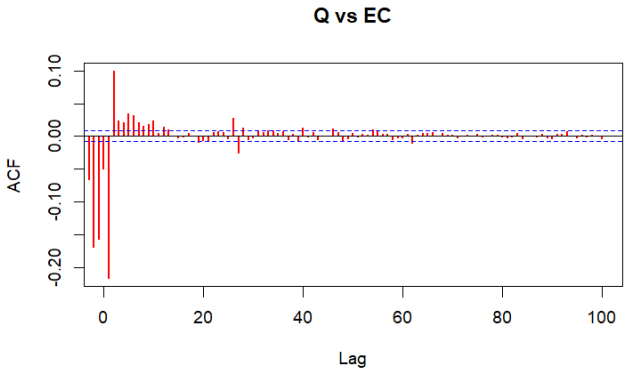

Fig. 21. Grafico Q vs EC

- Q vs T: (Fig. 22) ha valori positivi nei primi lag, che portano a pensare a un passaggio di acqua più calda ed immagazzinata da tempo nel sistema. Mentre i successivi valori negativi indicano l'arrivo di acqua piovana "nuova" nel sistema.

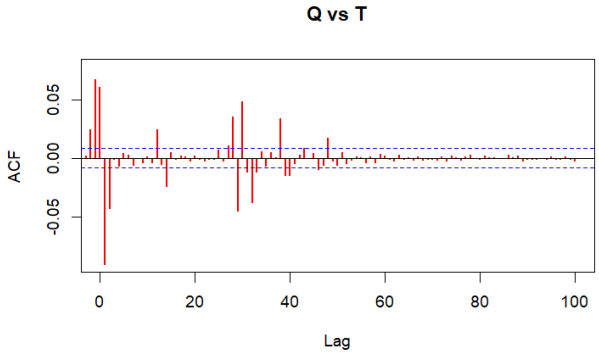

Fig. 22. Grafico Q vs T

- T vs EC: (Fig. 23) c'è una correlazione negativa, ma debole, che poi nel tempo risulta sempre meno rilevante. Da ciò ricaviamo che, quando la temperatura aumenta, la conducibilità tende a diminuire quasi simultaneamente e l'effetto è immediato o con un ritardo brevissimo.

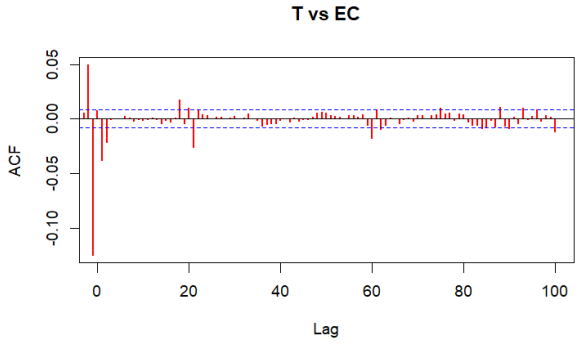

Fig. 23. Grafico T vs EC

Questi risultati non ci permettono di definire il comportamento della sorgente in dettaglio, perché alquanto contrastanti e in parte derivanti da problemi alla strumentazione. Ciò che ne ricaviamo è che molto probabilmente il sistema carsico relativo a questa sorgente si è sviluppato, ma presenta ancora aree di immagazzinamento e omogeneizzazione interna che portano alla miscelazione delle acque.

Un ultimo fattore che possiamo utilizzare per definire una sorgente è l'osservazione del suo ρ coefficiente di correlazione. Grazie al lavoro di Galleani et al. (2011) la correlazione tra portata e conducibilità elettrica ci permette di individuare il principale comportamento delle sorgenti d'acqua.
In questo caso è il valore è di 0.19, che lo colloca tra due categorie, tra quella detta "pistone" e quella di "omogeneizzazione", quindi ancora una volta una situazione poco chiara in termini di comportamento della sorgente

4.3 Sorgente del Tavaran Longo

La sorgente del Tavaran Longo si trova sul lato Nord del colle del Montello all'interno di una dolina di crollo, che presenta sul fondo due fori nella roccia che creano una galleria lunga più di 300 m. (Fig. 24) Alla base di questa galleria scorre l'acqua proveniente dal sottosuolo e il CTD-Diver è stato posizionato all'entrata di uno dei due fori a contatto con l'acqua. (Fig. 25) Anche quest'ultimo il 17/07/2024 ha subito uno spostamento rispetto alla sua posizione originale, in quanto era situato all'interno di una vasca di raccoglimento per l'acqua, usata in passato dalla popolazione per approvvigionarsi.

Fig. 24. Entrata di uno dei due fori presenti nella sorgente del Tavaran Longo.

Fig. 25. CTD-Diver posto all'entrata della galleria.

Di seguito (TAB. 6 e Fig. 26) i parametri statistici del livello dell'acqua, della temperatura e della conducibilità elettrica registrati allo strumento automatico.

Sorgente	Minimo	Primo Quartile	Media	Mediana	Terzo Quartile	Massimo
EC Tav	0.004	0.414	0.449104	0.444	0.493	0.551
T Tav	11.347	12.38	12.49583	12.473	12.61	16.463
Tav liv	2.033	18.51	20.33595	22.22	24.15	46.08

TAB. 6. valori statistici delle temperature espressi in °C, della conducibilità elettrica in mS/cm e del livello compensato in cm.

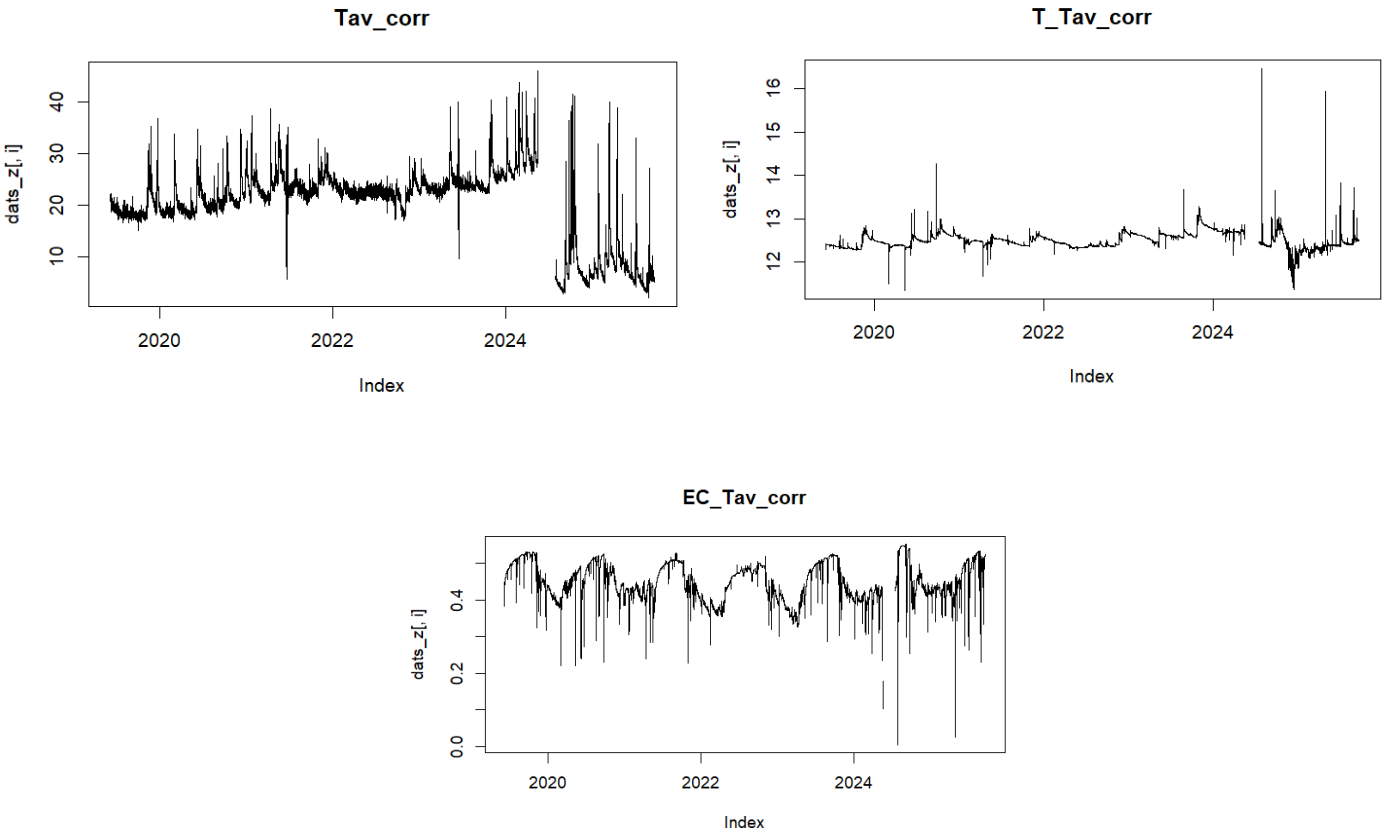

Fig. 26. I grafici rappresentano nell'ordine livello, temperatura e conducibilità elettrica delle acque della sorgente del Tavaran Longo, posti sulla scala temporale.

La sorgente del Tavaran Longo presenta una differenza nei livelli di acqua prima e dopo la data del trasferimento del CTD-Diver. Prima dello spostamento i valori del livello erano costantemente sui 17-20 cm, dovuti al riempimento della vasca di raccoglimento. Dopo il 17/07/2024 i livelli dell'acqua sono mediamente sotto i 10 cm con il CTD-Diver a diretto contatto con il flusso d'acqua.
È molto elevata la differenza di livello tra i periodi di piena e quelli di secca, con un flusso costante che viene interrotto da picchi tipici di una sorgente carsica. Sembra esserci un deflusso di base rilevabile nei periodi di minor piovosità.
Per quanto riguarda T ed EC, entrambi variano stagionalmente. È molto evidente come in questi grafici le escursioni dei valori siano molto più elevate in seguito allo spostamento dello strumento, legato alla posizione più esposta all'ambiente esterno.

Sono state calcolate le portate orarie per mezzo della "scala delle portate" (Fig. 27) costruita sulla base di misurazioni svolte sul campo che relazionate ai dati provenienti dal CTD-Diver ci hanno permesso di trovare questa funzione: Q = 0.274 livello^2 - 0.3018 livello - 3.9115.

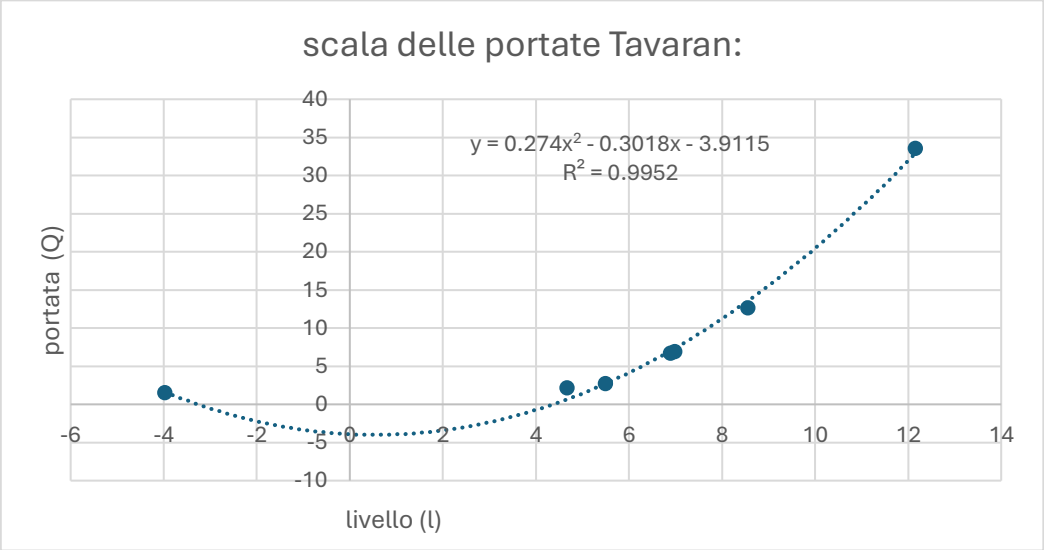

Fig. 27. Scala delle portate con i valori del livello (l) sulle ascisse e la portata (Q) sulle ordinate

Per quanto concerne invece i valori di portata della sorgente del Tavaran Longo questi sono i dati statistici (TAB. 7) e il grafico (Fig. 28) che li pone in ordine temporale:

	Minimo	**Primo Quartile**	**Media**	**Mediana**	**Terzo Quartile**	**Massimo**
Q (L/s)	0	0.8724	11.6816	2.0287	9.4047	16,46

TAB. 7 Statistica delle portate Q in L/s della sorgente Tavaran Longo.

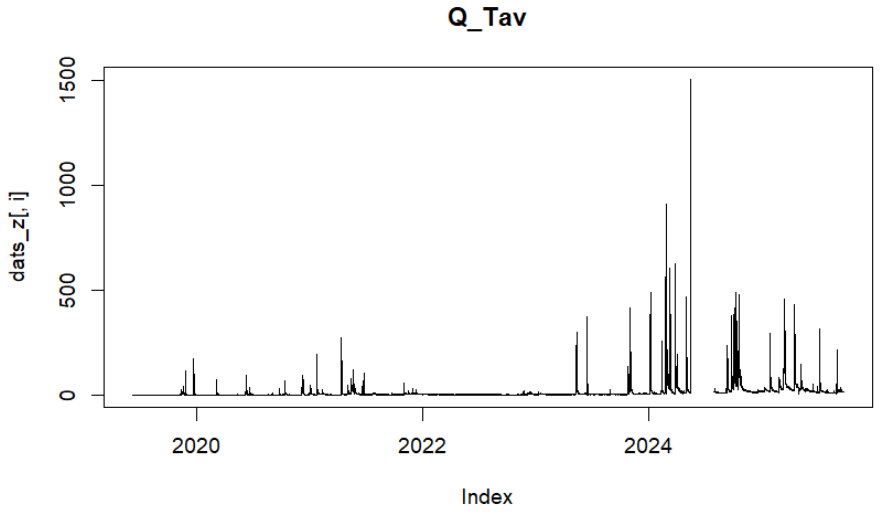

Fig. 28. Grafico delle portate Q di Tavaran

Il grafico delle portate ci permette di evidenziare meglio i periodi di piena, che sono stati molto più frequenti in questi ultimi due anni (2024 e 2025) rispetto al periodo precedente.

La FDC del Tavaran Longo (Fig. 29) presenta in principio una pendenza marcata, che progressivamente tende a diminuire. Questo sottolinea le ampie variazioni di portata che indicano un comportamento carsico. In assenza di precipitazioni il comportamento si avvicina a quello tipico di un acquifero fratturato, con un deflusso di base proveniente da zone ad elevata capacità di immagazzinamento.

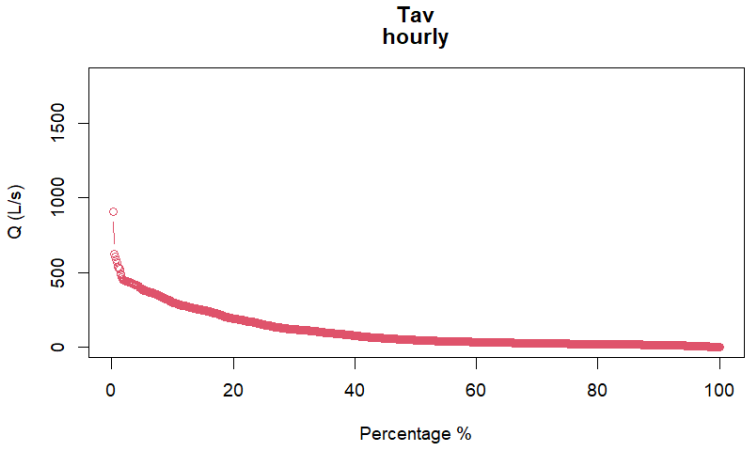

Fig. 29. Grafico dell'FDC

L'ACF (Fig. 30) conferma la precedente affermazione, infatti la pendenza elevata del grafico ci indica la scarsa "memoria" della sorgente, ovvero la notevole velocità con la

quale la portata reagisce ai fenomeni di precipitazione. Man mano che scendiamo per il grafico si evidenzia la presenza di un deflusso di base che assesta la portata su valori costanti dopo circa 90 ore.

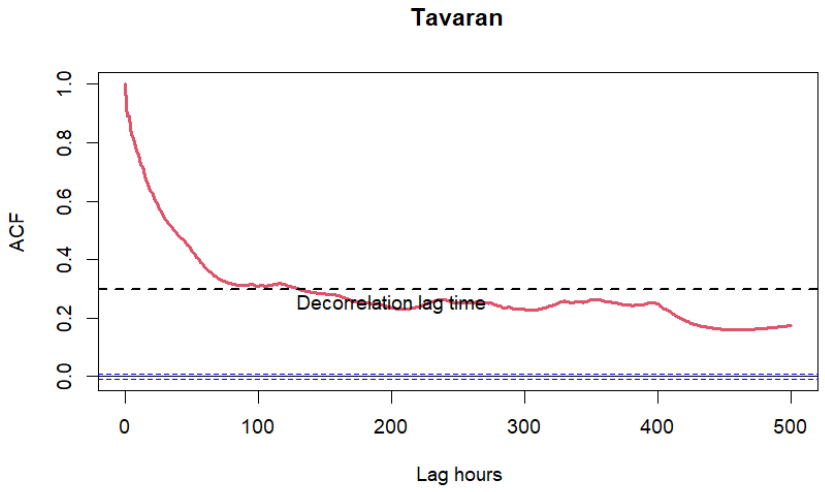

Fig. 30. Grafico dell'ACF

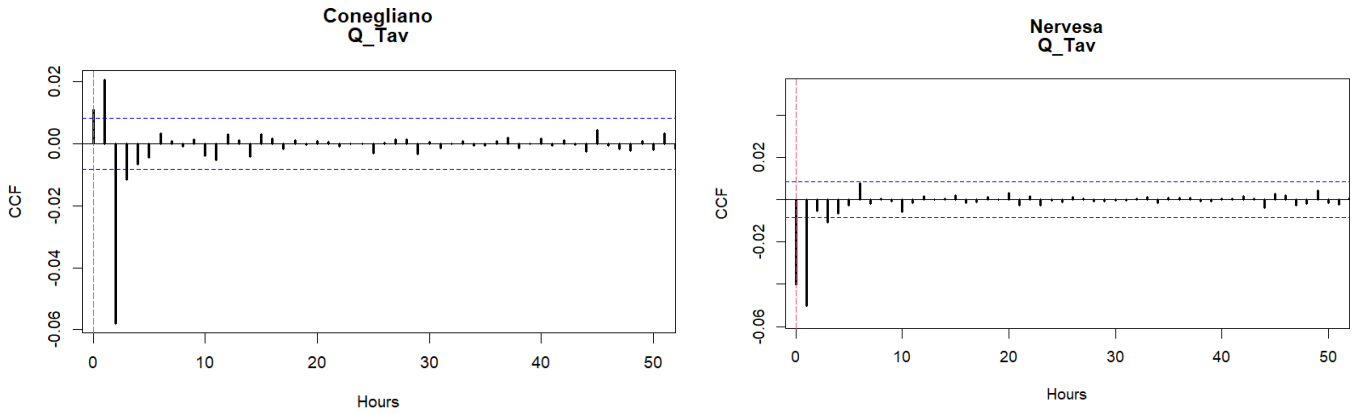

Fig. 31. Correlogrammi piogge vs portate di Tavaran Longo

I cross-correlogrammi tra le portate e le piogge (Fig. 31) non trovano riscontri significativi solo il confronto con la stazione di Conegliano porta a una correlazione positiva nei primi lag per poi diventare negativa e sempre meno rilevante. Nella stazione di Nervesa, quella più prossima, si notano solo iniziali correlazioni negative ed al settimo lag sembra esserci un leggero segnale.

- Q vs T: (Fig. 32) mostra una correlazione positiva già nei primi lag. Non sono correlazioni molto rilevanti, ma indicano un'azione di fuoriuscita di acqua più calda proveniente dal sistema in risposta all'aumento delle portate.

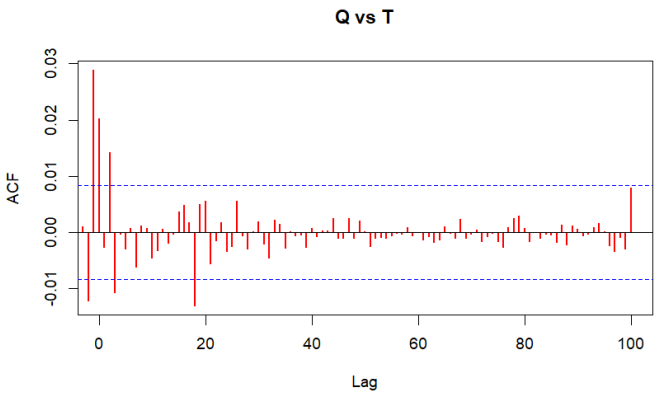

Fig. 32. Grafico Q vs T

- Q vs EC: (Fig. 33) evidenzia valori negativi in seguito all'aumento delle portate che è tipico delle sorgenti carsiche. Una bassa EC è segno del passaggio di acqua piovana meno ricca di sali e soluti, rispetto all'acqua proveniente da sistemi fratturati.

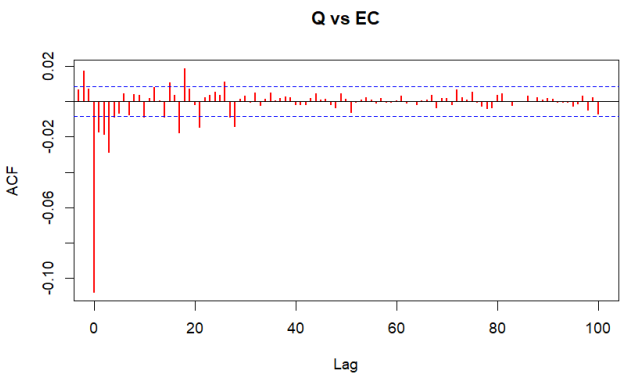

Fig. 33. Grafico Q vs EC

- T vs EC: (Fig. 34) si vede una correlazione negativa, poi positiva e in breve irrilevante. Deduciamo che le variazioni di temperatura e di conducibilità si comportano in senso opposto, cioè quanto l'una aumenta l'altra tende a diminuire.

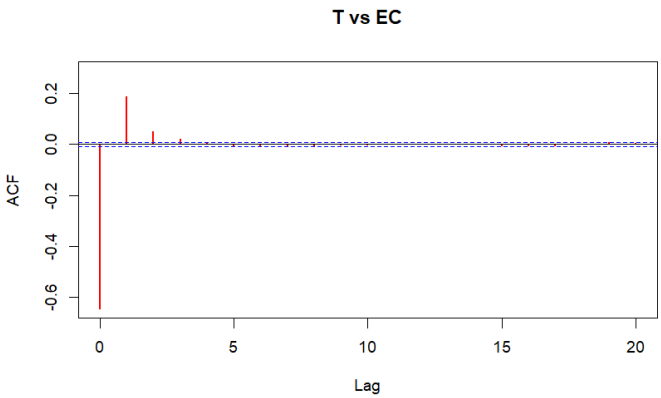

Fig. 34. Grafico T vs EC

Dall'analisi di questi elementi possiamo rilevare come la sorgente del Tavaran Longo sia assimilabile a un sistema carsico misto, con una risposta celere alle piogge, ma con la probabile presenza di un serbatoio più profondo che stabilizza la temperatura e ritorna rapidamente all'equilibrio.

Il coefficiente di correlazione tra portata e conducibilità elettrica che ci permette di classificare il comportamento principale per la sorgente del Tavaran Longo è di -0.456 che lo colloca nelle sorgenti di “sostituzione”.

4.4 Sorgente del Forame

La sorgente del Forame è posta nella zona più a Sud del colle del Montello, all'interno di una valle chiusa; un solco scavato nella roccia che presenta un gradino piuttosto accentuato alla cui base si trova una sorgente che alimenta un corso d'acqua. Trovandosi in prossimità di un deposito militare è stato negli anni '70 soggetto ad inquinamento da gasolio, che ora dovrebbe essere risolto anche se ci sono ancora tracce evidenti lungo il ruscello. Il CTD-Diver è stato agganciato a una struttura di cemento sul lato destro, a contatto con l'acqua che fuoriesce pochi cm più in profondità. (Fig. 35)

Fig. 35. Foto della sorgente del Forame (sx) e zoom sulla posizione del cilindro contenente il CTD-Diver (dx)

Le variabili idrologiche e fisico-chimiche della sorgente sono state riassunte nella tabella (TAB. 8) seguente.

Sorgente	Minimo	Primo Quartile	Media	Mediana	Terzo Quartile	Massimo
EC For	0.1	0.509	0.52049	0.531	0.541	0.722
T For	7.067	11.997	12.04845	12.073	12.143	16.437
For liv	0	2.95	10.42387	7.24	16.075	91.47

TAB. 8. valori statistici delle temperature espressi in °C, della conducibilità elettrica in mS/cm e del livello in cm della sorgente del Forame.

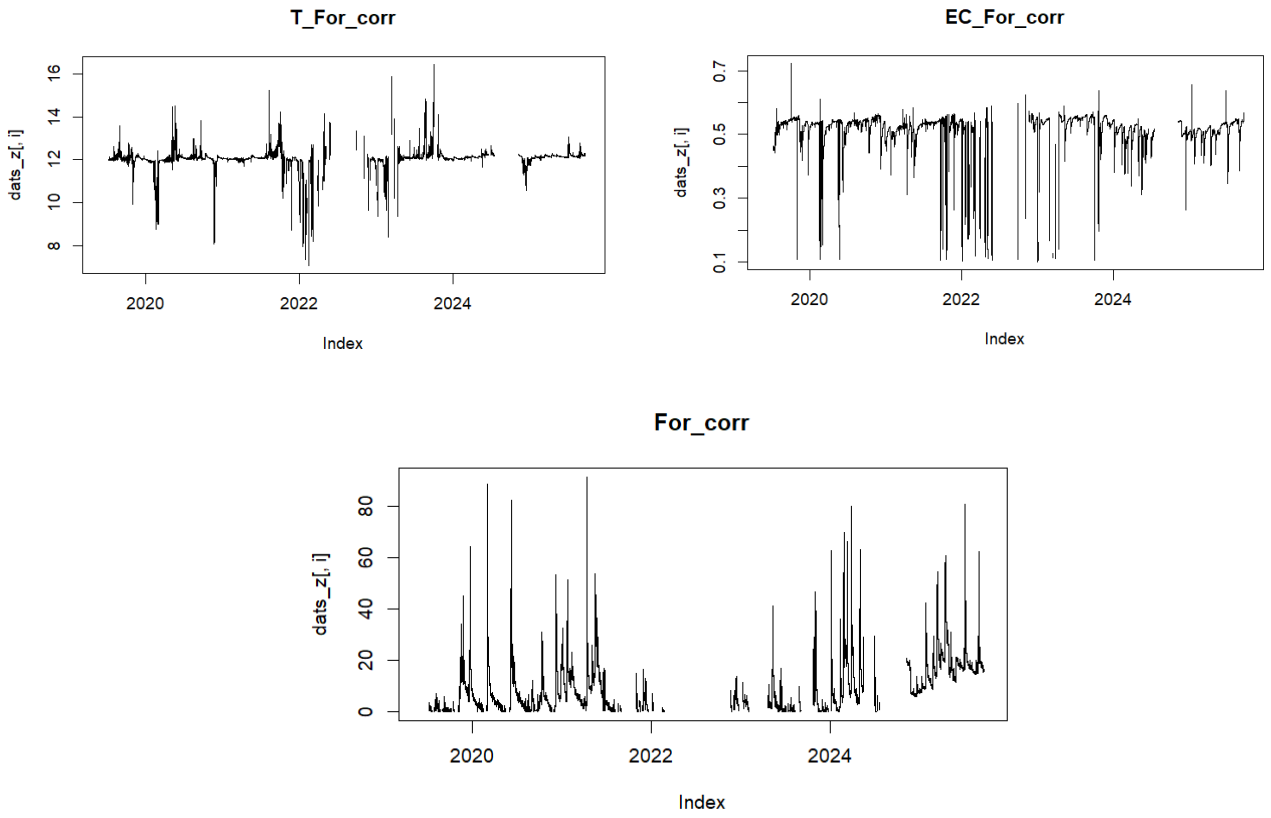

Fig. 36. I grafici rappresentano nell'ordine livello, conducibilità elettrica e temperatura delle acque della sorgente del Forame, posti sulla scala temporale.

Ci sono alcune lacune nel periodo compreso tra il 2022 e il 2023, quando la sorgente è andata in secca causando la ricezione di valori anomali che sono stati eliminati. Anche un arco temporale che va dal maggio al novembre 2024 non ci sono dati, a causa di una piena di dimensioni eccezionali che ha causato lo spostamento della struttura contenente il CTD-Diver. Il suo riposizionamento leggermente differente ha modificato probabilmente i valori di livello che da allora risultano mediamente più alti.
I valori di EC e T variano entrambi in relazione alla stagionalità e alle piene che provocano il loro abbassamento. Alcuni estremi legati ai valori passati sono legati a momenti in cui lo strumento si è trovato a vicino all'ambiente esterno, poco prima di una secca. (Fig. 36)

Per il Forame sono state effettuate delle misurazioni sul campo con l'utilizzo del mulinello, il quale associato alla sezione del fiume e posto in relazione alle misure dei livelli in quel momento è stato possibile ricavare la funzione che legava le due variabili $Q = 4.6619\ livello^{1.3637}$, ovvero la scala delle portate. (Fig. 37)

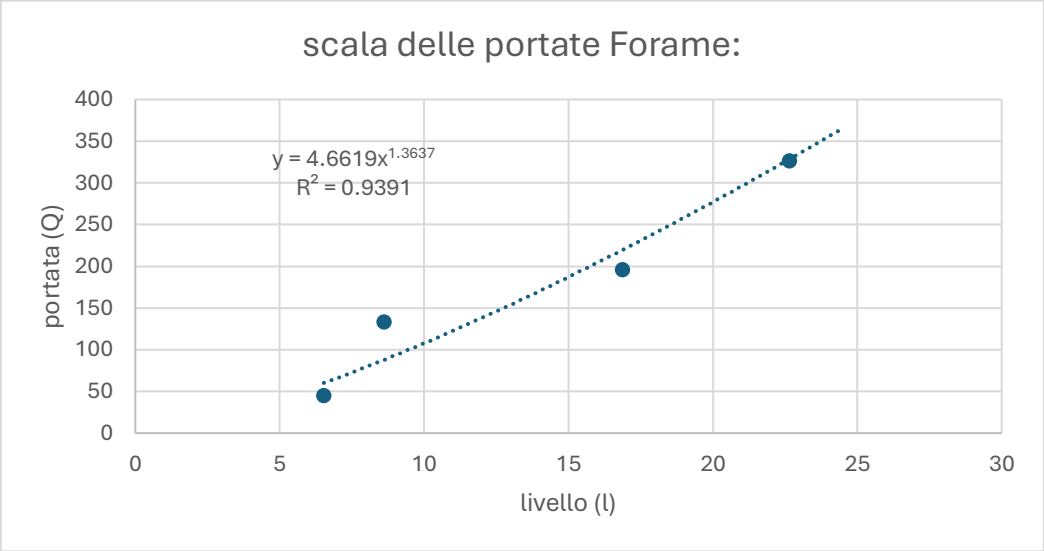

Fig. 37. Scala delle portate con i valori del livello (l) sulle ascisse e la portata (Q) sulle ordinate

Grazie all'equazione di questa curva è stato possibile ricavare i valori orari delle portate di cui troviamo i principali valori statistici e il grafico in ordine cronologico nella tabella (TAB. 9) e nel grafico (Fig. 38):

Sorgente	**Min**	**Primo Quartile**	**Media**	**Mediana**	**Terzo Quartile**	**Max**
Q_For	28.63582	98.437	192.3361	143.7847	222.09	1669.483

TAB. 9. Statistica delle portate Q in L/s della sorgente Forame.

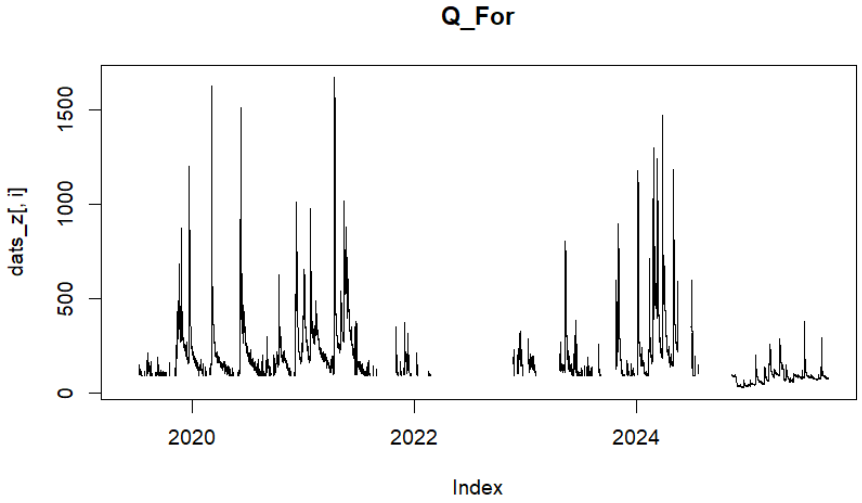

Fig. 38. Grafico delle portate Q di Forame

Il grafico delle portate evidenzia il periodo di forti piogge del 2024, con anche molti picchi degli anni precedenti, sintomi del fatto che questa sorgente presenta spesso piene forti. Solo nell'ultimo periodo si è assistito al placarsi di queste piene.

La FDC (Fig. 39) del Forame presenta un tratto iniziale molto ripido che arriva fino a circa l'8/9%, per poi iniziare a discendere in maniera molto graduale. La discesa così rapida è comune a tutte le sorgenti carsiche molto sensibili alle piogge.
Notiamo comunque come il 20% delle portate sia oltre i 500 L/s, che è un valore piuttosto elevato.

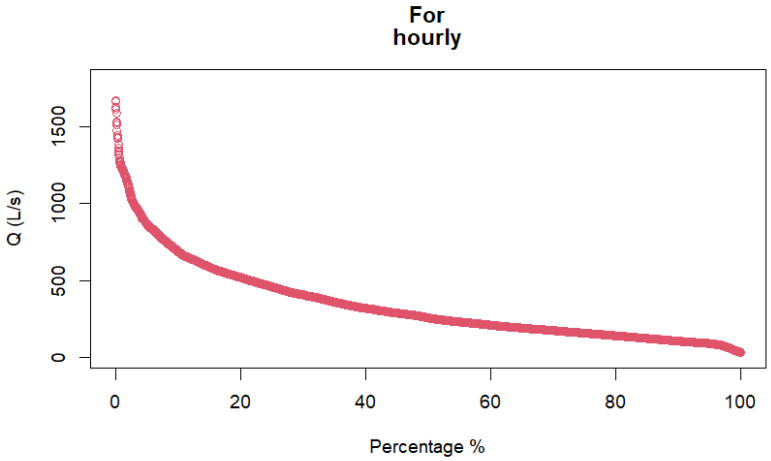

Fig. 39. Grafico dell'FDC

L'ACF (Fig. 40) del Forame presenta una curva che scende più lentamente. Inducendoci a dire che, se nelle prime ore la sorgente possieda poca "memoria", già dopo 100 ore inizia a limitare questo processo, sviluppando valori più costanti e presentando un carsismo limitato. Sembra quindi che dopo un centinaio di ore la sorgente cominci a regolare il flusso d'acqua in uscita dal sottosuolo.

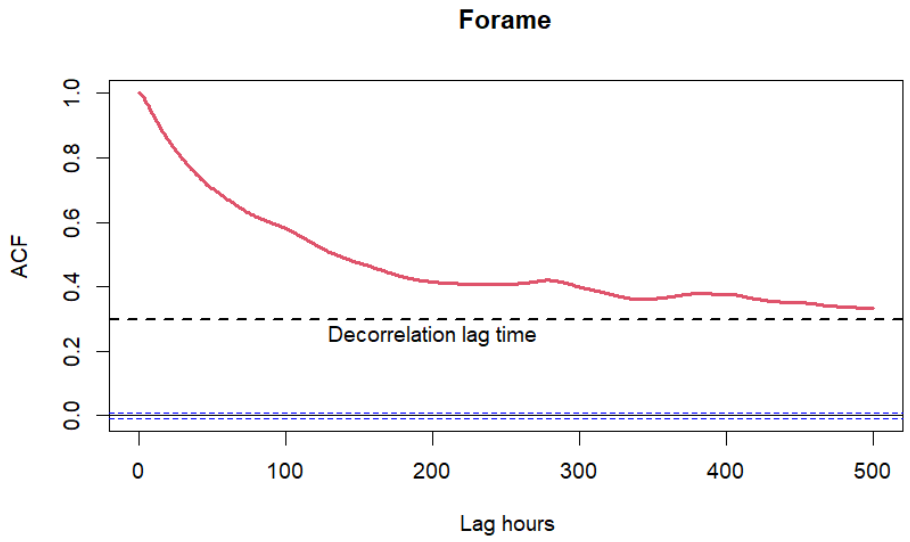

Fig. 40. Grafico dell'ACF

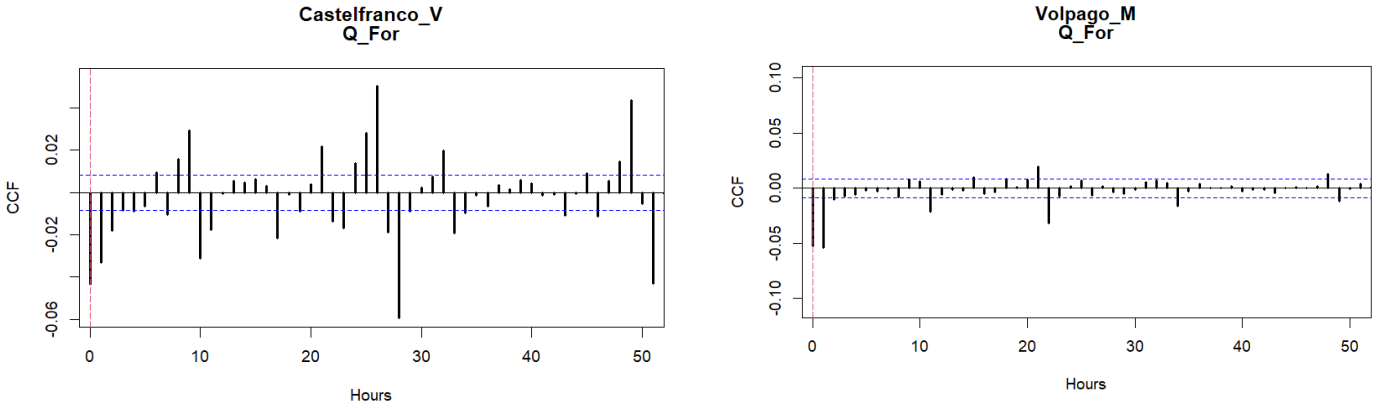

Fig. 41. Correlogramma piogge vs portate di Forame

Nel confronto tra le precipitazioni e la portata, (Fig. 41) la correlazione più significativa è quella con i valori di Castelfranco Veneto. È evidente come in seguito a un evento piovoso rilevato in quel luogo la sorgente aumenti il quantitativo di acqua in uscita con un lag di 8/9 ore. Mentre, ad esempio con Volpago, una correlazione positiva si ha dopo oltre 20 ore e in maniera poco percettibile.

Riguardo invece le cross-correlazioni che possiamo individuare tra Q, EC e T della sorgente abbiamo:

- Q vs T: (Fig. 42) vi è correlazione negativa e non molto rilevante che indica come l'aumento delle portate comporti un abbassamento generale della temperatura. Tipico delle sorgenti carsiche dove le acque piovane più fredde fuoriescono in fretta dal sistema.

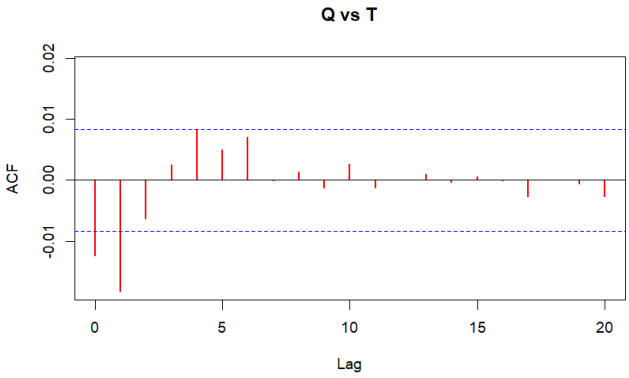

Fig. 42. Grafico Q vs T

- Q vs EC: (Fig. 43) ha correlazione negativa nei primi 2 lag, che ci indicano la fuoriuscita di acque diluite in seguito all'aumento di portata. La successiva risalita nel cross-correlogramma deriva dall'azione di ritorno all'equilibrio chimico della sorgente e dell'acquifero sottostante.

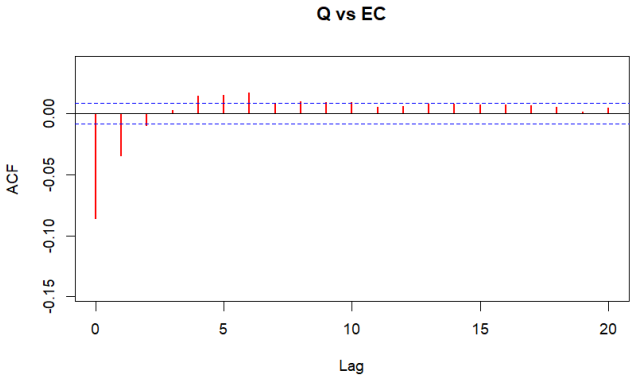

Fig. 43. Grafico Q vs EC

- T vs EC: (Fig. 44) trova una correlazione particolarmente positiva già a lag 0, portandoci a dire che i due parametri vanno di pari passo e all'aumentare della temperatura dell'acqua questa sarà tendenzialmente più concentrata, mentre più risulterà fredda più sarà diluita.

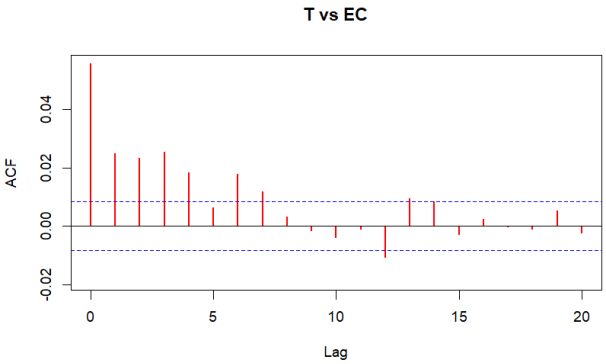

Fig. 44. Grafico T vs EC

Gli ultimi elementi ci portano a definire il Forame come una sorgente posta in un sistema carsico molto sviluppato in sola fase di piena con caratteristiche tipiche, in seguito prende il sopravvento una struttura sotterranea fratturata, con un serbatoio e una buona "memoria" specialmente a lungo termine.

Il valore del coefficiente di correlazione del VESPA della sorgente di Forame è -0.325, collocando anche questa sorgente tra quelle definite di “sostituzione”, come ben confermato dal cross-correlogramma temperatura (T) vs conducibilità elettrica (EC).

4.5 Confronto tra le sorgenti

Per un confronto efficace delle sorgenti è necessario comparare le loro componenti. Partendo dai grafici di livello (Fig. 45), temperatura (T) (Fig. 46) e conducibilità elettrica (EC) (Fig. 47) si nota come tutte e tre le sorgenti abbiano picchi elevati di livello in seguito alle piogge, anche se il Casselon risulta quello con valori maggiori. Le temperature delle acque risultano simili tra loro, con oscillazioni ed estremi legati alla stagionalità e a secche o piene. La EC ci fa notare come il Casselon abbia variazioni molto più ampie e picchi elevati, Tavaran ha valori in media più bassi, ma con picchi elevati e Forame si posiziona in una via intermedia.

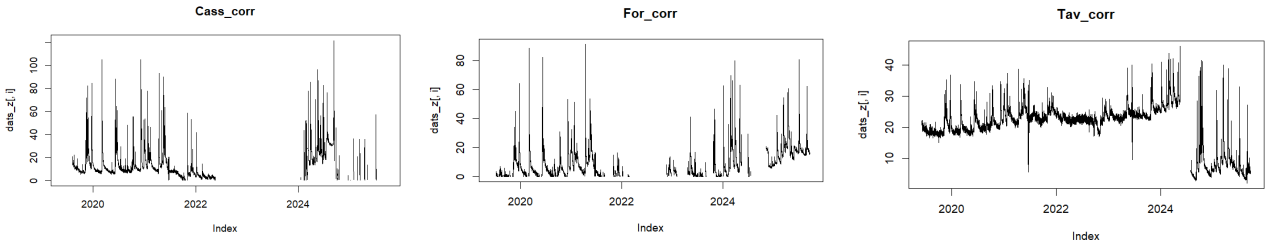

Fig. 45. I grafici di livello di Casselon, Forame e Tavaran Longo

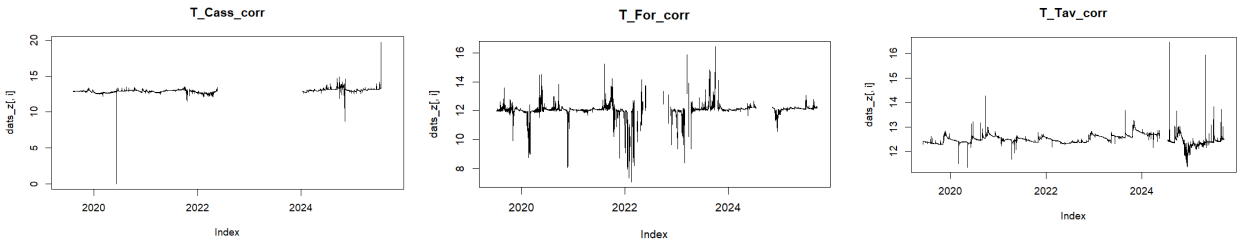

Fig. 46. I grafici di T di Casselon, Forame e Tavaran Longo

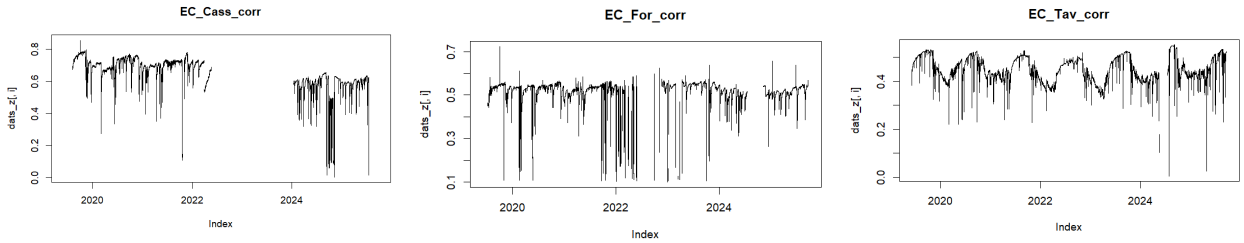

Fig. 47. I grafici di T di Casselon, Forame e Tavaran Longo

Paragonando i grafici delle portate (Fig. 48) vediamo come il Casselon presenta grande variabilità e picchi estremi comuni nelle sorgenti carsiche sviluppate, Tavaran Longo

abbia portate più basse e stabili, mentre Forame vede portate simili a Casselon, ma con una regolazione più marcata nel lungo periodo.

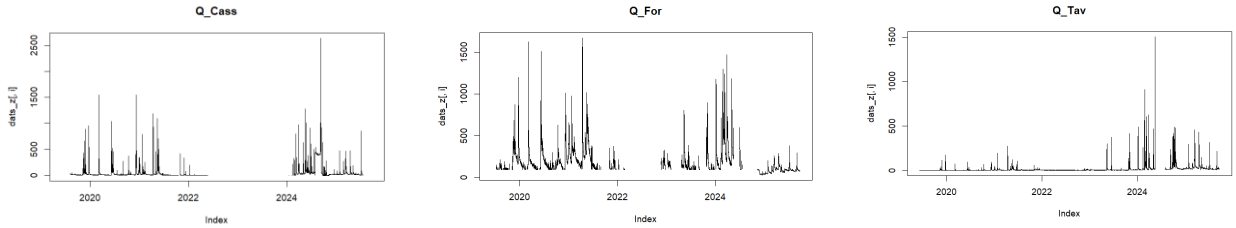

Fig. 48. I grafici di Q di Casselon, Forame e Tavaran Longo

Le FDC (Fig. 49) confrontate tra di loro mostrano Forame e Tavaran con discese molto rapide, valori massimi di portata e frequenze di simili; mentre Forame ha una rapida discesa iniziale, ma anche un deflusso di base evidente nel lungo periodo. Casselon e Tavaran si assomiglia in termini di FDC, mentre il forame si discosta da esse nei periodi di piena e di mantiene con una portata più regolare.

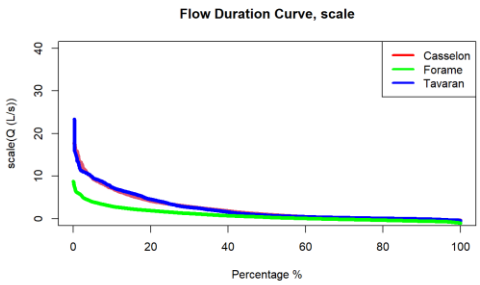

Fig. 49. grafico di comparazione delle FDC con portate scalate

Ad un'analisi dell'ACF (Fig. 50) comparata possiamo osservare come Forame presenta una curva meno ripida con una "memoria" più lunga rispetto alle altre sorgenti. Tavaran possiede una curva molto ripida che indica una "memoria" più breve, ma anche essa tende a regolarsi nel tempo. Casselon si pone come via di mezzo, una discesa rapida indicatrice di elevato carsismo, ma anch'esso con un assestamento dovuto alla presenza di serbatoi sotterranei.

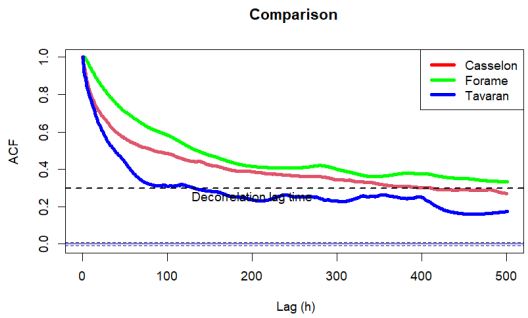

Fig. 50. grafico di comparazione delle ACF

Al confronto dei cross-correlogrammi, tutte e tre le sorgenti presentano una correlazione negativa tra Q ed EC (Fig. 52) iniziale indicando uscita di acqua piuttosto diluita probabilmente meteorica, elemento che va in contrasto con la correlazione positiva tra Q e T (Fig. 51) di Casselon e Tavaran. Ciò ci porta a pensare che l'acqua più calda in uscita dalla sorgente dopo eventi piovosi provenga dall'interno del sistema. Tale contraddizione si evidenzia infine nelle correlazioni tra T ed EC (Fig. 53) dove per Casselon e Tavaran i valori sono negativi; quindi, con l'aumento della T diminuisce l'EC, mentre per Forame notiamo una correlazione positiva.

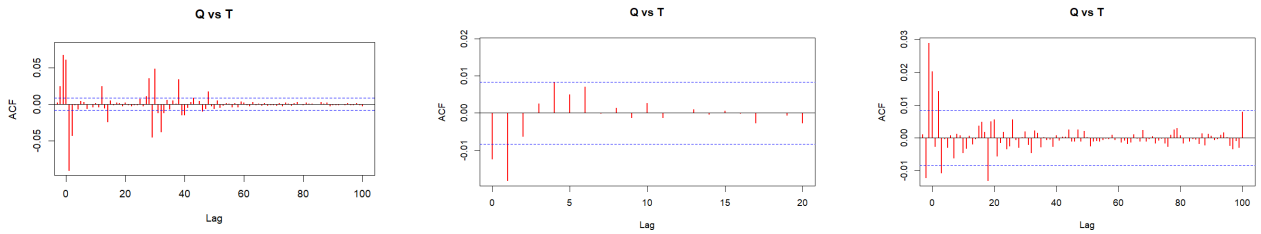

Fig. 51. I grafici di Q vs T di Casselon, Forame e Tavaran Longo

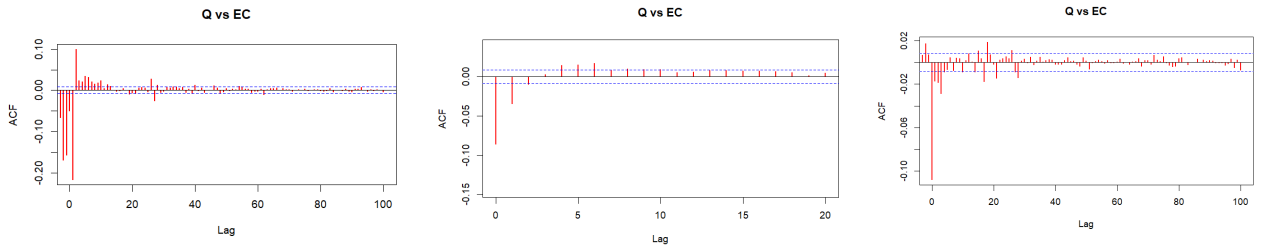

Fig. 52. I grafici di Q vs EC di Casselon, Forame e Tavaran Longo

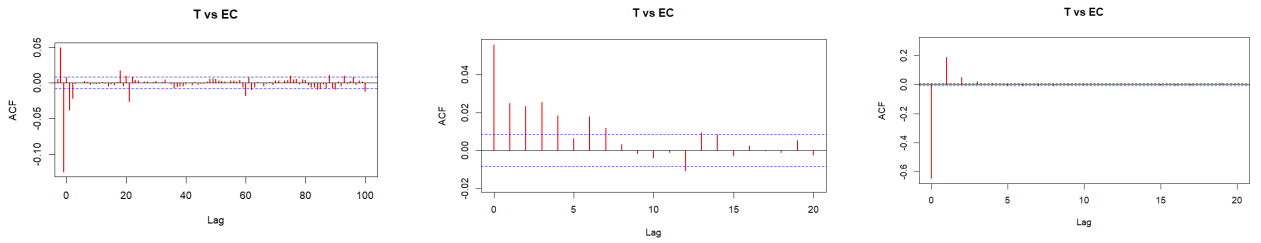

Fig. 53. I grafici di T vs EC di Casselon, Forame e Tavaran Longo

5. CONCLUSIONE

Lo scopo di questo lavoro consisteva nello studio di tre sorgenti situate sul colle del Montello (Casselon, Tavaran Longo e Forame), grazie al lavoro di monitoraggio e raccolta di dati in un periodo che va da giugno 2019 a settembre 2025. I valori raccolti in questo lasso temporale includono temperatura, conducibilità elettrica e livello dell'acqua orari, grazie a strumenti automatici di acquisizione dati posti in ognuna delle sorgenti. A questi sono stati aggiunti dati di portata misurati manualmente a cadenza mensile, che ci hanno permesso di costruire le scale di portata, i valori ricavati dagli strumenti sono stati confrontati anche con i valori pluviometrici di stazioni meteorologiche vicine, con istogrammi e grafici nel tempo.
Tali informazioni sono state molto utili per confrontare e identificare le caratteristiche delle singole sorgenti. I principali metodi di analisi sono stati la produzione di grafici che mostrassero il comportamento di T, EC, livello e portata nel tempo, assieme alle curve di FDC e ACF che ci hanno permesso di valutare la memoria della sorgente, le variazioni e le frequenze delle Q. Dati tutti questi elementi, sono stati costruiti dei cross-correlogrammi tra le statistiche chimico-fisiche elencate in precedenza per osservare eventuali correlazioni. La costruzione di tutte queste rappresentazioni e confronti è stata possibile grazie all'utilizzo del software RStudio.
Infine, anche con l'utilizzo del coefficiente di correlazione sono state tratte le seguenti conclusioni:

- Casselon: sembra risultare la sorgente con un sistema carsico più sviluppato, molto reattiva alle piogge, con variazioni di portata elevate e "memoria" piuttosto breve ρ = 0.193 è un valore intermedio che, associato ai cross-correlogrammi, ci porta a dire che il comportamento a "pistonaggio" può essere sicuramente una soluzione plausibile, con un'uscita di acqua sotterranea rilevante dopo le piogge.
- Tavaran Longo: le sue caratteristiche la pongono come una sorgente carsica dalle caratteristiche miste, presenta variabilità di portate, ma il deflusso di base e la costanza piuttosto rilevanti dei valori chimico-fisici indicano la presenza di un serbatoio interno al sistema. ρ = -0.456 che lo pone tra le sorgenti a "sostituzione" è coerente con i grafici precedenti.
- Forame: è la sorgente che presenta il sistema carsico meno sviluppato dei tre, anch'esso con portate molto variabili, ma caratteristiche di "memoria" e deflusso di base tipiche di sorgenti da acquiferi più strutturati. La ρ= -0.325 che la inserisce nelle sorgenti di "sostituzione" risulta un po' fuorviante, ma è vicina ai

range delle sorgenti di “omogeneizzazione”, indice di un sistema carsico ancora “giovane”.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Ferrarese, F., Sauro, U., *"Montello; La geomorfologia del Montello"*, Museo di Storia Naturale e Archeologia, Montebelluna, 2005.
2. Ferrarese, F., Sauro, U., *"The Montello Hill: the 'Classical Karst' of the conglomerate rocks"*, *ACTDa Carsologica* (Ljubljana), 2005.
3. Zampieri, D., Ferrarese, F., Sauro, U., *"Aspetti della speleogenesi del Montello"*, Museo di Storia Naturale e Archeologia, Montebelluna, 2005.
4. Garlato, A., Mozzi, P., *"Montello; I suoli del Montello"*, 3KCL, 2005.
5. Boano, F., Viglione, A., Vigna, B., *"Analisi di portate in un sistema acquifero carsico"*, Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino, 2020.
6. D'Alberto, L., *"Approfondimento caratteristiche metodo VESPA per la delimitazione delle aree di salvaguardia delle sorgenti"*, ARPA Veneto, 2022.
7. De Waele, J., Piccinini, L., *"Speleogenesi e morfologia dei sistemi carsici in rocce carbonatiche"*, Istituto Italiano di Speleologia, Bologna / Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, 2008.
8. Fiorillo, F., Doglioni, A., *"The relation between karst spring discharge and rainfall by cross-correlation analysis (Campania, southern Italy)"*, *Hydrogeology Journal*, 18, 1881–1895, 2010
9. Ford, D. C., Williams, P., *"Karst Hydrogeology and Geomorphology"*, Wiley, Chichester / Sussex (UK), 2007.
10. Galleani, L., Vigna, B., Banzato, C., Lo Russo, S., *"Validation of a Vulnerability Estimator for Spring ProteCTDion Areas: the VESPA index"*, *Journal of Hydrology*, 396(3–4), 233–245, 2011.
11. Lo Russo, S., Suozzi, E., Gizzi, M., Taddia, G., *"SOURCE: a semi-automatic tool for spring-monitoring data analysis and aquifer charaCTDerisation"*, *Environmental Earth Sciences*, 80, 710, 2021.
12. Potter, K., *"Methods for Presenting Statistical Information: The Box Plot"*, University of Utah, School of Computing, Salt Lake City, UT, 2006.
13. R Core Team, *"R: A Language and Environment for Statistical Computing"*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2025. Disponibile all'indirizzo: https://www.R-projeCTD.org/ (accesso in data ___).
14. RStudio Team, *"RStudio: Integrated Development for R"*, RStudio, PBC, Boston, 2025. Disponibile all'indirizzo: https://posit.co/ (accesso in data ___).
15. Searcy, J. K., *"Flow Duration Curve, Manual of Hydrology: Part 2. Low-Flow Techniques"*, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1542-A, 1959.

16. Spitzer, M., Wildenhain, J., *"BoxPlotR: a web tool for generation of box plots"*, *Nature Methods*, 11, 121–122, 2014.
17. Torresan, F., Fabbri, P., Piccinini, L., Dalla Libera, N., Pola, M., Zampieri, D., *"Defining the hydrogeological behavior of karst springs through an integrated analysis: a case study in the Berici Mountains area (Vicenza, NE Italy)"*, *Hydrogeology Journal*, 28, 1229–1247, 2020.