UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE CHIMICHE

DIPARTIMENTO DI GEOSCIENZE

**CORSO DI LAUREA IN SCIENZE E TECNOLOGIE PER L'AMBIENTE**

# MONITORAGGIO E ANALISI IDROGEOLOGICA DI ALCUNE SORGENTI CARSICHE DEL MONTELLO

Relatore: Prof. Paolo Fabbri

Laureando: Federico Scapin
(nr. 1228753)

Anno Accademico 2021/2022

# INDICE

Introduzione 1

1. Il carsismo 3

1.1. Sistema carsico 4

1.2. Sorgenti carsiche 6

2. Inquadramento geografico della zona di studio 9

2.1. Geomorfologia del Montello 10

2.2. L'azione del fiume Piave 12

2.3. Geologia e carsismo nel Montello 12

2.4. Sistema idrico del Montello 14

3. Strumenti di monitoraggio e metodi di analisi 15

4. Analisi e commento dei dati 23

4.1. Dati meteorologici 23

4.2. Sorgente Casselon 26

4.3. Sorgente Tavaran Lungo 32

4.4. Sorgente Forame 38

5. Conclusioni 43

Bibliografia 45

# INTRODUZIONE

Questo lavoro nasce con l'intento di effettuare uno studio idrogeologico su tre sorgenti carsiche situate nel rilievo del Montello (TV). I dati sui quali è stato svolto il lavoro sono stati ottenuti grazie ad un piano di monitoraggio mediante appositi strumenti (CTD-Diver) posti in prossimità delle tre sorgenti, in grado di memorizzare con cadenza oraria i valori di livello, temperatura e conducibilità elettrica dell'acqua.

I dati raccolti fanno riferimento ad un periodo della durata poco inferiore ai tre anni e le serie temporali sono state sottoposte ad un'analisi statistica mediante un apposito software (R-Studio) comparandole con le corrispondenti condizioni meteo della zona, in particolare con i dati delle precipitazioni.

Grazie al monitoraggio, alla raccolta dati e alla loro successiva analisi sono state quindi evidenziate importanti informazioni in merito al comportamento delle tre sorgenti, ai loro sistemi/modelli idrogeologici e alla loro teorica vulnerabilità.

# 1. IL CARSISMO

Per carsismo si fa riferimento all'insieme dei processi di alterazione delle rocce in cui il fenomeno dominante è quello della dissoluzione della roccia in acqua. È bene ricordare che tutte le rocce sono, in una certa misura, solubili in acqua, ma che solo alcune portano allo sviluppo delle tipiche forme carsiche e dell'assetto idrologico caratterizzato da sistemi idrici sotterranei complessi, nei quali l'acqua circola in condotti e cavità più o meno sviluppate.

Le rocce maggiormente interessate dal fenomeno carsico sono quelle carbonatiche e quelle evaporitiche.

Il processo carsico meglio studiato e conosciuto è quello che coinvolge le rocce carbonatiche, infatti queste costituiscono circa il 12-15% della superficie terrestre emersa, ed è descritto dalla reazione fra acqua, anidride carbonica e carbonato di calcio, riportata nell'equilibrio chimico di seguito:

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \leftrightarrow Ca(HCO_3)_2$$

L'acqua coinvolta nel processo è quella piovana che si arricchisce di anidride carbonica durante l'attraversamento dell'atmosfera o percolando nei suoli, che forniscono anche altri acidi organici rendendola di fatto ancora più corrosiva.

La $CO_2$ che entra in soluzione forma acido carbonico ($H_2CO_3$), un acido debole che si dissocia liberando protoni ($H^+$) responsabili dell'acidificazione dell'acqua e della trasformazione del carbonato di calcio ($CaCO_3$) in bicarbonato di calcio ($Ca(HCO_3)_2$), che è solubile e si dissocia nei suoi ioni $Ca^{2+} + 2HCO_3^-$ (De Waele e Piccini, 2008).

La solubilità del materiale coinvolto e la quantità di $CO_2$ che entra in soluzione però non sono gli unici fattori coinvolti nel processo di dissoluzione; infatti, ricopre particolare importanza anche la struttura del complesso roccioso e la presenza di fratture e discontinuità che facilitano l'accesso all'acqua e ne determinano le vie di scorrimento preferenziali.

L'acqua che si infiltra nelle discontinuità opera sulla roccia due azioni: un'erosione meccanica per abrasione ad opera delle particelle che trasporta ed un'azione chimica sciogliendo la roccia per corrosione.

Il flusso d'acqua compie quindi un lento lavoro di modellazione dell'ammasso cercando nuove vie di deflusso e, soprattutto, allargando quelle esistenti che percorre portando alla formazione delle tipiche forme carsiche (Del Soldato, 2015).

## 1.1. Sistema carsico

Per sistema carsico si fa comunemente riferimento all'insieme delle forme superficiali e soprattutto sotterranee prodotte da processi carsici, la cui funzione è quella di drenare le acque verso una sorgente. Si tratta perciò di un peculiare tipo di bacino idrogeologico in cui ha particolare rilevanza la componente sotterranea del deflusso e vi è una ridotta circolazione idrica superficiale (De Waele e Piccini, 2008).

Un sistema carsico può essere suddiviso verticalmente in una serie di zone (Fig. 1) caratterizzate da flussi idrici in condizioni idrodinamiche differenti:

1) *Epicarso*: è la zona aerea più superficiale e di alimentazione dell'idrostruttura che raccoglie le acque meteoriche o di scorrimento superficiale indirizzandole in profondità mediante infiltrazione diffusa (fratture) o concentrata (inghiottitoi).
2) *Zona vadosa*: è la zona non satura in cui i condotti e le fratture sono per la maggior parte del tempo asciutte e permettono la circolazione idrica temporanea e il rapido trasferimento delle acque meteoriche in profondità, con percorsi prevalentemente verticali.
3) *Zona epifreatica*: si tratta di una ristretta fascia di transizione con oscillazione potenziometrica.
4) *Zona freatica*: è la zona satura che si estende fino al livello impermeabile di base ed è caratterizzata da fratture perennemente occupate dall'acqua con un flusso idrico di tipo prevalentemente orizzontale che determina il trasferimento delle acque dalle zone di accumulo a quelle di emergenza e scarico.
5) *Area sorgiva*: rappresenta la zona in cui la falda freatica incontra la superficie topografica originando una o più sorgenti.

I vari ambienti che costituiscono il sistema carsico presentano diverse caratteristiche morfologiche in funzione delle modalità di flusso dell'acqua, infatti, nella zona vadosa assume maggiore importanza il ruolo dei fenomeni di erosione meccanica, mentre nella zona satura prevale la dissoluzione chimica. La fascia epifreatica di oscillazione, essendo caratterizzata da variazioni stagionali del flusso, presenta morfologie miste dovute sia all'azione meccanica che a quella corrosiva (Del Soldato, 2015).

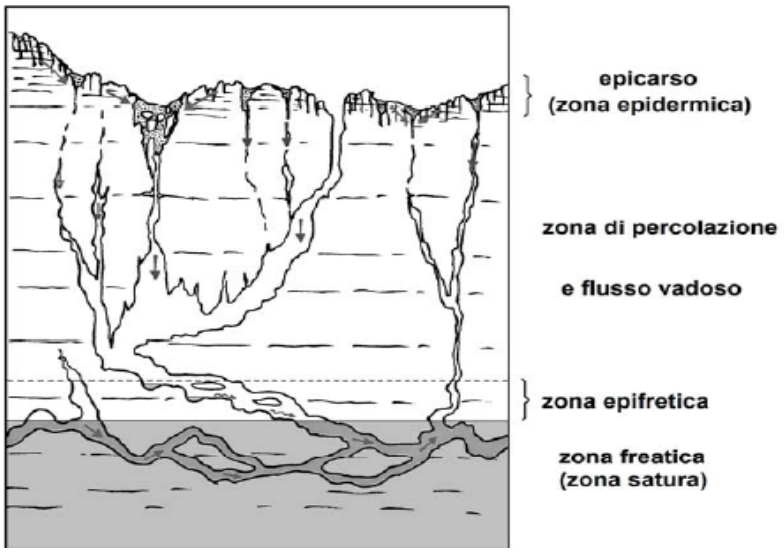



Figura 1: suddivisione verticale delle tipiche zone che costituiscono un sistema carsico (De Waele e Piccini, 2008).

Le struttura di un sistema carsico dipende da svariati fattori che possono avere un ruolo passivo (caratteristiche geologiche) o attivo (condizioni ambientali e tettonica). Le condizioni ambientali che si manifestano con modi ed entità diverse durante l'evoluzione del sistema e lo stesso flusso d'acqua che diventa via via più turbolento a causa del progressivo allargamento dello spazio vuoto, fanno sì che i sistemi carsici si evolvano nel tempo molto più velocemente dei normali sistemi idrici sotterranei (Savio, Stadler, et al., 2018).

A causa dell'elevata permeabilità generata dagli intensi processi erosivi, gli acquiferi carsici risultano essere estremamente vulnerabili all'inquinamento, infatti, il tempo impiegato dall'acqua per passare dalla zona di alimentazione alle sorgenti è solitamente molto breve e quindi anche le capacità di autodepurazione vengono meno.
Un inquinante che raggiunge la fascia freatica può compromettere la qualità dell'acqua per lunghi periodi rimanendo in parte intrappolato nelle camere della zona satura dalle quali viene mobilizzato solo nel corso degli episodi di piena (similmente a quanto accaduto alla sorgente Forame coinvolta in questo studio) (Del Soldato, 2015).
Il grado di vulnerabilità cambia a seconda che l'acquifero sia caratterizzato da un deflusso condizionato prevalentemente da condotti carsici (più permeabili) o dal reticolo di fratture (meno permeabile). La stima del flusso delle acque sotterranee e del trasporto di soluti è quindi una componente essenziale della conservazione, gestione e protezione delle falde dalla contaminazione (Ghasemizadeh, Hellweger, et al., 2012).

## 1.2. Sorgenti carsiche

Una sorgente rappresenta il punto superficiale in cui si genera naturalmente un flusso d'acqua, con una determinata portata in uscita, derivante dall'intersezione di un acquifero con la superficie del terreno.
Le sorgenti carsiche sono quindi le sorgenti associate ad un acquifero carsico e la loro risposta in termini di variazione di portata nel tempo dipende dal grado di carsismo dell'acquifero cui fanno riferimento.
All'interno di un sistema carsico si possono distinguere due tipologie di sorgenti:

1) le sorgenti a regime perenne ("underflow springs") sono situate sotto la tavola d'acqua e drenano la zona freatica durante il normale flusso di base.
2) le sorgenti a regime temporaneo ("overflow springs") drenano la zona epifreatica durante gli eventi di piena fungendo da straripamento del sistema carsico, mentre durante il normale flusso di base rimangono in secca in quanto situate al di sopra della tavola d'acqua (Savio, Stadler, et al., 2018).

Il comportamento di una sorgente può essere rappresentato tramite il suo idrogramma che ne esprime la variazione della portata nel tempo, e si può suddividere in un normale deflusso di base e in una serie di picchi generati dagli eventi di ricarica (precipitazioni che apportano acqua) con il loro successivo scarico; i sistemi carsici mostrano spesso una risposta idrologica immediata agli eventi di precipitazione, con una rapida dinamica di scarico in sorgente.
L'idrogramma assume un comportamento carsico quando la tavola d'acqua si alza sopra un certo livello raggiungendo i condotti ben sviluppati, mentre per il resto del tempo ha un comportamento da fratturato con un deflusso di base più costante. A seconda delle dimensioni e della frequenza dei picchi si può quindi dedurre se si tratta di un sistema con un grado di carsismo più o meno elevato.

L'indice di svuotamento $Q_t$ di Maillet fornisce inoltre un'idea del tempo in cui il sistema può sopravvivere senza ulteriori precipitazioni che lo alimentino e può essere calcolato secondo l'equazione:

$$Q_t = Q_0 * \exp\{-\alpha*(t-t_0)\}$$

in cui $Q_t$ è la portata al tempo t, $Q_0$ è la portata all'inizio della fase di scarico, cioè al tempo $t_0$, e α è il coefficiente di esaurimento; più α è elevato e più lo svuotamento del serbatoio è rapido (nelle sorgenti carsiche infatti α è elevato).

Un altro parametro utile è l'indice di variabilità Rv di Meinzer che permette di classificare la variabilità della sorgente in: costante (Rv<25%), subvariabile (25%<Rv<100%) o variabile (Rv>100%) e può essere calcolato secondo l'equazione:

$$Rv = (Q_{max} - Q_{min})*100/Q_{med}$$

in cui $Q_{max}$ è la portata massima, $Q_{min}$ è la portata minima e $Q_{med}$ quella media.

# 2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DELLA ZONA DI STUDIO

Il Montello (Fig. 2) è un colle isolato nell'alta pianura trevigiana dalla quale emerge come un "dorso di balena" (Stoch e Tomasin, 2002); spostandosi dalla laguna di Venezia verso le Prealpi precede infatti tutti gli altri colli subalpini.
Il rilievo ha la forma di un ellissoide allungato lungo l'asse maggiore per 13 km, in direzione ENE-WSW, ed esteso perpendicolarmente per circa 6 km lungo l'asse minore, con una superficie totale di quasi 60 $km^2$. Ha una quota media di 208 m s.l.m., elevandosi di circa 100 m sulla pianura che lo circonda, e raggiunge la quota massima di 369 m s.l.m. nella porzione centro-occidentale, in corrispondenza di S. Maria della Vittoria. (Ferrarese e Sauro, 2005).
Il colle (Fig. 3) è lambito a nord e ad est dal fiume Piave, si immerge verso sud nell'alta pianura veneta e ad ovest trova una diretta continuazione nella collina di Montebelluna, detta "Capo di Monte", separata da un antico meandro incastrato del Piave (Ferrarese, 2000).

Lo stesso nome "Montello" evidenzia la peculiarità del basso altopiano che, per il suo carattere compatto, non si presenta né come un colle, simile agli altri che delimitano l'alta pianura articolati in dorsali, né come un monte a causa della sua modesta altezza. La notevole estensione in senso laterale, tuttavia, gli conferisce il nome di "piccolo monte" o di "basso monte" e quindi di "montello" (Ferrarese e Sauro, 2005).

Figura 2: Immagine satellitare del Montello (TV) acquisita in data 04/11/2020.

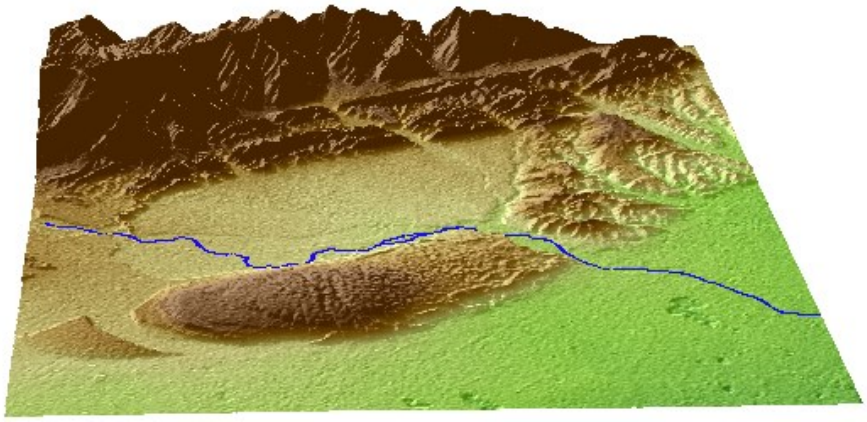


Figura 3: Modello tridimensionale del Montello realizzato tramite il sistema informativo geografico SAGA GIS; si può osservare il corpo principale del rilievo (al centro), che precede gli altri colli subalpini, il corso del Piave e la collina Capo di Monte (in basso a sinistra) separata da un antico meandro del fiume, l'attuale solco di Biadene.

## 2.1. Geomorfologia del Montello

Il Montello è tra le formazioni più recenti del margine meridionale delle Prealpi Venete e viene definito come una morfostruttura, cioè una forma che trae origine da processi che hanno luogo all'interno della crosta terrestre (processi endogeni o tettonici) e che continuamente la modificano.

Dal punto di vista dei caratteri strutturali, la porzione occidentale è una "dorsale anticlinale", cioè una dorsale formata in seguito ad un fenomeno di ripiegamento degli strati geologici, incurvati con la convessità rivolta verso l'alto (Fig. 4), a causa della compressione ad opera di forze perpendicolari rispetto all'asse di allungamento del rilievo (Ferrarese e Sauro, 2005).

Tale settore è costituito da sette terrazzi (Fig. 5) che degradano verso ovest con un motivo a gradinata ed imputabili a cicli erosivi dell'antico corso del Piave durante l'emersione del colle, prima che il fiume abbandonasse la paleoansa di Biadene a favore dell'attuale percorso verso est (Stoch e Tomasin, 2002). Ognuno dei terrazzi presenta un diverso grado di carsificazione che incrementa verso l'alto evidenziando un aumento dell'età con la quota (Zampieri, 2005).

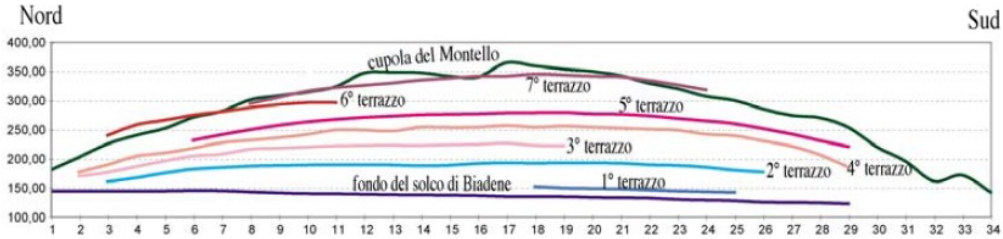



Figura 4: I profili longitudinali medi dei terrazzi, della cupola principale del Montello e del fondo del solco di Biadene evidenziano come le superfici di spianamento fluviale siano state deformate dalla tettonica a formare degli archi, espressione del ripiegamento ad anticlinale della parte più superficiale della morfostruttura (Ferrarese e Sauro, 2005).

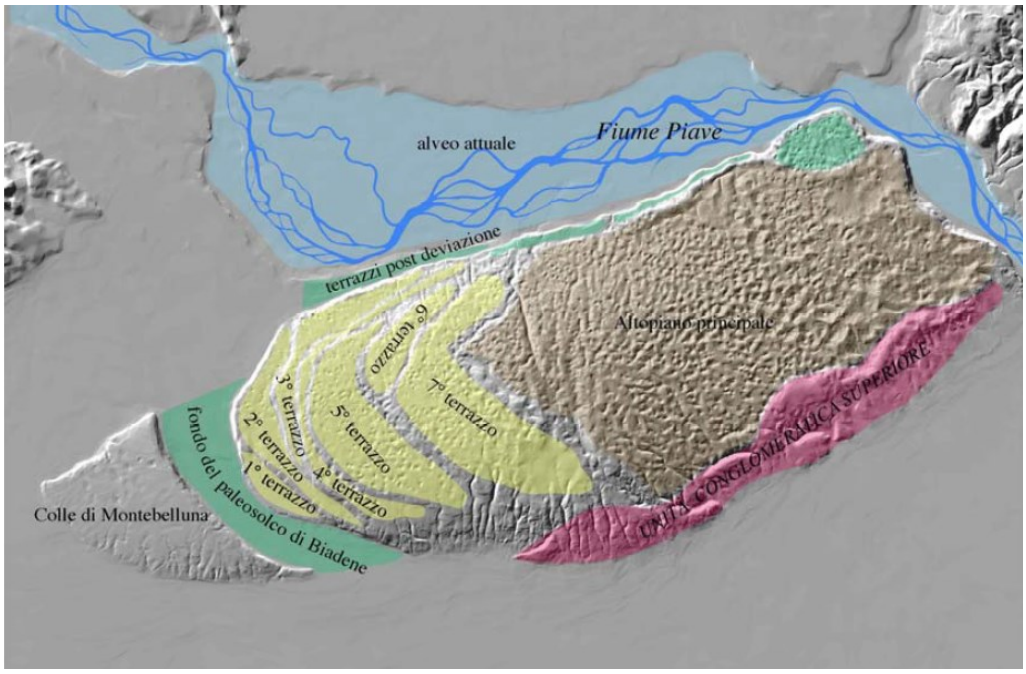



Figura 5: Modello digitale del rilievo del Montello e delle sue principali unità geomorfologiche (Ferrarese e Sauro, 2005).

La porzione orientale del colle invece si presenta come un anticlinorio, cioè un'anticlinale complicata dal susseguirsi di ondulazioni positive e negative secondarie (Stoch e Tomasin,2002). In questa zona il rilievo a doline rappresenta l'aspetto paesaggistico dominante, sia per la varietà delle dimensioni, sia perché occupa e influenza pressoché l'intera superficie (Ferrarese, 2000).

Le pendenze del colle non sono notevoli all'interno della sua superficie, ma raggiungono valori elevati ai margini dell'altopiano, soprattutto ad est e a nord dove il limite del rilievo è mantenuto netto da scarpate di erosione fluviale tuttora attive.

## 2.2. L'azione del fiume Piave

Dalle interrelazioni tra gli episodi di sollevamento e i processi dell'erosione fluviale si sono generate varie tipologie di forme, tra le quali:

1) altopiani di spianamento
2) terrazzi di spianamento
3) valli antecedenti incastrate nel rilievo in sollevamento
4) alvei attivi di spianamento in roccia parzialmente mascherati da coperture alluvionali

L'altopiano sommitale del Montello può essere considerato un altopiano di spianamento che per un certo tempo è stato livellato dal Piave, fino a quando il rilievo ha saputo prevalere sull'azione del corso d'acqua.

Per effetto della deformazione tettonica, il fiume, inizialmente incastrato nel settore occidentale, ha spostato il suo corso sempre più verso ovest scavando una valle antecedente (oggi chiamata solco di Biadene) fortemente asimmetrica che ha per versante destro una ripida scarpata e per versante sinistro una gradinata di sette terrazzi in roccia (Fig. 5). Nella formazione della valle si sono infatti alternate fasi nelle quali il corso d'acqua riusciva ad allargare e spianare il suo fondovalle con fasi nelle quali il fiume si approfondiva (Ferrarese e Sauro, 2005).

## 2.3. Geologia e carsismo nel Montello

La litologia del colle è rappresentata principalmente da un conglomerato in cui ciottoli di varia dimensione, costituiti per la maggior parte da calcari e dolomie, sono legati da un cemento carbonatico formando una serie di banchi suborizzontali, interrotti localmente da lenti marnose, argillose o arenacee (Ferrarese, 2000).

L'innesco del processo erosivo avviene quindi per dissoluzione del cemento del conglomerato con la liberazione dei ciottoli che inizialmente fungono da agente erosivo per trascinamento da parte della corrente idrica; la combinazione di erosione chimica e meccanica spiega la diffusione delle forme carsiche sia superficiali che profonde (Ferrarese, Sauro e Zampieri, 2005).

L'aspetto carsico più evidente è rappresentato dall'assenza di idrografia superficiale e dalle oltre 2000 doline presenti (Fig. 6), affiancate da forme ipogee quali grotte, fratture o cavità di piccole dimensioni (Sauro e Castiglioni, 2005).

Complessivamente si riconoscono almeno sette piani di sviluppo della cavità, correlabili ai terrazzi d'erosione (Fig. 5) e quindi ad antichi livelli di base. Sulle superfici più antiche, come sull'altopiano sommitale ed in particolare nel suo settore orientale, il progressivo allargamento delle doline ha spesso portato alla fusione di più depressioni semplici a costituire forme complesse chiamate "doline multiple".

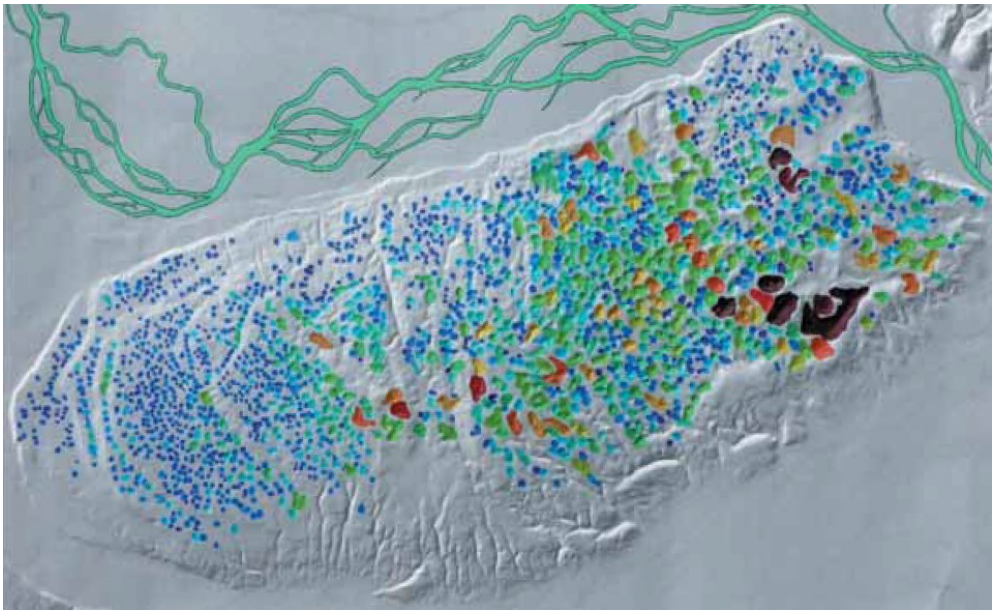


Figura 6: Distribuzione delle doline e forme carsiche del Montello; il colore da blu a rosso scuro è in relazione all'aumento di volume (Ferrarese e Sauro, 2005).

Oltre alle doline, nel Montello sono presenti anche forme fluviocarsiche come valli secche, valli cieche e valli chiuse:

1) Una valle secca è determinata da un fenomeno di corrosione accelerata del fondovalle connesso con la dinamica dell'epicarso e si presenta poco profonda con un fondo arrotondato e privo di un corso d'acqua.

2) Una valle cieca consiste in un solco percorso da un torrentello che finisce in un inghiottitoio, in grado di assorbire le acque, a monte del quale c'è una contropendenza; dove scorre l'acqua la valle ha continuato ad approfondirsi, mentre il tratto oltre l'inghiottitoio è rimasto sopraelevato.

3) Una valle chiusa presenta un netto gradino alla cui base scaturisce una sorgente che alimenta il corso d'acqua del fondovalle; un esempio è la valle dell'Acqua con la sorgente Forame, presa in esame per il seguente studio (Ferrarese e Sauro, 2005).

## 2.4. Sistema idrico del Montello

Le risorgive carsiche sono localizzate prevalentemente al contatto con la pianura e lungo il Piave, mentre le sorgenti poste alla superficie del colle sono molto scarse e in genere temporanee a causa dell'elevata permeabilità del terreno e dell'assorbimento dovuto al carsismo ipogeo che consentono solo qualche ruscellamento in seguito a forti acquazzoni (Stoch e Tomasin, 2002).

Osservando la geomorfologia del colle sono riconoscibili alcuni elementi di un reticolo idrografico locale, anche se risultano spesso modificati dai processi carsici, i quali creano vie di deflusso in profondità sottraendo gran parte dell'acqua superficiale (Fig. 7).

Le forme vallive più evidenti sono ubicate nelle zone a maggiore pendenza; in particolare il versante meridionale del colle è inciso da frequenti valli secche che partendo dall'altopiano sommitale raggiungono la pianura con andamento quasi rettilineo. Spesso però deviano o sono catturate da valli più larghe e profonde ad andamento parallelo all'asse del colle e ubicate nelle zone perimetrali del rilievo. È evidente che le incisioni di tipo "fluviale" sono influenzate da elementi strutturali quali fratture o piccole faglie che sono un'espressione della deformazione tettonica in atto.

Il versante opposto invece è meno pendente e presenta forme fluviali poco riconoscibili, ridotte ad una "cascata" di doline allineate (Ferrarese e Sauro, 2005).

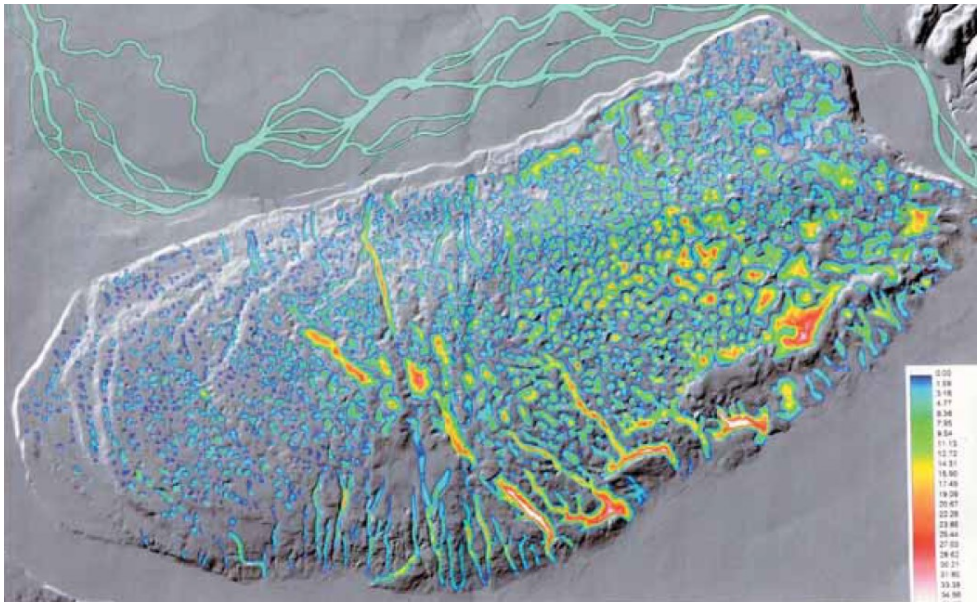


Figura 7: Forme fluviocarsiche e carsiche del Montello con relativa profondità che aumenta dal colore blu al rosso (Ferrarese e Sauro, 2005).

# 3. STRUMENTI DI MONITORAGGIO E METODI DI ANALISI

Lo studio idrogeologico svolto ha previsto un costante monitoraggio mediante dei sensori multiparametrici (CTD-Diver) posti in prossimità delle tre sorgenti Casselon, Tavaran Lungo e Forame (Fig. 8).

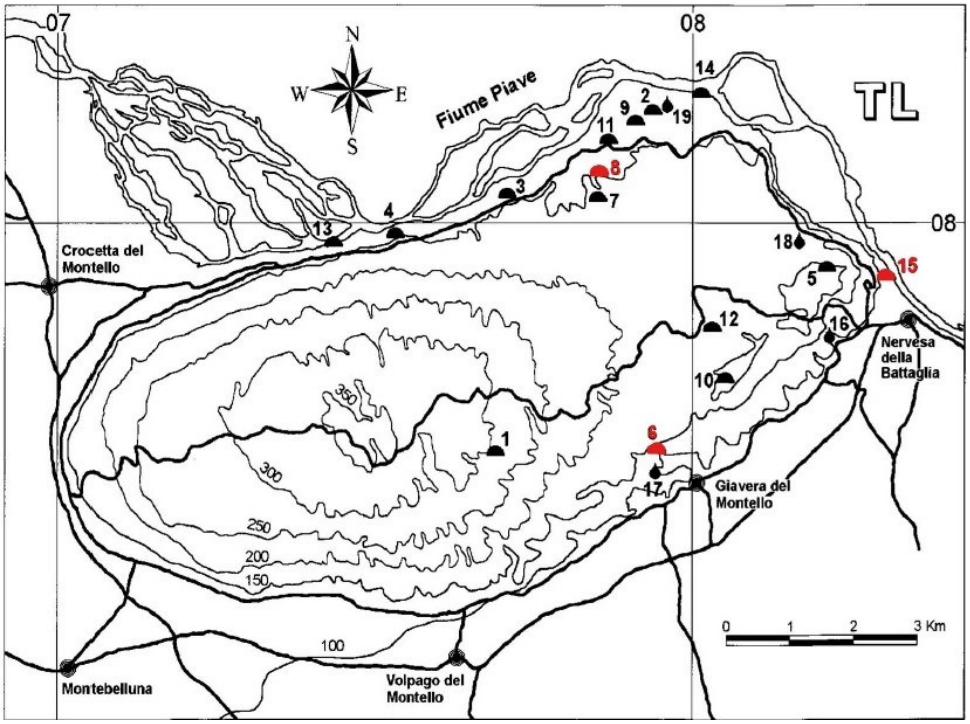



Figura 8: Mappa del Montello con evidenziate in rosso le tre sorgenti prese in esame per lo studio: sorgente Casselon (nr. 15), sorgente Tavaran Lungo (nr. 8) e sorgente Forame (nr. 6) (Stoch e Tomasin, 2002).

Gli strumenti sono entrati in funzione a partire da agosto 2019 e hanno memorizzato i dati, con cadenza oraria, per un periodo di 2 anni e mezzo, fino a marzo 2022. I parametri rilevati sono:

1) Il livello del corso d'acqua uscente dalla sorgente espresso come cm interposti tra il pelo libero dell'acqua e la posizione del sensore dello strumento (range tra 0 e 1000 cm, accuratezza ±0.5 cm e risoluzione 0.2 cm).
2) La temperatura (T) dell'acqua espressa in °C (range tra -20°C e 100°C, precisione ±0.1°C e risoluzione 0.01°C).
3) La conducibilità elettrica (EC) dell'acqua a 25°C espressa in mS/cm (range tra 0 mS/cm e 30 mS/cm, precisione ±1% e risoluzione di lettura 0.1%).

Dal momento però che il CTD-Diver non è in grado di effettuare delle misure anche della pressione atmosferica ($p_{atm}$), i valori registrati del livello dell'acqua tengono in considerazione del contributo di due componenti: la pressione idrostatica esercitata dalla colonna d'acqua al di sopra del sensore e la pressione atmosferica della colonna d'aria. I dati del livello, prima di essere utilizzati nei metodi di analisi, devono essere perciò compensati sottraendo il contributo della colonna d'aria.
Per fare ciò, sono stati utilizzati i valori di pressione atmosferica della stazione Arpav (Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto) di Cavallino Treporti (stazione nr. 160) e prima di essere sottratti a quelli memorizzati dai CTD-Diver sono stati riportati da mbar a cm di acqua moltiplicandoli per un fattore di conversione (1.01972).
Per le sorgenti Casselon e Forame i CTD-Diver sono posizionati in un'area esterna esposta agli agenti atmosferici quali temperatura stagionale dell'aria ed eventi di precipitazione, motivo per cui sono stati coperti con tubi protettivi contro detriti o sporcizie. Per la sorgente Tavaran Lungo, al contrario, lo strumento è situato all'interno di una vasca interna alla grotta, e i dati monitorati sono meno soggetti alle fluttuazioni di temperatura esterna e alle precipitazioni.
Per quanto riguarda i dati pluviometrici invece sono stati utilizzati i valori, sempre con cadenza oraria, forniti da quattro stazioni termo-pluviometriche Arpav situate nei comuni in vicinanza all'area di studio; le quattro stazioni di riferimento sono quelle di: Castelfranco Veneto (stazione nr. 102), Conegliano (stazione nr. 100), Crespano del Grappa (stazione nr. 156) e Treviso (stazione nr. 220).

I dati ottenuti dal monitoraggio delle tre sorgenti e quelli forniti dalle stazioni meteo sono stati elaborati tramite il software "R-Studio", cioè un ambiente di sviluppo per il linguaggio di programmazione "R", per la realizzazione di analisi statistiche. Il software ha fornito la rappresentazione grafica delle diverse serie temporali, l'ottenimento delle loro statistiche sommarie (valori massimi, minimi, medi e quartili), la formulazione delle curve di durata del deflusso (FDC), la verifica dell'autocorrelazione delle singole serie di dati (ACF) e della cross-correlazione tra serie di dati diverse (CCF).

**Istogrammi delle piogge**

Gli istogrammi delle piogge forniscono la distribuzione della frequenza dei diversi livelli di precipitazione nell'intervallo di tempo considerato. I dati delle stazioni pluviometriche

selezionate per lo studio sono riportati in un grafico ad istogramma nel quale sull'asse delle ordinate vi è la frequenza dei diversi valori misurati (cioè quante precipitazioni di una determinata intensità sono avvenute nel periodo di riferimento) e sull'asse delle ascisse vi è il relativo livello di pioggia registrato. Tale rappresentazione consente quindi di mettere in relazione la frequenza delle precipitazioni con la loro intensità.

**Flow duration curve (FDC)**

La curva di durata del flusso mostra la percentuale cumulata nella quale il livello (e quindi la sua portata) della sorgente è uguale o superiore ad una determinata soglia in un dato periodo (Torresan, Fabbri, et al., 2020).

I dati del livello dell'acqua nelle sorgenti sono ordinati dal valore più alto al più basso, senza un ordine cronologico, e riportati in un grafico con il livello sull'asse delle ordinate e la percentuale cumulata di tali livelli durante il periodo considerato sull'asse delle scisse.

La forma della curva del grafico di FDC permette la formulazione di alcune ipotesi in merito alle caratteristiche del sistema carsico in esame; in particolare le pendenze della curva consentono di definire quanto il sistema è sviluppato. La presenza di forti pendenze indica variazioni di livello molto accentuate e suggerisce un sistema carsico ben sviluppato capace di drenare l'acqua velocemente. Pendenze minori sono invece segnale di un basso livello di carsificazione e della presenza di sistemi di tipo fratturato, capaci di accumulare acqua per più tempo.

Diverse pendenze all'interno dello stesso grafico rappresentano perciò differenti comportamenti della sorgente nel tempo, a seconda del livello di saturazione del relativo sistema carsico.

**Autcorrelation function (ACF)**

La funzione di autocorrelazione è una misura della dipendenza lineare tra i valori successivi di una serie di dati, cioè il confronto tra una serie di dati e la stessa serie ritardata di un certo tempo, detto "lag time". Il grafico con la curva di autocorrelazione che si ottiene è un correlogramma in cui sull'asse delle ordinate viene riportato il coefficiente di autocorrelazione e su quello delle ascisse il lag time orario, quindi la serie viene traslata di un'ora alla volta.

L'ACF permette di valutare la memoria di un sistema, cioè il tempo necessario per "dimenticare" le sue condizioni iniziali, tramite il "decorrelation lag time" (tempo di

ritardo di decorrelazione); definito come il tempo necessario alla funzione per raggiungere un determinato valore, generalmente tra 0.1 e 0.2, al di sotto del quale non vi è più correlazione con la serie di dati iniziale.

Dal punto di vista idrogeologico, la forma del correlogramma fornisce informazioni sul grado di carsificazione e sulle riserve dell'acquifero carsico. Un sistema carsico poco sviluppato e con un importante stock di acque sotterranee ha un forte effetto memoria e il correlogramma è caratterizzato da leggere pendenze decrescenti. Al contrario, un sistema carsico maggiormente sviluppato, senza importanti riserve idriche sotterranee e dotato di una memoria corta prevede un correlogramma con una curva più ripida e un minor decorrelation lag time (Panagopoulos e Lambrakis, 2006).

La funzione di autocorrelazione può essere descritta come:

$$r(K) = \frac{C(K)}{C(0)} \qquad (1)$$

con:

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

$$C(0) = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}(x_t - \bar{x})^2 \qquad (3)$$

in cui k è l'intervallo di tempo, n è la lunghezza della serie temporale, t è il tempo, x è la misurazione di un singolo evento e $\bar{x}$ è la media delle misurazioni degli eventi (Zhang, Chen, et al., 2013).

**Cross-correlation function (CCF)**

La funzione di cross-correlazione rappresenta un confronto tra due diverse serie di dati, in genere per analizzare le relazioni tra i segnali di input (precipitazioni) e di output (livello della sorgente).

Si ottengono delle correlazioni positive in presenza di un aumento o una diminuzione di entrambe le serie di dati a confronto, e delle correlazioni negative nel momento in cui ad un aumento di una serie corrisponde una diminuzione dell'altra.

I dati utilizzati per l'analisi devono essere però poco autocorrelati in modo da evitare errori di valutazione, quindi le serie vengono prima filtrate lavorando sulle differenze tra un dato e quello precedente, rendendo così la serie non autocorrelata. La cross-correlazione rappresenta perciò la correlazione fra due serie di dati rispetto ai tempi di ritardo.

La funzione di cross-covarianza, dove u è l'input e y l'output, è data dalle equazioni (4) e (5):

$$c_{uy} = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n-k}(u_t - \bar{u})(y_{t+k} - \bar{y}) \qquad [K = 0,1,2 \dots, (n-1)] \qquad (4)$$

$$c_{uy} = \frac{1}{n}\sum_{t=1-k}^{n}(u_t - \bar{u})(y_{t+k} - \bar{y}) \qquad [K = -1, -2 \dots, -(n-1)] \qquad (5)$$

in cui $\bar{u}$ e $\bar{y}$ sono le medie dei parametri di input e output.

La CCF è definita come:

$$r_{uy}(k) = \frac{c_{uy}(k)}{\sqrt{c_{uu}(0)c_{yy}(0)}} \qquad (6)$$

I risultati sono rappresentati tramite un cross-correlograma, cioè un grafico con il valore di correlazione (tra -1 e +1) sull'asse delle ordinate e il ritardo su quello delle ascisse. Il cross-correlogramma è dotato inoltre di due bande di confidenza (definite come $-\frac{1.96}{\sqrt{n}}$ e $+\frac{1.96}{\sqrt{n}}$) al di sotto delle quali la correlazione è poco significativa (Torresan, Fabbri, et al., 2020).

Le analisi tramite cross-correlazione hanno riguardato i parametri monitorati (livello, temperatura e conducibilità elettrica) e le piogge; in particolare sono state ottenute le CCF di livello vs piogge, livello vs T, livello vs EC e T vs EC. Inoltre, sono state messe a confronto fra loro anche le serie temporali delle piogge nelle quattro stazioni considerate per confermare la presenza di eventi di precipitazione simultanei nella zona. Il confronto fra le precipitazioni e il livello della sorgente, cioè tra input (ricarica) e output (scarico), permette di valutare il tempo necessario all'acqua meteorica per attraversare la zona vadosa e arrivare in sorgente determinandone un aumento del livello; una correlazione con ritardo evidenzia infatti il tempo di risposta della sorgente agli eventi di ricarica.

Le altre CCF forniscono invece informazioni sulle dimensioni del sistema; un'acqua neoinfiltrata ha valori di conducibilità inferiori rispetto all'acqua contenuta nell'acquifero carsico e più tempo trascorre all'interno del sistema più si carica di ioni, inoltre, in alcuni tipi di sorgenti, un aumento di EC comporta un aumento di T.

**V.E.S.P.A. index**

Oltre alle analisi statistiche tramite il software R-Studio, è stato calcolato anche l'indice VESPA (Vulnerability Estimation for Spring Protection Areas), che utilizza i valori monitorati di portata, temperatura e conducibilità per fornire una valutazione sia sul tipo di comportamento del sistema, sia sulla sua vulnerabilità all'inquinamento.
L'indice è definito come:

$$V = c(\rho)\beta\gamma \qquad (7)$$

in cui $c(\rho)$ è il fattore di correlazione (8), variabile tra 0 e 1, β è il fattore di temperatura (9) e γ quello di scarico (10):

$$c(\rho) = [u(-\rho) + \alpha u(\rho)]|\rho| \qquad (8)$$

dove ρ è il coefficiente di correlazione tra livello e conducibilità compreso tra $-1 \leq \rho \leq 1$, $u(\rho)$ è la funzione di Heaviside definita come $u(\rho)=1$ per $\rho \geq 0$ e $u(\rho)=0$ per $\rho < 0$ e α è un coefficiente di scala compreso tra $0 \leq \alpha \leq 1$.

$$\beta = \left(\frac{T_{max}-T_{min}}{1°C}\right)^2 \qquad (9)$$

dove $T_{max}$ e $T_{min}$ sono la temperatura massima e minima registrate durante il periodo monitorato.

$$\gamma = \frac{Q_{max}-Q_{min}}{Q_{med}} \qquad (10)$$

dove $Q_{max}$, $Q_{min}$ e $Q_{med}$ sono rispettivamente il livello massimo, minimo e medio della sorgente durante il periodo monitorato (Banzato, Vigna, et al., 2011).

Per il calcolo dell'indice VESPA delle tre sorgenti considerate in questo studio sono stati utilizzati i valori di livello, T ed EC riferiti al periodo dall'01/01/2021 al 30/06/2021. Tale periodo rappresenta infatti il tempo più lungo dell'intero monitoraggio durante il quale vi è stata continuità di acqua contemporaneamente in tutte e tre le sorgenti, senza fasi prolungate di secca che potessero influenzare in modo significativo i risultati.

A seconda del valore ottenuto dall'indice V è possibile classificare la vulnerabilità della sorgente considerata secondo quattro classi riportate di seguito (Tab. 1):

| Vulnerabilità: | VESPA index: |
|---|---|
| Molto alta | $V \geq 10$ |
| Alta | $1 \leq V < 10$ |
| Media | $0.1 \leq V < 1$ |
| Bassa | $0 \leq V < 0.1$ |

Tab 1: Classificazione della vulnerabilità secondo l'indice VESPA (Banzato, Vigna, et al., 2011).

Tramite i fattori c(ρ) e ρ invece, è possibile definire il tipo di sistema carsico e il suo comportamento (Tab. 2):

| Tipologia di sorgente e fenomeno prevalente: | Coefficiente di correlazione ρ: | Fattore di correlazione c(ρ): |
|---|---|---|
| Tipo A: sostituzione | $-1 \leq \rho \leq -0.2$ | $0.2 \leq c(\rho) \leq 1$ |
| Tipo B: pistonaggio | $0.2 \leq \rho \leq 1$ | $0.1 \leq c(\rho) \leq 0.5$ |
| Tipo C: omogeneizzazione | $-0.2 \leq \rho \leq 0.2$ | $0 \leq c(\rho) \leq 0.2$ |

Tab 2: Tipologia di sorgente secondo il coefficiente di correlazione e il fattore di correlazione dell'indice Vespa (Banzato, Vigna, et al., 2011).

I tre tipi di sistemi proposti evidenziano tre differenti modalità di risposta dei parametri monitorati in risposta agli eventi di ricarica (Fig. 9):

1) *Sostituzione*: il comportamento per sostituzione presuppone un sistema carsico ben sviluppato e con elevata permeabilità che permette alle acque neoinfiltrate di raggiungere velocemente la sorgente, con conseguente aumento del livello e diminuzione della conducibilità. La vulnerabilità è in genere molto alta.

2) *Pistonaggio*: il comportamento a pistone avviene in un sistema carsico con minore permeabilità e dotato di un'ampia zona satura. Il basso grado di carsificazione determina un drenaggio moderato e un accumulo di acqua nell'acquifero, quindi le acque neoinfiltrate agiscono come un pistone rimobilizzando le acque già presenti, che provocano un aumento della temperatura e della conducibilità misurate in sorgente. La vulnerabilità è in genere medio-alta.
3) *Omogeneizzazione*: il comportamento per omogeneizzazione prevede un sistema carsico quasi assente e con una zona satura molto sviluppata. Le acque di neoinfiltrazione si spostano molto lentamente verso la sorgente che mostra fluttuazioni lente del livello e valori di temperatura e conducibilità piuttosto costanti. La vulnerabilità è in genere bassa.

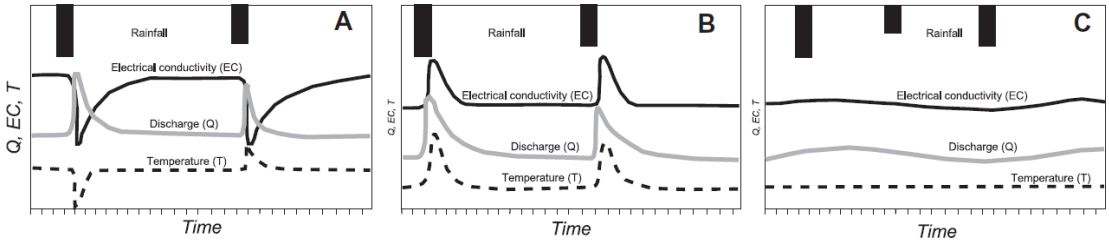



Figura 9: Esempi di risposte idrografiche delle sorgenti al processo di infiltrazione, in relazione all'efficacia del drenaggio. Alta efficacia e sostituzione prevalente (A); efficacia moderata ed effetto pistone prevalente (B); bassa efficacia ed omogeneizzazione prevalente (C) (Galleani, Vigna, et al., 2011).

# 4. ANALISI E COMMENTO DEI DATI

## 4.1. Dati meteorologici

### Eventi pluviometrici

I dati ricavati dalle quattro stazioni pluviometriche hanno fornito i risultati presenti in Tab. 3 e riportando cronologicamente gli eventi piovosi con la relativa intensità (mm) si sono ottenuti i grafici delle serie temporali (Fig. 10) che iniziano il 06/08/2019 e terminano l'01/04/2022:

| | Castelfranco (mm) | Conegliano (mm) | Crespano (mm) | Treviso (mm) |
|---|---|---|---|---|
| Minimo | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Primo quartile | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Mediana | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Media | 0.12 | 0.14 | 0.19 | 0.10 |
| Terzo quartile | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Massimo | 42.8 | 32.0 | 35.2 | 30.8 |

Tab. 3: statistiche delle precipitazioni registrate dalle quattro stazioni meteo nel periodo considerato.

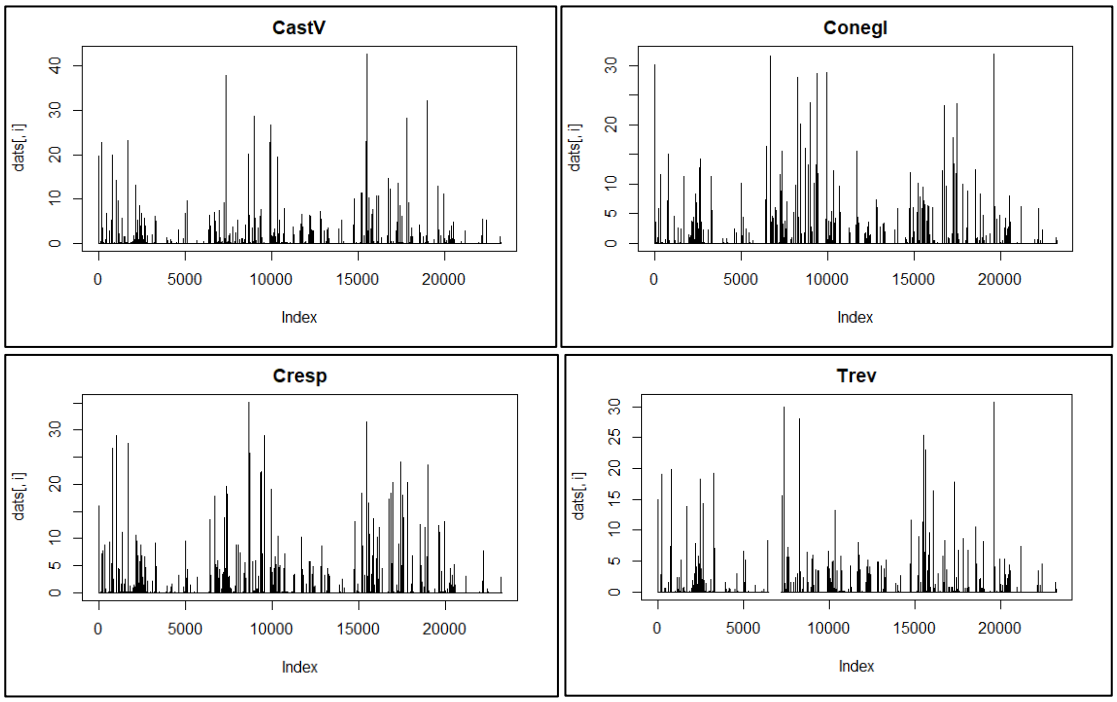



Figura 10: piogge registrate dalle quattro stazioni pluviometriche; in ascissa gli eventi in ordine cronologico e in ordinata i relativi valori di intensità (mm).

I grafici delle precipitazioni nelle quattro stazioni meteo mostrano una certa somiglianza per quanto riguarda gli eventi piovosi, che seguono circa lo stesso andamento sia per i periodi con maggiori picchi e frequenze sia per quelli di minore piovosità. Particolarmente evidente è la ridotta presenza di piogge da fine 2021 a marzo 2022 in cui terminano i grafici.

Nel grafico delle precipitazioni di Treviso è presente un periodo di dati mancanti dovuto ad un malfunzionamento della stazione meteo nel mese di maggio 2020 (valori fra 6500 e 7000 nell'asse temporale del grafico).

**Istogrammi delle piogge**

Negli istogrammi delle piogge orarie (Fig. 11) viene riportata la frequenza degli eventi piovosi in funzione della loro intensità e poiché si registrano anche le precipitazioni con intensità pari a 0 mm (non precipitazione) è normale che i valori fra 0 e 1 siano quelli con maggior frequenza, tanto da nascondere gli eventi di intensità superiore ai 5 mm.

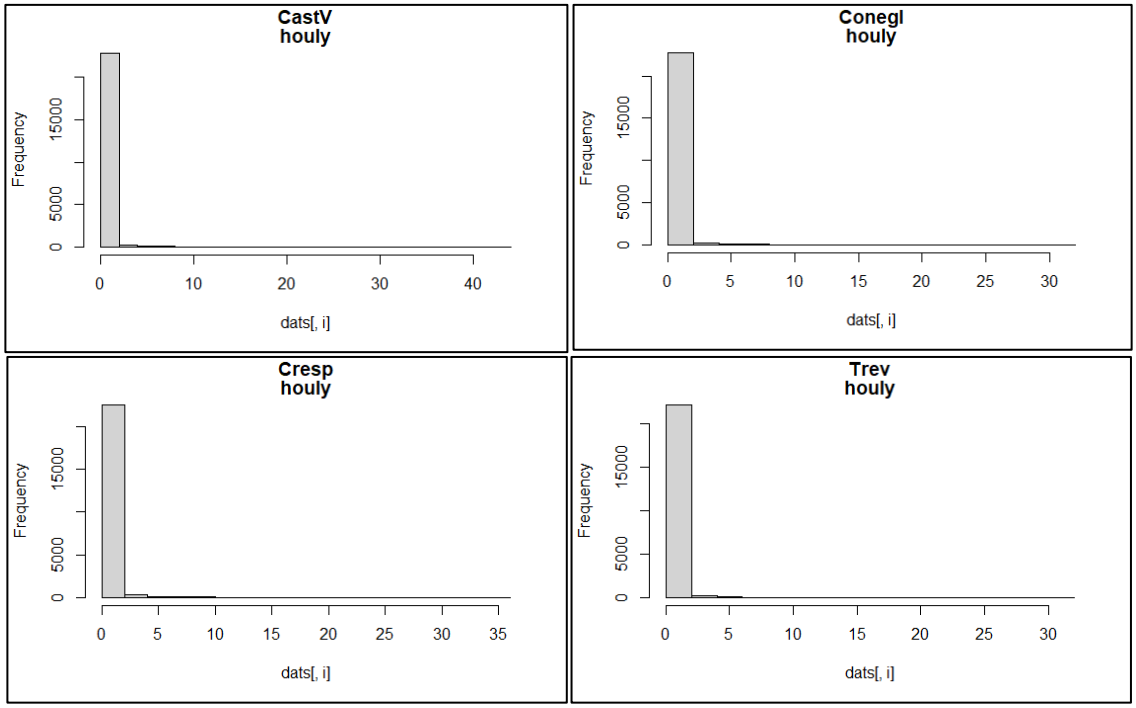



Figura 11: Istogrammi delle piogge con il valore misurato (mm) in ascissa e la relativa frequenza durante il periodo considerato in ordinata.

**Temperatura dell'aria a 2 metri dal suolo**

Oltre ai valori delle precipitazioni, si sono presi in considerazione anche i valori della temperatura dell'aria a 2 metri dal suolo così da poter confrontare, in caso di necessità, le

oscillazioni di temperatura esterna con i valori di temperatura dell'acqua misurati dai CTD-Diver. Il confronto è utile in particolare per due casi:

- per le sorgenti Casselon e Forame in cui gli strumenti sono esposti all'ambiente esterno
- per confrontare l'andamento della temperatura misurata nelle sorgenti durante i periodi di secca con quello delle stazioni meteo.

I dati ricavati dalle quattro stazioni meteo hanno fornito i risultati in Tab. 4 e i grafici delle serie temporali riportati di seguito (Fig. 12):

| | Castelfranco (°C) | Conegliano (°C) | Crespano (°C) | Treviso (°C) |
|---|---|---|---|---|
| Minimo | -6.6 | -3.3 | -5.4 | -6.0 |
| Primo quartile | 6.3 | 7.9 | 5.7 | 6.7 |
| Mediana | 12.2 | 13.0 | 10.7 | 12.5 |
| Media | 12.9 | 14.1 | 11.6 | 13.4 |
| Terzo quartile | 19.3 | 20.1 | 17.2 | 19.8 |
| Massimo | 36.8 | 35.1 | 32.7 | 36.3 |

Tab. 4: Statistiche della temperatura dell'aria a 2 metri dal suolo misurata dalle quattro stazioni meteo nel periodo considerato.

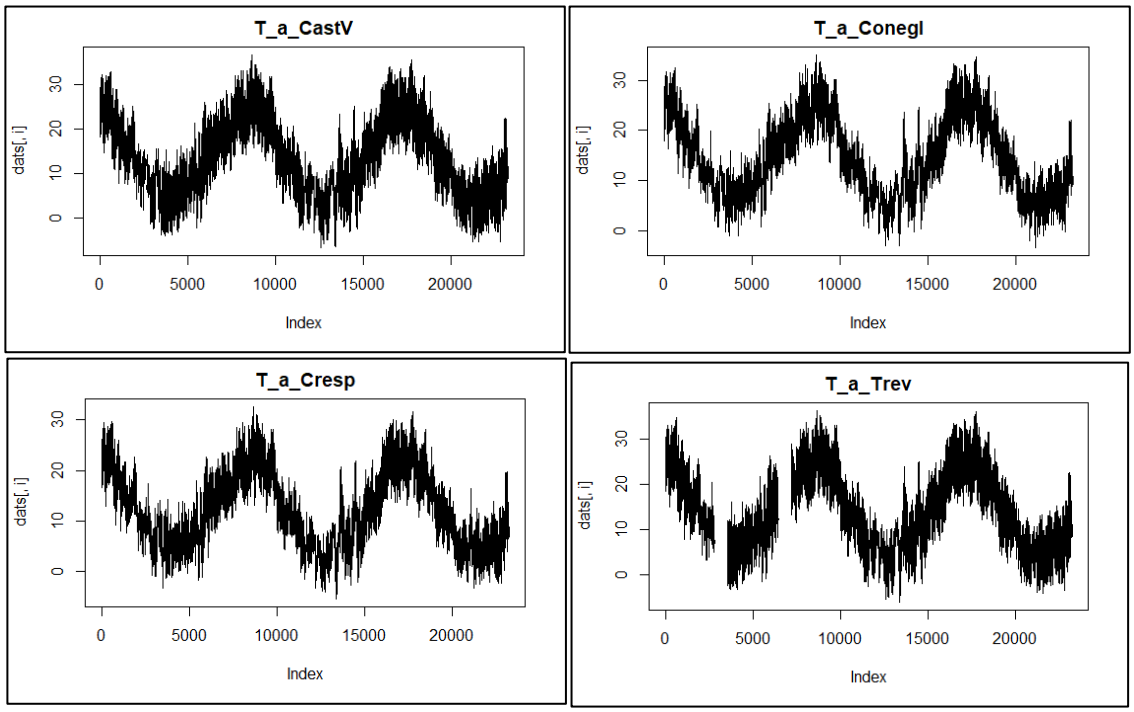



Figura 12: temperatura dell'aria a 2 metri dal suolo registrata dalle quattro stazioni meteo; in ascissa gli eventi in ordine cronologico e in ordinata i relativi valori di intensità (°C).

I grafici della temperatura dell'aria a 2 metri dal suolo evidenziano in modo chiaro gli andamenti stagionali, ben distinguibili rispetto alle escursioni di scala minore. Si

osservano tre picchi superiori con le temperature più alte nei mesi estivi e tre picchi inferiori con le temperature più basse nei mesi invernali.
Nel grafico della temperatura di Treviso sono presenti due periodi di dati mancanti dovuti a dei malfunzionamenti della stazione meteo nei mesi di dicembre 2019 e maggio 2020 (valori fra 3000 e 3500 e fra 6500 e 7000 nell'asse temporale del grafico).

## 4.2. Sorgente Casselon

Nota anche come "El Casseon" o "El Casselon", è stata una tra le principali prese di alimentazione di un vecchio acquedotto e si vedono ancora, in rovina, le opere di captazione (Stoch e Tomasin, 2002).
La sorgente è situata nella punta Est del Montello in un punto molto vicino al corso del Piave e il CTD-Diver, essendo posizionato in un punto esterno soggetto ad agenti atmosferici, sporcizia e possibili detriti trasportati dal flusso d'acqua, è stato posto all'interno di un tubo protettivo (Fig. 13).

Figura 13: CTD-Diver coperto dal tubo protettivo nella sorgente Casselon.

**Serie temporali di livello, temperatura e conducibilità elettrica**

Dai dati di livello, temperatura e conducibilità elettrica, misurati dal 06/08/2019 all'01/04/2022, si sono ottenute le statistiche sommarie riportate in Tab. 5:

| | Minimo | 1° quartile | Mediana | Media | 3° quartile | Massimo |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Livello (cm) | 0.000 | 0.000 | 1.740 | 5.276 | 5.424 | 97.850 |
| T (°C) | 12.15 | 12.77 | 12.90 | 12.87 | 12.97 | 14.28 |
| EC (mS/cm) | 0.275 | 0.675 | 0.702 | 0.698 | 0.732 | 0.855 |

Tab. 5: Statistiche della sorgente Casselon.

E le serie temporali dei tre parametri monitorati hanno fornito i seguenti grafici:

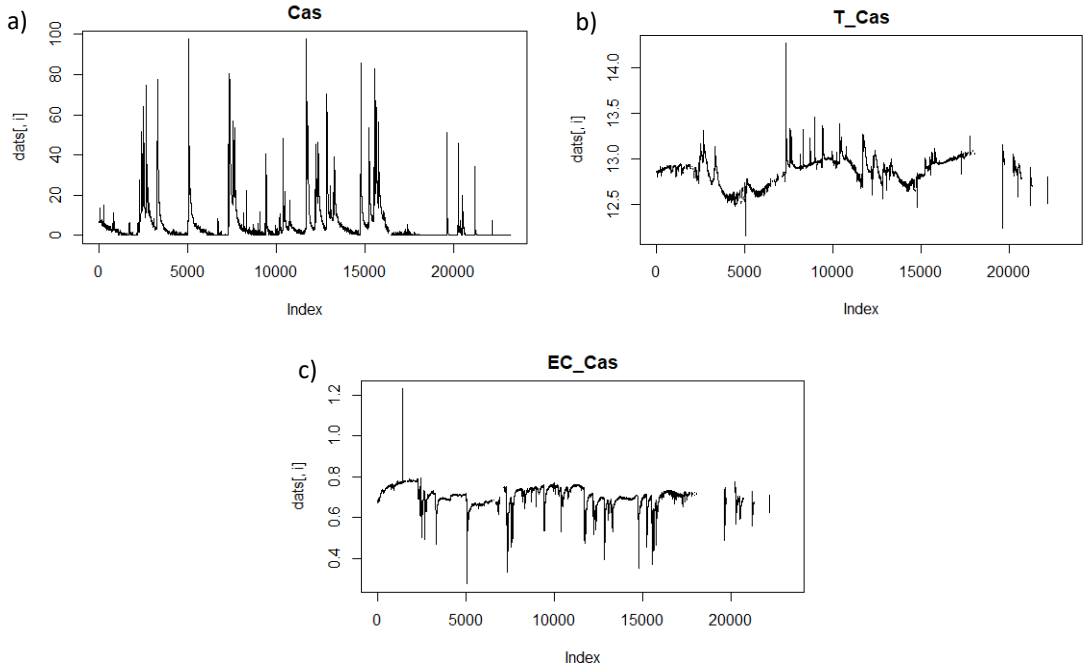



Figura 14: In ordine, serie temporali di livello (a), temperatura (b) e conducibilità elettrica (c)

Nel grafico del livello dell'acqua (Fig. 14-a) i due innalzamenti di maggior intensità si sono registrati ad inizio marzo 2020 e inizio dicembre dello stesso anno (valori a circa 5000 e 12000 nell'asse temporale del grafico). Il primo è un evento abbastanza isolato, mentre il secondo è seguito da ulteriori curve di scarico fino ai mesi di luglio/agosto 2021 dopo i quali si nota un appiattimento consistente del livello dell'acqua, ad eccezione di pochi innalzamenti alla fine del 2021, riferibile al periodo di secca visualizzato anche nei grafici delle precipitazioni (Fig. 10).

L'andamento della temperatura (Fig. 14-b) mostra delle variazioni in concomitanza con i picchi di innalzamento del livello dell'acqua, confermando il carattere carsico del sistema.

Poiché il CTD-Diver è posto esternamente alla sorgente, lo strumento e i valori registrati sono stati influenzati anche dalla temperatura dell'aria, infatti si può notare un andamento di fondo su ampia scala che, seppur di bassa magnitudo, segue quello della temperatura esterna.

Gli spazi vuoti presenti nel grafico sono riferiti ai periodi in cui la sorgente era in secca, persistenti soprattutto nell'ultimo periodo di monitoraggio, e durante i quali gli strumenti hanno misurato i valori di temperatura dell'aria.

I valori di conducibilità elettrica (Fig. 14-c) hanno un comportamento che ricalca, in maniera opposta, quello del livello; infatti, gli eventi di innalzamento dell'acqua vengono evidenziati da diminuzioni della conducibilità elettrica dovute all'uscita di acqua meno arricchita di sali che è passata velocemente attraverso il sistema carsico.

**Flow duration curve (FDC)**

Il grafico della FDC (Fig. 15) ha un andamento iniziale ripido (0-10%), con forti variazioni del livello, che presuppone la presenza di strutture carsiche ben sviluppate, e diminuisce poi la pendenza (10-30%) fino a far assumere alla curva un aspetto più regolare e costante (dal 30% in poi). Se la primissima sezione della curva descrive un sistema con un buon grado di carsismo, la restante parte indica invece un sistema con minori variazioni di livello, bassa permeabilità e con la capacità di accumulare acqua al suo interno.

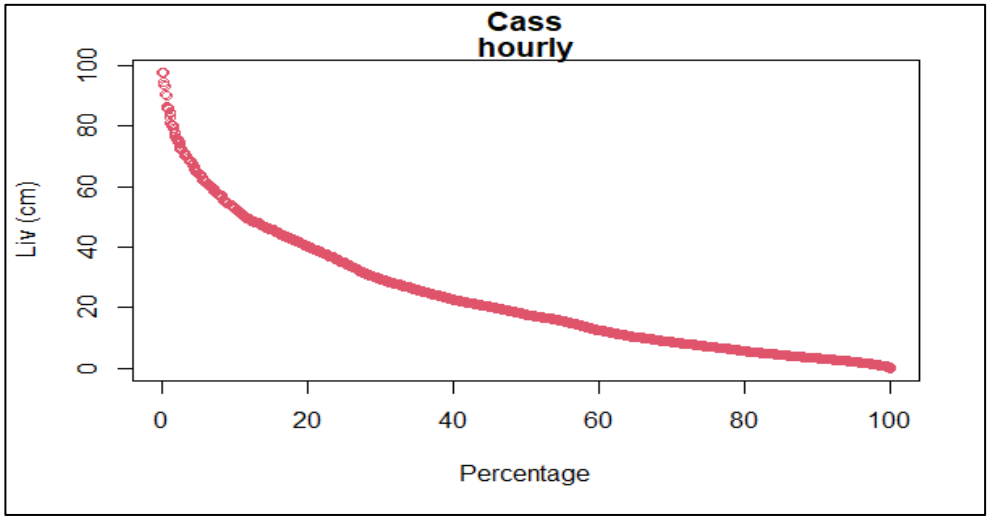



Figura 15: Grafico della FDC della sorgente Casselon.

**Autocorrelazione (ACF)**

Il grafico ottenuto dall'ACF (Fig. 16), come per la FDC, diminuisce molto rapidamente nelle prime 150/160 ore circa dopo le quali la pendenza inizia a calare fino a scendere, dopo 300 ore, al di sotto del livello di correlazione.

La forte pendenza iniziale evidenzia la presenza di un sistema a memoria corta, cioè con un buon grado di carsismo e la possibile presenza di condotti sviluppati, mentre la seconda parte della curva indica un sistema con un effetto memoria maggiore, più carsificato e capace di accumulare acque sotterranee ritardando il deflusso verso le sorgenti.

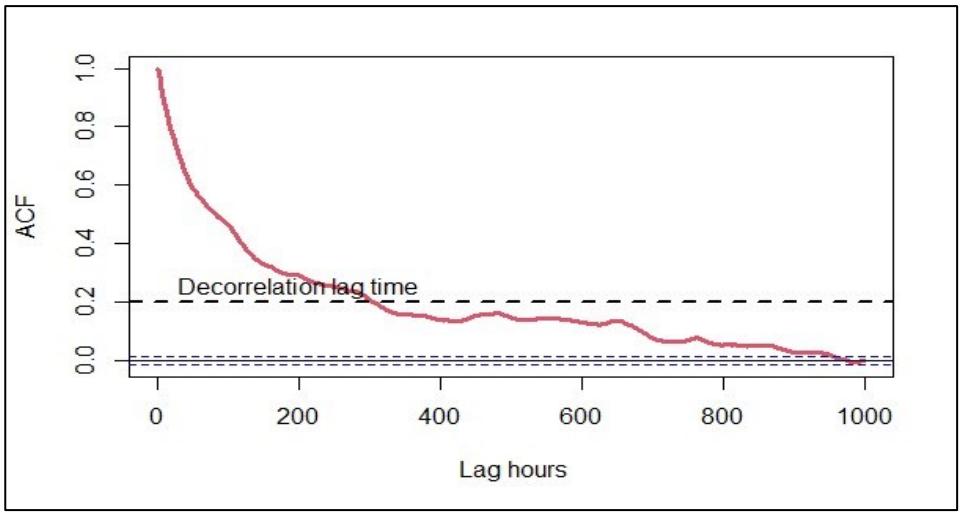


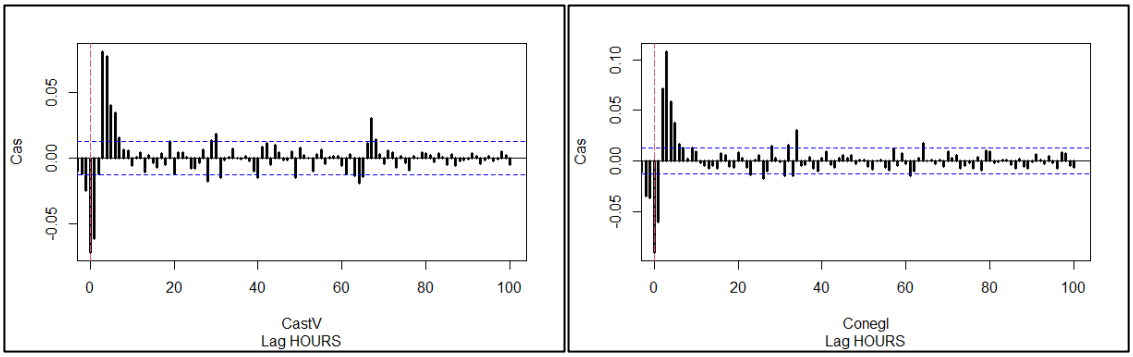

Figura 16: Grafico dell'ACF della sorgente Casselon.

**Cross-correlazione (CCF) tra livello vs piogge**

Nella CCF fra il livello della sorgente e le precipitazioni (Fig. 17) si notano delle correlazioni positive dopo 2/3 ore, cioè passano dalle 2 alle 3 ore dall'evento piovoso a quando vi è una risposta del livello d'acqua uscente dalla sorgente, e può essere considerato come il tempo di percorrenza impiegato dall'acqua neoinfiltrata per attraversare la zona vadosa e uscire dal sistema carsico. La correlazione rimane positiva per un tempo di circa 5 ore, durante le quali vi è un aumento sia delle precipitazioni che del livello delle sorgenti.

Dopo 7 ore dall'evento piovoso, vi è invece un'alternanza di correlazioni positive e negative che assumono però poca importanza restando al di sotto delle bande di confidenza, ad eccezione del cross-correlogramma con la stazione di Crespano.

Nelle prime 2/3 ore si osserva una correlazione negativa dovuta ad un aumento delle precipitazioni accompagnato da una variazione nulla del livello d'acqua in uscita.



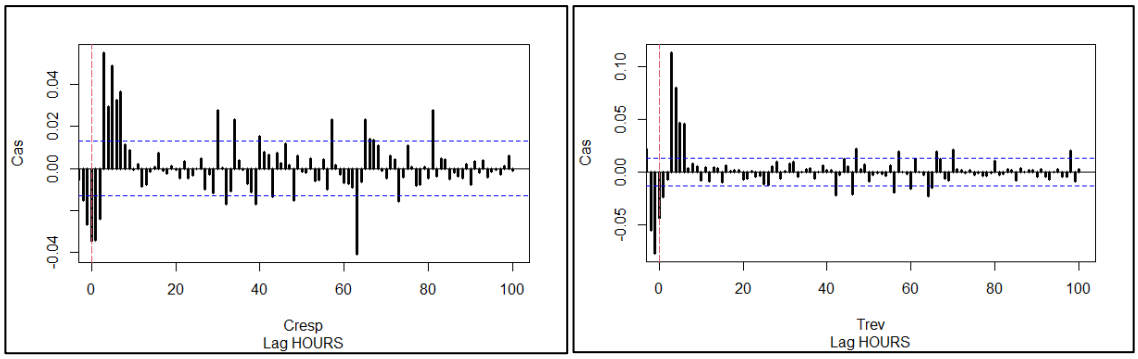


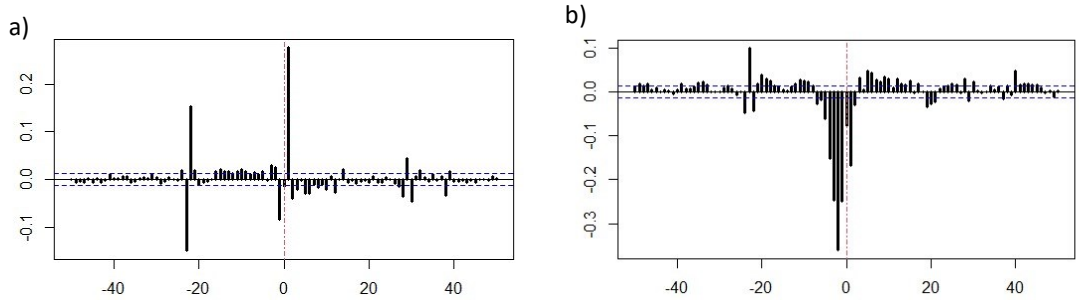
Figura 17: CCF tra livello del Casselon e le piogge misurate nelle quattro stazioni pluviometriche.

**Cross-correlazione (CCF) fra Livello vs T, Livello vs EC e T vs EC**

Nella CCF tra livello vs temperatura dell'acqua (Fig. 18-a) vi è un'intensa correlazione positiva dopo un'ora, che però diventa subito negativa le ore successive testimoniando un aumento del livello dell'acqua accompagnato da una diminuzione della temperatura; un comportamento riferibile ad un sistema carsico. Il forte picco iniziale fa pensare invece ad una sorta di effetto pistone (che si esaurisce velocemente) causato dalle acque neoinfiltrate che spingono fuori parte di quelle normalmente circolanti all'interno della zona satura.

La CCF tra livello vs conducibilità elettrica (Fig. 18-b) ha dei picchi negativi a lag 0, 1 e 2 dovuti al rapido movimento delle acque meteoriche scaricate in sorgente con pochi ioni disciolti; non sembrano confermare perciò l'ipotesi del comportamento a pistone.
Dopo queste prime due ore sono invece presenti una serie di correlazioni positive, poco evidenti, che indicano un aumento del livello accompagnato da un aumento della conducibilità.

L'ultima CCF tra temperatura e conducibilità elettrica (Fig. 18-c) presenta un comportamento negativo fra T ed EC a lag 0, mentre vi è una correlazione positiva dopo 1 ora.



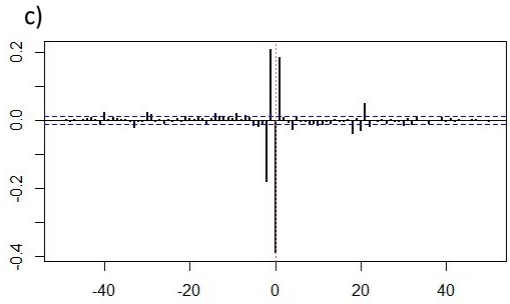



Figura 18: In ordine, CCF tra livello vs T (a), livello vs EC (b) e T vs EC (c) della sorgente Casselon.

**Indice VESPA**

I dati ottenuti dall'indice VESPA, calcolato con l'equazione (7), sono riportati in Tab. 6:

| | ρ | c(ρ) | β | γ | V |
|---|---|---|---|---|---|
| Casselon | -0.904 | 0.904 | 0.423 | 8.343 | 3.187 |

Tab. 6: Indice VESPA e parametri che rientrano nell'equazione per il suo calcolo per la sorgente Casselon.

I valori degli indici ρ e c(ρ) rientrano all'interno del range riferito ad un comportamento di sostituzione (Tab. 2) e la vulnerabilità pari 3.187 è medio alta (Tab. 1).

Si tratta quindi di un sistema abbastanza sviluppato che permette un rapido deflusso delle acque, confermato dai grafici di FDC, ACF e CCF; rimangono tuttavia poco chiari il comportamento "a pistone" ipotizzato dal grafico di CCF tra livello vs T (Fig. 30-a) e il comportamento della CCF tra T vs EC (Fig. 30-c).

## 4.3. Sorgente Tavaran Lungo

La sorgente Tavaran Lungo si trova lungo il lato Nord del Montello poco distante dal corso del Piave, ma più internamente rispetto al Casselon. La sorgente si differenzia dagli altri due casi di studio in quanto è situata all'interno di una grotta facilmente accessibile, tanto da comprendere al suo interno un laboratorio didattico di biospeleologia (laboratorio didattico "Saccardo"); la cavità si apre sul fondo di una dolina interessata da un ruscello perenne il quale, uscendo dall'imbocco della grotta, si infila poco dopo in un cunicolo (Stoch e Tomasin, 2002).

Il CTD-Diver in questo caso è posto all'interno di una vasca di contenimento costantemente piena d'acqua (Fig. 19) quindi non è influenzato dagli agenti meteorici esterni e non necessita di un tubo protettivo che lo ricopra.

Figura 19: CTD-Diver all'interno della grotta della sorgente Tavaran Lungo.

**Serie temporali di livello, temperatura e conducibilità elettrica**

Dai dati di livello, temperatura e conducibilità elettrica, misurati dal 06/08/2019 all'01/04/2022, si sono ottenute le statistiche sommarie riportate in Tab. 7:

| | Minimo | 1° quartile | Mediana | Media | 3° quartile | Massimo |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Livello (cm) | 15.139 | 19.520 | 22.099 | 22.224 | 24.030 | 38.841 |
| T (°C) | 11.35 | 12.40 | 12.48 | 12.49 | 12.55 | 14.27 |
| EC (mS/cm) | 0.219 | 0.413 | 0.444 | 0.450 | 0.497 | 0.531 |

Tab. 7: Statistiche della sorgente Tavaran Lungo.

E le serie temporali dei tre parametri monitorati hanno fornito i seguenti grafici:

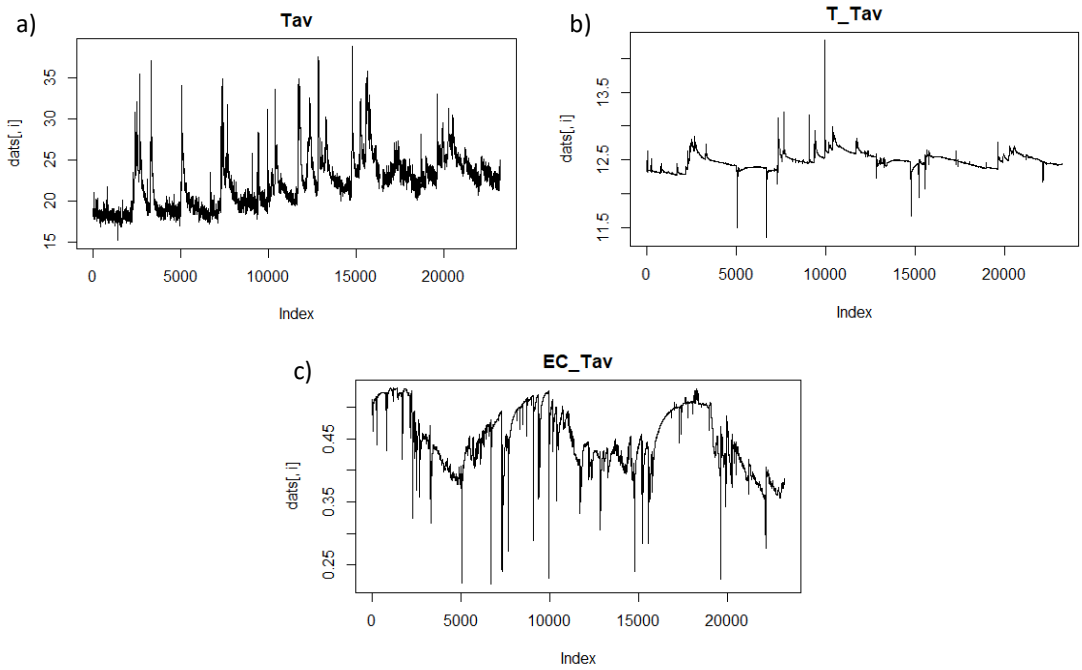



Figura 20: In ordine, serie temporali di livello (a), temperatura (b) e conducibilità elettrica (c) della sorgente Tavaran Lungo.

Dal grafico del livello dell'acqua (Fig. 20-a) è possibile osservare una linea di tendenza, con un aumento del livello medio dell'acqua, che si interrompe però nella parte finale del grafico in cui ha maggior prevalenza la fase di scarico dovuta probabilmente ad una carenza di eventi di precipitazione, e quindi di ricarica.

L'aumento di fondo del livello d'acqua, osservabile soprattutto nel periodo da giugno 2020 a giugno 2021 (valori fra 7000 e 16000 nell'asse temporale del grafico), fa ipotizzare che si tratti di un sistema carsico con buona memoria in grado di accumulare acqua che viene rilasciata lentamente, tanto da non riuscire a completare la curva di scarico prima delle precipitazioni successive.

Dai valori riportati nel grafico si potrebbe pensare che si tratti di una sorgente perenne che non raggiunge mai valori di livello pari a 0 cm, ma è bene tener presente che lo strumento di misurazione è stato posto all'interno di una vasca costantemente piena d'acqua, quindi in caso di sorgente in secca misurerebbe comunque un valore di base costante (che sarebbe il livello d'acqua all'interno della vasca quando questa non trabocca).

Le variazioni di temperatura (Fig. 20-b) seguono gli aumenti del livello dell'acqua; generalmente si registra un aumento della temperatura in concomitanza con

l'innalzamento del livello, ma si notano anche dei picchi negativi in cui la temperatura si abbassa.

Il grafico della conducibilità elettrica (Fig. 20-c) evidenzia in modo chiaro il carattere carsico della sorgente con picchi negativi in corrispondenza degli eventi di innalzamento del livello d'acqua.
Si nota inoltre che l'aumento della conducibilità in seguito ad un suo abbassamento non è immediato, ma spesso molto graduale. Tale caratteristica potrebbe essere dovuta ad una fuoriuscita delle acque piovane non immediata, ma ad una circolazione nel sistema per più tempo con accumulo di sali disciolti che alzano via via i valori di conducibilità elettrica; l'ipotesi potrebbe essere rafforzata dalle curve di scarico abbastanza allungate osservate precedentemente nel grafico del livello (Fig. 20-a).

**Flow duration curve (FDC)**

Il grafico della FDC (Fig. 21) ha una pendenza iniziale molto accentuata (maggiore rispetto a quella del Casselon, ma di minore durata) che si interrompe velocemente (prima del 10%) e che descrive un sistema carsico con uno svuotamento delle acque veloce. Successivamente la curva può essere suddivisa in due sezioni: la prima (dal 10% al 60%) ha una bassa pendenza che evidenzia un comportamento da flusso di base a bassa permeabilità, mentre la seconda (dal 60% in poi) mostra un aumento di pendenza e maggiori differenze di livello.
L'ultimo tratto della FDC presenta un rapido abbassamento dovuto ai valori minimi registrati nel mese di ottobre 2019.

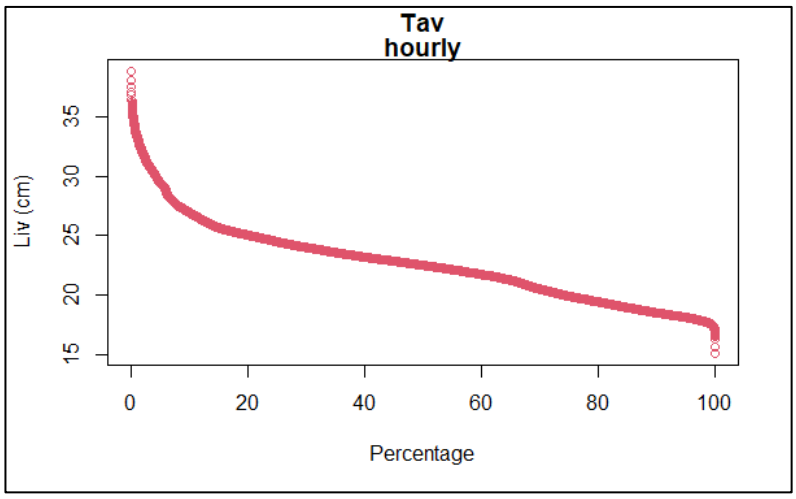



Figura 21: Grafico della FDC della sorgente Tavaran Lungo.

**Autocorrelazione (ACF)**

L'ACF (Fig. 22) ha una diminuzione abbastanza rapida nelle prime 200 ore che descrive un comportamento a bassa memoria, caratteristico di un sistema carsico sviluppato, che favorisce il deflusso iniziale delle acque. Dopo le prime 200 ore però, la curva assume una pendenza molto minore che porta l'ACF a concludere la correlazione dopo circa 1200 ore, evidenziando un sistema dotato di una memoria molto lunga (50 giorni) e con un accumulo di acque sotterranee consistente che ritarda di parecchio il deflusso alla sorgente.

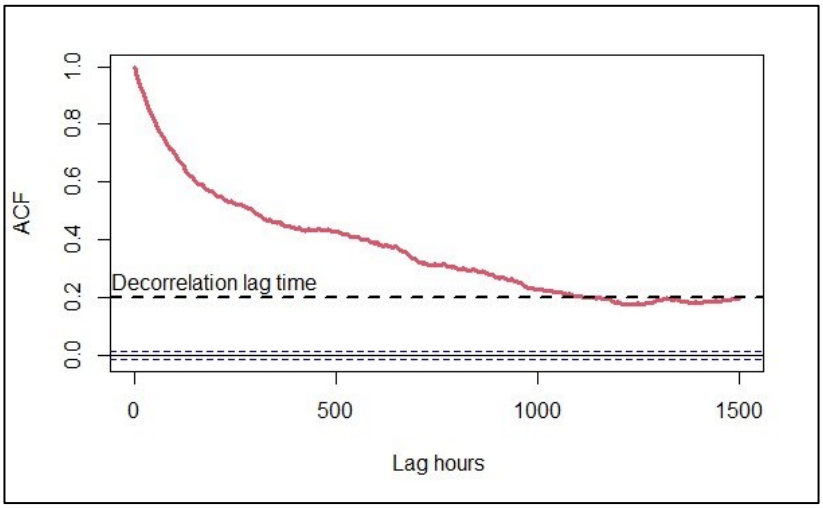



Figura 22: Grafico dell'ACF della sorgente Tavaran Lungo.

**Cross-correlazione (CCF) tra livello vs piogge**

Nella CCF fra il livello della sorgente e le precipitazioni (Fig. 23) si ha una correlazione negativa a lag 0 e delle correlazioni positive nelle 3 ore successive; in particolare la stazione di Castelfranco è correlata positivamente a lag 2 e 3, quelle di Conegliano e Crespano a lag 1, 2 e 3 e quella di Treviso a lag 1, 3 e 4.

Una correlazione così immediata indica la presenza di un sistema carsico sviluppato che risponde subito agli eventi di ricarica (precipitazioni) con un aumento della portata in uscita dalla sorgente.

Si può osservare però che, dopo l'iniziale correlazione positiva, segue un'alternanza di correlazioni positive e negative con magnitudo spesso superiori alle bande di confidenza, ma non altrettanto evidenti. Tale comportamento potrebbe essere spiegato come un alternarsi di fasi di ricarica interna del sistema, che una volta svuotati i canali principali accumula l'acqua che sta attraversando la zona vadosa, e fasi di scarico durante le quali l'acqua accumulata fluisce alla sorgente anche dopo che l'evento di precipitazione è

terminato. Questo comportamento confermerebbe la lunga memoria del sistema visualizzata tramite l'ACF (Fig 22.).

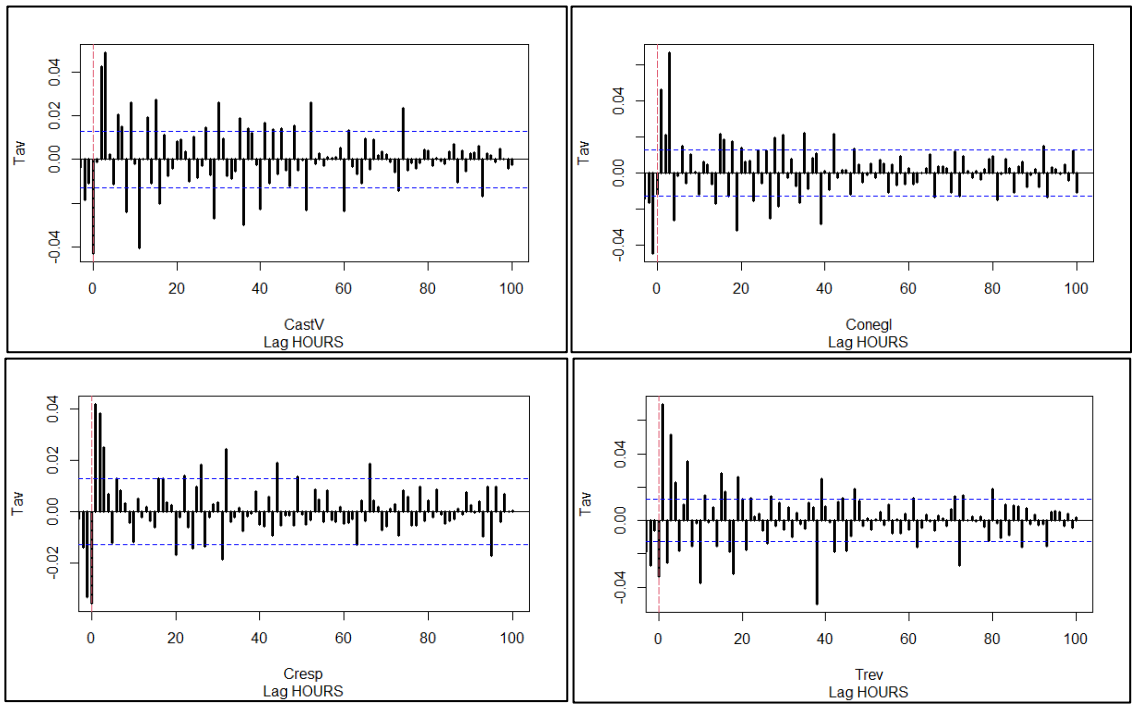



Figura 23: CCF tra livello del Tavaran Lungo e le piogge misurate nelle quattro stazioni pluviometriche.

**Cross-correlazione (CCF) fra Livello vs T, Livello vs EC e T vs EC**

Nella CCF tra livello vs temperatura dell'acqua (Fig. 24-a) si registra un'iniziale correlazione positiva a lag 0, in cui l'aumento del livello non è accompagnato da una diminuzione della temperatura dell'acqua, e un abbassamento invece a lag 1 e 3 in cui parte delle acque neoinfiltrate vengono scaricate dalla sorgente. Si nota anche un'alternanza tra picchi di correlazione positiva e negativa ma di debole intensità.

Nella CCF tra livello e conducibilità elettrica (Fig. 24-b) si può osservare con chiarezza come nelle prime 3-4 ore vi sia un aumento del livello e una diminuzione della EC, dovuta al rapido passaggio delle acque meteoriche che non fanno in tempo ad accumulare ioni disciolti durante il percorso all'interno del sistema.

La CCF tra temperatura e conducibilità elettrica dell'acqua (Fig. 24-c) mostra dei picchi negativi a lag 0 e 1 dovuti all'iniziale comportamento opposto dei due parametri considerati, mentre a lag 2 e 3 potrebbe far pensare ad una diminuzione sia di T che di EC.

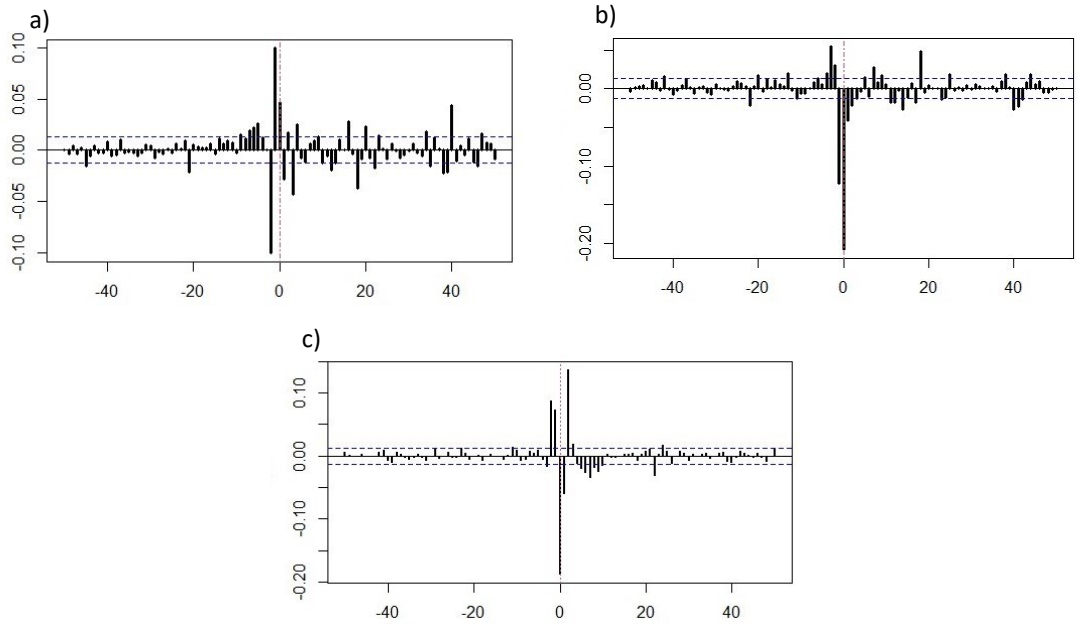



Figura 24: In ordine, CCF tra livello vs T (a), livello vs EC (b) e T vs EC (c) della sorgente Tavaran Lungo.

**Indice VESPA**

I dati ottenuti dall'indice VESPA, calcolato con l'equazione (7), sono riportati in Tab. 8:

| | ρ | c(ρ) | β | γ | V |
|---|---|---|---|---|---|
| Tavaran Lungo | -0.487 | 0.487 | 0.949 | 0.765 | 0.353 |

Tab. 8: Indice VESPA e parametri che rientrano nell'equazione per il suo calcolo per la sorgente Tavaran Lungo.

La presenza di un'importante componente fratturata, che conferisce al sistema una marcata memoria e permette l'accumulo di acque piovane, è confermata dai valori degli indici ρ e c(ρ) che testimoniano un comportamento intermedio fra pistonaggio e sostituzione (Tab. 2).

Anche la media vulnerabilità, pari a 0.353 (Tab. 1), presuppone la presenza di pochi condotti ben sviluppati e la circolazione delle acque che si protrae nel lungo tempo. I risultati ottenuti dall'applicazione dell'indice VESPA confermano quindi le considerazioni presentate dall'analisi dei grafici precedenti in merito ad un sistema dotato di una componente fratturata prevalente e con condotti che hanno rilevanza solo in vicinanza all'evento di precipitazione.

## 4.4. Sorgente Forame

La sorgente Forame si trova sul fondo di una valle, lungo la sponda Sud del Montello, dalla quale ha inizio il torrente Giavera.

La sorgente è stata soggetta, nel 1973, ad un considerevole sversamento di idrocarburi da un deposito militare della zona che ne ha inquinato le acque (tutt'ora non potabili) e in seguito al quale è stato effettuato un massiccio intervento di bonifica (Stoch e Tomasin, 2002).

Similmente al caso della sorgente Casselon, anche in questo sito il CTD-Diver è esposto agli agenti esterni e quindi posto all'interno di un tubo protettivo (Fig. 25).

Figura 25: Sorgente Forame con il CTD-Diver coperto dal tubo protettivo visibile in basso a destra.

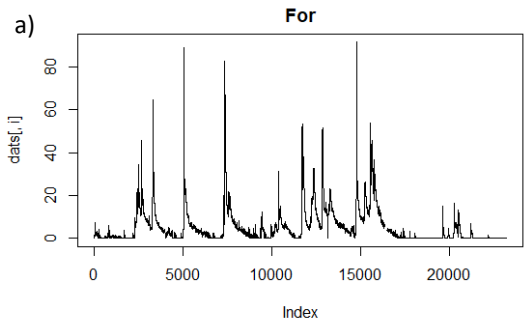
**Serie temporali di livello, temperatura e conducibilità elettrica**

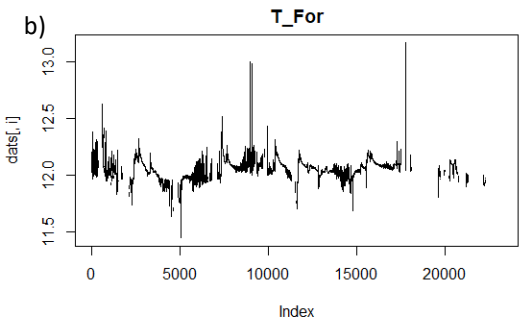
Dai dati di livello, temperatura e conducibilità elettrica, misurati dal 06/08/2019 all'01/04/2022, si sono ottenute le statistiche sommarie riportate in Tab. 9:

| | Minimo | 1° quartile | Mediana | Media | 3° quartile | Massimo |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Livello (cm) | 0.000 | 0.000 | 2.150 | 5.225 | 6.726 | 91.574 |
| T (°C) | 11.44 | 11.99 | 12.04 | 12.04 | 12.08 | 13.17 |
| EC (mS/cm) | 0.296 | 0.510 | 0.529 | 0.520 | 0.538 | 0.722 |

Tab. 9: Statistiche della sorgente Forame.

E le serie temporali dei tre parametri monitorati hanno fornito i seguenti grafici:



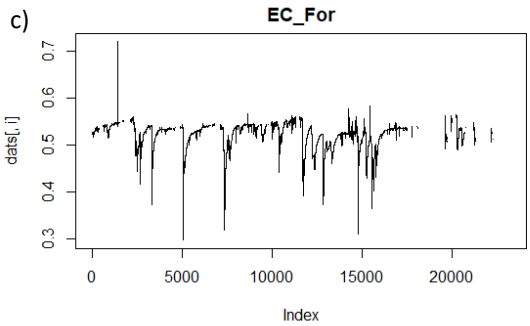



Figura 26: In ordine, serie temporali di livello (a), temperatura (b) e conducibilità elettrica (c) della sorgente Forame.

Il grafico del livello dell'acqua (Fig. 26-a) è simile a quello della sorgente Casselon, ma con picchi più bassi e anche qui, dopo luglio/agosto 2021, si nota un appiattimento consistente, riferibile ad un periodo di secca in cui sono stati spesso misurati 0 cm d'acqua.

Nel grafico della temperatura (Fig. 26-b) si riescono ad individuare le variazioni in corrispondenza degli aumenti del livello dell'acqua sia con innalzamenti della temperatura, che con abbassamenti.
Anche in questo caso la presenza di zone vuote all'interno della serie temporale è dovuta a periodi in cui non vi era flusso d'acqua uscente dalla sorgente.

Similmente a ciò che si è evidenziato nel grafico della temperatura, anche nel caso della conducibilità elettrica (Fig. 26-c) si riscontrano variazioni riferite agli eventi di innalzamento del livello d'acqua; in particolare si tratta di diminuzioni della conducibilità per effetto delle acque piovane che presentano una bassa conducibilità elettrica.

**Flow duration curve (FDC)**

Il grafico della FDC (Fig. 27) è caratterizzato da una forte pendenza nelle prime percentuali di livello (0-5%) dovuta al rapido svuotamento del sistema carsico. Successivamente segue una zona (5-15%) in cui la pendenza è minore, pur presentando differenze di livello abbastanza importanti, e infine (dal 15% in poi) vi è una diminuzione della curva costante, fino ai valori minori, che evidenzia un flusso di base dovuto alla componente più fratturata del sistema.

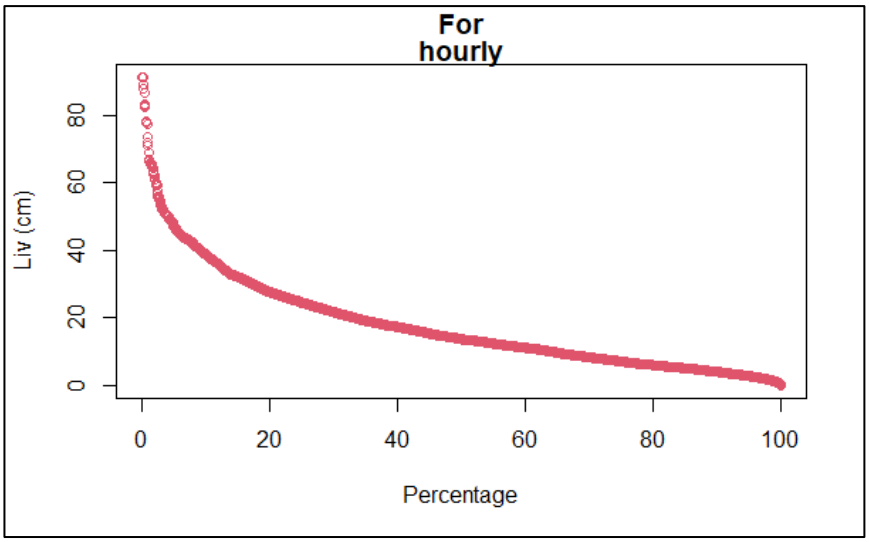



Figura 27: Grafico della FDC della sorgente Forame.

**Autocorrelazione (ACF)**

Il grafico ottenuto tramite ACF (Fig. 28) ha una forte diminuzione nelle prime 150 ore che attesta un sistema dotato di scarsa memoria e durante le quali prevale la componente di svuotamento dei condotti più sviluppati. Successivamente vi sono due cambi di pendenza: il primo a 150 ore in cui la curva si fa meno ripida, e il secondo a 400 ore in cui la curva quasi si appiattisce descrivendo una componente del sistema con un minor grado di carsismo, dotata di lunga memoria e che può accumulare le acque sotterranee ritardandone lo scarico.

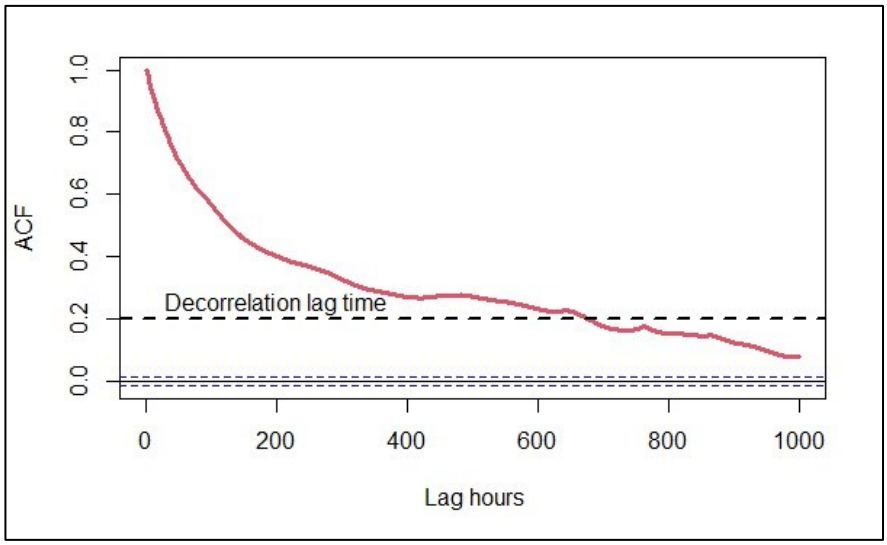



Figura 28: Grafico dell'ACF della sorgente Forame.

**Cross-correlazione (CCF) tra livello vs piogge**

Nella CCF fra il livello della sorgente e le precipitazioni (Fig. 29) si registrano delle correlazioni positive dal lag 3 in poi, quindi passano circa 2 ore dall'evento di ricarica alla registrazione di un aumento del livello d'acqua uscente. L'iniziale correlazione negativa è probabilmente dovuta all'aumento delle precipitazioni accompagnato da una variazione nulla del livello d'acqua delle sorgenti.

La correlazione è molto simile per le quattro stazioni, con valori al di sotto delle bande di confidenza dopo circa 7 ore (correlazione positiva per 4/5 ore).

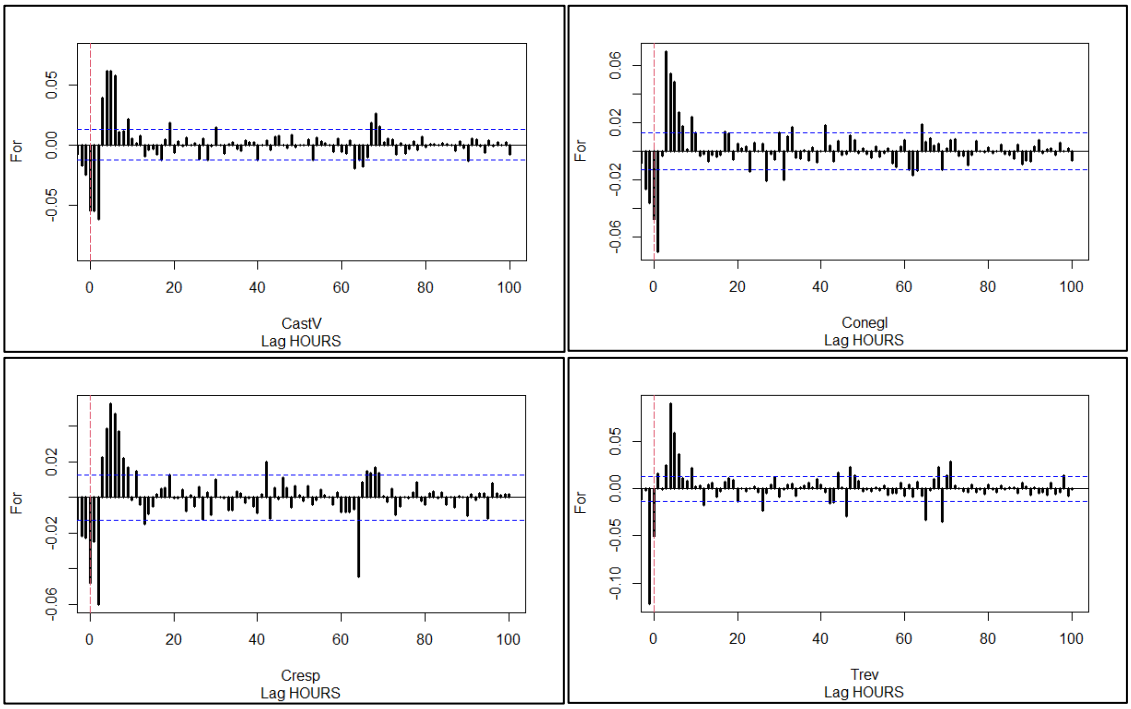



Figura 29: CCF tra livello del Forame e le piogge misurate nelle quattro stazioni pluviometriche.

**Cross-correlazione (CCF) fra Livello vs T, Livello vs EC e T vs EC**

Nella CCF tra livello vs temperatura dell'acqua (Fig. 30-a) si osserva una correlazione negativa durante i lag 0, 1 e 2, cioè un aumento della T senza aumento di livello. Nei lag successivi (4, 5 e 6) si registrano invece correlazioni positive e la temperatura che aumenta con il livello.

La CCF tra livello vs conducibilità elettrica (Fig. 30-b) si comporta in modo simile a quella precedente. Vi sono delle correlazioni negative a lag 0, 1 e 2 e delle successive correlazioni positive che testimoniano un aumento di conducibilità.

Nella CCF tra temperatura e conducibilità (Fig. 30-c) sono presenti una serie di correlazioni negative poco marcate a lag 1, 3, 4, 5 e 6 che evidenziano un comportamento non chiaro fra i due parametri.

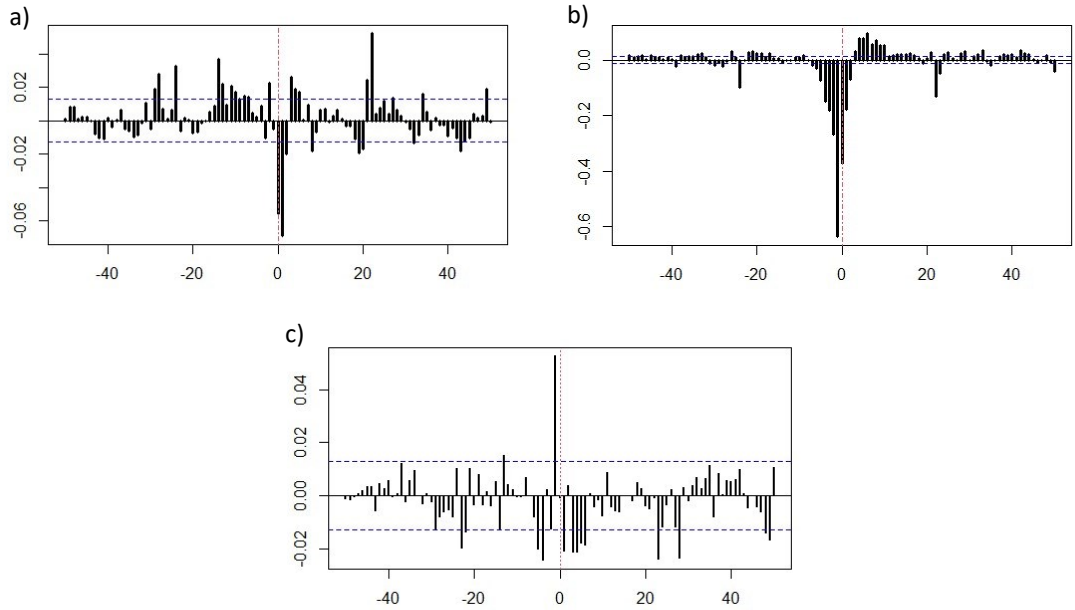



Figura 30: In ordine, CCF tra livello vs T (a), livello vs EC (b) e T vs EC (c) della sorgente Forame.

**Indice VESPA**

I dati ottenuti dall'indice VESPA, calcolato con l'equazione (7), sono riportati in Tab. 10:

| | ρ | c(ρ) | β | γ | V |
|---|---|---|---|---|---|
| Forame | -0.905 | 0.905 | 1.188 | 7.423 | 7.982 |

Tab. 10: Indice VESPA e parametri che rientrano nell'equazione per il suo calcolo per la sorgente Forame.

I valori degli indici ρ e c(ρ) rientrano all'interno del range riferito ad un comportamento di sostituzione (Tab. 2) e la vulnerabilità pari a 7.982 è alta (Tab. 1).

I risultati dell'indice VESPA confermano la presenza di condotti ben sviluppati che permettono un rapido scarico delle acque dopo circa due ore dall'evento di ricarica, come dimostrato dalle CCF (Fig. 29 e 30).

# 5. CONCLUSIONI

Lo studio ha previsto l'analisi di tre sorgenti carsiche situate nel Montello (TV) con l'obiettivo di comprenderne il comportamento e di valutarne la vulnerabilità in relazione al tipo di sistema carsico che le alimenta.

Per lo svolgimento del lavoro sono stati utilizzati i dati delle stazioni pluviometriche (Arpav) e quelli registrati dal 06/08/2019 all'01/04/2022, con cadenza oraria, dai CTD-Diver posti in ciascuna delle tre sorgenti.

Dalle correlazioni degli eventi di precipitazione con i parametri di livello, temperatura e conducibilità elettrica dell'acqua è stato possibile ottenere informazioni qualitative in merito al comportamento delle sorgenti e, in particolare, al loro tempo di risposta rispetto agli eventi di ricarica. Il calcolo dell'indice VESPA ha inoltre permesso sia di classificare il tipo di sorgente e di acquifero ad essa associato, sia di svolgere una valutazione della vulnerabilità per ciascuno dei tre sistemi studiati. La vulnerabilità di un sistema carsico è infatti strettamente connessa al suo comportamento e al suo grado di sviluppo, cioè alla sua permeabilità.

Le informazioni ottenute dalle analisi svolte hanno permesso la formulazione di un modello concettuale idrogeologico per ciascuna sorgente; nello specifico si è rilevato un comportamento di sostituzione, con alta vulnerabilità, per le sorgenti Casselon e Forame e un comportamento intermedio fra pistonaggio e sostituzione, con media vulnerabilità, per la sorgente Tavaran Lungo.

Data la relativa lunghezza del periodo monitorato e delle serie di dati, potrebbe risultare utile eseguire delle ulteriori analisi suddivise per durata di un anno in modo da approfondire il comportamento dei sistemi lavorando su periodi poi confrontabili fra loro, anche in vista di valutare possibili variazioni del comportamento delle sorgenti e l'evolversi dei loro sistemi di ricarica.

Ulteriori approfondimenti del lavoro dovrebbero prevedere la costruzione di una scala delle portate, in modo da associare i livelli dell'acqua misurati alle effettive portate uscenti, e la realizzazione di prove di tracciamento per verificare nel dettaglio le zone di ricarica, i percorsi e i tempi di percorrenza delle acque attraverso i sistemi che alimentano le sorgenti.

È bene tener presente che lo studio è stato condizionato, nel suo tratto finale, da un significativo periodo di siccità iniziato dalla seconda metà del 2021 (Fig. 10) e riflesso

diretto dell'attuale crisi idrica. Durante tale periodo si è misurata una netta diminuzione dei fenomeni di precipitazione con le sorgenti spesso in stato di secca; l'assenza di acqua in sorgente ha quindi esposto all'aria i CTD-Diver portando ad avere all'interno delle serie temporali sequenze di dati influenzati da tale condizione.

# BIBLIOGRAFIA


1. De Weale J., Piccini L. *Speleogenesi e morfologia dei sistemi carsici in rocce carbonatiche*, Atti del 45° Corso CNSS-SSI di III livello di Geomorfologia Carsica, 2008, pp. 24-58.
2. Del Soldato M. *Le vie del carsismo … a passeggio nelle meraviglie del mondo ipogeo alle origini dei Liguri*, Guida alle escursioni, Editrice Il Cigno, 2015, pp. 30-47.
3. Savio D., Stadler P., Reischer G. H., et al. *Opening the black box of spring water microbiology from alpine karst aquifers to support proactive drinking water resource management*, WIREs Water, 2018, pp. 1-5.
4. Ghasemizadeh R., Hellweger F., Butscher C., et al. *Groundwater flow and transport modeling of karst aquifers, with particular reference to the North Coast Limestone aquifer system of Puerto Rico*, Hydrogeology Journal, 2012, 20, pp. 1441-1461.
5. Stoch F., Tomasin G. *La fauna delle acque carsiche sotterranee del Montello*, Speleologia Veneta, 2002, 10, pp. 41-58.
6. Ferrarese F., Sauro U. *Montello; La Geomorfologia del Montello*, 3KCL, 2005, pp. 27-38.
7. Ferrarese F. *Doline di crollo*, Società Speleologica Italiana, 2000, 43, pp. 35- 40.
8. Zampieri D. *Montello; Elementi di Geologia*, 3KCL, 2005, pp. 21-25.
9. Zampieri D., Ferrarese F., Sauro U. *Montello; Aspetti della speleogenesi del Montello*, 3KCL, 2005, pp. 39-42.
10. Sauro U., Castiglioni B. *Montello; Il Montello: uno sguardo d'insieme*, 3KCL, 2005, pp. 141-145.
11. Torresan F., Fabbri P., Piccinini L., et al. *Defining the hydrogeological behavior of karst springs through an integrated analysis: a case study in the Berici Mountains area (Vicenza, NE Italy)*, Hydrogeology Journal, 2020, 28, pp. 1229-1247.
12. Panagopoulos G., Lambrakis N. *The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteristics of the karst systems: Application on two typical karst aquifers of Greece (Trifilia, Almyros Crete)*, Journal of Hydrology, 2006, 329, pp. 368-376.

13. Zhang Z., Chen X., Chen X., Shi P. *Quantifying time lag of epikarst-spring hydrograph response to rainfall using correlation and spectral analyses*, Hydrogeology Journal, 2013, 21, pp. 1619-1631.
14. Banzato C., Vigna B., Galleani L., Lo Russo S. *Application of the Vulnerability Estimator for Spring Protection Areas (VESPA index) in mountain Quaternary aquifers*, Intervento presentato al convegno GeoHydro2011, 2011.
15. Galleani L., Vigna B., Banzato C., Lo Russo S. *Validation of a Vulnerability Estimator for Spring Protection Areas: The VESPA index*, Journal of Hydrology, 2011, 396, pp. 233–245.
16. Cavallo C., Dal Molin L., De Waele J., et al. *Il censimento delle sorgenti carsiche d'Italia*, Atti del XIX Congresso Nazionale di Speleologia,2003, Vol. 2°, pp. 29-34.
17. Bonacci O. *Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers*, Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologique, 1993, pp. 51-62.
18. Sauro U. *Montagne vive. Esempi di evoluzione di morfostrutture carsiche*, Atti del 45° Corso CNSS-SSI di III livello di Geomorfologia Carsica, 2008, pp. 9-21.

# RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare il professore Paolo Fabbri che mi ha dato la possibilità di svolgere questo progetto e che mi ha permesso di conoscere i metodi e le procedure di analisi per lo studio dei sistemi carsici, approfondendo un importante ramo dell'idrogeologia. Ringrazio inoltre il Dott. Nico Dalla Libera che mi ha guidato durante le uscite al Montello insegnandomi le modalità di acquisizione e di raccolta dei dati.