



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE CHIMICHE

DIPARTIMENTO DI GEOSCIENZE

CORSO DI LAUREA IN SCIENZE E TECNOLOGIE PER L'AMBIENTE

STUDIO IDROGEOLOGICO DI UNA SORGENTE CARSICA A NANTO (VI)

Relatore: Prof. Paolo Fabbri

Laureando: Riccardo Gianello
(n°1228755)

Anno Accademico 2021/2022

INDICE

Introduzione

1. Il carsismo
 - 1.1 Struttura ed evoluzione di un sistema carsico
 - 1.2 Forme del carsismo
 - 1.3 Le sorgenti
2. Inquadramento area di studio
 - 2.1 Origine e geologia dei Monti Berici
 - 2.2 Geomorfologia dei Monti Berici
 - 2.3 Sistema idrico dei Monti Berici
3. Strumenti
 - 3.1 Metodi utilizzati
4. Analisi dati e discussione
 - 4.1 Analisi delle piogge
 - 4.2 Analisi della sorgente
 - 4.3 Vulnerabilità della sorgente
5. Conclusioni
6. Bibliografia

- **INTRODUZIONE**

Lo studio riguarda il comportamento idrogeologico della sorgente di Nanto (VI) e l'analisi della sua vulnerabilità, ed in particolare il suo livello di carsismo e un suo modello idrogeologico.

Quest'analisi è svolta basandosi su un monitoraggio in continuo ed una successiva analisi di alcuni parametri della sorgente come livello, conducibilità elettrica e temperatura. Il monitoraggio si è effettuato utilizzando uno specifico strumento chiamato CTD-Diver, che è posizionato nel punto di scarico della sorgente. Oltre a questi dati è stato necessario richiedere all'Arpav e ad un privato che si occupa di rilevazioni in zona, le precipitazioni e le pressioni misurate nell'arco di tempo considerato, in modo tale da avere tutti gli elementi per effettuare un'analisi completa del comportamento della sorgente. Infine, l'analisi di tutti questi dati raccolti è stata svolta utilizzando uno specifico software statistico, chiamato R-Studio (RStudio Team 2021).

1. IL CARSISMO

Il carsismo è un fenomeno che si presenta in territori costituiti in prevalenza da rocce solubili, principalmente calcari e dolomiti che, grazie all'azione dell'acqua, col tempo possono dissolversi e portare alla formazione di specifiche strutture sotterranee formate da condotti e cavità di varie dimensioni. Questo processo ha inizio dalla reazione tra acqua, anidride carbonica e specifiche rocce del sottosuolo. L'acqua meteorica è in grado di dissolvere le rocce grazie alla CO₂ che ha inglobato dall'atmosfera, e che in soluzione è diventata acido carbonico (H₂CO₃). Quest'ultimo reagisce a sua volta con il carbonato di calcio (CaCO₃) di cui sono formate le rocce calcaree, dando luogo alla formazione di bicarbonato di calcio Ca(HCO₃)₂.

La reazione chimica del fenomeno è la seguente:



Ovviamente il fenomeno carsico è incrementato da altri fattori, primi fra tutti le fratture, le faglie e pieghe nelle rocce che facilitano l'infiltrazione delle acque meteoriche e la loro azione di dissoluzione, facendo sì che il processo carsico si sviluppi.

1.1 STRUTTURA ED EVOLUZIONE DI UN SISTEMA CARSICO

Un sistema carsico è molto complesso e presenta un substrato, non soggetto a carsismo, che lo sostiene. Solitamente presenta una zona di alimentazione concentrata come possono essere un inghiottitoio oppure un corso d'acqua che da superficiale diventa sotterraneo e che passa attraverso il dreno principale, ma può anche esserci una zona di alimentazione diffusa costituita da reticoli di fratture oppure dreni secondari.

Negli acquiferi carsici è presente anche:

- una zona impermeabile
- una zona satura dove tutte le cavità della roccia sono piene d'acqua
- una zona vadosa che presenta anche cavità molto grandi che non sono quasi mai piene d'acqua
- una tavola d'acqua, che oscilla in relazione al regime delle precipitazioni

Inoltre, bisogna specificare che il limite tra la zona satura e la zona vadosa non è fisso ma varia entro un certo intervallo detto zona di oscillazione.

Infine, l'acqua che penetra nei vari condotti arriva alla sorgente che è posta più a valle del punto di partenza, ma talvolta l'acqua può uscire anche dalla cosiddetta "sorgente di troppo pieno" se il volume d'acqua che circola nel sistema è molto elevato. Un sistema carsico inoltre presenta di solito una risposta rapida agli eventi idrologici come le precipitazioni; infatti, la scarica della sorgente a seguito di un evento di questo tipo avviene in un breve lasso di tempo.

1.2 FORME DEL CARSISMO

Un sistema carsico vista la sua complessità e varietà presenta forme molto diverse tra loro e con diversa collocazione. Difatti il paesaggio carsico è diviso in epigeo e ipogeo.

L'ambiente epigeo è quello superficiale e qui le formazioni carsiche sono classificate in base alla scala del fenomeno, quindi abbiamo microforme e macroforme.

- **Microforme:** Forme erosive come i "campi solcati" che si estendono da pochi centimetri a vari metri e possono essere scannellature, impronte, solchi o docce carsiche e vaschette di corrosione.
- **Macroforme:** Sono forme carsiche più grandi come doline, inghiottitoi e valli carsiche.

Le doline sono tra le forme superficiali attive più rappresentative di un sistema carsico. È una conca chiusa e dal punto di vista idrologico rappresenta la chiusura di un bacino idrografico centripeto, dove l'acqua è convogliata verso il centro della dolina e grazie ad un inghiottitoio è scaricata per vie sotterranee. Possono essere di vari tipi come quelle ad imbuto, a crollo, composta, coperta e stagno carsico. L'ambiente ipogeo invece è quello sotterraneo, caratterizzato da grotte di varie dimensioni ma anche da canali e cunicoli con un'estensione variabile, che possono essere percorsi dai fiumi sotterranei. Questi ultimi possono scorrere nel sottosuolo per molti km e uscire in superficie creando le cosiddette "risorgive carsiche".

1.3 LE SORGENTI

Una sorgente è un punto della crosta terrestre dal quale fuoriesce, in modo naturale, un certo volume d'acqua proveniente da un acquifero sotterraneo e possono essere di vario tipo:

- sorgenti di deflusso semplice o di impregnazione
- sorgenti di emergenza o di valle
- sorgenti di versamento
- sorgenti di trabocco o sfioramento

Le sorgenti carsiche hanno un comportamento molto simile a quello di un fiume quindi la loro portata varia molto e sono molto influenzate dalle precipitazioni. Difatti si dice che hanno un comportamento misto “condotto-matrice”; in alcuni casi scaricano molta acqua come risposta dei condotti, in altri casi ne scaricano meno in quanto risposta della matrice. Inoltre, ogni sorgente ha una propria “curva di esaurimento” rappresentata da un'equazione:

$$\text{➤ } Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

- Q_0 è la portata all'istante $t=0$
- α è la costante di esaurimento, dipende da litologia, permeabilità, percolazione e grado di carsismo
- t è il tempo dall'inizio dell'esaurimento

La costante di esaurimento è molto importante in quanto se il suo valore è alto allora lo svuotamento del serbatoio sarà veloce.

Infine, le sorgenti possono essere classificate in base alla loro variabilità di portata, criterio stabilito da Meinzer, usando “l'indice di variabilità”, che si calcola con la formula seguente:

$$R_V = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\text{med}}}$$

Dove: Q_{\max} è la portata massima, Q_{\min} è la portata minima e Q_{med} è la portata media.

Grazie a questo indice quindi possiamo classificare le sorgenti in tre categorie.

- $R_V < 25 \%$ Sorgente costante
- $25 < R_V < 100 \%$ Sorgente sub-variabile
- $R_V > 100 \%$ Sorgente variabile

Questo indice è utile a selezionare le sorgenti che hanno bisogno di un intervento di regolarizzazione della portata ma allo stesso tempo può essere utilizzato se si considera la sorgente come fonte di approvvigionamento idrico. Infatti, la captazione di una sorgente con un indice di variabilità costante può risultare vantaggiosa anche con portate modeste, mentre una sorgente con indice di variabilità variabile può non risultare utilmente captabile, a meno che la portata non sia tanto importante nel periodo di massima da eccedere il quantitativo necessario a servire l'utenza e sia quindi possibile immagazzinare l'acqua per renderla disponibile in seguito.

2. INQUADRAMENTO AREA DI STUDIO

I Monti Berici (conosciuti meglio come Colli Berici, Fig.1) sono un'isola montuosa che si eleva isolata nell'alta pianura veneta a sud di Vicenza come prolungamento delle dorsali dei Lessini sudorientali (Sauro, 2002, 2003b, 2005). Hanno una forma di parallelogramma, il cui asse maggiore, orientato in direzione nord-est/sud-ovest è lungo circa 24 km, e con una superficie complessiva, di circa 165 km². Il profilo è omogeneamente arcuato, compatto e non particolarmente elevato sul livello della pianura, la cima più alta è il Monte Lungo (444 m s.l.m.), nella frazione di San Giovanni in Monte (Comune di Barbarano-Mossano).



Fig.1: Vista di parte dei Monti Berici

2.1 ORIGINE E GEOLOGIA DEI MONTI BERICI

Innanzitutto, bisogna sottolineare che i Monti Berici sono un'unità morfo-carsica più giovane rispetto ad altre come i Lessini, il Grappa, l'altopiano di Asiago o il Baldo. I molti studi effettuati sulle rocce dei Berici, e la numerosa presenza di fossili di molluschi (Accorsi Benini;1974), ricci di mare, coralli e alghe, attribuiscono a questi rilievi un'origine marina, avvenuta attraverso un lunghissimo processo di sedimentazione di resti vegetali e animali, ma è stato fondamentale anche un contributo fluviale. Le continue sollecitazioni tettoniche ed i fenomeni vulcanici, che si protrassero per un lunghissimo periodo di tempo, diedero inizio alla formazione di vari strati, dove i nuovi sedimenti seppellivano i sedimenti sottostanti, compattandoli e facendoli diventare, attraverso lunghi e complessi fenomeni fisici e chimici, una solida roccia compatta. Dal punto di vista geologico, i Berici sono costituiti per la maggior parte da calcari di età compresa fra il Cretaceo e il Miocene. Le formazioni più antiche e più recenti sono rispettivamente la Scaglia Rossa veneta presente molto fra Sossano e Nanto (Cornale et al., 1994); del Cretaceo superiore, circa 80-65 milioni di anni fa, e l'Arenaria di Sant'Urbano del Miocene medio-superiore, di circa 15 milioni di anni fa; sono presenti anche vulcaniti basiche, come basalti e tufi riferibili ad un vulcanesimo compreso tra l'Eocene e il Miocene inferiore.

2.2 GEOMORFOLOGIA DEI MONTI BERICI

Dal punto di vista morfo tettonico, i Monti Berici sono una struttura tabulare che presenta un altopiano carsico (un altopiano principale che si trova nella zona ad Est ed è largo dai 2 ai 4 km circa e lungo 10 km, mentre ve ne è un altro nella zona sud-orientale, più basso, verso la direzione della pianura) ed è costituita da un blocco, delimitato da faglie normali (Mietto,1988a), rialzato, e costituito da una sequenza di formazioni sedimentarie per lo più del Cretaceo ed età paleogeniche. Nei Monti Berici sono distinguibili sia forme che unità geomorfologiche. Possono essere considerate forme quelle che hanno caratteristiche riferibili a processi morfogenetici ben definiti, e si possono distinguere forme attive, parzialmente attive e relitte (cioè non più attive). Tra le forme attive, le più comuni sono le doline e le valli a canyon (o di scarpata), le forme parzialmente attive sono ad esempio le insenature della pianura all'interno del rilievo mentre le forme relitte sono segmenti di antiche valli interne. La presenza di queste forme dimostra che la morfologia dei Monti Berici è sia di tipo carsico che fluvio-carsico. Il carsismo in questi rilievi è stato originato dalla circolazione di flussi idrotermali, indotti dall'attività vulcanica del Paleogene o Neogene inferiore e dopo la formazione le varie cavità sono state riempite da magma (Dal Molin et al 2000., Sauro

2001). Dal punto di vista fluvio-carsico invece i Monti Berici presentano depositi di ciottoli ma anche rocce magmatiche e metamorfiche, soprattutto nella parte sommitale, che in passato si pensava derivassero da depositi glaciali (Da Schio et al. 1947., Dal Piaz 1947). Successivamente invece si è scoperto che queste rocce sono presenti in quanto la superficie era stata modellata dal corso di fiumi antichi dopo che era avvenuta una regressione marina. Inoltre, dall'immagine successiva (Fig.2) si può notare come ad un certo punto ci sia stato un cambiamento nell'attività erosiva dei fiumi. Difatti tra i 5-6 milioni di anni fa ci fu un abbassamento drastico del Mar Mediterraneo, quindi il livello di base si abbassò, e i fiumi iniziarono ad erodere maggiormente la superficie (Castiglioni et al., 1988; Mietto & Sauro, 1989, 2000) tanto che si possono ancora notare i resti dei meandri, che ora corrispondono alle valli più grandi dei Monti Berici come la Val Liona o il fondovalle di Pozzolo.

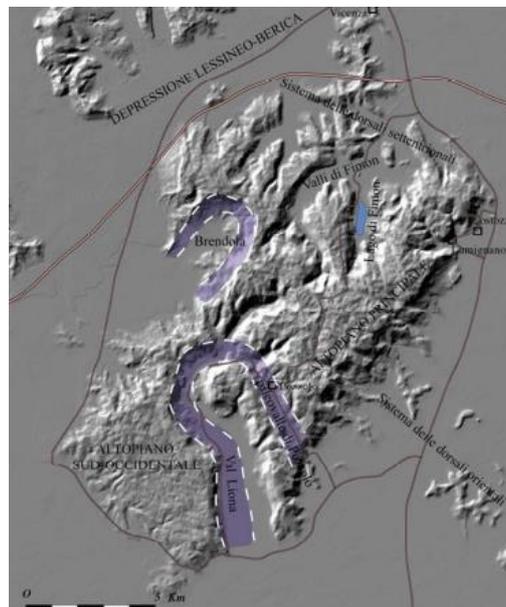


Fig.2: DEM dei Monti Berici con le principali unità geomorfologiche

2.3 SISTEMA IDRICO DEI MONTI BERICI

Il fenomeno del carsismo nei Monti Berici ha portato alla formazione di forme epigee e ipogee. Facendo riferimento alle forme ipogee, le più numerose e rappresentative sono le grotte, presenti con circa 630 unità e con un'estensione da pochi metri fino a circa 1 Km (Società Speleologica Italiana, 2019). Le forme epigee più presenti invece sono le doline, in numero molto elevato, le quali rappresentano un percorso preferenziale per l'acqua che è convogliata nel sottosuolo. Per questo motivo i Monti Berici sono privi di una rete idrografica superficiale.

L'acqua invece circola molto bene nel sistema carsico del sottosuolo attraverso condotti, fratture e matrici per infine scaricare in superficie dalle sorgenti. Questo sistema ne genera un gran numero per cui sono presenti circa 166 sorgenti (Marcolongo 2005). Di queste, 43 hanno un regime permanente (tra cui quella di Nanto) mentre le restanti 123 sono periodiche.

3. STRUMENTI

Per lo sviluppo di questa tesi è stato necessario in primis effettuare il prelievo dei dati relativi alla sorgente esaminata ovvero quella del comune di Nanto in provincia di Vicenza ($45^{\circ} 26' 05''$ N, $11^{\circ} 34' 38''$ E). Il monitoraggio della sorgente nel tempo, da maggio 2021 a luglio 2022, con cadenza oraria, è stato possibile utilizzando uno strumento multi-parametrico chiamato CTD-Diver. Questo era posto nel punto di scarico della sorgente, all'interno di una vasca, che poi fluiva in una vasca più grande posta ad una altezza inferiore. Lo strumento ha consentito il rilevamento della temperatura (T°) (espressa in $^{\circ}\text{C}$; range tra -20° a 100° , precisione $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ e risoluzione 0.01°C), della conducibilità elettrica (EC) a 25° (ovvero il contenuto di ioni presenti in acqua espresso in mS/cm ; range $0\text{-}30 \text{ mS/cm}$, precisione $\pm 1\%$ accuratezza di lettura $\pm 0.1\%$) e il livello della vasca della sorgente (dunque il valore in cm interposto tra il pelo libero dell'acqua e la posizione dello strumento; range $0\text{-}1000 \text{ cm}$, accuratezza $\pm 0.5 \text{ cm}$, risoluzione 0.2 cm). Lo strumento è dotato di una membrana molto sensibile in grado di rilevare la pressione dell'acqua sopra di esso, la quale è anche influenzata dalla pressione atmosferica. Di conseguenza nella fase di analisi dei dati è stato necessario compensare il valore fornito dallo strumento sottraendo dalla pressione rilevata quella atmosferica. I valori di pressione e precipitazioni utilizzati sono stati forniti dall'ARPAV (Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto) tramite le varie stazioni termopluviometriche sparse nel territorio, e da un privato che si occupa di rilevazioni nel comune di Nanto (VI). Le stazioni delle quali sono stati richiesti i dati sono state quelle di Brendola e Barbarano-Mossano, in quanto le più vicine alla sorgente. Successivamente alla raccolta dei dati è stata eseguita la loro elaborazione utilizzando un software statistico, R-Studio, che rappresenta un'interfaccia grafica di R (R Core Team 2021) che è un ambiente open source pensato appositamente per la realizzazione di analisi statistiche. Il software ha permesso l'analisi statistica dei dati, quindi, ha fornito i grafici dei vari parametri nel tempo, le statistiche nel tempo (massimi, minimi e quartili). Infine, ha permesso di valutare l'autocorrelazione (ACF) e la cross-correlazione (CCF) tra le serie di dati e la curva di durata (FDC) della sorgente.



Fig.3: CTD-Diver

3.1 METODI UTILIZZATI

- **FDC** (Flow duration curve): questa curva è ottenuta ordinando le portate dal valore più alto a quello più basso, senza tener conto della loro sequenza cronologica. Il grafico ottenuto mostra la portata sull'asse delle ordinate e la percentuale del tempo di monitoraggio, che ha superato la soglia di portata specificata, sull'asse delle ascisse.

L'FDC può essere utilizzato per stimare le principali caratteristiche del sistema carsico analizzando la pendenza della curva.

Infatti, la presenza di pendenze elevate segnala condotti carsici ben sviluppati (condotto dominante flusso), mentre le basse pendenze indicano sistemi con un carsismo più ridotto; quindi, scarsi condotti e prevalenza di un flusso a matrice (Malik 2015).

- **ACF** (Autocorrelation function): questa funzione è utile per valutare la memoria di un sistema, che viene stimata calcolando la correlazione tra una serie di valori di un parametro e la stessa serie ritardata di un certo tempo, definito lag-time. L'interpretazione del comportamento della sorgente è considerata valida fino ad un valore di autocorrelazione, generalmente compreso tra 0,1 e 0,2 al di sotto del quale si dice che non si ha autocorrelazione. (Mangin 1984; Liu et al. 2011; Panagopoulos e Lambrakis 2006; Tagne e Dowling 2018; Zhang et al. 2013).

Il software R-Studio permette di calcolare la ACF e disegna un grafico dove è rappresentata la curva di autocorrelazione, ottenuta ponendo sull'asse delle ascisse ritardi crescenti (il lag-time) di un'ora (quindi la serie di dati è traslata di un'ora, due ore, tre ore, etc) e sull'asse delle ordinate

il coefficiente di autocorrelazione. Descrivendo la memoria del sistema, questa funzione ci fornisce delle indicazioni sul grado di carsificazione del sistema stesso, tenendo conto che i valori di autocorrelazione di una serie temporale di un sistema molto carsico diminuiscono rapidamente; quindi, la curva è molto pendente (Chung et al. 2018; Liu et al. 2011), il che può essere interpretato come un sistema con memoria corta e di conseguenza un carsismo ben sviluppato. L'ACF è calcolata in questo modo (Zhang et al. 2013):

$$r(k) = \frac{C(k)}{C(0)} \quad (1)$$

Dove:

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

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

dove k è l'intervallo di tempo, n è la lunghezza della serie temporale, t è il tempo, x è la variabile analizzata e \bar{x} è la media della variabile.

- **CCF** (Cross-correlation function) : la funzione di cross-correlazione è utilizzata per determinare la risposta della sorgente nel tempo, alla conducibilità elettrica ed alla temperatura ed inoltre analizzare la relazione tra segnali di input e dei segnali di output. In questo caso sono stati correlati (T, EC e Q) con le precipitazioni (R). Prima che questi dati vengano confrontati però, è necessario sottoporli ad un semplice “filtraggio” in quanto di solito T, EC e livello sono spesso delle variabili molto autocorrelate. Il processo consiste nell'eseguire la differenza tra un dato e il dato precedente e rendere così non autocorrelati i parametri. In pratica la CCF rappresenta la correlazione esistente tra due diverse variabili rispetto ad un tempo di ritardo. Tramite i grafici che il software elabora, è possibile determinare se i due parametri considerati sono tra loro correlati positivamente, nel caso in cui ci sia un aumento o una diminuzione in contemporanea delle due variabili messe a confronto, oppure negativamente, se invece le due serie si comportano in modo opposto (una aumenta e l'altra diminuisce o viceversa). Ovviamente sono state cross-correlate anche le piogge, per vedere se in entrambe le stazioni pluviometriche prese in esame, gli eventi di precipitazioni sono avvenuti in simultanea o meno. La cross-correlazione comunque può essere descritta dalle seguenti relazioni:

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

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

dove u è la variabile di input e y quella di output, \bar{u} e \bar{y} sono le medie dei parametri di input e output. La CCF è dunque definita come:

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

L'equazione è stata utilizzata principalmente per analizzare la correlazione incrociata tra la pioggia (input) e la portata(output), per definire la risposta del sistema e per valutare quantitativamente il tempo di percorrenza dell'acqua meteorica per attraversare la zona vadosa. Nel caso ci fosse una cross-correlazione con ritardo, questo veniva inteso come un ritardo (espresso in ore) della risposta della sorgente ad un evento di ricarica. Inoltre, sono state effettuate cross-correlazioni tra i vari parametri come Q vs T e Q vs EC che permettono di determinare il comportamento della sorgente. Ad esempio, il confronto portata-conducibilità elettrica è utilizzato per determinare il tempo minimo di percorrenza dell'acqua neo-infiltrata per transitare attraverso il sistema di condotti e raggiungere il punto di emersione alle sorgenti. Di conseguenza, è possibile ottenere informazioni sulla dimensione del sistema carsico. L'analisi di T vs EC si fa per determinare se i due parametri sono sincroni difatti di solito un aumento di EC corrisponde ad un aumento di T . Come detto in precedenza, le conclusioni si traggono come per l'ACF, tramite dei grafici 2D chiamati cross-correlogrammi, in cui il valore di correlazione (tra -1 e +1) è riportato sulle ordinate e il ritardo (lag time) è riportato sulle ascisse. Su questi grafici sono presenti anche delle bande di confidenza, una positiva ed una negativa. Se due serie di dati sono correlate, il valore di correlazione deve essere necessariamente superiore alle bande di confidenza, se invece è inferiore allora la correlazione non è significativa. Queste due linee limite sono così determinate: $-\frac{1,96}{\sqrt{n}}$ e $\frac{1,96}{\sqrt{n}}$

Istogrammi delle piogge: questi grafici sono utili per riuscire ad individuare la precipitazione nell'intervallo di tempo considerato. Nell'asse delle ordinate sono posti i mm di pioggia mentre nell'asse delle ascisse il tempo. Le piogge sono anche rappresentate tramite box-plot ovvero una rappresentazione grafica utilizzata per descrivere la distribuzione di un campione tramite semplici indici di dispersione e di posizione. Viene rappresentato in modo orizzontale o verticale tramite un rettangolo diviso in due parti, da cui escono due segmenti ovvero i cosiddetti baffi che rappresentano i valori massimi e minimi, ed è delimitato dal primo e dal terzo quartile mentre è

diviso al suo interno dalla mediana. I valori che si trovano oltre i baffi sono detti outliers e rappresentano i valori estremi.

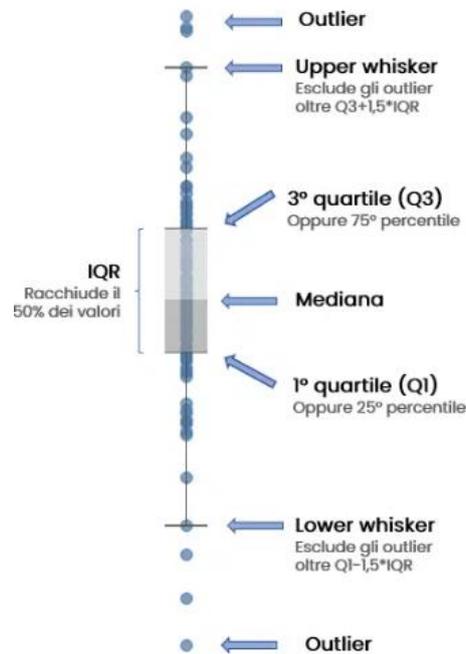


Fig.4: Rappresentazione di un box-plot

Oltre ai parametri sopra descritti, che indicano vari aspetti della sorgente, è fondamentale anche classificarne il comportamento, tramite l'utilizzo di parametri dell'indice V.E.S.P.A (Vulnerability Estimation for Spring Protection Area) basato su dati già visti ovvero T, EC, e Q. Questo metodo consente anche di determinare la vulnerabilità all'inquinamento consentendo anche di definire una zona di salvaguardia. L'indice V.E.S.P.A si calcola in questo modo:

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

Dove $c(\rho)$ è il fattore di correlazione che varia da 1 a 0 secondo l'equazione:

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

dove ρ è il coefficiente di correlazione tra livello ed EC, e può essere compreso tra $-1 \leq \rho \leq 1$; $u(\rho)$ è la funzione gradino di Heaviside la quale può assumere due valori:

$$u(\rho) = 1 \text{ se } \rho \geq 0$$

$$u(\rho) = 0 \text{ se } \rho < 0$$

α invece è un coefficiente scalare compreso tra $0 \leq \alpha \leq 1$ che normalmente si presume essere 0,5. β e γ sono rispettivamente i fattori di temperatura e di portata ,definiti come:

$$\beta = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{1 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$\gamma = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\text{med}}}$$

dove T_{\max} e T_{\min} sono rispettivamente la temperatura massima e la temperatura minima, Q_{\max} , Q_{\min} e Q_{med} sono rispettivamente i valori di massimo, minimo e media portata della sorgente registrati nel periodo di monitoraggio. Bisogna però spiegare cosa rappresentano e come possono essere interpretati i valori di β e γ . Infatti, un valore di β molto basso, dato da una piccola differenza tra i due valori di temperatura indica un lungo tempo di permanenza nell'acquifero, e quindi una falda poco vulnerabile. Mentre man mano che i valori di β crescono, aumenta la vulnerabilità. Lo stesso ragionamento vale per γ . Quindi ad una variazione bassa corrisponde un modesto grado di vulnerabilità, una maggiore differenza delle portate indica invece un processo di carica/discarica veloce e quindi un aumento della vulnerabilità della sorgente, fattore che influisce sull'indice V.E.S.P.A anche se in modo meno rilevante rispetto a β .

| VULNERABILITA' | INDICE V.E.S.P.A |
|-----------------------|-------------------------|
| Bassa | $0 \leq V < 0,1$ |
| Media | $0,1 \leq V < 1$ |
| Alta | $1 \leq V < 10$ |
| Molto alta | $V > 10$ |

Tab.1: Classi di vulnerabilità V.E.S.P.A

In base ai fattori c (ρ) e ρ sono stati proposti tre differenti tipi di serbatoio acquifero carsico:

- **Sostituzione:** Il fenomeno di “sostituzione” rappresenta un sistema carsico ben sviluppato. Qui le acque meteoriche arrivano velocemente alla sorgente, dove vi è un forte aumento della

portata, con conseguente diminuzione della conducibilità elettrica e una diminuzione della temperatura che dipende dalla temperatura dell'acqua piovana influenzata dalla stagione.

- **Pistonaggio:** Il comportamento di questo tipo è causato da un sistema carsico meno sviluppato del precedente ma con un buon sistema di immagazzinamento. Questo fenomeno produce un aumento di Q, T e EC a causa del comportamento a pistone che espelle l'acqua immagazzinata.
- **Omogenizzazione:** In questo caso il sistema carsico è poco sviluppato quindi la risposta della sorgente all'evento di pioggia è poco evidente o assente. Difatti in questo caso si notano fluttuazioni modeste e lente di livello che non sono correlate a T ed EC.

| TIPOLOGIA | Coefficiente di correlazione ρ | Fattore di correlazione $C(\rho)$ |
|--------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Sostituzione(A) | $-1.0 \leq \rho \leq -0.2$ | $0.2 \leq c(\rho) \leq 1.0$ |
| Pistonaggio(B) | $0.2 \leq \rho \leq 1.0$ | $0.1 \leq c(\rho) \leq 0.5$ |
| Omogenizzazione(C) | $-0.2 \leq \rho \leq 0.2$ | $0 \leq c(\rho) \leq 0.2$ |

Tab.2: Intervalli del coefficiente di correlazione e fattore di correlazione per i tre tipi di sistemi.

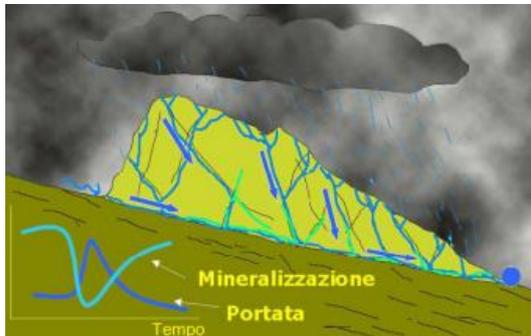


Fig.5: Sistema a sostituzione.

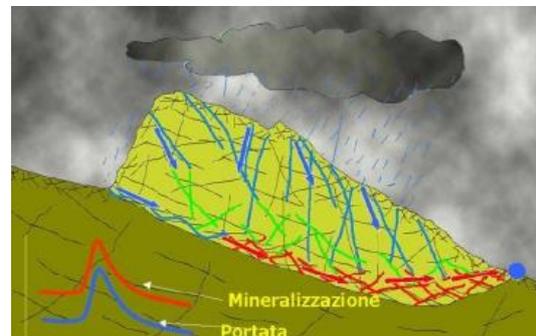


Fig.6: Sistema a pistonaggio.

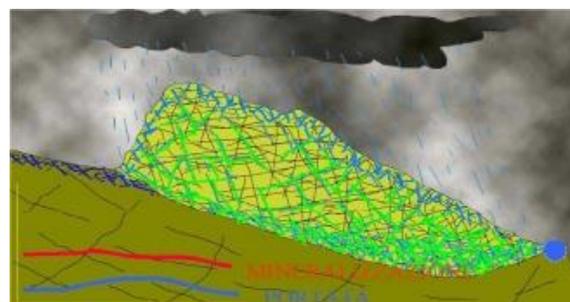


Fig.7: Sistema ad omogenizzazione.(Aurighi M. et al., 2019)

4. ANALISI DATI E DISCUSSIONE

4.1 ANALISI DELLE PIOGGIE

Per quanto riguarda le piogge, queste sono state rilevate con cadenza oraria come per gli altri dati, dal 20/05/2021 al 25/07/2022. Le stazioni termo-pluviometriche utilizzate sono state quelle dell'ARPAV di Brendola e Barbarano-Mossano, i due comuni più vicini alla zona della sorgente.

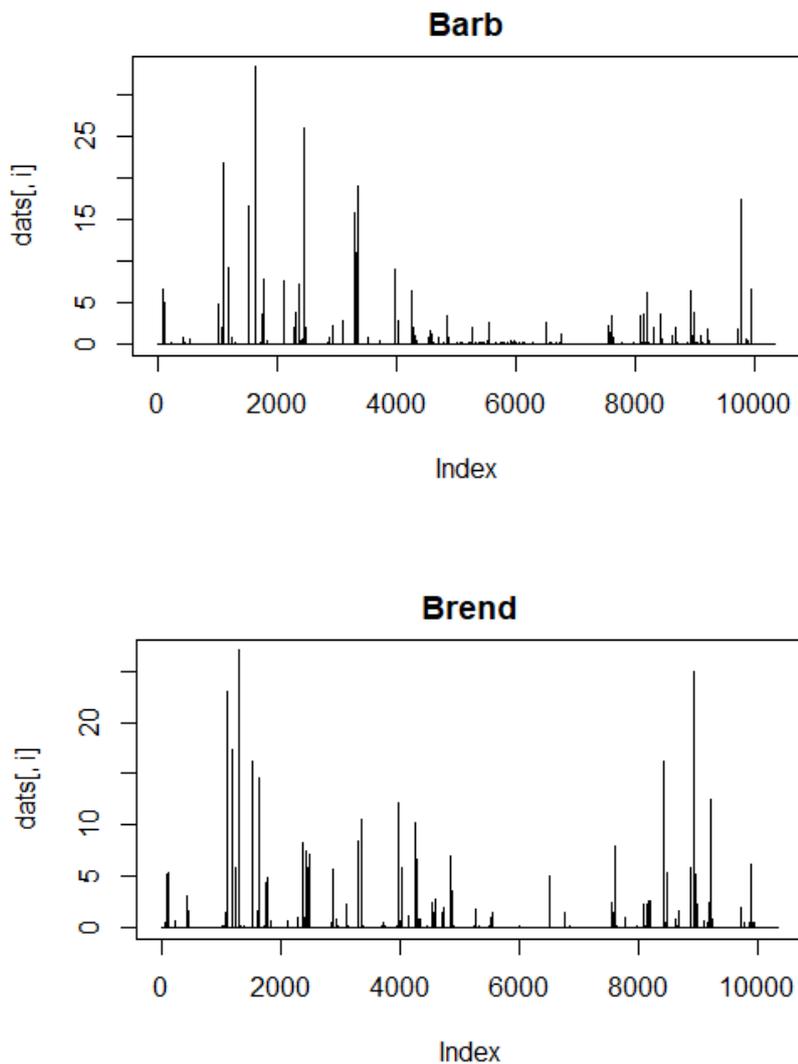


Fig.8 e Fig.9: precipitazioni registrate dalla stazione di Brendola, in ascissa i valori in ordine cronologico, in ordinata i valori registrati.

Da questi due grafici si evince come l'andamento delle piogge in generale appaia simile. Le differenze più rilevanti si riscontrano in due punti:

- Nella parte iniziale del grafico dove nella stazione di Barbarano-Mossano sono stati registrati valori maggiori in un periodo che va da agosto a settembre 2021.
- Nella parte finale del grafico dove nella stazione di Brendola sono stati rilevati quantitativi di pioggia maggiori, questa volta nel periodo di maggio 2022.

Infine, dagli istogrammi di frequenza sottostanti (Fig.10 e Fig.11) si può notare come i valori di precipitazione più presenti vanno tra 0 e 1 mm sia per la stazione di Barbarano-Mossano che di Brendola.

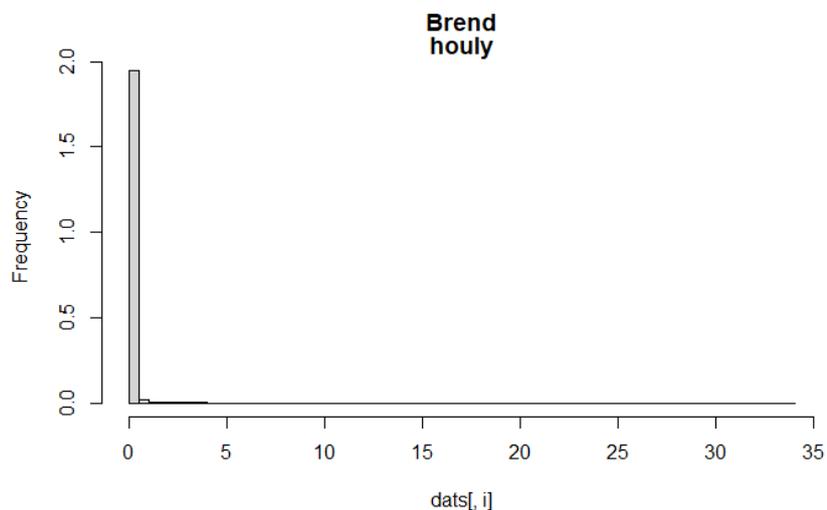
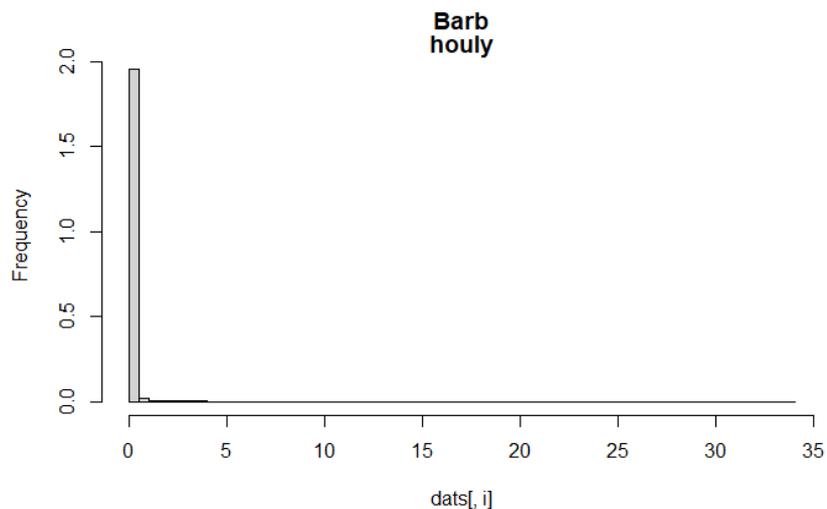


Fig.10 e Fig.11: istogrammi delle piogge, in ascissa il valore rilevato in mm, in ordinata la frequenza del dato nel periodo di analisi.

4.2 ANALISI DELLA SORGENTE DI NANTO

La sorgente di Nanto è situata alle pendici dei Monti Berici nel comune di Nanto ad una quota di circa 20 m s.l.m. Il CTD-Diver posto nel punto di scarico ha rilevato EC, T ed livello della sorgente, riassunti in tabella. (Tab.4)



Fig.12: Vasca di raccolta primaria dell'acqua,all'interno è posizionato il CTD-Diver

| | Min | 1st quart | Median | Mean | 3rd quart | Max |
|-----------------|-------|-----------|--------|--------|-----------|--------|
| EC(mS/cm) | 0.498 | 0.6180 | 0.6270 | 0.6323 | 0.6430 | 0.6910 |
| T(°C) | 14.64 | 15.84 | 15.91 | 15.87 | 15.94 | 16.18 |
| Livello (cm) | 42,53 | 45.78 | 46.61 | 46.69 | 47.13 | 71.16 |

Tab.3: Tabella riassuntiva dei valori statistici dei parametri della sorgente

Ora è doveroso analizzare come si comportano i tre parametri monitorati. Per farlo bisogna utilizzare i grafici di figure 13,14,15 sotto riportati. Nella figura 13, nelle ordinate si riporta il livello(cm), in figura 14 la T (C°) ed in figura 15 la conducibilità elettrica(mS/cm), nelle ascisse il tempo in ora dall'inizio del monitoraggio.

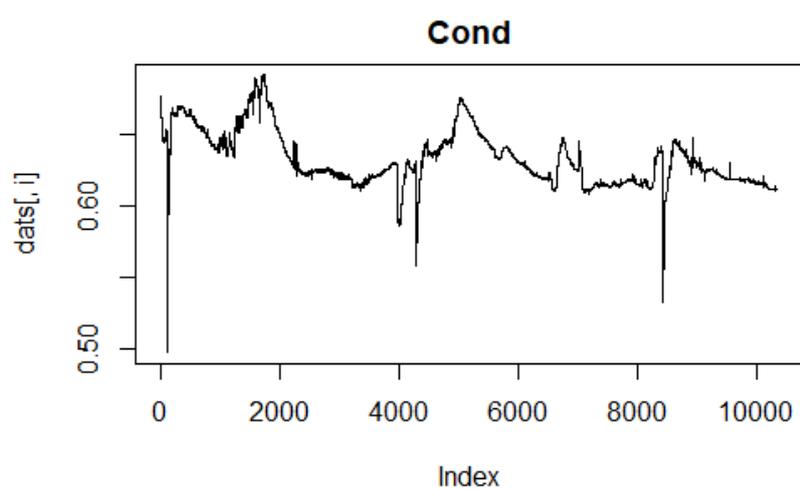
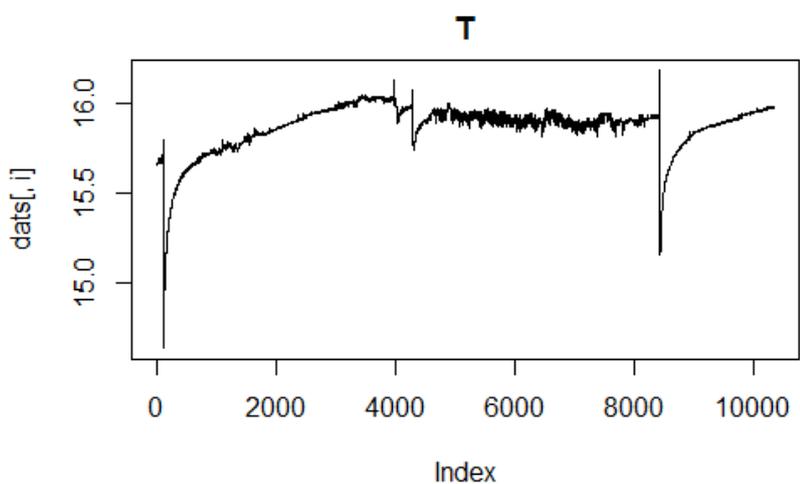
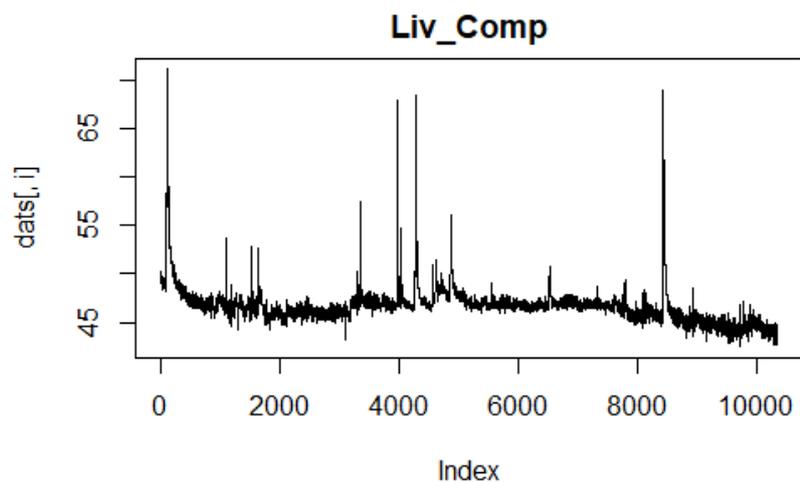


Fig.13,14 e 15: Grafici di livello, temperatura e conducibilità dove in ascissa i dati sono riportati in ordine cronologico mentre in ordinata sono presenti i valori registrati.

Dalla figura 13, si osserva che ci sono quattro picchi importanti di livello in tutto l'arco di tempo analizzato. Quello con il valore più alto risulta essere il primo, con 71,16 cm. Si può notare come in corrispondenza di ogni picco di livello ci sia una diminuzione sia della temperatura che della conducibilità. Per quanto riguarda il primo e l'ultimo picco i valori di T e EC sono calati notevolmente e questo può essere dovuto ad una veloce circolazione dell'acqua meteorica nel sistema idrico sotterraneo. Di conseguenza l'acqua non ha avuto il tempo di solubilizzare i minerali delle rocce e la temperatura è rimasta pressoché quella iniziale dell'acqua meteorica. I due picchi centrali di livello (circa ottobre 2021), che non si discostano molto dal valore di quelli precedentemente descritti, hanno portato ad una diminuzione molto meno marcata di T e EC. L'ipotesi qui è che nel sistema carsico circolasse già dell'acqua che a seguito della precipitazione è stata spinta verso la sorgente, per questo non c'è stata una variazione eccessiva dei due parametri. Infine, nel grafico della conducibilità elettrica (Fig. 15) ci sono diversi picchi positivi a cui però non corrispondono dei picchi di temperatura (Fig. 14) ma questa tende a rimanere abbastanza costante.

Altro importante parametro da analizzare è la:

➤ **Flow Duration Curve (FDC)**

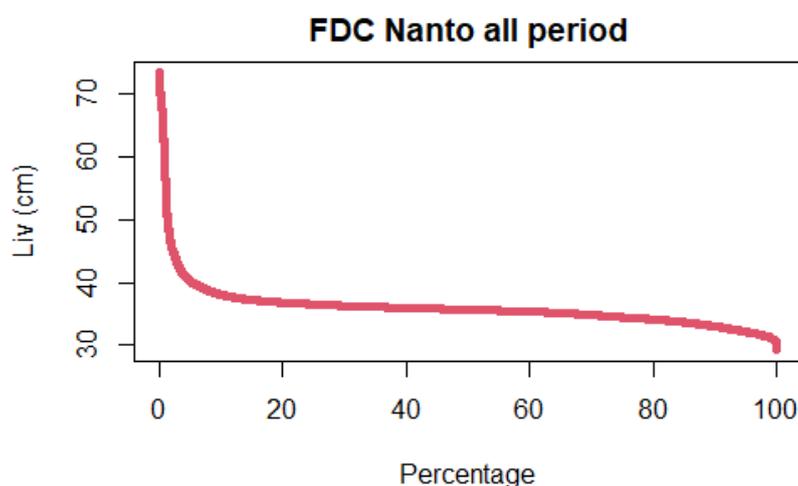


Fig.16: Grafico della FDC

Analizzando la figura 16, possiamo notare come nelle prime percentuali la curva sia estremamente pendente e questo indica una elevata velocità di scarico conseguente ad un comportamento carsico che si esaurisce in breve tempo. Ad un certo punto, tra il 2-4 % la curva cambia pendenza fino a circa il 20 % dopo il quale tende a stabilizzarsi e quindi prevale un flusso di base dato da un sistema

frattura-matrice. Inoltre, si può notare come alla fine della curva ci sia una leggera flessione verso il basso, dovuta ai valori minimi di portata.

➤ **Autocorrelazione (ACF)**

La figura 17 evidenzia la curva di autocorrelazione che conferma abbastanza quanto detto in precedenza nell'analisi della FDC. Infatti, c'è una rapida diminuzione dell'autocorrelazione fino alle prime 50 ore che evidenzia la presenza di condotti carsici ben sviluppati. Dopodiché, dalle 50 alle 300 ore si nota che l'ACF diminuisce ulteriormente ma in modo meno marcato per poi rimane costante e quasi parallela alla linea di decorrelation lag time; questo significa che il grado di carsismo si è ridotto (prevale ora la matrice) causando accumulo d'acqua nel serbatoio e ritardo nel deflusso delle acque alla sorgente. Dopo questo tempo, la curva scende al di sotto del decorrelation lag time.

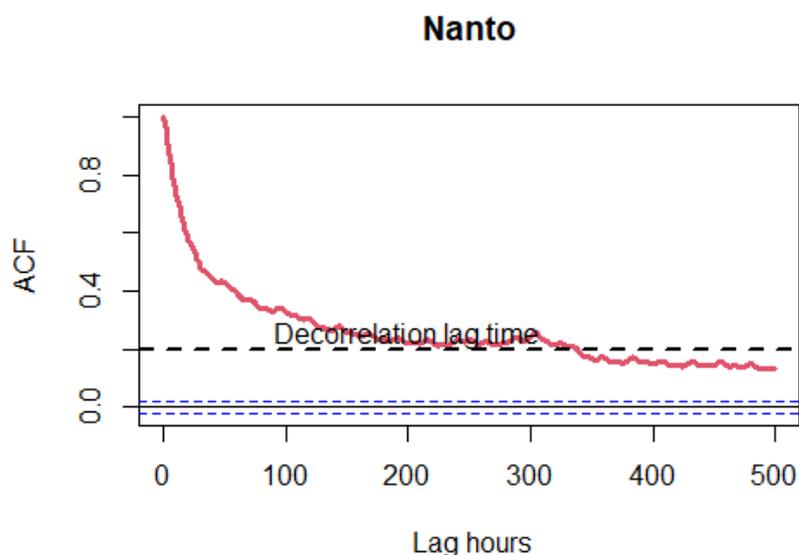


Fig.17: Grafico della ACF.

➤ **Cross-correlazione (CCF)**

Questa funzione è fondamentale per determinare il comportamento della sorgente in base agli eventi di ricarica che avvengono.

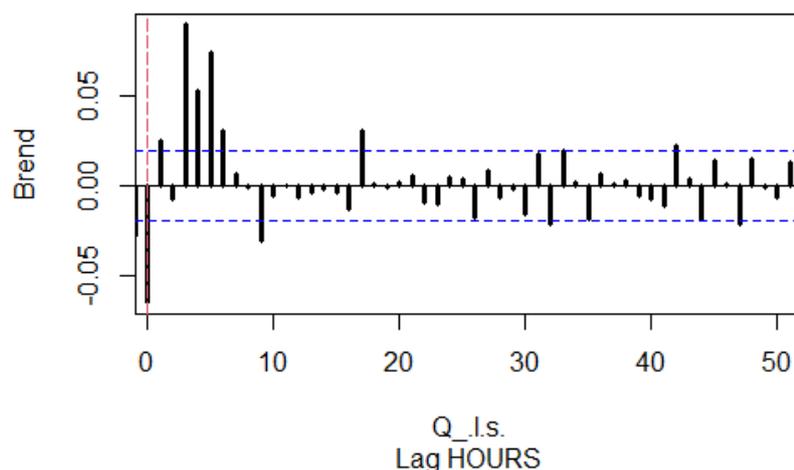
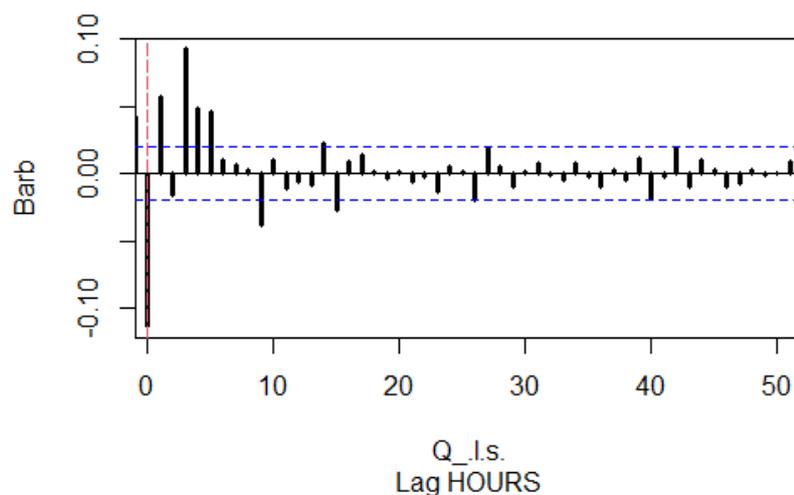
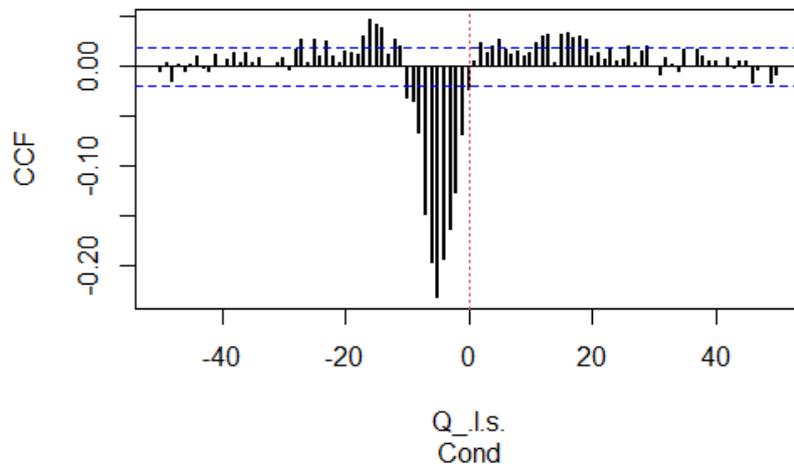
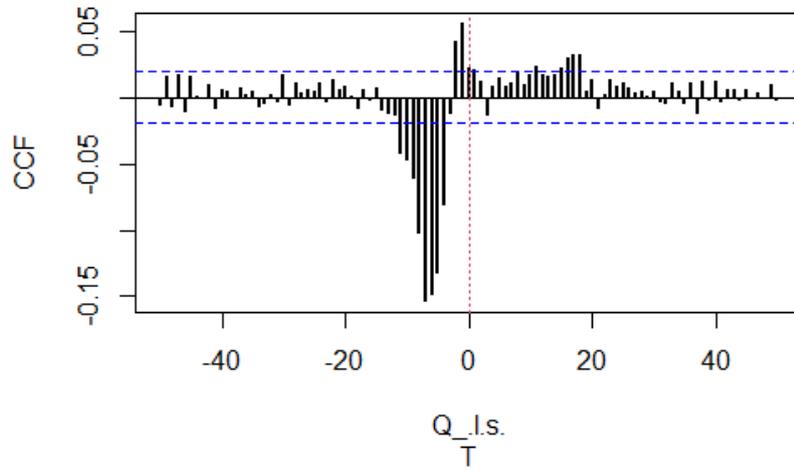


Fig. 18 e Fig. 19: Grafici di cross-correlazione portata-precipitazioni.

Nelle figure 18 e 19, le cross-correlazioni tra portata e precipitazioni registrate nelle stazioni di Barbarano-Mossano e Brendola assumono un comportamento simile. Infatti, si può notare come a lag 0, per entrambi i grafici, ci sia una correlazione negativa spiegabile col fatto che è stato registrato un aumento di livello delle piogge dalle stazioni termo-pluviometriche, ma questo non ha portato ad un aumento immediato della portata. A lag 1 invece c'è una lieve correlazione positiva ciò significa che dall'evento piovoso, la prima risposta della sorgente è avvenuta a distanza di un ora dall'impulso di ricarica. Quindi, dopo 3-5 h dall'evento piovoso si evidenzia una correlazione positiva, molto più significativa di quella in lag 1, interpretabile come la vera risposta della sorgente all'evento di precipitazione.

Ovviamente è fondamentale analizzare anche la CCF tra Portata (L/s) - T (°C),
Portata (L/s) - EC (mS/cm) e T (°C) - EC (mS/cm) visibili nelle figure 20,21 e 22:



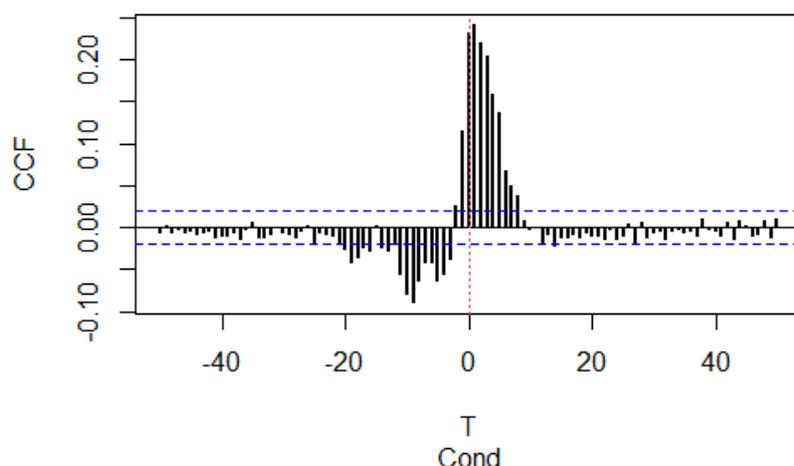


Fig. 20,21,22: CCF tra Q e T,Q e EC ed infine T e EC

Nella CCF tra Q(L/s) -T(°C)(Fig.20) si nota che a lag 0 c'è una correlazione positiva poco significativa mentre si presentano delle correlazioni maggiori, anche se modeste, tra lag 16 e lag 18 circa. Questo indica una non chiara relazione tra le due variabili esaminate. Andamento simile ha il grafico(Fig.21) (Q(L/s) -EC(mS/cm)). Dalla CCF tra T(°C) - EC(mS/cm)(Fig.22), si evince come ci sia una netta correlazione positiva tra i due parametri da lag 0 fino a lag 10 ma in diminuzione e questo significa che i due parametri si comportano allo stesso modo. Difatti un maggiore conducibilità elettrica fa sì che l'acqua abbia una temperatura maggiore, dovuta ad una maggiore concentrazione di ioni.

4.3 VALUTAZIONE DI VULNERABILITA'

La vulnerabilità di una sorgente si determina con l'indice V.E.S.P.A che viene calcolato con una specifica equazione (7) vista in precedenza. Dai calcoli effettuati emerge che la sorgente ha una vulnerabilità bassa e che il fenomeno che prevale è quello dell'omogenizzazione (tipo C).

| | ρ | $C(\rho)$ | β | γ | V |
|----------------|--------|-----------|---------|----------|-------|
| Sorgente Nanto | -0,039 | 0,039 | 1,54 | 1,23 | 0,074 |

Tab.4: Parametri per il calcolo dell'indice VESPA e il valore dello stesso.

5. CONCLUSIONI

La tesi si proponeva di definire modello idrogeologico e la vulnerabilità della sorgente carsica di Nanto (VI) alle pendici dei Monti Berici.

Per fare ciò, è stato necessario analizzare ed elaborare i dati ottenuti tramite il CTD-Diver, prima con excel e infine con R-Studio.

Tramite quest'ultimo è stato possibile determinare la risposta della sorgente agli eventi di ricarica ovvero le precipitazioni. Inoltre, si sono analizzate le correlazioni esistenti tra gli eventi di ricarica, il livello, la temperatura e la conducibilità elettrica in modo tale da ottenere informazioni su come questi parametri variano in base ad un determinato evento. Infine, utilizzando i dati sopra citati è stata calcolata la vulnerabilità tramite l'indice VESPA.

Quindi tramite l'analisi dei grafici di autocorrelazione (ACF), Flow Duration Curve (FDC), si è ricavato un comportamento di tipo carsico che si esaurisce in breve tempo e riguarda essenzialmente le piene della sorgente. Il calcolo dell'indice VESPA e dei suoi parametri ha segnalato un modello idrogeologico concettuale con un comportamento di tipo C, ovvero "omogenizzazione", che indica un sistema carsico poco sviluppato e quindi limitato, come segnalato da FDC, ACF e CCF ai soli eventi di piena.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Accorsi Benini C., 1974, “*I fossili di case soghe- M.Lungo (M.Berici, Vicenza)*”, Mem. Geopaleontol. Univ. Ferrara; Ita; Vol. 3.
2. Aurighi M., et al., “*Metodi per l’individuazione delle aree di salvaguardia delle sorgenti*”, Piano Tutela delle Acque, Allegato A2, DGR nr. 1621 del 5 novembre 2019.
3. Boscolo P., Mion C., 2008, “*Le acque sotterranee della pianura Veneta*”, Documento Unico di Programmazione DOCUP, Obiettivo n. 2 Progetto SAMPAS, Arpav.4. Castiglioni, G. B., Meneghel, M., Sauro, U., 1988: *Elementi per una ricostruzione dell’evoluzione morfotettonica delle Prealpi Venete*. Riv. Geografia Fis. Din. Quatern. suppl. 1, 1988), 31-44.
4. Cornale, P., Rosanò, P., Alberti, E., Princivalle, A., 1994. *Le pietre tenere del vicentino: uso e restauro*. Associazione Artigiani della Provincia di Vicenza Camera di Commercio Industria Artigianato Agricoltura di Vicenza, Amministrazione Provinciale di Vicenza Consorzio artigiani restauratori veneti.
5. Dal Molin L., Mietto P. & Sauro U., 2000, “*Considerazioni sul paleocarsismo terziario dei Monti Berici: la Grotta della Guerra a Lumignano (Longare – Vicenza)*”. Natura Vicentina, 4, 33-48.
6. Dal Piaz, G., 1947: *Sui depositi morenici prewurmiani dei Colli Berici e loro provenienza*. Acta Pont. Acad. Sc., 1946, 339-354.
7. Da Schio, A., Trevisiol, Perin, G., 1947: *Scienza e poesia sui Berici*. C.A.I. Vicenza, 278 pp.
8. Galleani L., Vigna B., Banzato C., Lo Russo S., 2011, “*Validation of a Vulnerability Estimator for Spring Protection Areas: The VESPA index*”, Journal of Hydrology, 396: 233– 245.
9. Liu L, Chen X, Xu G, Shu L., 2011, *Use of hydrologic time-series data for identification of hydrodynamic function and behavior in a karstic water system in China*. Hydrogeol J 19(8):1577–1585.

10. Mangin A.,1984, *Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale [The use of autocorrelation and spectral analyses to obtain a better understanding of hydrological systems]*. J Hydrol 67:25–43.
11. Marcolongo E.,2005, *Studio idrogeologico di alcune sorgenti fredde Dei Colli Berici [Hydrogeological study of some cold springs of the Berici Hills]*. MSc Thesis, Università di Padova, Padua, Italy.
12. Mietto, P.,1988a: *Aspetti geologici dei Monti Berici*. In: AA.VV. - I Colli Berici, Natura e civiltà. Signum Edizioni, Padova, 12-23.
13. Mietto, P., Sauro, U., 2000: *Le Grotte del Veneto: paesaggi carsici e grotte del Veneto. Regione del Veneto - La Grafica Editrice (Vago di Lavagno, Verona)*, seconda edizione, 480 pp.
14. Panagopoulos G, Lambrakis N.,2006, *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)*. J Hydrol 329:368–376.
15. Sauro, U., 2001: *Aspects of contact karst in the Venetian Fore-Alps*. Acta Carsologica, 30, 2, 89-102.
16. Sauro. U.,2002, *The Monti Berici: A peculiar type of karst in the southern alps*.
17. Sauro U., 2003b,*Aspetti geomorfologici. Grotte dei Berici. Aspetti fisici e naturalistici*. Museo Nat. Archeol., Vicenza, 1, 25-34.
- 18 . Sauro U., 2005,*The Monti Berici: guide of the fieldtrip*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, suppl. 7, 367-372.
19. Tagne GV, Dowling C.,2018, *Inferring groundwater flow and recharge from time series analysis of storm responses in a karst aquifer of southeastern Kentucky (USA)*. Hydrogeol J 26(8):2649–2668.
20. Torresan F., Fabbri P., Piccinini L., Dalla Libera N., Zampieri D., Pola M.,2020, “*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.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio sentitamente il professor Paolo Fabbri per avermi guidato nella stesura della tesi rendendosi molto disponibile e tempestivo, sia nel fornirmi i dati utili all'analisi, sia nel rispondere a miei eventuali dubbi e perplessità. Inoltre, voglio ringraziare il Dott. Giampaolo Girardi che mi ha aiutato nella fase di raccolta dei dati, fornendomi numerosi consigli su come attuare e pianificare un monitoraggio e come comportarsi in relazione al luogo in cui si esegue. Poi, il Dott. Elvio Cerato, che gentilmente mi ha fornito ulteriori dati fondamentali per la completezza dell'elaborato. Ovviamente ringrazio anche tutta la mia famiglia che mi ha sempre aiutato durante tutto il mio percorso di studi. Infine, non posso non ringraziare Giada, che più di tutti mi ha sostenuto e supportato in questi tre anni.