

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea Magistrale in Geologia e Territorio

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali

Tesi di Laurea Magistrale

Studio dell'acquifero carsico del Cansiglio-
Monte Cavallo (Alta valle Livenza, Pordenone)
tramite tracciamento multiplo, monitoraggio
idrochimico e idrologico

Candidato:
Luca Tedesco

Relatore:
Prof.ssa Maria Filippini

*Alla mia famiglia e a tutti quelli
che mi hanno accompagnato
in questa lunga avventura.*

INDICE

RIASSUNTO	1
CAPITOLO 1: INTRODUZIONE.....	3
1.1 Premessa	3
1.2 Fasi del lavoro.....	3
CAPITOLO 2: INQUADRAMENTI.....	5
2.1 Inquadramento geografico	5
2.2 Inquadramento geologico	6
2.2.1 Successione stratigrafica	8
<i>Ambiente di piattaforma</i>	8
<i>Complesso di scogliera</i>	9
<i>Ambiente di mare aperto</i>	11
<i>Depositi quaternari</i>	12
2.2.2 Assetto strutturale.....	13
2.3 Inquadramento geomorfologico.....	15
2.4 Inquadramento idrogeologico	16
2.5 Inquadramento dei punti di monitoraggio	17
2.5.1 Le Sorgenti	17
<i>Il Molinetto</i>	18
<i>La Santissima</i>	19
<i>Il Gorgazzo</i>	20
2.5.2 Le aree di infiltrazione concentrata	20
CAPITOLO 3: METODI, MATERIALI E ANALISI.....	23
3.1 Dati pregressi	23
3.1.1 Le misure di portata di acqua fluente	23
3.1.2 Punti di monitoraggio in continuo.....	24
3.1.3 Idrochimica e isotopi dell'acqua	25
3.2 La prova di tracciamento multiplo.....	27
3.2.1 I traccianti.....	27
<i>Fluoresceina</i>	27
<i>Sulforodamina G</i>	28
<i>Tinopal CBS-X</i>	28
3.2.2 Strumenti e metodi	29
<i>Il fluorimetro</i>	29
<i>I fluocaptori</i>	30
3.2.3 Il tracciamento	31
CAPITOLO 4: PRESENTAZIONE E DISCUSSIONE DEI DATI.....	35
4.1 Dati pregressi	35

4.1.1 Monitoraggio in continuo di portate, parametri chimico-fisici e dati climatici	35
<i>Dati delle misure di portata</i>	35
<i>Discussione</i>	36
<i>Dati del monitoraggio in continuo dei parametri chimico-fisici e climatici</i>	37
<i>Discussione</i>	41
4.1.2 Monitoraggio in discontinuo dell'idrochimica.....	43
<i>Ioni principali</i>	44
<i>Discussione</i>	46
<i>Lantanoidi</i>	46
<i>Discussione</i>	47
4.1.3 Monitoraggio discontinuo degli isotopi stabili nelle acque.....	48
4.2 Il tracciamento	49
4.2.1 Dati della prova del tracciamento multiplo	49
4.2.2 Discussione.....	54
<i>Fluoresceina</i>	54
<i>Sulforodamina G e Tinopal CBS-X</i>	55
4.3 Definizione delle aree di ricarica	56
CAPITOLO 5: CONCLUSIONI.....	59
BIBLIOGRAFIA	61
SITOGRAFIA	65
RINGRAZIAMENTI.....	67

RIASSUNTO

Con questo lavoro si cerca di definire, tramite l'interpretazione dei dati ottenuti da un monitoraggio idrochimico e idrologico di sorgenti e da una prova di tracciamento multiplo grotta-sorgente, la configurazione interna del Massiccio del Cansiglio-Monte Cavallo (Alta Livenza, Pordenone), uno dei maggiori complessi carsici italiani. L'elaborato tiene in considerazione le conoscenze già acquisite in passato in questa zona, come i lavori di Cucchi et al.(1999) e di Vincenzi et al.(2011), una tesi magistrale precedente alla trattazione di seguito esposta (Squarzone, 2015), e un articolo pubblicato che contiene buona parte dei dati presentati (Filippini et al., 2018).

Molinetto, Santissima e Gorgazzo sono i nomi delle tre sorgenti monitorate. Si tratta di tre grandi sorgenti, tutte posizionate sul versante orientale e sud-orientale del massiccio, le cui acque costituiscono i maggiori apporti del fiume Livenza. Sono ubicate in aree e a quote differenti, con estensioni diverse tra loro, ma tutte con soglia di permeabilità sottoposta (secondo la classificazione Civita, 1972).

I dati pregressi ottenuti nei precedenti lavori in queste sorgenti come le misure di portata, il monitoraggio in continuo dei parametri fisico-chimici e i dati idrochimici e isotopici ricavati dal campionamento delle acque, sono stati ampliati con l'aggiunta dei dati del tracciamento acquisiti, fulcro del lavoro di questa tesi.

Tramite l'iniezione di tre diversi traccianti artificiali in tre grotte differenti, è stato monitorato l'arrivo del tracciante alle sorgenti grazie a strumenti da campo installati, come fluorimetri e fluocaptori.

La combinazione finale di pregresse analisi geochimiche, di un monitoraggio idrodinamico in continuo e di una prova di tracciamento multiplo ha infine dimostrato che le tre sorgenti hanno aree di ricarica differenti.

Lo studio è finalizzato a dare un'interpretazione della configurazione del suddetto acquifero carsico. Data la loro grande complessità, l'idrogeologia della maggior parte di questi acquiferi è ancora poco conosciuta. È ritenuto fondamentale, invece, studiare questa complicata tipologia di acquiferi perché, nel prossimo futuro, in previsione di carenza d'acqua dovuta a cambiamenti globali e sovrasfruttamento delle acque sotterranee nelle principali pianure urbanizzate, questi potrebbero diventare una risorsa fondamentale come serbatoio strategico di acqua ad alta qualità (Liu et al., 2017).

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE

1.1 Premessa

Nella maggior parte delle Alpi, massicci calcarei come quello qui investigato includono importanti acquiferi carsici, spesso con acque sotterranee circolanti in profondi condotti e acque che fuoriescono da sorgenti vicine tra loro, con portate al di sopra di alcuni metri cubi al secondo. Vista la loro grande complessità, l'idrogeologia della maggior parte di questi acquiferi carsici è ancora poco conosciuta, nonostante in passato siano stati realizzati studi idrogeologici e analisi.

Questo elaborato è il naturale prosieguo della tesi magistrale di Gabriela Squarzoni (2015), tesa a fornire una caratterizzazione dettagliata delle sorgenti principali del Livenza sia dal punto di vista idrodinamico che chimico, oltre a costruire un quadro interpretativo dell'idrochimica delle aree di infiltrazione e delle sorgenti minori. Per questa tesi sono stati sfruttati dati precedentemente acquisiti di portata, di monitoraggio in continuo (temperatura, conducibilità elettrica, precipitazioni) e dati di monitoraggio idrochimico e isotopico. A questi dati si aggiungono quelli ottenuti dalle prove di tracciamento, utili a dipanare il più delle volte le complessità riscontrate in ambienti simili. I traccianti artificiali, infatti, possono rivelare il modello di flusso delle acque sotterranee attraverso i condotti e le fratture carsificate di sistema, la velocità di flusso, l'immagazzinamento e la dispersività. I dati del tracciamento multiplo raccolti nell'ambito di questo elaborato sono stati analizzati in modo da arrivare, insieme ai dati pregressi, a definire delle aree di ricarica per le sorgenti investigate.

Questo lavoro si colloca all'interno di un ampio progetto che comprende diversi enti. Tale programma è frutto della collaborazione fra l'Università di Bologna, l'Università di Trieste, il Politecnico di Torino e l'Unità Idrografica Regionale del Friuli Venezia Giulia. Importante e prezioso supporto tecnico è inoltre da attribuire ai gruppi speleologici di Sacile, Pordenone, Vittorio Veneto e Ferrara.

Il progetto, centrato sulla caratterizzazione idrogeologica del Massiccio del Cansiglio-Monte Cavallo, è nato con lo scopo di stabilire con precisione la configurazione del sistema carsico oggetto di studio.

1.2 Fasi del lavoro

In questo paragrafo verranno descritte le fasi del lavoro dell'intero progetto, descrivendo brevemente anche le fasi dei lavori precedenti, dalle quali sono stati ricavati i dati utili alle conclusioni ottenute per questa tesi.

Al fine di migliorare la conoscenza su questo importante sistema acquifero, sono state effettuate indagini e prove dai primi mesi del 2015 alla tarda estate del 2016, ovvero la durata dell'intero progetto.

Fin dall'inizio del lavoro (febbraio 2015) sono stati monitorati in continuo, nelle tre sorgenti, il livello idrometrico, la temperatura e la conducibilità dell'acqua compensata a 25 °C.

Sono state effettuate periodicamente delle misure di portata di acqua fluente nelle sorgenti monitorate. Questo al fine di trasformare le misure di livello registrate in continuo in valori di portata, per poter poi elaborare le curve di deflusso.

È stato effettuato anche un monitoraggio idrochimico discontinuo di nove sorgenti (tra le quali anche le tre principali) e di quattro grotte rappresentanti le aree di infiltrazione concentrata.

Nella tarda primavera del 2016, è stato effettuato il test di tracciamento multiplo grotta-sorgente, utilizzando tre diversi traccianti fluorescenti in tre differenti grotte: Fluoresceina, Sulforodamina G e Tinopal CBS-X.

Dopo l'iniezione in grotta a cura degli speleologi, l'arrivo dei traccianti è stato monitorato tramite fluorimetri e fluocaptori posizionati alle tre sorgenti.

La tesi è articolata in 5 capitoli. Dopo l'introduzione del capitolo 1, il capitolo 2 è dedicato all'inquadramento dell'area di studio. Si troverà qui la stratigrafia dell'area e l'assetto strutturale della zona. L'inquadramento sarà trattato dal punto di vista geografico, geologico, geomorfologico e idrogeologico.

Nel capitolo 3 si descrivono le modalità di lavoro e di raccolta dati, sia di quelli pregressi raccolti nei lavori precedenti che di quelli per questo elaborato. Viene illustrato il funzionamento dei principali strumenti utilizzati ed indicati i punti e i periodi di monitoraggio.

Nel capitolo 4 vengono presentati e discussi i dati. Saranno illustrati ed esaminati i dati pregressi e le informazioni raccolte nei precedenti lavori in questa zona, oltre che a quelli relativi alla prova di tracciamento multiplo eseguita per questa tesi.

Infine, il capitolo 5 illustra i ragionamenti conclusivi a cui si è giunti grazie allo sviluppo di tale studio.

CAPITOLO 2: INQUADRAMENTI

2.1 Inquadramento geografico

L'area oggetto di studio, compresa tra le regioni Veneto e Friuli Venezia Giulia, si estende nelle province di Treviso, Belluno e Pordenone (Fig. 1). Comprende quasi interamente il Massiccio del Cansiglio-Monte Cavallo e tocca la fascia pedemontana friulana, dove sorgono le principali sorgenti del fiume Livenza (Fig. 2). Il Massiccio Cansiglio-Cavallo costituisce la parte sud-occidentale delle Prealpi Carniche ed è limitato a nord dalla val Cellina e dai monti dell'Alpago, ad est dalla pianura friulana, a sud dalla pianura veneta e a ovest dal Lago di Santa Croce, dalla valle del Fadalto e dal Lago Morto. L'altopiano del Cansiglio, un'ampia conca orientata NNE-SSW, occupa gran parte della zona. A est invece si eleva la catena del Monte Cavallo che divide questa conca dal Piancavallo, una seconda piana meno estesa. La massima quota della zona appartiene al Monte Cavallo (2250 m s.l.m.) mentre gran parte dell'area si trova circa a un migliaio di metri di altitudine (l'altopiano del Cansiglio ha quota media di circa 1000 m s.l.m., mentre il Piancavallo supera di poco i 1200 m s.l.m.). Alla base del massiccio, verso sud-est, si trovano le quote minime della zona: questa fascia varia tra i 30 e i 50 m s.l.m. In questa area a bassa quota sono ubicate le sorgenti.

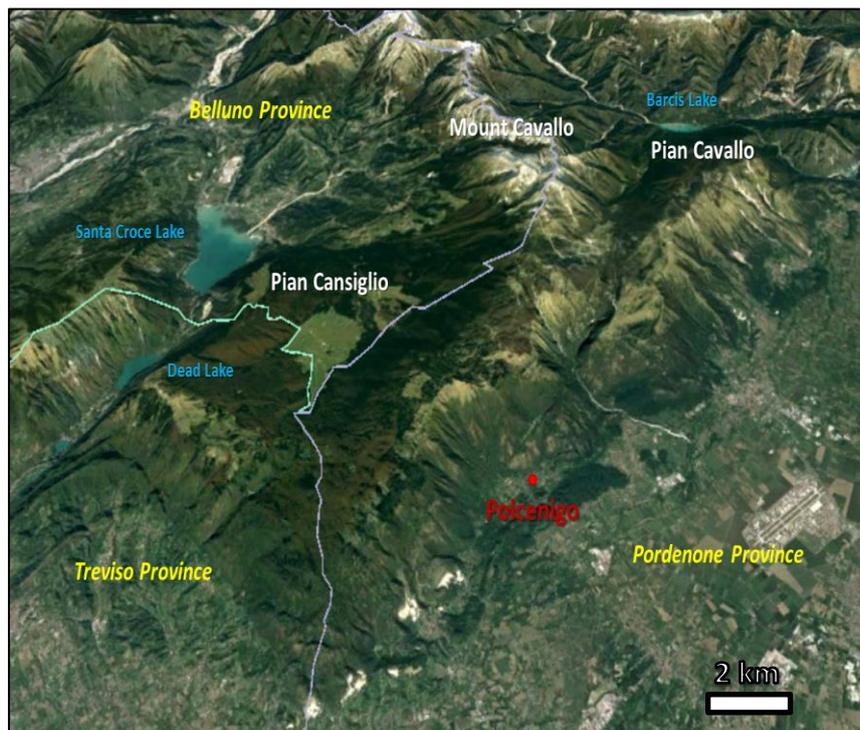


Figura 1. Immagine satellitare dell'area: il confine tra Friuli e Veneto si sviluppa lungo la catena del Cavallo fino alla pianura sottostante.



Figura 2. Mappa generale del Friuli; l'area di studio è indicata nel riquadro nero. In alto a destra, l'ubicazione del luogo nella penisola italiana.

2.2 Inquadramento geologico

Il massiccio del Cansiglio-Cavallo è situato subito a sud del lineamento periadriatico. L'intera area studiata rappresenta parte dell'antico margine della piattaforma carbonatica mesozoica Adria, coinvolta poi negli eventi orogenetici sfociati nella formazione della catena alpina. La genesi di quest'area risulta essere piuttosto complessa viste le varie fasi di eventi tettonici che l'hanno interessata. Questa zona è di particolare interesse poiché costituisce una delle poche aree in Italia in cui la formazione della piattaforma carbonatica era ancora attiva alla fine del Cretaceo (Philip, 1985). Il Massiccio del Cansiglio-Cavallo alla fine del Giurassico costituiva la propaggine più avanzata della piattaforma carbonatica costituente la microplacca Adria (Cavallin & Martinis, 1982; Zanferrari et al., 1982). L'area oggetto di studio è parte dell'antico complesso di scogliera che si è andato a formare a partire dal Giurassico superiore e che, a causa dei movimenti tettonici che preludevano alla successiva grande fase orogenetica, ha avuto un'evoluzione dinamica dal Cretaceo fino al Paleogene, tendendo a migrare verso terra o verso mare per adattarsi alle variazioni ambientali (Ferasin, 1958; Gnaccolini & Mattavelli, 1969; Ghetti, 1987).

In base alla migrazione delle facies di scogliera verso l'interno o l'esterno della piattaforma, sono state distinte alcune delle fasi principali:

- 1) Nel Giurassico superiore inizia la propensione allo spostamento verso il mare aperto, cioè verso un approfondimento dell'ambiente di sedimentazione.
- 2) Tra l'Albiano (Cretaceo inferiore) e il Turoniano (Cretaceo superiore), a causa di un sollevamento dell'intera area, si ha un successivo spostamento verso il mare aperto.
- 3) A partire dal Turoniano, la barriera retrocede migrando verso il continente (ovvero verso est) a causa di una fase di subsidenza. Al termine del Cretaceo Superiore questo spostamento raggiunge il massimo sviluppo, portando così le facies di mare aperto a sostituire pienamente quelle della scogliera esterna.
- 4) Al passaggio tra Mesozoico e Cenozoico inizia un'intensa fase di sollevamento che coinvolge principalmente la porzione più orientale della scogliera, terminando con l'emersione dell'intero sistema e la fine della deposizione organogena.

L'origine dei terreni della fascia pedemontana dell'area studiata è invece da ricercare negli eventi collisionali che hanno interessato Adria nel Cenozoico, all'apice dell'orogenesi alpina. Sono per lo più flysch e depositi molassici che si sono messi in posto a partire dall'Eocene, testimoniando il sollevamento avvenuto a settentrione a causa della formazione della catena alpina. I depositi molassici si sono originati nell'arco di cinque fasi deposizionali (Massari et al., 1986), l'ultima delle quali (Langhiano inferiore – Messiniano) interessa la zona oggetto di studio, nella porzione antistante il Massiccio Cansiglio-Cavallo. Questa risulta essere composta per lo più da conglomerati formati durante quest'ultimo ciclo: si tratta di un sistema di delta, a cui poi è succeduto un sistema di conoidi alluvionali, il cui materiale proveniva dalla catena alpina in veloce sollevamento. Nel Messiniano, infine, l'intero bacino veneto-friulano si è trasformato in un bacino lacustre pensile, del tutto separato dal Mediterraneo

2.2.1 Successione stratigrafica

La zona è interessata da depositi cretacico-terziari, ma più generalmente le formazioni che s'incontrano sul Massiccio Cansiglio-Cavallo sono di età compresa tra il Norico e il Miocene (Cavallin, 1979). Di seguito le descrizioni di tutte le unità del Massiccio (Fig. 3), incluse quelle più marginali rispetto all'area del progetto.

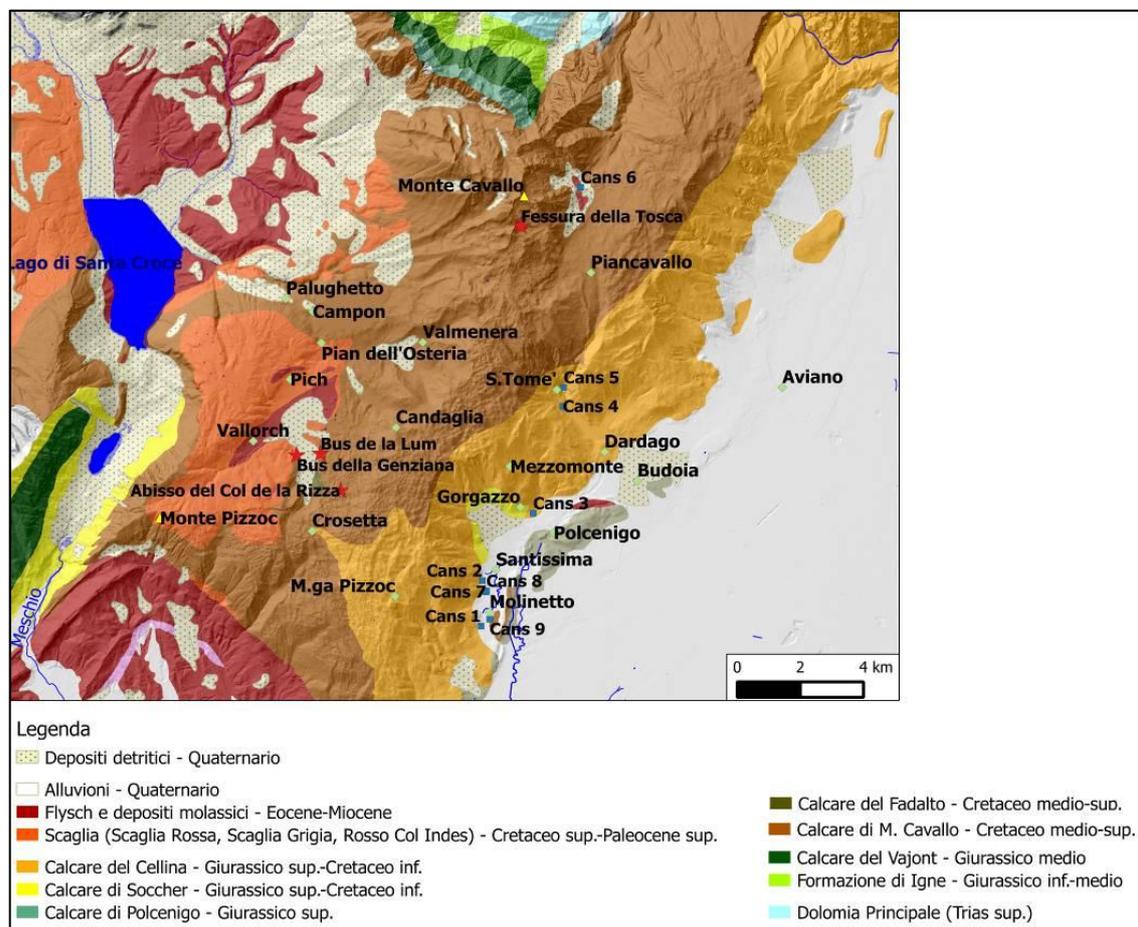


Figura 3. Carta formazionale dell'area elaborata a partire dai dati della regione Friuli Venezia-Giulia e della regione Veneto. I quadratini blu rappresentano tutte le sorgenti con relativo codice identificativo mentre le stelle rosse indicano le grotte monitorate (Squarzoni, 2015).

Ambiente di piattaforma

Dolomia principale

È costituita prevalentemente da grossi banchi di dolomie e dolomie calcaree biancastre o raramente di color nocciola, che possono raggiungere 100 - 200 cm di spessore. Comune trovare laminazioni stromatolitiche mentre compaiono sottili livelli di brecciole dolomitiche alla base di qualche banco (Radrizzani et al, 1986). Potente fino a un migliaio di metri (Costa et al., 1996), è organizzata nelle classiche sequenze cicliche peritidali in cui a bancate di ordine metrico si sovrappongono dolomie stromatolitiche fittamente laminate (Bosellini & Hardie, 1988). Al tetto si passa alla formazione di Igne.

Età: Norico-Retico (Radrizzani et al., 1986; Costa et al., 1996).

Affiora a nord del lago di Santa Croce, fuori dal settore specifico di studio.

Formazione di Igne

Lo spessore massimo è quasi un centinaio di metri. Questa unità è caratterizzata da una certa eterogeneità, vista la presenza più o meno dominante della porzione marnosa nei calcari che la caratterizzano. Questi calcari marnosi sono spesso nodulari e intervallati da calcari micritici scuri sottilmente stratificati (Costa et al., 1996). Al letto è in contatto con la Dolomia Principale mentre al tetto con il Calcare del Vajont.

Età: Toarciano – Aaleniano (Costa et. al, 1996).

Affiora a nord e a nord ovest del Massiccio, e come l'unità precedente è fuori dal settore specifico di studio.

Calcare del Vajont

Questa unità, interpretata come complesso torbiditico alimentato dalla piattaforma Friulana, è composta da calcareniti oolitiche color nocciola con intercalazioni di livelli di pochi decimetri di micriti scure. Man mano che ci si sposta da est a ovest, lo spessore varia da poche decine di metri a qualche centinaia, (Bosellini e Masetti, 1972). Passa al letto alla formazione di Igne ed al tetto al Calcare di Soccher.

Età: Giurassico medio (Costa et. al., 1996).

Affiora a ovest e a nord-ovest del Massiccio.

Complesso di scogliera

Calcari di Polcenigo (o Calcari ad Ellipsactinie)

Questa unità, situata sul margine della piattaforma friulana, costituisce la porzione centrale della scogliera giurassica ed è potente circa 600 m. È composta da calcari massicci di scogliera con abbondanti idrozoi e coralli; sono presenti locali tasche bauxitiche. Passa al Calcare del Cellina verso l'interno e verso l'alto (Sartorio et al., 1987).

Età: Oxfordiano – Kimmeridgiano (Sartorio et al., 1987).

Si estende limitatamente nella parte settentrionale della Catena del Cavallo, vicino ai confini dell'area oggetto di studio.

Calcare di Soccher

Costituita da calcareniti e calcilutiti a strati distinti (strati da 5 a 150 cm), la formazione è potente poche centinaia di metri (Radrizzani et al., 1986). La selce è solitamente presente in noduli, liste e lenti. Corrisponde alla zona di transizione tra il mare aperto e l'antico complesso di scogliera. Al letto si trova il Calcare del Vajont, mentre al tetto compare la Scaglia. Inoltre è eteropica con i Calcari di Monte Cavallo, verso la porzione interna della piattaforma.

Età: Titoniano – Albiano (Radrizzani et al., 1986).

Affiora prevalentemente presso il versante del Massiccio che scende verso il Lago Morto, nel settore occidentale della zona.

Calcarea del Cellina

Sono strati da 20 cm a 1 m di calcari grigio-nocciola fini o finissimi alternati a calcari detritici fossiliferi in strati da 1 a 5 nella porzione inferiore (Ghetti & Cancian, 1989), mentre in quella superiore si trovano in alternanza: calcari micritici bianchi o grigio chiari con strutture di essiccazione; calcari intraclastici, di color bruno o nocciola scuro, in strati da centimetrici a decimetrici, talora lenticolari; qualche orizzonte di calcari detritici fossiliferi; brecce e conglomerati calcarei intraformazionali; dolomie vacuolari a grana grossolana in banchi da 1 a 3 m; calcari marnosi; calcari stromatolitici con strutture di essiccazione e strati argillosi verdastri. L'ambiente di riferimento sembra perciò essere di retroscogliera, lagunare e di piana. Costituisce il complesso di scogliera insieme ai Calcari di Polcenigo e al Calcarea di Monte Cavallo (Ferasin, 1958; Cavallin, 1979). Tale unità raggiunge uno spessore di un migliaio di metri e poggia sui Calcari di Polcenigo. Sembra essere eteropica con i Calcari di Monte Cavallo, che si estendono più a ovest.

Età: Kimmeridgiano – Aptiano (Sartorio, 1989)

Occupava la fascia più orientale della zona in esame.

Calcari di Monte Cavallo

È costituita per lo più di calcari bioclastici, prevalentemente biancastri, che costituiscono la scarpata di un complesso di scogliera, allungata in direzione NE-SO e descritta da Ferasin (1958). In realtà affiorano anche calcari grossolani nei lati est e sud-est del Cansiglio, spesso molto ricchi in organismi costruttori, che probabilmente costituiscono la scogliera vera e propria. Esistono rapide variazioni laterali di facies, spesso ricchi di grossi clasti fossiliferi, che associano calcari a grana fine con calcari grossolani (Cancian et al., 1985). La stratificazione è poco evidente oppure in banchi di spessore dagli 80 cm ai 3 metri o anche di più. Raramente si trovano strati di potenza decimetrica, di colore grigio chiaro, talvolta marnosi. Lo spessore di questa unità raggiunge 400 – 500 metri ed è stato misurato nel vicino Alpago da Mantovani et al. (1976).

È eteropica a ovest con il Calcarea di Soccher, che nelle zone più interne si ritrova anche al tetto e la Scaglia e ad est con il Calcarea del Cellina (Ghetti & Cancian, 1989).

Età: Cretaceo medio – superiore (Cancian et al., 1985).

Affiora in tutta la conca del Cansiglio, ma con maggiore evidenza nel lato est, estendendosi verso nord e nord-est.

Calcari del Fadalto

Questa unità è interpretata come un corpo calcarenitico messo in posto nella parte inferiore della scarpata da correnti torbiditiche ed è costituita da conglomerati e calcareniti gradate a laminazioni parallele, alternati talvolta a calcari pelagici con lenti di selce. Lo spessore massimo è di 400-500 m. Al letto e in eteropia verso ovest si passa al Calcarea di Soccher, a tetto segue il Rosso di col Indes (con cui è anche in rapporto di eteropia), mentre in eteropia verso est si passa al calcarea di Monte Cavallo (Ghetti & Cancian, 1989).

Età: Albiano – Maastrichtiano (Ghetti & Cancian, 1989).

Si trova in una zona per lo più ricoperta da depositi quaternari, corrispondente alla porzione più a sud della conca del Cansiglio. Occupa una piccola porzione dell'area di studio.

Ambiente di mare aperto

Rosso di col Indes

Questa unità è costituita in prevalenza da calcari marnosi rosso violacei stratificati in grossi banchi, ma possiede caratteristiche litologiche e spessore variabili. Verso l'alto la stratificazione si fa più sottile, aumenta il contenuto argilloso e compaiono frequenti intercalazioni di colore grigio (Cancian et al., 1985). Questa orizzonte, con le successive Scaglie alle quali spesso è accorpato, rappresenta l'avvenuto passaggio al mare aperto (Ghetti & Cancian, 1989).

Al letto e in eteropia passa al Calcare del Fadalto mentre al tetto segue la Scaglia Grigia.

Età: Santoniano – Maastrichtiano (Cancian et al., 1985)

Si trova soprattutto nella parte settentrionale della conca del Cansiglio, assottigliandosi fino a scomparire man mano che ci si sposta verso sud.

Scaglia Grigia

Si tratta di una serie di calcari marnosi e di marne in strati di spessore variabile e con frequenti interstrati argillosi, con diverse lenti e noduli di selce di colore grigiastro (Cancian et al., 1985).

Questa unità poggia sul Rosso di Col Indes e, quando questo è mancante, passa direttamente al tetto delle facies di scarpata. Potente 35-40 metri. Il limite superiore è dato dal contatto con la Scaglia Rossa, con la quale la Scaglia Grigia verso Ovest ha un rapporto eteropico (Ghetti & Cancian, 1989).

Età: Maastrichtiano (Cancian et al., 1985; Ghetti & Cancian, 1989).

Affiora soprattutto nei versanti ovest e sud-ovest del Piano del Cansiglio.

Scaglia Rossa

Questa unità presenta soprattutto calcari marnosi e marne a prevalente colore rosso mattone con frequenti intercalazioni rosacee o nettamente grigiastre. Sono numerose anche le vene di calcite a causa della presenza di alcune faglie e dell'intensa fratturazione. Lo spessore varia tra i 20 e i 50 metri (Ghetti & Cancian, 1989). Con strati di 5 - 30 cm e una stratificazione molto fitta, è presente spesso un'intensa fratturazione che suddivide la roccia in piccole scaglie. Sono frequenti anche le intercalazioni di calcari conglomeratici (Cancian et al., 1985), descritti successivamente.

È un orizzonte che poggia sulla Scaglia Grigia ed è sovrastato dai Flysch terziari.

Età: Maastrichtiano – Paleocene superiore (Cancian et al., 1985; Ghetti & Cancian, 1989).

Affiora nella parte centrale della Conca del Cansiglio.

Conglomerato del rifugio Sasso

Costituisce un livello di intercalazione all'interno della Scaglia Rossa, con spessore di circa 3 metri. Si tratta di ciottoli calcarei di dimensione variabile da 2 a 30 cm subarrotondati, molto spesso ricchi di resti fossiliferi (Cancian et al., 1985).

Età: Paleocene (Cancian et al., 1985).

Flysch e depositi molassici

Durante l'Eocene, a testimonianza del sollevamento in atto al momento dell'apice dell'orogenesi alpina, cominciano a depositarsi i flysch provenienti dalle regioni

settentrionali. Invece, a partire dall'Oligocene e per tutto il Miocene, si passa alle unità molassiche con massimo spessore pari a 4000 metri al limite tra le prealpi e la pianura e in assottigliamento verso sud.

Nella zona di studio sono abbondanti depositi molassici riferibili all'ultima fase deposizionale descritta in Massari et al. (1986), mentre si ritrovano pochi depositi flyschoidi. Per questi autori si tratta di un corpo che passa da arenarie piuttosto fini a conglomerati secondo una sequenza shallowing up, determinata da una fase di regressione marina che lasciava progredire prima un sistema di delta e fan sottomarini, poi un sistema di grandi conoidi alluvionali.

L'età di questi depositi è riferibile al Miocene superiore (Massari et al., 1986).

Questi depositi affiorano principalmente a sud-ovest e a nord-ovest del Massiccio.

Depositi quaternari

Depositi glaciali

Depositi morenici di piccole dimensioni si ritrovano lungo la valletta che unisce Campon a Pian Osteria. Sono costituiti soprattutto da ciottoli o blocchi di calcari talvolta accompagnati da detrito più fine, sino al diametro delle sabbie e dei limi (Cancian et al., 1985). Molto probabilmente provengono dall'antico ghiacciaio del Piave che arrivava solo a lambire il Cansiglio nel Riss tramite un piccolissimo ramo che fluiva verso Valmenera (Castiglioni, 1964).

I modesti depositi morenici nella valle che da S. Tomè va a Budoia (Valle del Cunasso) sono invece risalenti alla glaciazione würmiana (Zenari, 1929).

Tali depositi morenici qui descritti sono assai rari nell'area in esame.

Depositi fluvioglaciali

Sono costituiti da materiale calcareo di dimensioni variabili da qualche decina di centimetri alle argille (Cancian et al., 1985). Vari ciottoli sono ricchi in rudiste o in altri organismi di scogliera che ne indicano la provenienza. Procedendo verso ovest, si ritrovano i materiali più fini mentre il materiale più grossolano, spesso arrotondato e subarrotondato, si trova nel lato orientale del Piano di Valmenera. Sono localizzati esclusivamente nel Piano di Valmenera.

Depositi torbosi

Si trovano dove il deposito di materiale fluvioglaciale molto fine ha determinato la formazione di un laghetto con aspetto acquitrinoso, nel lato ovest del Piano di Valmenera (Cancian et al., 1985).

Coni alluvionali

La conoide più grande ha il vertice presso le Case Vallorch ed occupa tutto il Piano del Cansiglio ed è costituita soprattutto da materiale poco arrotondato derivante dalla Scaglia Grigia (Cancian et al., 1985). Il suo spessore è esiguo, tanto che nel Piano del Cansiglio si vede frequentemente la roccia sottostante, soprattutto in corrispondenza delle numerose doline. Si osservano coni minori nella depressione a sud-est di Pian d'Osteria, costituiti da frammenti calcarei spigolosi o subarrotondati per dissoluzione e da terriccio nerastro. Anche in questo caso lo spessore è debole. Altri conoidi sono localizzati al margine

orientate del Piano di Valmenera e verso la pianura, dove di notevoli dimensioni è il conoide che parte dall'uscita della valle dell'Artugna, sul quale sorgono gli abitati di Budoia e Dardago (Zenari, 1929).

Depositi eluviali

In molte aree si rinvencono depositi di alterazione in situ formati in seguito a processi di degradazione meccanica e biochimica della roccia sottostante (Cancian et al., 1985). Le caratteristiche di questi depositi, nel Piano del Cansiglio, indicano l'origine dalla Scaglia Grigia. Invece nella zona a nord di Candaglia si notano minuti frammenti derivati dal Calcere bioclastico del Monte Cavallo. Nelle depressioni e sul fondo delle doline ove affiorano i calcari bioclastici è frequente trovare anche un terriccio nerastro, molto ricco di humus. In altri tratti è frequente un terreno argilloso, di colore bruno-rossastro, spesso molto plastico.

Depositi di versante

Si tratta di blocchi calcarei con grado di smussamento quasi nullo, localizzati per lo più lungo i fianchi e alle basi dei versanti che costituiscono la Conca del Cansiglio (Cancian et al., 1985).

Depositi continentali alluvionali

Sedimenti ghiaiosi e sabbiosi, talvolta contenenti basse frazioni di limo. Si tratta di materiale sciolto di origine alluvionale che ricopre buona parte della pianura antistante il Massiccio (Carulli, 2006). Situati lungo il margine sud-est dell'area di interesse, nella prima pianura friulana.

2.2.2 Assetto strutturale

L'origine della forte deformazione tettonica che interessa quest'area è da ricercarsi negli intensi sforzi compressivi che hanno coinvolto tutto il Sudalpino durante la sua orogenesi. L'assetto strutturale del Massiccio risulta essere piuttosto complesso: in generale l'altopiano del Cansiglio può essere considerato un'ampia sinclinale con asse orientato NNE-SSW, la cui geometria è ricalcata dalla superficie topografica, grazie alla notevole corrispondenza tra morfologia e tettonica in questo settore (Cancian et al., 1985). Mentre la parte centrale coincide col nucleo di questa piega, dove gli strati sono orizzontali o suborizzontali, i fianchi del Piano coincidono coi fianchi della sinclinale (Fig. 4).

La sinclinale è però asimmetrica, in quanto sul lato WNW corre una flessura, per cui gli strati diventano improvvisamente verticali o subverticali; in certi tratti, poi, la piega si rompe e compare una faglia di debole rigetto, la Linea di Vallorch. L'asse della piega viene bruscamente tagliato dalla linea di Pian d'Osteria verso NNW (De Nardi, 1976; Cancian et al, 1985).

Immediatamente a ESE della sinclinale segue un'anticlinale, con direzione NW-SE sulla dorsale Crosetta – Pizzoc e con asse orientato NE-SW lungo la dorsale Candaglia – Cornier. Questa anticlinale tende a rovesciarsi verso sud tanto da avere il fianco meridionale interessato da profondi disturbi tettonici (De Nardi, 1976).

Una seconda anticlinale compare a NW, con asse che, man mano che ci si sposta verso nord, passa da NE-SW a E-W. Questa piega immerge da una parte verso il Lago di Santa

Croce e dall'altra verso l'altopiano, delimitando il margine settentrionale del Cansiglio (De Nardi, 1976) (Fig. 4).

L'intero Massiccio Cansiglio-Cavallo è perimetrato dal Lineamento Periadriatico a nord, dalla linea Montaner a sud-ovest e dalla linea Caneva-Maniago a sud-est (Cavallin, 1979).

Il Lineamento Periadriatico è un sovrascorrimento di importanza regionale che in questa area porta la Dolomia Principale a contatto con terreni di età compresa tra Triassico superiore e Miocene. Il piano presenta una direzione generale est-ovest con immersione verso Nord e inclinazione variabile tra 20° e 60° (Cavallin & Martinis, 1982).

La Linea di Montaner è una dislocazione che ha subito un'evoluzione temporale complessa. Si sviluppa dalle pendici del Monte Pizzoc fino a Caneva con orientazione NW-SE e, procedendo verso sud, pone a contatto i calcari di piattaforma con unità terrigene terziarie sempre più recenti (Cavallin, 1979).

La Linea di Caneva-Maniago delimita il margine sud-orientale del massiccio del Cansiglio-Cavallo e mette a contatto lungo un piano orientato NE-SW, immerso a nord, i calcari di piattaforma con la successione terziaria (Cavallin, 1979). Sono state individuate in questa zona altre strutture, che andrebbero a complicare l'assetto della Linea di Caneva-Maniago: la Linea di Sarone (direzione NNE-SSW) e la linea di Aviano (direzione WSW-ENE), la cui intersezione avverrebbe presso Polcenigo (Zanferrari, 1973).

Altri elementi tettonici presenti in questa zona sono la Linea di Sacile, faglia inversa ad alto angolo che disloca i depositi quaternari (Braitenberg et al., 2007), la Linea del Cansiglio, faglia inversa che si propaga in direzione NNE-SSW dal Lineamento Periadriatico alla linea Caneva-Maniago (Braitenberg et al., 2007), e le Linee di Santa Croce e di Lastra, che delimitano il Cansiglio sul lato nord-occidentale (De Nardi, 1976; Bozzo & Semenza, 1973) (Fig. 4).

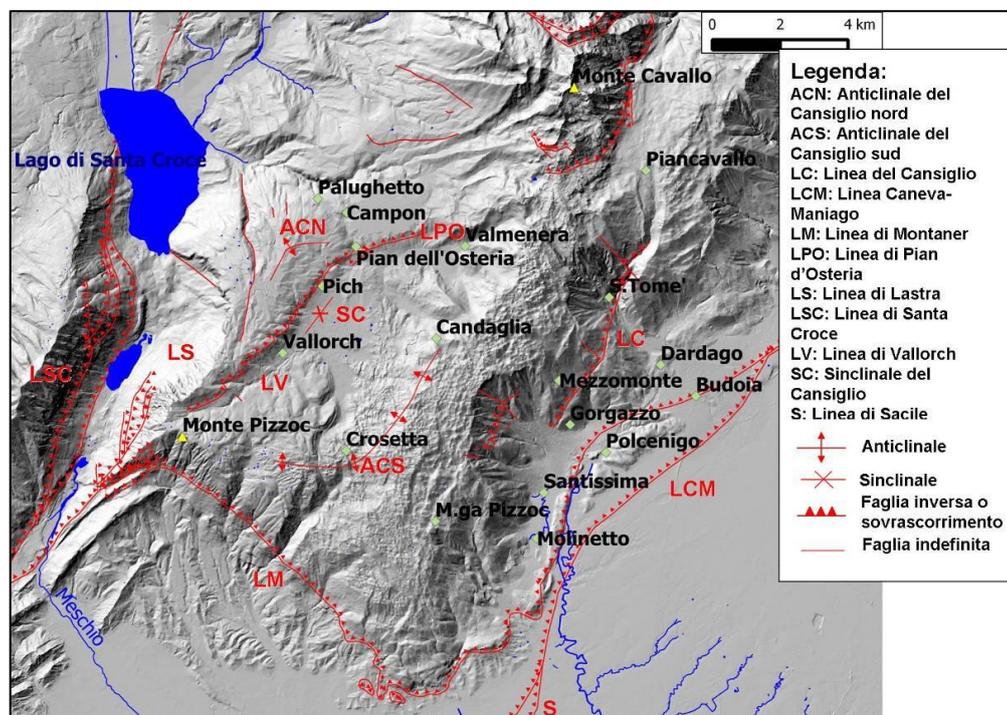


Figura 4. Nell'immagine DEM (Squarzonei, 2015) sono mostrate le principali strutture tettoniche descritte in precedenza e riportate in letteratura.

2.3 Inquadramento geomorfologico

Il Massiccio Cansiglio-Cavallo è a tutti gli effetti un altopiano carsico, all'interno del quale si riconoscono diverse aree a doline (Castiglioni, 1964). Sul fondo di un'ampia conca chiusa, nella porzione centrale, si apre il Pian di Cansiglio, polje carsico non più soggetto a inondazione, dove la presenza di diversi inghiottitoi permette lo smaltimento di tutte le acque che si riversano nella conca (infiltrazione concentrata). Una valle fluviale confluisce in questa depressione, il vallone di Vallorch (Fig. 5), costituita da calcari di scogliera molto puri e impostata su marne e calcari marnosi. Il Pian di Cansiglio è dunque situato tra rocce carsificabili e non carsificabili, per cui si può parlare di "polje di contatto litologico".

Numerose sono anche le grotte profonde, ad ingresso prevalentemente verticale, tra le quali ricordiamo Abisso Col de la Rizza, Bus de la Genziana, Bus de la Lum, Fessura de la Tosca. La maggior parte delle cavità è ubicata nel settore orientale del Cansiglio, dove il calcare è più puro; nonostante ciò, vi sono alcune grotte anche nel settore occidentale, come il Bus del Pal che si sviluppa quasi interamente nella Scaglia (Gasparo & Guidi, 1976).

Il fenomeno carsico ha interagito con fenomeni di tipo glaciale, sebbene solo in modo parziale. Si ritrovano nella zona di Campon infatti cordoni morenici risalenti alla glaciazione del Riss, lasciati dall'antico ghiacciaio del Piave che arrivava appena a lambire l'altopiano (Castiglioni, 1964).

Si rinvengono morfologie di origine glaciale anche nella valle del Cunasso (Zenari, 1929), dove sedimenti morenici si mescolano con quelli derivanti dai versanti laterali, e nella Valle dell'Artugna, dove è presente una notevolissima quantità di materiale accumulato da una lingua glaciale che partiva dalla placca gelata che ricopriva il Piancavallo e dove, nel suo tratto iniziale, sono ancora presenti le forme tipiche dell'erosione glaciale (Piccin, 1979; Castiglioni, 1980).

Andando verso la fascia pedemontana, tra le forme di tipo alluvionale si ritrovano i terrazzi che delimitano il corso di alcuni torrenti, oltre ai conoidi di cui si è già brevemente parlato in precedenza. Per esempio, presso il torrente Artugna, si possono osservare terrazzi probabilmente originati dai sollevamenti di origine tettonica (Vidali, 1993).

L'impronta strutturale sulla morfologia è ben visibile non solo in corrispondenza delle rete idrografica che si sviluppa nella porzione orientale dell'area ma anche, più genericamente, nella grande conca del Cansiglio, dove l'ampia sinclinale che si estende da NNE a SSW ne definisce la geometria a grande scala (Cancian et al., 1985).

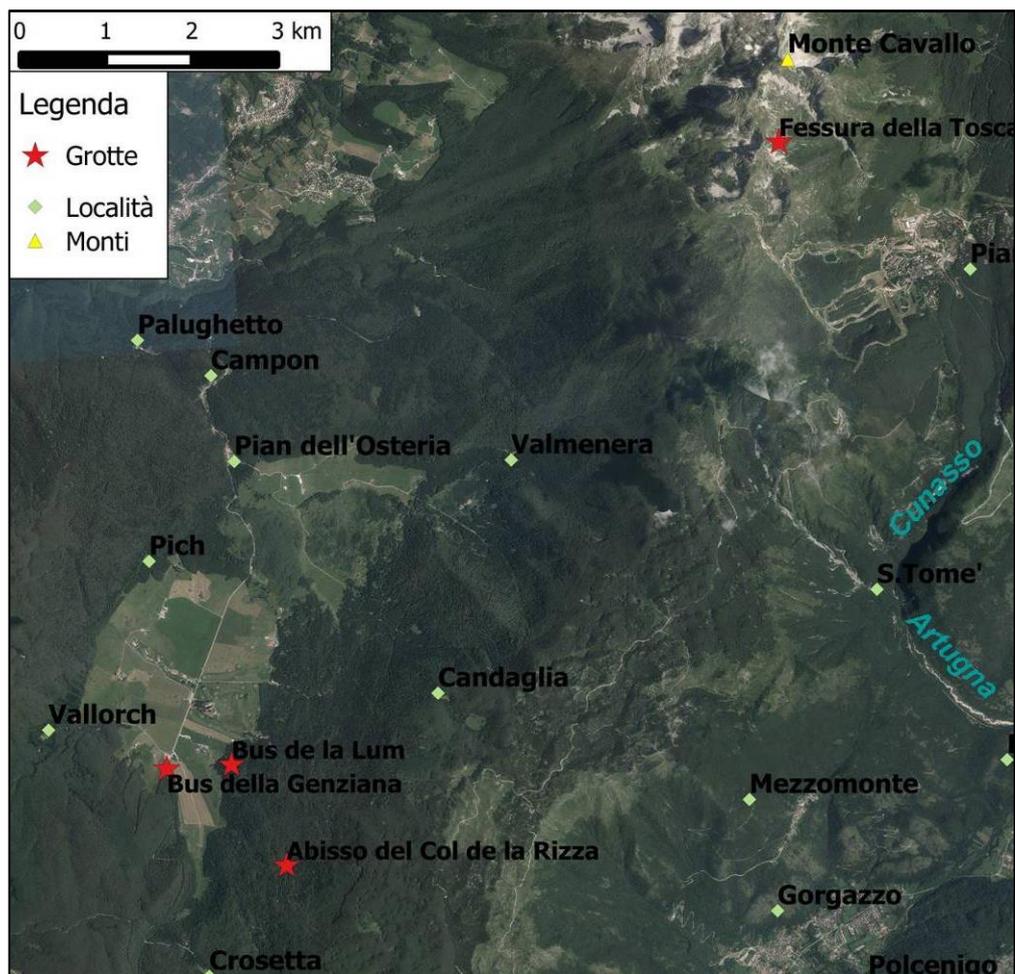


Figura 5: Ortofoto dell'area. Verso nord si estende la Catena del Cavallo, mentre nell'immagine sono indicate le località più importanti, i monti e le grotte monitorate.

2.4 Inquadramento idrogeologico

Il Pian di Cansiglio rappresenta senza dubbio uno dei più importanti acquiferi carsici italiani (Castiglioni, 1964; De Nardi, 1976). Sull'intero Massiccio è praticamente assente una vera e propria rete idrografica, nonostante la Catena del Cavallo, che dal Monte Cavallo si estende verso NW, rappresenti uno spartiacque per il deflusso superficiale. Le acque convogliano dunque verso le conche del Piancavallo a est, e del Pian Cansiglio a ovest, dove alimentano un sistema carsico sia superficiale che profondo (De Nardi, 1976).

Gli unici torrenti di una qualche rilevanza presenti nell'area di indagine sono il torrente Cunasso che scende lungo la valle di San Tomè verso l'abitato di Dardago, e che a quote meno elevate prende il nome di torrente Artugna, e il torrente Vallorghet che scende verso la conca del Cansiglio lungo la valle di Vallorch, zona parzialmente incisa anche da una rete di piccolissimi affluenti, le cui acque grazie alla presenza della Scaglia riescono a defluire in superficie (De Nardi, 1976).

Alla base del Massiccio, sul lato occidentale, si sviluppano il Lago Morto e il Lago di Santa Croce mentre su quello orientale hanno origine le diverse sorgenti oggetto di studio che alimentano il fiume Livenza.

Nell'area in esame sono tante le sorgenti presenti. Alcune sono definite sorgenti "montane", intendendo le sorgenti minori posizionate a quote relativamente elevate lungo i versanti del massiccio. Le loro portate sono molto esigue e le loro temperature mediamente

più basse delle sorgenti posizionate nella fascia pedemontana. Appartenenti a quest'ultima zona sono le sorgenti monitorate oggetto di questo studio ovvero, da sud a nord, Molinetto, Santissima e Gorgazzo.

2.5 Inquadramento dei punti di monitoraggio

2.5.1 Le Sorgenti

Molinetto, Santissima e Gorgazzo, il cui contributo medio è stimato in 11 m³/s (Meneghel et al., 1986), nonostante si trovino tutte sul versante orientale e sud-orientale del massiccio, hanno caratteristiche che cambiano a seconda della loro posizione (Fig. 6).

Le acque di queste tre grandi sorgenti costituiscono i maggiori apporti del fiume Livenza, alle quali si affiancano polle di piccola o media dimensione situate poco distante dalle venute d'acqua principali. Sono tutte allineate lungo le strutture ausiliarie della Linea Caneva-Maniago, che ha portato i calcari mesozoici a sovrascorrere sulle molasse terziarie, mettendo a contatto un complesso carbonatico molto carsificato con dei sedimenti terrigeni molto meno permeabili (Cavallin, 1979).

Ad ognuna è stato assegnato un codice identificativo, a cui si farà riferimento più volte in questa tesi (Tab. 1).

NOME	CODICE	UNITÀ GEOLOGICA	TIPOLOGIA	X (ED50/UTM33)	Y (ED50/UTM33)	QUOTA (m s.l.m.)
Molinetto	CANS1	Calcere del Cellina	Soglia di permeabilità sottoposta	304395	5098028	28
Santissima	CANS2	Calcere del Cellina	Soglia di permeabilità sottoposta	304548	5099481	32
Gorgazzo	CANS3	Calcari del Cellina	Soglia di permeabilità sottoposta	306320	5101518	50

Tabella 1. Riassunto delle caratteristiche principali delle sorgenti monitorate. In ordine: nome della sorgente, codice assegnato, unità geologica, tipologia secondo la classificazione Civita (1972), coordinate cartografiche X e Y, e quota sul livello del mare.

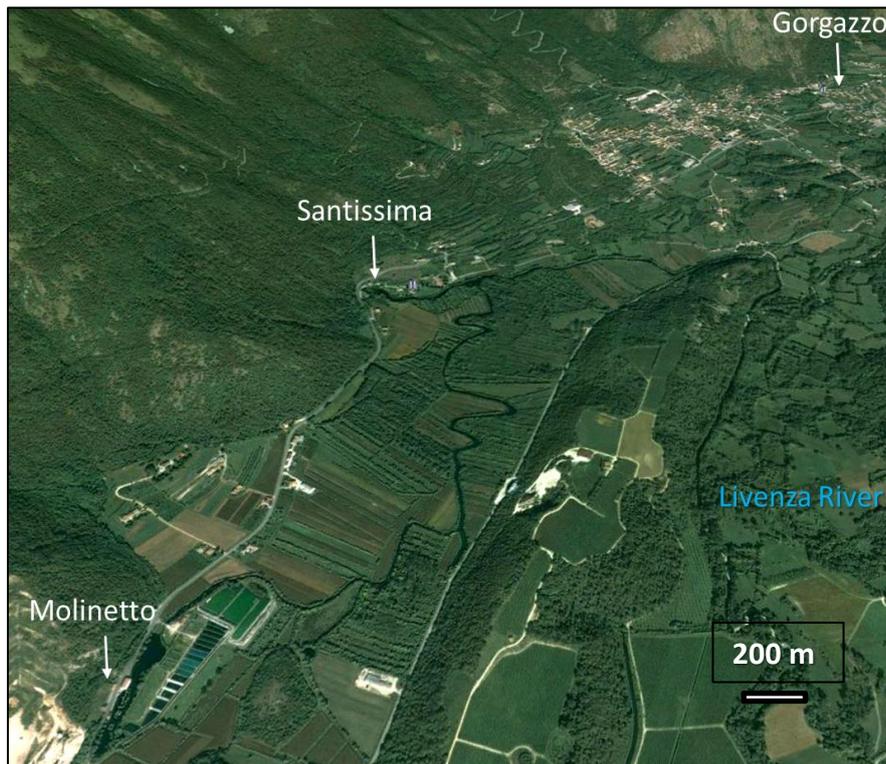


Figura 6. Ortofoto dell'area con le tre sorgenti indicate.

Il Molinetto

Questa sorgente si trova al margine della piana dei Palù, nella primissima pianura friulana. È impostata in prossimità di una faglia inversa parallela alla linea Caneva-Maniago (Giaconi, 1996). Non presenta un'unica venuta d'acqua, ma è costituita da numerose fuoriuscite diffuse che vanno formare un piccolo laghetto (Fig. 7), le cui acque vengono poi convogliate verso nord-est. Secondo la terminologia di Civita (1972) è classificabile come “sorgente per soglia di permeabilità sottoposta”, in cui il membro meno permeabile sottostante è dato dai depositi terziari su cui sono sovrascorsi i calcari mesozoici più permeabili.

Il flusso d'acqua tende per lo più ad attraversare il detrito sovrastante e non proviene direttamente dai calcari. Nell'area adiacente al Molinetto lo spessore del sedimento sciolto varia tra i 12 e i 50 metri circa, a seconda della zona (Giaconi, 1996); in particolare, si tratterebbe per lo più di sabbie da ghiaiose a limose che passerebbero a torbe nelle porzioni più superficiali, dovute a un'antica palude bonificata definitivamente poco tempo addietro. La portata media di questa sorgente, in letteratura stimata attorno ai 3 m³/s, con un range di variazione che va da 1.8 m³/s a 6.5 m³/s (Cucchi et al., 1999; Vianelli, 2000), determina uno degli apporti idrici più importanti del Livenza.



Figura 7. Foto della sorgente Molinetto. A sinistra si vede il piccolo laghetto che si viene a formare.

La Santissima

Come il Molinetto, si tratta anche in questo caso di una “sorgente per soglia di permeabilità sottoposta” (Civita, 1972), essendo anche questa posizionata lungo la medesima faglia della precedente. È situata al margine della piana dei Palù.

Appare come un continuo fronte sorgivo allineato per uno sviluppo lineare complessivo di circa 40 m; anche qui gli apporti idrici sono diffusi e non è visibile un'unica venuta d'acqua (Fig 8).

È la sorgente maggiore del Livenza con una portata media che si aggira sui 6 m³/s, con valori minimi stimati attorno a 4 m³/s e massimi che superano gli 8 m³/s (Cucchi et al., 1999; Vianelli, 2000).

Lungo il corso del torrente è possibile osservare, a breve distanza dell'area di origine del corso d'acqua, come questo si scinda in due parti e la gran parte del flusso si diriga verso il Molinetto; le acque delle due sorgenti sono captate congiuntamente qualche km a nord del Molinetto stesso e convogliate attraverso un'opera sotterranea in direzione del Livenza che scorre più a est, al di là di una modesta collinetta.

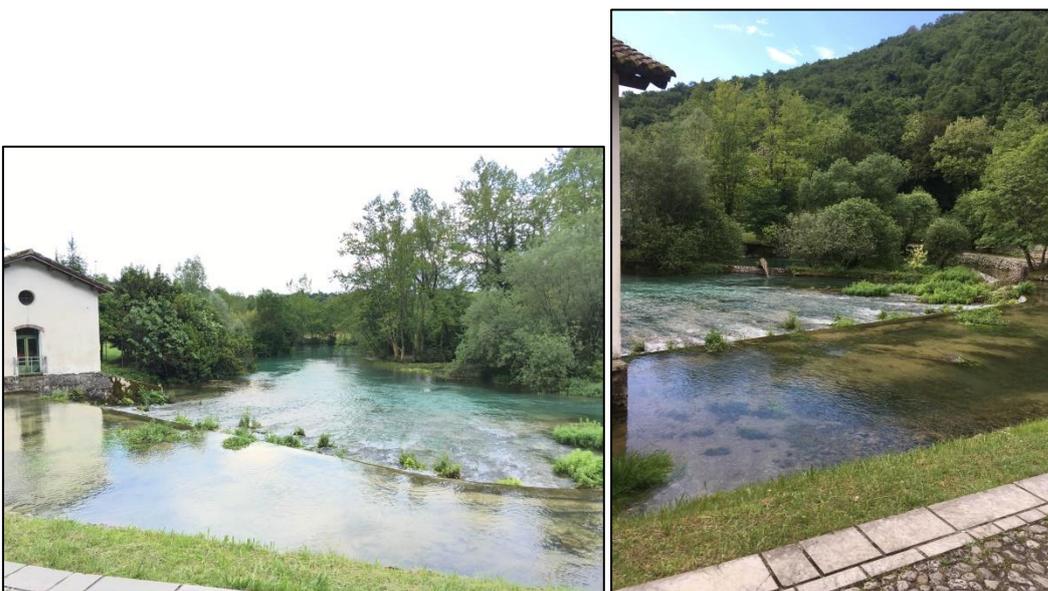


Figura 8. Due diverse prospettive della sorgente Santissima.

Il Gorgazzo

Ci sono alcuni motivi che rendono questa sorgente diversa dalle due precedenti. In primo luogo è posizionata a quota lievemente maggiore delle altre due (50 m s.l.m.), subito sotto il versante che da Pian d'Osteria scende verso Mezzomonte, laddove la faglia compressiva che coinvolge l'origine del Molinetto e della Santissima diventa sepolta; inoltre, l'acqua sembra sgorgare direttamente dai calcari mesozoici attraverso un sifone verticale che verso la superficie si apre ad imbuto. Le spedizioni esplorative finora attuate, effettuate da Luigi Casati, sono giunte alla profondità massima di 155 m al di sotto del livello del mare, all'incirca 212 metri al di sotto del piano campagna, e sembrano confermare la presenza dei calcari mesozoici per tutto il tratto indagato (Prometeo Ricerche per l'Uomo, 2008).

Secondo valori di letteratura, la portata media di questa sorgente varia dai 2 m³/s (Cucchi et al., 1999) ai 3 m³/s (Vianelli, 2000), a seconda degli autori, pur raggiungendo picchi pari a 5 m³/s. Alcuni ritengono inoltre che la portata minima vada a zero in periodi di particolare magra (Cucchi et al., 1999). Si tratta pertanto di una sorgente "di troppo pieno", alimentata dal sifone sottostante (Fig. 9). la sorgente tende a seccarsi in periodi di assenza prolungata di precipitazioni.



Figura 9. Due vedute differenti della sorgente Gorgazzo.

2.5.2 Le aree di infiltrazione concentrata

Il Cansiglio-Cavallo è un enorme massiccio carsico (Castiglioni, 1964), in cui sono presenti numerosi inghiottitoi e, pertanto, punti di infiltrazione concentrata.

Nel precedente lavoro di tesi (Squarzoni, 2015) sono state monitorate quattro grotte dal punto di vista idrochimico e isotopico. Tre di queste sono state selezionate per l'iniezione dei traccianti, due delle quali sono posizionate sull'altopiano del Cansiglio (Abisso Col della Rizza, Bus de la Genziana), mentre la terza è situata sul versante ovest del Monte Cavallo (Fessura della Tosca) (Tab. 2). Di seguito saranno descritte brevemente le grotte adibite alla prova di tracciamento.

Nome grotta	Codice	Quota ingresso (m s.l.m.)
Bus della Genziana	GEN	1020
Abisso del Col della Rizza	RIZ	1115
Fessura della Tosca	TOS	1885

Tabella 2. In ordine: nome della grotta, codice assegnato e quota di ingresso della grotta.

- Abisso col della Rizza: si sviluppa all'interno dei Calcari di Monte Cavallo e raggiunge una profondità complessiva pari a 796 metri. È una grotta ad ingresso verticale (1115 m s.l.m.). Alla base della cavità si apre una grande volta perforata da numerosi camini da cui ricade un abbondante stillicidio.

- Bus de la Genziana: posta a 1020 m s.l.m., con ingresso in pratica sulla strada, è indubbiamente la grotta più articolata tra quelle monitorate. Si sviluppa quasi interamente nei Calcari di Monte Cavallo (Ghetti & Cancian, 1989), se si escludono i primi metri che in cui affiora la Scaglia, e si estende su diversi livelli e tramite diversi rami. Le morfologie interne sono condizionate dalla presenza di detrito, sia sotto forma di blocchi che come ricoprimento argilloso del fondo. Il suo assetto risente della presenza di piccole faglie. Sia in alcuni pozzi e sia in alcuni rami è stata rilevata acqua, talvolta come stillicidio costante e talvolta come vero e proprio flusso a cascata (Fig. 10). In alcuni casi l'acqua presente all'interno dei vari rami, quando non scompare al di sotto dei detriti di ricoprimento, sembra essere convogliata verso il Salone principale (Grillo, 2002).



Figura 10: Bus de la Genziana durante la fase di iniezione del tracciante.

- Fessura della Tosca: tra le grotte considerate per questo studio è quella situata a quota più elevata (1885 m s.l.m.). Anch'essa presenta un ingresso a pozzo e si sviluppa per lo più in verticale, fino a una profondità di circa 240 m. La presenza di numerosi blocchi detritici e di un nevaio che si estende per una buona porzione del pozzo principale ne rende difficile l'esplorazione. Si sviluppa all'interno dei Calcari di Monte Cavallo.

CAPITOLO 3: METODI, MATERIALI E ANALISI

3.1 Dati pregressi

Nell'ambito di questa tesi sono stati utilizzati, tra il resto, dati acquisiti in occasione di un lavoro precedente (Squarzoni, 2015), al fine di definire, insieme ai risultati del tracciamento effettuato per la presente tesi, le aree di ricarica delle sorgenti del Livenza. Alcuni tra i dati raccolti in precedenza non sono stati presentati da Squarzoni (2015) e vengono mostrati per la prima volta in questo lavoro. Di seguito l'elenco dei dati pregressi considerati:

- Dati in discontinuo di misura della portata dell'acqua fluente;
- Dati idrologici dal monitoraggio in continuo delle sorgenti;
- Dati idrochimici ricavati dal prelievo di campioni d'acqua;
- Dati relativi agli isotopi stabili dell'acqua delle sorgenti, delle grotte e delle precipitazioni (mostrati per la prima volta in questa tesi).

I successivi sottoparagrafi tratteranno sinteticamente periodi, metodi e strumenti utilizzati per la raccolta dei dati pregressi elencati in precedenza. Per una spiegazione più dettagliata si rimanda al lavoro di tesi magistrale di Squarzoni (2015).

3.1.1 Le misure di portata di acqua fluente

Le campagne di misura

Sono state effettuate periodicamente delle misure di portata di acqua fluente nelle sorgenti monitorate. Questo al fine di trasformare le misure di livello registrate in continuo in valori di portata, per poter poi costruire le curve di deflusso.

Delle tre sorgenti, solo il Gorgazzo permetteva l'ingresso in acqua per misure a guado. L'intenso flusso rendeva difficili le misure alla Santissima mentre al Molinetto, per via della sua configurazione e dell'abbondante vegetazione presente, è stato complicato individuare una sezione idonea alla misura della portata a guado. Per le ultime due sorgenti è stato quindi necessario trovare una metodologia di misura che non prevedesse l'ingresso in acqua di un operatore.

Strumenti

Le misure di portata sono state effettuate tramite un correntometro *FlowTracker*® (Gorgazzo) e un *Acoustic Doppler Current Profiler* (Molinetto, Santissima e Gorgazzo). Il primo è uno strumento a guado che usa il principio Doppler, misurando lo spostamento di frequenza del suono riflesso dalle particelle trasportate dall'acqua in sospensione. Il secondo funziona ugualmente tramite l'effetto Doppler, con la differenza fondamentale data dal fatto che il correntometro, installato su una barchetta telecomandata, permette la misura della portata senza obbligare l'operatore ad entrare nel flusso. Oltre a misurare la velocità della corrente nei punti prescelti, può determinare la profondità di ogni punto di misura, attraverso il tempo di ritorno dell'onda acustica riflessa dalle particelle presenti in profondità. In entrambi i casi si tratta di misure di tipo Euleriano, in cui la descrizione del moto avviene da un punto di riferimento fisso, in funzione dello spazio e del tempo, senza seguire la massa fluida nel suo movimento (Cengel & Cimbala, 2007). Dal momento che il

Gorgazzo è stata l'unica sorgente a permettere campagne di indagine con due diverse metodologie, per tale sorgente si dispone di un numero maggiore di misure.

3.1.2 Punti di monitoraggio in continuo

Punti e periodi di monitoraggio

Le tre sorgenti, Molinetto, Santissima e Gorgazzo (Fig. 6), sono state strumentate ai fini di acquisire in continuo dati di livello idrico, conducibilità elettrica e temperatura. Il periodo di monitoraggio dell'intero progetto di cui fa parte questa tesi si estende dal 20 febbraio 2015 (CANS2) o 25 marzo 2015 (CANS1 e CANS3) fino al 29 agosto 2016. I dati sono stati monitorati continuamente, ogni 30 minuti (CANS1 e CANS3) e ogni ora (CANS2). Il periodo di monitoraggio include eventi idrologici estremi (inondazioni e periodi di secca) e di ricarica dovuta a pioggia e scioglimento delle nevi. A causa di lavori nell'alveo vicino la presa del Gorgazzo, la posizione del *Diver*® è stata cambiata durante il periodo di monitoraggio.

Nelle vicinanze delle sorgenti è stata poi monitorata, sempre in continuo, la pressione atmosferica, al fine di poter compensare i valori di livello registrati nelle aree sorgive, grazie a un sensore installato presso l'abitato di Polcenigo, 0.5 km a SE del Gorgazzo.

I dati sono stati scaricati periodicamente fino all'ultima operazione, avvenuta il 29 agosto 2016.

Sono infine stati utilizzati i dati pluviometrici messi a disposizione da ArpaV e dall'Istituto idrografico della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, che ha anche fornito le misure idrometriche del Livenza, con le relative scale di deflusso. I dati per la temperatura dell'aria e delle precipitazioni appartengono alla stazione meteorologica Cansiglio-Tramedere ("SM1" 1028 m s.l.m.), mentre le stazioni considerate per lo spessore della copertura nevosa sono quelle di Casera Palatina ("SM2" 1505 m s.l.m.) e Faverghera ("SM3" 1605 m s.l.m.) (fig. 11).



Figura 11. Indicate nella mappa satellitare dell'area le stazioni meteorologiche e le sorgenti monitorate.

Strumenti e metodi

Le misure in continuo sono state rese possibili grazie all'installazione in ogni sorgente di tre *CTD-Diver*® (Schlumberger Water Services), e di un *Baro-Diver*® (Schlumberger Water Services) per la correzione delle misure di pressione (Fig.12).



Figura 12. Posizione del Diver® da due differenti angolazioni, alla sorgente Gorgazzo.

Diver®

Grazie a questo strumento è possibile misurare l'altezza del livello idrico, la temperatura, nonché talvolta anche la conducibilità elettrica. È un data logger, e i dati rilevati vengono immagazzinati nella memoria interna dello strumento, dalla quale possono essere scaricati tramite computer, con l'utilizzo dello specifico software.

In particolare il calcolo del livello idrico si ottiene mediante misure di pressione: il *Diver*® registra infatti un valore di pressione assoluta (trasformando il valore della pressione in un segnale elettrico), da correggere a seconda della pressione atmosferica esterna. Per questo motivo si è installato nelle vicinanze delle sorgenti un *Baro-Diver*®, il quale, con lo stesso principio di funzionamento, fornisce una misura barometrica.

La temperatura viene misurata attraverso un sensore semiconduttivo che permette di utilizzare il valore ottenuto per compensare il sensore di pressione per l'effetto della temperatura.

Oltre al livello idrico e alla temperatura, i *CTD-Diver*® misurano anche la conducibilità elettrica dell'acqua, o come conducibilità non compensata o come conducibilità compensata a $T = 25\text{ °C}$ ("conducibilità specifica"), a seconda delle esigenze dell'utente.

3.1.3 Idrochimica e isotopi dell'acqua

Definizione dei punti e delle campagne di monitoraggio

Le tre sorgenti sono state monitorate dal punto di vista chimico attraverso l'acquisizione periodica di campioni d'acqua, oltre che, quando possibile, dei valori di conducibilità elettrica, pH e temperatura in situ. Il campionamento è stato effettuato in sette turni diversi tra febbraio e settembre 2015 (Tab. 3), al fine di analizzare i principali ioni presenti, gli elementi delle Terre Rare (principalmente lantanoidi) e gli isotopi stabili dell'acqua. All'interno dell'area di studio sono stati inoltre installati due pluviometri a diverse altitudini

(31 m s.l.m. e 1025 m s.l.m.), in modo da raccogliere acqua piovana per l'analisi degli isotopi dell'acqua.

Campagna	Data campionamento CANS1	Data campionamento CANS2	Data campionamento CANS3
1	19/02/15	19/02/15	19/02/15
2	23/03/15	23/03/15	24/03/15
2b	27/03/15	27/03/15	27/03/15
3	03/05/15	03/05/15	04/05/15
4	31/05/15	31/05/15	31/05/15
5	22/07/15	22/07/15	22/07/15
6	23/09/15	23/09/15	23/09/15

Tabella 3: Date e numeri identificativi delle campagne di campionamento per ogni sorgente monitorata.

Strumenti e metodi

La fase di campionamento prevedeva la raccolta di 500 mL di campione tal quale e 250 mL di campione acidificato con acido nitrico, per l'analisi degli ioni principali e dei lantanoidi.

I campioni per le analisi degli isotopi stabili dell'acqua (compresi i campioni provenienti dai pluviometri) sono stati raccolti in fiale di vetro di 8 mL.

I campioni per le analisi chimiche sono stati analizzati dal Laboratorio di Ricerche Idrogeologiche del Politecnico di Torino, con l'ausilio delle seguenti tecniche (in riferimento alle norme APAT-IRPA del 2003):

- Titolazione per ioni calcio, magnesio e bicarbonato;
- Cromatografia ionica per gli anioni;
- spettroscopia di assorbimento atomico per sodio e potassio;
- ICP-MS per gli elementi della serie dei lantanidi.

Gli isotopi stabili delle acque sono stati analizzati presso il "Helmholtz Zentrum München" di Monaco di Baviera mediante analisi isotopica basata sui laser (L2120-i, Picarro Inc, Santa Clara, USA), tenendo conto della "Vienna Standard Mean Ocean Water" (VSMOW), ovvero uno standard per l'acqua che definisce la composizione isotopica dell'acqua dolce. Nell'analisi è stata usata una precisione di $\pm 0,1 \text{ ‰}$ per $\delta^{18}\text{O}$ e $\pm 0,5 \text{ ‰}$ per $\delta^2\text{H}$.

Quando possibile sono stati acquisiti anche i parametri in situ, tramite sonde multiparametriche portatili che forniscono la misura di pH, temperatura e conducibilità specifica.

3.2 La prova di tracciamento multiplo

Per la prova di tracciamento multiplo grotta-sorgente sono stati usati tre traccianti fluorescenti (Fluoresceina, Sulforodamina G e Tinopal CBS-X) iniettati in tre diversi punti (grotte); per rilevarne l'arrivo in ogni sorgente è stato posizionato un fluorimetro da campo e dei fluocaptori.

3.2.1 I traccianti

A metà del novecento si riteneva che un buon tracciante dovesse avere tali caratteristiche: essere rilevabile a basse concentrazioni, avere basso valore di background nelle acque naturali, non essere adsorbito dalla matrice che attraversa, non reagire con le acque in cui è posto, essere piuttosto solubile e subito disponibile.

Ad oggi però, nessun tracciante sperimentato sembra essere compatibile con tutte queste indicazioni contemporaneamente. I traccianti che più si avvicinano ad avere alcune delle più importanti caratteristiche che contraddistinguono un tracciante ideale sono i traccianti fluorescenti. Infatti, oltre ad essere di facile recupero, di solito hanno un valore di background abbastanza inferiore a quello che caratterizza altri tipi di tracciante e non sono reattivi. Se eccitati con una specifica lunghezza d'onda, grazie alla loro proprietà di emettere radiazioni in determinate bande spettrali, riescono ad essere rilevabili a bassissime concentrazioni. Questo permette un'analisi tramite spettrofluorimetro capace di misurare concentrazioni dell'ordine del $\mu\text{g/L}$, se non anche inferiori (Bradley, 1970; Sabatini & Al Austin, 1991; Mull, 1993).

Per questo lavoro si è scelto di utilizzare tre traccianti fluorescenti: Fluoresceina, Sulforodamina G e Tinopal CBS-X.

Fluoresceina

La Fluoresceina è una sostanza innocua usata in campo medico per l'angiografia e, nell'industria, come colorante per i saponi e detersivi. In polvere presenta una tipica colorazione rossastra, mentre in acqua, con una notevole concentrazione, assume una tinta giallo-rossiccia (Fig. 13).

Usata per la prima volta nel 1877 da un idrologo tedesco, è stata testata varie volte in Francia prima che venisse introdotta negli Stati Uniti (Dole, 1906).

La Fluoresceina risente fortemente dell'effetto del decadimento fotochimico e la sua fluorescenza, oltre a variare in funzione della temperatura, decresce in acque con pH minore di 5; a causa della sua presenza in molti prodotti igienizzanti di uso comune il valore di background è relativamente elevato (Smart & Laidlaw, 1977; Mull, 1993).

Sebbene limo, sabbia e argilla non abbiano alcuna influenza sulla risposta fluorescente di questo tracciante, terreni torbosi portano a una quasi completa decolorazione, con grado di influenza proporzionale alla presenza di materia organica (Dole, 1906; Plummer, 1945). Inoltre la Fluoresceina, quando per esempio passa attraverso terreni fini, mostra una moderata sensibilità all'adsorbimento (Ambrose, 1921; Stabler, 1921). Per l'appunto questo colorante si scioglie molto rapidamente ed è completamente solubile in acqua, con la quale forma una soluzione debolmente acida (Bradley, 1970).

Il limite di rilevazione è di circa $0.1 \mu\text{g/L}$ (Jones, 1984).

Per questa prova è stata usata la Fluoresceina sodica di formula $C_{20}H_{10}O_5Na_2$.



Figura 13. Iniezione da parte degli speleologi di Fluoresceina nella grotta “Bus della Genziana” in data 28 maggio 2016.

Sulforodamina G

È una polvere di colore variabile da rosso fino a marrone-rossastro molto scuro, piuttosto solubile in acqua. Detta anche Amido-Rodamina G, appartiene al gruppo delle Rodamine, di cui fanno parte anche altri tipi di traccianti comunemente usati in idrogeologia, come la Rodamina WT e la Sulforodamina B. I coloranti appartenenti a questa famiglia sono generalmente sostanze fluorescenti, la cui risposta varia in funzione del pH e della temperatura. La Sulforodamina G non risulta essere in alcun modo tossica, a differenza di altre Rodamine, come ad esempio la Rodamina B e la Rodamina WT, che possono reagire con i nitriti e formare composti cancerogeni (Flury e Wai, 2003).

La sua formula bruta della Sulforodamina G è $C_{25}H_{25}N_2NaO_7S_2$.

Tinopal CBS-X

Il Tinopal è una sostanza innocua usata come sbiancante ottico nei comuni detersivi. In polvere presenta una colorazione giallo-paglierino mentre in acqua, a notevole concentrazione, presenta una colorazione bianco-azzurrina. Generalmente è invisibile in acqua ma produce una radiazione nel campo del visibile quando esposta a luce ultravioletta (Mull, 1993).

Il Tinopal appartiene alla classe più ampia degli sbiancanti ottici anionici che derivano dallo stilbene. Come gli altri appartenenti a questa famiglia, ha una lunghezza d'onda di emissione di 440 nm e una lunghezza d'onda ottimale di 365 – 370 nm (Uggeri & Vigna, 1990; Fay et al., 1995).

È una sostanza poco solubile (2.5% a 25 °C) ma con elevata fluorescenza (Fay et al., 1995), indipendentemente, o quasi, dal valore di pH dell'acqua (Bauer et al., 1976). Il tempo di dimezzamento in seguito all'esposizione alla luce è di 17 ore (Gaspar & Oreseanu, 1987).

Il limite più grande di questo prodotto è dato dal fatto che è molto suscettibile ad adsorbimento ($K_{oc} = 76.5$, $K_d = 0.26$, Fay et al., 1995), cosa che potrebbe condizionare anche fortemente la sua risposta all'uscita. D'altra parte, però, riesce ad essere rilevato a bassissime concentrazioni: il limite di rilevazione è di 1 µg/L per Uggeri & Vigna (1990), di 0.1 µg/L per Jones (1984) e compreso tra 1 e 100 pg/L per Gaspar & Oreseanu (1987). Questi ultimi, poi, sostengono anche che la fluorescenza del Tinopal possa aumentare di circa 60 volte, se a questo viene addizionato del glicerolo in proporzione 1:1. Bisogna

anche ricordare, poi, che la soglia di rilevazione di questa sostanza, come di tante altre, dipende in primo luogo dal background presente in acqua.

La formula bruta del Tinopal è $C_{28}H_{20}Na_2O_6S_2$.

3.2.2 Strumenti e metodi

Il fluorimetro

Il fluorimetro è uno strumento capace di rilevare il passaggio di diversi traccianti fluorescenti (ad esempio Tinopal, Fluoresceina e Rodamina) attraverso la misura della radiazione emessa dalle particelle di tali composti quando queste vengono colpite da particolari radiazioni incidenti. Installato all'interno di una qualsiasi riserva idrica, permette il passaggio dell'acqua attraverso il proprio sistema ottico; quest'ultimo è costituito da quattro lampade poste su quattro assi diversi, tre delle quali misurano tre sostanze coloranti differenti mentre la quarta prende nota del livello di torbidità. Ogni asse è fornito di un sistema di rilevamento e di un sistema di eccitazione. Ogni lampada viene accesa a turno, in modo che le risposte dovute ai diversi traccianti e alla torbidità siano indipendenti.

La sonda (Fig. 14) immersa in acqua manda poi i segnali fluorimetrici a un datalogger posto fuori flusso che consente di registrare i dati su una scheda di memoria, da cui si possono esportare per procedere all'elaborazione delle misure.

Per questo lavoro, in una prima fase, si è ritenuto utile installare tutti e tre gli strumenti nella stessa sorgente (Santissima), in modo da verificare che funzionassero in modo coerente tra loro. È stato necessario eseguire alcuni interventi al fine di risolvere i diversi problemi emersi nel corso di questa prima fase. Dopo alcune settimane di taratura, sono stati spostati nei luoghi preposti alla misurazione dove sono stati lasciati per un altro periodo "pre-tracciamento", per rilevare il rumore di fondo delle sorgenti per ogni tipo di colorante. In questo caso, si è impostata una frequenza di misura di 15 minuti su tutti i fluorimetri.



Figura 14. A sinistra, il fluorimetro da campo installato alla sorgente Santissima. A destra, un particolare della sonda di misura esterna.

I fluocaptori

I fluocaptori sono semplici dispositivi capaci di adsorbire le molecole dei diversi traccianti, a seconda della natura della sostanza adsorbente. Ad esempio, per quanto riguarda la Fluoresceina, i fluocaptori possono essere assemblati inserendo dei granuli di carbone all'interno di un piccolo sacchetto costruito con del materiale analogo a quello di cui sono formate le zanzariere (Dunn, 1957) (Fig. 15). Anche per la Rodamina il nucleo dei fluocaptori può essere costituito da carbone, mentre in altri casi si può utilizzare semplicemente del cotone (Mull, 1993).

Una volta posizionati i fluocaptori, è necessario sostituirli con una certa periodicità in modo da determinare l'inizio e la fine del periodo in cui traccianti arrivano alla sorgente in esame. Questo perché rilevano una concentrazione cumulata, quindi si ottengono informazioni più dettagliate nel tempo alternandoli a nuovi fluocaptori. Oltre a questo, il ricambio periodico dei fluocaptori è necessario per evitare il problema che, nel tempo, la concentrazione adsorbita nel fluocaptore venga rilasciata in acqua.

Questi dispositivi devono essere poi analizzati in laboratorio affinché si determini la possibile presenza della sostanza adsorbita. Sia la Fluoresceina che il Tinopal CBS-X possono essere estratti dal fluocaptore mediante una soluzione di potassa alcoolica al 10%.

Successivamente la soluzione può essere esaminata:

- Visivamente con illuminazione laterale;
- Visivamente con l'ausilio di una lampada di Wood;
- Con l'ausilio di un fluorimetro.

La soluzione esaminata viene sempre confrontata alla fine con un campione negativo.

Per questo studio sono stati realizzati sia fluocaptori con carbone attivo che con nucleo di garze di cotone. Questo perché i carboni attivi possono rilevare tutti i tre traccianti fluorescenti utilizzati, mentre le garze di cotone sono specifiche per il solo Tinopal CBS-X. Sono poi stati installati tre fluocaptori a carbone fissi per sorgente, destinati a rimanere nel flusso fino al termine del periodo di rilevazione; in aggiunta a questi, si è provveduto al ricambio settimanale di altri fluocaptori, sia a carbone che con il nucleo in cotone, in modo da determinare in maniera più esatta possibile l'eventuale arrivo delle diverse sostanze coloranti. Ad ogni ritiro i fluocaptori sono stati avvolti singolarmente in fogli di alluminio per assicurarsi che stessero al buio e poi chiusi in buste da freezer in cui sono stati indicati luogo data e ora di campionamento. Dopo averli fatti asciugare in un luogo buio, sono stati spediti in due laboratori indipendenti (all'Università di Bologna e al Laboratorio di Ricerche Idrogeologiche del Politecnico di Torino) per le analisi, eseguite utilizzando il metodo descritto da Vigna (2010).



Figura 15. A destra, un fluocaptore con nucleo di carboni attivi realizzato per questo studio. A sinistra, la posizione dei fluocaptori alla sorgente Santissima.

3.2.3 Il tracciamento

Delle quattro grotte monitorate chimicamente ne sono state scelte tre in cui eseguire l'iniezione: Abisso col della Rizza, Bus della Genziana e Fessura della Tosca. Una volta definiti i punti di iniezione, bisognava capire la quantità necessaria di tracciante da iniettare per ogni grotta.

In generale, il quantitativo di tracciante da utilizzare per un test è legato principalmente alla portata della sorgente, alla portata del punto di immissione e alla tipologia del sistema idrogeologico (da acquiferi molto permeabili a sistemi a permeabilità ridotta).

Alla sorgente devono infatti arrivare quantitativi non troppo elevati o ridotti di tracciante. Questo perché per quantitativi ridotti una concentrazione troppo bassa del tracciante nei fluocaptori fornisce risultati negativi e le strumentazioni automatiche non rilevano il tracciante. Per quantitativi elevati, invece, la colorazione delle acque sorgive risulta essere troppo evidente con possibili allarmismi o lamentele da parte della popolazione. Inoltre il colorante nell'acquifero può rimanere per tempi molto lunghi (mesi).

Per decidere la quantità di tracciante da immettere è stata seguita la formula di Vigna-Marchiolatti:

$$M = \sqrt{\frac{L \cdot Q^2}{q}}$$

Dove:

M = massa di tracciante espressa in kg

L = la distanza tra il punto di immissione e la sorgente espressa in km

Q = portata sorgiva al momento del tracciamento espressa in m^3/s

q = portata in m^3/s nel punto di immissione del tracciante

Sulla base di questi dati specifici delle sorgenti e delle grotte, si è scelto di seguire lo schema di iniezione riportato di seguito (Tab. 4).

TRACCIANTE	QUANTITÀ INIETTATA	PUNTO D'INIEZIONE	DATA INIEZIONE
Sulforodamina G	5 kg	Abisso col della Rizza	21 maggio 2016
Fluoresceina	10 kg	Bus della Genziana	28 maggio 2016
Tinopal	10 kg	Fessura della Tosca	19 giugno 2016

Tabella 4. Schema riassuntivo con specificati il tipo di tracciante utilizzato, la quantità introdotta, il punto di iniezione e la data di immissione.

Il periodo di iniezione è stato deciso in base alle condizioni meteorologiche e al conseguente regime di flusso atteso, tenendo presente che le condizioni ottimali prevedono la presenza, nella zona di ricarica, di una quantità d'acqua tale per cui sia possibile la diluizione dei coloranti e il loro movimento lungo flusso, ma che allo stesso tempo non sia così abbondante da causare una diluizione al di sotto dei limiti di rilevabilità degli strumenti posti alle sorgenti. Si erano presi in considerazione dapprima i giorni di fine autunno del 2015, in teoria precedenti alla caduta delle prime nevi. Ma viste le forti nevicate di quel periodo, le quali impedirono il raggiungimento dei punti di iniezione, si decise di rimandare il tracciamento alla successiva primavera.

Il 21 maggio 2016, 5 kg di Sulforodamina G sono stati iniettati presso Abisso col della Rizza a circa 850 m s.l.m. (250 m sotto l'ingresso della grotta), con flusso locale valutato circa 1-2 L/s.

Il 28 maggio 2016 sono stati iniettati 10 kg di Fluoresceina presso Bus della Genziana, ad un'altitudine di circa 600 m s.l.m. (400 m sotto l'ingresso della grotta), con portata locale nel fiume sotterraneo di circa 10 L/s. Infine, il 19 giugno 2016 (dopo il disgelo), 10 kg di Tinopal CBS-X sono stati iniettati presso la Fessura della Tosca intorno a 1700 m s.l.m. (200 m sotto ingresso della grotta), con portata locale nel fiume sotterraneo di circa 10 L/s. Vista l'impossibilità di trasportare grandi e pesanti volumi di tracciante pre-disciolto nelle grotte, tre diverse squadre di speleologi hanno trasportato il colorante in polvere ai punti di iniezione e sciolto questo in sito. Le operazioni sono durate 10-12 ore per ciascuna delle tre iniezioni.

La distribuzione dei traccianti da iniettare nelle diverse grotte è stata progettata in base al punto di uscita atteso (Fig. 16). Infatti si riteneva più probabile che l'acqua della Fessura della Tosca, mai giunta alle sorgenti principali in investigazioni precedenti (Vincenzi et al., 2011), arrivasse per prima al Gorgazzo, sorgente con spessore di detrito quasi nullo e dunque più idoneo alla rilevazione del Tinopal, che altrimenti sarebbe potuto essere adsorbito sul materiale terrigeno.

In ciascuna sorgente è stato installato un fluorimetro poco prima del momento di iniezione, così da poter rilevare per un determinato periodo valori naturali, senza i traccianti. Una settimana prima dell'iniezione sono stati posizionati i fluocaptori che sarebbero poi rimasti per l'intero periodo del tracciamento, insieme a quelli destinati al ricambio settimanale.

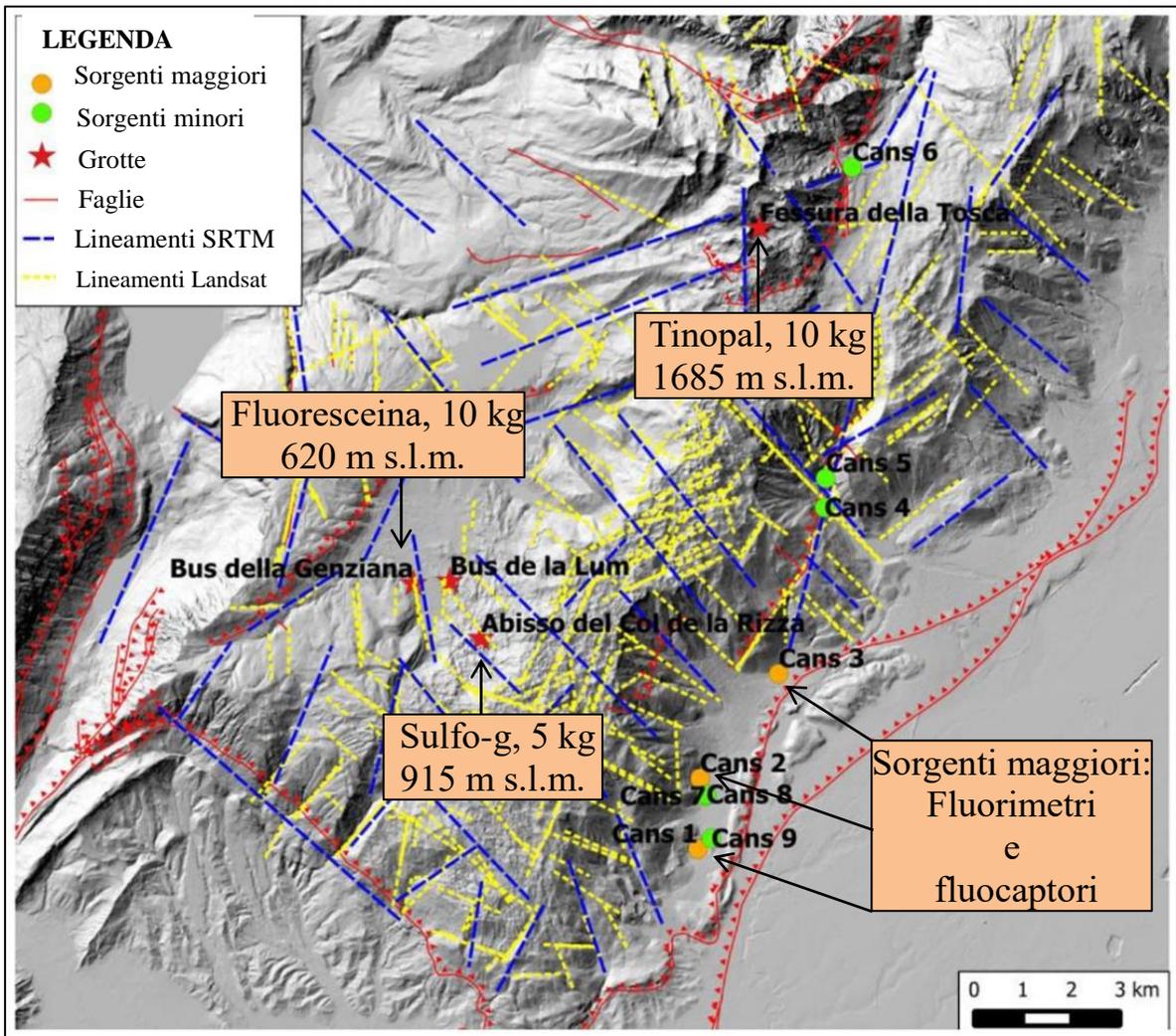


Figura 16. Mappa dei lineamenti della zona che illustra le sorgenti principali monitorate, le grotte scelte per l'iniezione e i traccianti e le loro quantità immesse.

CAPITOLO 4: PRESENTAZIONE E DISCUSSIONE DEI DATI

4.1 Dati pregressi

4.1.1 Monitoraggio in continuo di portate, parametri chimico-fisici e dati climatici

Dati delle misure di portata

Le misure di livello, registrate in continuo, sono state correlate con quelle di portata, ottenute tramite campagne di misura, al fine di ottenere un idrogramma dettagliato nel periodo che va da luglio 2015 a febbraio 2016 per il Molinetto, da marzo 2015 a febbraio 2016 per la Santissima e da marzo 2015 a luglio 2015 per il Gorgazzo.

Per ogni sorgente è stata costruita una curva di deflusso attraverso cui trasformare i valori di livello, preliminarmente già compensati per il valore di pressione atmosferica, in valori di portata (Fig. 17). Le curve di deflusso mostrate successivamente sono state modificate rispetto a quelle di Squarzone (2015), essendoci una campagna di misura di portata in più per le sorgenti Molinetto e Santissima (11/02/2016) (Tab.5).

CANS1:

Data misura di portata	Q [m ³ /s]	h[cm]
21/07/2015	1.20	129
20/10/2015	2.00	133
11/02/2016	3.02	134

CANS2:

Data misura di portata	Q [m ³ /s]	h[cm]
24/03/2015	5.47	167
17/04/2015	6.06	171
10/06/2015	5.37	163
21/07/2015	5.37	159
20/10/2015	6.64	180
11/02/2016	8.49	190

CANS3:

Data misura di portata	Q [m ³ /s]	h[cm]
24/03/2015 (Pos. Diver 1)	1.22	28
17/04/2015 (Pos. Diver 1)	2.51	47
03/05/2015 (Pos. Diver 2)	2.33	107
10/06/2015 (Pos. Diver 2)	1.48	97
21/07/2015 (Pos. Diver 2)	0.67	86

Tabella 5. Misure manuali di portata (Q) alle tre sorgenti. Il livello dell'acqua alle sorgenti è stato misurato tramite i Driver®. Sono indicate, per la sorgente CANS3, le diverse posizioni del Driver®, visto che è stato spostato durante il periodo di monitoraggio.

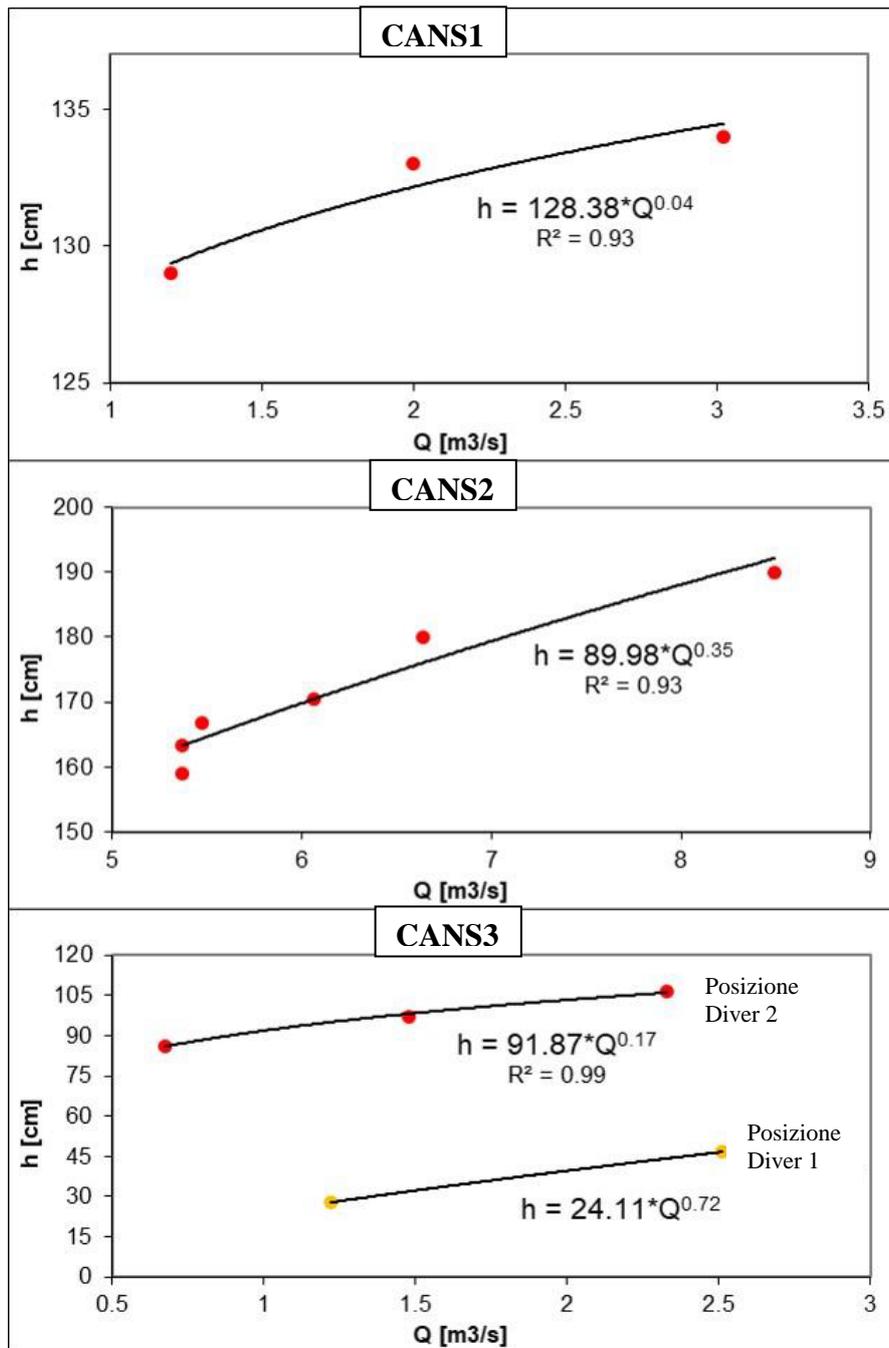


Figura 17. In ordine, dall'alto, le curve di deflusso del Molinetto, della Santissima e del Gorgazzo. Per quest'ultima sono state realizzate due curve, una per il periodo precedente allo spostamento del sensore in continuo (in basso) e una per il periodo successivo (in alto) (Filippini et al., 2018).

Discussione

Per la sorgente Molinetto si dispone di tre sole misure, per cui la curva di deflusso calcolata potrebbe non essere del tutto rappresentativa (Fig. 17), specie per quanto riguarda i periodi di piena intensa, durante i quali non è stato possibile effettuare le misure.

Alla Santissima, invece, il numero di misure di portata effettuata risulta essere più favorevole alla costruzione di una curva di deflusso rappresentativa (Fig. 17), sebbene anche in questo caso non sia stata misurata nessuna condizione di forte piena.

Infine al Gorgazzo, dove come già accennato è stato necessario spostare il Diver® dopo circa un mese dall'inizio del monitoraggio, occorre far riferimento a due diverse curve di deflusso (Fig. 17), dato che la relazione portata-livello dipende dalla sezione fluviale, che sicuramente varia nei due punti. Per la costruzione della prima curva, però, non è stato possibile avere a disposizione più di due misure, per cui, come nel caso del Molinetto, potrebbe trattarsi di una scala di deflusso non del tutto rappresentativa. La seconda curva, risulta invece più affidabile, nonostante anche in questo caso non vi sia stata alcuna calibrazione in caso di piena, per il quale potrebbe quindi perdere significatività.

Dati del monitoraggio in continuo dei parametri chimico-fisici e climatici

Gli acquisitori in continuo hanno registrato, nell'arco del periodo di monitoraggio, valori di conducibilità elettrica specifica, temperatura e livello idrometrico in ognuna delle 3 sorgenti (CANS1, CANS2, CANS3). La frequenza di registrazione è stata impostata a 30 minuti per il Gorgazzo e il Molinetto e a 60 minuti per la Santissima e la stazione barometrica. I dati rilevati sono stati compensati per il valore di pressione atmosferica per quanto riguarda la misura di livello. A supporto di questi dati sono state raccolte le misure termiche, pluviometriche e nivometriche messe a disposizione dall'ArpaV e dall'Istituto Idrografico della regione Friuli Venezia Giulia, sotto forma di dato giornaliero. I pluviometri installati (SM1, SM2 e SM3, Fig.11) dagli enti regionali sono provvisti di un sistema di fusione della neve, per cui misurano le precipitazioni complessive, sia liquide che solide. Nei grafici riportati di seguito, oltre ai dati chimico-fisici e climatici monitorati in continuo, sono presenti anche gli idrogrammi ricavati dalle curve di deflusso (Fig. 18,19,20).

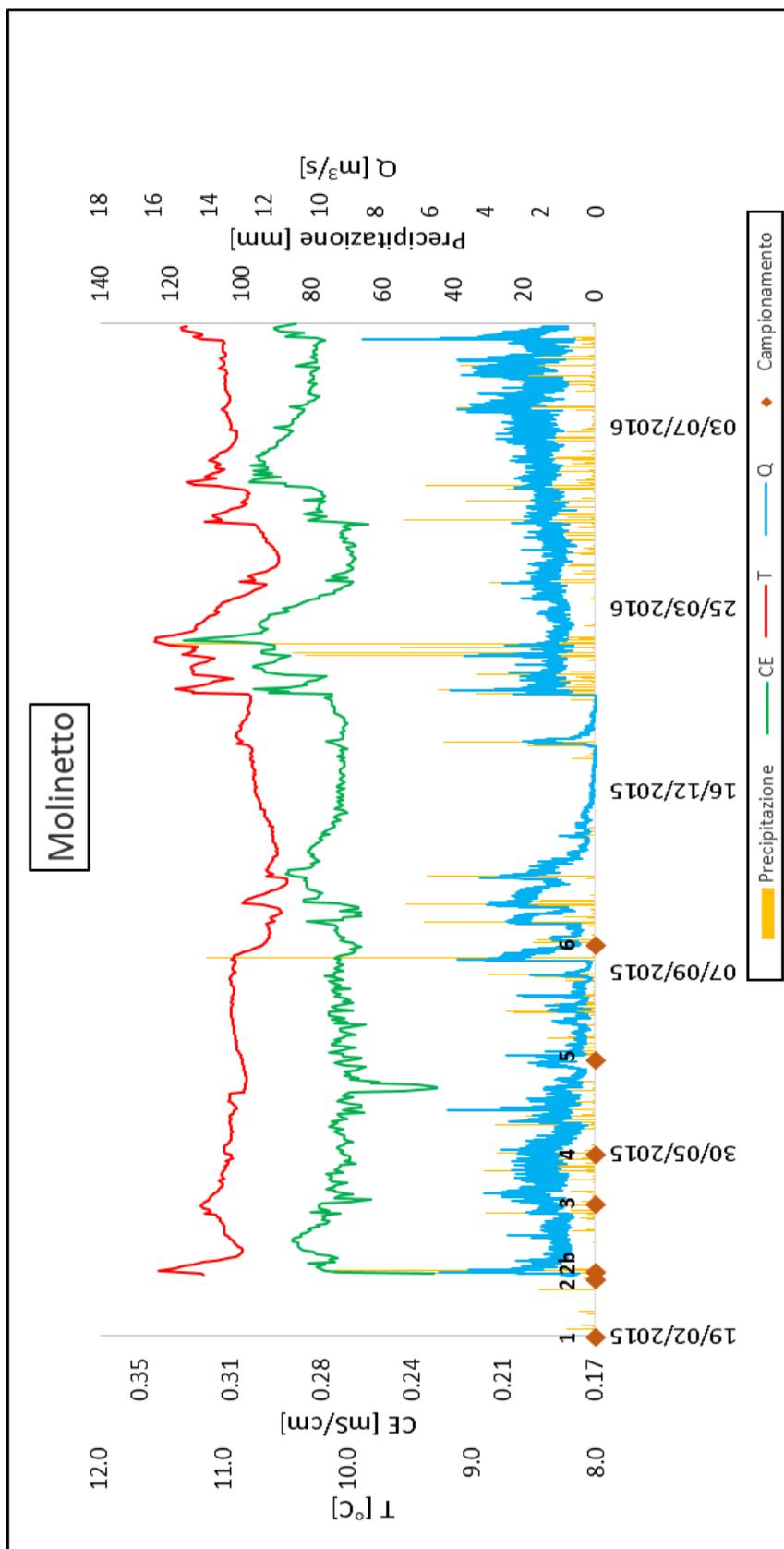


Figura 18. Portata(Q), temperatura(T), precipitazioni e conducibilità elettrica(CE) al Molinetto durante il periodo di monitoraggio. Indicati con 1,2,2b,3,4,5,6 sono invece i momenti di campionamento delle acque.

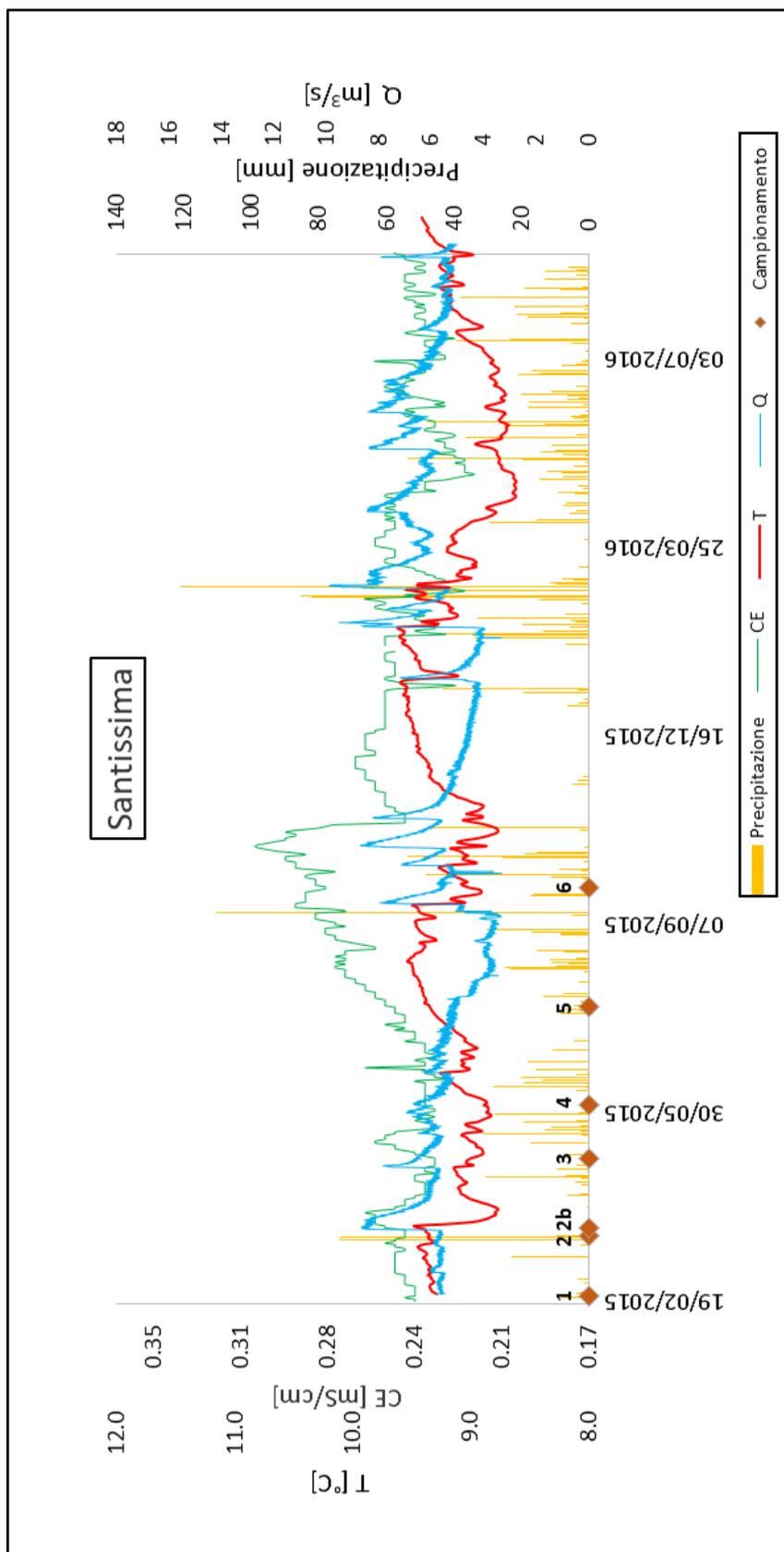


Figura 19. Portata(Q), temperatura(T), precipitazioni e conducibilità elettrica(CE) alla Santissima durante il periodo di monitoraggio. Indicati con 1,2,2b,3,4,5,6 sono invece i momenti di campionamento delle acque.

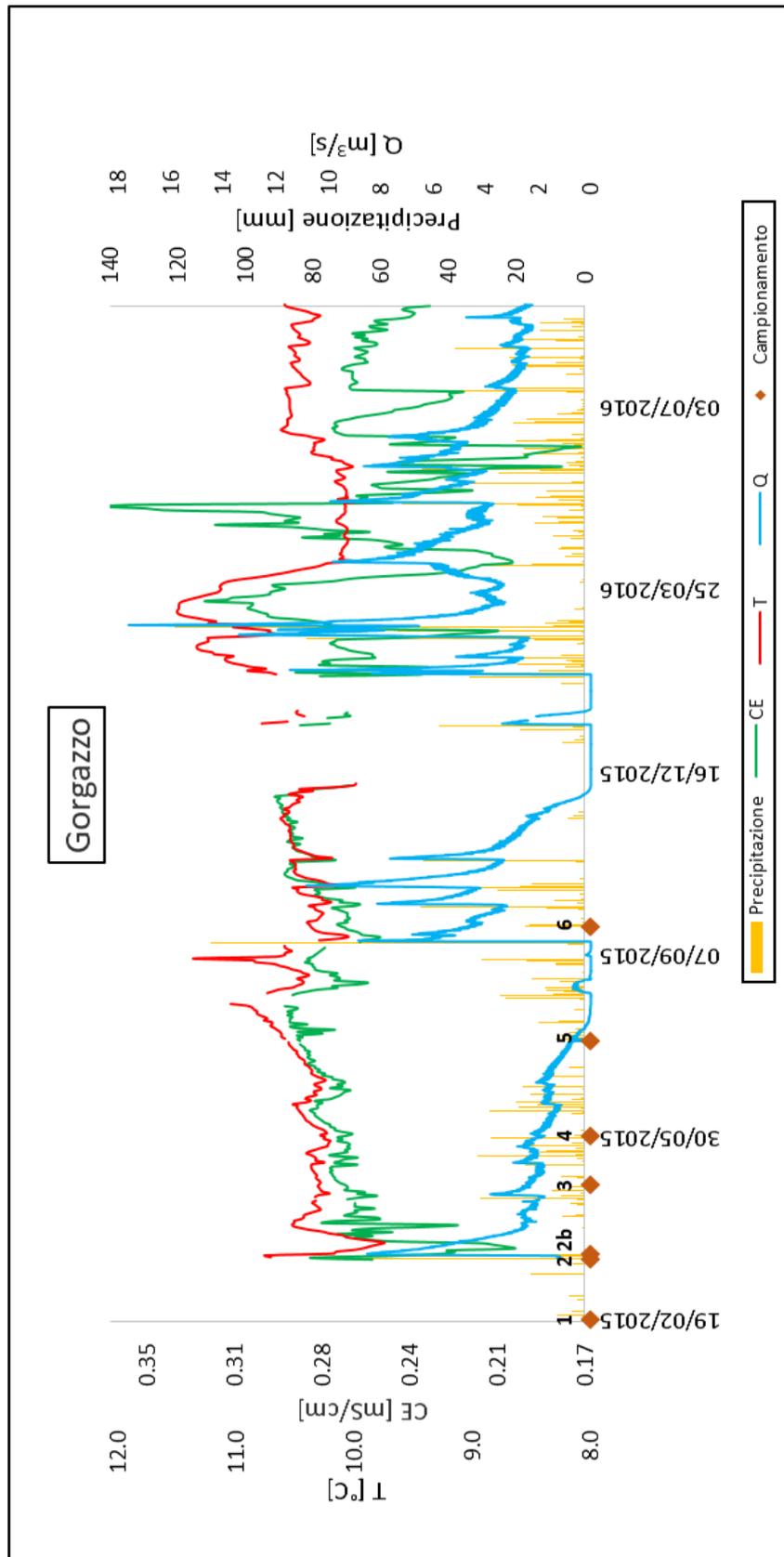


Figura 20. Portata(Q), temperatura(T), precipitazioni e conducibilità elettrica(CE) al Gorgazzo durante il periodo di monitoraggio. Indicati con 1,2,2b,3,4,5,6 sono invece i momenti di campionamento delle acque.

Discussione

I parametri monitorati in continuo possono essere messi a confronto per cercare di capire meglio l'idrodinamica dei sistemi di flusso che scaricano in corrispondenza delle 3 grandi sorgenti. Un ulteriore dato da tenere in considerazione è senza dubbio il dataset pluviometrico, in base al quale è possibile osservare la risposta del sistema a eventi di precipitazione più o meno intensa.

Analizzando sorgente per sorgente, il Molinetto è quella che mostra minori oscillazioni a grande scala di portata e temperatura (Fig. 18). La sua risposta a eventi piovosi intensi, seppur evidente, non è marcata come negli altri due casi e tende, generalmente, a mantenere una portata abbastanza sostenuta anche in periodi privi di precipitazioni. La temperatura, per gran parte dell'anno vicina agli 11 °C, tende ad aumentare marcatamente solo in occasione di precipitazioni piuttosto intense, specie se avvengono in un periodo in cui le portate sono abbastanza sostenute; verso l'inizio dell'autunno, invece, al termine della fase, seppur non estremamente marcata, di esaurimento, le prime piogge intense portano a un netto decremento della temperatura dell'acqua. Anche la conducibilità elettrica specifica è sostanzialmente costante con valore medio vicino a 0.27 mS/cm (Tab. 6). Questi parametri, sul lungo periodo, mostrano a una diminuzione della portata media un aumento della temperatura ed un lievissimo incremento della conducibilità elettrica (Fig. 18). Questi andamenti si ritrovano nella stagione estiva (luglio-agosto), in cui le precipitazioni diminuiscono.

La sorgente Santissima evidenzia un range di variazione della portata più ampio della precedente e mostra risposte a eventi di precipitazione intensa ben visibili (Fig. 19): si può osservare infatti in corrispondenza del periodo estivo una fase di svuotamento abbastanza regolare.

La temperatura, che oscilla generalmente in corrispondenza di eventi di piena, tende ad aumentare durante la stagione estiva raggiungendo valori vicini a 9.7 °C, mentre nei periodi più freddi è inferiore di solamente un grado. La conducibilità, mediamente vicina a 0.25 mS/cm (Tab. 6), cresce nella stagione poco piovosa fino a superare i 0.300 mS/cm.

I trend di conducibilità, temperatura e portata sembrano del tutto correlabili sul lungo periodo: durante la stagione poco piovosa le portate calano mentre aumentano conducibilità e temperatura (Fig. 19).

La sorgente Gorgazzo è la sorgente che mostra la più grande variabilità dei parametri di elevata intensità (Fig. 20).

La portata ha valori estremamente variabili. È evidente il rapido esaurimento che mostra in fase di magra, con portate molto elevate durante le piene e praticamente nulle durante i periodi poco piovosi, in cui probabilmente l'acqua a malapena raggiunge il livello di sfioro.

Le temperature variano con minime di poco inferiori ai 10 °C e massime di poco superiori agli 11°C. La conducibilità elettrica, sebbene evidenzia valori medi vicini a 0.26 mS/cm, nei periodi più aridi scende fino a poche decine di μ S/cm (Tab. 6).

Sorgenti	T Max [°C]	T Min [°C]	T Media [°C]	CE Max [mS/cm]	CE Min [mS/cm]	CE Media [mS/cm]
CANS1	11.56	10.49	10.90	0.33	0.23	0.27
CANS2	9.62	8.61	9.14	0.30	0.22	0.25
CANS3	11.50	9.75	10.48	0.36	0.17	0.26

Tabella 6. Temperature e conducibilità elettrica (massime, minime e medie) rilevate alle tre sorgenti durante l'intero periodo di monitoraggio (marzo 2015-agosto 2016).

Le portate massime, minime e medie derivate alle tre sorgenti a partire dal monitoraggio in continuo dei livelli sono riportate nella tabella 7 insieme alla Variabilità di scarico ("V", definita come il rapporto tra fluttuazione di scarico, ovvero max - min, rispetto allo scarico medio; Meinzer, 1923). Vale la pena notare come la sorgente Gorgazzo possa diventare completamente asciutta durante i periodi di bassa ricarica. Le tre sorgenti mostrano un diverso comportamento idrologico: la sorgente Santissima ha la massima portata media, seguita da Gorgazzo e Molinetto; Molinetto e Santissima hanno una variabilità di scarico inferiore rispetto al Gorgazzo (Tab. 7) . Le più alte variazioni di portata al Gorgazzo si verificano tra marzo e giugno, quando il disgelo contribuisce alla ricarica, mentre la Santissima ha più forti variazioni di portata in risposta alle intense piogge del periodo settembre-novembre.

Vale la pena sottolineare come durante i periodi di scarico la massima quantità di acqua fuoriesca alla Santissima, mentre il più alto flusso durante le inondazioni sia stato registrato presso il Gorgazzo.

Sorgenti	Q max [m ³ /s]	Q min [m ³ /s]	Q media [m ³ /s]	V
CANS1	5.1	0.2	1.9	2.5
CANS2	9.9	3.3	5.8	1.1
CANS3	17.6	0.0	3.0	5.8

Tabella 7. Portata massima, minima e media rilevata nelle tre sorgenti durante l'intero periodo di monitoraggio (marzo 2015-agosto 2016). "V" è la variabilità di scarico durante l'intero periodo, definita da Meinzer (1923).

Dai dati ottenuti emerge chiaramente come le tre sorgenti abbiano parametri e comportamenti diversi tra loro. La differenza più visibile è la temperatura registrata alla Santissima, da 1 a 2°C inferiore rispetto alle altre due sorgenti. In generale, variazioni della temperatura e di conducibilità elettrica al Molinetto e alla Santissima risultano più lievi rispetto al Gorgazzo, soprattutto durante il periodo di scioglimento delle nevi (marzo-giugno). Le sorgenti Santissima e Molinetto generalmente registrano una diminuzione di temperatura e di conducibilità elettrica dopo gli eventi principali di ricarica, con temperature diminuite al massimo di 0,4°C (CANS2) e 0,6°C (CANS3), mentre la conducibilità elettrica diminuisce al massimo di 0,02 mS/cm (CANS2) e 0,04 mS/cm (CANS3). Al Gorgazzo invece sembra registrarsi un fenomeno di flusso a pistone (con un aumento della temperatura fino a 0,2 °C), confermato dal leggero aumento di CE (fino a 0,02 mS/cm).

Il Molinetto mostra le temperature generali più alte, suggerendo una ricarica da un sistema di flusso lento e profondo. Il Gorgazzo mostra una temperatura generale leggermente maggiore della Santissima, suggerendo una connessione tra condotti saturi molto profondi (la cui esistenza è confermata dalle recenti esplorazioni).

Le variazioni di conducibilità elettrica sono in genere trascurabili (<30 uS/cm).

Nel dettaglio, il Molinetto mostra un lieve effetto pistone dopo abbondanti precipitazioni, soprattutto in inverno; Santissima e Gorgazzo mostrano una graduale diminuzione di temperatura dopo gli eventi di pioggia principali, suggerendo un mescolamento graduale tra acque residenti e acque di recente infiltrazione. I picchi di temperatura osservabili al Gorgazzo nella stagione estiva corrispondono a momenti in cui, a causa del bassissimo livello, il sensore si trovava probabilmente vicino al pelo dell'acqua. Infatti, la temperatura torna a valori "normali" all'arrivo delle precipitazioni.

In generale la sorgente Molinetto mostra la maggiore stabilità, con una risposta minore alle precipitazioni da parte di Q e dei vari parametri. Il Gorgazzo, invece, mostra risposte nette alle precipitazioni mentre la Santissima è da considerarsi in una situazione intermedia tra le prime due.

Tutto questo suggerisce la presenza di un sistema carsico saturo molto sviluppato. Da SW a NE aumenta il grado di carsificazione e si passa da un Sistema a dreni interdipendenti del Molinetto a un sistema a dreno dominante del Gorgazzo, con la Santissima come sistema intermedio. La Santissima è la sorgente principale del sistema (con le portate maggiori), mentre il Gorgazzo rappresenta probabilmente un "troppo pieno", essendo la sorgente più alta in quota e con grandi variazioni di portata, con episodi di $Q=0$ nelle stagioni più secche. Il Molinetto (la più bassa in quota) drena principalmente acque residenti profonde e ha un'interazione molto limitata con l'acqua appena infiltrata.

La Santissima è una sorgente con evidenti risposte agli eventi infiltrativi (picchi di portata legati alle piogge con rapidi incrementi legati alla trasmissione delle pressioni idrauliche nei condotti saturi del sistema). Notevoli variazioni della temperatura e conducibilità sono legate ad arrivi di acque diverse dalle diverse parti del sistema.

Il Gorgazzo è caratterizzato da portate che si annullano durante i periodi con scarsi apporti di ricarica ma che raggiungono anche valori massimi di portata in seguito ai principali eventi infiltrativi. Questa rappresenta una tipica situazione di una sorgente di troppo-pieno. Durante le magre le acque del sistema vanno a confluire verso le altre sorgenti: risposta sempre rapida legata alla messa in carico della zona satura del sistema.

4.1.2 Monitoraggio in discontinuo dell'idrochimica

Le date delle campagne di campionamento sono illustrate nel capitolo precedente (Tab. 3) e i campionamenti sono indicati anche nelle figure 18,19,20.

Secondo la classificazione di Langelier-Ludwig (Langelier & Ludwig, 1942) tutte le acque in esame sono acque bicarbonato-calciche, come si può facilmente intuire conoscendo la geologia dell'area.

L'elaborazione dei diagrammi di Schoeller (Schoeller, 1955) riportati di seguito conferma generalmente questa classificazione ma permette anche di rilevare alcune peculiarità dei diversi set di analisi.

I pattern mostrati dagli elementi dei lantanoidi, evidenziati attraverso diagrammi normalizzati rispetto a un valore di riferimento ma sostanzialmente analoghi a quelli di Schoeller (Piper, 1974), sembrano, invece, essere meno omogenei, pur confermando una forte impronta carbonatica nella composizione delle acque.

Di seguito saranno riportati i diagrammi di Schoeller per gli ioni principali delle tre sorgenti, quelli durante un evento di magra e uno di piena, quelli relativi alla presenza di lantanoidi e le relative discussioni.

Ioni principali

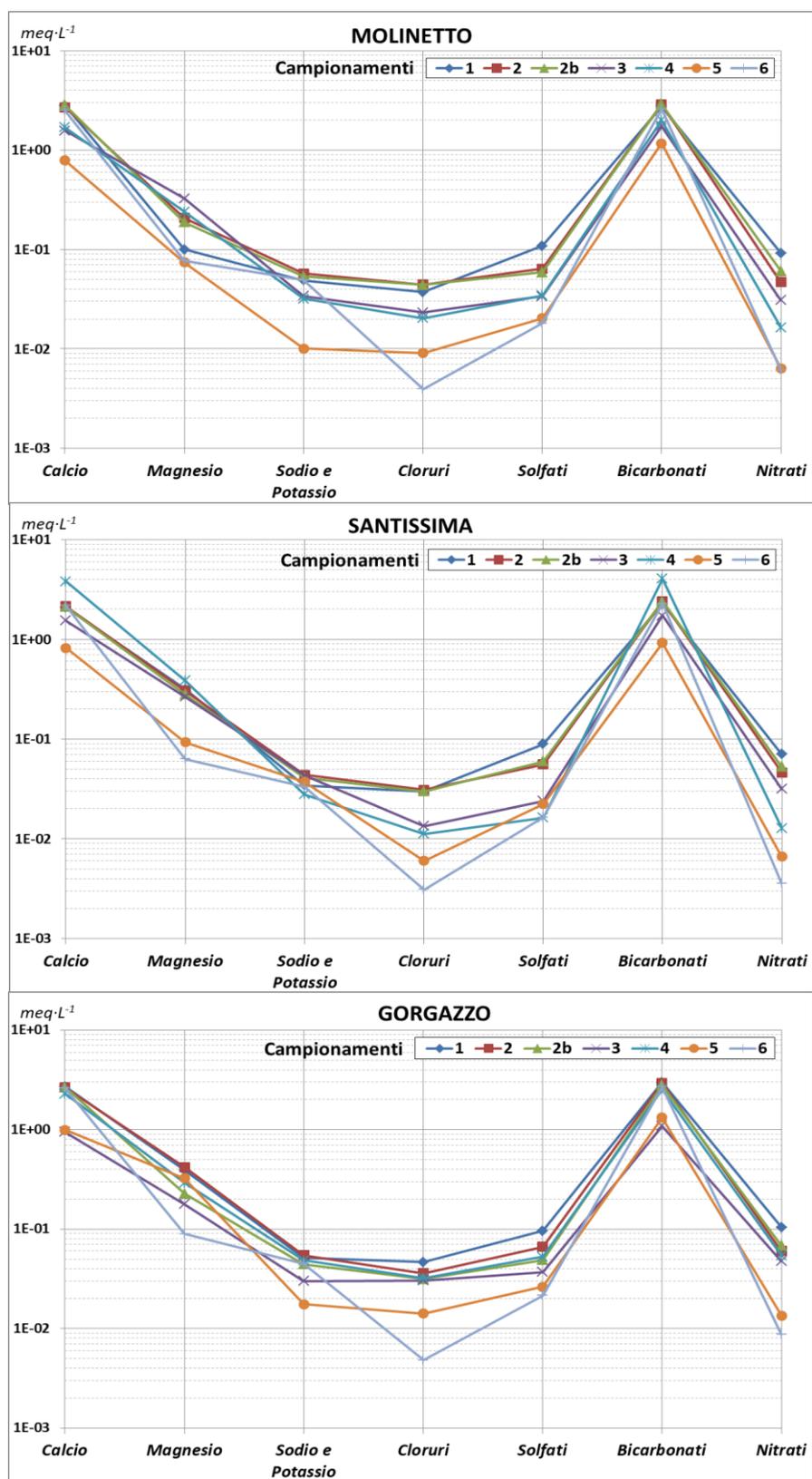


Figura 21. Diagrammi di Schoeller per gli ioni principali nelle tre sorgenti.

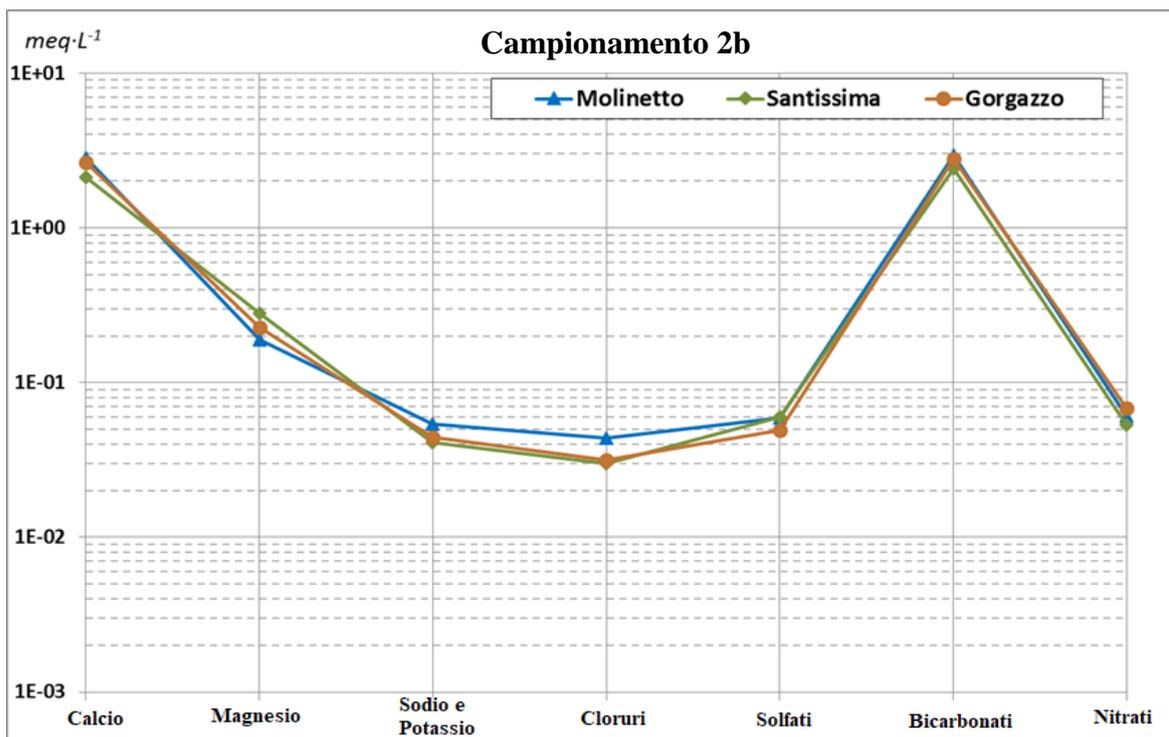


Figura 22. Idrochimica per le tre sorgenti durante un periodo di piena.

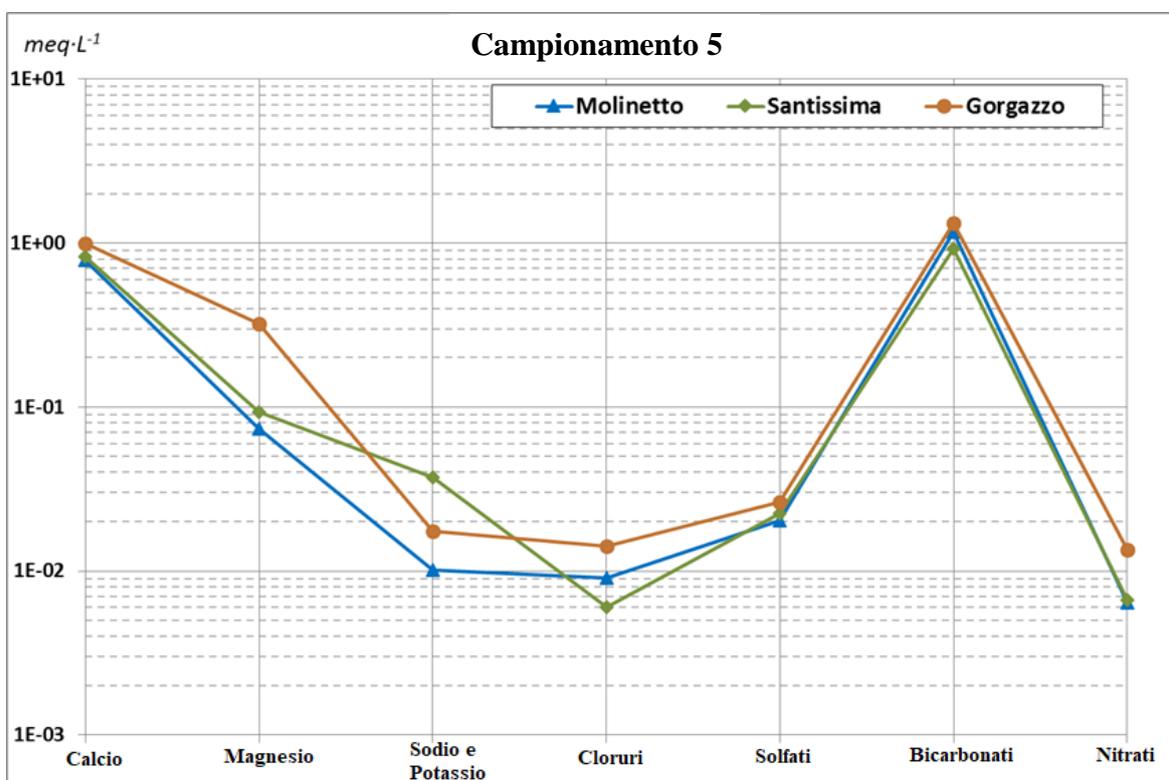


Figura 23. Idrochimica per le tre sorgenti durante un periodo di magra.

Discussione

Le tre sorgenti monitorate mostrano la stessa idrochimica complessiva (soprattutto negli elementi principali), con lievi differenze nel tempo (Fig. 21). Gli apporti provenienti da settori molto diversi del sistema sono legati a circolazioni nella zona “non satura” e nella zona “satura”. Sono visibili notevoli variazioni della mineralizzazione nel tempo. In genere, la prima ricarica dovuta al disgelo è più mineralizzata di quella indotta nella tarda estate dai primi temporali. In particolare, ioni magnesio, cloruri, solfati e nitrati sono meno abbondanti durante il periodo delle piogge intense.

Durante un periodo di piena (Fig. 22) si nota un importante fenomeno di pistonaggio con l'arrivo di acque molto simili alle tre sorgenti. Probabilmente nella situazione di piena vengono mobilizzate le acque più profonde del sistema, che sono ovviamente molto simili tra loro (solitamente durante una piena sopraggiungono acque diverse).

Durante un periodo di magra invece (Fig. 23), l'acqua sembra provenire da circuiti piuttosto diversi con acque più mineralizzate e ricche in ioni calcio e magnesio al Gorgazzo. Poiché questa è la situazione in magra, si evidenzia l'assenza di un'unica zona satura con dreni interconnessi. Sembrano essere presenti, invece, diversi circuiti semidipendenti.

Il comportamento chimico delle tre sorgenti è simile nei turni di campionamento 2 e 6, che rappresentano i due principali periodi di ricarica (Fig. 21). Lo stesso comportamento è invece differente all'inizio dell'estate (campionamento 5), tra i due periodi di ricarica, specialmente riguardo gli ioni magnesio, sodio e potassio, e cloruri. Vale la pena ricordare che il magnesio contenuto è sempre leggermente superiore al Gorgazzo, con una differenza maggiore durante i periodi di flusso normale ($\Delta = 3$ mg/L, campionamento 5). Le acque sembrano molto più simili durante i due periodi di forte ricarica (circa $\Delta = 1$ mg/L, campionamenti 2 e 6).

Lantanoidi

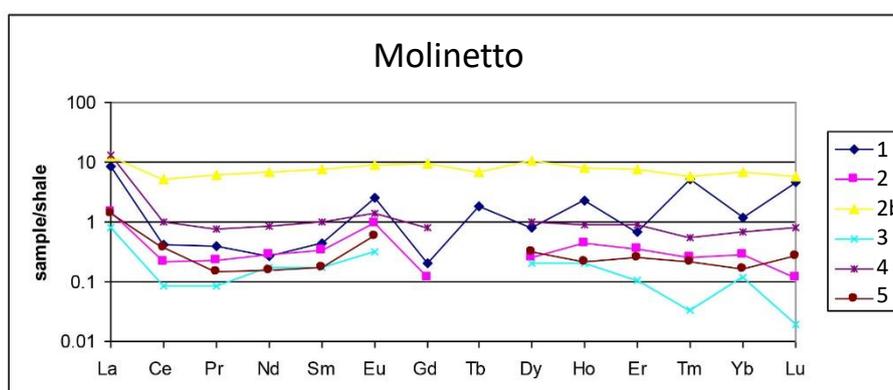


Figura 24. Concentrazione dei lantanidi al Molinetto.

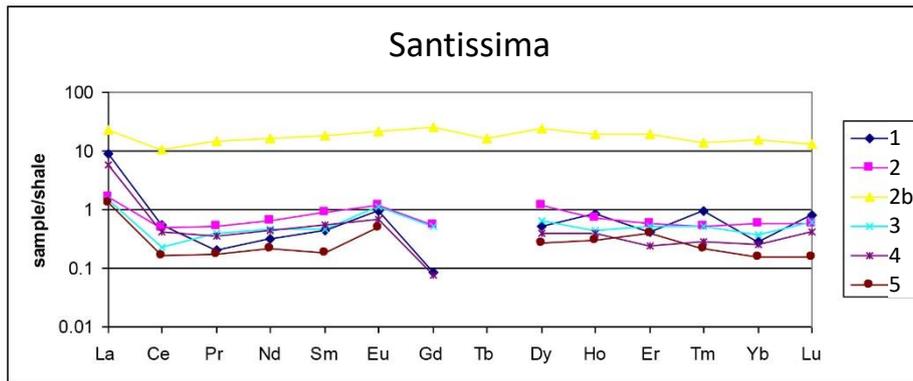


Figura 25. Concentrazione dei lantanidi alla Santissima.

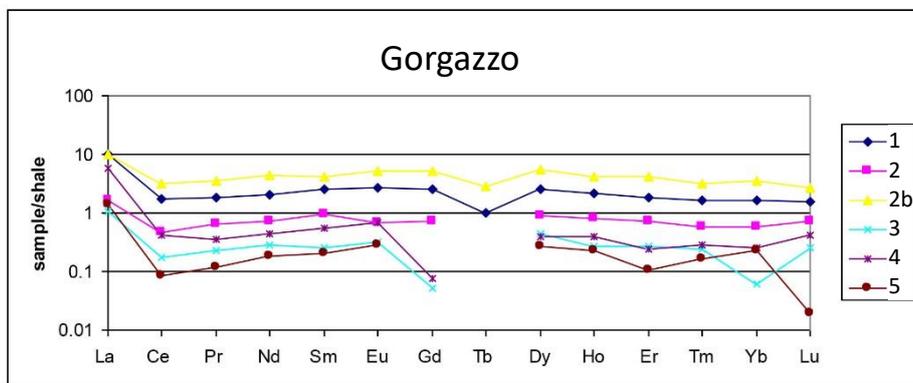


Figura 26. Concentrazione dei lantanidi al Gorgazzo.

Discussione

Il contenuto di lantanidi mostra un'impronta piuttosto debole ma tipica delle acque che hanno circolato in contatto con rocce carbonatiche, con valori bassi in cerio e un valore alto in europio (Johannesson et al., 1997a, 1997b; Lee et al., 2003; Nagarajan et al., 2011). Nelle tre sorgenti manca il tipico picco dell'europio comune nei circuiti in rocce carbonatiche. Questo andamento è legato a probabili apporti di calcari molto marnosi. Si suppone che le acque conservino "memoria" della loro provenienza come acque di precipitazione, risentendo al più, allo stesso tempo, di un effetto ambientale locale; entrambi questi fattori attenuano il segnale carbonatico, lasciando pensare ancora a un tempo limitato di contatto acqua-roccia.

Le acque di ricarica, provenienti da intensi eventi meteorici, in tutte e tre le sorgenti perdono l'impronta carbonatica (campionamento 2b, post piena): scompaiono quasi completamente i picchi dell'europio e del cerio e la curva si appiattisce. Tutto ciò è accompagnato da un arricchimento generale in quasi tutti gli elementi della serie, evidenziato in maniera particolare alla Santissima (Fig. 25): questo indica un ricambio rapido ed efficiente in caso di forti precipitazioni.

Al Gorgazzo (Fig. 26) tale differenziazione è meno netta, i parametri cambiano gradualmente. Questa sorgente non mostra un legame forte con le rocce carbonatiche (picchi di europio e cerio quasi assenti), suggerendo che anche in regimi idrici normali il Gorgazzo manifesti un rapido ricambio delle acque.

Il Molinetto (Fig. 24) è la sorgente che mantiene l'impronta carbonatica più chiara, con un picco dell'europio quasi sempre evidente.

Questa impronta di carbonato sembra essere meno evidente dopo un evento significativo di ricarica, con un aumento di lantanidi e un appiattimento della curva, che sono visibili sia al Molinetto che alla Santissima (Fig. 24 e 25). Ciò indicherebbe una rapida sostituzione nel sistema dei condotti da parte delle recenti acque di infiltrazione. In condizioni di flusso normale, le acque del Gorgazzo sembrano avere un'impronta meno evidente di carbonato (picchi di Eu e Ce sono quasi assenti), mentre le acque del Molinetto hanno più evidenti picchi di Eu e Ce.

4.1.3 Monitoraggio discontinuo degli isotopi stabili nelle acque

Sono stati analizzati gli isotopi stabili delle acque delle sorgenti, delle grotte e delle precipitazioni, raggruppandone i valori nel grafico a seguire dove sono stati messi in correlazione con l'equazione che descrive le acque meteoriche tipiche del Nord Italia proposta da Longinelli & Selmo (2003) (Fig. 27).

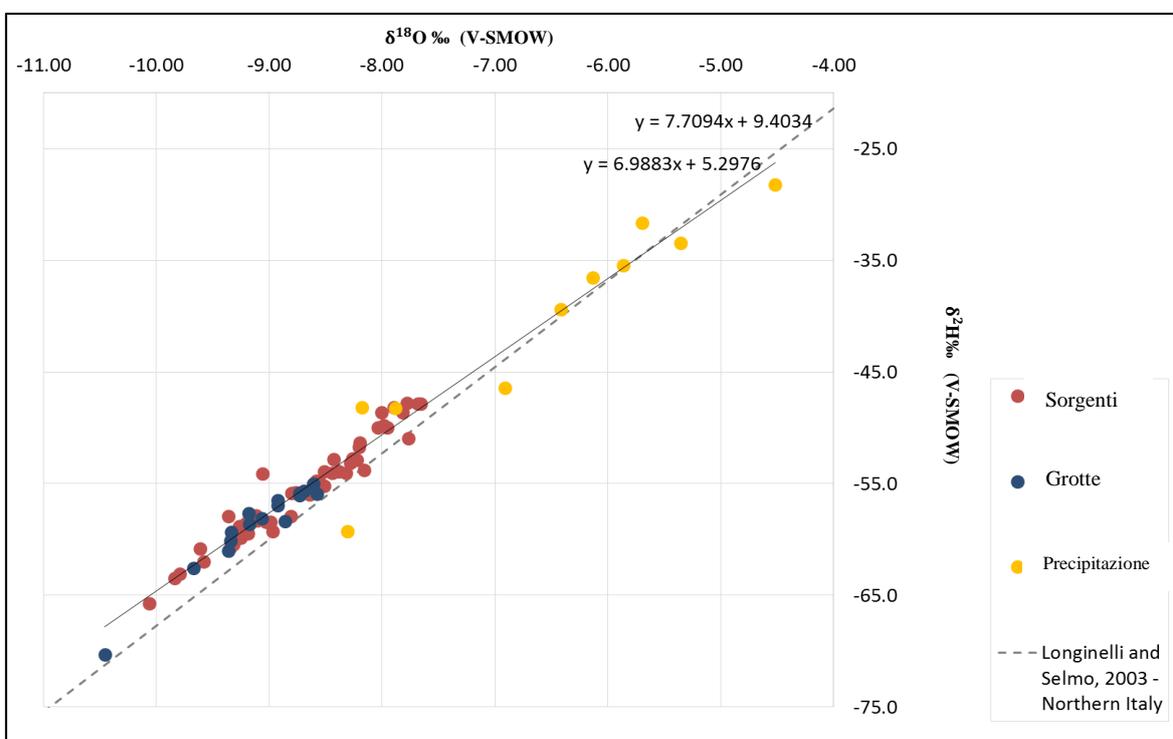


Figura 27. Firma degli isotopi stabili delle piogge, delle grotte e delle sorgenti. L'equazione descrive la "Local Meteoric Water Line" (LMWL) per le acque del Nord Italia (Longinelli & Selmo, 2003).

Tutti i valori degli isotopi stabili dell'acqua (pioggia, sorgenti e grotte) si allineano lungo una retta abbastanza simile a quella proposta da Longinelli & Selmo (2003) per le acque meteoriche del Nord Italia (Fig. 27). Le acque piovane hanno rapporti isotopici più ricchi, seguiti poi da quelle delle sorgenti e delle grotte.

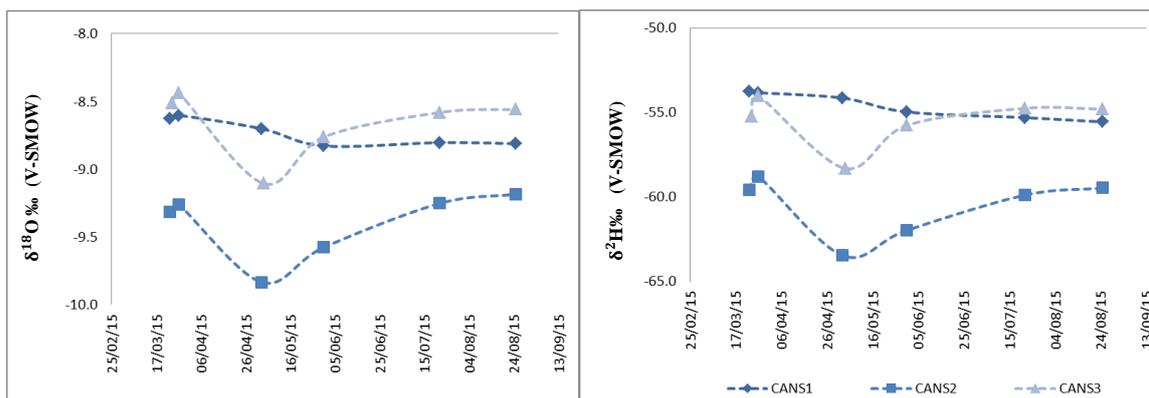


Figura 28. Valori degli isotopi stabili misurati nel tempo alle tre sorgenti. Da notare come nel momento dello scioglimento delle nevi i valori siano più bassi (aprile-maggio) e come la sorgente Santissima abbia valori in generale più bassi, perché è probabilmente alimentata da aree di ricarica a quote superiori.

La sorgente Santissima mostra valori di isotopi stabili meno arricchiti in confronto con le altre sorgenti, indicando molto probabilmente così aree di ricarica da quote superiori (Fig. 28). L'acqua di sorgente campionata durante il periodo del disgelo mostra valori decisamente più bassi per la Santissima e il Gorgazzo (campionamento 3). Il Molinetto mostra una minore variabilità nella composizione di isotopi stabili, questo perché in questa sorgente non è evidente l'arrivo della ricarica dovuto alla fusione delle nevi, molto marcato invece alla Santissima e al Gorgazzo.

4.2 Il tracciamento

4.2.1 Dati della prova del tracciamento multiplo

I dati registrati dai fluorimetri relativamente all'arrivo dei traccianti sono stati elaborati in curve di restituzione (o curve di breakthrough) del tracciante. Il colorante immesso si sposta nell'acquifero insieme ad una parte più o meno rilevante della massa idrica che defluisce verso le sorgenti e subisce una serie di fenomeni di diluizione legati alle caratteristiche idrogeologiche del sistema. Lo studio della curva di restituzione del tracciante permette quindi di comprenderne il suo funzionamento.

Alcuni segnali ritenuti più "significativi" (ovvero che indicavano un probabile arrivo di tracciante), sono stati "puliti" tenendo conto dei soli dati notturni (dalle ore 21:00 alle ore 06:00) nell'elaborazione della curva di restituzione, così da evitare eventuali picchi dovuti alla luce diurna.

Le curve di restituzione di ogni tracciante ad ogni sorgente sono state messe a confronto con le portate delle sorgenti, con le precipitazioni dell'intero periodo di monitoraggio e con le analisi effettuate sui fluocettori. Questi ultimi sono proiettati nei grafici nel rispettivo tempo di posa. Vengono riportati nei grafici solo quelli valutati con certezza essere positivi all'adsorbimento del tracciante, e quelli "forse positivi", ovvero fluocettori che non sono negativi, ma di cui la presenza del tracciante è in forte dubbio: la loro positività potrebbe essere legata all'arrivo di tracciante o alternativamente alla presenza di sostanza organica.

Di seguito sono illustrati i risultati delle analisi dei fluocettori (Tab. 8) e le curve di restituzione dei traccianti per ogni sorgente (Fig. 29,30,31).

Sorgente	Data posizionamento	Data rimozione	Risultati carbone	Risultati cotone
MOLINETTO	16/05/2016	28/05/2016	negativo	negativo
	23/05/2016	04/06/2016	negativo	negativo
	28/05/2016	11/06/2016	negativo	negativo
	04/06/2016	18/06/2016	poco positivo FLUO	negativo
	11/06/2016	18/06/2016	negativo	negativo
	18/06/2016	25/06/2016	negativo	negativo
	18/06/2016	03/07/2016	negativo	negativo
	25/06/2016	09/07/2016	negativo	negativo
	03/07/2016	16/07/2016	negativo	negativo
	09/07/2016	23/07/2016	negativo	negativo
	16/07/2016	31/07/2016	negativo	negativo
	23/07/2016	06/08/2016	negativo	negativo
	31/07/2016	16/08/2016	negativo	negativo
	06/08/2016	21/08/2016	negativo	negativo
	16/08/2016	27/08/2016	negativo	positivo TINO
21/08/2016	30/08/2016	negativo	negativo	
Sorgente	Data posizionamento	Data rimozione	Risultati carbone	Risultati cotone
SANTISSIMA	16/05/2016	28/05/2016	negativo	negativo
	23/05/2016	04/06/2016	positivo FLUO	negativo
	28/05/2016	11/06/2016	molto positivo FLUO	negativo
	04/06/2016	18/06/2016	molto positivo FLUO	positivo TINO
	11/06/2016	18/06/2016	forse positivo FLUO	negativo
	18/06/2016	25/06/2016	negativo	negativo
	18/06/2016	03/07/2016	forse positivo FLUO	negativo
	25/06/2016	09/07/2016	forse positivo FLUO	negativo
	03/07/2016	16/07/2016	negativo	negativo
	09/07/2016	23/07/2016	negativo	negativo
	16/07/2016	31/07/2016	negativo	negativo
	23/07/2016	06/08/2016	negativo	negativo
	31/07/2016	16/08/2016	negativo	negativo
	06/08/2016	21/08/2016	negativo	negativo
	16/08/2016	27/08/2016	negativo	negativo
21/08/2016	30/08/2016	negativo	negativo	
Sorgente	Data posizionamento	Data rimozione	Risultati carbone	Risultati cotone
GORGAZZO	16/05/2016	28/05/2016	negativo	negativo
	23/05/2016	04/06/2016	negativo	negativo
	28/05/2016	11/06/2016	negativo	negativo
	04/06/2016	18/06/2016	negativo	negativo
	11/06/2016	18/06/2016	negativo	negativo
	18/06/2016	25/06/2016	forse positivo FLUO	negativo
	18/06/2016	03/07/2016	negativo	negativo
	25/06/2016	09/07/2016	negativo	negativo
	03/07/2016	16/07/2016	negativo	negativo
	09/07/2016	23/07/2016	negativo	negativo
	16/07/2016	31/07/2016	negativo	negativo
	23/07/2016	06/08/2016	negativo	negativo
	31/07/2016	16/08/2016	negativo	negativo
	06/08/2016	21/08/2016	negativo	negativo
	16/08/2016	27/08/2016	negativo	negativo
21/08/2016	30/08/2016	negativo	negativo	

Tabella 8. Risultati delle analisi dei fluocaptorii analizzati all'Università di Bologna e al Laboratorio di Ricerche Idrogeologiche del Politecnico di Torino. Sono mostrati il nome della sorgente dove sono stati posizionati i fluocaptorii, i giorni di posizionamento e rimozione dei singoli fluocaptorii alle sorgenti, e i risultati delle analisi sia dei fluocaptorii a nucleo di carbone che a nucleo di cotone. In caso di positività, a fianco si trova la sigla del tracciante risultato positivo (FLUO=Fluoresceina, TINO=Tinopal CBS-X).

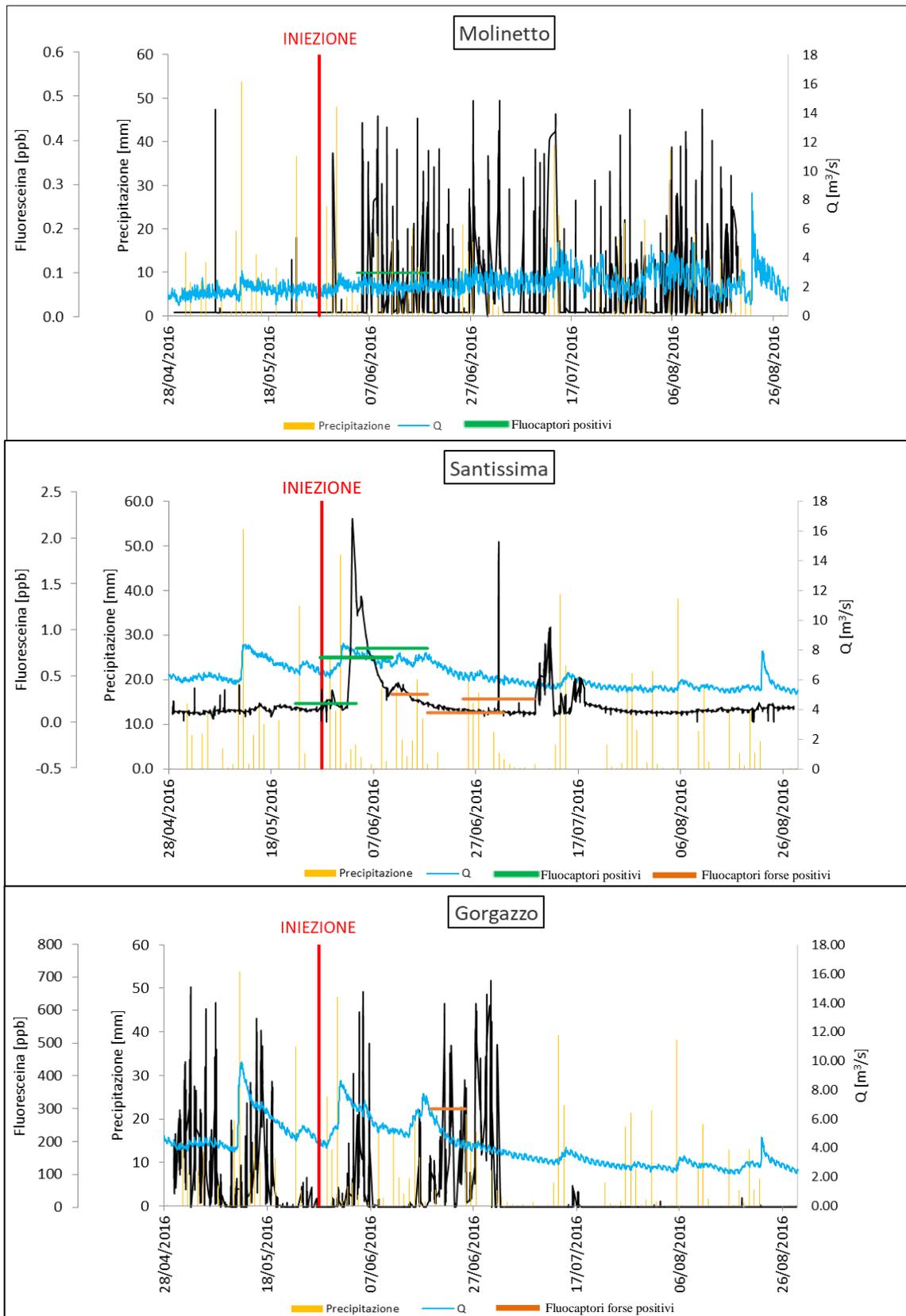


Figura 29. Confronto tra la curva di restituzione della Fluoresceina con l'andamento della portata, con le precipitazioni dell'intero periodo di monitoraggio e con le analisi effettuate sui fluocettori per tutte e tre le sorgenti.

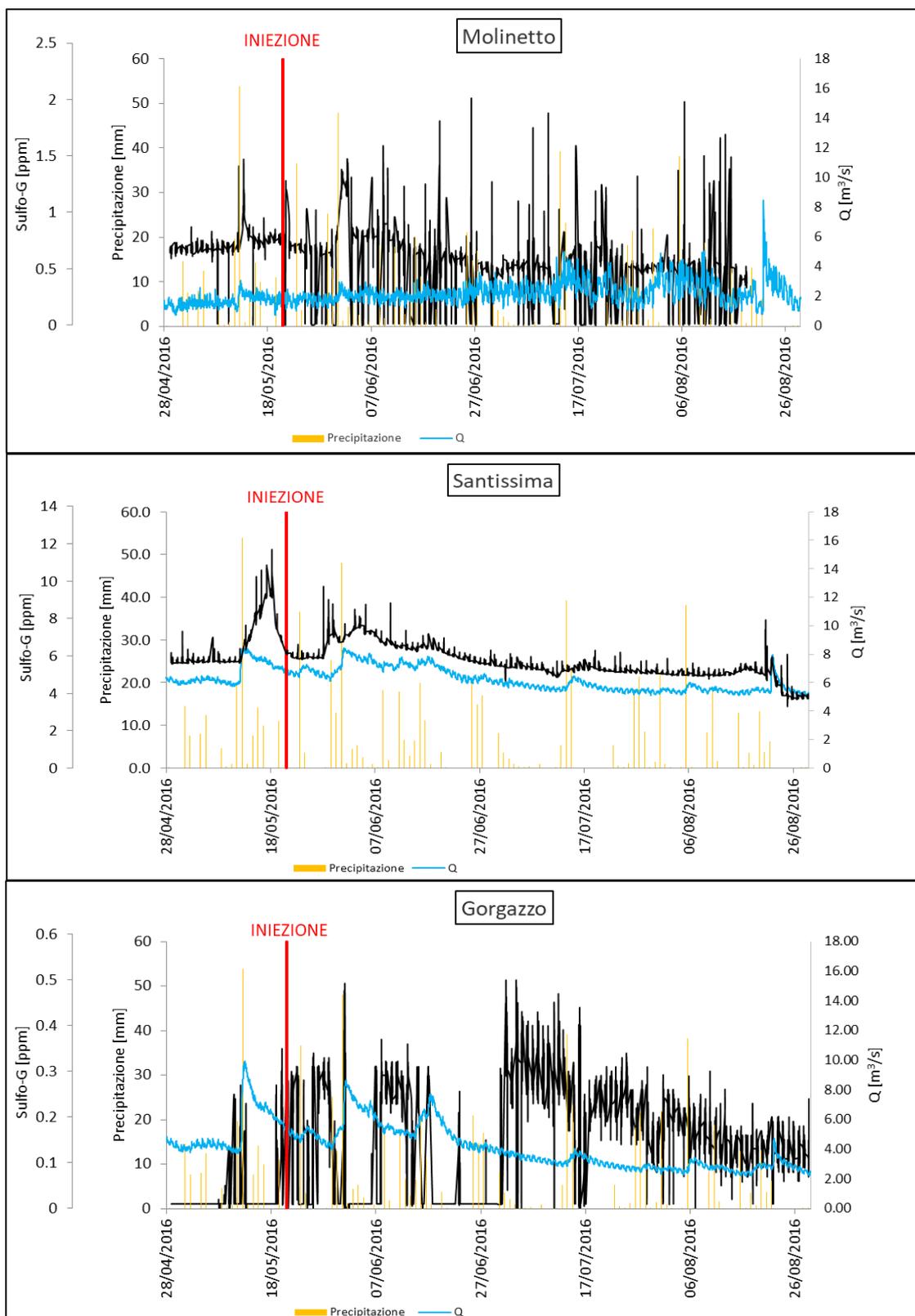


Figura 30. Confronto tra la curva di restituzione della Sulfrodamina G con l'andamento della portata, con le precipitazioni dell'intero periodo di monitoraggio e con le analisi effettuate sui fluocaptori per tutte e tre le sorgenti.

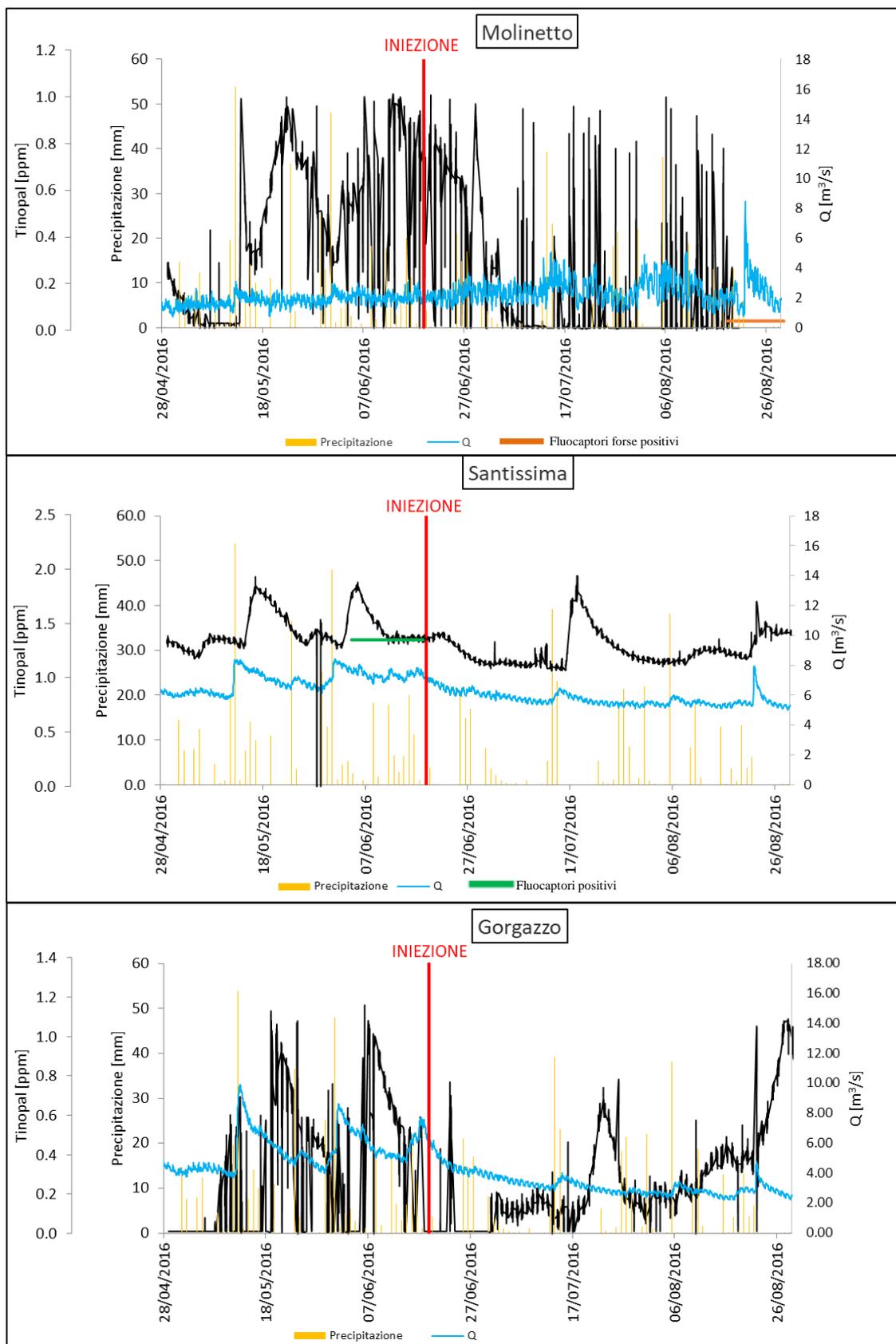


Figura 31. Confronto tra la curva di restituzione della Tinopal CBS-X con l'andamento della portata, con le precipitazioni dell'intero periodo di monitoraggio e con le analisi effettuate sui fluocaptori per tutte e tre le sorgenti.

4.2.2 Discussione

Fatta eccezione per l'arrivo di Fluoresceina alla sorgente Santissima (Fig. 29), il test di tracciamento artificiale non ha fornito altri risultati attendibili. Tutte le curve di restituzione mostrano picchi di fluorescenza prima dell'iniezione del tracciante. Questo è probabilmente dovuto al "rumore" di origine antropica (acque reflue delle case o impianti sciistici). I picchi di pre-iniezione compromettono l'interpretazione dei picchi post-iniezione, che potrebbero rappresentare esiti positivi dall'iniezione del tracciante o da ulteriore rumore antropogenico. Il rumore di fondo (cioè un'oscillazione a breve scala del segnale fluorescente) rende l'interpretazione dei risultati ancora più complessa. Questo rumore di fondo potrebbe essere causato dalla luce solare o da altri fattori ambientali (ad esempio la ricca vegetazione in alcune delle sorgenti). Alcune volte sono presenti dei picchi di fluorescenza corrispondenti a picchi di portata, potrebbero quindi essere dovuti ad aumento di torbidità (come ad esempio al Gorgazzo, Fig 30). Altre volte, picchi indipendenti sono con maggiore probabilità attribuibili all'arrivo dei traccianti. Infine, è da specificare che alcuni traccianti potrebbero anche interferire tra loro, quindi un picco ricondotto a un determinato tracciante potrebbe anche essere causato da un altro causando ulteriore difficoltà nell'interpretazione.

Fluoresceina

Alla Santissima è stata rilevata Fluoresceina quattro giorni dopo l'iniezione del tracciante che ha raggiunto un picco di concentrazione di 2,2 µg/L dopo sei giorni dall'iniezione (Fig. 32, Tab. 8). Tra l'iniezione e il primo arrivo del tracciante sono stati registrati, presso la stazione di Cansiglio-Tramedere, eventi di precipitazione fino a 48 mm/giorno.

Un secondo picco di concentrazione (1,3 µg/L) è stato rilevato 8 giorni dopo l'iniezione dell'elemento tracciante (Fig. 32). Un terzo picco (0,4 µg/L) è stato rilevato 15 giorni dopo l'iniezione, preceduto da nuovi eventi importanti di precipitazioni (fino a 18 mm/giorno) (Fig. 32). Il recupero dell'elemento tracciante è stato alto, circa il 75%. La velocità del flusso delle acque sotterranee è stata stimata a 1768 m/giorno, sulla base della distanza tra la grotta Bus della Genziana e la sorgente Santissima (7 km), e dell'intervallo di tempo tra iniezione dell'elemento tracciante e il primo arrivo. Da sottolineare che tale velocità di flusso rappresenta solo la risposta veloce agli eventi significativi di ricarica, trascura la dispersione e quindi non è uguale alla velocità di flusso media dell'acqua. La velocità del flusso stimata è 4,6 volte superiore rispetto alla massima determinata da Vincenzi et al. (2011) per l'acquifero stesso. Una possibile spiegazione è che non si sia verificata nessuna precipitazione significativa tra iniezione dell'elemento tracciante e il primo arrivo del tracciante stesso. Vale la pena notare, tuttavia, che il picco di Fluoresceina rilevato da Vincenzi et al. (2011) è simile al terzo osservato nella presente prova di tracciamento (Fig. 32), entrambi in termini di lasso di tempo e concentrazione. I risultati dalle analisi dei fluocaptorì a carboni attivi hanno confermato l'affidabilità della curva rilevata con il fluorimetro (Tab. 8). Questi risultati indicano chiaramente un collegamento fra la grotta Bus della Genziana e la sorgente Santissima. Il collegamento in questione non è costituito solo da un canale di flusso principale ma da diversi canali, come indicato dai picchi multipli della curva di concentrazione del tracciante.

Fluocaptorì "forse positivi" sono stati rilevati nelle tre settimane successive all'arrivo del tracciante, ma vista i valori bassi di fluorescenza sono stati ritenuti inaffidabili.

Al Molinetto è stato analizzato un fluocaptore poco positivo, posto una settimana dopo l'iniezione del tracciante. I molteplici picchi di fluorescenza mostrati nella curva hanno

però consigliato un'interpretazione poco attendibile riguardo all'arrivo della Fluoresceina in questa sorgente (Fig. 29).

Al Gorgazzo, un fluocaptore “forse positivo”, posto 20 giorni dopo l'iniezione del tracciante, è stato giudicato inattendibile visto gli alti valori di fluorescenza e di portata (Fig.29).

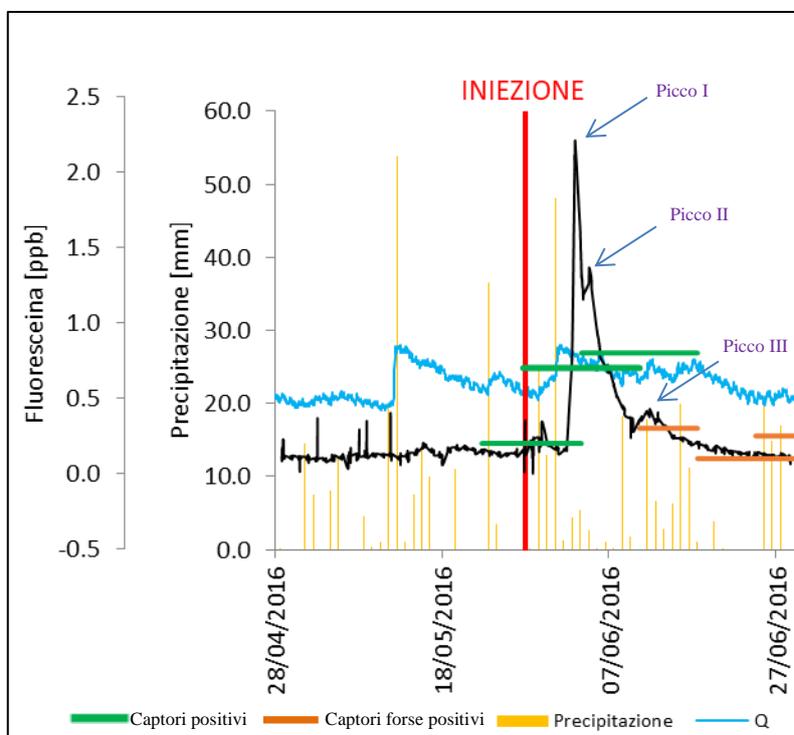


Figura 32. Prima parte della curva di restituzione della Fluoresceina alla sorgente Santissima. In figura evidenziati i tre picchi dell'arrivo.

Sulfurodamina G e Tinopal CBS-X

Sulfurodamina G e Tinopal CBS-X non hanno restituito nessun segnale affidabile alla Santissima, sia tramite fluorimetri che fluocaptori. Segnali disturbati simili sono stati osservati al Molinetto e al Gorgazzo per tutti e tre i traccianti iniettati.

Alti valori altalenanti di fluorescenza sono evidenziati nelle curve di restituzione della Sulfurodamina G, dove però la mancanza di picchi o segnali “puliti” suggerisce una totale assenza di restituzione di questo tracciante (Fig. 30). La generale mancanza di risultati chiari e affidabili dell'arrivo dei traccianti è attribuibile all'enorme diluizione potenziale del sistema acquifero, alla connettività mancante tra le grotte e le sorgenti indagate o al disturbo antropico (per esempio acque reflue domestiche da lavatrici).

Per quanto riguarda il Tinopal CBS-X, un fluocaptore forse positivo è stato riscontrato a due mesi dall'iniezione del tracciante al Molinetto, decisamente troppo lontano nel tempo dal momento dell'immissione del tracciante (Tab. 8). Alla Santissima e al Gorgazzo, un possibile ma non del tutto affidabile picco di Tinopal CBS-X è presente in entrambe le curve nello stesso periodo (ultimi 10 giorni di luglio) (Fig. 31). Questo perché l'arrivo non è coerente con le date di iniezione e i risultati dei fluocaptori hanno dato esiti negativi (Tab. 8).

In sostanza, nonostante l'alta quantità di tracciante iniettata, l'utilizzo di Sulfurodamina G e di Tinopal CBS-X non ha fornito risultati significativi al fine della ricostruzione della struttura idrogeologica del massiccio.

4.3 Definizione delle aree di ricarica

Combinando tutte le osservazioni raccolte tramite i dati pregressi (monitoraggio idrologico e idrochimico) insieme ai risultati della prova di tracciamento multiplo, si è potuto ipotizzare delle aree di ricarica delle sorgenti.

Le sorgenti Molinetto, Santissima e Gorgazzo si trovano su una soglia di permeabilità che mette a contatto, ad Est, i calcari mesozoici del massiccio del Cansiglio con le unità di flysh. Queste sorgenti sembrano dunque essere solo grandi fuoriuscite di acque sotterranee del sistema acquifero Cansiglio-Monte Cavallo.

Le tre sorgenti mostrano un comportamento idrologico e idrochimico distinto.

La Sorgente Molinetto sembra essere alimentata da una sezione meno carsificata dell'acquifero rispetto alle altre due sorgenti, comportandosi a metà strada tra un sistema di circolazione interconnesso e un sistema di circolazione dispersiva, senza condotti principali. Questa teoria è supportata dalla variabilità piuttosto bassa in acqua di isotopi stabili e dal contenuto in lantanidi tipico delle acque a contatto prolungato con rocce carbonatiche. In particolare, il contenuto in lantanidi indica un'impronta più pronunciata nelle acque del Molinetto e un'altra più debole in quelle del Gorgazzo, con quest'ultima a suggerire una minore interazione acqua-roccia durante il percorso. Inoltre, il Molinetto mostra variazioni più oscillanti dei tassi di flusso dopo gli eventi principali di ricarica in confronto alle altre due sorgenti: questo denota che la sorgente venga ricaricata da percorsi di flusso dispersivi, piuttosto che da percorsi preferenziali. Il lieve aumento di conducibilità elettrica e temperatura dopo gli eventi di ricarica principale indica un flusso a pistone leggero, in cui le acque residenti sono spinte fuori dalla falda acquifera per trasferimento di pressione idraulica.

Considerando le prove di tracciamento effettuate da Vincenzi et al.(2011), che hanno mostrato un collegamento con la grotta "Abisso col della Rizza", la sorgente Molinetto probabilmente drena una sezione relativamente poco carsificata del massiccio che si estende dalla sorgente stessa verso l'altopiano del Cansiglio (Fig. 33) le aree di drenaggio ipotizzate sono collegate alle sorgenti lungo direzioni che sono coerenti con le indicazioni di flusso principale individuate dall'analisi di lineamento del massiccio carsico (vale a dire le direzioni ENE-WSW e NW-SE) (Squazoni, 2015).

La sorgente Santissima è un altro esempio di sistema di circolazione interconnessa, con chiara evidenza di flusso lungo condotti ben sviluppati. Questa sorgente ha variazioni meno pronunciate di portata rispetto al Molinetto e Gorgazzo, e ha il più alto tasso di flusso medio, che rappresenta il principale deflusso dell'acquifero carsico. Una delle differenze più evidenti con le altre due sorgenti è la temperatura dell'acqua, essendo la Santissima da 1 a 2 °C più fredda. Ciò suggerisce che la ricarica delle acque provenga, almeno in parte, da altitudini più elevate e quindi più fredde. L'altitudine maggiore delle acque di ricarica è confermata dai valori di isotopi stabili, che sono più bassi nella Santissima rispetto alle altre due sorgenti. Considerando un gradiente isotopico medio di 0.21‰ ogni 100 m, una parte significativa delle acque della Santissima deve provenire da aree situate almeno 350 metri più in alto rispetto alle aree di drenaggio delle altre due sorgenti. Questo porta a credere che il bacino di drenaggio di della sorgente Santissima

comprenda parte della catena montuosa di Piancavallo e/o la zona Monte Pizzoc (Fig. 33). D'altra parte, visti i risultati delle analisi dei traccianti, la Santissima drena sicuramente anche l'Altopiano del Cansiglio (dove si trova la grotta "Abisso col della Rizza") (Fig. 33). La Santissima sembra così drenare un bacino di ricarica grande che copre un'ampia fascia di altitudini. Questo spiegherebbe la portata alta e costante della sorgente.

Il Gorgazzo è un tipico sistema di circolazione interconnesso, reagendo in modo pronunciato agli eventi principali di infiltrazione (con picchi di quasi 18 m³/s, per poi arrivare a condizioni completamente asciutte alla fine dei periodi di siccità). Ciò dimostra che le sue risposte più significative alla ricarica sono durante il periodo del disgelo e meno importanti durante il periodo di piogge intense. Le acque provenienti dal disgelo contribuiscono direttamente alla ricarica del Gorgazzo, come indicato dal picco negativo in isotopi stabili di acqua rilevata durante il periodo del disgelo. Conducibilità elettrica e temperatura diminuiscono significativamente dopo gli eventi di ricarica principale sia durante il disgelo che durante i periodi di piogge intense. Questo sta ad indicare il contributo del flusso diretto dalla superficie alla sorgente. La più alta concentrazione in ioni magnesio rilevata al Gorgazzo rispetto alle altre due sorgenti indica che parte del suo bacino di drenaggio include rocce dolomitiche, presenti principalmente in profondità (parte inferiore della successione carbonatica) e nella parte nord-orientale della zona di studio (vicino a Piancavallo). Stando a quest'ultima evidenza, l'area di ricarica della sorgente quasi sicuramente comprende parte della zona di Piancavallo (Fig. 33). Inoltre, l'esplorazione della sorgente Gorgazzo fino a 165 m di profondità ha dimostrato la presenza di una profonda e estesa rete di condotti saturi che alimentano la sorgente, i quali potrebbero intercettare le rocce dolomitiche di successione profonda.

In condizioni di basso flusso, le tre sorgenti drenano le loro aree di ricarica in modo indipendente, come mostrato dalle loro differenze chimiche. Le aree drenanti del Molinetto e della Santissima possono essere parzialmente sovrapposte data la prova di tracciamento di Vincenzi et al. (2011), effettuata in condizioni di basso flusso, che permise di dimostrare una connessione della grotta "Abisso col della Rizza" con entrambe le sorgenti. Durante i periodi di alto flusso, i differenti settori nell'acquifero sono più interconnessi, come dimostrato dalla omogeneizzazione della composizione degli ioni principali nelle tre sorgenti. Infine, l'acqua neo-infiltrata è responsabile della composizione principale delle acque sorgive, come suggerito dall'appiattimento della curva dei lantanidi dopo gli eventi di ricarica principale.

La prova di tracciamento realizzata per questo studio non ha consegnato risultati definitivi. Una connessione diretta tra la grotta "Bus della Genziana" e la sorgente Santissima è stata confermata, con tempi di arrivo veloci e un inaspettato alto tasso di recupero del tracciante (75%). La maggior velocità di flusso delle acque sotterranee e una maggior velocità di recupero rispetto a quelle valutate da Vincenzi et al. (2011) suggerisce che il sistema acquifero sia più interconnesso durante il periodo di ricarica (come nella prova di tracciamento corrente) rispetto al periodo secco (come nella prova eseguita da Vincenzi et al., 2011).

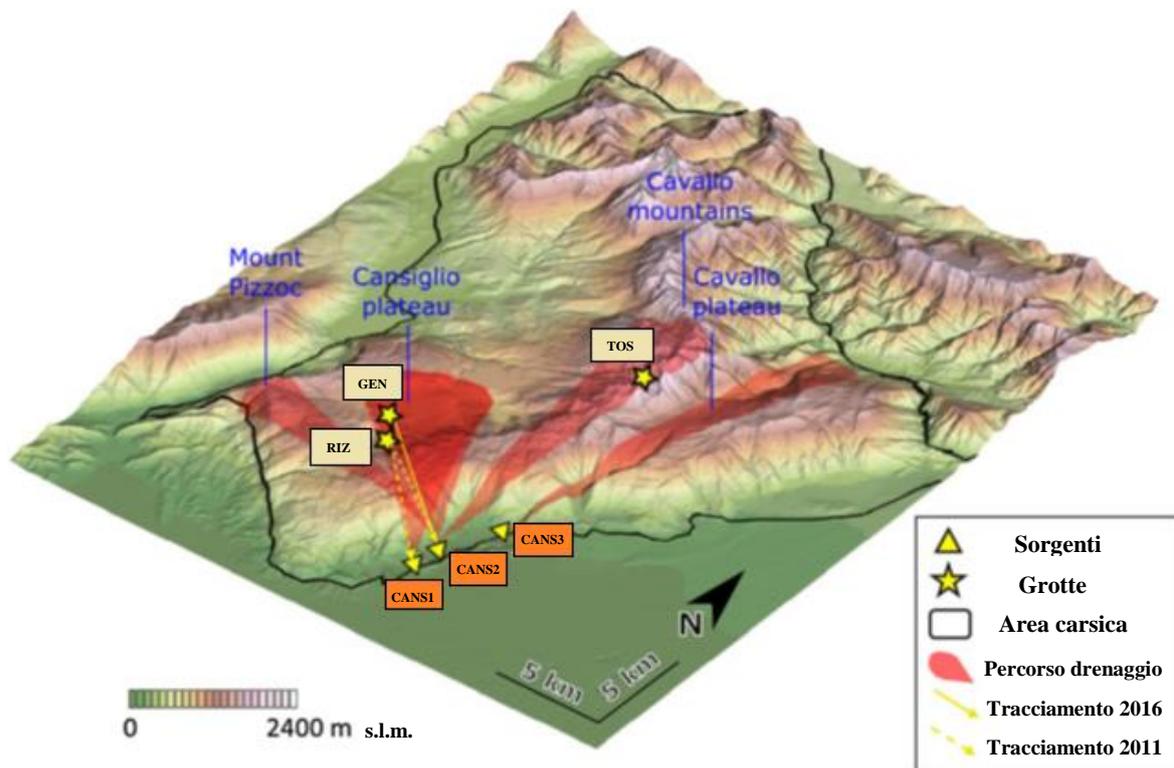


Figura 33. Mappa 3D dell'area carsica del Cansiglio-Monte Cavallo. I principali percorsi di drenaggio definiti in questo studio sono evidenziati in rosso. Le frecce gialle mostrano le connessioni grotta-sorgente accertate dal test del tracciante di Vincenzi et al. (2011 – linee tratteggiate) e dal test corrente materia di questo studio (2016 - linea continua) (Filippini et al., 2018).

CAPITOLO 5: CONCLUSIONI

Nonostante la grande varietà di dati raccolti, solo una parte di questo grande acquifero carsico è stata delineata, lasciando ancora molte incognite in sospeso. Questo sistema mostra un'intricata geometria dovuta alla complessità strutturale dell'area e alla sua particolare evoluzione. Il sistema è drenato da tre sorgenti principali che, anche se situate vicine tra loro, seguono diversi modelli sotterranei carsici. Sebbene la chimica generale suggerisca che le tre sorgenti attraversino più o meno lo stesso tipo di rocce, esse rispondono in modo diverso a eventi di ricarica come precipitazioni intense e nevicate. Sempre considerando le analisi idrochimiche, è singolare il fatto che la differenza in composizione chimica sia meno pronunciata durante condizioni di portate elevate rispetto alla quelle di portate basse. Questo suggerisce che, durante condizioni di basso flusso, i condotti e sistemi di frattura siano più interconnessi, e così il sistema più dinamico.

Le tre sorgenti sono alimentate da più sistemi semi-dipendenti caratterizzati dalla presenza di una zona satura molto estesa (grande sviluppo di reticoli di condotti «a pieno carico»). Le analisi chimiche puntuali evidenziano una notevole differenza del chimismo delle tre sorgenti nei periodi di magra quando dovrebbe esserci una notevole costanza legata all'apporto dell'acqua di base. Al contrario durante le piene si osserva una certa similitudine legata all'arrivo delle acque più profonde e più mineralizzate rispetto a quelle delle magre (Fig. 22 e 23). Le notevoli differenze di temperatura della sorgente Santissima (molto più bassa rispetto alle altre due sorgenti) indicano una provenienza di almeno parte delle sue acque da quote più alte. Anche il dato isotopico (più basso) conferma come questa sorgente venga alimentata da un settore più in quota rispetto agli altri due circuiti (quindi settore del Monte Cavallo e massici più a Nord).

La sorgente del Gorgazzo presenta un funzionamento tipico di una sorgente di «troppo-pieno» con portate nulle durante le piene e valori massimi di portate in seguito ad importanti eventi infiltrativi. In magra le acque di tale sistema confluiscono verso le altre due sorgenti. La chimica di questa sorgente evidenzia in magra più alti valori di Calcio, Magnesio e Bicarbonati rispetto alle altre emergenze a sottolineare un'alimentazione proveniente da settori più calcareo-dolomitici o da una circolazione in reticoli molto profondi.

Il rapido incremento delle portate in seguito ai principali eventi infiltrativi è legato alla trasmissioni delle pressioni idrauliche nell'estesa rete dei condotti «a pieno carico».

Per quanto riguarda la prova di tracciamento realizzata per questa tesi, la generale mancanza di risultati interessanti suggerisce che l'uso di traccianti possa risultare inefficace nel contesto di grandi sistemi carsici drenati da grandi sorgenti e interessati da impatti antropici. Questo è avvenuto nonostante la prova sia stata eseguita in condizioni ideali, ovvero all'inizio di una stagione di ricarica, con un flusso attivo presso il punto di iniezione e con grandi quantità di tracciante iniettato.

Da questa prova di tracciamento si sono rilevate bassissime concentrazioni dei traccianti legate ad una notevole diluizione per la presenza di una zona satura molto estesa, dove i reticoli carsici «a pieno carico» sono tra loro parzialmente interconnessi. I problemi legati all'arrivo di sostanze fluorescenti presenti nell'acquifero sono molto probabilmente legati ad immissioni di scarichi civili.

Tenendo conto di tutti i dati, l'area carsica del Cansiglio-Monte Cavallo può essere definita come un sistema acquifero carsico insolito con una rete di drenaggio interconnessa.

L'area di alimentazione delle tre sorgenti comprende sicuramente i settori di Pian Cansiglio e Pian Cavallo ma sembra estendersi fino ai massicci posti più a Nord del Monte Cavallo.

BIBLIOGRAFIA

Ambrose A. W., 1921. Use of detectors for tracing movement of underground water. U.S. Bureau of Mines. Bull. 195. Pet. Tech., 62: 106-120.

APAT, 2003. Metodi analitici per le acque, 1: 487 p.

Bauer F., Zupan M., Behrens H., 1976. Fluorescent tracers, trad. Kranjc M. In: Gospodaric R. e Habic P. (Eds), Underground water tracing, investigations in Slovenia 1972-1975. Third Int. Symp. of Underground Water Tracing (3° SUWT).

Bosellini A., Hardie L.H., 1988. Facies e cicli della Dolomia Principale della Alpi Venete. Mem. Soc. Geol. It., 30, Roma: 245-266.

Bosellini A., Masetti D., 1972. Ambiente e dinamica deposizionale del Calcarea del Vajont (Giurassico medio Prealpi Bellunese e Friulane). Ann. Univ. Ferrara, 5: 87-100.

Bozzo G. P., Semenza E., 1973. Nuovi elementi tettonici del vallone Fadalto e loro inquadramento nella struttura del Veneto Nord - orientale. Boll. Mus. Civ. Sc. Nat. Venezia, Suppl. 24: 11-25.

Bradley M. F., 1970. Evaluation and application of dye tracers in Karst terrain for determining aquifer characteristics. Master Thesis: 94 p.

Braitenberg C., Grillo B., Nagy I., Zidarich S., Piccin A., 2007. La stazione geodetica-geofisica ipogea del bus de la Genziana – Pian Cansiglio. Atti e Memorie della Commissione Grotte “E. Boegan” 41: 105-120.

Cancian G., Ghetti S., Semenza E., 1985. Aspetti geologici dell'Altipiano del Cansiglio. Lavori della Società Veneta di Scienze Naturali, suppl. 10: 79-90.

Carulli G. B., 2006. Carta geologica del Friuli Venezia-Giulia – scala 1:150000. Regione autonoma Friuli Venezia-Giulia, Direzione centrale ambiente e lavori pubblici.

Castiglioni, G. B., 1964. Forme del Carsismo superficiale sull'altopiano del Cansiglio. Atti Ist. Veneto Sc. Lett. Arti, cl. Sc. Mat. Fis. Nat.; 122: 327-344.

Castiglioni G. B., 1980. La morfologia glaciale del gruppo del Cavallo. In: Valussi G., Facchin D. (a cura di), Piancavallo: analisi del territorio. Atti del 2° convegno di studi sul territorio della provincia di Pordenone, Ass. It. Ins. Geog., tip. GEAP, Pordenone: 33-39.

Cavallin A., 1979. Assetto strutturale del Massiccio Cansiglio - Cavallo, Prealpi Carniche Occ. Atti del 2° Convegno di Studi sul Territorio della provincia di Pordenone (Piancavallo, 19-20 ottobre 1979): 15-32.

Cavallin A., Martinis B., 1982. Gli scorrimenti del Margine Settentrionale della Piattaforma Carbonatica Adriatica. In: Castellarin A., Vai G.B. (a cura di), Guida alla geologia del Sudalpino centro-orientale, Guide geol. Reg. S.G.I., Bologna: 349-359.

Cengel Y. A., Cimbala J. M., 2007. Cinematica dei fluidi. In: Cozzo G., Santoro C. (a cura di), *Meccanica dei fluidi*: 99-134.

Civita M., 1972. Schematizzazione idrogeologica delle sorgenti normali e delle relative opere di captazione. *Mem. e Note Ist. Geol. Appl.* 12.

Costa V., Doglioni C., Grandesso P., Masetti D., Pellegrini G.B., Tracanella E., 1996. Foglio "Belluno" 1:50.000. Note illustrative del F. 063 Belluno. *C. Geol. d'Italia alla scala 1:50.000, Ser. Geol. It.*: 74 p.

Cucchi F., Forti P., Giacconi M., Giorgetti F., 1999. Note idrogeologiche sulle sorgenti del Fiume Livenza. Ricerca eseguita dall'Unità 4.7 e dall'Unità 4.9 del Gruppo Nazionale Difesa Catastrofi Idrogeologiche del CNR pubblicazione n° 1831: 51-60.

De Nardi, A., 1976. Il Cansiglio Cavallo: lineamenti geologici e morfologici. Azienda delle Foreste della Regione Friuli - Venezia Giulia e Azienda di Stato per le Foreste Demaniali, Udine: 139 p.

Dole R. B., 1906. Use of fluorescein in the study of underground water. *U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 160*: 73-86.

Dunn J.R., 1957. Stream tracing, Mid-Appalachian Bull. No. 2, M.A.R. Region, Natl. Speleological Soc: 7.

Fay S. R., Spong R. C., Alexander S. C. Alexander E. C. JR, 1995. Optical brighteners: sorption behaviour, detections septic system tracer applications. *Proceeding of Int. Ass. Of Hydrogeologists XXVI International Congress, Edmonton, Alberta, Canada.*

Ferasin F., 1958. Il "complesso di scogliera" cretacico del Veneto centro-orientale. *Mem. Ist. di Geol. e Min. dell'Università di Padova* 21: 53 p.

Filippini M., Squarzone G., De Waele J., Fiorucci A., Vigna B, Grillo B., Riva A., Rossetti S., Zini L., Casagrande G., Stumpp C., Gargini A., 2018. Differentiated spring behavior under changing hydrological conditions in an alpine karst aquifer. *Journal of Hydrology* 556: 572–584.

Flury M., Wai N. N., 2003. Dyes as tracers for vadose zone hydrology. *Rev. Geophys.*, 41(1): 2.1-2.37.

Gaspar E., Oreseanu I., 1987. Natural and artificial tracers in the study of the hydrodynamics of karst. *Theoretical and applied karstology* 3: 31-107.

Gasparo F., Guidi P., 1976. Dati catastali delle prime mille grotte del Friuli. *Supplemento di Atti e Memorie della Commissione Grotte "Eugenio Boegan" XVI*: 116 p.

Ghetti S., 1987. Evoluzione cretacica del margine occidentale della piattaforma friulana. Tesi di dottorato di ricerca, Consorzio Univ. Ferrara, Firenze, Parma, Pavia, Perugia, Siena, 205 p.

Ghetti S., Cancian G., 1989. Stratigrafia del “Bus de la Genziana” (Cansiglio, Prealpi Venete). *St. Trent. Sc. Nat.*, 65: 125-140.

Giaconi M., 1996. Studio idrogeologico delle sorgenti del fiume Livenza (PN). Tesi di Laurea in prospezioni geofisiche, Università degli Studi di Trieste: 206 p.

Gnaccolini M., Mattavelli L., 1969. Esempi di sedimentazione ciclica nella zona interna del complesso di scogliera Barcis-Cansiglio. *Ist. Geol. Paleont. Univ. Milano* 8: 343-362.

Grillo B., 2002. Carsismo e idrogeologia dell’altopiano del Cansiglio. Tesi di Laurea in geologia applicata, Università degli Studi di Trieste: 153 p.

Johannesson K.H., Stetzenbach K.J., Hodge V.F., Kreamer D.K., Zhou X., 1997a. Delineation of ground-water flow system in the Southern Great Basin using aqueous rare earth element distribution. *Groundwater* 35 (5): 807–819.

Johannesson K.H., Stetzenbach K.J., Hodge V.F., 1997b. Rare earth elements as geochemical tracers of regional groundwater mixing. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61 (17): 3605–3618.

Jones W. K., 1984. Dye tracer tests in karst areas, *NSS Bull.* vol. 46, n. 2: 3-9.

Langelier W.F., Ludwig H.F., 1942. Graphical methods for indicating the mineral character of natural waters. *American Water Works Association Journal* 34: 335-352.

Lee S., Lee D., Kim Y., Chae B., Kim W., Woo N., 2003. Rare earth elements as indicators of groundwater environment changes in a fractured rock system: evidence from fracture-filling calcite. *Appl. Geochem.* 18: 135–143.

Liu J., Yang H., Gosling S.N., Kumm M., Flörke M., Pfister S., Hanasaki N., Wada Y., Zhang X., Zheng C., Alcamo J., Oki T., 2017. Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth’s Future* 5: 545–559.

Longinelli, A., Selmo, E., 2003. Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map. *J. Hydrol.* 270 (1): 75–88.

Mantovani P., Panizza M., Smenza E., Piacente S., 1976. L’Alpago (Prealpi Bellunesi): Geologia, geomorfologia, nivopluiometria. *Boll. Soc. Geol. It.* 95 (1976):1589-1656

Massari F., Grandesso P., Stefani C., Zanferrari A., 1986. The Oligo-Miocene Molasse of the Veneto-Friuli region, Southern Alps. *Giornale di geologia, ser. 3°*, 48/I-2: 235-255.

Meinzer O.E., 1923. Outline of ground-water hydrology. *US Geol. Surv. Water Supply Pap.* 494: 5.

Meneghel M., Sauro U., Baciga M.L., Fileccia A., Frigo G., Toniello V., Zampieri D., 1986. Sorgenti carsiche e erosione chimica nelle Prealpi Venete. *Studi Trentini di Scienze Naturali, Acta Geologica* 62: 145-172.

- Mull, D. S., 1993. Use of dye tracing to determine the direction of ground-water flow in karst terrane at the Kentucky state university research farm near Frankfort, Kentucky. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 93-4063: 21 p.
- Nagarajan R., Madhavaraju J., Armstrong-Altrin J.S., Nagendra R., 2011. Geochemistry of Neoproterozoic limestones of the Shahabad Formation, Bhima Basin, Karnataka, southern India. *Geosci. J.* 15 (1): 9–25.
- Philip J., 1985. Sur les relations des marges téthysiennes au Campanien et au Maastrichtien déduites de la distribution des Rudistes. *Bullétin de la Société géologique de France* 5,8: 723.
- Piccin M., 1979. Carta geomorfologica del Piancavallo (Prealpi carniche occidentali). Allegato in: Valussi G., Facchin D. (a cura di), Piancavallo: analisi del territorio. Atti del 2° convegno di studi sul territorio della provincia di Pordenone, Ass. It. Ins. Geog., tip. GEAP, Pordenone.
- Piper D. Z., 1974. Rare-Earth Elements in the SediCycle: A Summary. *Chemical Geology* 14: 285-304.
- Plummer F.B., 1945. Tracing flow of fluids and gas beneath ground. *Oil and Gas Journal*, 44: 141 p.
- Radrizzani C. P., Tunis G., Venturini S., 1986. Biostratigrafia e Paleogeografia dell'area sud-occidentale dell'anticlinale M. Mia – M. Matajur (Prealpi Giulie). *Riv. It. Paleont. Strat.*, V. 92, n. 3: 327-382.
- Sabatini D. A., Al Austin T., 1991. Characteristic of Rhodamine WT and Fluorescein as Adsorbing Ground-Water Tracers. *Ground Water*. 29, 3: 340-349.
- Sartorio D., Tunis G., Venturini S., 1987. Nuovi contributi per l'interpretazione geologica e paleogeografica delle Prealpi Giulie (Friuli orientale): il pozzo SPAN 1. *Riv. Ital. Paleont. Strat.* 93: 181-200.
- Schoeller H., 1955. *Les eaux souterraines*. Masson e C.le Ed., Paris: 642 p.
- Smart P. L., Laidlaw I. M. S., 1977. An evaluation of some fluorescent dyes for water tracing. *Water Resources Research*, Volume 13, Issue 1: 15-33.
- Squarzoni G., 2015. Studio idrogeologico per la progettazione e l'esecuzione di un tracciamento multiplo dell'acquifero carsico del Massiccio del Cansiglio-Monte Cavallo (Alta valle Livenza, Pordenone). Tesi di Laurea Magistrale in Geologia e Territorio, Università degli Studi di Bologna: 145 p.
- Stabler H., 1921. Fluorescein an aid to tracing waters underground. U.S. Bureau of Reclamation, *The Reclamation Record*, vol. 12, No. 3: 122-123.
- Uggeri S., Vigna B., 1990. Un tracciante alternativo nello studio degli acquiferi carsici: il Tinopal. *Le Grotte d'Italia*, Atti XVI Congresso Nazionale di Speleologia: 289-302.

Vianelli M., 2000. Le sorgenti del Livenza. In: Vianelli M. (a cura di), I fiumi della notte. Alla scoperta delle acque carsiche italiane. Ed. Bollati Boringhieri: 151-154.

Vidali A., 1993. Evoluzione dell'ambiente carsogenetico alla testata del Livenza: rapporti con la pedemontana. Boll. Soc. Nat. "S.Zenari" 17: 33-58.

Vigna B., 2010. Gli acquiferi carsici. Dispense didattiche della Società Speleologica Italiana, Erga edizioni, Genova: 1-48.

Vincenzi V., Riva A., Rossetti S., 2011. Towards a better knowledge of Cansiglio karst system (Italy): results of the first successful groundwater tracer test. Acta Carsol. 40 (1): 147-159.

Zanferrari A., 1973. Sulla terminazione occidentale del sovrascorrimento periadriatico (piega-faglia periadriatica auct.) nelle Prealpi Carniche. Boll. Soc. Geol. It., 93: 33-46.

Zanferrari A., Bollettinari, G., Carobene, L., Carton, A., Carulli, G., Castaldini, D., Cavallin A., Panizza M., Pellegrini G., Pianetti F., Sauro U., 1982. Evoluzione neotettonica dell'Italia nord-orientale. Memorie di scienze geologiche 35: 355-376.

Zenari S., 1929. Carta geologica delle Tre Venezie, Foglio 24 "Maniago" – Note Illustrative. Ministero LL. PP., Sezione geologica dell'Uff. Idrograf. R. Magistrato delle Acque, Padova.

SITOGRAFIA

Agenzia regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto.
www.arpa.veneto.it

Prometeo Ricerche per l'Uomo, 2008. www.prometeoricerche.eu

RINGRAZIAMENTI

Vorrei ringraziare tutti coloro che mi sono stati vicini durante questo lunghissimo percorso universitario e mi hanno aiutato a raggiungere questo importante obiettivo.

In primis, un doveroso grazie di cuore per Maria Filippini che mi ha seguito in questo progetto biennale (ma che doveva durare meno) per la realizzazione di questa tesi. Dalle spedizioni in Friuli, passando per le mie sporadiche visite fino alle ultime settimane frenetiche di scrittura, è sempre stata presente e disponibile nei miei confronti per dubbi e chiarimenti. Un grazie anche al Prof. Gargini che nel 2016 mi consigliò questa tesi “lontana” ma molto affascinante dal punto di vista metodologico. Ringrazio anche tutte le persone che hanno partecipato a questo progetto e con cui mi sono dovuto interfacciare, a Bologna e in Consiglio.

Il ringraziamento più grande è per i miei genitori che, nonostante il cammino lungo e tortuoso, non hanno mai smesso di farmi sentire il loro appoggio e sostegno senza mai smettere di incitarmi. Ringrazio anche i miei nonni, sempre presenti e curiosi riguardo la mia avventura universitaria, senza farmi mai mancare il loro supporto.

Un grande ringraziamento finale anche per tutti gli amici che mi hanno accompagnato in questo viaggio. I compagni con cui ho studiato in aula e con cui ho esplorato le montagne in escursione, i super coinquilini con cui ho abitato a Bologna e tutti gli amici, scout e non, che non mi hanno mai fatto mancare il loro incitamento per il raggiungimento di questo traguardo leggendario che neanche un anno fa sembrava lontanissimo, se non impossibile. Dopo tante difficoltà, malumori e voglie di abbandonare, con una lenta ripartenza alla fine sono giunto a destinazione anche io: ora sono curioso di sapere cosa mi attende il futuro fuori da Unibo dopo più di 8 anni di onorata (per così dire) militanza.

Grazie a tutti,

Luca Tedesco