



Agenzia Regionale per la Prevenzione
e Protezione Ambientale del Veneto



REGIONE DEL VENETO



CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA

SORGENTE LARON

Relazione

ARPAV

Dipartimento Regionale Qualità dell'Ambiente

Rodolfo Bassan

Progetto e realizzazione

Unità Organizzativa Qualità Acque Interne

Unità Organizzativa Monitoraggio Acque Interne

Dirigente

Fabio Strazzabosco

Ugo Pretto

Autori

Lucio D'Alberto

Alessandro Pozzobon

Ringraziamenti

Si ringrazia per il supporto operativo alla sorgente il personale di Piave Servizi: Della Libera Sandro, Marciano Raffaele, Piaia Fulvio.

Foto in copertina: *Sorgente Laron, Fregona (TV), foto di Lucio D'Alberto*

Luglio 2022

CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA SORGENTE LARON

Sommario

CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA SORGENTE LARON	3
1 PREMESSA	5
2.0 ACQUISIZIONE DATI	6
3.0 STATISTICHE DATI REGISTRATI	7
4.0 DEFLUSSO E SOGLIA ZERO SFIORO	9
4.1 EQUAZIONE DELLE PORTATE	11
4.2 IDROGRAMMA	13
5.0 MASTER RECESSION CURVE	16
6.0 VULNERABILITA'	19
6.1 METODO TEMPO DI DIMEZZAMENTO	20
6.2 METODO VESPA INDEX	22
7.0 TIPO DEFLUSSO	25
8.0 PORTATE E CHIMISMO	32
9.0 BACINO DI ALIMENTAZIONE	34
10.0 MODELLO CONCETTUALE	36
BIBLIOGRAFIA	39
STRUMENTAZIONE E METODO	40
ANALISI IDROGRAMMA E TEMPI DI RISPOSTA	41

1 PREMESSA

La presente relazione è la sintesi di un approfondito monitoraggio svolto presso la sorgente Laron in comune di Fregona (TV) tra il 2018 ed il 2021.

L'interesse per questo sito nasce dal fatto che questa piccola sorgente è, per importanza, simile a molte altre sorgenti nel contesto collinare - montano, fondamentali per l'alimentazione degli acquedotti a servizio di piccole borgate periferiche. L'approvvigionamento può avvenire per caduta e quindi favorisce la limitazione dei costi di gestione purché qualità e quantità dell'acqua siano eccellenti. L'individuazione dell'area di ricarica di queste sorgenti è quindi importante per la loro tutela e diventa un investimento per il futuro delle genti che ancora intendono abitare questa porzione di territorio.

La sorgente Laron è da molti anni campionata da ARPAV nell'ambito della rete di monitoraggio regionale delle acque sotterranee come previsto dalla Direttiva Acque 2000/60/CE e dal D.Lgs. 152/2006 e s.m.i.. Il monitoraggio qui descritto ha integrato il monitoraggio ordinario con acquisizione dati in continuo di livello, temperatura e conducibilità elettrica, con misure di portata e sopralluoghi. La successiva elaborazione dei dati ha permesso di approfondire la conoscenza della sorgente e del corpo idrico ad essa afferente.

Il periodo di monitoraggio considerato in questa nota va dal 28/08/2018 al 09/09/2021, e contiene due sottoperiodi di assenza dati, da inizio luglio ad inizio settembre 2019 e 4 giorni ad inizio ottobre 2020.

2.0 ACQUISIZIONE DATI

L'elenco della strumentazione usata e la descrizione dei metodi di raccolta dati sono riportati in appendice.

Si segnala che le misure in continuo sono state effettuate per livello (pressione in bar), temperatura (gradi centigradi), conducibilità elettrica (micro Siemens su centimetro riferiti a 20°C).

La portata in litri al secondo è stata misurata occasionalmente con metodo correntometrico nel caso di portate sostenute, con metodo volumetrico per portate basse.



Fig. 1 Sorgente Laron. Si nota in primo piano la soglia di sfioro con a monte la pozza naturale da cui emerge l'acqua e il tubo azzurro in cui è alloggiata la sonda.

3.0 STATISTICHE DEI DATI REGISTRATI

Una prima elaborazione statistica dei dati registrati è riportata nella tabella (tab. 1) e rappresentata nella figura sottostante (fig. 2). Questi sono i dati medi orari elaborati tenendo conto del livello di sfioro, che rappresenta la presenza o assenza di deflusso naturale. La determinazione del livello di sfioro è descritta in un paragrafo seguente. Inoltre sono riportati anche i dati di portata che sono indirettamente calcolati con l'ausilio dell'equazione delle portate descritta più avanti.

Tabella 1						
Parametro	Udm	Minima	Media	Mediana	Massima	dati
Livello (≥sfioro)	[bar]	0,0700	0,0768	0,076	0,0870	24740
(Portata)	[l/s]	(0)	(8,87)	(7,22)	(30,24)	25000
Temperatura	[°C]	10,85	11,21	11,25	11,56	24740
Conducibilità	[μS/cm a20°C]	233	303	311	332	24740

I dati graficati (fig. 2) evidenziano l'esiguo intervallo di variazione termica per il 50% dei casi con una forte presenza di dati estremi verso temperature relativamente molto più basse della media. I pochi dati di temperatura intorno agli 11,5 °C, outlier massimi, sono da considerare un'anomalia legata ad un'episodica ripresa del deflusso durante il periodo di secca.

Per quanto riguarda la conducibilità elettrica invece si nota che la mediana è spostata verso i valori più alti e vi è un gruppo di valori estremi nei valori minimi. I dati di livello, "puliti" dai dati sotto soglia di sfioro, presentano una simmetria abbastanza forte; simmetria che però non si mantiene per la portata, dato che sono conteggiati circa 260 dati di portata nulla.

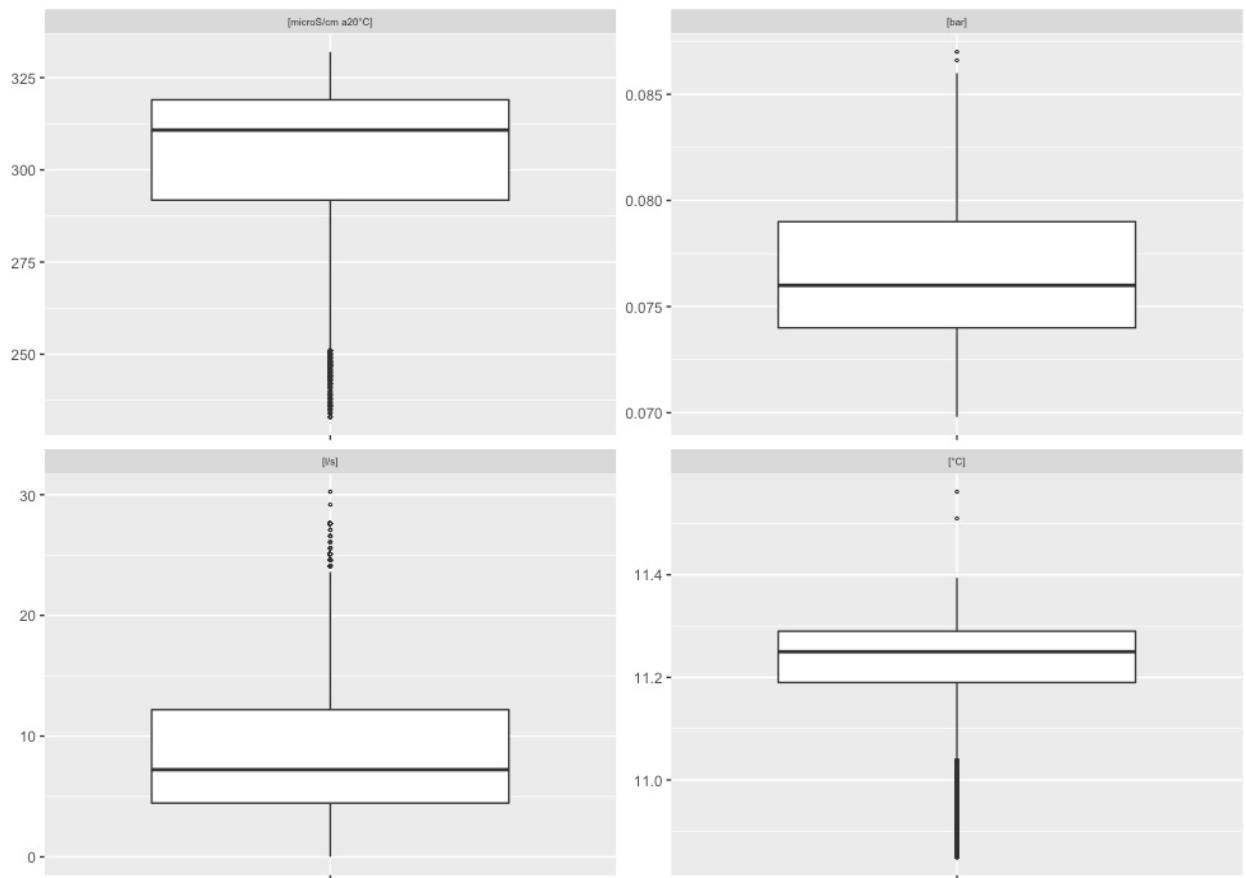


Fig.2 Boxplot delle medie orarie dei dati registrati: in alto a sinistra conducibilità elettrica [$\mu\text{S/cm}$ a 20°C], in alto a destra livello espresso come pressione [bar], in basso a sinistra portata [l/s], in basso a destra temperatura [$^\circ\text{C}$]. Con le circonferenze sono rappresentati i valori anomali (outliers).

4.0 DEFLUSSO e SOGLIA ZERO SFIORO

Nel periodo di registrazione si è osservato anche un periodo di asciutta che obbliga quindi ad identificare il livello-pressione corrispondente al passaggio da minimo deflusso a deflusso nullo.

Non essendo stato possibile durante i sopralluoghi osservare il deflusso nullo e quindi validare un valore determinato di pressione con portata nulla, si è proceduto ad individuare la pressione soglia mediante un calcolo con il fattore di conversione bar / metri.

In occasione delle misure di portata si è misurato anche il battente d'acqua a monte della soglia di sfioro presso un punto di riferimento ben definito dell'opera. La correlazione tra livello alla soglia e livello registrato è stata calcolata in questo modo:

- si è verificata la corrispondenza tra pressione registrata e altezza del battente d'acqua misurata presso il punto di riferimento; le 15 coppie di dati evidenziano una correlazione lineare la cui linea di tendenza ha un $R^2 = 0,98$ e l'assenza di deriva strumentale. Questa retta porterebbe ad una pressione di zero deflusso pari a 0,06977 bar, fig. 3.

- prendendo a riferimento il minimo battente misurato (0,3 cm con portata 0,28 l/s e con 0,07 bar) si è calcolato di quanto doveva essere più basso il valore di pressione registrato per avere un battente 0 cm.

- il coefficiente usato per passare da cm a bar è $1019,71621 \text{ cm} = 1 \text{ bar}$ e il calcolo su 0,3 cm è di 0,0002942 bar.

- quindi la pressione di riferimento per la quota 0 battente è $0,07 - 0,000294 = 0,069706$ bar (2 cifre decimali sotto la risoluzione della sonda, risoluzione 0,0001 bar o 0,1cm per comparare con metro centimetrato).

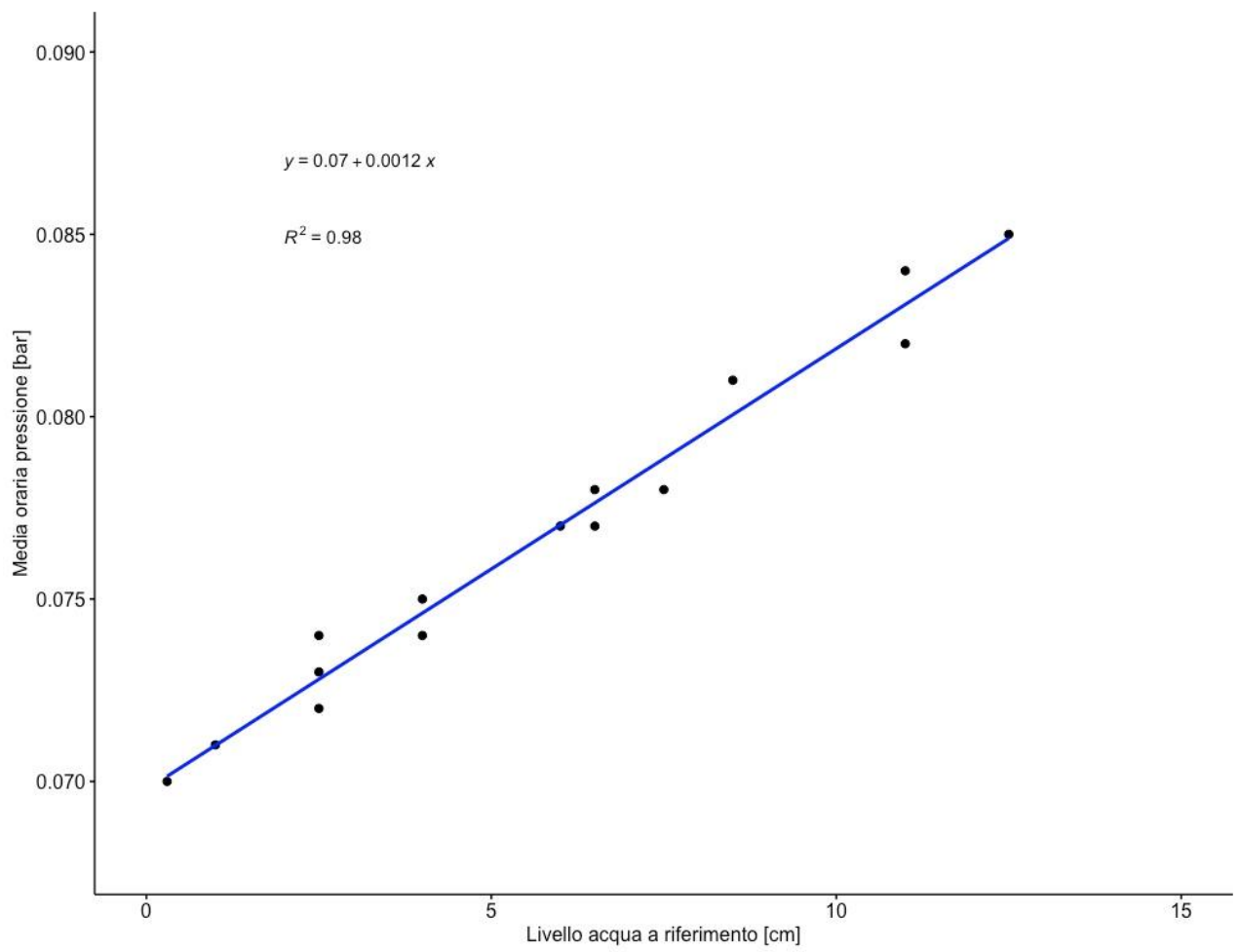


FIG 3: Confronto tra lama d'acqua al punto di riferimento e corrispondente media oraria della pressione dai dati registrati dalla sonda.

4.1 EQUAZIONE delle PORTATE

La determinazione della curva delle portate è una fase importante per passare dalle misure di livello in continuo a valori di portata che definiscono il regime idrologico e il totale dei deflussi.

Nel periodo agosto 2018 – inizio settembre 2021 si sono effettuate 16 misure di portata a cui corrispondono altrettante misure di livello in continuo.

Le misure di portata effettuate (fig. 4), sono distribuite in 4 gruppi di intervallo ben separati tra loro: 0,28-0,8 l/s (2 misure); 1,97-5 l/s (6 misure); 8-11 l/s (4 misure); 18-24 l/s (4 misure).

La loro distribuzione può tracciare un'equazione polinomiale con un buon grado di correlazione ($R^2 = 0,94$) se posta in relazione con la media oraria della pressione di livello registrata contemporaneamente. Inoltre non è possibile considerare un'equazione logaritmica perché si è riscontrato deflusso nullo: i valori uguali a zero non possono essere contemplati nei calcoli logaritmici.

Avendo calcolato il valore di pressione con deflusso nullo (0,069706 bar) si è tolto questo valore di base alla media oraria registrata e si sono graficate le 16 coppie di dati, livello e portata, corrispondenti. Si è individuata così la curva polinomiale di secondo grado passante per l'origine che rappresenta l'equazione delle portate:

$$y = 54659,768239x^2 + 803,729205x$$

Per calcolare il corretto dato di portata tramite l'equazione è quindi necessario togliere il valore 0,069706 al dato di pressione prima di elevarlo a potenza o moltiplicarlo per il coefficiente di trasformazione.

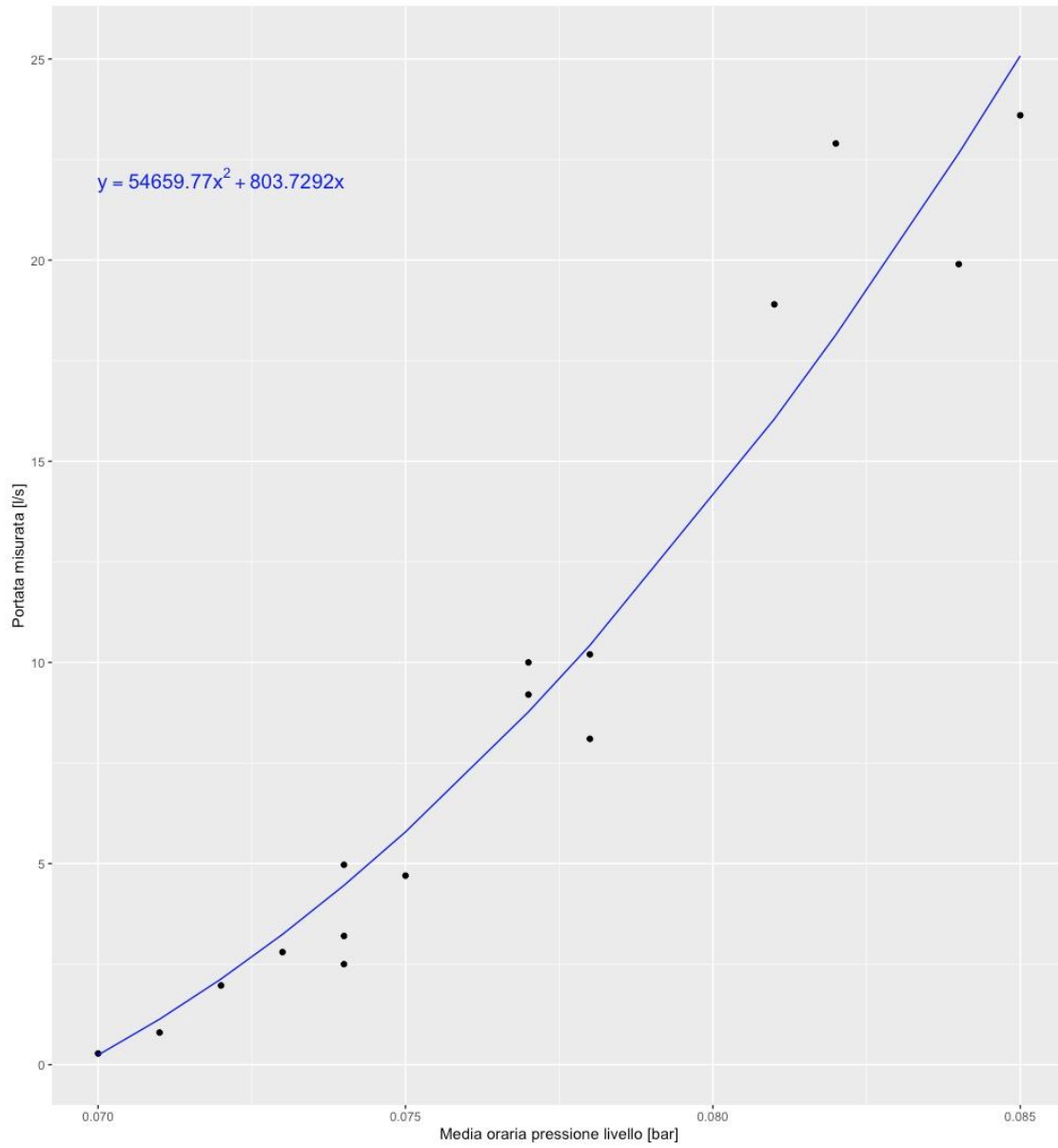


Fig. 4 Equazione delle portate. Grafico correlazione media pressione oraria e portata misurata (16 coppie di dati). La linea blu indica l'equazione delle portate ricavata dagli stessi dati forzandone il passaggio per il punto 0,069706 bar e 0 l/s

4.2 IDROGRAMMA

Sulla base della relazione calcolata nel capitolo precedente, si è proceduto a trasformare il dato di livello in portata, costruendo così l'idrogramma sia orario che giornaliero. In fig. 5 si riporta l'idrogramma delle medie giornaliere (portata nel tempo) della sorgente. Nella stessa figura si è graficato anche il pluviogramma della stazione meteorologica Cansiglio Tramedere (Dati ARPAV – Centro Meteo Teolo).

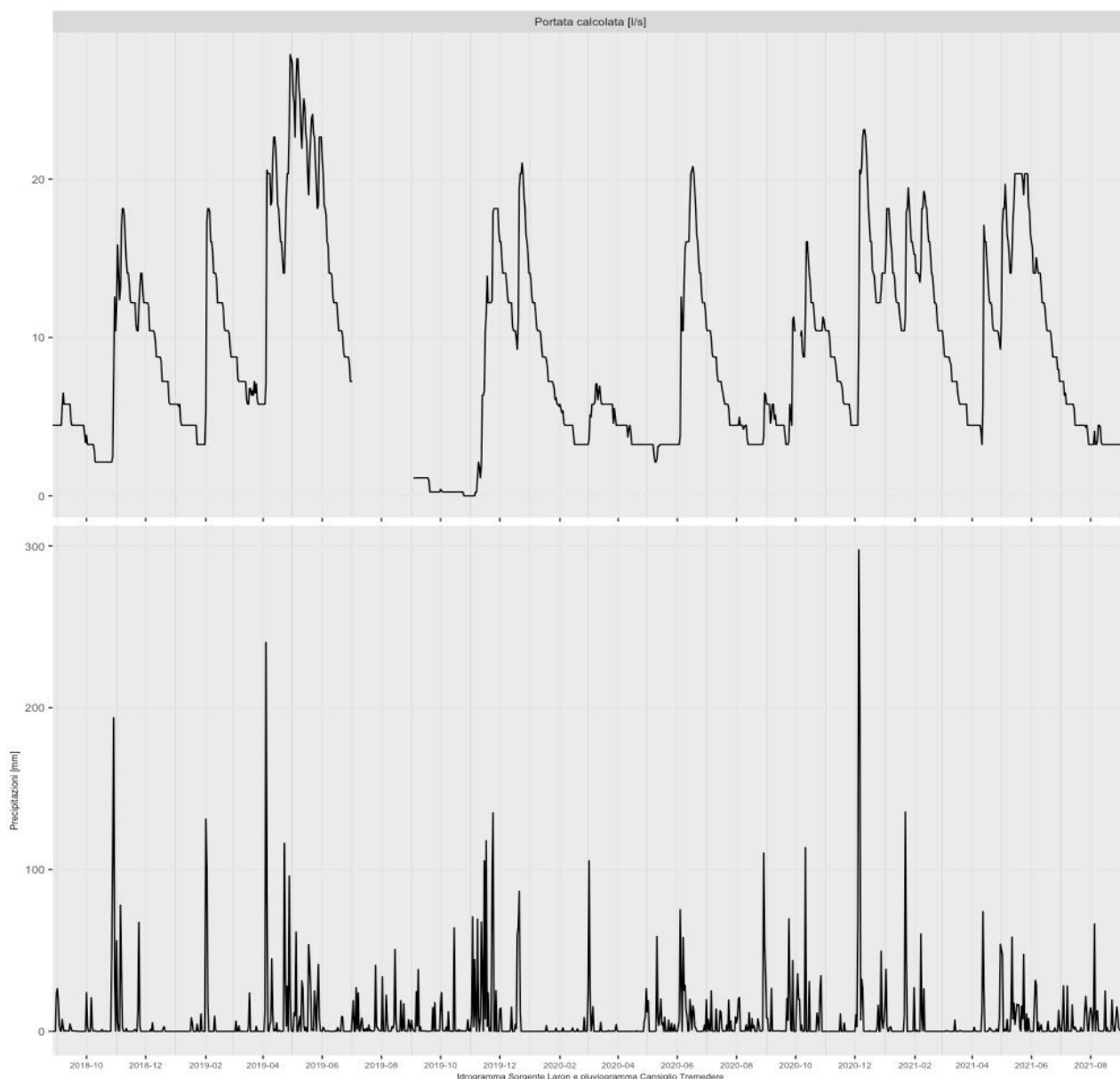


Fig. 5 Idrogramma giornaliero e precipitazioni. Le porzioni dove mancano i dati sono dovute al non funzionamento, causa batterie scariche, della sonda (da inizio luglio a inizio settembre 2019 e 4 giorni a inizio ottobre 2020).

I valori derivati dalle elaborazioni, applicati sia alla media oraria che giornaliera, sono riportati in tabella 2.

Tabella 2										
	Livello	Dati no sfioro	Livello		Portata					
	sfioro		minimo		minima		mediana		massima	
	calcolato		sonda	manuale	misurata	calcolata	misurata	calcolata	misurata	calcolata
	[bar]	[numero]	[bar]	[cm]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]
DATI misurati			0,07	0,3	0,28		6,5		23,6	
Da equazione dati giornalieri	0,069706	12				0		6,54		27,87
Da equazione dati orari	0,069706	260				0		6,96		30,24

Suddividendo i dati per anni idrologici si ottengono i seguenti valori giornalieri (tab. 3). Si tenga conto che nell'anno 2019-2020 ci sono stati 12 giorni di secca e negli anni 2020/2021 i dati di portata e di precipitazione sono incompleti.

Tabella 3						
Anno idrologico	Precipitazioni	Dati portata	Minima	Media	Mediana	Massima
	mm	n	l/s	l/s	l/s	l/s
2018-2019	2631	303	0,24	10,37	8,77	27,87
2019-2020	2628	366	0	6,57	4,46	21,03
2020-2021	2490	344	2,23	10,41	10,43	23,13

La frequenza delle portate può essere evidenziata con i quantili (fig.6). Nei grafici seguenti sono riportate le distribuzioni delle portate dei circa tre anni idrologici monitorati e con i punti blu e rosso sono indicati il valore di 3 e 8 l/s, portate scelte come riferimento (3 l/s brusco calo di livello in svuotamento; effetto pistone per portate >8 l/s, vedi oltre). Osservando i risultati per i 3 l/s sono: anno 2018-2019 (*pro parte*: mancante luglio e agosto 2019) quantile di 0,16 (16 percentile) dei dati di portata, mentre nell'anno successivo esso

è allo 0,13 (13 percentile) e infine per il quasi completo 2020-2021 (*pro parte*: mancanti 25 giorni a settembre 2021) è al 1 percentile.

Dai dati si nota che i quantili non sembrano essere legati direttamente alle precipitazioni totali (mancando valutazioni sull'evapotraspirazione reale) e neanche al numero di dati disponibili (giorni).

Dai grafici si osserva che il 2019-2020 ha un brusco incremento per portate 3-6 l/s mentre i grafici degli altri due anni hanno un andamento più rettilineo.

E' possibile ipotizzare che l'andamento dei quantili sia legato alla distribuzione dei singoli eventi di pioggia, alla loro intensità e ad eventuali lunghi periodi di svuotamento.

Tabella 4					
Anno idrologico	Precipitazioni	Dati portata	Quantile 3 l/s	Quantile 8 l/s	Portata mediana
	mm	n	n	N	l/s
2018-2019	2631	303	0,16	0,45	8,77
2019-2020	2628	366	0,13	0,71	4,46
2020-2021	2490	340	0,01	0,38	10,43

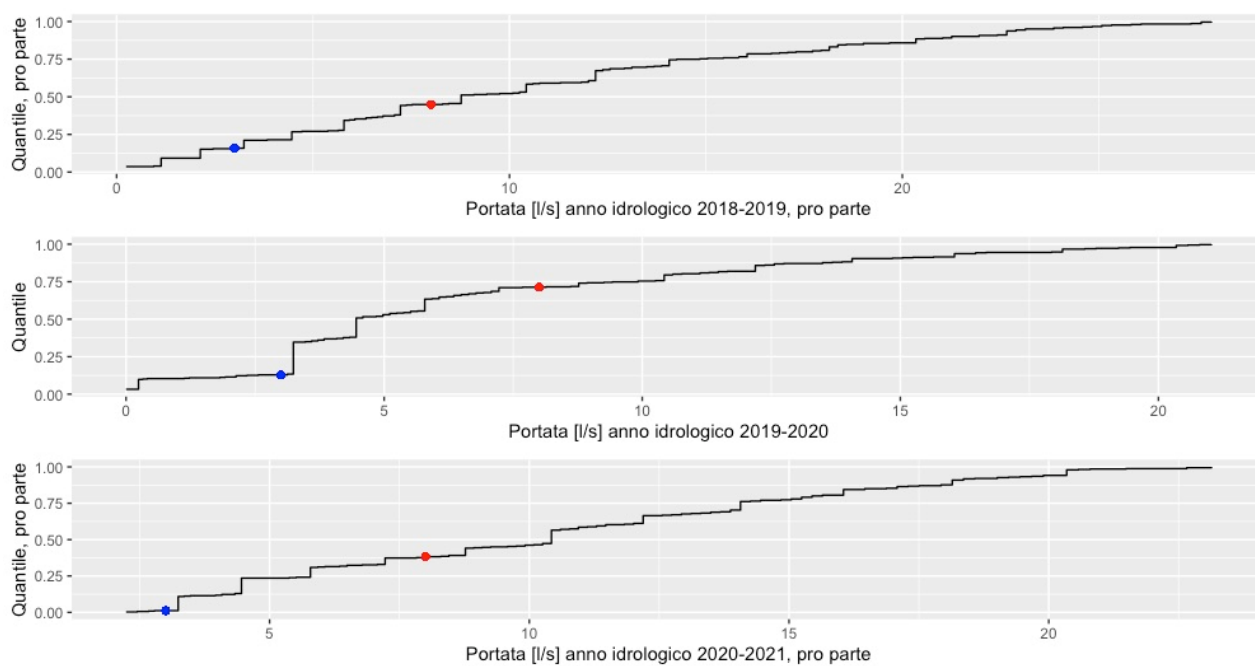


Fig. 5 Grafici quantili portate per anno idrologico. Le portate di due dei tre anni idrologici sono mancanti di alcuni dati (circa 20-60, *pro parte*). I punti blu e rosso indicano il valori usati come riferimento 3 e 8 l/s.

5.0 MASTER RECESSION CURVE

L'idrogramma di livello e portata permette di costruire la "Master Recession Curve" (MRC). La MRC è la sintesi statistica della curva di svuotamento che caratterizza la sorgente. In questo caso si è usata la macro per Excel prodotta da Posavec (RecessionCurveAnalysis_MRCTool_v3_1). Questa macro funziona solo per segmenti con almeno 4 dati consecutivi e non vi possono essere valori pari a 0 nei dati.

Fra le varie opzioni proposte dalla macro si è preferito usare "Master Recession Curve (MRC) Separation technique" che prevede inizialmente di graficare le frequenze di portata (Flow duration curve) e successivamente di suddividere la curva ottenuta in 2 o 3 segmenti di MRC. La scelta dei punti percentuale di flusso ("Q%") dove operare la segmentazione è affidata all'operatore.

Inseriti i valori di segmentazione il sistema determina le MRC parziali e le relative equazioni che vengono poi disegnate in un grafico oltre alla MRC generale.

Nel caso specifico per il periodo si è scelta una suddivisione in 2 segmenti corrispondente alla portata che rappresenta il 4% della frequenza dei dati.

I valori di portata nulla, per non rendere impossibile il calcolo, sono stati trasformati in 0,01 l/s.

Nelle immagini che seguono vi sono la curva di flusso e la MRC ricavata (fig. 7 e 8).

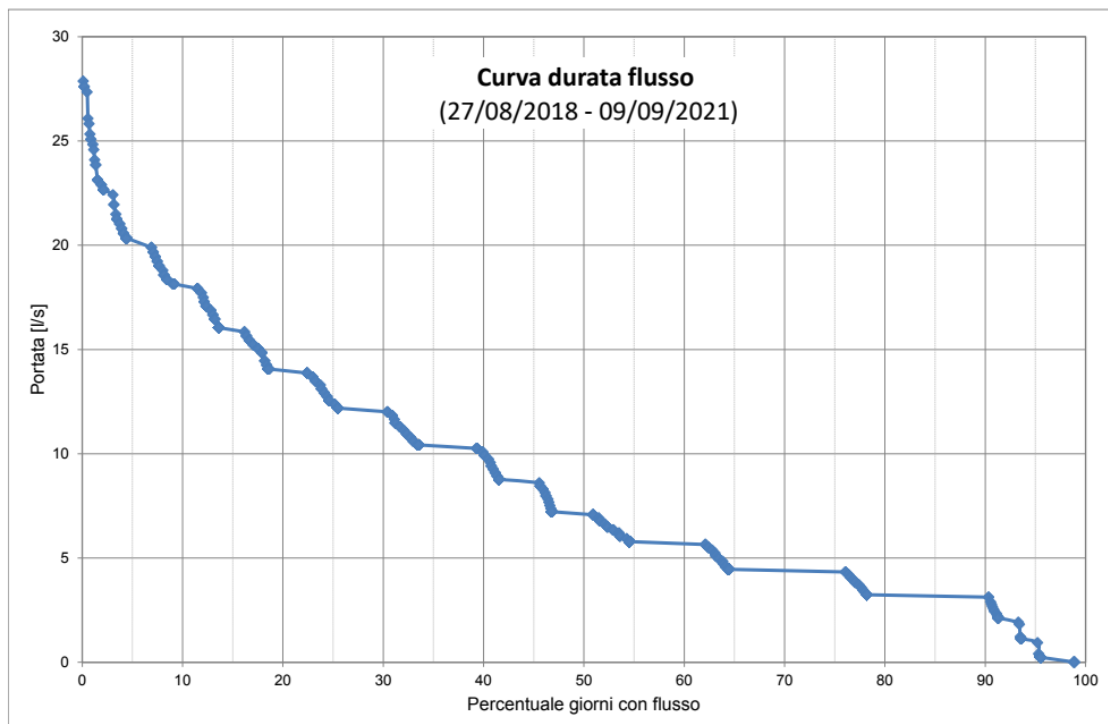


Fig. 7 Curva di flusso (Flow duration curve) da medie giornaliere di tutti i dati di livello acquisiti

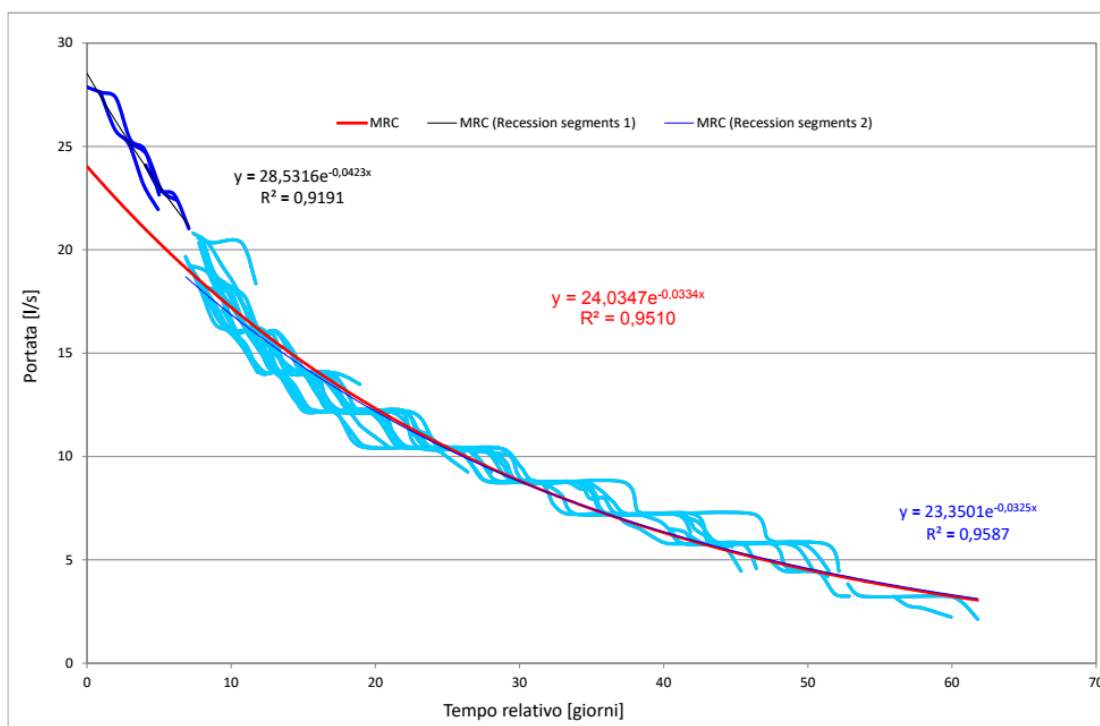


Fig. 8 Master Recession Curve per il periodo 27/08/2018 – 09/09/2021 (separazione a 4% delle frequenze della curva di flusso)

I dati ricavati da queste elaborazioni sono sintetizzati in tabella.

Tabella 5					
Periodo	MRC	MRC 1	alfa 1	MRC2	alfa2
27/08/2018 - 09/09/2021	$Y=24,0347e^{-0,0334x}$	$Y=28,5316e^{-0,0423x}$	-0,0423	$Y=23,3501e^{-0,0325x}$	-0,0325

L'esponente di queste equazioni rappresenta il coefficiente α presente nell'equazione di Maillet che permette di ipotizzare i tempi necessari per scendere sotto una certa portata di interesse. Nel caso specifico l'equazione di Maillet non è applicabile per le portate molto basse in quanto sotto i 3 l/s si nota un brusco calo delle frequenze di flusso.

Nell'applicare la macro per la MCR si è osservato che essa non risulta applicabile a valori di portata inferiori a 2-3 l/s, probabilmente per la flessione delle frequenze su accennata e non gestibile dal software.

Seguendo le considerazioni fatte da Fiorillo et al. 2012, un calo repentino della curva di svuotamento è indicazione di un regime vulnerabile alla siccità ("drought-vulnerable") e infatti la sorgente Laron ha presentato un evento di secca.

Questo si è verificato a 3 settimane dall'ultimo evento piovoso avvenuto quando la sorgente aveva già portata molto bassa (0,24 l/s). Andando indietro nel tempo si osserva che questo svuotamento è continuato nonostante frequenti precipitazioni avvenute nei 3 mesi precedenti. Però comparando le precipitazioni con quelle dell'anno successivo (figura 9) appare probabile che esse non avessero sufficiente intensità per fermare lo svuotamento.

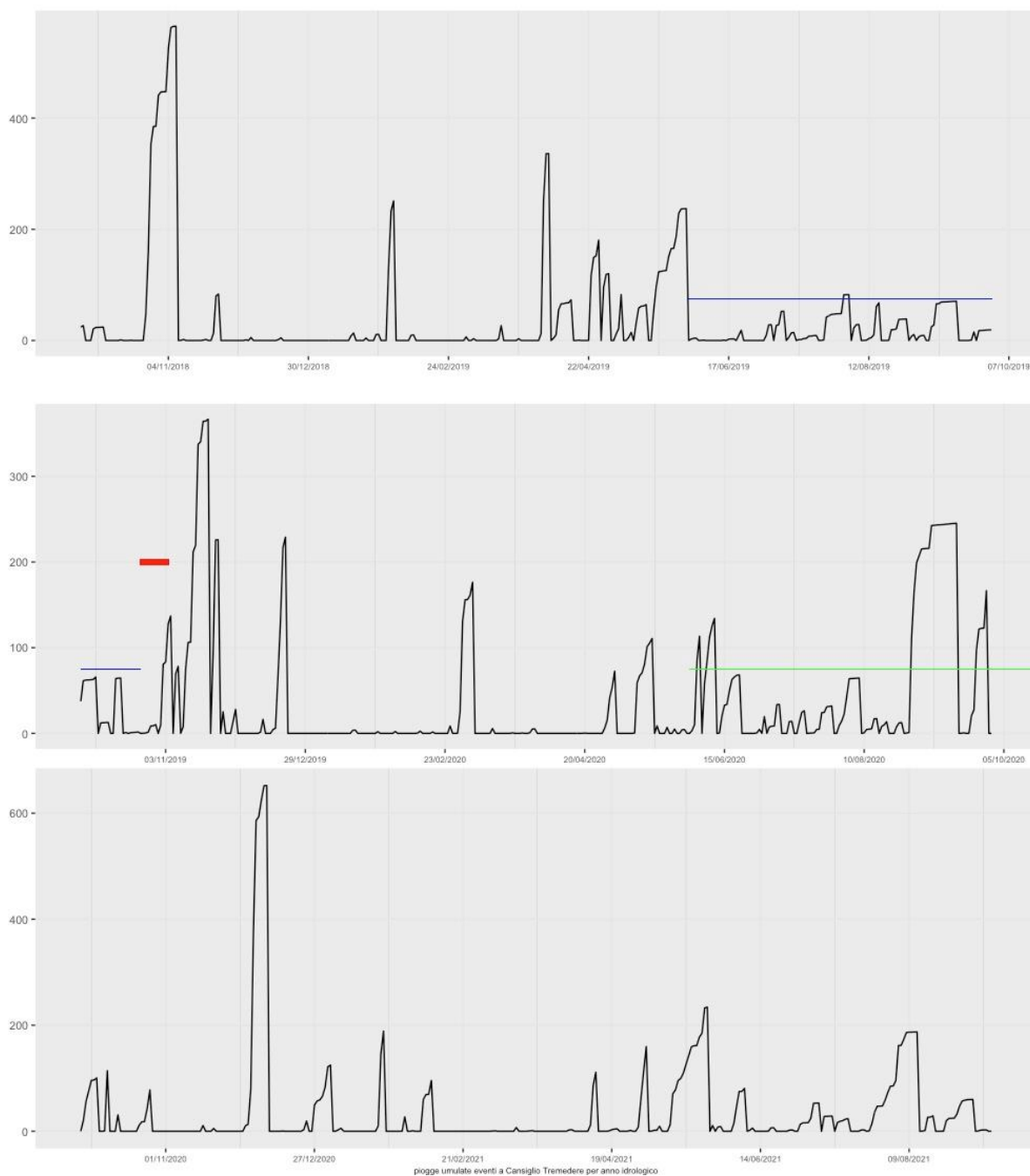


Fig. 9. Piogge cumulate dei vari eventi nei tre anni idrologici considerati. Il grafico in centro è riferito al periodo ottobre 2019 – settembre 2020. Il segmento rosso indica i giorni di secca della sorgente (25/10 – 05/11/2019), il valore 75 mm è segnalato con una riga blu orizzontale dal primo giugno al 25/10/2019, e con con riga verde dal 1/06/2020 al 30/9/2020. Come si può notare vari eventi di pioggia nell'estate del 2020 superano i 75 mm fatto che probabilmente non ha permesso l'asciutta alla sorgente.

6.0 VULNERABILITA'

Un parametro importante per conoscere la sorgente e analizzarne il suo regime idrologico è calcolare la vulnerabilità specifica dell'acquifero alimentante. Nella letteratura sono proposti vari metodi più o meno complessi che necessitano di diversi tipi di dati. Con i dati ricavati dal monitoraggio si possono applicare solo alcuni di questi metodi che sono basati su parametri idrochimici e non geologico-territoriali.

6.1 Metodo del Tempo di Dimezzamento

L'idrogramma delle portate permette di calcolare il grado di vulnerabilità con il metodo del tempo di dimezzamento (Civita 2008 che riprende Civita 1988). Il metodo prevede di eseguire il calcolo sulla curva di svuotamento del picco principale dell'anno idrologico.

Nei tre anni di monitoraggio (agosto 2018 – settembre 2021) alla sorgente Laron il picco principale ha dei picchi secondari nella porzione di decremento della curva di svuotamento che disturbano il calcolo.

Quindi si è provato ad eseguire il calcolo per la parte finale dello stesso picco massimo e per altri picchi che hanno un calo continuo.

Nella seguente tabella 6 sono riportati i dati del calcolo per i cinque periodi indicati.

Tabella 6				
Periodo	Qmax	Q0,5max	giorni	Situazione
04/02/19 - 27/02/19	18,1	9,05	23	C
31/05/19 - 17/06/19	22,7	11,35	18	B
24/12/19 - 9/01/20	21	10,5	16	B
17/06/20 - 02/07/20	20,8	10,4	15	B
10/02/21 - 03/03/21	19,2	9,6	21	C

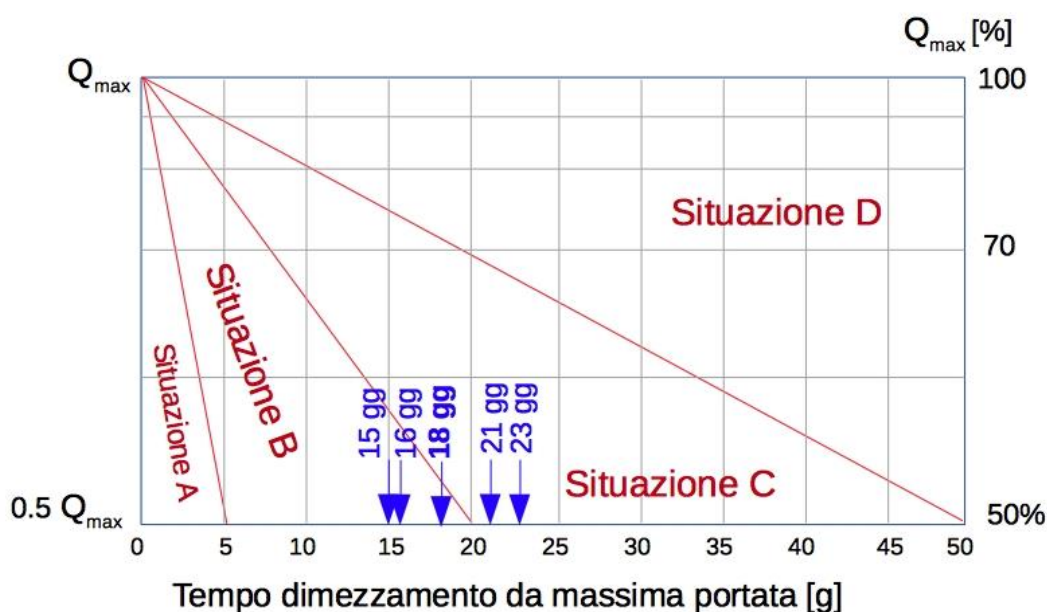


Fig. 10 Normogramma per il calcolo del tempo di dimezzamento da Civita 2008. Sono stati evidenziati i giorni calcolati per la sorgente Laron di cui in grassetto quello della curva dal picco massimo registrato.

Il metodo prevede di calcolare dopo quanti giorni la portata cala alla metà del valore di picco; più veloce è questo calo maggiore è la vulnerabilità. Il metodo, individuato il numero di giorni che portano alla metà della portata di picco, usa un normogramma che evidenzia quattro “Situazioni” corrispondenti ad altrettanti gradi di vulnerabilità. L’Autore ha individuato le linee di separazione nel normogramma osservando/monitorando il comportamento di alcune sorgenti ben studiate e queste linee rappresentano segmenti di curve di svuotamento graficate in scala semilogaritmica (Civita 2008).

Questa sintesi, per la sorgente Laron, evidenzia come la maggior parte delle curve di svuotamento analizzate ricadano nella “Situazione B” fra cui anche quella che parte dalla portata maggiore tra esse (fig. 10).

6.2 Metodo VESPA Index

Il metodo, proposto nel 2011 da Galleani et al., prevede un calcolo con una formula che usa i dati di monitoraggio in continuo di Portata, Temperatura, Conducibilità elettrica. Per una migliore comprensione del metodo di calcolo si consiglia però l'articolo di Banzato et al. 2017. L'indice VESPA è strutturato per enfatizzare le variazioni dei parametri e alcune correlazioni tra essi.

Per eseguire il calcolo è necessario avere un intero anno di dati con acquisizione ogni 1 o 2 ore in modo da coprire le varie condizioni di regime idrologico.

La formula di calcolo include tre coefficienti:

- indice di variabilità della portata (simile a quello di Meinzer) indicato con la lettera γ
- intervallo di variazione della temperatura che per diventare adimensionale è diviso per l'unità Celsius, indicato dalla lettera β
- coefficiente di correlazione tra portata e conducibilità elettrica indicato con $c(\rho)$

Il coefficiente tra portata e conducibilità richiede alcuni calcoli e passaggi logico-matematici più complessi degli altri e si basa sul coefficiente di correlazione tra le stesse due variabili.

Per la sorgente Laron, si dispone di circa tre anni di monitoraggio in continuo, ma purtroppo vi sono 2 interruzioni dovute a non funzionamento della sonda ed una terza parziale dovuta all'assenza di deflusso.

Questo fa sì che non si possa avere un periodo di registrazione in continuo di almeno un anno. Infatti anche l'assenza di deflusso, che di per sé rende ovviamente una portata pari a 0, trova nei dati di temperatura e conducibilità valori di ristagno nella polla che alterano soprattutto il dato di temperatura.

Vista la situazione si è provato ad applicare l'equazione per ottenere l'indice VESPA per tre periodi rispettivamente di 10, 11 e 11 mesi elaborando sia i dati di medie orarie che di medie giornaliere. Si è provato poi a fare anche il calcolo per l'intero periodo e per un periodo che includesse i dati a flusso nullo.

Nelle tabelle sono riportati i valori dei vari coefficienti e il valore finale dell'indice.

Tabella 7 da medie orarie						
Periodo	Mesi	ρ	$c(\rho)$	β	Γ	VESPA
27/08/18 - 02/07/19	10	-0,44	0,44	0,23	2,64	0,27
06/11/19 – 01/10/20	11	-0,39	0,39	0,24	3,35	0,31
06/10/20 - 09/09/21	11	-0,73	0,73	0,18	2,2	0,28
media		-0,52	0,52	0,22	2,73	0,29
27/08/2018 - 09/09/2021	Intero periodo (include due intervalli senza dati e i 12 giorni di secca)	-0,33	0,33	0,51	3,36	0,56
01/10/2019 - 01/10/2020	12 (include 12 giorni di secca)	-0,12	0,12	0,50	3,62	0,22
03/09/2019 - 01/10/2020	13 (include 12 giorni di secca)	-0,019	0,019	0,50	3,86	0,037

Tabella 7a da medie giornaliere						
Periodo	Mesi	ρ	$c(\rho)$	β	Γ	VESPA
27/08/2018 - 02/07/2019	10	-0,44	0,44	0,22	2,43	0,23
06/11/2019 – 01/10/2020	11	-0,39	0,39	0,22	2,86	0,247
06/10/2020 - 09/09/2021	11	-0,73	0,73	0,17	2,01	0,248
media		-0,52	0,52	0,20	2,43	0,24
27/08/2018 - 09/09/2021	Intero periodo	-0,33	0,33	0,23	3,08	0,236

Dai dati orari (tabella 7), si può osservare che i valori finali dei singoli sottoperiodi sono simili tra loro mentre differiscono di circa il 50%, dal valore dell'intero periodo.

Dai dati giornalieri (tabella 7a), si può osservare che i valori finali dei singoli sottoperiodi e dell'intero periodo sono molto simili tra loro.

I sotto periodi individuati non includono i 12 giorni di asciutta. Per le sole medie orarie si è provato a fare il calcolo anche su sottoperiodi di 12 e 13 mesi che includessero anche l'assenza di deflusso. In questi casi il coefficiente ρ risulta di un ordine di grandezza inferiore per il periodo di 13 mesi tanto da modificare totalmente il risultato finale, mentre il calcolo del sottoperiodo di 12 mesi non porta sostanziali variazioni. Non è chiaro da cosa

possano dipendere queste differenze; si potrebbe ipotizzare che esse siano legate all'inclusione nel calcolo di un mese in più, ma non si riscontra la stessa cosa nei casi in cui si analizzano periodi inferiori all'anno idrologico. Osservando la sequenza di dati, si nota come il mese antecedente alla secca che presenta un continuo calo di portata, incide molto.

Elaborazioni per verificare differenze dell'indice finale con dati acquisiti orari o medie giornaliere sono state operate da Banzato et al. 2017. Essi hanno evidenziato come i dati grezzi orari mostrino valori più alti rispetto alle medie giornaliere che invece riducono le variazioni.

Per essere cautelativi, tenendo per buoni i dati ottenuti dalle medie orarie sia come sottoperiodi che come intero periodo di misura, si ricava che i valori dell'indice VESPA sono compresi nell'intervallo 0,27 – 0,56 e quindi rispetto ai valori di riferimento del metodo si ricade nella classe di vulnerabilità media ($0,1 \leq V < 1$; tabella 4 estratta da Galleani et alii 2011).

Table 1
Proposed VESPA index intervals for the identification of the spring vulnerability level.

Vulnerability	VESPA index
Very high	$V \geq 10$
High	$1 \leq V < 10$
Medium	$0.1 \leq V < 1$
Low	$0 \leq V < 0.1$

Fig. 11 classi di vulnerabilità da Galleani et. alii 2011

Se compariamo il dato di vulnerabilità ottenuto con il metodo del dimezzamento e con il metodo VESPA osserviamo che la stessa è lievemente diversa.

Secondo il metodo di dimezzamento la "Situazione B" è associata a velocità di deflusso sotterraneo tra 0.01 e 0,001 m/s con probabile vulnerabilità "alta". Mentre secondo il metodo VESPA essa è "media". Questo per la delimitazione delle aree di salvaguardia indicate dalla DGR 1629/2019 implica delle differenze non secondarie, come appare dal confronto di tabella 8.

Tabella 8				
	Zona di Tutela assoluta			Zona di rispetto
Vulnerabilità	Estensione verso monte [m]	Estensione verso valle [m]	Estensione laterale [m]	Estensione a monte [m]
Media	20	5 (10)	15	400
Alta	30	5 (10)	22,5	2000

7.0 Tipo deflusso

Tornando ad osservare i dati ottenuti con il metodo VESPA si possono fare alcune considerazioni sul tipo di deflusso. Infatti il tipo di deflusso sotterraneo è schematizzato, soprattutto per le sorgenti carsiche, in 3 diverse tipologie: per sostituzione, a pistone e per omogeneizzazione. Queste tipologie inoltre sono associate ad intervalli diversi del coefficiente di correlazione ρ come riportato nella tabella 2 della pubblicazione Galleani et al. 2011 (fig. 12).

Table 2

Intervals spanned by the correlation coefficient and correlation factor for the three basic types of spring described in Section 3.1.

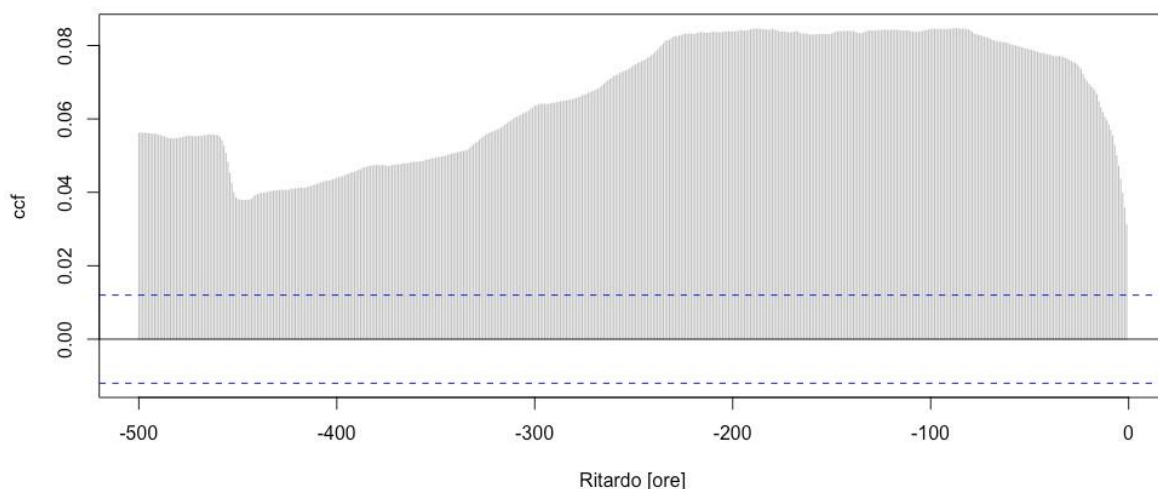
Spring type and prevailing phenomena	Correlation coefficient (ρ)	Correlation factor $c(\rho)$
Type A – replacement	$-1 \leq \rho \leq -0.2$	$0.2 \leq c(\rho) \leq 1$
Type B – piston	$0.2 \leq \rho \leq 1$	$0.1 \leq c(\rho) \leq 0.5$
Type C – homogenization	$-0.2 \leq \rho \leq 0.2$	$0 \leq c(\rho) \leq 0.2$

Fig. 12 Tabella di correlazione tra tipi di deflusso sotterraneo e coefficiente di correlazione ρ . Da Galleani et al. 2011

I dati VESPA ricavati (tabella 7) ricadono tutti nell'intervallo $-1 \leq \rho \leq -0,2$ che si associano al deflusso di "tipo A - sostituzione". Questa caratteristica dovrebbe potersi osservare analizzando dettagliatamente l'idrogramma in cui in condizioni di "sostituzione" all'aumentare della portata vi è una contestuale diminuzione della conducibilità elettrica e della temperatura.

Per analizzare questa situazione e verificare il ritardo con cui la sorgente ha un aumento di portata rispetto alle precipitazioni, si è provveduto a considerare alcune porzioni dell'idrogramma. Queste porzioni sono state poi correlate con le precipitazioni cumulate della stazione Cansiglio Tramedere che risulta più piovosa rispetto a quella di Vittorio Veneto e quella con la maggior correlazione fra quelle considerate (massima cross-correlation tra livello e precipitazione: Cansiglio Tramedere 0,084 con ritardo -88 ore; Col Indes 0,073 con ritardo -180 ore; Vittorio Veneto 0,065 con ritardo -84 ore; Conegliano 0,064 con ritardo -87 ore) (fig. 13).

Correlazione incrociata tra livello e precipitazioni Cansiglio Tramedere dati orari



Correlazione incrociata tra livello e precipitazioni Vittorio Veneto dati orari

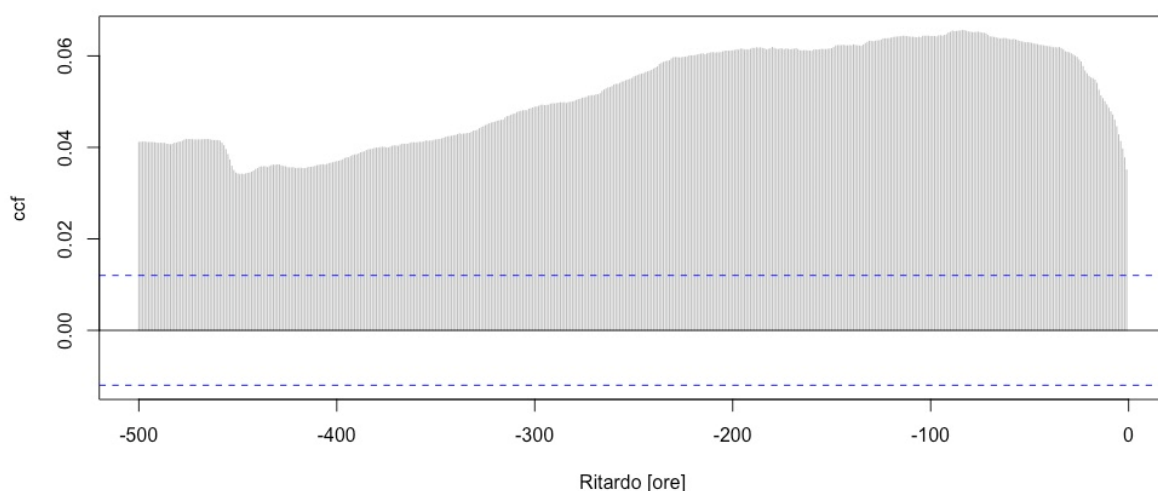


Fig. 13 Correlazione incrociata livello-precipitazioni: in alto con stazione pluviometrica di Cansiglio Tramedere, sotto con stazione di Vittorio Veneto

I dettagli metodologici e i singoli periodi analizzati sono riportati e descritti nella parte in appendice, mentre qui si propone una sintesi delle osservazioni.

Un'analisi di questo tipo deve tener conto di almeno 4 variabili: portata iniziale, intensità di pioggia, durata delle precipitazioni (o pioggia cumulata) e ritardo da altri eventi piovosi. Con intensità molto alte e portate iniziali basse l'aumento di portata è repentino (un'ora). Per intensità basse invece si osserva che con 5-6 mm/ora si innesca un aumento di deflusso dopo 4 ore circa partendo indicativamente da una portata iniziale di 8 l/s. Quando l'intensità cala sotto i 2-3 mm/ora in circa un'ora di tempo si ha una rapida diminuzione della portata.

Tranne per gli eventi in coda ad altri eventi precedenti, sembra che il deflusso aumenti, una volta raggiunti circa 50 mm di pioggia cumulata.

Analizzando le variazioni per piene quando la sorgente è in magra si è osservato che la conducibilità elettrica ha un calo significativo dopo circa 5 ore dall'evento più intenso.

Prendendo spunto da Wang et al. 2019 è stato valutato se la distribuzione gaussiana dei dati evidenzia diversi tipi di deflusso.

L'analisi dei dati medi orari di portata è stata eseguita con la funzione "density" del pacchetto R che interpola la distribuzione gaussiana dei dati distribuiti su 512 classi. L'elaborazione è stata eseguita sia per tutto il periodo che per i singoli anni idrologici (fig 14a). Per l'intero periodo si è ottenuto come valore di massima frequenza circa l'11% per una portata di circa 3,9 l/s mentre altri valori si registrano molto meno frequentemente. Se si considerano i singoli anni idrologici si identificano anche due picchi ben distinti (fig. 14 b,c,d) di cui il principale tra 3,5 e 6 l/s.

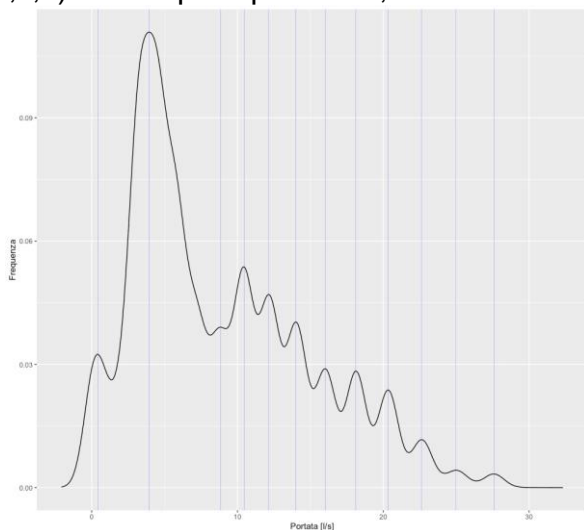


Fig. 14a Intero periodo 2018 - 2021: 3,9 l/s con 11%; 10,4 l/s con 5%; 12,1 l/s con 4,7%

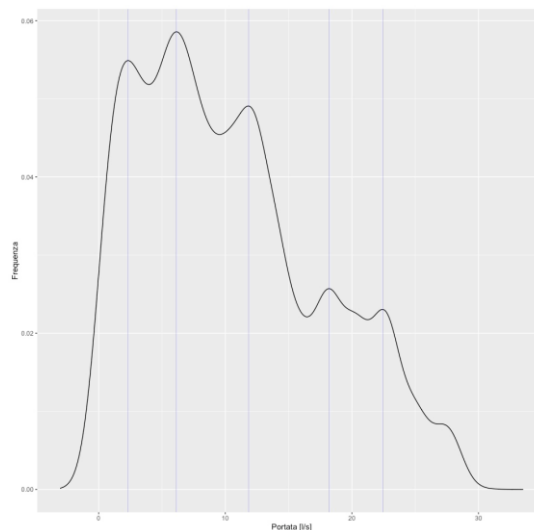


Fig. 14b Anno idrologico 2018-2019: 6,1 l/s con 6%; 2,8 l/s con 5,5%; 11,8 l/s con 5%

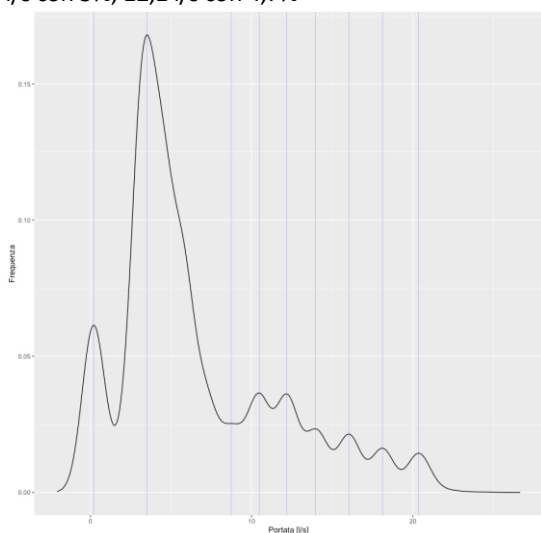


Fig. 14c Anno idrologico 2019 – 2020. Portata 3,5 l/s 16,8%; 0,19 l/s 6%

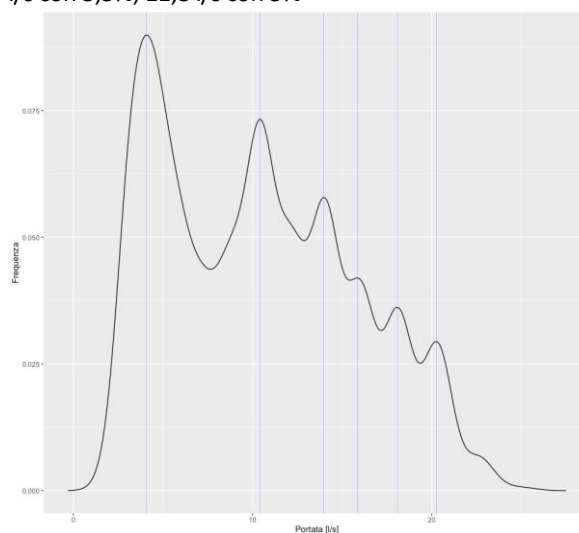


Fig. 14d Periodo dal 6/10/2020 al 9/9/2021: 4,07 l/s con 9%; 10,4 l/s con 7%; 13,95 l/s con 6%

Un'analisi simile per la conducibilità elettrica può evidenziare diverse componenti di deflusso. Nel caso specifico si ha che per l'intero periodo vi sono 2 picchi di frequenza molto simili e vicini (fig. 15a), mentre per gli anni presi singolarmente vi è un solo picco o il secondario è con frequenze molto inferiori (fig. 15 b, c, d).

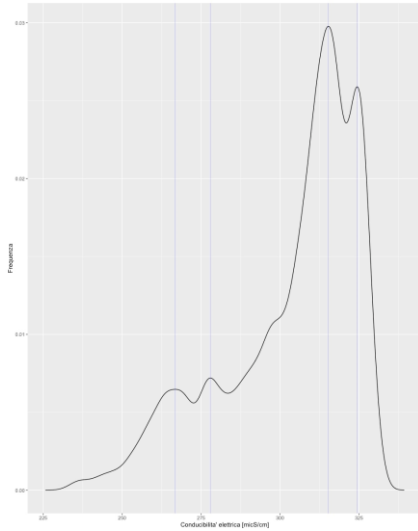


Fig. 15a Frequenza della conducibilità elettrica su simulazione gaussiana come 512 classi, intero periodo: 315 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con 3%; 324,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con 2,5%

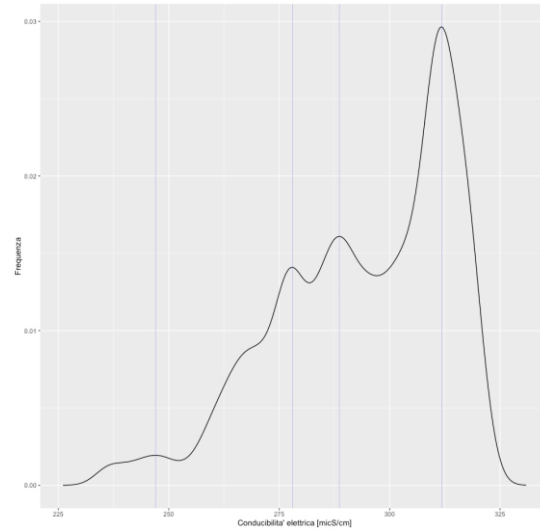


Fig. 15b Anno idrologico 2018-2019: 312 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con 3%; 289 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con 1,6%

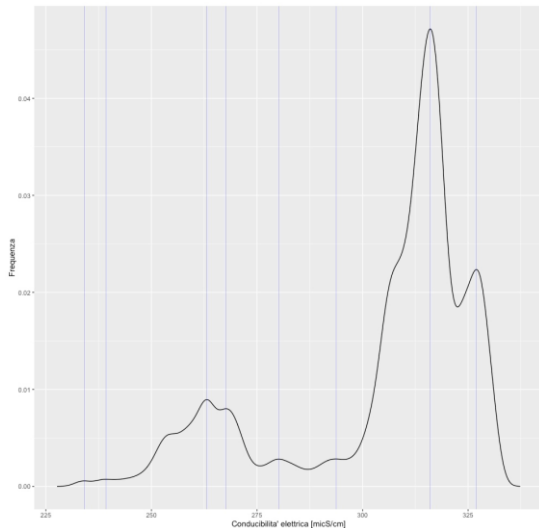


Fig. 15c anno idrologico 2019-2020 Conducibilità: 316 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 4,7%; 327 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 2%

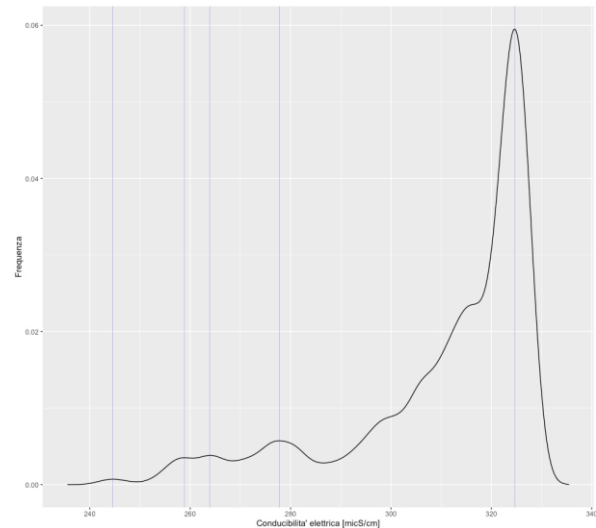


Fig. 15d Periodo 6/10/2020 al 9/9/2021: 324,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con 5,9%; 277,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con 0,57%

I due picchi di conducibilità (315 e 325 $\mu\text{S}/\text{cm}$) per l'intero periodo, si differenziano di poco tra loro anche in quanto a portata le cui mediane sono sull'ordine dei 5,7 l/s. Molto diversa è invece la frequenza dei valori di conducibilità inferiori a circa 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (0,6 - 0,7%). Quindi è difficile definire se vi sono più tipi di circolazione però sembra essere più probabile che le acque più mineralizzate (>300 $\mu\text{S}/\text{cm}$) corrispondano a portate tra 4,5 e 10,4 l/s (mediana 6,9 l/s) che è una parte dell'intervallo di portate in cui si concentrano la maggior parte di tutti i dati (intervallo 4,5-12 l/s, mediana 7,2 l/s).

Si è inoltre provato a fare una stima dei volumi di acqua che caratterizzano il pistonaggio ad inizio piena e che possono rappresentare dei volumi di acqua residente in un circuito secondario o sifoni sospesi. Per farlo si è calcolato il volume fuoriuscito nel tempo tenendo

conto che la conducibilità elettrica è aumentata e poi tornata ai valori iniziali. Si sono valutati alcuni eventi più evidenti (6 picchi-pistone), ma non necessariamente tutti. Le variazioni di conducibilità riscontrate sono minime, pochi $\mu\text{S}/\text{cm}$, poco più del doppio dell'accuratezza e della risoluzione strumentale. Nella seguente tabella si può così osservare che il picco-pistone generalmente si esaurisce in 2 ore o poco più, ad eccezione della situazione di portata minima che è quella in cui anche la variazione di conducibilità è minima.

Tabella 9				
Data	Orario	Cond iniziale e cond max	Portata iniziale e portata max	Volume deflusso mc
08 - 09/08/2021	18 – 00:30	318,6 - 320	3,2 – 5,4	113,8
04/04/2019	19 - 20:30	306-310	8,4 – 11,8	51,7
19/12/2019	22 - 23:30	326 - 328	10,4	56,3
24/11/2018	5 - 7:30	313,8 – 315,2	10,4 – 12,2	97,1
28/05/2019	20 – 22:30	290 – 293,6	18,1 – 20,3	135,3
14/06/2020	11 - 14	275,2 – 287,4	16 – 24,6	298

Escluso il primo caso elencato si osserva che la portata è sempre superiore agli 8 l/s e che c'è un corrispettivo aumento di volume. Questo generale aumento potrebbe essere legato al coinvolgimento di un volume roccioso sempre maggiore nelle cui fratture risiede dell'acqua più mineralizzata.

I veloci tempi di reazione del sistema fanno però pensare che vi sia anche un veloce apporto di nuove acque di precipitazione. Per stimare questa componente si è provato a seguire i calcoli proposti da Birk et alii (2004). Nell'ambito dell'inizio di una piena si individuano le repentine variazioni di portata e di conducibilità elettrica associati. Queste sono così correlate tra loro per individuare la componente di acqua nuova (cQ_n) che defluisce dalla sorgente secondo la seguente formula:

$$cQ_n \approx Q_n - Q_n * \frac{CE_n}{CE_v}$$

dove CE_n è il valore di conducibilità elettrica corrispondente al massimo suo decremento e Q_n la portata corrispondente, CE_v invece la conducibilità prima dell'inizio della piena. Si è applicata questa formula agli eventi con inizio a portate basse in modo di escludere possibili interferenze tra eventi di precipitazione diversi.

Un esempio di questo tipo di analisi è riportato in figura 16. Nel grafico la linea verde evidenzia l'ultimo insieme di dati dell'acqua "vecchia" pre piena (Q_v , CE_v), la linea gialla il momento con il massimo decremento di conducibilità elettrica (Q_n , CE_n) e con la linea arancione il momento in cui si raggiunge la minima conducibilità. Nella successiva tabella sono invece riportati i valori numerici degli eventi analizzati.

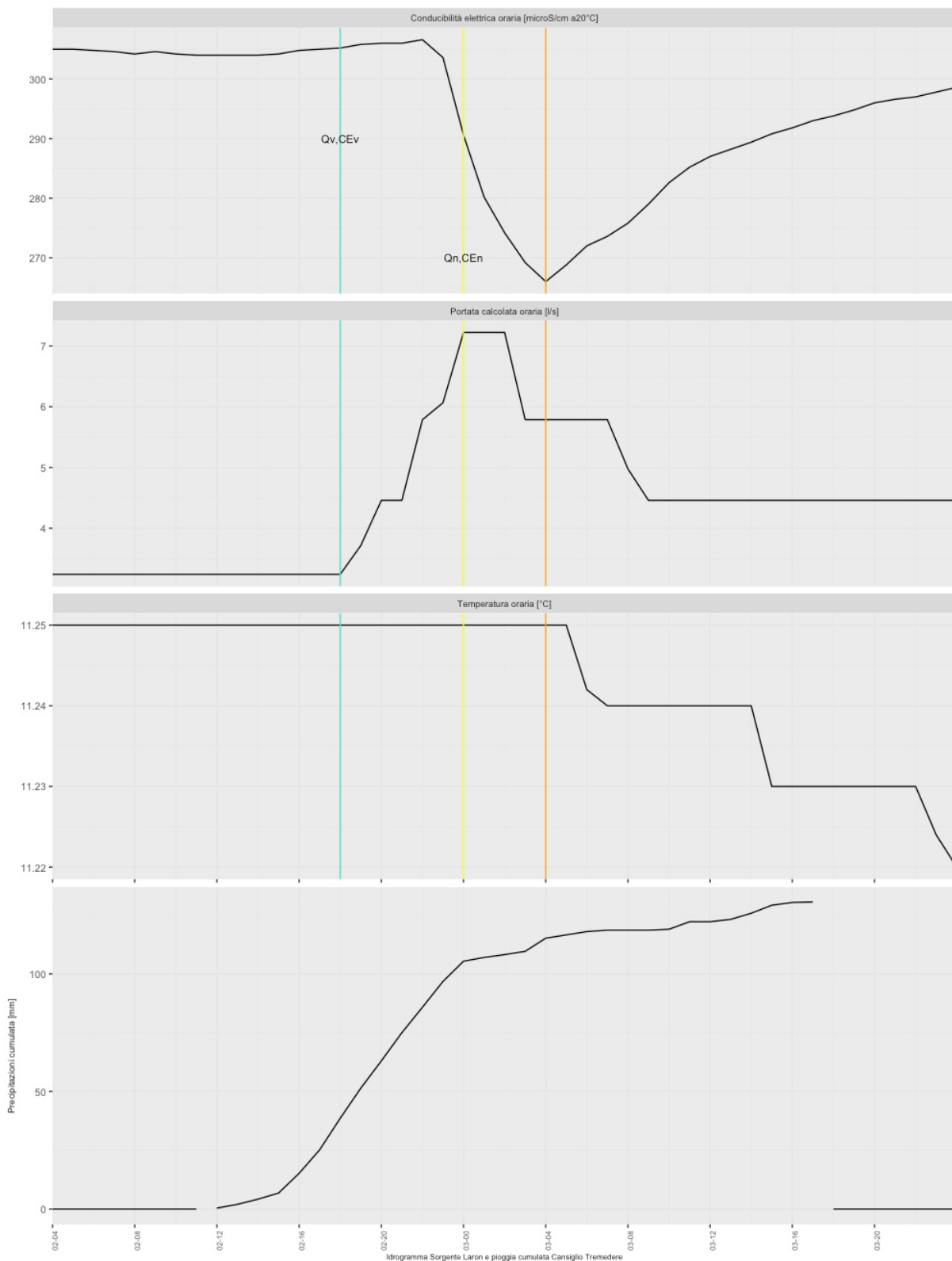


Fig. 16 Esempio dell'andamento dell'idrogramma e dei momenti scelti per il calcolo della componente di "acqua nuova" in arrivo ad inizio piena (2-3/03/2020)

Conducibilità pre piena (CEv) [μ S/cm]	Conducibilità a massima variazione (CEn) [μ S/cm]	Portata pre piena (Qv) [l/s]	Portata a cambio conducibilità (Qn) [l/s]	Componente Portata nuova (cQn) [l/s]	% della portata	Data evento
321	306,6	3,24	4,46	0,2	4,5	05/08/2021
318,2	307,8	10,43	12,19	0,4	3,3	22/06/2021
312	298	5,78	7,22	0,32	4,5	18/03/2019
305,2	290,6	3,24	7,22	0,34	4,7	2-3/03/2020
305	291,6	3,24	8,77	0,39	4,45	4-5/06/2020
296	286,2	4,46	7,22	0,24	3,3	06/09/2018
287,8	271,6	3,24	8,77	0,49	5,6	30/08/2020

Come si vede dalla tabella (ordinamento decrescente conducibilità pre piena) per casi di basse portate la percentuale di acqua “nuova” arrivata al repentino iniziale calo di conducibilità è sull’ordine del 4-5% (al minimo di conducibilità essa è sull’ordine del 7-10% e talora fino al 19%). Il calo di conducibilità si riscontra dopo 4-6 ore dall’inizio di incremento di portata, ma per le portate più alte anche solo dopo un’ora.

Un caso anomalo si ha all’inizio di settembre del 2018 quando nonostante 3 precipitazioni (15 mm, 32 mm, 19 mm tra il 31/8 e il 2/9) non si hanno incrementi di portata (4,5 l/s). Vi sono oscillazioni della conducibilità elettrica sempre con ritardo di alcune ore dalle piogge, mentre si è registrato l’aumento di portata alcuni giorni dopo (06/09/2018) con il contestuale decremento di conducibilità.

8.0 PORTATE e CHIMISMO

La caratterizzazione idrochimica della sorgente è simile a molte altre dell'area prealpina e rientra nella tipologia di acqua bicarbonato calcica.

Un ulteriore approfondimento è possibile correlando le portate ai parametri chimici. Nei grafici della figura seguente sono riportate nelle ordinate le concentrazioni di alcuni parametri e in ascissa le portate misurate contestualmente al campionamento.

Alcuni parametri sembrano avere un comportamento simile in relazione all'aumento di portata (Alcalinità, Calcio, Magnesio, Nitrati, Solfati). Seppure su un intervallo di limitate variazioni di concentrazione appare che per portate da 0 a 5 l/s vi sia un aumento della concentrazione, che sembra rimanere stabile fino a 15 l/s, mentre per ulteriori incrementi del deflusso vi è un calo di concentrazione. Questo trend, seppur influenzato dai pochi dati in corrispondenza di portate elevate, sembra essere reale perchè concorde fra più parametri.

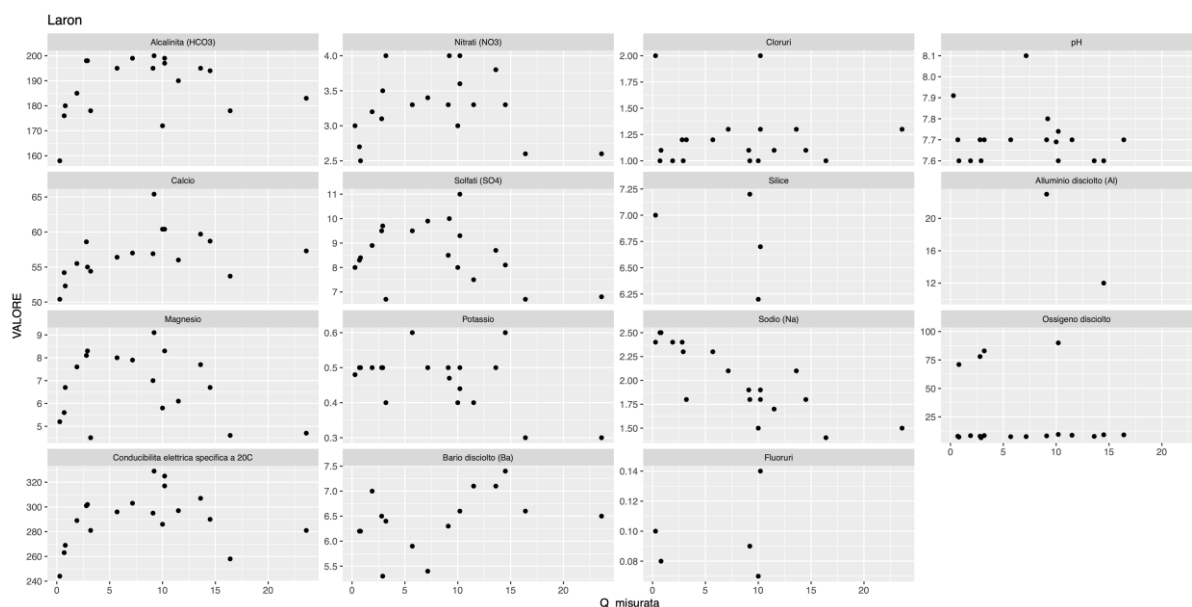


Fig. 17 Grafici che comparano le concentrazioni di alcuni parametri chimici e la portata misurata al momento del campionamento. Unità di misura: mg/l per Alcalinità, Calcio, Cloruri, Magnesio, Nitrati, Ossigeno, Potassio, Silice, Sodio, Solfati; µg/l: Alluminio, Bario, Fluoruri; µS/cm a 20°C per Conducibilità elettrica, numero puro per pH.

L'analisi dell'idrogramma evidenzia inoltre che all'aumento di portata corrisponde un calo di conducibilità elettrica e temperatura dell'acqua, fattore che in ogni caso evidenzia come vi sia un apporto di acqua più fredda e meno mineralizzata di quella che normalmente alimenta la sorgente.

Si propone così l'elaborazione statistica di correlazione incrociata (cross-correlation CCF) tra il livello e la conducibilità elettrica (fig. 18a) e temperatura fig. 18b).

Per entrambi i parametri si ha inizialmente una correlazione negativa (cioè all'aumentare del livello calano conducibilità e temperatura) su un intervallo di circa 60 ore per la conducibilità e di circa 200 ore per la temperatura.

Successivamente si ha una blanda correlazione positiva per entrambi i parametri che raggiunge al massimo un valore di 0,27 - 0,28 su un ritardo temporale a -429 ore (circa 18 giorni) per la conducibilità e -634 ore (26 giorni) per la temperatura. Questo può essere dovuto al fatto che la conducibilità è effetto di una interazione chimica che può verificarsi in condizioni di flusso/movimento, mentre l'aumento di temperatura è associabile ad un ristagno dell'acqua e quindi a quella parte dell'acquifero in condizioni più freatiche che vadose.

Paragonando però i due parametri tra loro, si ha una generale concordanza che diventa massima (0,837) con un ritardo di 10 ore. Il calo di correlazione scende lentamente all'umentare del ritardo, senza evidenziare scostamenti significativi.

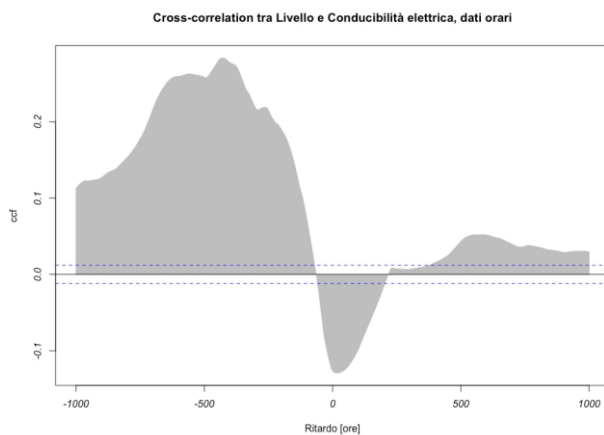


Fig. 18a Correlazione incrociata livello-conducibilità

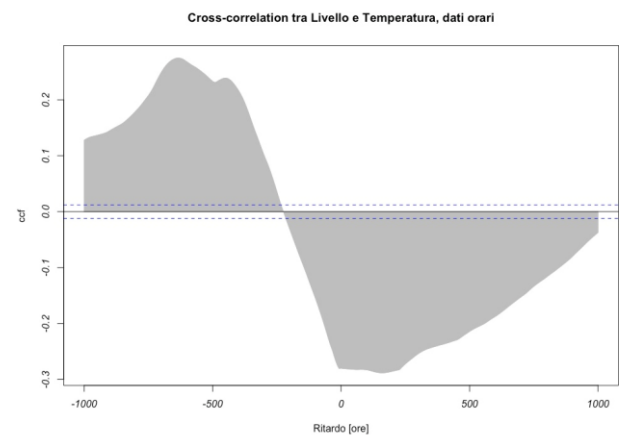


Fig. 18b Correlazione incrociata livello-temperatura

È possibile quindi ipotizzare che per portate basse (fino a 5 l/s) il deflusso sia in condizioni vadose in "canali" con sezione più ampia del quantitativo d'acqua in transito e coinvolga secondariamente acqua "ferma" (es. fondo di pozze). Per portate tra i 5 e i 15 l/s prevale il deflusso legato alla porosità di matrice o fratture secondarie indirizzato verso la sorgente dal carico idraulico. Con portate maggiori si hanno acque di nuova infiltrazione che superano in quantità e diluizione acque residenti.

9.0 BACINO di ALIMENTAZIONE

La sorgente corrisponde ad un punto di venuta da fratture nella roccia in un bancone di calcarenite a bioclasti lievemente marnoso a giacitura subverticale (Formazione di Monte Baldo).

Il versante sovrastante è quasi completamente boscato ed è suddivisibile in due porzioni: un rilievo allungato tipo hogback e un lungo pendio che sale fin sopra i 1500 metri di quota coronato verso l'alto da modeste balze rocciose.

La zona di hogback è caratterizzata da detrito eluviale originato da materiali argillosi, marnosi e calcari marnosi. Il pendio è principalmente impostato su una coltre di detrito di versante della pezzatura delle ghiaie. Questo detrito, dello spessore di almeno 5 m, è prevalentemente cementato e con evidenti "stratificazioni" marcate da tasche di limi di color rosso.

Su questo pendio sono incisi vari canali legati probabilmente a colate detritiche; la maggior parte di essi non sono più attivi se non uno nella parte più settentrionale che mantiene rimobilizzato parte del detrito.



Fig. 19 Incisione nel pendio entro i detriti cementati e stratificati che con il loro angolo di riposo danno l'inclinazione del versante.

Dal punto di vista idrologico lo scorrimento idrico superficiale sembra essere limitato a pochi punti e ai momenti di intensa precipitazione. Si osservano tracce di ruscellamento su alcune porzioni della strada sterrata che percorre la parte settentrionale del bacino idrografico e in un'incisione nella parte a sudest del bacino, a valle di un ripiano e di una sorgente secondaria localizzati a quote comparabili con quelle della sorgente Laron.

Una parte del ruscellamento sul sedime stradale sembra infiltrarsi poco a monte della sorgente Laron. Un'altra condizione di infiltrazione può essere rappresentata da due ripiani con doline al limite superiore del bacino idrografico (quote 1300 e 1400 m slmm circa).

10.0 MODELLO CONCETTUALE

Analizzando gli idrogrammi e i dati in continuo si può provare a creare un modello concettuale del regime idrologico di questa sorgente.

Si ipotizza che il principale bacino di alimentazione sia il versante boscato con detriti, ove non vi è ruscellamento e le precipitazioni, al netto dell'evapotraspirazione, si infiltrano. L'accumulo detritico, che poggia sulle rocce poco permeabili della serie terrigena (Scaglia Rossa e Cinerea, Flysch di Belluno, Arenarie Galuconitica di Belluno, Calcarenite di Castelcucco, Arenaria di Libano, Arenaria di S. Gregorio), ha il suo piede a ridosso del lato est del crinale Col dei Casiret, costituito da strati subverticali della Formazione di Monte Baldo o dell'Arenaria di San Gregorio (Bondesan et al. 2013).

Questo crinale fa da barriera sia per la sua prevalenza morfologica che per la ridotta permeabilità che va diminuendo verso ovest. L'acqua così tende ad infiltrarsi nell'ammasso roccioso tramite fratture e forse via un incipiente reticolo carsico.

In condizioni di piena, vale a dire in presenza di una ricarica veloce da precipitazioni, si ha quindi un veloce riempimento dei condotti di maggiori dimensioni e aumento di carico idrostatico presso le strozzature del reticolo ipogeo (fig. 19 - 2). In questa situazione si possono riattivare piccole condotte secondarie più alte con pozze o sifoni sospesi la cui acqua viene spinta avanti (pistonaggio) e rimpiazzata da acqua di neoinfiltrazione (fig. 19 -3). L'iniziale aumento di conducibilità e temperatura registrati alla sorgente rappresentano lo svuotamento di queste acque "vecchie" (fig. 19 - 4), mentre il crollo di questi parametri è associabile all'arrivo dell'acqua nuova (fig 19 - 5).

In molti casi si osserva che il calo di temperatura continua più a lungo rispetto a quello di conducibilità e portata (fig. 19 - 5 - 6).

Più intenso è l'evento di pioggia/ricarica, più veloce e netto è il fenomeno di pistonaggio (aumento sincrono portata, conducibilità e temperatura e successivo calo dei secondi due parametri).

Meno intensa è la precipitazione più veloce è la risalita dei parametri fisici misurati dopo il pistonaggio perchè si disattivano i cunicoli più alti e prevale la circolazione dallo sgocciolamento delle fratture più strette e sospese sul livello di base. Si ha così un lieve innalzamento della conducibilità elettrica senza un aumento di temperatura. Questo andamento della conducibilità forse può anche essere legato a dissoluzione per miscela di acque (Bögli, 1964).

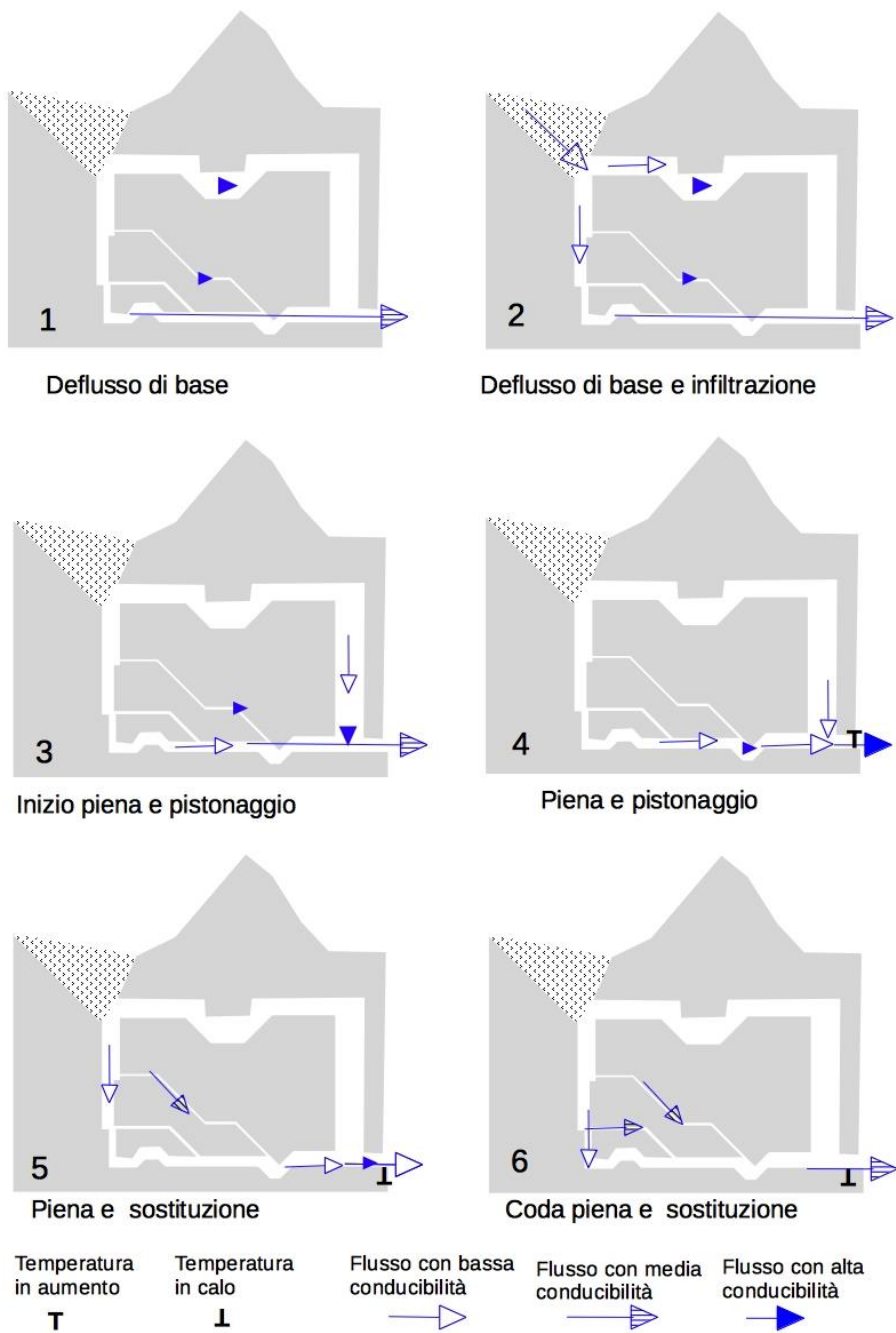


Fig. 20 Modello concettuale del deflusso della sorgente Laron.

11.0 SINTESI

In conclusione, si è osservato che il regime della sorgente risente delle precipitazioni con una sola ora di ritardo per piogge con intensità superiori ai 30 mm/ora anche in condizioni di portate minime. Vi è un ritardo dalle 4 alle 23 ore con intensità tra gli 8 e i 4 mm/ora partendo da portate di 10 e 6 l/s. Sempre sull'ordine delle 4-6 ore è il ritardo nel caso in cui l'intensità sia di 2-3 mm/ora ma partendo da portate superiori ai 10 l/s.

La sorgente, seppur perenne nel periodo di monitoraggio, ha avuto un breve periodo di secca.

Il tipo di drenaggio è principalmente per sostituzione anche se in alcune situazioni vi è del pistonaggio (portate >8 l/s).

Per le portate più basse la stima dell'arrivo della componente di acqua di neoinfiltrazione alla sorgente si attesta sul 4-5% della portata fluente durante la fase di piena.

Il calcolo della vulnerabilità intrinseca indica una classe medio alta che è in accordo con le repentine risposte idrauliche del sistema e gli eventi di pistonaggio solo per le portate maggiori.

Le osservazioni eseguite nell'area del bacino di alimentazione sembrano indicare una principale zona d'infiltrazione diffusa attraverso il suolo e poi nel substrato; inoltre vi è probabilmente dell'infiltrazione concentrata convogliata dal sedime della strada sterrata verso il piede della falda detritica al contatto con il prospiciente crinale roccioso.

BIBLIOGRAFIA

Banzato C, Butera I, Revelli R, Vigna B (2017) Reliability of the VESPA index in identifying spring vulnerability level. *J Hydrol Eng* 22(6): 1–11.

Bondesan A., Busoni S., Preto N. (2013): Carta geologica della provincia di Treviso. Sezioni 064130 – Fregona Mezzavilla – 064140 Coltura, scala 1:10000.

Birk Steffen, Liedl Rudolf, Sauter Martin (2004): Identification of localised recharge and conduit flow by combined analysis of hydraulic and physico-chemical spring responses (Urenbrunnen, SW-Germany). *Journal of Hydrology*, 286, 179-193.

Bogli A. (1964): La Corrosion par mélange del eaux. *International Journal of Speleology*, 1(1-2): 61-70

Civita M. (1988): Una metodologia per la definizione e il dimensionamento delle aree di salvaguardia delle opere di presa delle sorgenti normali [A methodology for delineation and design of protection areas for normal springs]. *Boll Ass Min Subalpina* 25(4):423–440

Civita M. (2008): An improved method for delineating source protection zones for karst springs based on analysis of recession curve data. *Hydrol. J.* 16, 855–869. doi:10.1007/s10040-008-0283-4.

Fiorillo F., Revellino P., Ventafridda G. (2012): Karst aquifer draining during dry periods. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 74, n. 2, p. 148-156.

Galleani L, Vigna B, Banzato C, Lo Russo S (2011) Validation of a vulnerability estimator for spring protection areas: the VESPA index. *J Hydrol* 396:233–245.

Kristijan Posavec, Jelena Parlov, and Zoran Nakic´ (2010): Fully automated objective-based method for master recession curve separation. *Ground water*, v. 48, n. 4, p. 598-603.

Zejun Wang , Qianlong Chen, Ziqi Yan, Mingming Luo, Hong Zhou, Wei Liu (2019): Method for identifying and estimating karstgroundwater runoff components based on the frequency distributions of conductivity and discharge. *Water*, 11, 2494; doi:10.3390/w11122494.

STRUMENTAZIONE e METODO

Da settembre 2018 è stata installata una sonda (modello CTD mini della OTT) con registrazione in continuo presso la sorgente Laron. La sonda rileva conducibilità, temperatura e livello con un intervallo di misura di 12 minuti.

La registrazione è in bar di battente d'acqua.

La sonda è stata installata in un tubo da un pollice forato posizionato nella pozza naturale circa 2 m a monte della soglia in cemento verso le vasche di sedimentazione e carico. La pozza è profonda circa 70 cm e la sonda è adagiata su un supporto ad un paio di cm dal fondo.

Le misure di portata sono state fatte con metodo volumetrico e metodo correntometrico:

- volumetrico, impiego di una bacinella di volume noto (10 litri) fino a totale riempimento che con il suo bordo rettilineo permette di prendere l'intero deflusso dalla soglia in cemento;
- correntometrico, dal 2018 ad inizio 2020 si è usato micromulinello Seba con elica di diametro pari a 30 mm e passo 100 mm. Da inizio 2020 a fine monitoraggio correntometro elettromagnetico OTT MFPro. Le misure sono state fatte sul fondo cementato a circa 40 centimetri a monte della soglia.

La sorgente Laron è compresa nella rete monitoraggio acque sotterranee già dal 2007 con campionamento e misura di portata due volte l'anno: sono quindi disponibili dati chimici associabili alla portata nel momento del campionamento.

Le elaborazioni dati sono state eseguite con Microsoft Access per la preparazione degli stessi a medie orarie e giornaliere; mentre le elaborazioni statistiche con software R.

ANALISI IDROGRAMMA e TEMPI DI RISPOSTA

Si è analizzato visivamente l'idrogramma della sorgente e si sono scelti alcuni periodi per determinare il ritardo d'inizio di piena rispetto alle precipitazioni. L'andamento delle precipitazioni considerato è quello della stazione Cansiglio Tramedere in quanto la stazione Vittorio Veneto ha minori quantità (Fig. 21).

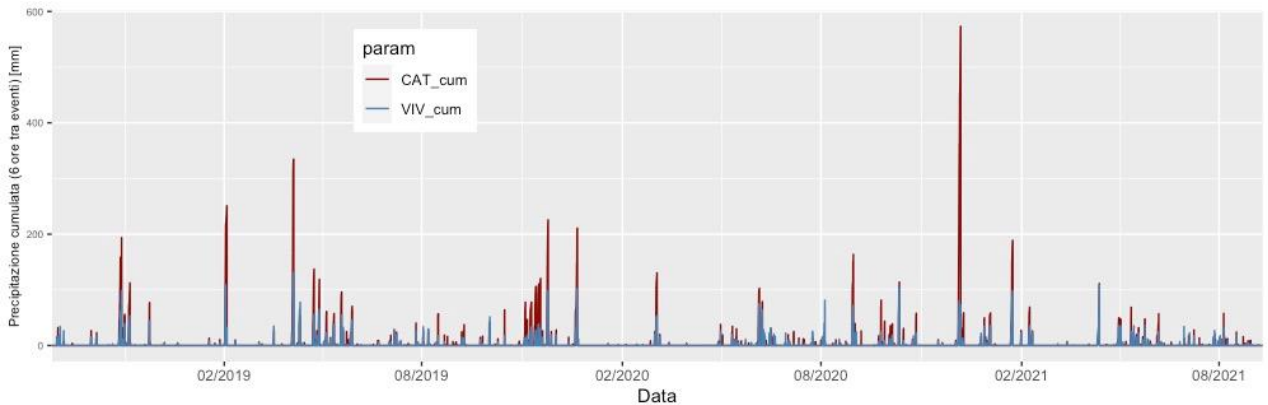


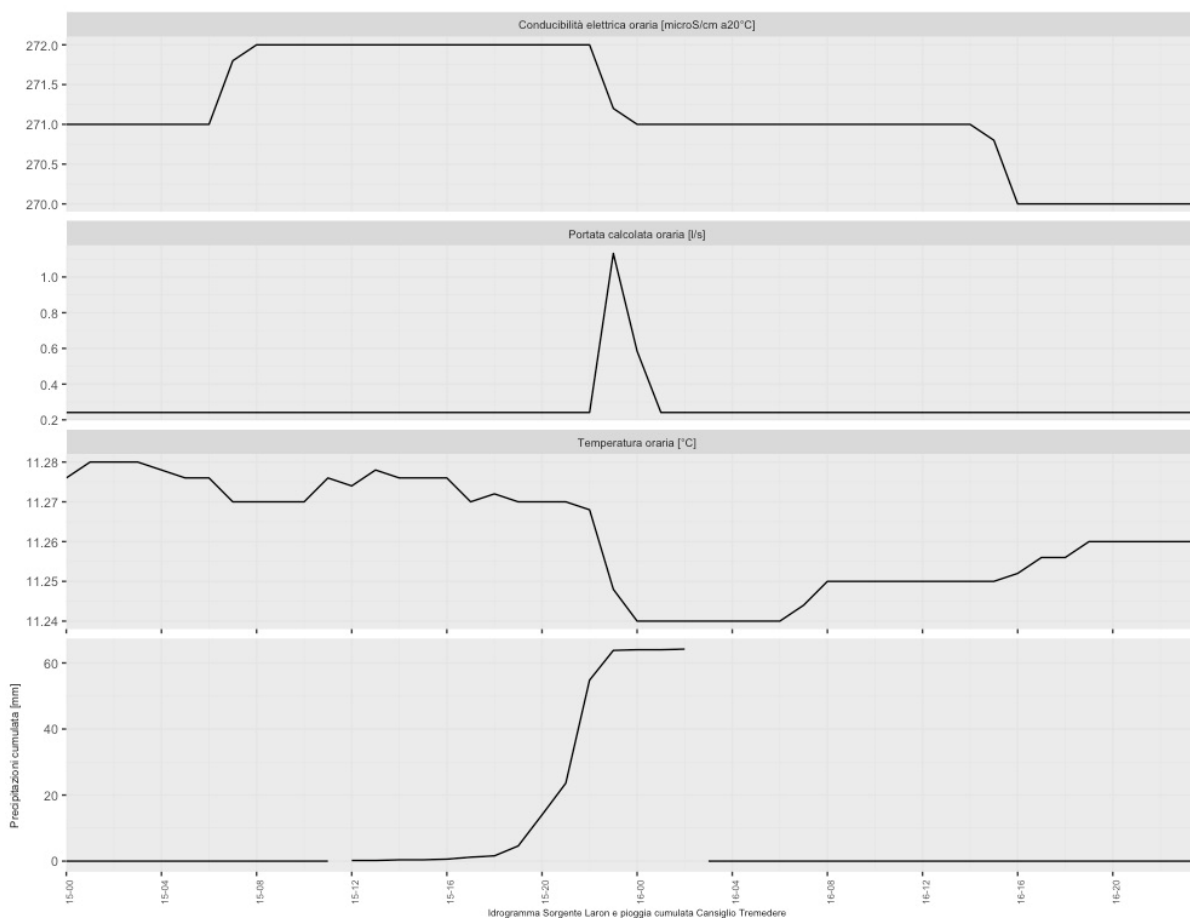
Fig. 21 Le osservazioni citate si riferiscono al pluviogramma di Cansiglio Tramedere (CAT_cum) che nell'immagine viene confrontato con quello di Vittorio Veneto (VIV_cum). I pluviogrammi sono le cumulate degli eventi interspaziati con almeno 6 ore senza pioggia per Cansiglio Tramedere e Vittorio Veneto: la stazione di Vittorio Veneto ha quasi sempre valori minori.

Per la distinzione degli eventi di pioggia e il calcolo delle cumulate si sono applicati i seguenti principi: a) si considerano due eventi separati se vi sono almeno 6 ore di assenza di precipitazioni; b) i valori giornalieri pari a 0,2 mm di pioggia se preceduti e seguiti da almeno 6 ore senza pioggia non sono stati presi in considerazione.

Nella tabella seguente sono riportati gli eventi selezionati e i dati più significativi.

Data evento	Portata inizio (l/s)	Intensità pioggia (mm/ora)	Inizio aumento portata dopo ore	Pioggia cumulata (mm)	Portata massima (l/s)	Calo portata dopo ore di pioggia meno intensa (ora)	Intensità pio ridotta (mm/ora)
15-16 /10/2019	0,24	30	1	54,8	1,1	1	9
29 – 30 /8/ 2020	3	57	1	57	7,5	1	0,2
4-5 /8/2021	3	19	1	58	5,7	1	0,2
8-9/8/2021	3	6	1	12	5,5	1	0
3 - 5 /4/2019	6	4	23	92	21	2	2,5
19 – 21 /12/2019	8	8 e 5	4 (a Q 8) e 2 (a Q 10)	53	10 e 17,5		
23 – 24 /11/2018	10	8	4	48	13,5	3	1
21-23 /1/2021	10	3,2	7	55	17,5	?	
18-20 /5/2019	17	5	6-7	41	19,5	5+3(dopo picco secondario)	1
4 – 5 /5/2019	21	2 (poi 7-5)	4	8	26,5	?	(1)

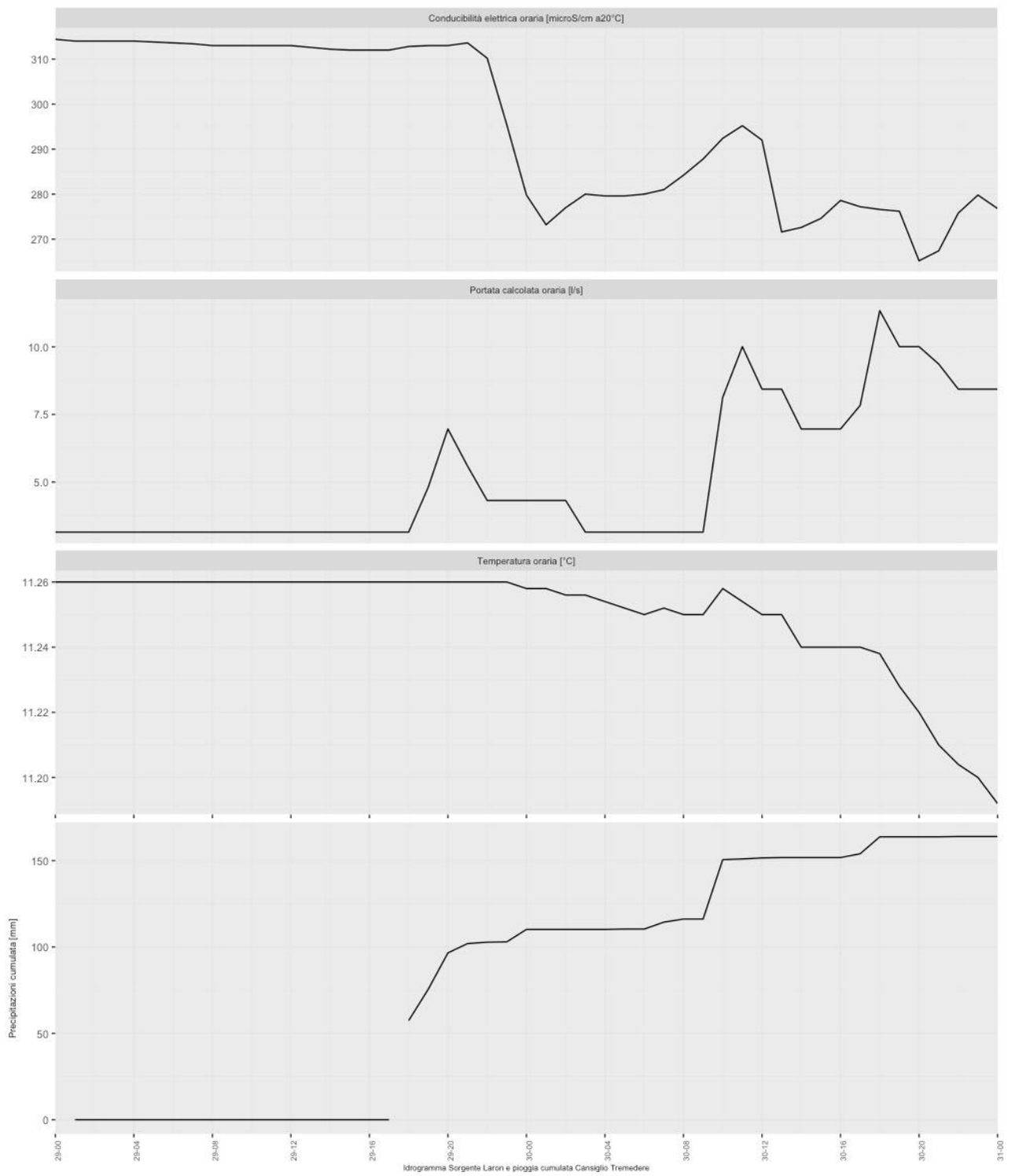
Nella tabella la portata prima della piena (“portata inizio”) determina l’ordine degli eventi analizzati. L’analisi ha seguito il seguente criterio. Individuato il momento in cui si è iniziato ad avere un incremento di portata si è calcolata la pioggia cumulata fino a quel momento e si sono conteggiate le ore di precipitazione precedenti considerandole se consecutive e con una media oraria >2 mm. Sono poi indicate la portata di picco raggiunta (Portata massima) e l’intervallo in ore necessario ad avere un calo di portata nel caso vi sia una diminuzione dell’intensità di pioggia che è riportata nell’ultima colonna (“Intensità pio ridotta”).



Evento 15 – 16/10/2019. Minima intensità iniziale (14:00-18:00, cumulata 1,6 mm). Progressivo aumento d'intensità (18:00-19:00 a 3mm/h; 19:00-21:00 a 9mm/h; 21:00-22:00 a 31mm/h; cumulata 54,8mm) e successivo calo e fine evento (22:00-23:00 a 9mm/h; fine 2:00 del 16/10; cumulata 64,2mm).

La portata iniziale è bassa (0,24 l/s) e alle ore 23 si ha l'aumento di portata fino a 1,1 l/s per scendere all'ora successiva a 0,58 l/s e poi tornare al valore iniziale.

Diminuzione di conducibilità e temperatura, molto ridotte, sono contemporanee all'aumento di portata, ma si protraggono per alcune ore in più rispetto al deflusso. Questo evidenzia un completo e veloce processo di sostituzione anche se associato ad una blanda diluizione. L'evento si svolge in un tempo rapido e con portate evidenti. La portata di 1,13 l/s e poi 0,58 l/s in due ore portano ad un deflusso totale di 6,17 mc di cui 4,44 mc innescati dall'evento piovoso; questo volume, dati i 64mm di pioggia cumulata, è il corrispettivo della pioggia caduta su 64 mq.



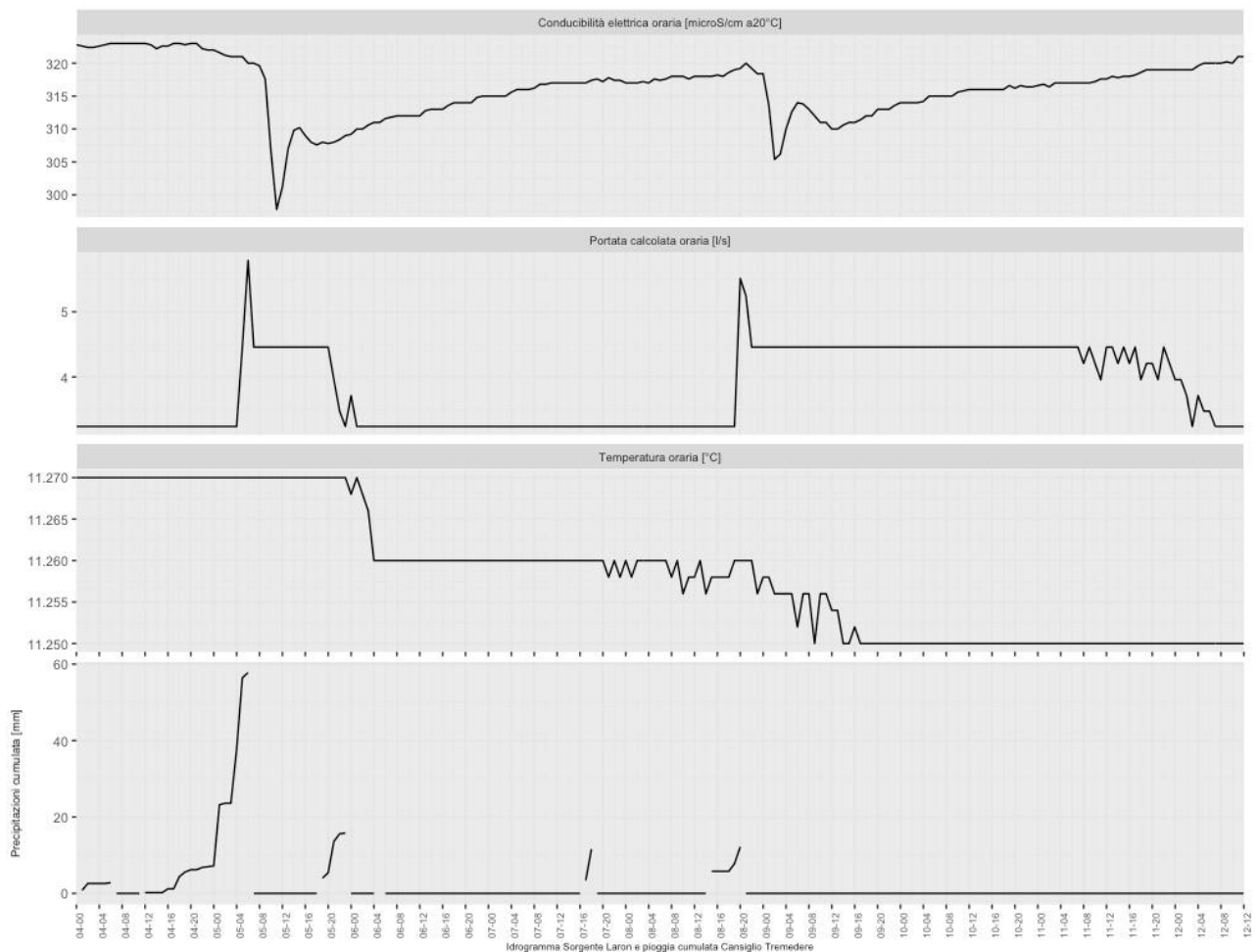
Evento 29-30/8/2020. Intenso piovasco nella prima ora (17:00-18:00; cumulata 57,4mm), successivo calo intensità (18:00-20:00 a 19,6mm/h; cumulata 96,6mm) e ulteriore diminuzione (20:00-24:00 a 3,4mm/h; cumulata 110,2mm). Il 30/08 debolissima ripresa (24:00-06:00; cumulata 110,4mm; 6:00-9:00; cumulata 116,2mm) e poi un po più sostenuta (9:00-10:00 a 34,4mm/h; cumulata 150,6).

La portata, da 3,2 l/s, inizia ad aumentare dopo 2 ore (19:00) dall'inizio e alle 20:00 raggiunge il picco con 7,2 l/s. Già alle 21:00 la portata è in calo e dalle 22:00 rimane stabile sui 4,3l/s fino alle 2 del 30/08 per poi scendere nuovamente a 3,2 l/s alle 3 del giorno stesso (con 110 mm cumulati).

Il deflusso totale che si è avuto durante il picco (dalle 19:00 alle 2:00) è stato di circa 145 mc di cui 93 mc innescati dalla pioggia cumulata (110,2 mm) che corrispondono ad un'area di circa 847 mq.

La conducibilità inizia a crollare quando la portata è scesa a 4,3 l/s alle 22 del 29/08 mentre ricomincia a salire all'1 del 30/8. Il primo mescolamento tra acqua residente e acqua di pioggia è in un volume di 48 mc, cioè il volume defluito dall'inizio del calo di conducibilità e quello all'inizio dell'incremento di conducibilità.

Alle 23 la temperatura inizia a scendere dopo altri 16 mc (di cui 12 mc di acqua nuova) circa rispetto alla conducibilità. Si noti che solo dopo il ritorno alla portata iniziale si ha un incremento della conducibilità che si mantiene anche con l'aumento di portata evidenziando un fenomeno di pistonaggio.



Evento 04-05/8/2021. Debolissima pioggia (12:00-17:00; cumulata 1,2mm), successivo incremento (17:00-18:00; cumulata 4,4mm) e poi sempre meno (18:00-24:00; cumulata 7,2mm). Intensificazione (24:00-1:00 a 16mm/h; cumulata 23,2mm) e seguente decremento o stasi (1:00-3:00; cumulata 23,6mm) con successivo piovasco (3:00-5:00 a 16,4mm/h; cumulata 56,4mm).

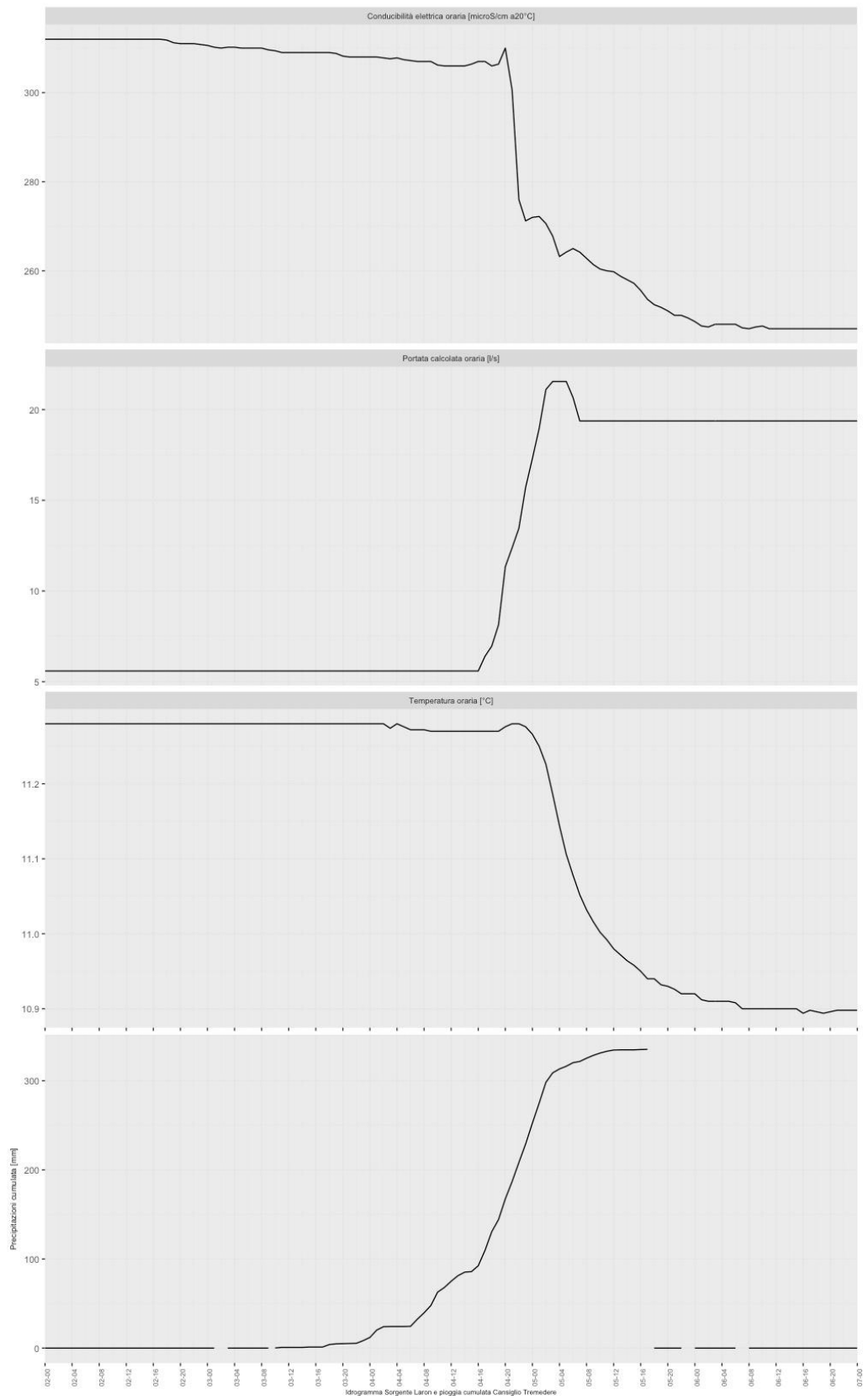
Portata da 3,2 l/s inizia ad aumentare alle 5 del 5/8 mentre alle 7 è di nuovo in calo (max 5,7 l/s). Visto che vi è un solo picco è probabile sia l'effetto delle piogge intense tra le ore 4 e le 6 e non i primi aumenti di intensità. Questo evidenzerebbe una risposta immediata all'arrivo dell'acqua piovana (ritardo 1 ora massimo).

La conducibilità inizia lentamente a calare dalla mezzanotte, ma è dalle 9 del 5/8 che il calo diventa significativo raggiungendo il minimo alle ore 11:00.

Evento del giorno 8/08/2021 inizia alle ore 15 con circa 6 mm in un'ora e poi altri 5 mm circa alle 20 per un totale di 12 mm. Questo evento, seppur iniziato con una portata bassa (3,2 l/s simile al precedente) sale velocemente a 5,5 l/s alle 20 e mantiene un deflusso di 5,2 l/s anche nell'ora successiva.

La conducibilità ha inizialmente un lieve aumento (che non si è evidenziato nell'evento precedente) in concomitanza al picco di piena e poi inizia a calare lentamente intorno alle 22 fino alle ore 2 del giorno 9 quando vi è un calo più significativo. Questo significa che l'acqua piovuta impiega 6 ore per arrivare alla sorgente.

Osservando l'insieme di questi 2 eventi si nota che dopo il calo di portata entrambi hanno una risalita della conducibilità come se fosse un effetto pistone secondario.



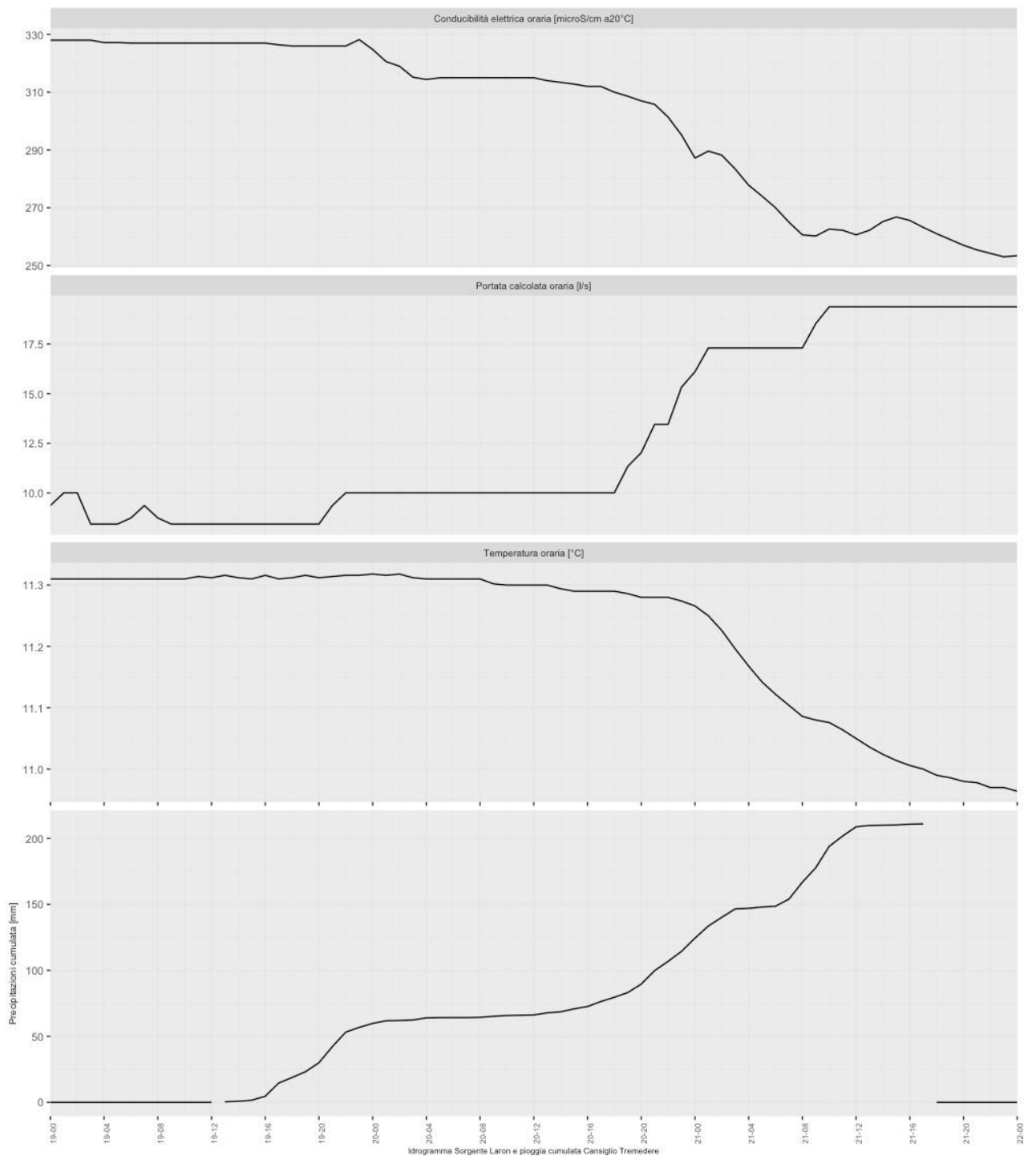
Evento dal 3/04 al 5/04/2019.

Debolissime precipitazioni (11:00-17:00; cumulata 1mm), poi lievissimo e incostante incremento (17:00-23:00; cumulata 8mm) con successivo incremento significativo (23:00-2:00 max 8 mm/h; cumulata 23,6mm), stasi nella notte del giorno 4 (2:00-6:00; cumulata 24mm), ripresa talora intensa (6:00-16:00 a 6,8mm/h; cumulata 92mm), forte intensificazione (16:00 – 3:00 del 5/4 a 18mm/h; cumulata 308,4)

e successivo calo e fine evento (3:00 del 5/4 - 9:00 del 5/4 a 3mm/h; cumulata 328mm).

Si parte da una portata di circa 6 l/s che inizia ad aumentare alle ore 17 del 4/4/2019 quando le precipitazioni cumulate sono di circa 109 mm e aumenta costantemente fino a 22,7 l/s, portata che si mantiene per 3 ore (2:00-5:00 del 5/4). Successivamente vi è un lieve calo e una condizione di stasi a 20 l/s circa per tutto il resto della giornata.

Un minimo effetto pistonaggio si attiva con portata superiore a 8 l/s (ore 19) e dura per un'ora (circa 30 mc defluiti), poi inizia il calo della conducibilità si protrae fino alle 2 del 6/4 su un plateau di portata di 19 l/s che infine si stabilizza sui 250 μ S/cm come si stabilizza anche la temperatura.



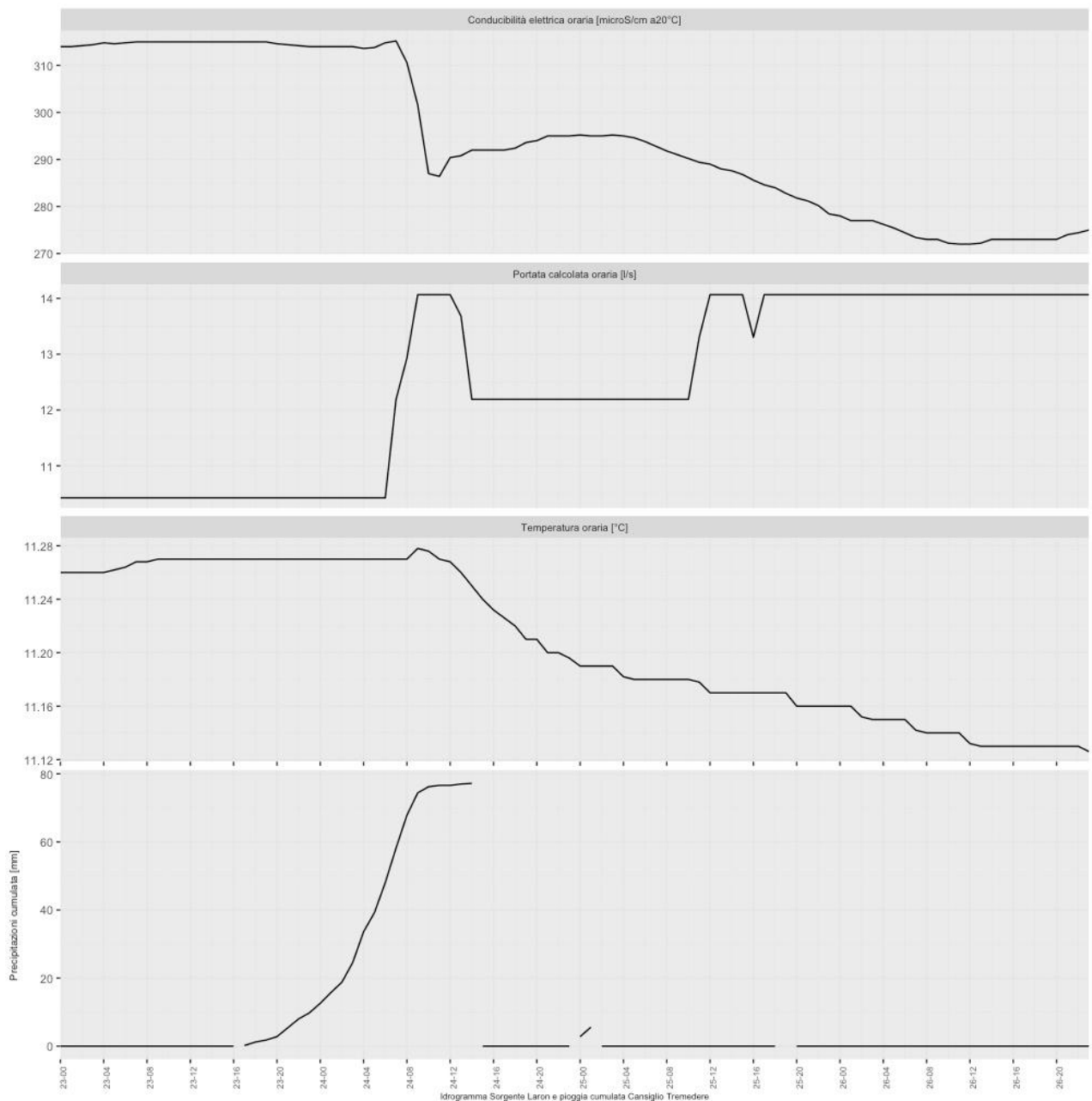
Evento 19-21/12/2019,

Inizio evento con bassa intensità (13:00-16:00 a 1mm/h; cumulata 4,6mm), aumento intensità fino a 12 mm/h (16:00-24:00 a 7mm/h circa; cumulata 59,8mm); poi ulteriore calo (24:00-16:00; cumulata 72,6mm), successivo incremento (16:00del 20/12 – 3:00 del 21/12; cumulata 146,6mm) e calo (3:00-6:00; cumulata 148,6mm); ulteriore intensificazione (6:00-12:00 a 10mm/h; cumulata 208,8 mm) e fine evento ore 17:00 con 211 mm totali.

Partendo da circa 8,7 l/s la portata inizia ad aumentare alle 20, 4 ore dopo aumento intensità, ma alle 22 si ferma e va in plateau (10,4 l/s) contemporaneamente al calo di pioggia fino alle 18 del giorno 20/12, 2 ore dopo che la pioggia ha ripreso intensità; dalle 18 inizia aumento significativo fino alle 21 (14 l/s), stasi per un ora e poi ancora aumento fino all'1 del giorno 21/12 (18,1 l/s); la portata rimane costante fino alle ore 8 e poi ulteriore aumento fino alle 10 (20,3 l/s) dove inizia altro plateau.

Dopo inizio aumento di portata c'è piccolo effetto pistone e poi calo conducibilità per sostituzione che resiste fino alle 3 del giorno 20 cioè dopo 5 ore dall'inizio del plateau, la conducibilità ha un plateau fino all'1 di notte del 21/12 e il suo successivo calo è interrotto due volte da modesti innalzamenti che si manifestano con 6 e 4 ore di ritardo rispetto all'aumento di portata. E' interessante notare come il secondo innalzamento abbia un'ampiezza maggiore rispetto al precedente e a quello di inizio evento, è probabile denoti l'arrivo di acqua più vecchia localizzata nei punti che necessitano di maggior carico idraulico per mantenere l'acqua in movimento (nelle 6 ore di innalzamento e calo della conducibilità sono defluiti 438 mc di cui 47,5 mc legati all'ultimo innalzamento di portata).

La temperatura ha avuto un calo significativo (tot 0.3°) dalle 22 del 20/12 con un rallentamento proprio nel momento di passaggio tra la portata di 18,1 e 20,3 l/s appena precedente al rialzo temporaneo di conducibilità.



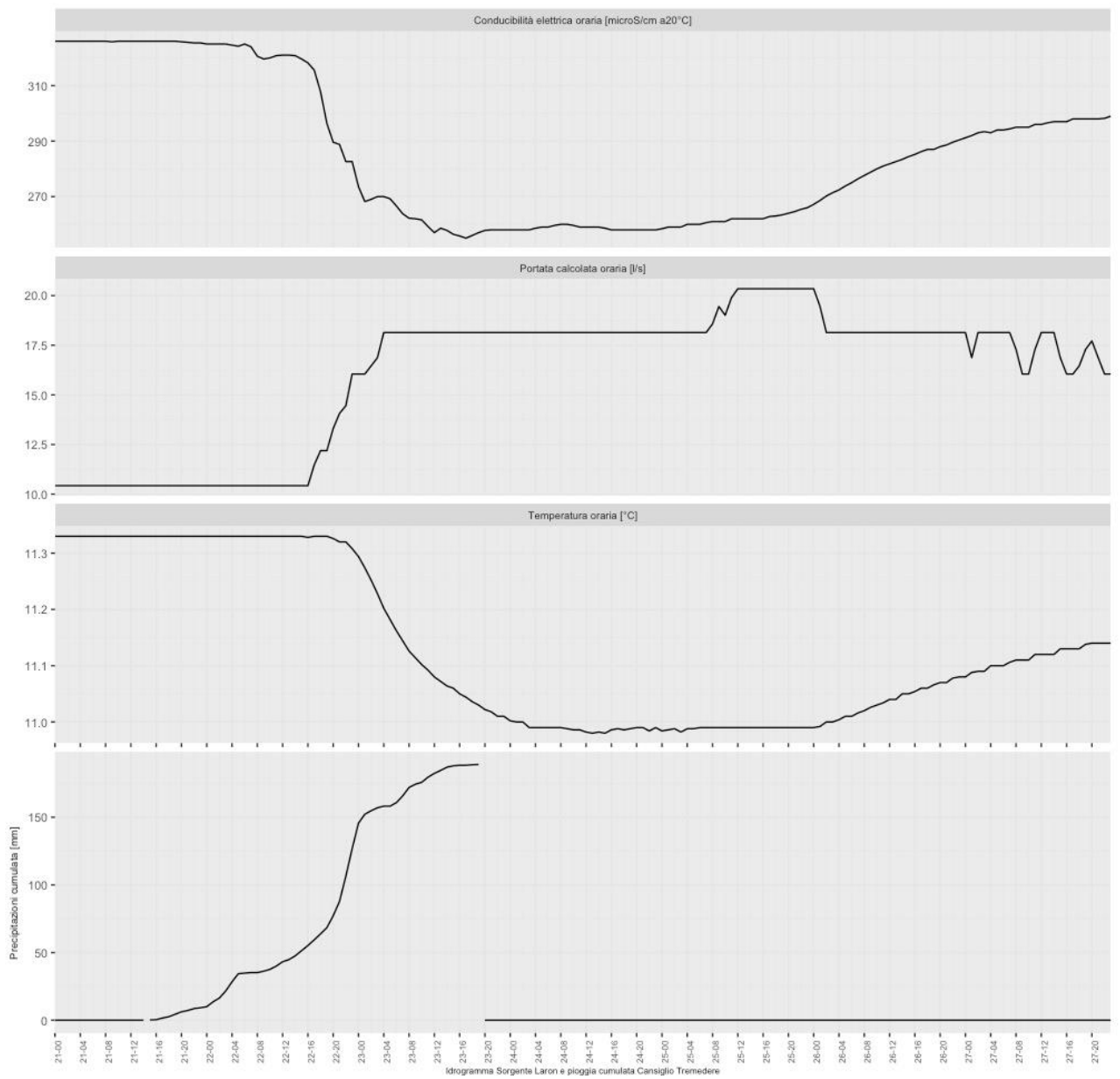
Evento 23-25/11/2018

Bassa intensità per le prime ore (17:00-20:00; cumulata 2,8mm), poi lieve incremento (20:00-2:00 a 2,7mm/h; cumulata 18,8mm); successiva intensificazione (2:00 – 9:00 a 8mm/h; cumulata 74,4mm) e coda dell'evento (9:00 -14:00; cumulata 77,2mm).

La portata iniziale è 10,4 l/s che aumenta a 12,2 l/s alle 7:00 del 24/11 e raggiunge i 14 l/s alle ore 9:00 e si mantiene fino alle ore 12:00. Il successivo calo porta ad un plateau sulla portata di 12 l/s (14:00 del 24/11 alle 10:00 del 25/11) a cui segue un successivo aumento fino a 14 l/s, portata che persiste per circa 3 giorni.

La conducibilità manifesta un breve e modesto aumento (5:00-7:00 del 24/11) durante la fase di aumento di portata seguito anche da un impercettibile un aumento di temperatura.

E' interessante notare come la portata sia aumentata nuovamente il 25/11 senza alcuna precipitazione, sembrano quindi attivi due percorsi, uno più veloce, che porta acqua poco mineralizzata e che si scarica subito ed un altro più lento che mantiene il carico idraulico per più tempo.



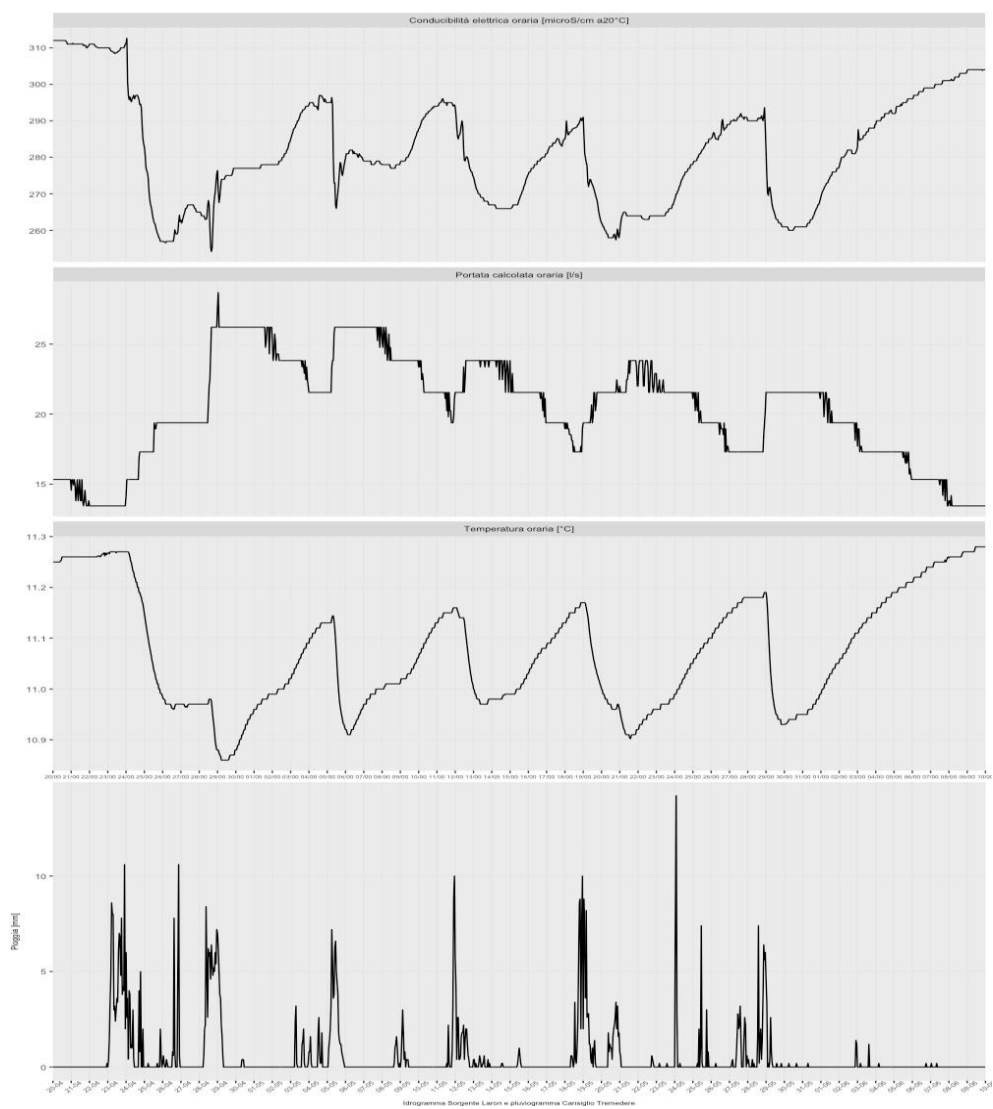
Evento 21– 23/01/2021

La pioggia inizia alle ore 14 del 21/01/2021 con lieve intensità fino alle 24:00 (cumulata 10mm); incremento fino alle ore 5:00 del 22/01 (cumulata 34,4mm a 4,8mm/h); bassissima intensità (5:00 – 10:00; cumulata 37,6mm); incremento intensità (il 22/01 dalle 10:00 – 19:00 a 3,4mm/h; cumulata 68,4mm); ulteriore incremento (19:00 – 01:00 del 23/01 a 13,9mm/h; cumulata 152,2mm); ultima fase a bassa intensità (01:00 – 19:00 a 2mm/h; cumulata 189mm).

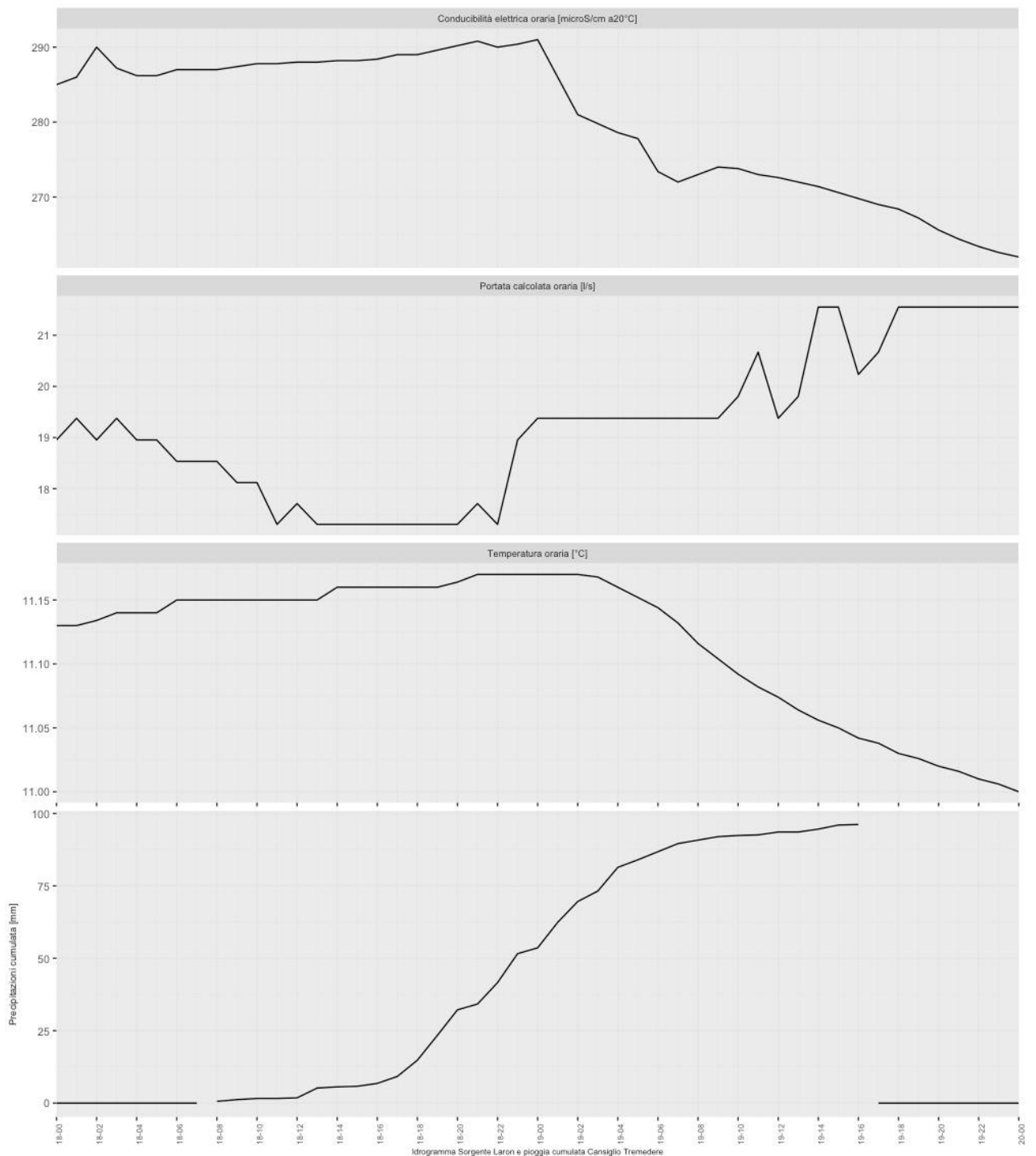
La portata iniziale di 10,4 l/s inizia ad aumentare tra le 16:00 e 17:00 del giorno 22/01 raggiungendo i 16 l/s alle ore 23:00 del 22/01 e dopo una parziale stasi fino all' 1:00 del 23/01 sale a 18 l/s alle 4:00. Si mantiene su questo valore fino alle 7:00 del 25/01 e poi torna ad aumentare raggiungendo i 20,3 l/s alle 12:00 dello stesso giorno e mantenendone il valore fino alla mezzanotte. Successivo calo 18,1 l/s raggiunto alle 2:00 del 26/01 e mantenuto fino all' 1:00 del 27/01; Da questo momento iniziano cicli diminuzione-aumento con aumento nella seconda parte della mattina inizio pomeriggio. Verificare se l'incremento da 18 a 20 l/s nella mattina del 25/01 con calo in piena notte e i cicli del giorno 27/01 non siano legati allo svuotamento di gallerie e sifoni sospesi piuttosto che allo scioglimento nivale (fenomeno però che sembra succedere anche in periodi non nevosi).

Conducibilità e temperatura hanno un andamento molto simile ma sfalsato di alcune ore. La conducibilità era in lievissimo calo fino alle 6:00, che si intensifica lievemente fino alle 16:00 del giorno 22/01 (318 $\mu\text{S}/\text{cm}$), da questo momento si ha un calo più repentino concomitante con l'aumento di portata e che si rallenta all' 1:00 e si esaurisce alle 17:00 del 23/01 (255 $\mu\text{S}/\text{cm}$); l'aumento ricomincia alle 02:00 del 25/01 che si fa significativo dalla mezzanotte (inizio calo della portata da 20 a 18 l/s).

La temperatura inizia a calare alle 20:00 del 22/01 (4 ore dopo la conducibilità) con minimo alle 04:00 del 24/01; l'aumento si ha nuovamente dalle 02:00 del 26/01 (circa 2 ore più tardi della conducibilità).



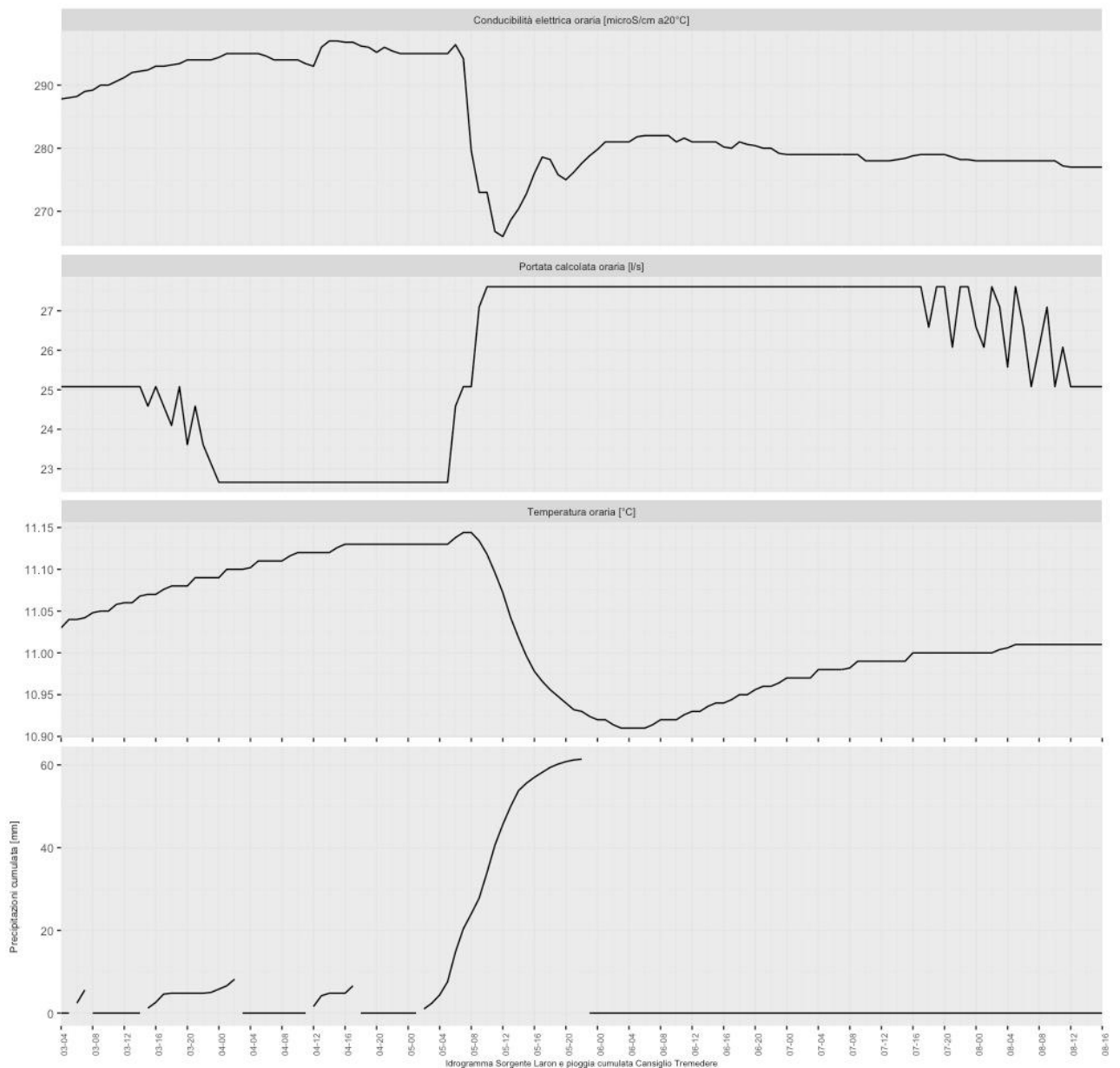
Periodo aprile giugno 2019 con frequenti modeste precipitazioni e portate superiori ai 15 l/s. Si osserva un andamento ciclico legato alle precipitazioni



Evento dal 18 al 20 maggio 2019.

Inizia a piovere alle 7 del 18 maggio con tenori bassi fino alle 17 (9mm cumulati, 1 mm ora) per aumentare poi fino alle 4 del 19 raggiungendo 81,4 mm cumulati (6-7 mm ora), poi intensità cala fino alle 16 del 19/5 con cumulata 96mm e intensità 1,2 mm/ora

Partendo dai **17 l/s** l'inizio di aumento di portata è alle 22 (5 ore con intensità sui 6mm/ora) del giorno 18 con una cumulata di 41,6 mm (o 32mm dal cambio di intensità) e raggiunge il plateau di 19,5 l/s a mezzanotte che mantiene fino alle 9 del 19/5. In questo momento, senza significativi cambi di intensità di pioggia la portata ha due picchi, sale prima a 20,5 l/s, poi scende e poi risale a plateau di 21,5 oltre la fine dell'evento di pioggia (ore 16 del 19/5, cumulata 96mm). Potrebbe essere la tracimazione di un sifone o l'apporto "laterale" (dato il contestuale iniziale aumento di conducibilità) visto che il condotto principale ha meno carico idraulico.



Evento del 5/5/2019. La portata è già superiore ai 20 l/s.

Tra il 3 e il 5 maggio si susseguono 4 eventi piovosi di cui i primi 3 con soli 20,4 mm totali. Il terzo evento ha inizio alle ore 2:00 del 05/05. Modesta intensità fino alle ore 4:00 (cumulata 4,4mm), poi intensificazione (4:00 – 14:00 a 4,9mm/h; cumulata 53,8mm); decremento fino alle 22:00 con cumulata totale 61,4mm.

Portata iniziale 22,6 l/s che aumenta a partire dalle 5:00 del 5/5 e lentamente sale fino a 27,6 l/s alle 10:00 del 5/05. Tale portata rimane costante almeno fino alle 17 del 7/5. Da questo momento fino alle 12:00 dell' 8/05 si susseguono 6 cicli diminuzione aumento con progressivo calo a 25 l/s.

La conducibilità ha un lieve aumento in concomitanza al terzo evento di pioggia senza aumento di portata ed un altro (ore 5:00 del 5/5) corrispondente all'inizio dell'aumento di portata. Vi è poi una diminuzione (296,4 – 266 μ S/cm) fino alle 13:00 del 5/5 a cui segue un ulteriore aumento fino alle 17:00 (278,6 μ S/cm) con calo fino alle 20:00 (275 μ S/cm) e successivo aumento (282 μ S/cm) alle 6:00 del 6/5; da qui in poi un lentissimo calo.

La temperatura ha un comportamento più semplice, alle ore 6:00 del giorno 5/5 ha un aumento (maggiore di quello lento dei giorni precedenti) corrispondente alla prima parte dell'aumento di portata (23-25 l/s), seguito poi dal repentino calo (fino alle ore 6:00 del 6/6) probabilmente dovuto all'ulteriore aumento di portata. Essa ritorna ad aumentare molto lentamente come prima dell'evento.

Si conferma l'effetto pistone tra i 23 e i 25 l/s con contemporaneo aumento delle 3 variabili che corrisponde ad un deflusso di 15 mc.

Unità Organizzativa Qualità Acque Interne
Via Rezzonico , 41
35131 Padova, (PD)
Italy
Tel. +39 049 7393 783
E-mail: orac@arpa.veneto.it



ARPAV

Agenzia Regionale
per la Prevenzione e
Protezione Ambientale
del Veneto

Direzione Generale
Via Ospedale Civile, 24
35121 Padova

Italy

tel. +39 049 82 39 301

fax. +39 049 66 09 66

e-mail: urp@arpa.veneto.it

e-mail certificata: protocollo@pec.arpav.it

www.arpa.veneto.it