

**Fabio Gemiti, Mario Galli, Maurizio Tentor¹, Luca Zini³, Chiara Calligaris³,
Luca Tringali², Michele Maris¹, Matteo Cavanna¹**

La conducibilità elettrica come strumento per stimare l'alimentazione del sistema carsico

- 1) Gruppo Speleologico Monfalconese "Amici del Fante"
- 2) Gruppo Speleologico "Talpe del Carso" - Jamarski Klub "Kraški Krti"
- 3) Dipartimento di Matematica e Geoscienze - Università degli Studi di Trieste

Introduzione

Una delle principali sfide nella ricerca speleologico idrogeologica è quella di stimare in modo il più possibile accurato l'entità (dimensione, estensione e sviluppo spaziale) e la localizzazione del reticolo ipogeo presente in un'area carsica. Quando l'attività esplorativa classica non risolve tutte le problematiche, l'indagine diretta deve essere integrata da ricerche geofisiche e da analisi idrochimiche.

In quest'ottica, nel 2015 è partita una proficua collaborazione tra gli speleologi del Gruppo Speleologico Monfalconese "Amici del Fante", quelli del Gruppo Speleologico "Talpe del Carso" - Jamarski Klub "Kraški Krti", alcuni studiosi indipendenti e i ricercatori del Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste, volta alla comprensione dei deflussi sotterranei e delle modalità di ricarica/esaurimento nel settore occidentale del Carso Classico.

In questi tre anni è stata pertanto sviluppata una metodologia che attraverso l'analisi della conducibilità elettrica delle acque superficiali e sotterranee permette di individuare l'origine delle diverse tipologie di acque presenti.

La misura della conducibilità elettrolitica è ampiamente utilizzata da almeno una cinquantina d'anni nello studio delle acque carsiche per la sua semplicità di acquisizione e per il basso costo della strumentazione necessaria. Da almeno una ventina d'anni esistono in commercio anche sistemi miniaturizzati (sonde multiparametriche) per l'acquisizione in continuo di conducibilità, temperatura e pressione idrostatica, che hanno fatto fare un salto di qualità alle indagini idrologiche nei territori carsici. A tale proposito va sottolineato che il Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università di Trieste ha iniziato fin dal 1995 un monitoraggio in continuo, mediante sonde multiparametriche, delle acque superficiali e sotterranee del Carso Classico, in territorio italiano e sloveno. La rete è stata implementata nel tempo anche grazie a progetti europei come il Progetto HYDROKARST e a tutt'oggi sono funzionanti una ventina di strumenti variamente ubicati. Nel sottosuolo del Carso isontino sono state posizionate sonde nella Grotta di Comarie (cat. FVG n. 1287), nel piezometro sloveno S1 presso Brestovica e, più recentemente e a cura dei gruppi speleologici locali, sul fondo dell'Abisso Samar di Riky (cat. FVG n. 4709) e nella Grotta del Proteo presso Sagrado (cat. FVG n. 1191).

Utilizzo della conducibilità nello studio delle acque carsiche

Modalità di alimentazione della falda carsica

La conducibilità (indicata qui di seguito con l'acronimo K20 in quanto riferita alla temperatura di 20°C) è utilissima per seguire l'evoluzione della composizione di un'acqua nel tempo, soprattutto quando proviene dalla miscelazione di acque con composizione ionica sufficientemente diversa.

E' questo il caso delle acque sotterranee che nel Carso Classico convergono verso le sorgenti del Timavo (Figura 1). Queste acque sono alimentate dall'infiltrazione carsica che interessa un'area vasta circa 750 kmq, con un contributo complessivo stimato in una ventina di mc/s, dalle acque del Reka che si inabissano a S. Canziano con portata media di circa 8 mc/s e dalle acque dell'Isonzo, che alimentano la circolazione sotterranea del Carso isontino con portata media stimata in 10 mc/s (Cucchi et al., 2015; Gemiti, 1984; Gemiti, 1996; Zini et al., 2013; Zini et al.,

2017).

Da un punto di vista geochimico le acque di infiltrazione carsica hanno un contenuto relativamente elevato di bicarbonato di calcio che, da solo, costituisce il 95% dei sali disciolti. Queste acque di percolazione, raccolte nelle cavità interessate dallo stillicidio, presentano una conducibilità a 20°C che varia generalmente tra 300 e 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a seconda dell'arricchimento in CO_2 delle acque piovane di percolazione.

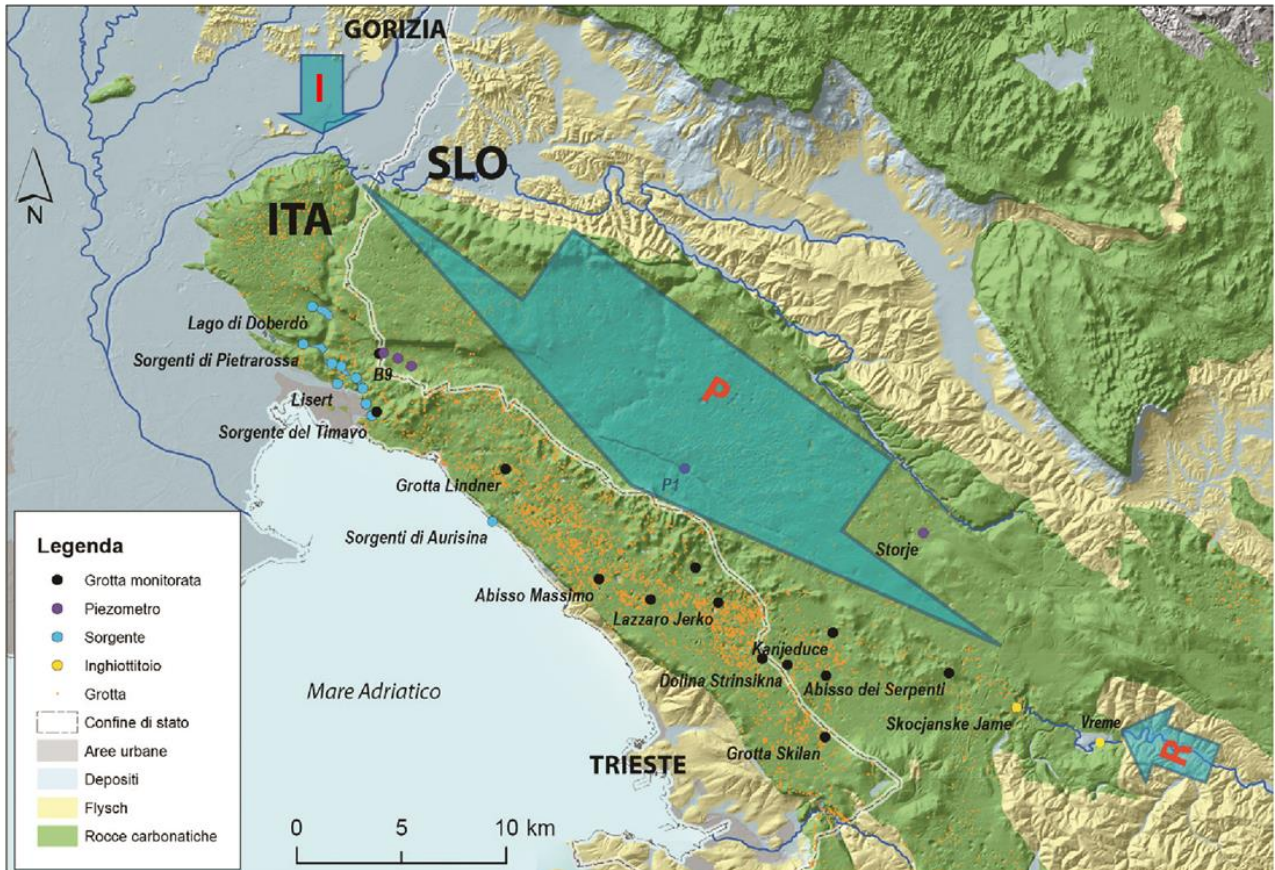


Figura 1 - L'idrostruttura del Carso Classico con i "punti acqua" notevoli. Le frecce schematizzano gli apporti dell'Isonzo da nord (I), quelli del Reka da SE (R) e quelli delle precipitazioni (P).

Le acque del Reka e dell'Isonzo sono invece meno mineralizzate.

Il Reka ha un carattere torrentizio e fluisce in un bacino prevalentemente arenaceo-marnoso, con forti variazioni di portata tra magra e piena. Il contenuto di sali disciolti varia molto, con valori di K_{20} compresi tra 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in magra (quando è sensibile l'apporto delle sorgenti carsiche della Bistrica) e 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in forte piena.

L'Isonzo ha portate decisamente maggiori e più costanti e di conseguenza vi sono meno variazioni di salinità e quindi di conducibilità. La K_{20} , dopo la confluenza con il Vipacco, ammonta, in base ai dati di letteratura, a 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le perdite verso il Carso, tra Gorizia, Gradisca e Sagrado, non avvengono per contatto diretto con i calcari, ma attraverso la falda freatica presente nei depositi alluvionali. In tal modo viene garantita una filtrazione del materiale in sospensione ed anche una maggiore omogeneità di composizione: per questo motivo le acque del Carso isontino (Doberdò, Pietrarossa e Sablici) si mantengono sempre limpide anche durante le maggiori torbide del sistema Isonzo-Vipacco. Apporti diretti e rilevanti del Vipacco attraverso condotti carsici verso il Carso isontino sono pertanto da escludere, dal momento che questo fiume, durante le piene, presenta elevatissimi valori di torbidità.

In definitiva la composizione delle acque sotterranee del Carso, a seconda che prevalga una delle tre componenti principali di alimentazione, ha caratteristiche diverse (Calligaris et al., 2018)

(Figura 2).

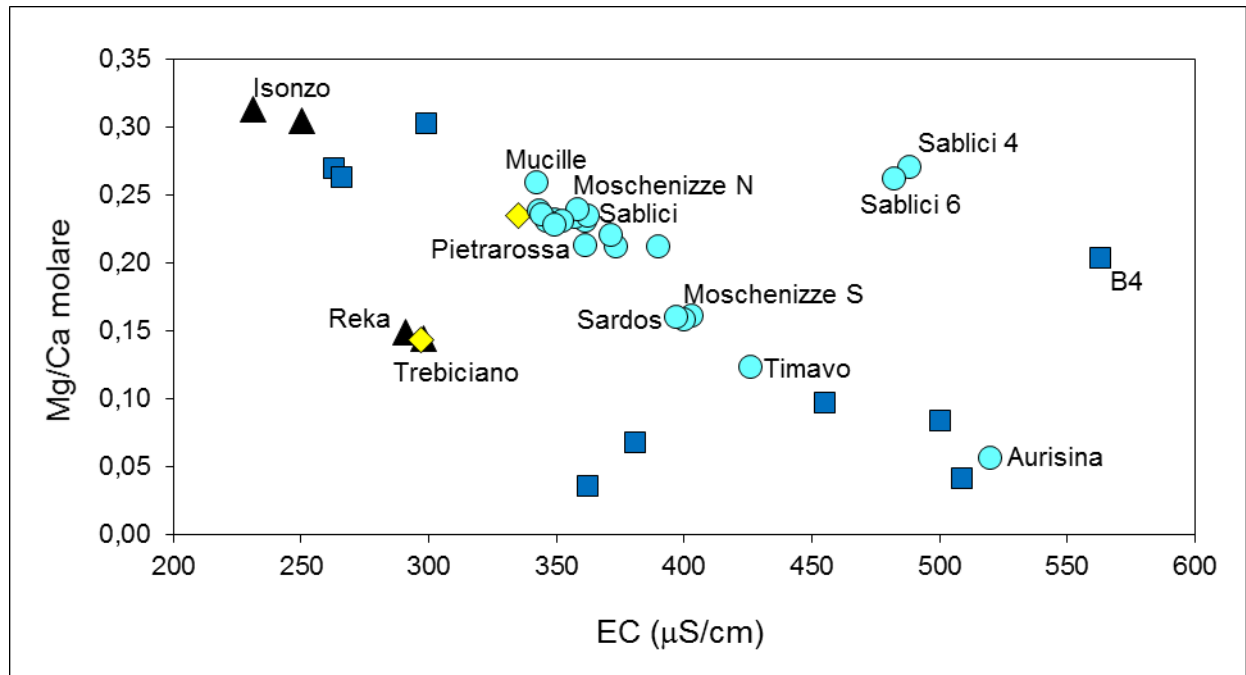


Figura 2 - Diagramma di correlazione Conducibilità Elettrica (EC) vs Mg/Ca (modificato da Cucchi et al., 2015). Al limite superiore sinistro si trovano le acque poco mineralizzate dell'Isonzo e con maggiore contenuto di magnesio, nella parte bassa destra le acque carsiche, con maggiore conducibilità e minor contenuto di magnesio. I triangoli neri rappresentano le acque superficiali, i quadrati blu sono i piezometri, ai cerchi azzurri corrispondono i punti di sorgenza, le losanghe gialle sono i laghi carsici.

Bilanci idrici

Il primo bilancio idrico dell'acquifero del Carso Classico è stato realizzato da Civita et al. (1995); successivamente Doctor et al. (2000) e Doctor (2008) hanno condotto studi di dettaglio in base a dati essenzialmente geochimici. Più di recente, Cucchi et al. (2015) durante il Progetto HYDROKARST hanno rivisto in parte i dati giovandosi anche di misure idrodinamiche. Nello specifico, già Doctor (2000 e 2008), durante le sue ricerche, diede corso ad analisi isotopiche di O^{18} e C^{13} sui campioni di acqua che portarono all'individuazione di 3 componenti principali di ricarica: le acque carsiche (rappresentate dall'acqua del piezometro B3 a Brestovica), le acque dell'Isonzo e la cosiddetta componente antropica, introdotta per giustificare la presenza di cloruri nelle acque estratte a Klarici (piezometro B-4) dall'acquedotto sloveno Kraški vodovod. Questa "componente antropica" è in verità argomento alquanto controverso, che richiederebbe maggiori approfondimenti (Gemitì, 2011).

Per ogni sorgente carsica e nei piezometri B-3 e B-4 presso Brestovica Doctor calcolò per i tre diversi regimi idrici (magra, morbida, piena) la percentuale di ciascun contributo. Ad esempio, per le sorgenti del Timavo il contributo dell'Isonzo, in percentuale, fu valutato rispettivamente del 57, 53, 49 %. Per gli stessi regimi fece emergere anche una stretta correlazione tra i valori isotopici e quelli di conducibilità.

Preso atto che alle risorgive e nei laghi carsici di Doberdò e Pietrarossa dopo precipitazioni di una certa entità aumenta la portata e contemporaneamente aumenta anche la K20 per gli apporti di acque carsiche, indotti dalle acque di neo infiltrazione, ci si è posti il problema di verificare se la composizione (espressa in termini di K20) delle acque carsiche, fosse relativamente costante. Per dare una risposta è stata analizzata la notevole mole di dati in continuo acquisiti nel tempo dalla rete di sonde multiparametriche e quelli acquisiti a partire dal 2015 che dall'attività di monitoraggio in discontinuo dal Gruppo di lavoro (Tabella 1).

	Misure in continuo con diversi				Misure in discontinuo					
	Periodo	Minimo valore medio	Media	Massimo valore medio	Periodo	Analisi N°	Regime	Minimo	Media	Massimo
Sorgenti										
Timavo	1999-2012			440	2017	1	piena			430
Sardos	2008-2011			440	2017	1	piena			460
Aurisina	2003-2011		450	520	2015	17	vario	440	470	500
Cavità										
Trebiciano	2004-2012			440	2015-2017	21	magra	440	460	480
Lindner	2005-2011	350	460	530						
Abisso Massimo	2008-2010	250	440	490						
Piezometri										
Opicina	2005-2012	400	440	480						
Metanodotto S1	2004-2005	510	550	570						
Storije					2013	2	vario	450	475	500
Ts 17					2015	6	vario	580	590	600
G07					2015	20	vario	410	490	600
S2					2015	11	vario	471	500	541
S21					2015	4	magra/nor.	470	485	500
B3 (Brestovizza)					1999-2000		vario		490	

Tabella 1 - Valori di K20 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) rilevati nelle acque carsiche in corrispondenza delle sorgenti, delle cavità e dei piezometri. Dall'analisi dei dati illustrati in questa tabella derivano i valori percentuali relativi ai diversi contributi e presentati in Tabella 2.

L'analisi svolta ha permesso di discriminare nei diversi punti di monitoraggio solo quelle serie di dati significativi delle condizioni idrologiche nelle quali prevale il drenaggio di acque carsiche.

Per le sorgenti di Aurisina, con alimentazione doppia (acque carsiche e Reka) sono stati scartati i periodi di piena nei quali prevale il contributo del Reka.

Per le acque del Sardos e del Timavo con alimentazione triplice (acque carsiche, acque isontine e Reka) sono state analizzate solo le piene provocate da forti precipitazioni concentrate sul bacino carsico e con modesti aumenti di portata del Reka.

Per le acque fluenti nell'Abisso di Trebiciano con alimentazione doppia (acque carsiche e Reka) sono stati presi in considerazione solo i periodi estivi di forte magra, quando le acque del Reka vengono totalmente inghiottite presso Vreme (Cucchi et al., 1981) e non influenzano i deflussi dell'Abisso. Le acque temporaneamente presenti sul fondo dell'Abisso Massimo e della Grotta Lindner appartengono alla tipologia delle acque carsiche fluenti in profondità che solo durante le grandi piene potrebbero risentire degli apporti del Reka.

Per quanto riguarda le acque di alcuni piezometri terebrati in occasione degli studi realizzati per le grandi opere pubbliche, si osserva che queste talvolta hanno conducibilità decisamente elevata, fino a massimi di $600 \mu\text{S}/\text{cm}$. In questo caso però si tratta di acque di percolazione stagnanti che non partecipano ai flussi sotterranei e quindi non rappresentative e scartate in queste analisi.

L'elaborazione dei dati relativi alle acque carsiche evidenziano che le K20 raggiungono valori di $430 \mu\text{S}/\text{cm}$ al Timavo (che però presenta anche una modesta componente di Isonzo e Reka), di $460 \mu\text{S}/\text{cm}$ al Sardos (con modesta presenza di acque isontine) e tenori fino a $490/500 \mu\text{S}/\text{cm}$ per le sorgenti di Aurisina, l'Abisso di Trebiciano e i piezometri presso Brestovica.

In conclusione, fatta eccezione per le acque di percolazione stagnanti, le acque carsiche fluenti hanno una composizione relativamente costante ed omogenea alla quale è stato attribuito il valore indicativo e caratterizzante di $470 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Sulla base dell'ampia bibliografia sulle acque dell'Isonzo è stato assegnato un valore indicativo e caratterizzante di $240 \mu\text{S}/\text{cm}$, mentre a quelle del Reka si possono assegnare valori indicativi e caratterizzanti in regime di morbida di $310 \mu\text{S}/\text{cm}$, in regime di magra di $350 \mu\text{S}/\text{cm}$ e in regime di piena di $200 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Esempio di applicazione della nuova metodologia per la stesura di un bilancio idrico

In Tabella 2 sono riportati i valori di K20 rilevati durante un periodo di forte magra verificatosi alla fine dell'estate 2016 e riferiti alle principali sorgenti che drenano le acque dell'intero altopiano del Carso.

	K20	Isonzo	Portate	Isonzo
	$\mu\text{S/cm}$	%	mc/s	mc/s
Doberdò	270	87	0,1	0,1
Sablici + Lisert	282	82	1,8	1,5
Sardos/MS	323	64	0,7	0,4
Timavo	352		12,6	
Reka	350		0,9	
Timavo – Reka	352	51	11,7	6,0
Totale				8,0

Tabella 2 - Bilancio idrico relativo al giorno 31 agosto 2016.

Per ogni sorgente è indicata la portata calcolata in base alle curve di deflusso registrate alle sorgenti del Timavo e di Sablici o stimata in base a dati pregressi (Zini et al., 2013). Sulla base dei valori proposti in Tabella 1, sono stati calcolati gli apporti dell'Isonzo in termini percentuali e di mc/s. Il contributo dell'Isonzo diminuisce percentualmente procedendo verso S-E, anche se comunque sono le sorgenti del Timavo il principale fruitore di tali apporti dal punto di vista quantitativo.

Conclusioni

Complessivamente, il Carso isontino nelle condizioni idrologiche di forte magra drena ben 8 mc/s di acque isontine, senza tener conto degli scarichi della sorgente Moschenizze Nord e dei prelievi dell'acquedotto di Brestovizza (complessivamente almeno 0,3 mc/s di acque dell'Isonzo). Si tratta di un'alimentazione importante soprattutto nei periodi di magra, che condiziona lo sviluppo speleogenetico dell'area occidentale del Carso Classico. I punti di ingressione delle acque della falda isontina nell'idrostruttura, come evidenziato anche da altre ricerche, sono probabilmente numerosi ed hanno generato un'articolata rete di dreni che convogliano le acque verso il complesso sistema sorgentifero. L'assenza di torbidità ed il simile comportamento idrodinamico di tutte le sorgenti del settore occidentale dell'idrostruttura è segno pertanto di una rete di dreni interconnessi, di dimensioni contenute, sviluppatasi prevalentemente al di sotto del livello del mare.

Nonostante i numerosi studi effettuati, si è comunque ancora lontani dall'aver una conoscenza approfondita dell'idrogeologia carsica nel settore nord-occidentale del Carso Classico. Ulteriori ricerche, da realizzarsi ad esempio attraverso l'utilizzo di traccianti naturali o artificiali ed esplorazioni speleosubacquee, permetterebbero di identificare e quantificare ancora più nel dettaglio i diversi contributi alle sorgenti e di gestire quindi l'utilizzo futuro della risorsa acqua in maniera sempre più consapevole e sostenibile.

Bibliografia

Calligaris C., Mezga K., Slejko F.F., Urbanc J., Zini L., 2018 - Groundwater characterization by means of conservative ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) and non-conservative. *Geosciences*, 8, 321; doi:10.3390/geosciences8090321.

($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) isotopic values: the Classical Karst Region aquifer case (Italy–Slovenia)

Cucchi F., Zini L., Calligaris C., 2015 - Le acque del Carso Classico, Progetto HYDROKARST. EUT, ISBN 978 - 88 - 8303 - 621 - 7.

- Cucchi F., Forti F., 1981 – La “Cattura” del Timavo superiore a Vreme. Atti e Mem. Comm. Grotte E. Boegan., 21: 55-64.
- Civita M., Cucchi F., Eusebio A., Garavoglia S., Maranzana F., Vigna B., 1995 – The Timavo hydrogeologic system: an important reservoir of supplementary water resources to be reclaimed and protected. Acta Carsologica, 24: 169-186.
- Doctor D.H., Lojen S., Horvat M., 2000 - A stable isotope investigation of the Classical Karst Aquifer: evaluating Karst groundwater components for water quality preservation, “Acta Carsologica”, Ljubljana, 29(1):79-92.
- Doctor D.H., 2008 - Hydrologic connection and dynamics of water movement in the Classical Karst (Kras) aquifer: evidence from frequent chemical and stable isotope sampling, “Acta Carsologica”, Ljubljana, 37(1):101-123.
- Gemiti F., 2011 - Origine e bilancio dei cloruri nelle acque del carso classico. Atti e Memorie della Commissione Grotte “E. Boegan”, 43:117-149.
- Gemiti F., 1984 - La portata del Timavo alle risorgive di S. Giovanni di Duino, “Annali del Gruppo Grotte dell'Associazione Trenta Ottobre”, Trieste, 23-41.
- Gemiti F., 1996 - Portata liquida e portata solida del Timavo alle risorgive di S. Giovanni di Duino, “Hydrores – Annuario 1995”, Trieste, 13:75-88.
- Zini L., Calligaris C., Zavagno E., 2013 - Classical Karst hydrodynamics: a sheared aquifer within Italy and Slovenia. In: Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water - Society Interactions. IAHS Publication 364, 499 - 504. ISSN 0144 - 7815.
- Zini L., Calligaris C., Cucchi F., 2017 - Il lacus timavi. Idrogeologia. Atti e Memorie della Commissione Grotte “E. Boegan”, 47: 63-76.