Provincia di Nuoro

Francesco Murgia

M O N T E A L B O

RICERCHE SPELEOLOGICHE E STUDI IDROGEOLOGICI NEL RIFUGIO DEL DRAGONE

Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia
Serie II vol. XXVII - 2013
(riedizione agosto 2020)

Lavoro coordinato dalla Provincia di Nuoro - Settore Ambiente - nell'ambito delle norme regionali sulla protezione delle risorse idriche

Redazione: Paolo Forti

Pubblicato con il contributo di:
Federazione Speleologica Sarda

Le fotografie, ove non diversamente indicato, sono dell'Autore

In copertina:

Il sifone a monte della Sala del Torrente nella grotta Locoli (Foto: Pierpaolo Porcu)
The sump upstream the River Chamber of Locoli cave (Photo: Pierpaolo Porcu)

La responsabilità di quanto affermato nel testo è dell'Autore

Tutti i diritti d'autore, di traduzione, elaborazione o riproduzione sotto qualsiasi forma, intera o parziale, sono riservati a:

Società Speleologica Italiana
via Zamboni 67 - 40126 Bologna

ISBN 978-88-89897-08-9

Finito di stampare nel febbraio 2013 da GRAFICHE A&B - Bologna

Rieditato nel 2020

M O N T E A L B O

RICERCHE SPELEOLOGICHE E STUDI IDROGEOLOGICI NEL RIFUGIO DEL DRAGONE

DI

FRANCESCO MURGIA

Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia
Serie II vol. XXVII - 2013
(riedizione agosto 2020)

INDICE

Presentazione …… pag. 6
Riassunto - Abstract …… pag. 7
Introduzione …… pag. 9
Inquadramento territoriale …… pag. 12
Geologia e tettonica …… pag. 14
Geomorfologia …… pag. 21
Climatologia …… pag. 24
Idrogeologia generale …… pag. 27
Osservazioni sugli elementi di bilancio idrologico …… pag. 30
Osservazioni sull'evoluzione del livello di base …… pag. 32
La sorgente di Fruncu 'e Oche …… pag. 38
Il sistema carsico di grotta Locoli …… pag. 41
Altre risorgenti temporanee nella valle di Locoli …… pag. 47
Idrodinamica dell'acquifero carsico …… pag. 50
Obiettivi, metodologia e strumentazioni …… pag. 50
Indagini sulle principali direttrici di deflusso sotterraneo …… pag. 53
Indagini sulle geometrie dell'acquifero concernenti il regime di magra …… pag. 62
Approfondimenti sulla compartimentazione dell'acquifero …… pag. 67
Ulteriori approfondimenti sulla compartimentazione dell'acquifero …… pag. 73
Ulteriori approfondimenti sulle modalità di deflusso idrico sotterraneo …… pag. 79
Approfondimenti sui circuiti di drenaggio carsico secondari …… pag. 84
Caratterizzazione della sorgente Fruncu 'e Oche …… pag. 90
Analisi di bilancio idrologico …… pag. 95
Dimensionamento della riserva regolatrice …… pag. 98
Dimensionamento della riserva geologica …… pag. 101
Caratterizzazione generale dell'acquifero del Monte Albo …… pag. 110
Implicazioni sulla pianificazione territoriale locale …… pag. 112
Elementi d'analisi territoriale connessi alla valorizzazione dell'acquifero del Monte Albo …… pag. 113
Valorizzazione dell'acquifero: le soluzioni tecniche allo studio …… pag. 117
Implicazioni sulla gestione delle riserve idriche strategiche nelle aree mediterranee …… pag. 119

Ringraziamenti …… pag. 120
Bibliografia …… pag. 121

Presentazione

E' oramai assodato che gli studi idrogeologici in ambiente carbonatico sono molto complessi, soprattutto a causa dell'estrema disomogeneità degli acquiferi ospitati, che rende praticamente impossibile una loro modellizzazione prescindendo dall'evoluzione carsica di ognuno di loro.

Ma tale evoluzione, e conseguentemente la distribuzione dei vuoti all'interno del massiccio, la loro gerarchizzazione e la loro effettiva interconnessione, sono cose estremamente difficili, se non del tutto impossibili, da ricostruire in maniera esclusivamente teorica.

Sono infatti sempre necessarie lunghe, e spesso complesse, esplorazioni dirette, che possono essere portate avanti esclusivamente da persone allenate e altamente qualificate: gli speleologi.

Per questo motivo la componente "speleologica" è assolutamente fondamentale ogniqualvolta si voglia definire in dettaglio il loro comportamento idrodinamico ed idrochimico.

Questo è ancora più vero nel caso, non molto frequente in realtà, che si possa avere un accesso diretto alla zona freatica, come invece è avvenuto per l'acquifero presente nel Monte Albo.

Le importanti esplorazioni speleo subacquee, infatti, con il ritrovamento di vastissimi ambienti completamente sommersi, hanno permesso di dare un'interpretazione logica, e non del tutto scontata, ai dati idrodinamici ed idrochimici raccolti per anni a livello dei recapiti.

In questo modo è stato possibile avanzare alcune ipotesi gestionali che, se confermate da ulteriori prove mirate, potrebbero permettere, in un futuro prossimo, di risolvere in modo brillante il problema di un maggior approvvigionamento idropotabile per la costa nord orientale della Sardegna, senza alterarne in modo permanente le riserve geologiche. Oggigiorno, infatti, il suo sviluppo turistico è in parte condizionato e frenato dalla scarsità soprattutto qualitativa dell'offerta idrica disponibile nei mesi estivi.

La soddisfazione di poter pubblicare nell'ambito delle Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia questo importante studio idrogeologico è anche maggiore perché sono passati orami quasi 30 anni da quando, in questa collana allora ai primi passi, veniva presentato un primo importante studio idrogeologico che, anche allora, trattava di un'area carsica della Sardegna: l'anello metallifero dell'Iglesiente.

Paolo Forti

Direttore dell'Istituto Italiano di Speleologia

Riassunto

Il presente lavoro è il frutto delle attività di ricerca e di analisi idrogeologica svolte dal Settore Ambiente della Provincia di Nuoro nel quadro generale delle norme regionali che attribuiscono agli enti intermedi competenze specifiche sulla protezione delle risorse idriche.

In quanto segue è illustrato lo studio idrogeologico di dettaglio dell'acquifero carsico del Monte Albo, una dorsale montuosa di calcari mesozoici che si estende per oltre 50 km^2 nel nord-est della Sardegna. Il monitoraggio delle acque sotterranee, protrattosi ininterrottamente per oltre tre anni, è stato condotto con numerosi test di tracciamento geochimico effettuati sui deflussi idrici in diverse porzioni dell'acquifero ed in differenti condizioni idrodinamiche. Lo studio è completato dall'analisi dei parametri di bilancio idrogeologico effettuata sulla base di un monitoraggio puntuale degli afflussi e dei deflussi idrici registrati nel bacino di alimentazione. L'impianto analitico adottato ha potuto disporre di oltre 1.200.000 dati di monitoraggio, la cui elaborazione ha permesso di identificare le diverse aree di infiltrazione, di determinare le direzioni di deflusso sotterraneo e di individuare una precisa suddivisione dell'acquifero che consente di programmare l'uso sostenibile di una riserva geologica valutata in oltre 25 Mm^3.

I risultati del presente studio sono stati raggiunti anche grazie al supporto delle associazioni speleologiche locali ed al lavoro degli speleosub che, durante le loro esplorazioni, hanno contribuito a descrivere le condotte carsiche ipogee, a valutare le direzioni dei flussi di acqua nelle grotte ed a posizionare alcuni sensori di monitoraggio nelle porzioni più inaccessibili del carso saturo.

Parole chiave: acquifero carsico, esplorazione speleologica, fluoresceina, Tinopal® CBS-X, fluorimetro, sensori multiparametrici, idrodinamica sotterranea, riserva regolatrice, riserva geologica, fabbisogno idrico.

Abstract

This research is the result of a hydrogeological analysis co-ordinated by the Environment Department of Nuoro Province on the basis of a general framework of regional laws that provide expertise to intermediate institutions on the water resources protection.

It consist in the detailed hydrogeological study of the Monte Albo karst aquifer, a Mesozoic limestones mountain ridge which extends over 50 km^2 in the north-east of Sardinia. The monitoring of groundwater, which lasted for more than three years, was made by means of several geochemical dye tests performed in different aquifer and in different hydrodynamic conditions. The research is completed by an analysis of the water balance by means a precise monitoring of inflows and outflows recorded within the feeding basin. The analysis is based on 1,200,000 monitoring data, whose processing allowed to identify the different inlets, to determine the groundwater direction flow and to identify a well-defined aquifer division thus allowing to plan the best sustainable use of the geological reserves, which were estimated over 25 Mm^3.

The results of this study were obtained also thanks to the support of local caving associations and cave divers that, during their explorations, have helped to describe the karst underground galleries, to assess the underground water flows and to locate monitoring sensors in some the most inaccessible portions of saturated karst.

Keywords: karst aquifer, caving exploration, fluorescein, Tinopal® CBS-X, fluorometer, multiparameter sensors, underground hydrodynamics, regulating reserves, geological reserves, water needs.

Introduzione

Il dragone, emblematico Signore delle caverne più profonde, è anche il simbolico custode del buio e del vuoto, due tra gli archetipi più terribili che, da sempre, tormentano l'animo umano (Fig. 1). Ma per gli speleologi confrontarsi con il buio ed il vuoto delle grotte è l'occasione per saggiare un piacere sublime, fatto di forti emozioni e scenari imponenti, la cui esplorazione consente di descrivere gli ultimi paesaggi incogniti rimasti sulla Terra (Foto 1).

Fig. 1: il simbolismo di San Giorgio e il Drago in un dipinto di Paolo Uccello - *symbolism of St. George and the Dragon in a painting by Paolo Uccello*

Foto 1: ceselli di roccia nella grotta Su Bentu (Foto: Team La Salle, Danieli - Renda - Chauvet) - *rock chisels in Su Bentu cave (Photo: Team La Salle, Danie i - Renda - Chauvet)*

In ciò che segue si illustrano le esplorazioni speleologiche e le indagini idrogeologiche condotte proprio in una di quelle terre incognite ancora celata nel cuore profondo della Sardegna.

Molte generazioni di speleologi, dalla metà del secolo scorso, si sono mosse sulle tracce del dragone nascosto nel Monte Albo e già in tantissimi hanno bussato agli innumerevoli accessi che conducono alle porzioni più profonde del suo rifugio. Come spesso accade, però, a fiaccare gli entusiasmi degli speleologi si sono parate innanzi, nel buio, nuove porte ancora chiuse, in forma d'acqua profonda o di massi fittamente accatastati.

Ma il dragone del Monte Albo non ha mai smesso di manifestare la sua presenza, inghiottendo voracemente le poderose piene che percorrono la piana di Su Bufalu o risputando con violenza, dalla grotta di Locoli e dalla sorgente di Fruncu 'e Oche, le acque delle alluvioni più impetuose (Foto 2).

Foto 2: piena sul Rio Locoli (Foto: Pierpaolo Murgia) - *flood waters of Rio Locoli (Photo: Pierpaolo Murgia)*

Nel 2007, dopo alcuni decenni di sostanziale oblio, è ripartita l'esplorazione nel cuore della montagna e gli speleologi dello Speleo Club di Nuoro e dello Speleo Club Oristanese si sono trovati assieme a chi scrive, speleologo anch'esso e responsabile scientifico dei progetti ambientali della Provincia di Nuoro, per riprendere la ricerca nel rifugio del dragone e lì cercare alcune risposte ai tanti segreti celati nel profondo delle grotte (Foto 3).

Foto 3: speleologi in azione nella grotta Locoli (Foto: Angelo Naseddu) - *cavers in Locoli cave (Photo: Angelo Naseddu)*

In oltre quattro anni di attività è stato fatto un lavoro duro, entusiasmante e coinvolgente che si è svolto aggiungendo chilometri di rilievi alle precedenti elaborazioni topografiche, trasportando attrezzature speleosubacquee e posizionando sensori di monitoraggio oltre i sifoni di grotta "Locoli", individuando i refoli di vento che escono dalle fratture nei versanti calcarei e dischiudendo gli accessi degli inghiottitoi nelle valli carsiche.

L’approccio all’analisi utilizzato in questo studio, impostato sulle osservazioni dirette della ricerca speleologica e su un monitoraggio costante dei parametri chimico-fisici dell’acquifero, ritengo sia stato più efficace che il tentare di costringere pedissequamente quell’acquifero nella fuscella di un modello predefinito così come si farebbe con la ricotta, notoriamente ben più malleabile del calcare: le peculiari evoluzioni geologiche e geomorfologiche a cui è soggetto ciascun sistema carsico, infatti, sono determinanti nel comporre i dettagli delle condizioni idrodinamiche che caratterizzano un determinato acquifero ed esclusive dell’area in cui tali evoluzioni si sono compiute.

Inquadramento territoriale

Il Monte Albo, localizzabile nella porzione nord-orientale della Sardegna in prossimità della costa tirrenica, si estende per circa 60 Km^2 lungo una direttrice prevalente SW-NE (Fig. 2). Si tratta di un rilievo prevalentemente calcareo interessato da diffuse morfologie di origine carsica e caratterizzato da una lunga linea di cresta, estesa per oltre 20 km, che discende raramente al di sotto dei 1000 metri. Le cime più elevate sono Punta Catirina e Punta Turuddò, entrambe poste a 1.127 m di quota, e Punta Cupetti (1029 m s.l.m.), che domina sul paese di Siniscola. Il versante nord-occidentale del Monte Albo (Foto 4) è caratterizzato da una lunga falesia che sovrasta un complesso sistema vallivo impostato su rocce impermeabili mentre quello sud orientale (Foto 5) si articola in pianori allungati in direzione SW-NE (Artudè, Su Bufalu, Valle di Locoli) tra loro separati da tratti di falesia o da profonde codule.

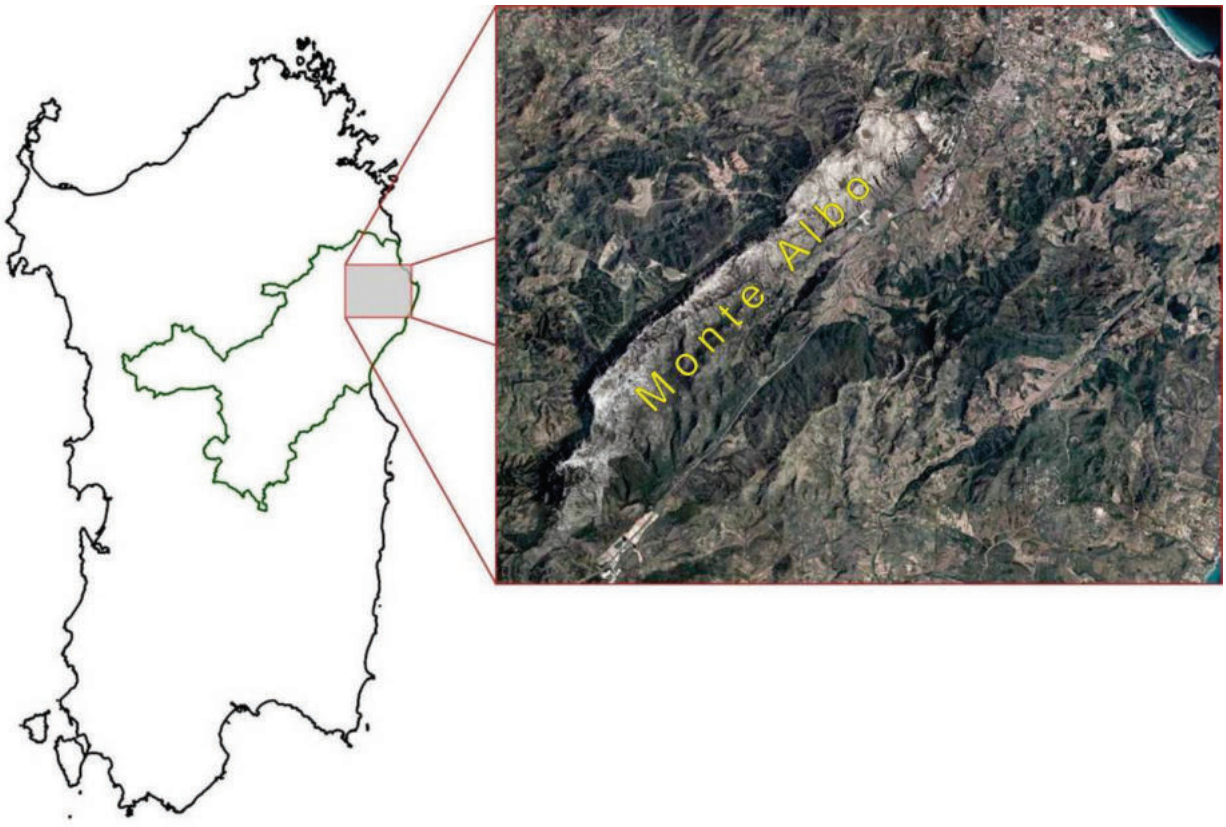

Fig. 1: inquadramento territoriale dell'area in studio - *territorial location of the study area*

Nella cartografia I.G.M. redatta in scala 1 : 100.000, il Monte Albo ricade interamente nel foglio 195 Orosei, mentre in quella in scala 1 : 25.000 l'area occupa buona parte del foglio 195 III N.O. "Lula" e 195 S.E. "Siniscola" ed una piccola porzione dei fogli 195 III N.E. "Monte Senes" e 195 IV S.O. "Cantoniera Janna 'e Ruche". Il Monte Albo è delimitato da due vie di comunicazione principali: la SS 131 d.c.n. Nuoro - Olbia, localizzabile alle pendici sud orientali del rilievo, e la strada Lula - Cantoniera S. Anna, che taglia in quota i versanti nord occidentali delle assise calcaree.

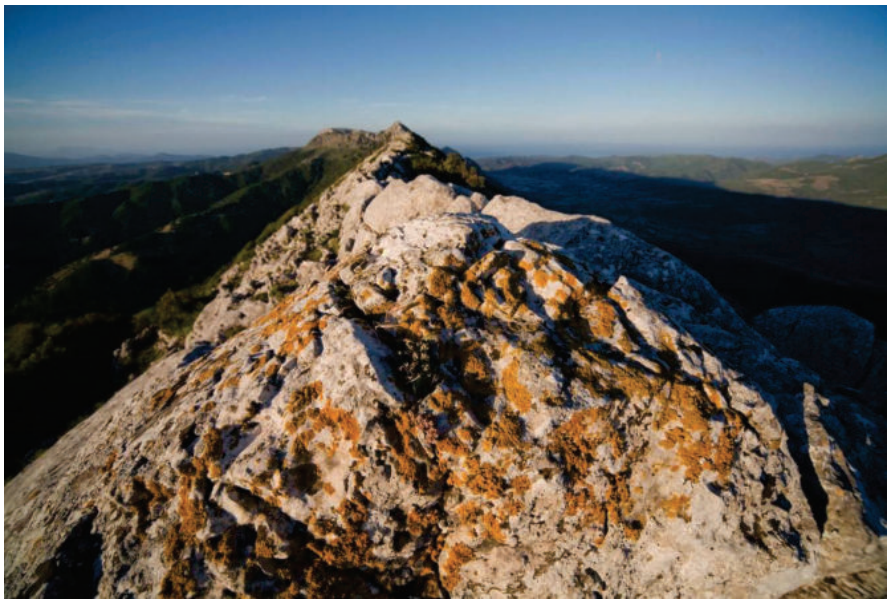

Foto 4: la cresta e le falesie del versante occidentale del Monte Albo (Foto: Domenico Ruiu) - *ridge and cliffs on the western slope of Monte Albo (Photo: Domenico Ruiu)*

Foto 5: le articolate morfologie del versante orientale del Monte Albo - *complex morphologies on the eastern slope of Monte Albo*

Geologia e tettonica

La successione stratigrafica dei terreni presenti nella Sardegna nord-orientale (Fig. 3) presenta, alla base, le unità litologiche appartenenti al complesso cristallino-metamorfico del Paleozoico, costituite principalmente da micascisti e filladi in facies a scisti verdi (Foto 6), entro le quali si sono intruse le plutoniti tardotettoniche appartenenti al ciclo orogenetico ercinico (CALVINO ET ALII, 1958; CALVINO ET ALII, 1972; CARMIGNANI ET ALII, 1986).

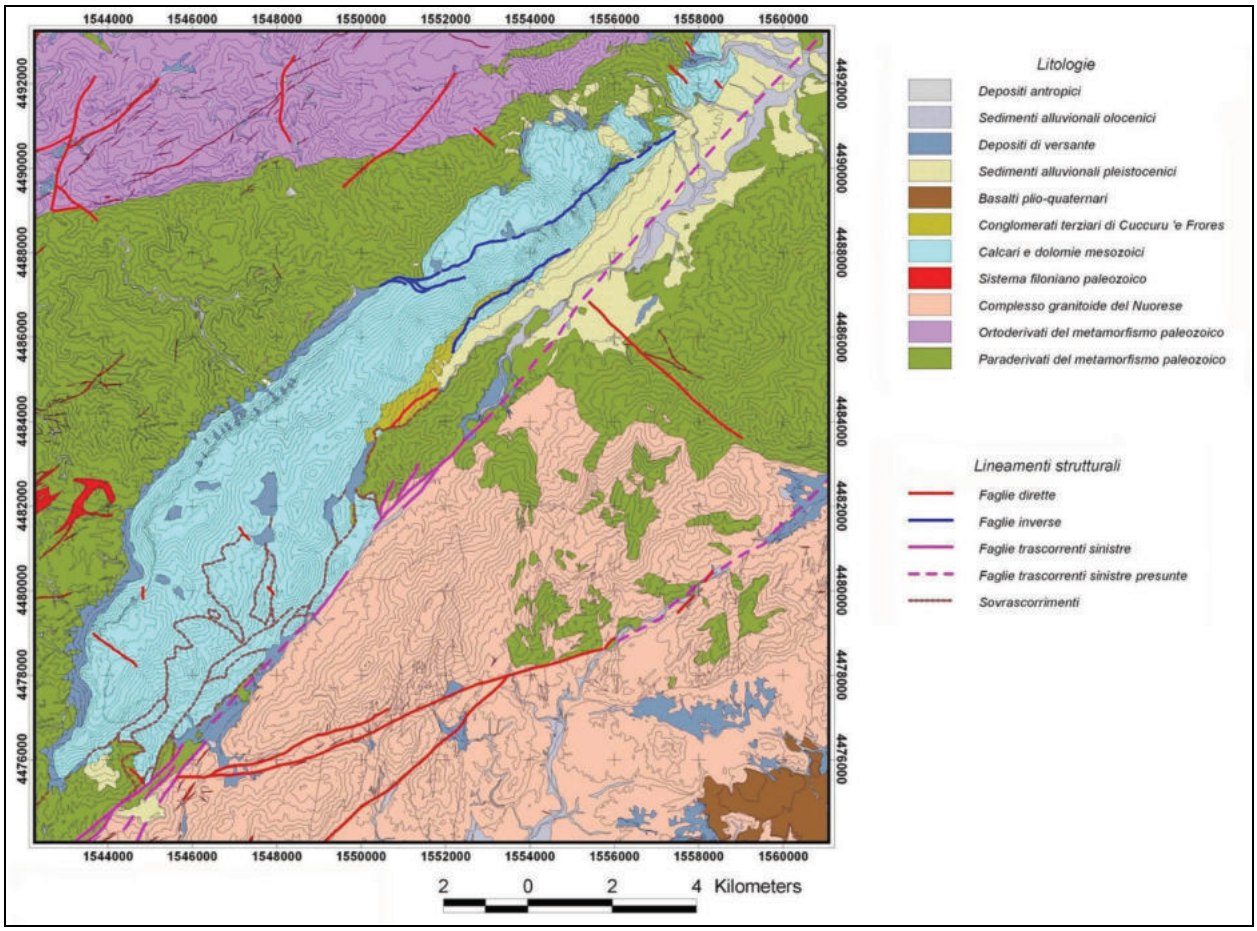

Fig. 3: carta geologica dell'area in studio (Fonte dati: Provincia di Nuoro) - *geological map of the survey area (Data: Provence of Nuoro)*

Foto 6: scisti del basamento paleozoico - *schists of the paleozoic basement*

Sopra i terreni paleozoici poggiano, in completa discordanza, i terreni carbonatici mesozoici alla base dei quali sono presenti brecce di rocce cristalline immerse in una matrice arenacea. A questi terreni fanno seguito dolomie, calcari dolomitici ed arenacei del Giurese medio, sormontati da calcari chiari del Giurese superiore, talora ben stratificati ma più spesso in facies biohermali, caratterizzati da associazioni fossili di coralli, alghe e gasteropodi (VARDABASSO, 1948; VARDABASSO, 1959). La sedimentazione cretacea comincia con un orizzonte di calcareniti a grana fine poco cementate, attribuito al Cretaceo inferiore, al quale subentrano calcareniti compatte attribuite al Cretaceo inferiore-medio e superiore. Sedimenti di età cretacea, costituiti da marne calcaree ed arenarie, intensamente tettonizzati e dislocati rispetto ai litotipi giuresi, sono presenti nelle ultime propaggini settentrionali del Monte Albo (CHABRIER, 1970; DIENI ET ALII, 1987). La potenza complessiva delle bancate calcaree mesozoiche si aggira attorno agli 800 metri e le direzioni delle loro immersioni si sviluppano principalmente verso i quadranti orientali (Foto 7). Di grande importanza in relazione all'evoluzione geomorfologia ed idrogeologica recente dell'area in esame sono le formazioni tardo-terziarie e quaternarie che bordano i calcari mesozoici, localizzabili in prevalenza lungo il versante SE del Monte Albo. In alcune zone limitate (valle del Riu Locoli, Piana di Su Bufalu, Tanca Altara), sono presenti depositi di un conglomerato poligenetico fortemente cementato, con elementi calcarei prevalenti e cristallino-metamorfici molto arrotondati, ai quali è attribuita un'età eocenica (DIENI & MASSARI, 1965; DIENI & MASSARI, 1985). La formazione più rappresentata, invece, è costituita da alluvioni ciottolose terrazzate attribuite al Pleistocene la cui sedimentazione ha interessato anche alcuni degli ambienti carsici ipogei presenti nell'area (Foto 8).

Foto 7: i calcari del Monte Albo presso la Piana di S. Marco - *Monte Albo limestones at San Marco plain*

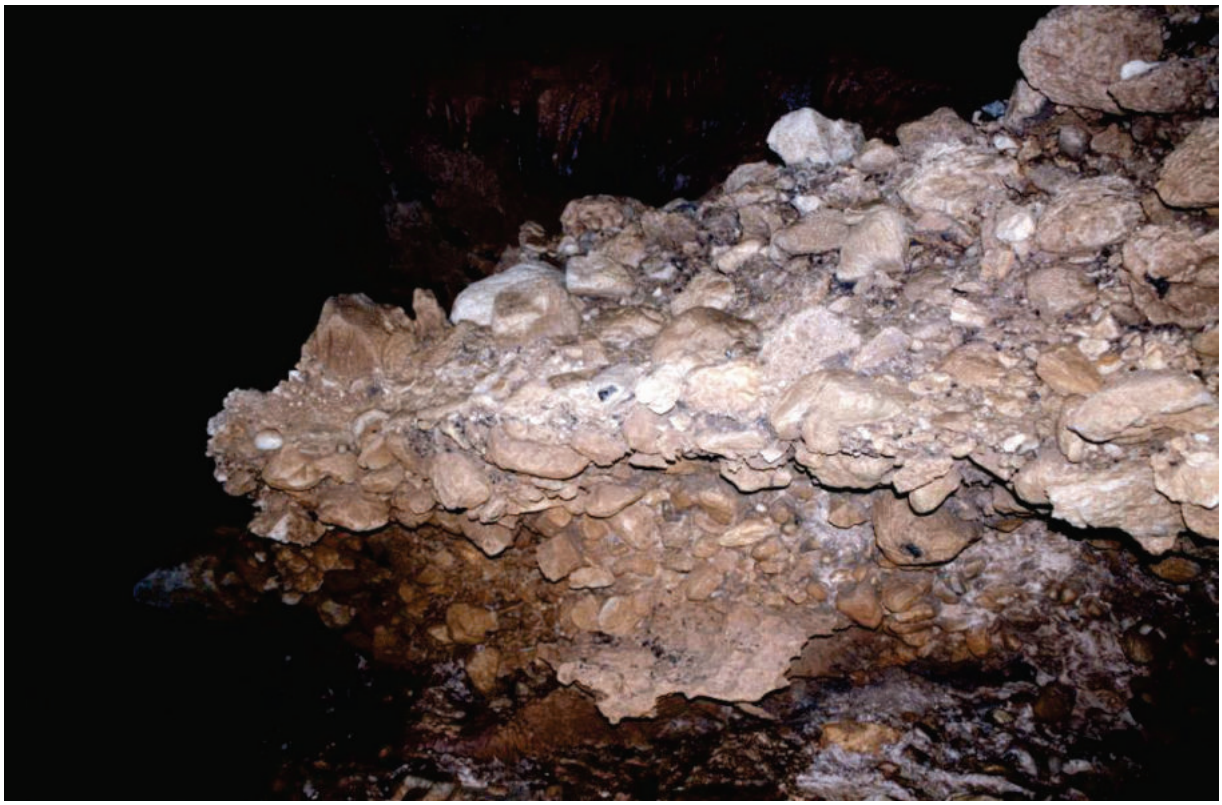

Foto 8: depositi conglomeratici nella grotta Locoli - *conglomerates in Locoli cave*

Questi depositi sono caratterizzati dalla prevalenza di clasti di grandi dimensioni e molto arrotondati, provenienti dall'erosione di ortogneiss e micascisti paleozoici, immersi in una matrice sabbioso-limosa ed intercalati a sottili lenti e livelli argillosi. La potenza di questi depositi è valutabile in affioramento, al di sopra dei rilievi paleozoici ubicati a Sud del Riu Siniscola, tra i 10 ed i 15 metri (Foto 9). Una terebrazione per ricerche idriche, effettuata nei primi anni '90 dall'Ente Sardo Acquedotti e Fognature in prossimità della sorgente di Fruncu 'e Oche, ha attraversato le alluvioni per circa 50 metri senza incontrare il tetto della formazione sottostante (MURGIA, 1996).

Foto 9: depositi sedimentari pleistocenici intagliati dal Rieddu Su Manganu - *pleistocene sediments trenched by Rieddu Su Manganu*

Le pendici delle assise carbonatiche sono interessate da accumuli di frana che alcuni autori ritengono connessi con la morfogenesi gravitativa plio-quaternaria (DIENI & MASSARI, 1970), addolcite, soprattutto nel versante orientale, da conoidi e depositi di detrito recenti costituiti in prevalenza da elementi di natura calcarea (Foto 10). Nelle zone di fondovalle, inoltre, sono presenti lembi di una copertura costituita da minute brecce calcaree di origine crioclastica generalmente poco cementate, la cui genesi è probabilmente riconducibile all'erosione delle assise carbonatiche prodotta delle azioni di gelo e disgelo avvenute durante le oscillazioni climatiche del Quaternario.

Foto 10: depositi alluvionali eterogenei nel versante orientale del Monte Albo - *heterogeneous alluvial deposits on Monte Albo's eastern slope*

La tettonica oligo-miocenica ha fortemente dislocato le coperture carbonatiche del Monte Albo dando luogo, lungo il versante orientale, alla formazione di una serie di *thrust* sintetici connessi ad una fascia di transpressione di tipo "*flower*" avente

direzione N 60° (CARMIGNANI ET ALII, 1992; PASCI, 1997) (Fig. 4). La principale dislocazione presente nell'area connessa a tali eventi, la Faglia di Nuoro, d'importanza regionale, mette in contatto i graniti di Monte Senes con i calcari del Monte Albo in prossimità di Monte Pizzinnu, dove le stratificazioni carbonatiche assumono un andamento sub-verticale incuneandosi lateralmente ai graniti paleozoici (OGGIANO, PASCI & FUNEDDA, 1998) (Foto 11).

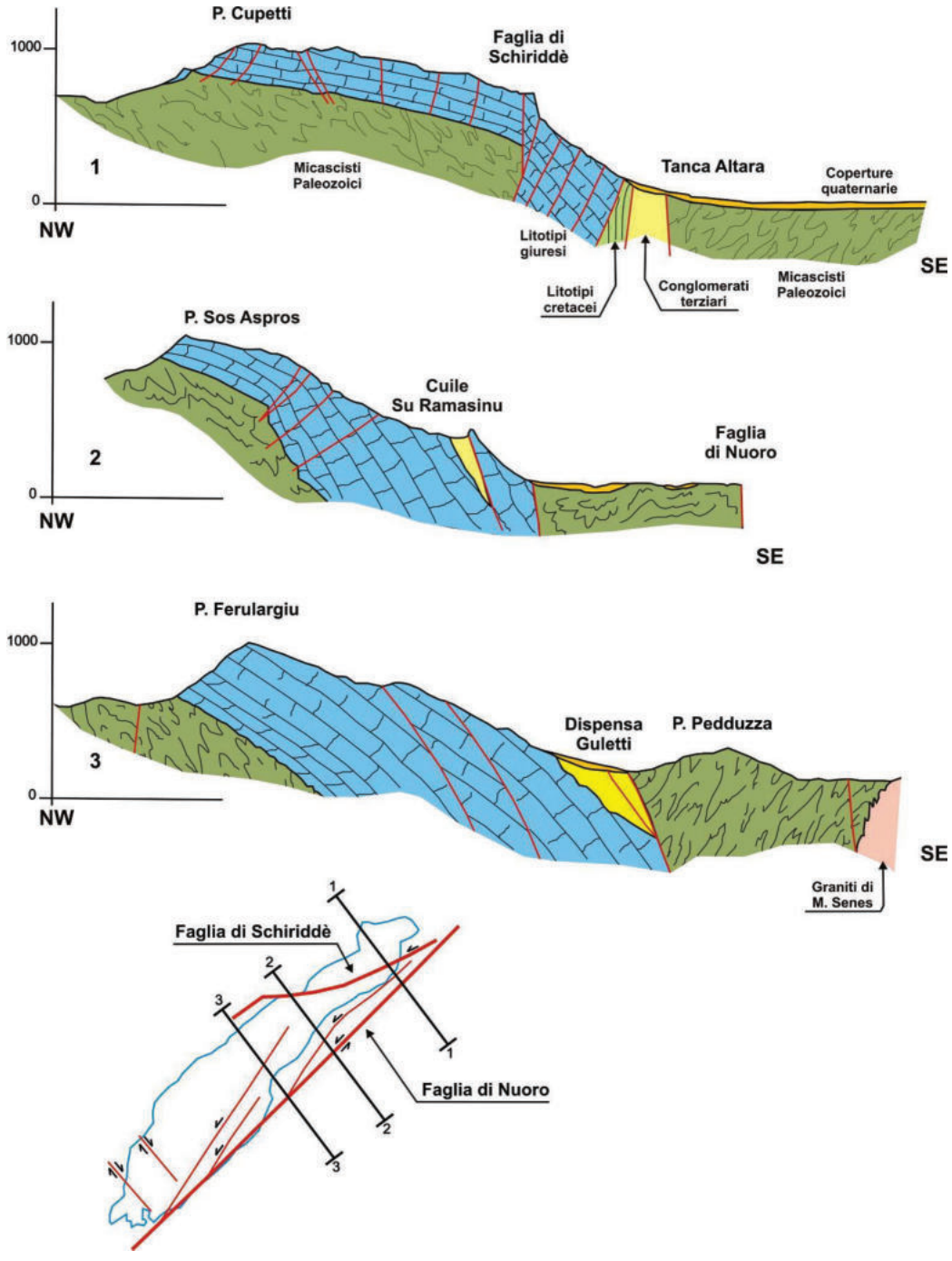

Fig. 4: sezioni e schema strutturale del Monte Albo (da CARMIGNANI L. ET ALII 1992, modificato) - *sections and structural sketch of Monte Albo (from CARMIGNANI L. ET ALII 1992, modified)*

Foto 11: calcari subverticali nel versante orientale del Monte Albo - *subvertical limestone beds at Monte Albo's eastern slope*

Nell'area tra Punta Pedduzza e la valle di Locoli gli stessi movimenti transpressivi hanno dato luogo alla sovrapposizione delle coperture impermeabili paleozoiche sui calcari mesozoici sede dell'acquifero carsico (Foto 12).

Foto 12: interfaccia scisti-calcari presso la ex "Cava Tondi" nel versante orientale del Monte Albo - *fillites-limestones interface at former "Cava Tondi" in Monte Albo's eastern slope*

La situazione strutturale del Monte Albo, nella sua porzione più settentrionale, è ulteriormente complicata dalla presenza della Faglia di Schiriddè che, con direzione N 45°, taglia le assise calcaree da Punta Mutrucone sino alla piana di Siniscola, convergendo verso la Faglia di Nuoro in prossimità della sorgente di Fruncu ‘e Oche. I movimenti tettonici sopra descritti hanno provocato un'intensa e generale fratturazione delle rigide masse carbonatiche costituendo associazioni di allineamenti orientati prevalentemente NNE-SSW e NW-SE. La fitta fratturazione della compagine mesozoica, unitamente alla disposizione dei terreni permeabili ed impermeabili conseguente alla evoluzione strutturale dell’area, devono considerarsi come altrettanti elementi precursori alla formazione di un importante acquifero all'interno dei terreni calcarei.

Geomorfologia

Nel corso del Pliocene, un'intensa attività erosiva ha isolato i calcari del Monte Albo dai rilievi circostanti, incidendo profondamente anche il basamento cristallino paleozoico sul quale poggiano le assise carbonatiche. A seguito di tali fenomeni si originarono scivolamenti gravitativi di imponenti dimensioni, tuttora visibili in alcuni tratti dei versanti esposti verso i quadranti orientali (ALVAREZ & COCOZZA, 1974). I movimenti di queste masse litoidi hanno contribuito a regolare nel tempo la circolazione idrica sotterranea sia nell'acquifero carsico sia in quello alluvionale costiero. I processi di alterazione delle masse carbonatiche si sono manifestati anche durante il Pleistocene, dando luogo alla formazione di estese coperture detritiche che ammantano i bordi settentrionali del Monte Albo. Le stesse coperture assumono la forma di vere e proprie conoidi nei fondovalle che degradano sui versanti orientali (Foto 13).

Foto 13: conoide alluvionale presso Cuile Su Romasinu, nel versante orientale del Monte Albo - *alluvial fan at Cuile Su Romasinu in Monte Albo's eastern slope*

Il paesaggio del Monte Albo è caratterizzato da diffusi e sviluppati fenomeni geomorfologici di tipo carsico: a tale fattore di modellamento si lega la formazione di numerose doline, lapiez, grotte, voragini ed inghiottitoi. Tra le forme carsiche superficiali, di particolare interesse dal punto di vista idrogeologico sono le estese depressioni doliniformi localizzabili a Su Campu 'e Susu, poco a sud di Punta Cupetti (Foto 14), le doline idrovore della Piana di Su Bufalu (Foto 15) e l'allineamento di inghiottitoi localizzati al contatto tra i calcari ed i litotipi cristallini paleozoici, ubicato lungo la Faglia di Nuoro presso Monte Pizzinnu (Foto 16).

Foto 14: morfologie doliniformi nelle quote elevate del Monte Albo (Foto: Domenico Ruiu) - *karstic morphologies on the higher altitudes of Monte Albo (Photo: Domenico Ruiu)*

Foto 15: la piana di Su Bufalu - *Su Bufalu plain*

Foto 16: l'inghiottitoio di Nuscalè - *Nuscalè sinkhole*

Tra i fenomeni carsici ipogei, la grotta maggiormente rappresentativa del territorio è quella di Locoli (Foto 17), che sino al 2005 era esplorata per uno sviluppo complessivo di poco più di un chilometro. Le difficoltà di progressione di questa cavità, caratterizzata da lunghi sifoni profondi oltre 90 metri, hanno certamente rallentato l'attività speleologica e, quindi, l'esplorazione delle condotte ipogee. Per altro, moltissime sono le cavità conosciute sul Monte Albo caratterizzate da uno sviluppo planimetrico sinora conosciuto inferiore ai 200 metri e, in particolare, molto rappresentate sono le voragini, la cui esplorazione si è spesso interrotta tra i 50 e 100 metri di profondità.

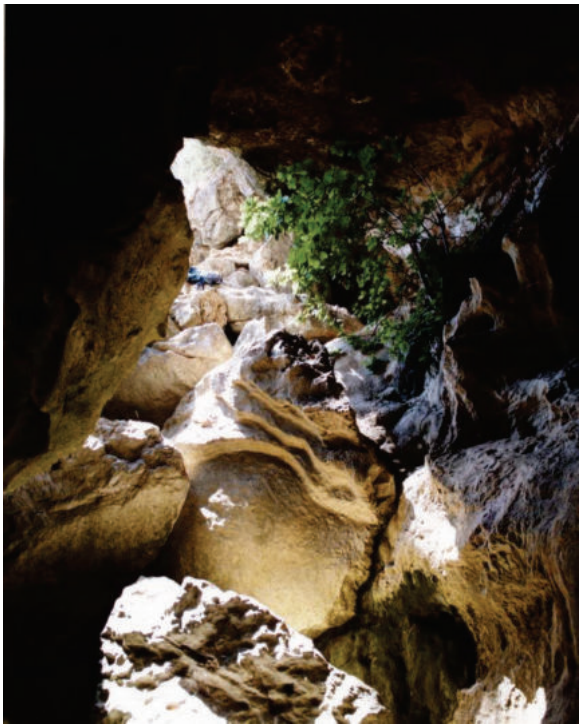

Foto 17: l'ingresso di grotta Locoli - *Locoli cave entrance*

Climatologia

L'area del Monte Albo è caratterizzata da una forte variabilità climatica connessa all'estensione della catena montuosa, ai forti dislivelli che caratterizzano l'area, ad una morfologia assai articolata nonché alla vicinanza del Mar Tirreno. La rete di stazioni meteorologiche non è sufficientemente fitta da permettere una definizione precisa dei tipi climatici che caratterizzano le diverse fasce in cui può essere suddivisa l'area in studio. La stazione termometrica storica più prossima al Monte Albo è quella di S. Lucia, i cui dati possono essere riferiti, con le dovute approssimazioni, alle porzioni meno rilevate e prossime al mare del settore meridionale del complesso montuoso (CAMARDA I., 1984). Nella Tabella 1 sono riassunti i dati delle temperature medie rilevati nel periodo 1973-1980, raccolti dal Servizio Idrografico.

Nell'area del Monte Albo non è mai stato eseguito un rilevamento termometrico riferibile alle zone più interne ed elevate ma considerando valido, in prima approssimazione, il gradiente termico generale della Sardegna, si ottengono i valori riportati in Tabella 2.

I dati delle stazioni termopluviometriche di S. Lucia e di Lula compongono le serie storiche relative all'andamento delle piogge; in particolare, i dati della stazione di Lula possono essere considerati indicativi della fascia altimetrica compresa tra i 500 e i 700 metri che cinge l'area in esame. Nella tabella 3 sono riportati i dati pluviometrici medi relativi alle stazioni considerate.

	G	F	M	A	M	G	L	A	S	0	N	D	M. annua
med. max	14.0	14.2	15.3	16.4	21.0	25.7	28.8	28.8	25.8	21.3	17.0	14.6	**20.2**
medie	11.4	11.6	12.3	13.4	17.4	21.8	24.5	24.9	22.3	18.2	14.1	12.0	**16.9**
med. min.	8.8	9.0	9.4	10.4	13.9	17.9	20.3	21.0	18.8	15.2	11.3	9.4	**13.8**

Tabella 1: temperature della stazione "Cantoniera S. Lucia" (35 m s.l.m.) (Dati Servizio Idrografico Italiano) - *temperature in the Cantoniera S. Lucia station (35 m s.l.m.) (Data Servizio Idrografico Italiano)*

Altitudine	Temperature medie diurne (°C)		
m. s.l.m.	Gennaio	Luglio	Annuale
100-500	11 - 8	25 - 23,5	18 - 16
500-800	6 - 4	23,5 - 19,5	16 - 15
800-1000	4 - 2,5	19,5 - 18	15

Tabella 2: temperature medie ricavate per l'area del Monte Albo utilizzando il gradiente termico della Sardegna (Dati Servizio Idrografico Italiano - *average temperature for the Mt. Albo area by using the Sardinia termal gradient (Data Servizio Idrografico Italiano)*

Stazione	Periodo	G	F	M	A	M	G	L	A	S	0	N	D	M. annua
S. Lucia	(1925-65)	117	84	98	60	61	19	8	15	54	99	109	127	851
	(1965-81)	41	49	71	55	32	13	13	12	31	85	66	83	551
Lula	(1921-65)	111	90	86	51	44	19	8	11	35	114	113	138	820
	(1965-81)	90	105	98	78	43	22	12	26	36	93	77	148	829

Tabella 3: piogge registrate nelle stazioni di S. Lucia e di Lula (Dati Servizio Idrografico Italiano) - *rain fall registered in the S. Lucia and Lula gauge stations (Data Servizio Idrografico Italiano)*

Confrontando i valori delle precipitazioni dal 1925 al 1965 e dal 1965 al 1981, è interessante osservare che mentre nell'area di Lula non si riscontrano variazioni significative nelle medie registrate, a S. Lucia si assiste, nell'ultimo periodo considerato, ad un calo delle precipitazioni di circa il 30%. Considerando il gradiente medio delle precipitazioni per la Sardegna, in prima istanza si può assumere che, nel Monte Albo, queste varino dai 500 mm ad oltre 1.200 mm nelle zone più elevate. Le precipitazioni nevose, pressoché assenti nei settori esposti a sud e nelle aree altimetricamente più basse, sono invece relativamente frequenti nelle zone di cresta, dove possono perdurare anche per alcuni giorni. La nebbia, fenomeno molto frequente nelle zone elevate, avvolge spesso le zone cacuminali (Foto 18); la condensazione di masse d'aria umida sui calcari, ed in particolare nell'estesa rete di fratture ed entro le cavità carsiche, può contribuire ad accrescere, anche se forse in maniera non sostanziale, i volumi dell'infiltrazione efficace negli acquiferi sotterranei.

Foto 18: masse di aria umida provenienti dal Tirreno scavalcano il Monte Albo (Foto: Antonio Lai) - *humid air masses coming from the Tyrrhenian Sea overcome Monte Albo (Photo: Antonio Lai)*

I dati di temperature e precipitazioni della stazione termopluviometrica di S. Lucia, correlati a quelli della vicina stazione di Orosei, consentono di ottenere alcune indicazioni sul tipo di clima della zona: secondo diverse classificazioni climatiche le zone di S. Lucia e di Orosei si collocano:

a. nell'orizzonte inferiore dei bioclima mediterraneo semiarido (EMBERGER);
b. nel tipo semiarido del sottoclima mediterraneo caldo (GIACOBBE);
c. nel Mesotermico B'_3 semiarido con modesto surplus idrico invernale, oceanico marittimo (THORNTWAITE).

Quelle sopra elencate sono peculiarità tipiche di un clima prettamente mediterraneo le cui caratteristiche salienti sono l'aridità estiva, la mitezza della temperatura e la concentrazione dei fenomeni precipitativi nel periodo invernale ed autunnale. Questo tipo di clima è proprio di gran parte delle aree di bassa quota del versante sud-orientale del Monte Albo mentre per le zone più elevate si possono ipotizzare tipologie climatiche tendenzialmente mesofile per l'aridità decrescente. La presenza di alcuni alberi con il tipico portamento a bandiera nelle zone di cresta indica che i venti dominanti sono quelli che soffiano in direzione N-W.

Idrogeologia generale

I lineamenti strutturali dei calcari mesozoici e la posizione delle limitrofe aree paleozoiche risultano di particolare importanza per valutare le modalità e le direzioni di deflusso idrico superficiale e sotterraneo nell'area in studio. In particolare, la vergenza della compagine carbonatica, costantemente disposta verso i quadranti orientali, e la presenza di numerose dislocazioni ed accavallamenti tettonici, che mettono a contatto i calcari con il basamento metamorfico impermeabile, hanno creato le condizioni per la concentrazione della circolazione idrica lungo direttrici ben definite (Fig. 5) e, nel contempo, la venuta a giorno di manifestazioni sorgentizie di portata notevole (sorgente di Fruncu 'e Oche, risorgente di Locoli).

L'idrografia che incide i terreni paleozoici, le pianure alluvionali e le aree costiere si compone di corsi d'acqua a regime irregolare caratterizzati da un'elevata dinamica nei periodi immediatamente successivi ai massimi input meteorologici e per lo più asciutti durante l'estate. Il collettore idrico principale è il Rio Siniscola il cui bacino idrogeologico ha un'estensione complessiva di 154,4 Km^2 di cui 97,6 Km^2 si dipartono su litotipi paleozoici e su coperture alluvionali mentre i restanti 56,8 Km^2 sono localizzati sui calcari del Monte Albo.

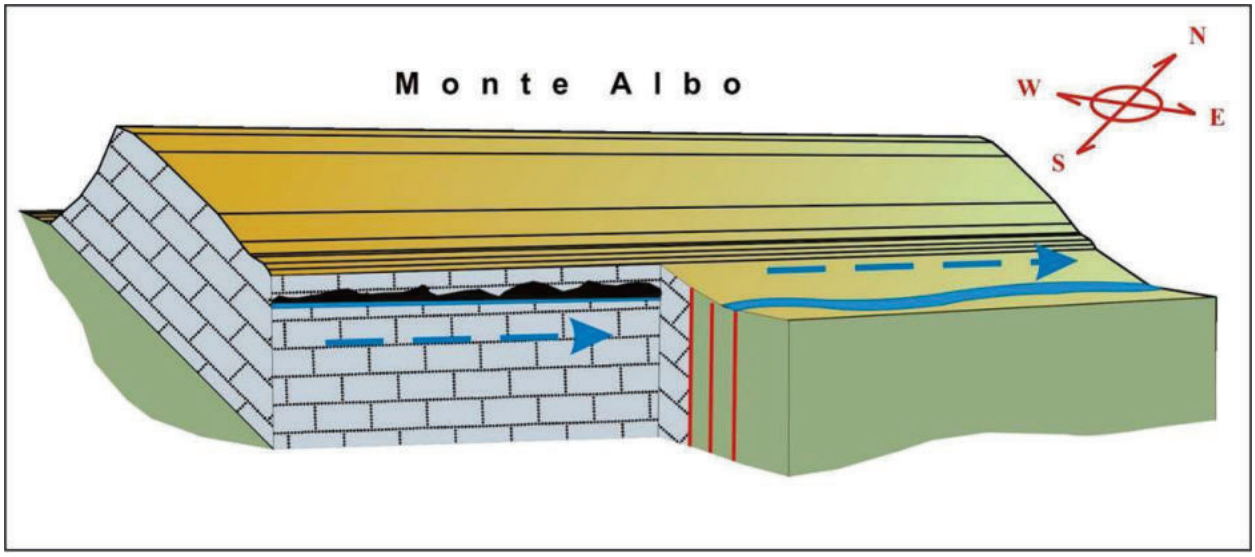

Figura 5: ipotesi di studio sulle direttrici idriche superficiali e sotterranee nel Monte Albo - *surface and groundwater flow directions in the Monte Albo area - case study*

Il Rio Siniscola ha una lunghezza di 24,8 chilometri e raggiunge il Mar Tirreno, con una foce ad estuario, nella spiaggia di Mare Flumene, tra la frazione di La Caletta ed il borgo di S. Lucia (Fig. 6). Il principale affluente del Rio Siniscola è certamente la sorgente di Fruncu ‘e Oche, della cui morfologia e funzionalità idrogeologica si tratterà in dettaglio nel seguito. Un altro importante affluente è il Rio Locoli, che raccoglie le acque che fuoriescono dall’omonima cavità carsica in occasione degli eventi di piena più intensi. Nell’area carbonatica i corsi d’acqua sono caratterizzati da un andamento effimero i cui alvei terminano il loro corso superficiale, spesso, in corrispondenza di apparati carsici idrovori.

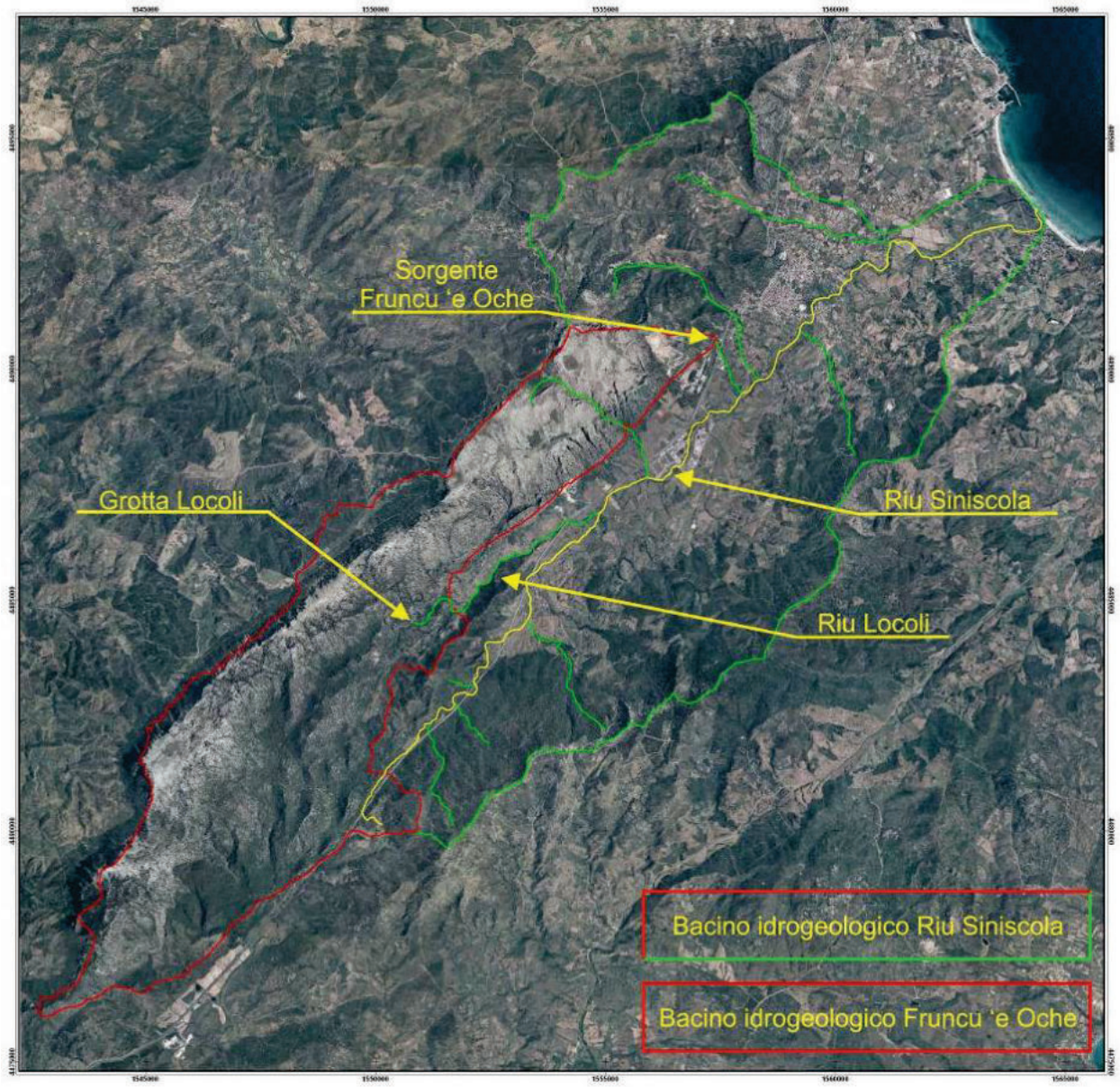

Figura 6: quadro territoriale dei principali elementi idrogeologici nell’area in studio (Base cartografica: Provincia di Nuoro) - *main hydrogeologic elements in the studied area (cartographic base: Provence of Nuoro)*

A tal proposito è rimarchevole l'inghiottitoio ubicato in località Bonaetè (Foto 19), posto sul versante occidentale del massiccio carbonatico, che drena un'estesa porzione di territorio impostato su rocce impermeabili del paleozoico prima di essere catturato da un inghiottitoio che si apre sulla dolomia basale. Nel versante orientale della placca calcarea, in località Monte Pizzinnu, è presente un importante allineamento di inghiottitoi disposto lungo un alveo che incide l'interfaccia calcari mesozoici-basamento paleozoico mentre la piana di Su Bufalu, come già sopra riportato, è interessata da una serie di importanti apparati doliniformi che drenano nel sottosuolo le acque superficiali provenienti dalla piana di Altudè.

Le principali manifestazioni sorgentizie sono quella di Fruncu 'e Oche (DE WAELE & MURGIA, 1999), che drena in modo perenne l'acquifero carsico profondo, quelle interessate occasionalmente dalla circolazione idrica in occasione delle piene (Grotta Locoli e Pozzo Carta) ed altre ancora (Schiriddè, Sa Mela, …) le quali, pur essendo connesse a circuiti idrogeologici di tipo carsico, drenano bacini di limitata estensione, per lo più circoscritti a placche carbonatiche isolate o a locali scivolamenti gravitativi. Molto diffuse nell'area, anche se di scarsissima portata, sono le emergenze connesse alla circolazione delle acque sotterranee nei litotipi cristallini paleozoici.

Foto 19: l'inghiottitoio di Bonaetè (Foto: Giancarlo Carta) - *Bonaetè sinkhole (Photo: Giancarlo Carta)*

Osservazioni sugli elementi di bilancio idrologico

L'assenza di stazioni termopluviometriche e di misura degli scorrimenti idrici superficiali nel bacino idrogeologico che comprende il Monte Albo non ha permesso, sinora, di redigere un bilancio idrologico rigoroso attraverso il quale determinare, sul totale delle precipitazioni, quali percentuali attribuire all'evapotraspirazione reale, al ruscellamento superficiale ed all'infiltrazione efficace. E' possibile effettuare una prima analisi sulla percentuale da assegnare al valore dell'infiltrazione efficace, il cui valore è riconducibile, almeno in prima approssimazione, al volume d'acqua utilizzabile come risorsa idropotabile, elaborando le misure disponibili in bibliografia relative ad un'altezza di precipitazioni media annua nel bacino idrogeologico del Monte Albo stimabile in circa 800 mm, ad una superficie accertata dello stesso bacino pari a 56,8 Km^2 e ad una portata media annua complessiva di tutte le manifestazioni sorgentizie e dei pozzi presenti nell'area nord-occidentale del massiccio carbonatico stimata negli strumenti di pianificazione regionale di settore in 120,9 l/s (REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA, 2006). Sulla base di questi dati si perviene sia ad una prima valutazione del volume d'acqua meteorica che, mediamente, incide in un anno sul bacino idrogeologico in esame, pari a 44,8 Mm^3, sia ad una stima dei deflussi annui dalle sorgenti del Monte Albo, pari a 3,76 Mm^3. Quest'ultimo dato, riconducibile in prima analisi all'infiltrazione media annua sul Monte Albo, corrisponde a poco più del 8,45% sul totale delle precipitazioni. Paragonando questo valore a quelli calcolati in altre regioni carsiche della Sardegna (circa il 20% nell'intero bacino minerario dell'Iglesiente, con valori di picco che superano il 38% nelle aree soggette a morfologie carsiche (CIVITA ET ALII, 1983; CIVITA ET ALII, 1986), e superiore al 30% nel Supramonte carbonatico di Oliena, Orgosolo, Dorgali ed Urzulei (MURGIA, 2008) risulta evidente una differenza netta, pari a non meno del 20%, tra queste percentuali d'infiltrazione e quella stimata per il bacino carsico del Monte Albo. Le affinità di carattere strutturale e morfologico rilevabili nei bacini carsici della Sardegna orientale (Supramonte - Monte Albo) fanno si che questa differenza non possa essere attribuita né a diverse condizioni d'infiltrazione né, tanto meno, a sostanziali differenti quantità di afflussi meteorici nei diversi bacini carsici. E' ragionevole concludere, quindi, che un valore d'infiltrazione pari al 8,45% sia largamente sottostimato e che tale sottostima sia da imputarsi principalmente ai valori di deflusso medi annui sinora assunti per le

sorgenti presenti nel territorio: applicando all'area del Monte Albo percentuali di infiltrazione efficace variabili tra il 25% ed il 35% sul totale delle precipitazioni, infatti, è possibile stimare per questo territorio un volume d'infiltrazione potenziale compreso tra 11,2 e 15,7 Mm^3/anno, che corrispondono ad una portata media annua dei deflussi idrici dagli acquiferi compresa tra i 0,36 ed i 0,5 m^3/s. Anche se da queste valutazioni non è possibile trarre alcun dato di carattere quantitativo, dalle stesse emerge l'importanza di poter disporre di un sistema di monitoraggio delle pluviometrie e dei deflussi idrici nel bacino idrogeologico del Monte Albo attraverso i cui dati ottenere un quadro più oggettivo delle reali potenzialità idriche dell'acquifero carsico. Sui dati di tale monitoraggio, oggi disponibili, verterà l'analisi di bilancio idrogeologico illustrata nei successivi paragrafi.

Osservazioni sull'evoluzione del livello di base

Il confronto tra le morfologie superficiali e quelle sotterranee in relazione all'evoluzione del livello di base consente di approfondire la conoscenza geologica di un territorio carsico: infatti, esiste un rapporto di stretta dipendenza tra l'evoluzione di un sistema di gallerie carsiche e l'evoluzione del corso d'acqua superficiale idrologicamente connesso a quelle gallerie (Fig. 7). Tale dipendenza è legata al fatto che un alveo superficiale si deve considerare, almeno in prima approssimazione, come la naturale prosecuzione del torrente sotterraneo che si immette in quell'alveo. In generale, l'evoluzione di un corso d'acqua, sia esso superficiale che sotterraneo, procede seguendo l'evoluzione del livello di base che, generalmente, corrisponde a quello del mare: se quest'ultimo si abbassa a seguito di un particolare evento geologico o climatico i fiumi incidono più profondamente i propri alvei a causa di un generale aumento della energia idrodinamica e, quindi, della velocità di erosione (Fig. 7b). Quando il mare si solleva, al contrario, negli stessi alvei precedentemente escavati si instaurano condizioni depositive a cui conseguono la formazione di estese pianure alluvionali e, nelle grotte, alla sedimentazione delle gallerie precedentemente approfonditesi (Fig. 7c).

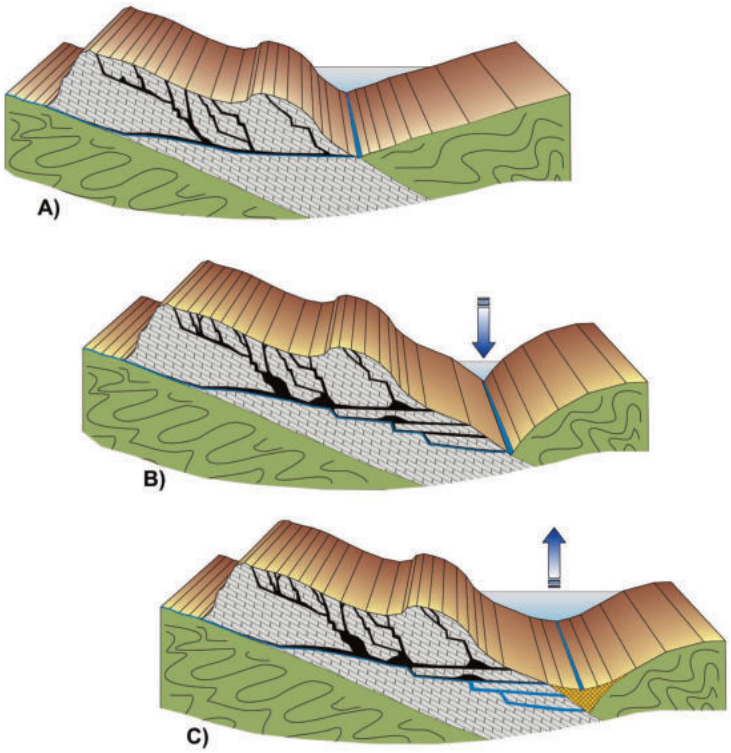

Figura 7: schema generale sull'evoluzione del livello di base. Le depressioni e i sollevamenti del mare regolano l'erosione e la sedimentazione degli alvei fluviali e dei circuiti idrici sotterranei - *general sketch of the base-level evolution. Swinging of changing sea level controls the erosion and sedimentation of riverbeds and groundwater circuits*

Analizzando la disposizione delle rocce presenti nella valle di Locoli poste lungo le pendici orientali del Monte Albo risulta evidente come questa zona rivesta un grande interesse dal punto di vista idrogeologico e speleogenetico: in tale area, infatti, i calcari mesozoici sede dell'acquifero carsico risultano affiancati lateralmente, e in talune aree sormontati, da lembi o coltri di scisti paleozoici (Foto 20). Questa peculiarità strutturale ha dato luogo alla formazione di una soglia di permeabilità costituita proprio dalle filladi impermeabile (Foto 12).

Foto 20: la valle di Locoli incassata tra il Monte Albo e i rilievi paleozoici di Punta Pedduzza - *Locoli valley embedded betweeen Monte Albo and the paleozoic reliefs of Punta Pedduzza*

La presenza di questo sbarramento naturale, quindi, ha regolato i deflussi idrici sotterranei e superficiali dal terziario in avanti. L'incisione della copertura impermeabile, avvenuta prevalentemente lungo l'interfaccia scisti-calcari, ha dato luogo all'approfondimento della valle del Rio Locoli soprattutto a causa dell'azione erosiva delle acque provenienti dal sistema carsico. Restano ancora da chiarire molti dettagli sull'evoluzione della rete di drenaggio idrico ipogeo di questa porzione del Monte Albo e, soprattutto, le relazioni esistenti tra l'evoluzione del livello di base nel reticolo idrografico superficiale e le testimonianze dell'approfondimento delle gallerie osservate durante le esplorazioni speleosubacquee: infatti, il profilo di lunghi tratti delle condotte allagate, ubicate a profondità anche oltre 30 metri inferiori rispetto al reticolo idrografico superficiale, è caratterizzato da una ripida forra le cui pareti sono segnate da solchi, lame, *scallops* nonché, sul fondo, da numerose marmitte di erosione (Foto 21) la cui genesi è riconducibile ad un'antica circolazione idrica di tipo vadoso.

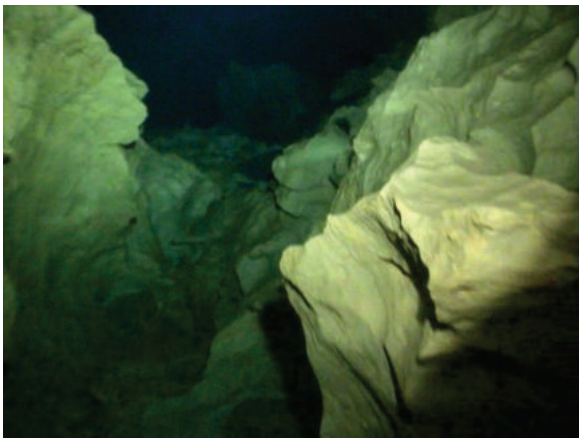

Foto 21: forme carsiche evorsive nelle gallerie allagate di grotta Locoli (Foto: Pietro Mauri) - *karst erosions in the flooded galleries of Locoli cave (Photo: Pietro Mauri)*

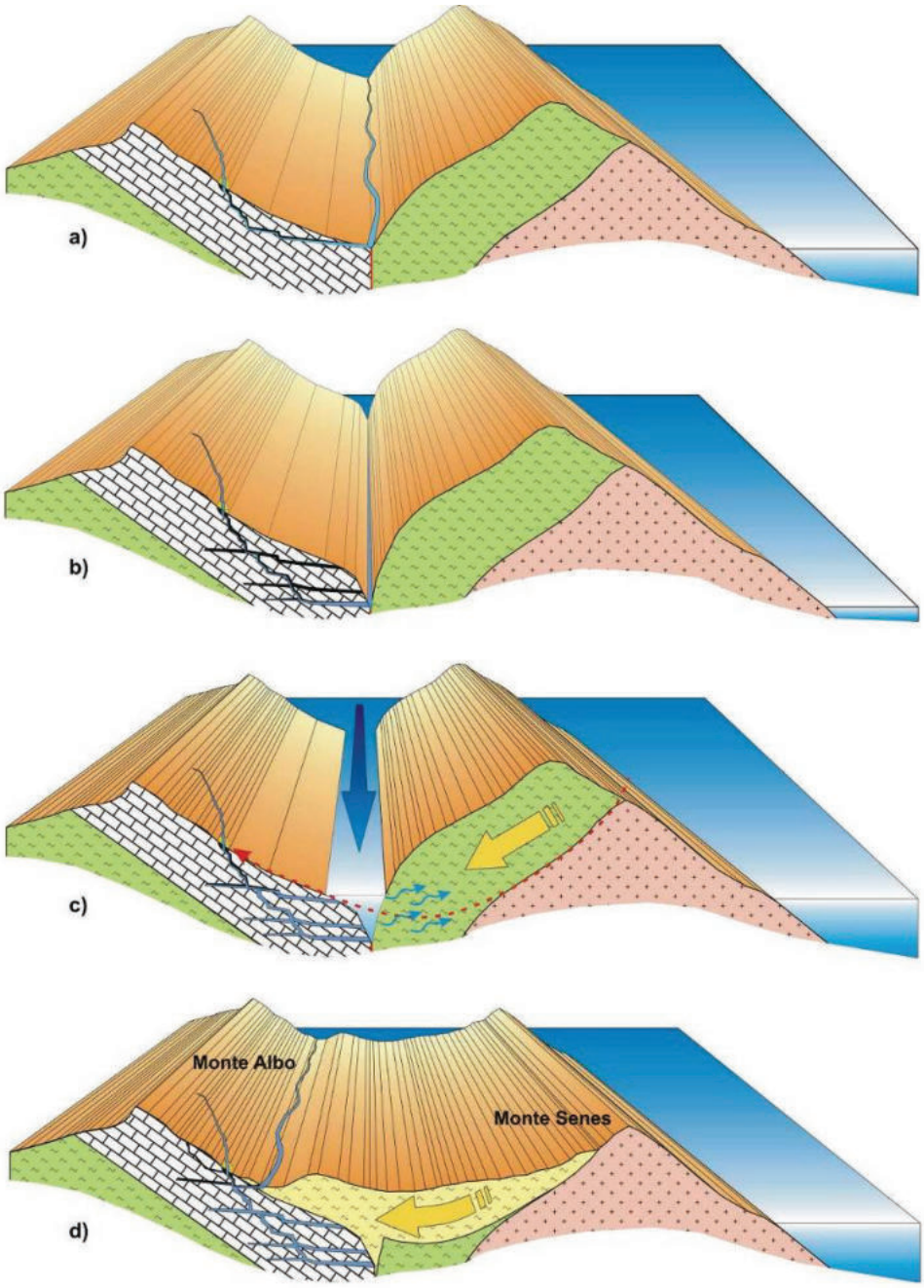

Figura 8: evoluzione morfologica “Messiniana” nell’area del Monte Albo. Ipotesi di studio.

a) Scenario riferibile alla fase di “pre-crisi” messiniana;
b) Crisi Messiniana: i corsi d’acqua sotterranei e superficiali scavano profondamente i propri alvei mano a mano che il Mar Mediterraneo si abbassa di livello;
c) Scenario riferibile alla fase di “post-crisi” messiniana: negli alvei sovraescavati durante la fase precedente s’incunea il mare pliocenico che contribuisce a destabilizzare l’assetto morfologico del versante occidentale di Monte Senes;
d) La falda scistosa di Monte Senes collassa scorrendo sopra i calcari del Monte Albo

Figure 8: "Messinian" morphological evolution in the Monte Albo area. Study hypothesis.

a) *"Pre-Messinian crisis" phase;*
b) *Messinian crisis phase: surface and underground rivers dig deeply as the Mediterranean Sea level lowers;*
c) *"Post-Messinian crisis" phase: the Pliocene sea enters the riverbeds entrenced during the previous phase and contributes to destabilize the morphological structure of Monte Senes western slope;*
d) *The schists of Monte Senes collapses flowing over the limestone of Monte Albo*

La presenza di tali morfologie pone alcuni dubbi sulla completezza della successione degli eventi geologici sinora accertati nell'area in studio: a quella successione, infatti, sembra mancare quel tassello che dovrebbe connettere gli eventi tettonici di età oligocenica, che hanno prodotto l'assetto strutturale complessivo della Sardegna nord-orientale, a quelli morfogenetici successivi, principalmente di età pliocenica e quaternaria, i quali hanno prodotto il modellamento dei rilievi e il deposito delle coltri sedimentarie nelle forme che oggi possiamo osservare. Questo tassello di raccordo deve avere una "sagoma" tale da giustificare sia la profondità e le forme morfologiche osservate nelle condotte carsiche sia le strutture tettoniche e le morfologie che caratterizzano il versante orientale del Monte Albo. Uno schema di evoluzione geologica e morfogenetica che potrebbe portare alla ricostruzione di quel tassello prende spunto dai movimenti tettonici che nel Messiniano, circa 6 milioni di anni fa, portarono il Sud della penisola iberica a collidere con la porzione più settentrionale dell'Africa, causando la chiusura dello Stretto di Gibilterra e lo sconvolgimento della geografia mediterranea del tardo terziario (CITA, 1973; CITA & CORSELLI, 1993): l'interruzione del collegamento con l'oceano Atlantico, infatti, provocò un brusco sbilancio negativo nel ciclo apporti-evaporazione del Mediterraneo il quale, in conseguenza di ciò, subì un rapido processo di disseccamento (HSÜ, 1973; GARGANI & RIGOLLET, 2007). La depressione del Mar Mediterraneo causò l'approfondimento di tutti i corsi d'acqua, superficiali e sotterranei, i quali furono costretti ad "inseguire" quel mare che, con il procedere dell'evaporazione, si allontanava sempre più dall'antica linea di costa (Fig. 8b) (MAILLARD & ALII, 2006; GARGANI & ALII, 2010). Nel Pliocene inferiore, con il ristabilirsi della circolazione idrica tra l'Oceano Atlantico ed il Mediterraneo, il mare s'incuneò profondamente nei profondi fiordi precedentemente scavati e, tra questi, in quelli incisi tra i calcari del Monte Albo e gli antistanti rilievi paleozoici (Fig. 8c) (GARCIA-CASTELLANOS D. & ALII, 2009). In seguito, è ipotizzabile che l'ingressione marina nei canyon messiniani abbia potuto provocare una generale destabilizzazione dell'acclive versante scistoso del Monte Senes, il collasso gravitativo di quest'ultimo e la conseguente impostazione di alcuni di quegli sovrascorrimenti (Fig. 8d) che attualmente impermeabilizzano i circuiti carsici più profondi del versante orientale del Monte Albo.

Se, in generale, lo schema evolutivo geomorfologico messiniano sopra esposto sembra largamente accettato dalla comunità scientifica e la presenza dei profondi canyon sottomarini antistanti la costa orientale sarda, su una porzione dei quali potrebbe

essere collassata l'antica copertura paleozoica, è ampiamente testimoniata dai rilevamenti batimetrici dei fondali tirrenici, la conferma dello schema evolutivo sul livello locale necessita certamente di quegli approfondimenti che potrebbero accreditarne o meno la validità. In particolare, mancano i riscontri oggettivi sugli ipotizzati collassi gravitativi pliocenici del Monte Senes e su come la loro geometria, eventualmente, sia da porre in relazione con le dislocazioni che hanno regolato l'assetto tettonico del Monte Albo nel Terziario.

Pur rimanendo ancora indeterminate alcune delle sequenze geologiche e geomorfologiche che condussero all'approfondimento del sistema carsico nel Monte Albo, è certo che gli eventi prodottisi in epoca pleistocenica provocarono la sedimentazione di quella parte del sistema carsico prossimo all'ambiente epigeo. Quest'ultimo evento è testimoniato dai già citati lembi residui di riempimenti alluvionali quaternari, costituiti da ciottoli di natura cristallino-metamorfica ben cementati, osservabili all'interno di grotta "Locoli" (Foto 8). Tali sedimenti potrebbero essere correlabili alle alluvioni terrazzate pleistoceniche, ben rappresentate nelle aree meno elevate del territorio in esame. Anche l'interpretazione geomorfologica e paleogeografica dei segmenti idrografici che incidono le alluvioni ciottolose localizzabili tra il Riu Siniscola ed il Rieddu Su Manganu, in un'area localizzabile a SW dell'abitato di Siniscola, risulta interessante ai fini della ricostruzione dell'evoluzione prodottasi in epoca pleistocenica nel sistema di idrostrutture che drenano l'acquifero carsico. In quest'area (Fig. 9) sono presenti un gruppo di segmenti idrografici morfologicamente molto evoluti i cui assi, convergenti verso il massiccio carbonatico, risultano disposti a ventaglio sulla superficie topografica. Lo sviluppo altimetrico di queste brevi incisioni è compreso tra le quote 65 e 40 metri sul livello del mare e la loro genesi non è riconducibile a fenomeni geomorfologici in atto; solo i tratti terminali di alcune di queste incisioni sono tuttora sede di manifestazioni sorgentizie relativamente abbondanti (sorgente "Cordianeddu"). Oltre queste incisioni morfologiche, nella stessa area sono presenti gli alvei del Rio Fruncu 'e Oche, che fa capo all'omonima sorgente, e del Rieddu Su Manganu, la cui freschezza morfologica testimonia una recente impostazione avvenuta intagliando anche i segmenti idrografici precedentemente descritti. L'analisi in chiave geomorfologica di queste osservazioni consente di ipotizzare l'esistenza, in epoca quaternaria, di un fronte costituito da sorgenti d'emergenza del livello piezometrico, identificabile con il primo gruppo dei segmenti idrografici, la cui funzione idrologica potrebbe essere stata quella di drenare l'acquifero carbonatico tamponato dalla coltre alluvionale.

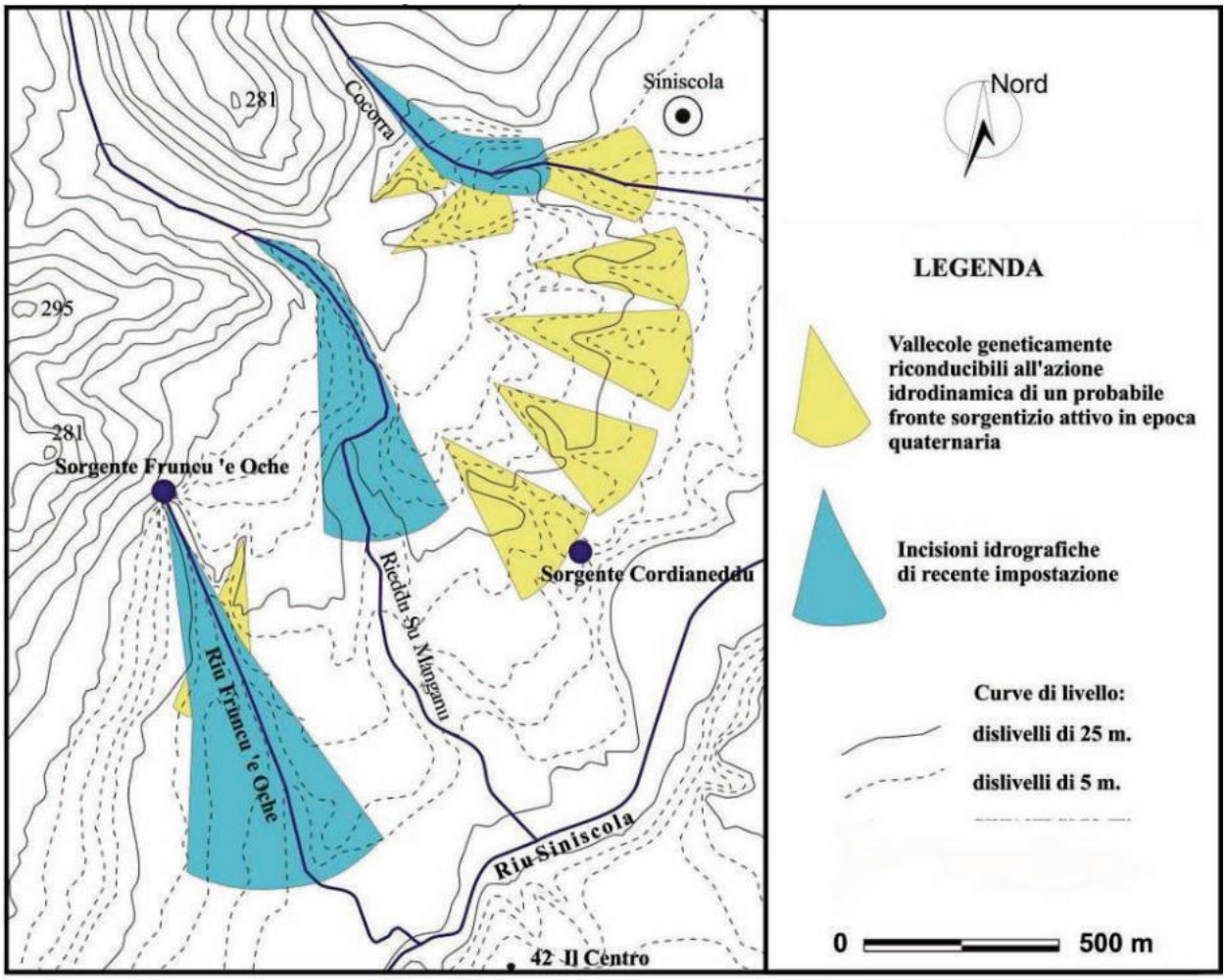

Figura 9: disposizione delle incisioni morfologiche nelle alluvioni dell'area di Fruncu 'e Oche. Alcune delle incisioni di recente impostazione tagliano nettamente quelle più antiche (MURGIA, 1996)- *morphological asset of the creeks developed in the quaternary deposits of Fruncu 'e Oche area. The more recent of them cut the older ones (MURGIA, 1996)*

È probabile che la funzionalità di questo fronte sorgentizio si sia ridotta repentinamente non appena le acque sotterranee riuscirono ad aprirsi una via preferenziale verso la superficie tra le fratture carsificate. L'apertura della sorgente di Fruncu 'e Oche e l'incisione dell'omonimo alveo, quindi, potrebbero aver avuto come conseguenza la depressione della superficie piezometrica nell'acquifero presente entro le alluvioni sino all'attuale livello dinamico.

La sorgente di Fruncu ‘e Oche

La sorgente di Fruncu ‘e Oche è ubicata nella porzione settentrionale del Monte Albo, in località S. Giuseppe, ad una quota di 56 metri s.l.m. (Foto 22).

Foto 22: la sorgente di Fruncu ‘e Oche negli anni ’60. L’immagine illustra lo stato della sorgente in fase di piena prima della realizzazione della captazione acquedottistica (Foto: Archivio storico) - *Fruncu 'e Oche spring in the 60s. The image shows the spring during the flood before the implementation works of the water supply catchment (Photo: Archivio storico)*

L’emergenza è inserita in un contesto geologico assai complesso (Fig. 10) costituito da calcari e marne cretacee e da calcari giuresi i cui strati subverticali sono separati, a Nord e per faglia, dai litotipi del basamento metamorfico impermeabile. Alla base del versante, nelle immediate prospicienze della sorgente, i calcari mesozoici sono bordati da coltri di sedimenti continentali costituiti prevalentemente da conglomerati eterogenei a matrice argillosa. La complessità geologica dell’area è la conseguenza di un assetto strutturale altrettanto complesso: in prossimità della sorgente, infatti, si addensano numerose ed importanti dislocazioni tettoniche sia ad andamento normale sia a componente inversa e trascorrente. Tali dislocazioni costituiscono altrettante vie di drenaggio idrico sotterraneo che convergono, dall’intero Monte Albo, verso l’area della sorgente. Quella di Fruncu ‘e Oche può essere classificata come una sorgente di frattura perenne a regime variabile, alla quale la documentazione bibliografica esistente attribuisce, come già riportato, una portata media annua di 120,9 l/s. Attualmente la sorgente è sede di una captazione acquedottistica (Foto 23) nella cui opera di presa sono presenti due grandi vasche che contengono i deflussi idrici provenienti da altrettante gallerie artificiali di drenaggio (Foto 24 a e b). Le vasche sono dotate di stramazzi che laminano i deflussi eccedenti ai prelievi acquedottistici che consentono di eseguire misure di portata precise e continue. Le fratture beanti intercettate dalle gallerie artificiali sono state oggetto di alcune ispezioni speleosubacquee, durante le quali si è potuto osservare la parziale ostruzione di tutte le vie di drenaggio esplorate. Le ostruzioni, costituite principalmente da materiali detritici per lo più angolosi, hanno impedito, di fatto, di accertare la presenza di eventuali condotte carsiche sommerse ubicate al di sotto del livello dinamico.

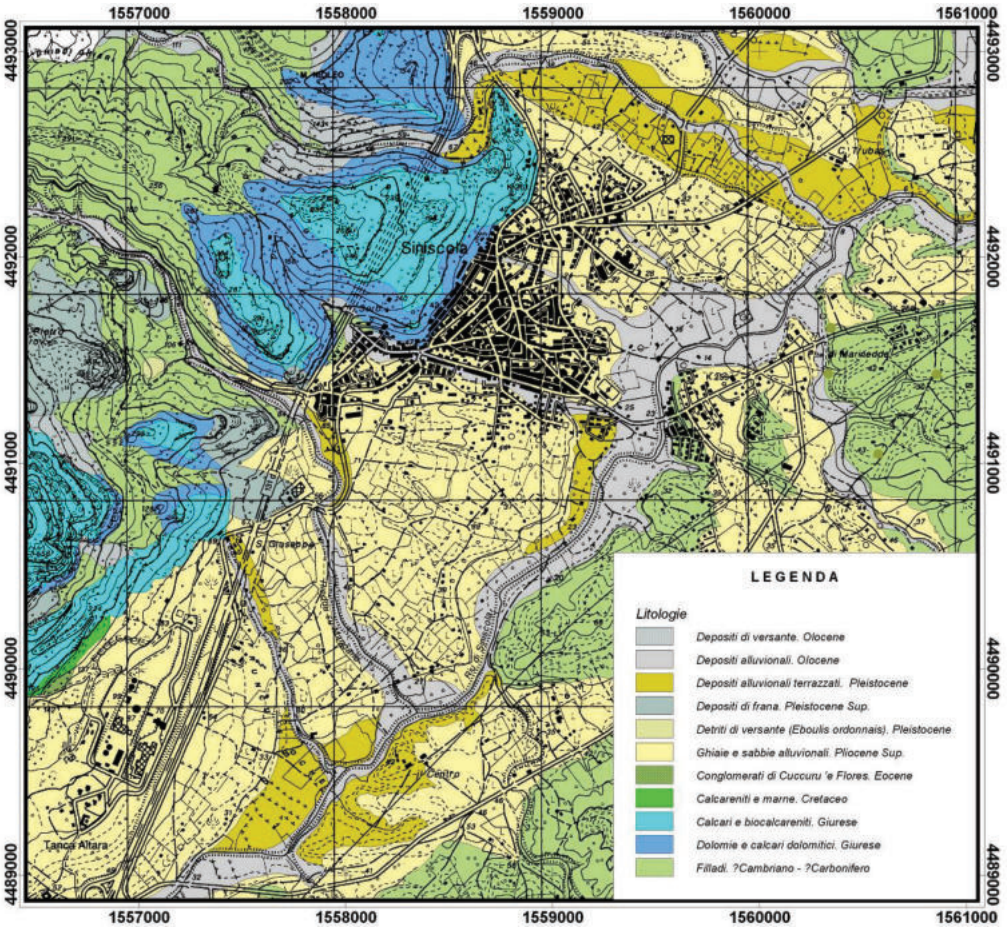

Figura 10: carta geologica dell'area di Fruncu 'e Oche (base cartografica: www.sardegnageoportale.it - Regione Autonoma della Sardegna) - *geological map of the Fruncu 'e Oche area (cartographic base: www.sardegnageoportale.it - Regione Autonoma della Sardegna)*

Foto 23: l'opera di presa acquedottistica presso la sorgente di Fruncu 'e Oche - *aqueduct intake at Fruncu 'e Oche spring*

La sorgente di Fruncu 'e Oche è stata oggetto di un monitoraggio continuo protrattosi per circa tre anni che ha permesso di acquisire i trend di variazione dei livelli piezometrici, delle portate, delle temperature e delle conducibilità elettriche al variare delle condizioni idrodinamiche manifestatesi in sorgente. I risultati di tali monitoraggi, riportati nel paragrafo dedicato all'analisi idrogeologica dell'acquifero insieme a quelli del monitoraggio fluorimetrico, hanno consentito di valutare gli apporti verso la sorgente delle acque infiltratesi nelle diverse porzioni del bacino idrogeologico.

Foto 24a: la galleria drenante principale della sorgente di Fruncu ‘e Oche - *the main draining tunnel of Fruncu ‘e Oche spring*

Foto 24b: la galleria drenante secondaria della sorgente di Fruncu ‘e Oche - *the secondary draining tunnel of Fruncu ‘e Oche spring*

Il sistema carsico di grotta Locoli

Il sistema carsico che drena le acque nei calcari del Monte Albo è in gran parte ancora inesplorato ed una sola grotta, quella di "Locoli", ha uno sviluppo accertato superiore a 3,5 Km (Fig. 11). Questa cavità si apre, ad una quota di 103,5 metri s.l.m., alla base del versante che fronteggia i rilievi paleozoici di Punta Pedduzza e Su Pizu Ruju. Le recenti esplorazioni speleologiche di questo sistema hanno consentito di rilevare oltre 2,5 Km di nuove condotte, per la maggior parte sommerse, anche di dimensioni imponenti. Locoli è una grotta che palesa gli effetti di un'intensa attività idrica soprattutto nei mesi invernali, quando la cavità è invasa dalle acque di piena che le condotte carsiche, saturate dalle acque d'infiltrazione, non riescono a contenere.

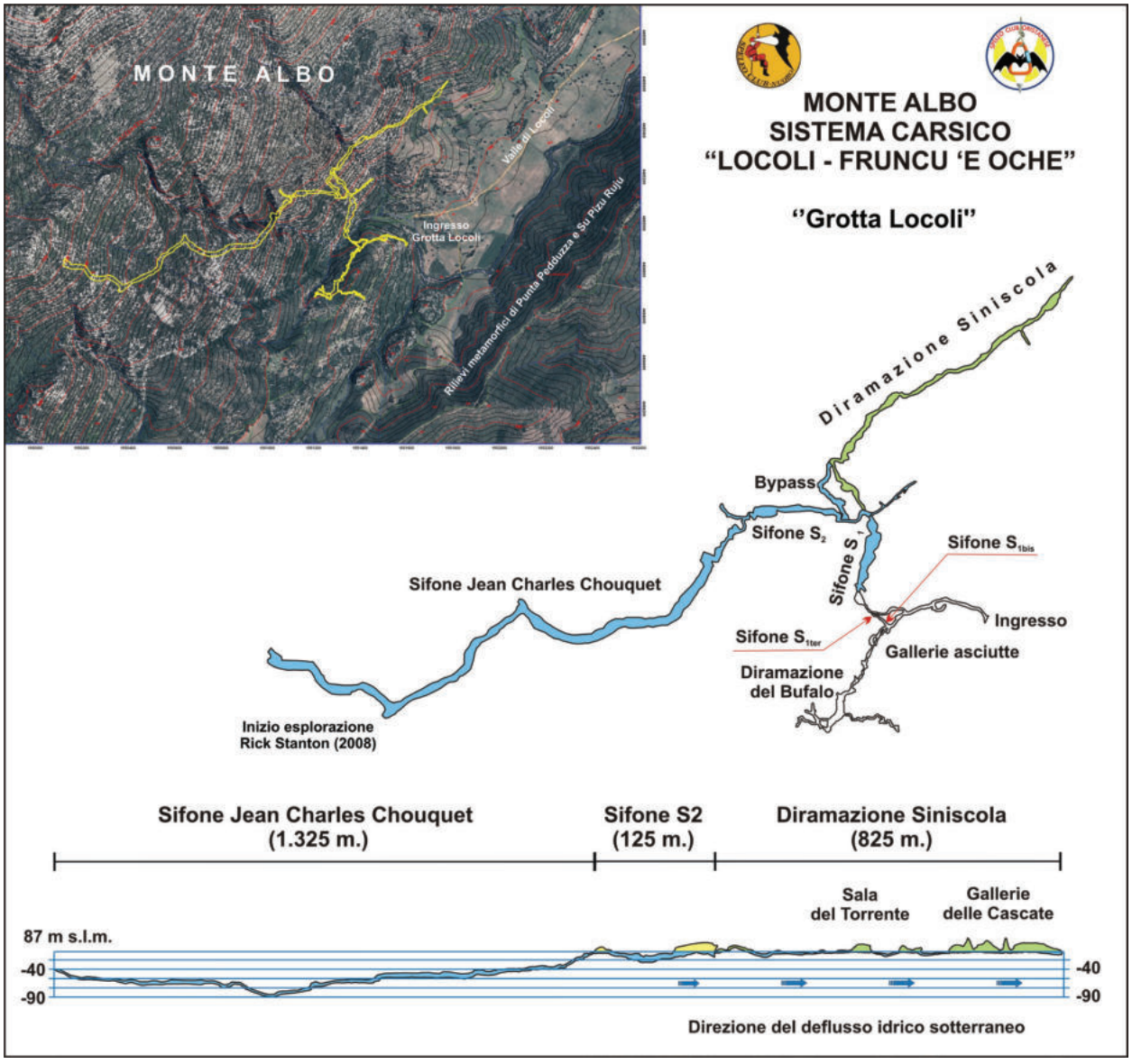

Figura 11: rilevamento delle condotte carsiche della grotta Locoli - *plan view and section of the Locoli cave*

Dall'ingresso, la cavità si sviluppa per circa 250 metri con una serie di gallerie subaeree poste ad una quota media di 97 metri s.l.m., al termine delle quali sono presenti alcuni sifoni allagati entro i quali proseguono i condotti carsici (Fig. 12).

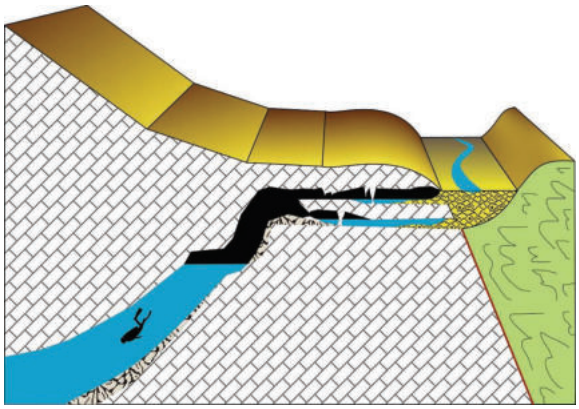

Figura 12: sezione schematica delle condotte carsiche della grotta Locoli - *schematic profil of the Locoli cave*

Le gallerie sommerse, il cui livello idrodinamico di magra è posto alla quota di circa 87,5 metri s.l.m., sono state esplorate in tempi successivi da diverse équipe di speleosubacquei: per due volte, nel 1981 e nel 1982, Patrick Penez e Jean Claude Chouquet si sono addentrati nei sifoni denominati S_1, S_2 ed S_3 esplorando e topografando complessivamente circa 1.050 metri di condotte sommerse e raggiungendo una profondità massima di -80 metri dal livello iniziale. Durante le successive immersioni, effettuate nel 1987 e nel 1988 da una seconda équipe di speleosubacquei guidata dallo svizzero Olivier Isler, Jacques Brasey ha esplorato il sifone pensile denominato S_{1ter}, che si apre dentro la porzione subaerea di grotta "Locoli" ad una quota di circa 100 metri s.l.m.. Negli ambienti post sifone, Brasey osservò la presenza di un salone riccamente concrezionato e di alcune gallerie parzialmente allagate la cui successiva esplorazione ha premesso di rilevare un secondo sistema di gallerie posto ad una quota superiore a quella dei sifoni più profondi.

Nei primi anni '90, lo speleosub dorgalese Leo Fancello si è dedicato all'esplorazione di un secondo sifone pensile, l'S_{1bis}, la cui funzionalità idrodinamica è connessa principalmente al drenaggio verso l'antistante piana di Locoli delle acque di piena. Questo sifone, considerati lo sviluppo planimetrico e la direzione delle condotte sommerse, è connesso assai probabilmente con un'altra cavità, Sa Conchedda 'e Locoli", che sarà illustrata nel seguito.

Dal 2005, dopo alcuni anni di sostanziale oblio, l'esplorazione di grotta Locoli ha ripreso vigore grazie all'impegno dello Speleo Club di Nuoro e dello Speleo Club Oristanese; gli speleologi sardi si sono posti come obiettivo prioritario quello di proseguire l'esplorazione del sistema carsico profondo nel sifone S_3, ribattezzato "Jean Claude Chouquet" in memoria del valoroso speleosub francese tragicamente scomparso e tra i primi esploratori del sifone.

Le punte esplorative in questa porzione dell'acquifero, che hanno fatto seguito a numerose immersioni preparatorie, sono state eseguite il 28 settembre del 2008 ed il 22 maggio 2010 dall'inglese Rick Stanton. Durante la prima esplorazione, coadiuvato dai sardi Pietro Mauri e Pierpaolo Porcu e dal tedesco Thorsten Waelde, Stanton ha raggiunto, a -90 metri, la massima profondità del sifone "Jean Charles Chouquet" ed ha proseguito lungo la condotta risalendola sino ad una profondità di -45 metri, percorrendo complessivamente 1.325 metri di galleria allagata (Foto 25). L'immersione, effettuata utilizzando abilmente le nuove tecniche di progressione speleosubacquea, si è svolta in un'acqua cristallina caratterizzata da una visibilità superiore ai 20 metri.

Foto 25: speleosub in esplorazione nella forra allagata di grotta Locoli (Foto: Pietro Mauri) - *cave diver exploring the flooded part of Locoli cave (Photo: Pietro Mauri)*

Nel corso dell'esplorazione, all'interno del sifone è stata rilevata la presenza di una sala di dimensioni eccezionali nella quale, nonostante l'ottima visibilità e le potenti luci a disposizione, lo speleosub inglese non è riuscito a scorgere né il soffitto né la parete opposta a quella a ridosso della quale aveva deciso di procedere. Nella seconda punta esplorativa, Stanton, coadiuvato da Pietro Mauri ed Enrico Seddone, ha completato la risalita del sifone "Jean Charles Chouquet", esplorandolo per uno sviluppo complessivo di 1.700 metri. Oltrepassata una breve galleria asciutta, Stanton ha affrontato un nuovo sifone, l'S_4, che ha percorso per circa 100 metri ad una profondità media di -10 metri. Superato anche questo sifone, lo speleosub inglese ha percorso una nuova galleria asciutta lunga circa 200 metri per poi immergersi in un'altro sifone, l'S_5, che ha percorso per circa 250 metri sino a -34 metri di profondità, fissando il nuovo limite esplorativo delle gallerie che si estendono in direzione SW. Di questa seconda punta esplorativa non è disponibile, al momento, il rilevamento topografico.

Le osservazioni effettuate nel corso delle esplorazioni hanno consentito di formulare nuove ipotesi sulla funzionalità idrodinamica delle profonde condotte esplorate. In particolare, la presenza degli oltre 1.700 metri di gallerie sommerse facenti capo al sifone Jean Charles Chouquet e la profondità media di circa 50 metri delle stesse, inducono ad ipotizzare che sia presente, nel contesto generale dell'acquifero carsico, un esteso carso saturo che

funziona da bacino d'immagazzinamento idrico sotterraneo. Questa ipotesi sarà approfondita nel paragrafo dedicato alle analisi idrologiche condotte con l'ausilio dei traccianti geochimici. Tra il 2008 ed il 2010, le esplorazioni del sistema carsico profondo sono state affiancate dalla ricerca delle condotte che allontanano i deflussi sotterranei, già osservati da Patrick Penez negli anni '80, che scorrono nella breve condotta aerea che dal sifone S_2 porta all'S_1: l'ipotesi che quegli scorrimenti idrici proseguissero il loro deflusso dall'S_1 verso la superficie ed il Rio Locoli, infatti, non risultava comprovata dai riscontri sul regime idrico di questo corso d'acqua il quale, in concomitanza con gli scorrimenti sotterranei osservati, risultava in secca. Un'ipotesi più attendibile, pertanto, doveva partire dal presupposto che quei deflussi si allontanassero dall'area di grotta Locoli utilizzando gallerie carsiche ancora sconosciute per alimentare, in direzione NE, la sorgente di Fruncu 'e Oche. Considerando gli andamenti delle dislocazioni tettoniche presenti nell'area in relazione allo sviluppo planimetrico conosciuto della grotta, nel 2008 gli speleosub Pietro Mauri, Pier Paolo Porcu e Thorsten Waelde hanno proceduto ad esplorare con particolare attenzione l'area posta tra l'attacco del sifone S_2 e l'uscita dell'S_1, individuando dapprima una ripida condotta ascendente che conduce ad alcune cavità sino a quel momento inesplorate e, in seguito, un più agevole bypass sommerso che mette in comunicazione l'S_1 con le stesse condotte individuate in precedenza. Il primo tratto delle nuove gallerie è costituita da un sifone lungo 240 metri (Foto 26) e largo circa otto, la cui profondità varia da una decina di metri sino a poco più di un metro in corrispondenza di un laminatoio.

Foto 26: sifone a monte della Sala del Torrente di grotta Locoli (Foto: Pierpaolo Porcu) - *siphon upstream of the Sala del Torrente in Locoli cave (Photo: Pierpaolo Porcu)*

La porzione completamente sommersa è interrotta da due laghi e riemerge in una grande sala lunga circa 100 metri, larga 20 metri ed alta altrettanti. La porzione sinistra di questa cavità, denominata "Sala del Torrente" (Foto 27), è occupata da un imponente cumulo di crollo che costringe l'acqua proveniente dal sifone a scorrere sul lato destro della sala. Percorso un alveo di qualche decina di metri, il torrente sotterraneo si immette in un nuovo sifone che s'incunea sotto una parete di calcare compatto. Questo sifone, inframmezzato da alcune bolle d'aria, prosegue per circa 50 metri con una profondità modesta per poi sbucare in un ambiente lungo circa 100 metri che si chiude su uno specchio d'acqua. Dopo circa 70 metri, il nuovo sifone emerge in un'altra sala di dimensioni imponenti, lunga oltre 150 metri e con altezze difficilmente stimabili nonostante le pur potenti luci in dotazione agli speleosub. La grande cavità, denominata "Galleria delle Cascate", è occupata da due estesissime frane e, lungo l'alveo sotterraneo, da una serie di colatoi laterali.

Foto 27: grotta Locoli – Sala del Torrente (Foto: Pierpaolo Porcu) - *Locoli cave - Sala del Torrente (Photo: Pierpaolo Porcu)*

In fondo alla galleria il soffitto si abbassa repentinamente e le pareti, sin qui lontane tra loro alcune decine di metri, si stringono sino a raggiungere a malapena i tre metri di larghezza. In questo punto si presenta l'ennesimo sifone che, attualmente, rappresenta l'estremo limite esplorativo delle condotte in direzione Nord. Le nuove gallerie esplorate costeggiano il versante orientale del Monte Albo con un orientamento complessivo compreso tra 40° e 50° N, in direzione della sorgente di Fruncu 'e Oche e dell'abitato di Siniscola; per questo motivo tutto il nuovo ramo è stato denominato "Diramazione Siniscola". Così come è possibile supporre che le profonde gallerie esplorate da Stanton rappresentino la porzione di un più esteso carso saturo, è stato ipotizzato che le gallerie della "Diramazione Siniscola" potessero essere le vie di deflusso che connettono il bacino d'immagazzinamento idrico sotterraneo di grotta Locoli con la sorgente di Fruncu 'e Oche. Ai sifoni poco profondi ubicati tra le cavità a carso saturo (Foto 28) ed alle condotte di deflusso della Sala delle Cascate, invece, si è attribuito il ruolo di sfioratori, in grado di regolare i deflussi dalle condotte serbatoio verso quelle di deflusso. Queste due ipotesi saranno sviluppate nel paragrafo dedicato alle analisi idrologiche condotte con l'utilizzo dei traccianti geochimici.

Foto 28: lo sfioratore localizzato presso la Sala del Torrente di grotta Locoli (Foto: Pierpaolo Porcu) - *spillway close to Sala del Torrente of Locoli cave (Photo: Pierpaolo Porcu)*

Nel 2009, a seguito dello svuotamento artificiale del breve sifone S_{1ter}, gli speleologi dello Speleo Club Nuoro e dello Speleo Club Oristanese hanno avviato l'esplorazione sistematica delle gallerie denominate "Diramazione Su Bufalu", che ha consentito di rilevare oltre 500 metri di nuovi ambienti e meandri (Foto 29).

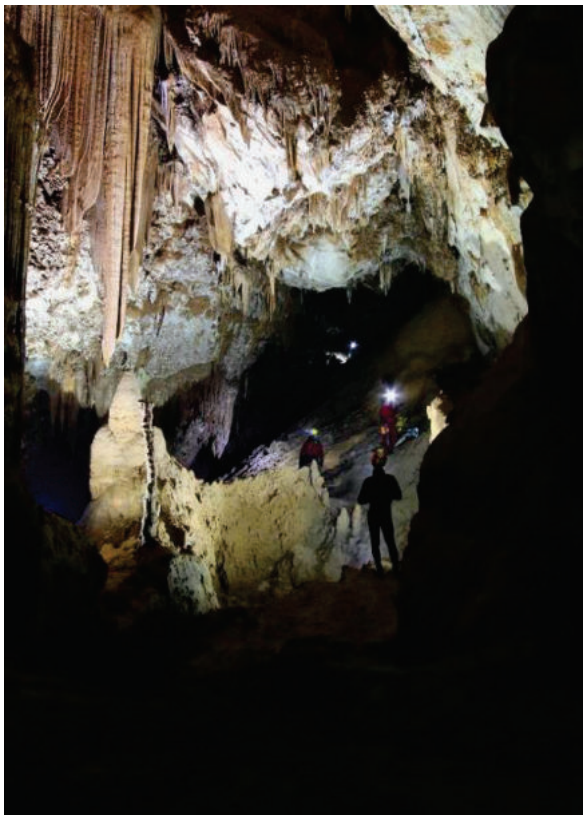

Foto 29: grotta Locoli – le gallerie superiori nella "Diramazione del Bufalo" (Foto: Speleo Club Nuoro) - *Locoli cave - the upper galleries in the "Diramazione del Bufalo" (Photo: Speleo Club Nuoro)*

Negli specchi d'acqua presenti in questa diramazione sono stati posizionati alcuni sensori di monitoraggio che hanno consentito di acquisire ulteriori dati sulla variazione dei livelli piezometrici, delle temperature e delle conducibilità elettriche al variare delle condizioni idrodinamiche nelle condotte. L'interpretazione dei monitoraggi sono riportate nei successivi paragrafi dedicati alle analisi idrogeologiche sull'acquifero carsico.

Altre risorgenti temporanee nella valle di Locoli

Fatta eccezione per la sorgente di Fruncu 'e Oche, la dinamica dei deflussi idrici nell'acquifero carsico profondo del Monte Albo si concentra sulle risorgenti temporanee che si immettono nella rete idrografica superficiale della valle di Locoli. La testimonianza che non siano presenti ulteriori sorgenti di "troppo pieno" a N-E del Rio Locoli la si può desumere osservando la continuità della barriera fisica costituita dal rilevato stradale sulla SS 131 d.c.n., disposta parallelamente al Monte Albo: tale barriera, infatti, non risulta superata da alcuna opera di attraversamento idrico nel tratto che va dal ponte sul Rio Locoli sino a quello sul Rio Fruncu 'e Oche.

Poche decine di metri a valle dell'ingresso della grotta Locoli, lungo il tratto d'alveo iniziale del omonimo rio, è presente la risorgente di "Sa Conchedda 'e Locoli" (Foto 30), angusta e dal modestissimo sviluppo planimetrico aereo. L'ingresso di questa cavità, caratterizzato da superfici calcaree perfettamente levigate e dalla presenza di uno specchio d'acqua permanente tuttora inesplorato, è interessata dalle stesse fasi idrodinamiche di piena che incidono sulla

soprastante grotta "Locoli". La quota del sopra citato livello idrico è riconducibile a quella dei sifoni pensili localizzati all'interno di grotta “Locoli” e, quindi, "Sa Conchedda 'e Locoli" può considerarsi come la principale via di drenaggio delle condotte subaeree presenti in quella cavità.

Foto 30: la risorgente di “Sa Conchedda ‘e Locoli” posta lungo l’alveo dell’omonimo rio - *"Sa Conchedda 'e Locoli" spring along the Locoli riverbed*

Nella porzione più meridionale della valle di Locoli, a circa 350 metri ad Est dall’ingresso dell’omonima cavità, è presente un pozzo artificiale di grande diametro il cui tratto iniziale è impostato sulle alluvioni recenti e la cui base intercetta, ad una profondità di circa 5 metri, i conglomerati post eocenici. Tale opera è stata realizzata in corrispondenza dell’alveo di un brevissimo segmento idrografico (Foto 31), la cui osservazione diretta ha permesso di rilevare un ulteriore punto di emissione idrica naturale, localizzato a monte del pozzo, che si attiva durante le piene.

Foto 31: pozzo artificiale attestato sui conglomerati terziari della valle di Locoli, ubicato in prossimità dell’omonima grotta - *artificial well in the tertiary conglomerates of Locoli valley, near the Locoli cave entrance*

La disostruzione parziale di questa risorgente ha consentito di portare alla luce una diaclasi piuttosto profonda, impostata sui conglomerati fratturati ed interessata da evidenti fenomeni di erosione carsica. A seguito dell’opera di disostruzione è stato raggiunto un livello idrico che s’incunea in profondità entro la compagine rocciosa. Il livello piezometrico osservato è correlabile ai livelli dinamici del pozzo localizzato a valle, di quello presente entro “Sa Conchedda ‘e Locoli” e dei sifoni pensili ubicati entro la grotta “Locoli”.

A circa 1,5 Km dall’ingresso di grotta “Locoli”, a ridosso del versante calcareo del Monte Albo e poco ad Ovest di Cuile Ramasinu, è presente una polla ricavata nel

corso di recenti lavori di miglioramento pascolo (Foto 32). Questa scaturigine, che si presenta come un piccolo specchio d'acqua permanente, in occasione delle piene è interessata da cospicue portate idriche che si immettono nel Rio Locoli. Considerato il comportamento idrodinamico osservato e l'ubicazione di questa risorgente temporanea, posta in una posizione intermedia tra grotta Locoli e la sorgente di Fruncu 'e Oche, la stessa è stata oggetto di alcuni monitoraggi che hanno consentito di acquisire trend di variazione dei livelli piezometrici, delle temperature e delle conducibilità elettriche al variare delle diverse condizioni idrodinamiche nell'acquifero. Anche i risultati di tali monitoraggi sono riportati nei paragrafi seguenti.

Foto 32: risorgente di "troppo pieno" presso "Cuile Carta" (Pozzo Carta) intercettata da alcuni lavori di miglioramento pascolo - *overflow spring at "Cuile Carta" (Pozzo Carta)*

Idrodinamica dell'acquifero carsico

Obiettivi, metodologia e strumentazioni

Le analisi idrogeologiche sviluppate in questo studio hanno tratto vantaggio dal non doversi adattare ad alcuna rigida limitazione di tempo per la loro esecuzione; ciò ha permesso di individuare alcuni target di ricerca e di modulare le scelte sui monitoraggi chimico-fisici sia in base ai risultati che mano a mano venivano raggiunti nel corso delle esplorazioni speleologiche sia in relazione alle analisi in progress dei dati di monitoraggio (MURGIA, 2010). Questi ultimi hanno avuto come finalità la definizione delle principali direttrici di deflusso idrico sotterraneo e l'acquisizione di alcuni elementi conoscitivi utili per effettuare una prima valutazione sulla geometria delle condotte carsiche deputate al drenaggio delle acque di piena nel Monte Albo (GOLDSCHEIDER & DREW, 2007). Tali obiettivi sono stati perseguiti tra la fine del 2007 e l'inizio del 2008 identificando preliminarmente sul terreno i principali punti di assorbimento delle acque superficiali e, successivamente, tracciando le acque d'infiltrazione nel corso di due distinti episodi di piena. Il passaggio del tracciante nell'acquifero è stato monitorato collocando una serie di fluocaptori nei sifoni di grotta "Locoli" e posizionando presso la sorgente di Fruncu 'e Oche un sensore fluorimetrico in grado di valutare e registrare le variazioni di concentrazione del tracciante nelle acque defluenti dal sistema carsico.

Nella tarda primavera del 2008, a seguito della scoperta della "Diramazione Siniscola" e del torrente sotterraneo che la percorre, si è deciso di tracciare i deflussi in questa porzione del sistema carsico al fine di accertare il collegamento tra il torrente ipogeo e la sorgente di Fruncu 'e Oche. Nell'estate successiva è stato effettuato un primo tracciamento presso uno degli inghiottitoi presenti nella piana di Su Bufalu, al fine di ottenere informazioni utili sulle modalità e sulle direzioni di deflusso idrico sotterraneo in regime di magra. Considerata l'assenza di qualsiasi circolazione idrica superficiale nel periodo estivo, l'iniezione del tracciante è stata eseguita diluendo la fluoresceina sodica in un impulso unico di circa 24 m^3 d'acqua resi disponibili dall'Ente Foreste della Sardegna.

Nel febbraio del 2009, considerati i risultati ottenuti sino a quel momento e con l'obiettivo di acquisire dati di tipo quantitativo utili per i successivi tracciamenti, è stata posizionata nella sorgente di Fruncu 'e Oche una sonda multiparametrica in grado di acquisire i valori di temperatura, conducibilità e livello idrico, questi ultimi necessari per valutare le portate in sorgente. Nel contempo, è stata posizionata una seconda sonda

multiparametrica nel sifone S_1 di grotta "Locoli" al fine di comparare le oscillazioni del livello piezometrico che si manifestano simultaneamente nel cuore dell'acquifero carsico e nella sorgente.

Nella tarda primavera del 2009, in concomitanza con un evento di piena occorso alla fine del mese di aprile, l'acquifero carsico è stato nuovamente tracciato iniettando il colorante presso uno degli inghiottitoi presenti in località Nuscalè, con l'obiettivo di accertare il collegamento tra quel punto di infiltrazione e la sorgente di Fruncu 'e Oche. Al fine di non interferire con le iniezioni di fluoresceina già programmate per il successivo periodo estivo, questo test è stato eseguito utilizzando come tracciante il Tinopal® CBS-X.

Nell'estate del 2009, in occasione della campagna esplorativa speleosubacquea nella "Diramazione Siniscola", si è provveduto ad eseguire due nuovi test di tracciamento presso la "Sala del Torrente" di grotta "Locoli", nello stesso sito già interessato nel 2008 da una precedente iniezione di fluoresceina. Questi tracciamenti hanno avuto come obiettivo quello di verificare quale percentuale dei deflussi idrici sotterranei osservati nella "Diramazione Siniscola" contribuisse ad alimentare direttamente la sorgente di Fruncu 'e Oche, ovvero di valutare l'eventuale presenza di un sub-bacino d'immagazzinamento carsico "tampone" posto tra grotta "Locoli" e la sorgente stessa. Sempre nell'estate del 2009, e ancora con l'ausilio delle risorse messa a disposizione dell'Ente Foreste della Sardegna, si è provveduto ad iniettare 2 Kg di fluoresceina sodica presso l'inghiottitoio di Nuscalè, al fine di verificare i dati dell'analogo tracciamento in regime di magra effettuato l'anno precedente ed ottenere una stima dei volumi idrici immagazzinati nella porzione più profonda dell'acquifero carsico.

In occasione delle esplorazioni speleosubacquee condotte tra la fine del 2009 e la primavera del 2010, sono state posizionate due nuove sonde multiparametriche nei sifoni di grotta "Locoli", la prima nel sifone S_2 e la seconda nella Sala del Torrente. I dati di monitoraggio acquisiti da queste sonde, insieme a quelli rilevati dai sensori già posizionati presso il sifone S_1 della stessa grotta, nella sorgente di Fruncu 'e Oche e nella polla d'acqua presente presso Cuile Ramasinu, hanno consentito di compiere approfondimenti sulle modalità di deflusso nell'acquifero carsico durante le piene.

Anche il sistema di drenaggio idrico ipogeo di grotta "Locoli" posizionato superiormente rispetto ai sifoni profondi è stato interessato, a più riprese, dai monitoraggi di livello idrico, temperatura e conducibilità. Tali monitoraggi hanno consentito di acquisire dati sulle interazioni tra la dinamica delle

acque del circuito carsico profondo e quelle che interessano le gallerie localizzate alle quote superiori.

Le indagini condotte attraverso i test di tracciamento dell'acquifero carsico hanno consentito di inquadrare in un contesto idrogeologico definito sia le analisi delle curve di portate della sorgente di Fruncu 'e Oche sia quelle dei parametri chimico-fisici delle acque. In particolare, i monitoraggi dei deflussi misurati in sorgente hanno permesso di valutare la riserva regolatrice di Fruncu 'e Oche e di identificare la tipologia di circuito carsico che meglio corrisponde all'acquifero del Monte Albo. I deflussi misurati nel periodo settembre 2010 - settembre 2011, inoltre, sono stati correlati ai dati degli afflussi meteorologici riferibili allo stesso periodo; tali dati sono stati acquisiti da due pluviometri dotati di datalogger e di sistema GSM di trasmissione dati disposti nel bacino idrogeologico in esame in occasione di questo studio. L'insieme di queste analisi ha consentito di redigere un modello afflussi-deflussi dell'acquifero carsico che fornisce, per le analisi di bilancio idrologico, una percentuale assai attendibile del coefficiente d'infiltrazione in relazione al totale delle precipitazioni.

In tutti i tracciamenti eseguiti, le variazioni di concentrazione del colorante in sorgente sono state monitorate con l'ausilio di un fluorimetro a campionamento continuo tipo "GGUN-FL30", prodotto dall'Università svizzera di Neuchatel, in grado di rilevare la presenza di tre diversi tipi di tracciante (Fluoresceina, Tinopal® e Rodamina) in concentrazioni pari a 0,02 ppb (Foto 33). Lo stesso fluorimetro è dotato anche di un sensore di temperatura con risoluzione al centesimo di grado e di un misuratore di torbidità.

Foto 33: fluorimetro - *fluorimeter*

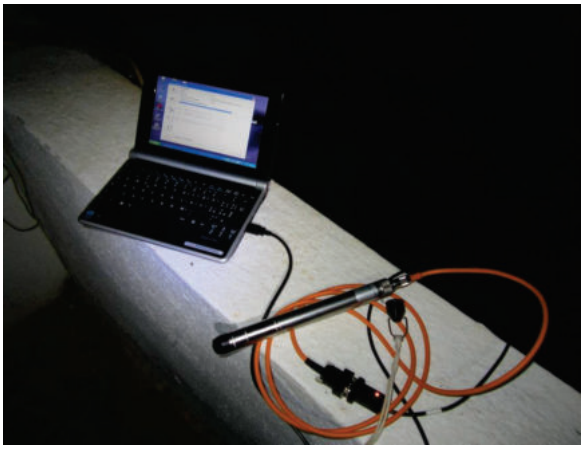

Foto 34: sonda multiparametrica - *multiparameter monitoring sensor*

Per il monitoraggio dei valori di temperatura, conducibilità e livello idrico sono stati variamente utilizzati 6 sensori multiparametrici tipo "DL/N" prodotti dalla società svizzera Sensor Technik Simach

(STS®) (Foto 34). Per il monitoraggio degli afflussi meteorologici, invece, sono stati utilizzati due pluviometri R102 prodotti dalla italiana ETG s.r.l. (Foto 35).

Foto 35: pluviometro localizzato presso "Caserma Guzzurra" nel versante occidentale del Monte Albo - *rain gauge set at "Caserma Guzzurra" in Monte Albo western slope*

Indagini sulle principali direttrici di deflusso sotterraneo

Come già sopra riassunto, gli obiettivi prioritari di ricerca hanno avuto come finalità quelle di individuare le principali direttrici di deflusso idrico sotterraneo e di acquisire, nel contempo, nuovi elementi conoscitivi sulla geometria delle condotte carsiche deputate al drenaggio delle acque di piena. A tal fine, le iniezioni del tracciante sono state effettuate, in tempi distinti, negli inghiottitoi di Bonaetè, ubicato nel versante occidentale del Monte Albo ad una quota di 535 metri s.l.m., in quello presente nella piana di Su Bufalu, localizzabile alle pendici orientali delle assise carbonatiche ad una quota di 235 m s.l.m. e direttamente nel torrente sotterraneo localizzato nella Sala del Torrente di grotta "Locoli", ad una quota stimabile in circa 87 m s.l.m.. (Fig. 13).

Il tracciamento dell'inghiottitoio di Bonaetè (Foto 36) è stato eseguito il 19 dicembre 2007, in condizioni climatiche non usuali per questa porzione di Sardegna: al momento dell'iniezione della fluoresceina, infatti, il torrente in ingresso nel sistema carsico era alimentato principalmente da acque di fusione nivale con una portata di poco inferiore ai 10 l/s e con una temperatura di 3,6 °C. Al momento dell'iniezione dei 2 Kg di fluoresceina sodica previsti, l'intero sistema carsico ipogeo del Monte Albo si presentava assai ben alimentato dalle abbondanti precipitazioni che interessavano, nel periodo, tutta la Sardegna nord-orientale. La presenza del colorante nella sorgente di Fruncu 'e Oche (Fig. 14) si è manifestata circa 44 ore dopo la sua immissione nei condotti idrici sotterranei, dopo aver attraversato un percorso ipogeo, stimato in linea d'aria, di circa 8,35 Km. La velocità media del tracciante nell'acquifero è valutabile in circa 150 m/h mentre il tempo complessivo di residenza della fluoresceina nelle condotte ipogee è stato di poco superiore alle 100 ore.

La concentrazione massima del tracciante si è manifestata in sorgente con un picco di circa 22,72 mg/m^3 dopo circa 9 ore dal primo riscontro di positività. L'analisi dei fluocaptori collocati presso la grotta "Locoli", effettuata dal laboratorio chimico del Presidio Multizonale di Prevenzione della ASL n° 3 di Nuoro, ha dato esito negativo. Con questo tracciamento si è accertata la presenza di una via di drenaggio carsico, sino a quel momento sconosciuta, che collega il versante occidentale del rilievo calcareo a quello orientale e, quindi, alla sorgente di Fruncu 'e Oche (Fig. 15).

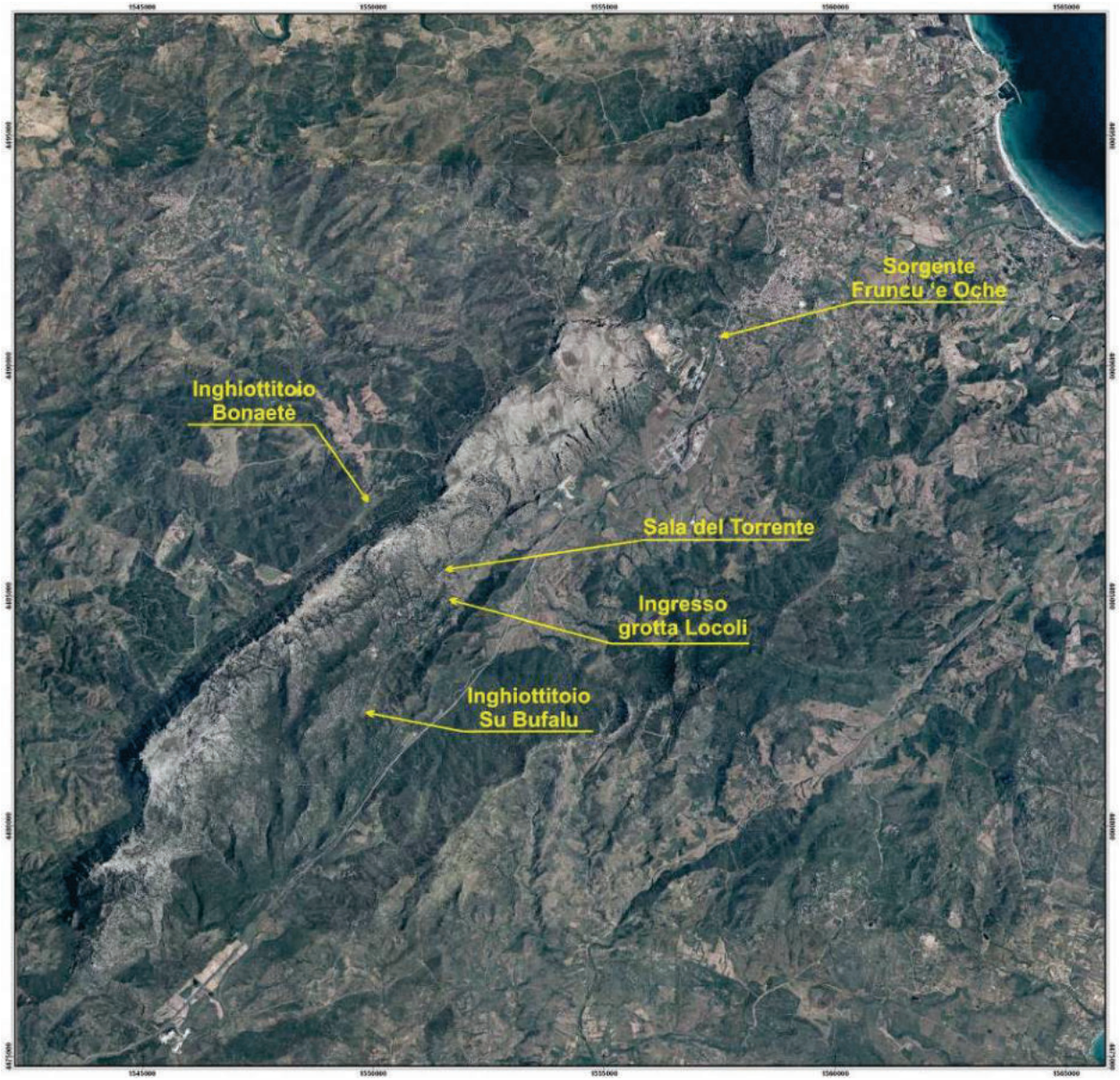

Figura 13: ubicazione dei principali punti di analisi idrogeologica nell'area in studio (Base cartografica: Provincia di Nuoro) - *location of main sites for hydrogeological analysis in the survey area - (cartographic base: Provence of Nuoro)*

Foto 36: iniezione del tracciante presso l'inghiottitoio "Bonaetè" effettuata in acque di fusione nivale - *tracer injection in melting snow water at the "Bonaetè" sinkhole*

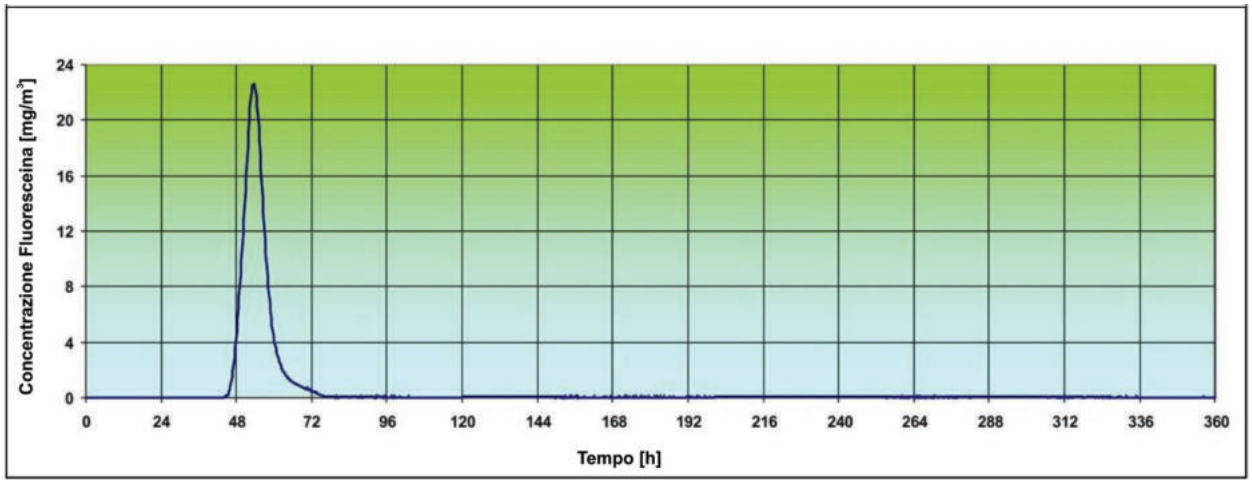

Figura 14: colorazione dall'inghiottitoio Bonaetè in fase di piena. Il rilascio del tracciante in sorgente si manifesta con un unico picco dopo circa 44 ore dall'iniezione e con tenori di colorante elevati - *dye test into Bonaetè sinkhole in flood condition. The release of high concentration of tracer into the spring is shown by a single peak about 44 hours after injection*

Questa prima osservazione ha obbligato, innanzitutto, ad estendere i confini del bacino idrogeologico che alimenta la sorgente di Fruncu ‘e Oche includendo il bacino idrologico superficiale, impostato su litotipi paleozoici, del corso d’acqua che s’infiltra nel Monte Albo in località Bonaetè. Il mancato riscontro del passaggio del colorante presso grotta “Locoli”, inoltre, induce a ritenere che le vie di drenaggio idrico sotterraneo che collegano l’inghiottitoio di Bonaetè con la sorgente di Fruncu ‘e Oche seguano una direzione WNW-ENE, in corrispondenza con la linea tettonica della faglia inversa di Schiriddè.

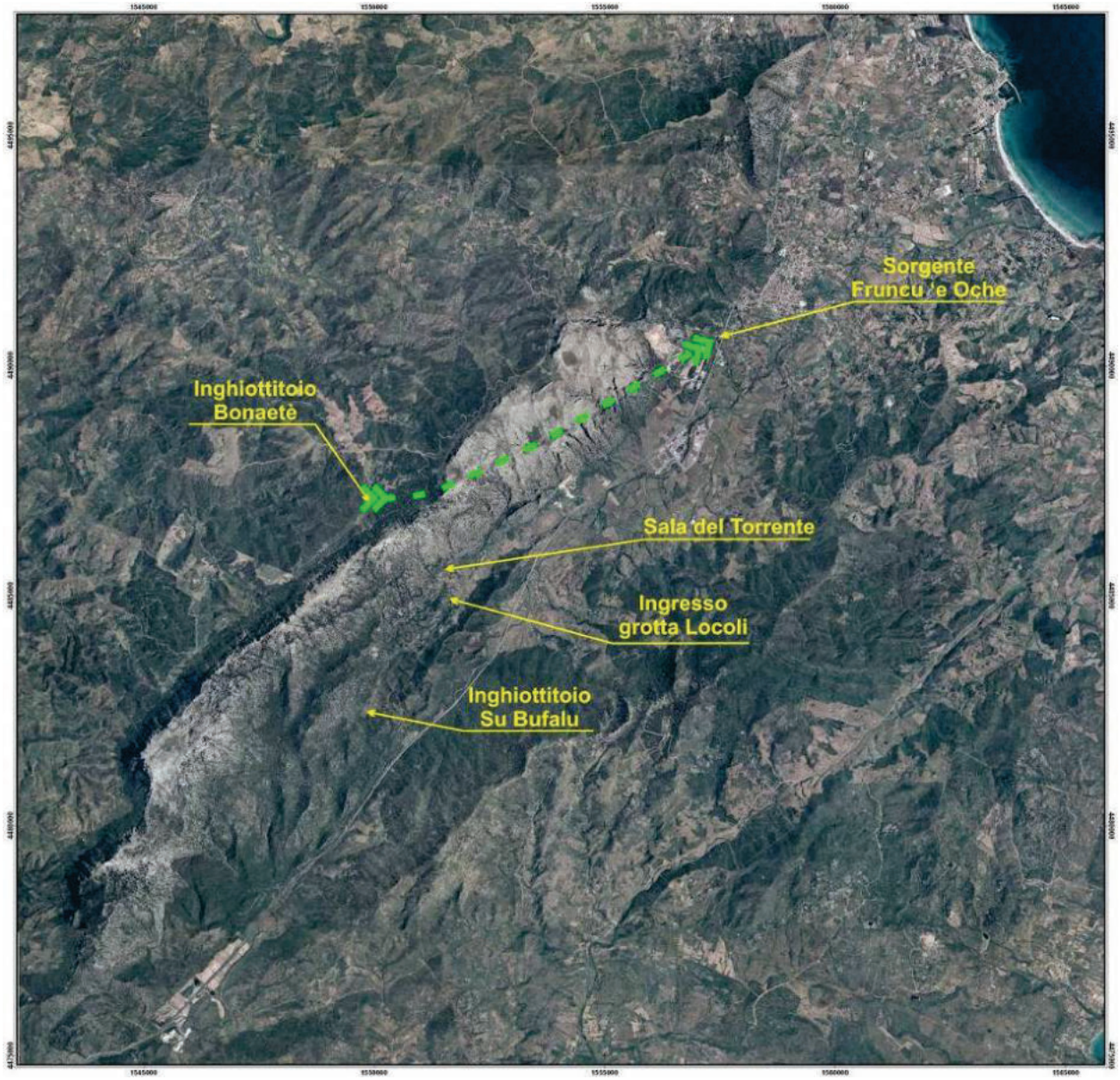

Figura 15: colorazione dall’inghiottitoio Bonaetè in fase di piena. L’assetto strutturale del Monte Albo e la negatività del passaggio del tracciante dalla grotta Locoli indicano una direzione di deflusso orientata ESE-WNW (Base cartografica: Provincia di Nuoro) - *dye test into Bonaetè sinkhole during a flood. The Monte Albo structural setting and the absence of tracer passage at Locoli cave indicate a ESE-WNW flow direction (cartographic base: Provence of Nuoro)*

La notevole velocità con cui il tracciante si è trasmesso in sorgente è da mettere in relazione al dislivello di quasi 500 metri esistente tra il punto d'iniezione ed il recapito finale. Il confronto tra i valori di temperatura dell'acqua misurati al momento dell'iniezione del tracciante (3,6 °C) ed in sorgente (T minima pari a 13,5 °C) (Fig. 16) testimonia che le acque di piena provenienti dall'inghiottitoio di Bonaetè e dalle quote più elevate del Monte Albo diluiscono in modo sostanziale la propria "informazione termica", e le loro portate, in un contesto più generale di deflussi sotterranei d'infiltrazione recente caratterizzato da volumi idrici assai rilevanti, la cui temperatura media risulta scarsamente influenzata dalle acque infiltratesi alle quote superiori.

Il secondo tracciamento, effettuato nella valle di Su Bufalu, è stato eseguito durante l'evento piovoso del 4 gennaio 2008 con l'immissione di 1 Kg di fluoresceina in un torrente a regime temporaneo che, al momento dell'iniezione, si immetteva in uno degli inghiottitoi presenti nella piana con una portata di circa 25 l/s, (Foto 37).

Foto 37: colorazione dalla piana di "Su Bufalu". L'acqua di piena tracciata s'infiltra rapidamente in uno degli inghiottitoi presenti nella valle - *dye test at "Su Bufalu" plain. The flood water rapidly infiltrates into a sinkhole*

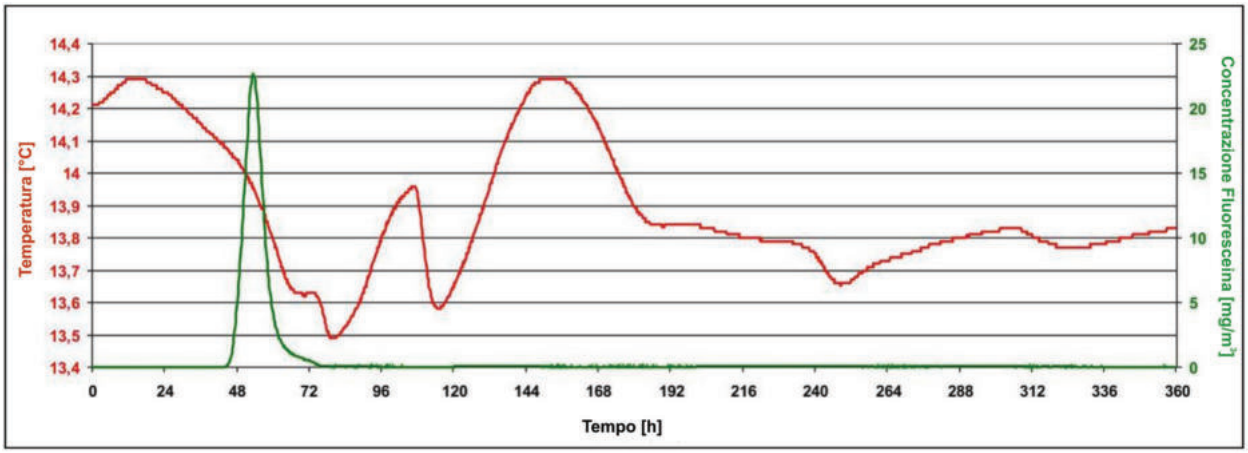

Figura 16: colorazione dall'inghiottitoio "Bonaetè" in fase di piena. L'impulso idrico tracciato, infiltratosi nei circuiti sotterranei con una temperatura di 3,6 °C, è emerso in sorgente dopo aver fortemente smorzato l'impronta termica iniziale - *dye test into Bonaetè sinkhole during a flood. The traced water pulse, infiltrated with a temperature of 3.6 °C, has emerged in spring after a strong loss of the initial thermal imprint*

Dal controllo diretto delle acque di piena presso la risorgente di Locoli, posta a circa 3,25 Km in linea d'aria dal punto d'iniezione, è stato possibile osservare il passaggio del tracciante già dopo 24 ore circa dalla sua immissione (Foto 38).

Foto 38: colorazione dalla piana di "Su Bufalu". L'acqua colorata emerge da Sa Conchedda 'e Locoli a meno di 24 ore dalla sua iniezione nei circuiti sotterranei (Foto: Barbara Garau) - *dye test at "Su Bufalu" plain. The traced water reemerges from Sa Conchedda e' Locoli less than 24 hours after injection (Photo: Barbara Garau)*

Questa osservazione è stata confermata anche dalle successive analisi di laboratorio dei fluocaptori precedentemente disposti all'interno della cavità carsica. La presenza del colorante nella sorgente di Fruncu 'e Oche (Fig. 17) si è manifestata circa 72 ore dopo la sua iniezione nei condotti sotterranei a seguito dell'attraversamento di un percorso ipogeo, valutato anch'esso in linea d'aria, pari a circa 11,25 Km. La velocità media del tracciante, in questa porzione di sistema carsico ipogeo ed alle condizioni idrodinamiche in atto durante la prova, è stimabile in circa 135 m/h mentre il tempo complessivo di residenza della fluoresceina nelle condotte è stato di poco superiore alle 170 ore. La concentrazione massima del tracciante si è manifestata in sorgente con un picco di circa 1,37 mg/m^3 dopo circa 12 ore dal primo riscontro di positività.

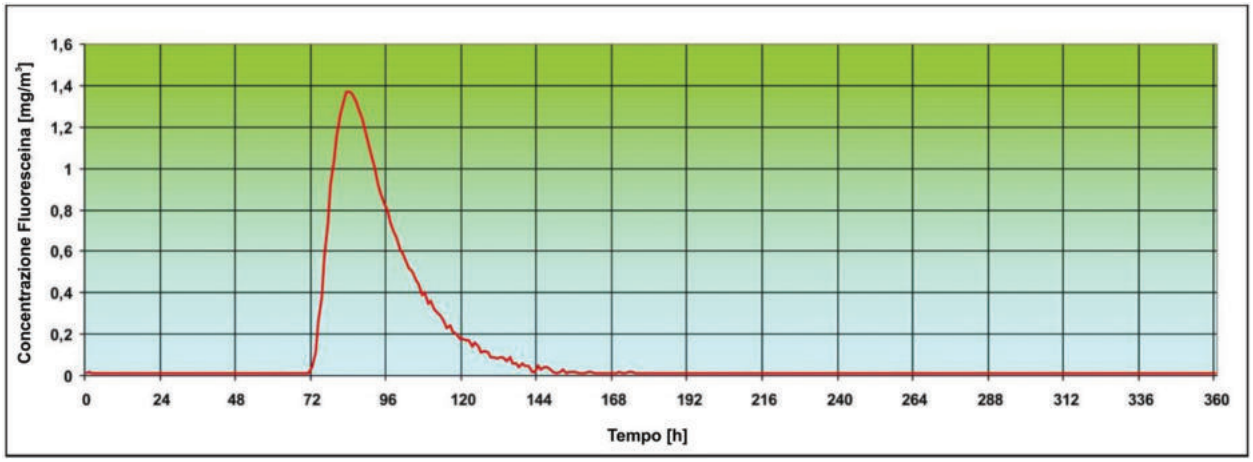

Figura 17: colorazione dalla piana di "Su Bufalu" in fase di piena. Il rilascio del tracciante si manifesta in sorgente dopo circa 72 ore dall'iniezione con un unico picco di concentrazione d'intensità piuttosto modesta - *dye test at "Su Bufalu" plain during a flood. The release of the tracer spring out after about 72 hours since injection with a single not very high concentration peak*

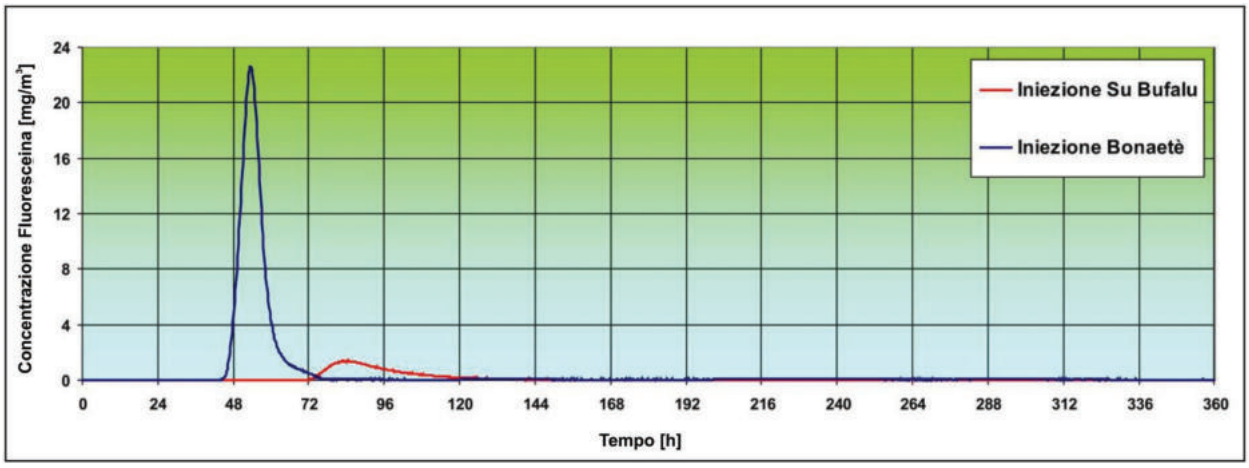

Figura 18: confronto tra le colorazioni nell'inghiottitoio "Bonaetè" e nella piana di "Su Bufalu". La notevole differenza nel valore dei due picchi è dovuta alle differenti caratteristiche idrodinamiche dei circuiti in cui sono transitate le acque tracciate. Parte del tracciante immesso nella piana di "Su Bufalu", inoltre, è stato emesso dalle risorgenti di troppo pieno nella valle di Locoli senza transitare per la sorgente di Fruncu 'e Oche - *comparison between the dye test in "Bonaetè" sinkhole and dye test in "Su Bufalu" plain. The significant difference of the two peaks is due to different hydrodynamic behaviour of the drains through which the traced waters flowed. Part of the tracer injected into "Su Bufalu" plain was released from overflow resurgences in the Locoli valley without reaching the Fruncu e' Oche spring*

Confrontando le curve di rilascio di questi due primi tracciamenti (Fig. 18) emerge una differenza di concentrazione superiore ad un fattore 16 tra i due picchi manifestatisi in sorgente. Questa grande differenza è da attribuire solo in parte alla quantità doppia di colorante iniettato a Bonaetè rispetto a Su Bufalu ed è connessa, soprattutto, alle diverse tipologie di circuiti drenanti sotterranei sui quali hanno impattato le due colorazioni; quella iniettata a Bonaetè è transitata in un circuito carsico "veloce", molto trasmissivo e diretto, scaricandosi in sorgente senza diluirsi in modo sostanziale con le acque di piena provenienti da altre porzioni dell'acquifero. L'iniezione di colorante effettuata a Su Bufalu, invece, ha attraversato la porzione più bassa del sistema carsico, diluendosi e miscelandosi con gli apporti idrici di altri tributari ipogei prima di raggiungere la sorgente e rilasciando buona parte del colorante con le piene di grotta "Locoli" e dalle altre risorgenti che si immettono nel rio Locoli.

Il terzo tracciamento, condotto con l'immissione di 200 g di fluoresceina nell'alveo sotterraneo della Galleria del Torrente (Foto 39), è stato eseguito il 17 Maggio 2008 in regime di morbida. La portata del torrente sotterraneo al momento dell'immissione del tracciante, misurata dagli speleosub calcolando in maniera speditiva la velocità dell'acqua e la sezione di deflusso, è stata stimata in circa 500 l/s.

Foto 39: iniezione del tracciante nella Sala del Torrente di grotta Locoli (Foto: Pierpaolo Porcu) - *tracer injection at the Sala del Torrente on Locoli cave (Photo: Pierpaolo Porcu)*

Nelle ore successive alla iniezione il sistema è stato interessato da due distinti input meteorologici (Fig. 19) che hanno influenzato le modalità di rilascio del colorante. In questa occasione, il passaggio della fluoresceina si è manifestato in sorgente circa 60 ore dopo l'iniezione, a seguito dell'attraversamento di un percorso sotterraneo stimato, in linea d'aria, in circa 8 Km. La velocità media del tracciante nel sistema carsico ipogeo è valutabile in circa 100 m/h mentre il tempo complessivo di residenza della fluoresceina nelle condotte ipogee è stato di circa 130 ore. La concentrazione massima del tracciante si è manifestata, dopo circa 10 ore dal primo riscontro di positività con un picco di circa 2 mg/m^3; un secondo picco, di circa 0,8 mg/m^3, è stato rilevato dopo circa 22 ore ed un terzo, di circa 1 mg/m^3, dopo circa 33 ore dal primo passaggio del colorante in sorgente. La presenza nella curva di rilascio di tre picchi di concentrazione è riconducibile alla confluenza, lungo la linea di drenaggio che collega la Sala del Torrente con la sorgente di Fruncu 'e Oche, di uno o più tributari ipogei i cui apporti idrici, in modo intermittente o in tempi differenti, hanno provocato una diluizione dei deflussi tracciati e la conseguente partizione dell'onda di colorante in tre picchi distinti (Fig 20). L'attivazione dei tributari ipotizzati è da mettere in relazione ai due distinti input meteorologici occorsi tra il momento dell'iniezione e quello di arrivo dell'onda di colorante in sorgente. Lo schema che rappresenta tale ipotesi, illustrato in figura 17, prevede la presenza di un'unica via preferenziale di deflusso verso la sorgente piuttosto che di una circuitazione distribuita su più vie di drenaggio divaganti e disposte alla stessa quota lungo la direzione principale di deflusso.

L'analisi dei dati relativi agli ultimi due tracciamenti descritti confermano l'ipotesi formulata nel paragrafo dedicato all'analisi strutturale dell'area: le acque che s'infiltrano sul versante orientale del Monte Albo seguono, per via sotterranea, una direttrice SSW-NNE, parallela a quella della faglia di Nuoro. La notevole velocità del tracciante nell'acquifero accertata in tutte le prove di colorazione testimonia, inoltre, la presenza di gallerie carsiche molto ampie in grado di trasferire le acque di piena verso la sorgente di Fruncu 'e Oche in tempi assai rapidi (Fig. 21).

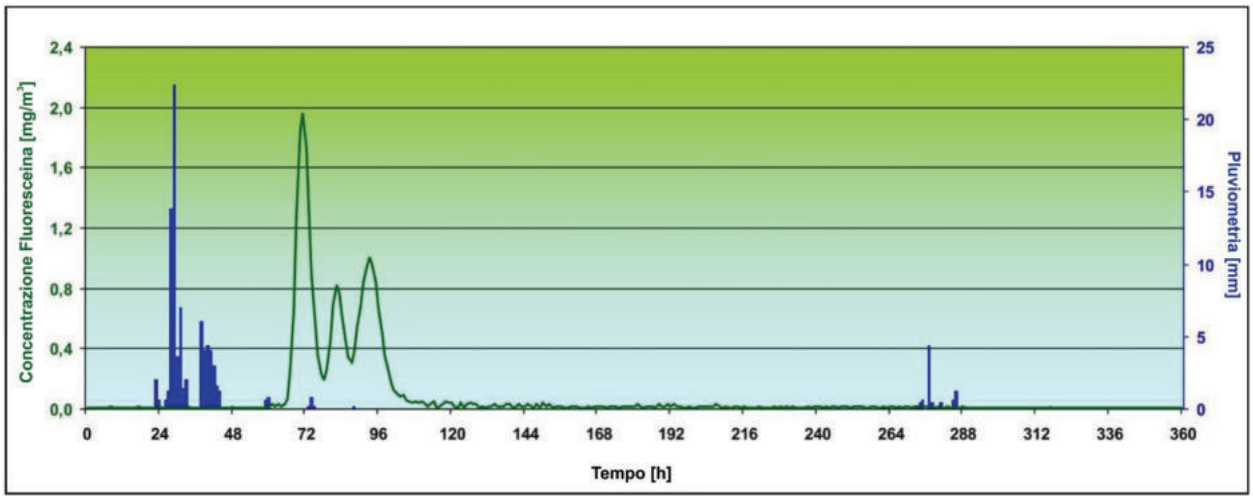

Figura 19: tracciamento dalla "Sala del Torrente" in fase di morbida. I tre picchi di piena nei quali si fraziona il rilascio del tracciante in sorgente sono correlabili con gli input di precipitazione succedutisi nel periodo di transito del colorante nei circuiti sotterranei - *dye test at the "Sala del Torrente" on average flow. The three tracer peaks at the spring are related to successive rainfalls occurred during the dye transit in the aquifer*

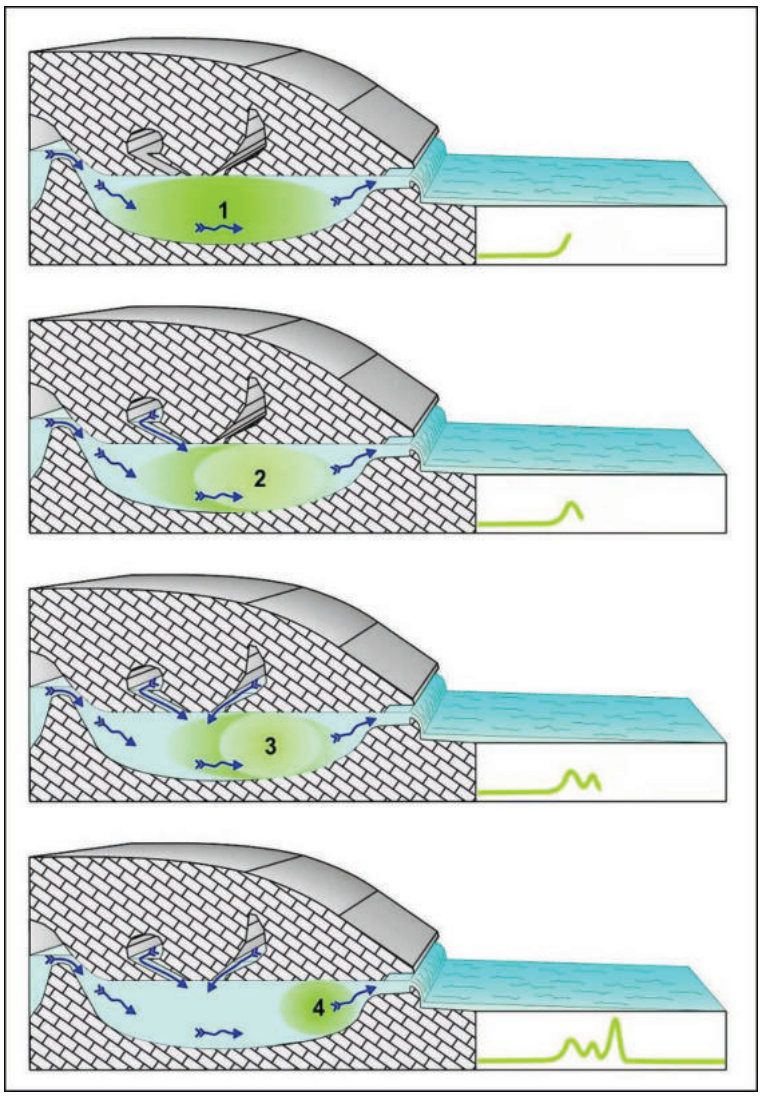

Figura 20: tracciamento dalla "Sala del Torrente" in fase di morbida - ipotesi sulle modalità di propagazione del colorante:
Fase 1: la fluoresceina inizia a transitare in sorgente;
Fase 2: il tracciante subisce una prima diluizione a seguito di un impulso di pioggia che innesca uno o più tributari localizzabili tra la Sala del Torrente e la sorgente di Fruncu 'e Oche;
Fase 3: concluso l'influsso del primo impulso, la concentrazione del tracciante riprende a crescere, sino all'arrivo di un nuovo impulso piovoso che definisce un secondo picco a seguito di una nuova diluizione;
Fase 4: il tracciante residuo transita in sorgente senza ulteriori diluizioni, dando luogo ad un terzo picco di concentrazione

Figure 20: dye test from "Sala del Torrente" - hypothesis on the dye propagation mode:
Step 1: the tracer reaches the spring;
Step 2: the tracer undergoes a first dilution as a result of a rain pulse that activates one or more tributaries localized between Sala del Torrente and Fruncu 'e Oche spring;
Step 3: when the influence of the first pulse ends, the tracer concentration raises again until a new rainy pulse arrives causing a second dilution;
Step 4: the residue tracer passes to the spring without further dilution, giving rise to a third peak.

Figura 21: ipotesi sulla direzione di deflusso del tracciante iniettato nella piana di "Su Bufalu" e nella "Sala del Torrente" (Base cartografica: Provincia di Nuoro) - *hypothesis on the flow direction of the tracer injected into "Su Bufalu" plain and the "Sala del Torrente" (cartographic base: Provence of Nuoro)*

Indagini sulle geometrie dell'acquifero concernenti il regime di magra

Il 13 agosto del 2008, al fine di ottenere informazioni anche sulle modalità di deflusso idrico sotterraneo in regime di magra, è stato effettuato un nuovo tracciamento negli inghiottitoi presenti nella piana di Su Bufalu. L'iniezione è stata eseguita diluendo 1 Kg di fluoresceina sodica in un impulso unico di circa 24 m^3 d'acqua, resa disponibile grazie all'intervento delle autobotti dell'Ente Foreste della Sardegna, la cui collaborazione si è dimostrata determinante per l'esecuzione della prova. In figura 22 la curva di restituzione del tracciante è messa a confronto con l'analoga curva relativa al precedente tracciamento effettuato in regime di piena.

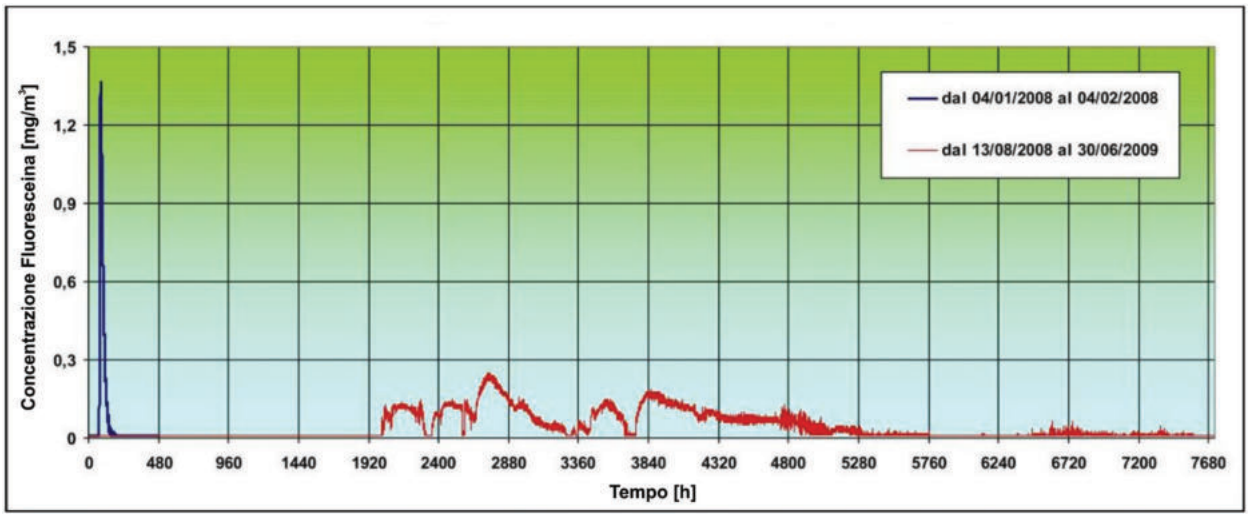

Figura 22: confronto tra i test di tracciamento eseguiti in piena ed in magra dall'inghiottitoio della piana di "Su Bufalu". Nel grafico risulta evidente la diversa distribuzione del rilascio del colorante in sorgente al variare del regime idrico che caratterizzava la singola iniezione del tracciante - *comparison of dye tests in "Su Bufalu" plain sinkhole during flood and in base flow condition. The graph clearly shows the different distribution of dye release in the spring due to variation of water regime*

Le variazioni di concentrazione misurate presso la sorgente di Fruncu 'e Oche sono state elaborate facendo coincidere il tempo T_0 di ogni singola iniezione. Dall'analisi del grafico risulta evidente la grande velocità con cui la fluoresceina si sia propagata verso la sorgente in regime di piena; in questa circostanza, rappresentata graficamente dal tratto blu, il tracciante è transitato in sorgente dopo circa 72 ore dalla sua immissione ed è completamente defluito dall'acquifero dopo ulteriori 4,7 giorni. La curva relativa alla colorazione eseguita in fase di magra, rappresentata graficamente dal tratto rosso, illustra come, in questa occasione, il tracciante sia affiorato in sorgente dopo oltre 83 giorni dalla sua iniezione nei circuiti sotterranei, continuando poi a defluire nei mesi successivi. L'analisi comparata delle due curve dimostra l'esistenza nell'acquifero di condotte carsiche poste sopra i livelli piezometrici di magra in grado di allontanare rapidamente le acque di piena verso la sorgente di Fruncu 'e Oche e di una estesa rete di condotte allagate la cui distribuzione nel sottosuolo permette un prolungato frazionamento dei deflussi di magra, argomento questo che sarà approfondito nel seguito. Nella curva (Fig. 23) il passaggio della fluoresceina in sorgente mostra valori di concentrazione caratterizzati da un andamento ciclico. Nel grafico, i tenori di colorante nell'acqua sono messi a confronto con quelli della torbidità, in modo da poter riferire le variazioni di concentrazione alle differenti condizioni idrodinamiche manifestatesi nell'acquifero: i periodi in cui la torbidità presenta i picchi, infatti, corrispondono ad altrettanti eventi di piena a cui seguono le fasi di svuotamento del sistema carsico.

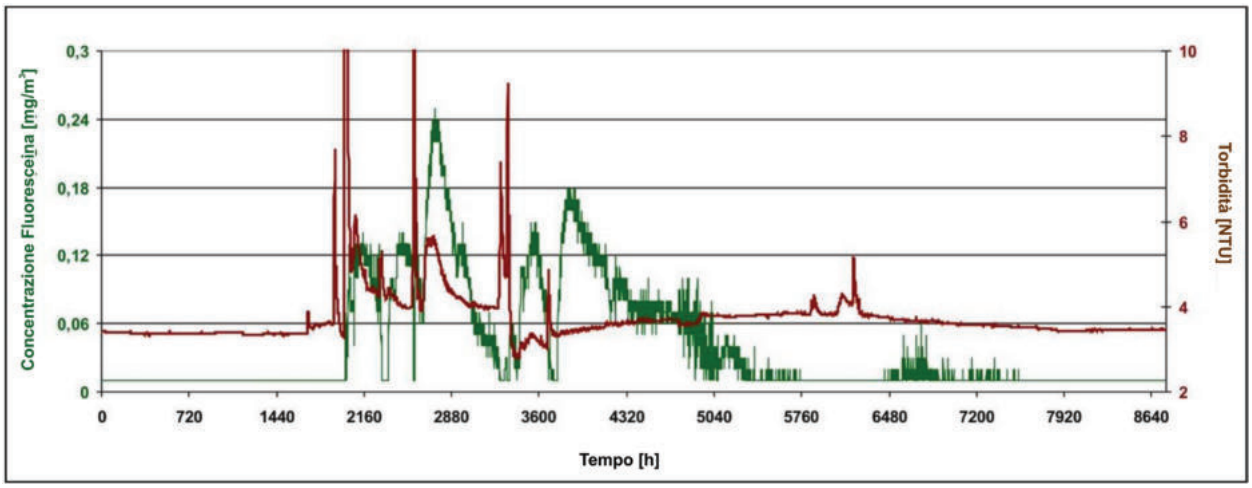

Figura 23: nel raffronto fluorimetria-torbidità, le modalità "cicliche" del rilascio del colorante immesso in fase di magra sono messe a confronto con le variazioni del regime idrico in sorgente - *in fluorimetry-turbidity comparison, the cyclical release of the dye injected in base flow condition is compared with changes in spring water regime*

Nel grafico risulta evidente come la concentrazione della fluoresceina decresca durante le fasi di svuotamento, tenda ad annullarsi per diluizione in occasione dei massimi di piena e si ripresenti all'inizio della successiva fase di scarica con concentrazioni ben superiori rispetto alla coda della precedente fase di svuotamento. Questo andamento periodico della concentrazione è da associarsi, assai probabilmente, all'effetto capacitivo delle condotte allagate nelle quali le acque "colorate" vengono parzialmente mobilizzate durante ognuna delle fasi di piena a seguito dell'innalzamento del livello piezometrico per poi essere gradualmente rilasciate verso la sorgente di Fruncu 'e Oche. A seguito di questi primi risultati si è deciso di ripetere la colorazione nella successiva stagione estiva utilizzando come punto d'immissione un inghiottitoio presente in località Nuscalè. La scelta del nuovo sito d'iniezione, oltre alla necessità di verificare l'andamento dei dati già rilevati, è legata anche alla possibilità di accertare l'interconnessione idrica sotterranea tra l'area di Monte Pitzinnu, fortemente disturbata dalla tettonica connessa alla Faglia di Nuoro, l'acquifero carsico e la sorgente di Fruncu 'e Oche (Fig 24). La stessa scelta è stata finalizzata anche ad una prima verifica sulla vulnerabilità dell'acquifero: il bacino idrografico che confluisce nell'inghiottitoio di Nuscalè, infatti, è attraversato dalla strada statale 131 d.c.n. Abbasanta-Olbia, la quale può essere considerata come un potenziale elemento di rischio per un eventuale inquinamento dello stesso acquifero. L'iniezione estiva è stata preceduta, il 27 aprile del 2009, in regime di piena, da un primo test di tracciamento eseguito utilizzando un chilogrammo di Tinopal® CBS-X, con il quale è stato possibile accertare preventivamente il collegamento tra l'inghiottitoio di Nuscalè e la sorgente di Fruncu 'e Oche (Fig. 25).

Figura 24: ipotesi sulla direzione di deflusso del tracciante iniettato nell'inghiottitoio "Nuscalè" (Base cartografica: Provincia di Nuoro) - *hypothesis on the flow direction of tracer injected into "Nuscalè" sinkhole (cartographic base: Provence of Nuoro)*

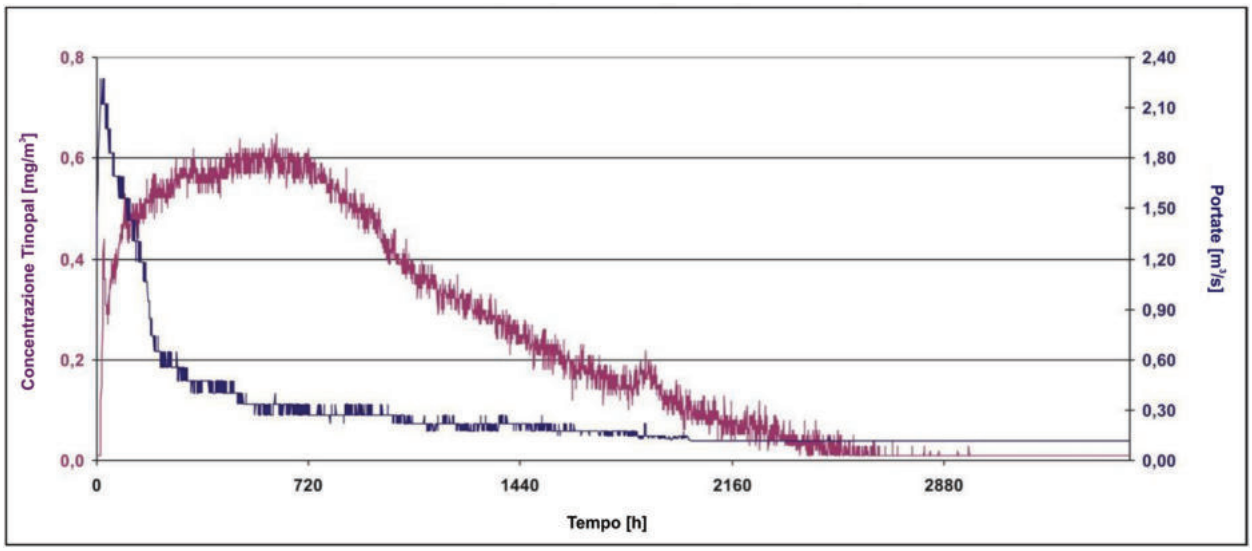

Figura 25: tracciamento con Tinopal® dall'inghiottitoio di "Nuscalè" in fase di piena. Il test è stato realizzato per accertare il collegamento tra l'inghiottitoio e la sorgente di Fruncu 'e Oche prima dell'esecuzione del nuovo test da eseguire in fase di magra con l'utilizzo della fluoresceina - *dye test with Tinopal® from "Nuscalè" sinkhole during a flood. The test was made to prove the connection between the iniection sinkhole and Fruncu 'e Oche spring before a new fluorescein test programmed during base flow condition*

La seconda colorazione dell'acquifero carsico in regime di magra è stata effettuata il 1 agosto 2009, anche stavolta grazie ai mezzi forniti dall'Ente Foreste della Sardegna, immettendo nell'acquifero 2 Kg di fluoresceina sodica diluiti in circa 24 m^3 d'acqua. Il colorante si è manifestato in sorgente dopo oltre 54 giorni dalla sua immissione, con un primo picco di concentrazione pari a 0,25 mg/m^3. Le variazioni periodiche della concentrazione del tracciante rilevate in sorgente nei 30 mesi successivi all'iniezione, riportate nel grafico di figura 26, confermano le ipotesi relative all'effetto capacitivo della porzione più profonda dell'acquifero carsico del Monte Albo; le stesse variazioni, quindi, indicano la presenza di un esteso bacino d'immagazzinamento idrico sotterraneo sostanzialmente distinto, ma non separato, dai circuiti deputati al drenaggio delle portate di piena e di morbida. Una porzione di questo bacino di immagazzinamento ipogeo corrisponde proprio alle gallerie più profonde esplorate dagli speleosubacquei nella grotta di Locoli.

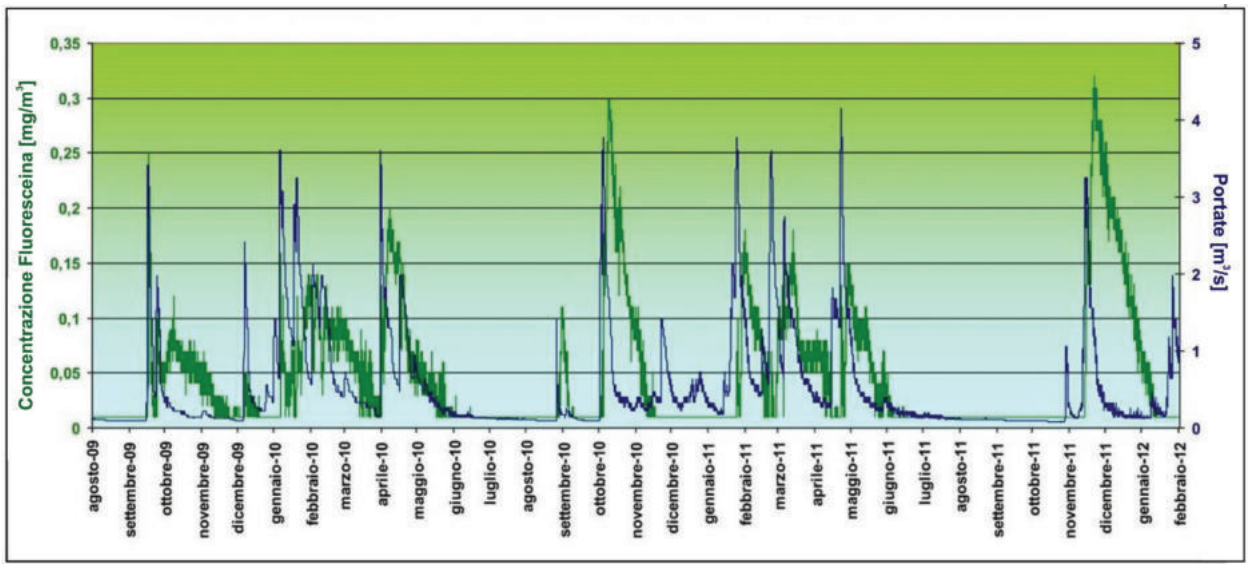

Figura 26: colorazione dall'inghiottitoio "Nuscalè" in fase di magra. Confronto fluorimetria-portate: al fine di rendere più leggibile l'andamento ciclico del rilascio del colorante in sorgente, i valori della concentrazione del periodo luglio 2010 - agosto 2010 sono stati epurati dei dati riferibili ai due tracciamenti successivi effettuati nell'estate del 2010 presso la "Sala del Torrente" - *dye test into "Nuscalè" sinkhole in base flow condition. Comparison fluorimetry - flow: to make the cyclical release of dye in the spring more readable, the concentration values for the period July 2010 - August 2010 have been purged of data concerning the two following dye test carried out during summer 2010 at the "Sala del Torrente"*

Approfondimenti sulla compartimentazione dell'acquifero

L'effetto capacitivo del sistema carsico risulta evidente anche dall'analisi dei diagrammi relativi alle variazioni di livello idrico, temperatura e conducibilità elettrica misurate in occasione di tre consecutivi eventi di piena registrati nel sifone S_1 di grotta "Locoli" nel periodo tra il 10 aprile ed il 10 maggio 2010 (Fig. 27). Le variazioni relative ai primi due eventi sono contraddistinte da un andamento sostanzialmente omogeneo dei valori di temperatura e conducibilità: infatti, a fronte di innalzamenti del livello piezometrico relativamente contenuti, pari a 4,6 metri nel corso del primo evento e 7,8 metri nel secondo, non si registrano apprezzabili variazioni nei valori degli altri parametri monitorati. La stessa omogeneità, invece, non la si osserva in corrispondenza del terzo e successivo evento di piena, quando i valori di temperatura e di conducibilità subiscono un repentino decremento in corrispondenza di un sollevamento del livello piezometrico pari a 13,3 metri. Tale livello, contraddistinto dal punto angoloso che rompe bruscamente l'andamento crescente della curva, corrisponde alla quota sopra la quale avviene il trabocco verso l'esterno delle acque sino a quel momento confinate nell'acquifero carsico.

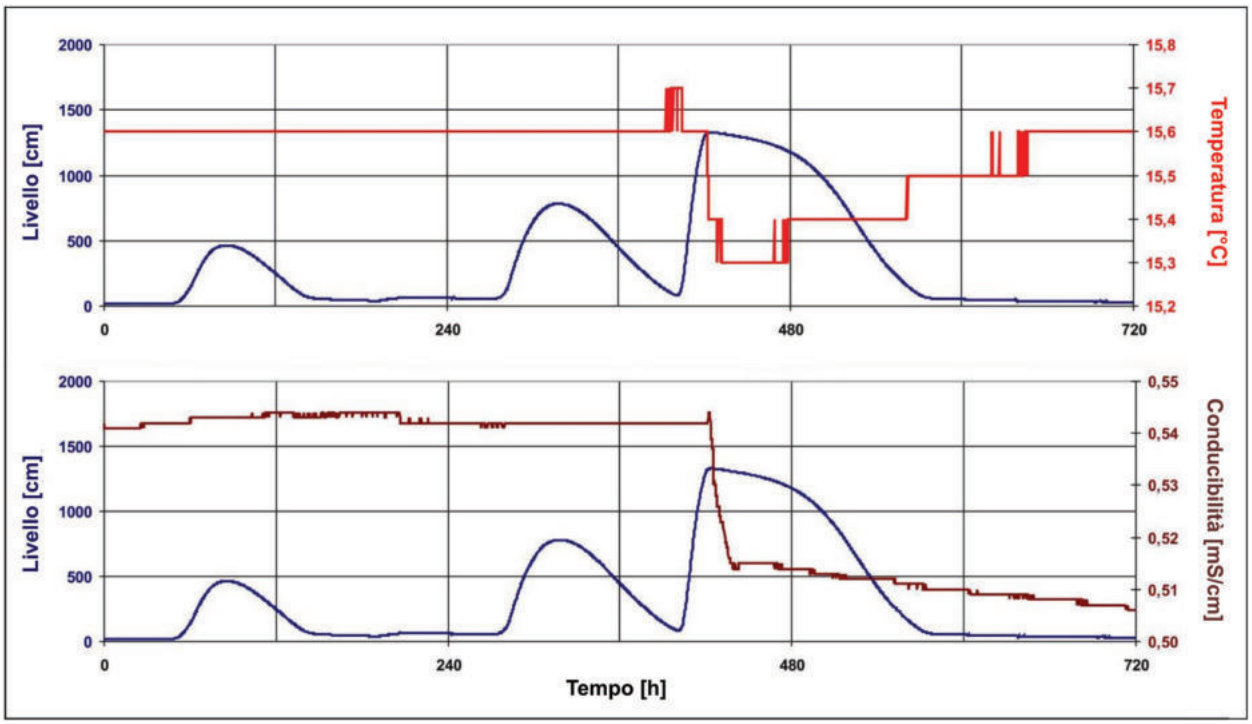

Figura 27: effetto capacitivo. Agli incrementi piezometrici delle prime due piene registrati nel sifone S_1 di grotta Locoli non corrisponde alcuna variazione nei valori di conducibilità e temperatura; gli stessi valori subiscono un rapido decremento, invece, in occasione della terza piena, quando il livello piezometrico si solleva sino al livello di trabocco dell'acquifero sull'antistante valle di Locoli - *capacitive effect. The piezometric uplifts of the first two floods recorded in the S_1 siphon of Locoli cave does not correspond to any change in the values of conductivity and temperature; on the contrary, the same values undergo a rapid decrease at the third flood, when the piezometric level within the aquifer reaches the level of overflow towards Locoli valley*

Raffrontando le variazioni di livello idrico, temperatura e conducibilità elettrica osservate nel sifone S_1 di Locoli con le simultanee variazioni degli stessi parametri registrati presso la sorgente di Fruncu ‘e Oche (Fig. 28), si osserva come il passaggio di ogni singola piena in quest’ultimo sito produca, invece, altrettanti decrementi sia nei valori di temperatura che di conducibilità elettrica.

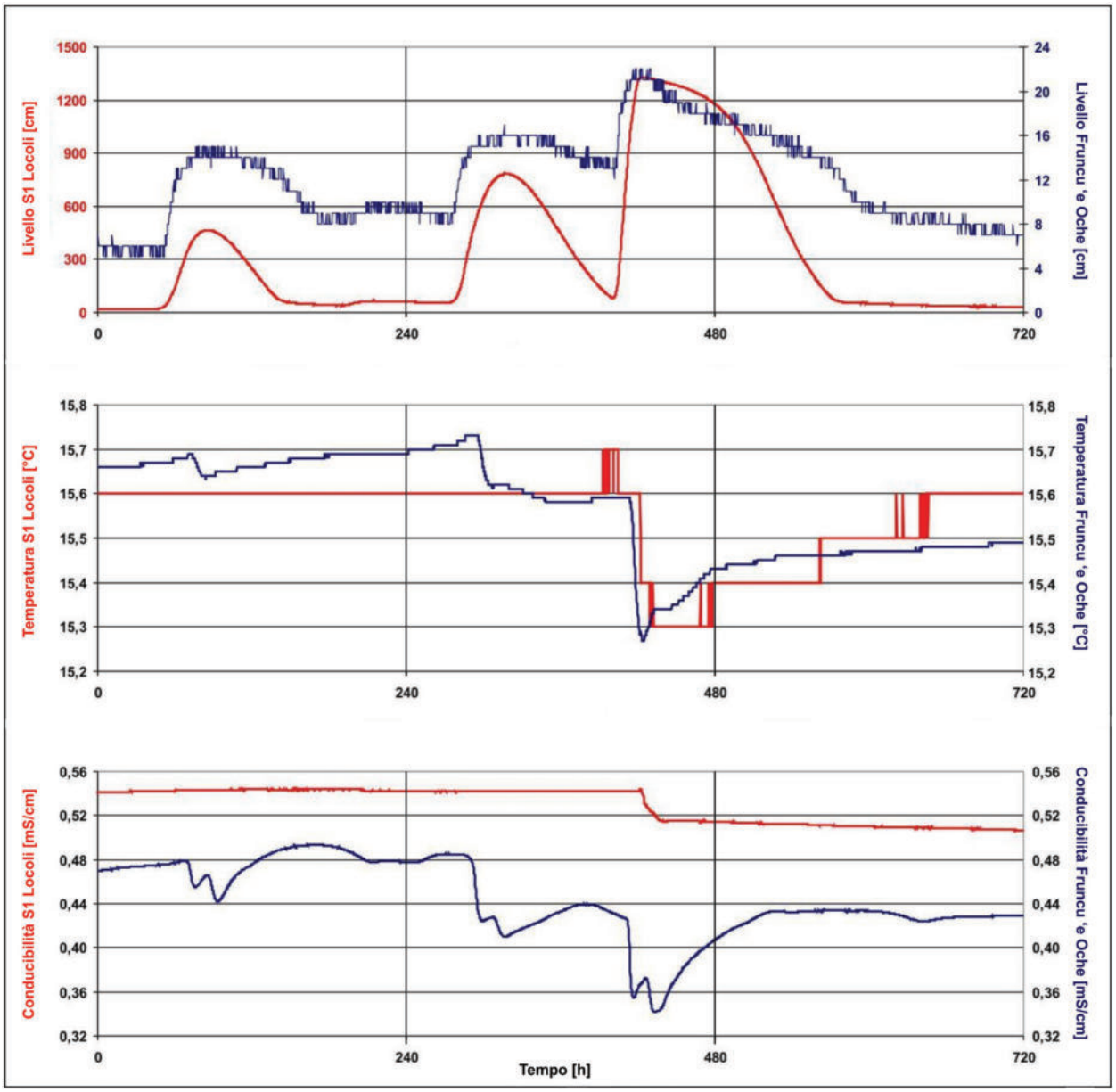

Figura 28: effetto capacitivo. Nel confronto tra i parametri di temperatura, conducibilità e livello piezometrico registrati simultaneamente nel sifone S_1 di grotta Locoli e presso la sorgente Fruncu ‘e Oche risulta evidente la diversa funzionalità idrodinamica dell’acquifero nei due siti - *capacitive effect. The comparison of temperature, conductivity and piezometric level parameters simultaneously recorded in the S_1 siphon of Locoli cave and in Fruncu ‘e Oche spring clearly shows the different hydrodynamic behaviour of these two sites*

Tali decrementi sono da porre in relazione al veloce transito in sorgente di acque d'infiltrazione recente variamente miscelatesi con quelle già residenti nell'acquifero carsico. Il confronto tra le variazioni dei parametri osservate nei due siti, quindi, dimostra come nel sifone S_1 di grotta Locoli il passaggio delle due prime piene abbia causato solamente il sollevamento delle acque già presenti nell'acquifero carsico senza produrre alcun miscelamento con le acque d'infiltrazione recente. Nello stesso sifone, invece, tale miscelamento è avvenuto nel momento in cui le acque dell'acquifero, in occasione della terza piena, hanno raggiunto una quota tale da trovare libero sfogo verso l'esterno, dando luogo all'irruzione di acque d'infiltrazione recente in tutte le cavità di grotta "Locoli" e la parziale sostituzione di quelle già residenti nelle porzioni più superficiali del carso saturo. L'insieme di queste analisi ci consente di affermare che le acque che invadono il sistema carsico ipogeo nel corso delle piene percorrono ben precise direttrici di drenaggio, molto trasmissive, verso la sorgente di Fruncu 'e Oche; il carico idraulico che si produce durante tali eventi induce nelle gallerie allagate un onda di pressione che provoca il sollevamento delle acque già residenti nell'acquifero. Ciò comporta una parziale mobilizzazione delle acque "colorate" risiedenti nel carso saturo in occasione di ogni singola piena, la loro miscelazione con quelle d'infiltrazione ed il successivo rilascio verso la sorgente di Fruncu 'e Oche durante le fasi di svuotamento dell'acquifero, come rappresentato nel grafico di figura 27.

Verificata l'esistenza di un carso saturo costituito dalle "condotte serbatoio" osservate nel corso delle esplorazioni speleosubacquee, le successive indagini idrogeologiche sono state indirizzate ad esaminare la funzionalità idrodinamica della porzione di sistema carsico posto tra la grotta "Locoli" e la sorgente di Fruncu 'e Oche. In particolare, le analisi sono state finalizzate a valutare in che misura la funzionalità delle gallerie carsiche di questa porzione d'acquifero, ancora sconosciute all'esplorazione speleologica, sia connessa al deflusso delle acque sotterranee verso l'area di emergenza od al loro stoccaggio ipogeo e, inoltre, a valutare se le gallerie parzialmente allagate della Diramazione Siniscola, ed in particolare le morfologie osservate nella Sala del Torrente, possano considerarsi come altrettanti elementi fisici che assolvono la funzione di laminare le acque provenienti dal retrostante acquifero profondo.

Una valutazione sulla funzione di "soglia" delle condotte presenti nella Diramazione Siniscola la si può dedurre dall'analisi del grafico di figura 29, che illustra le variazioni simultanee di livello idrico misurate presso la sorgente di Fruncu 'e Oche ed il sifone S_1 di grotta "Locoli" nel periodo dal 24 giugno al 10 ottobre 2010. A tal fine, preliminarmente, è interessante analizzare l'origine sia dei bruschi decrementi dei livelli piezometrici che si osservano nel grafico al di sotto della quota di sfioro degli stramazzi che regolano le portate della sorgente (livello 0) sia delle rapide oscillazioni dei medesimi. Tali decrementi ed oscillazioni sono da mettere in relazione al rapporto tra gli afflussi in sorgente provenienti dall'acquifero ed i volumi idrici prelevati nella captazione dagli impianti acquedottistici. Questo rapporto, soprattutto in fase estiva, assume valori inferiori all'unità causando, spesso per lunghi periodi, l'assenza di quelle portate eccedenti ai prelievi che, generalmente, si scaricano dagli stramazzi sulla rete idrografica superficiale; in tali circostanze, le repentine variazioni di livello che si registrano nelle vasche di prelievo dipendono dalla variabilità degli emungimenti acquedottistici in relazione al fabbisogno di risorsa idrica imposto dalla rete.

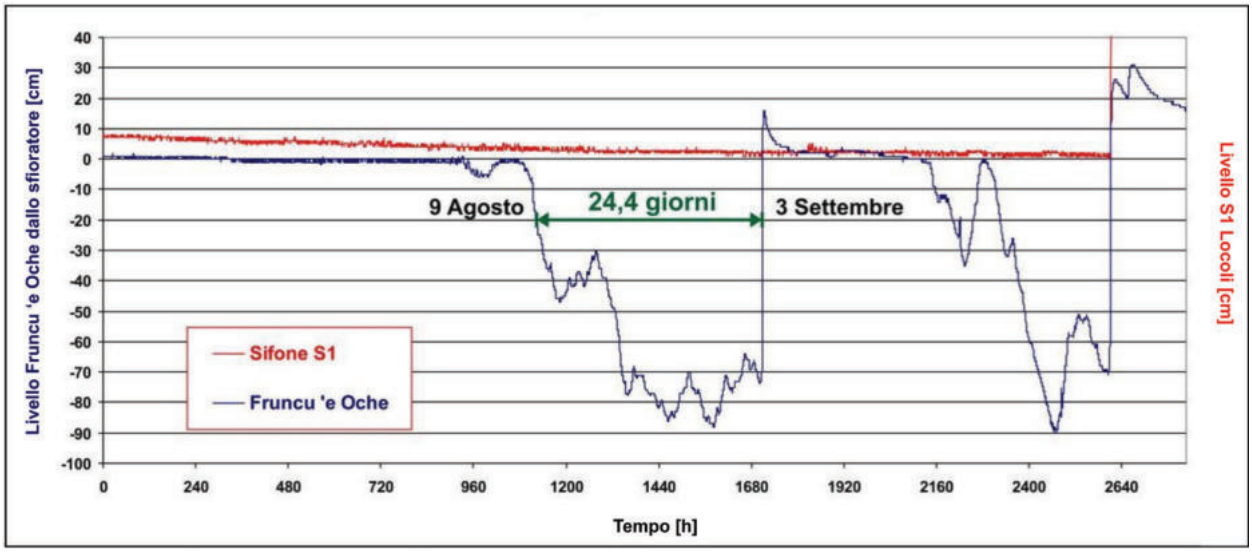

Figura 29: effetto soglia. Dal confronto tra i livelli idrici registrati nel sifone S_1 di grotta Locoli e presso la sorgente di Fruncu 'e Oche emerge la non connessione idrologica dei due siti nel periodo di massima magra - *threshold effect. The comparison of the water levels recorded in the S_1 siphon of Locoli cave and the Fruncu 'e Oche spring shows there's no hydrological connection between the two sites during the base flow period*

Questo effetto è ben rappresentato in figura 30 nella quale si illustrano le variazioni del livello registrate presso la sorgente di Fruncu ‘e Oche dal 22 al 27 agosto 2009. Analizzando le variazioni di livello in funzione dei tempi è facile osservare come i decrementi di livello corrispondano ai *range* orari di maggior richiesta di risorsa idrica mentre gli incrementi corrispondano alle ore notturne di minor utilizzo. Altre variazioni congruenti con questa *ratio* le si possono riscontrare analizzando la stessa sequenza nei *range* giornalieri; in tali intervalli, i maggiori decrementi di livello si possono riscontrare in concomitanza con i giorni di sabato e domenica, che coincidono con la presenza di una maggiore utenza nelle località turistiche del litorale baroniese.

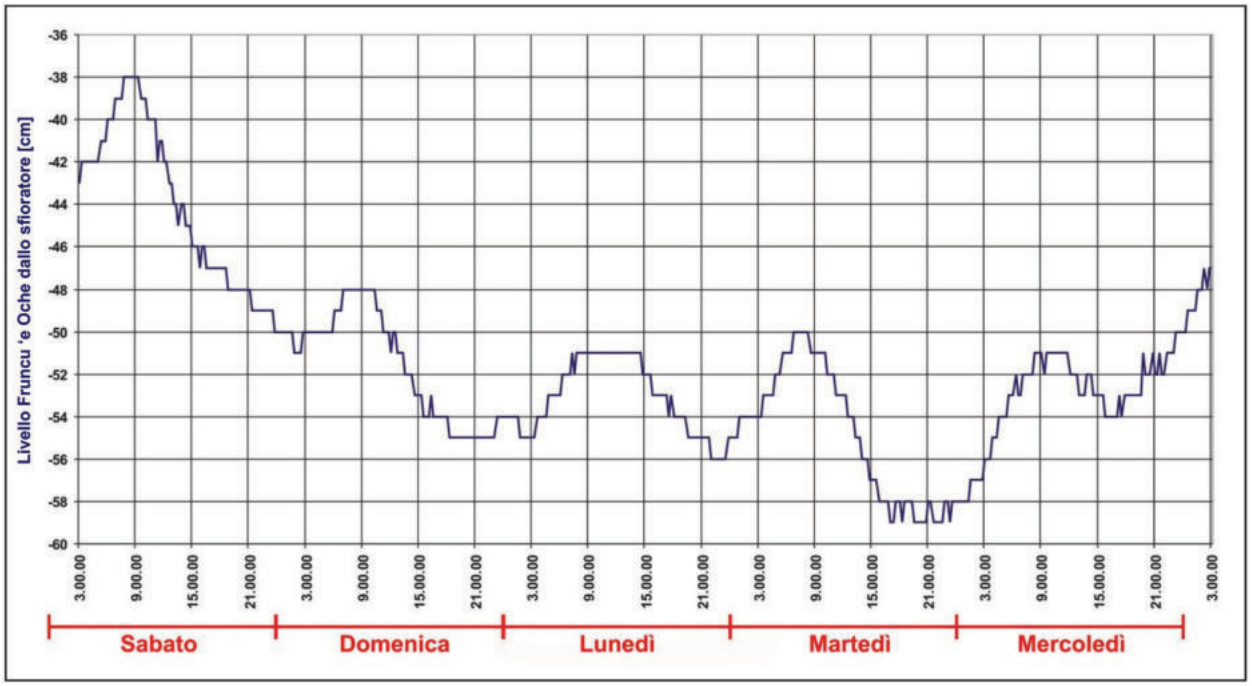

Figura 30: effetto soglia. Nel dettaglio rappresentato, le oscillazioni dei livelli misurati nella sorgente di Fruncu ‘e Oche trovano un riferimento specifico ai giorni ed alle ore di maggior prelievo idrico della captazione acquedottistica - *threshold effect. In shown above detail, measured changes in water levels in Fruncu ‘e Oche spring refer to days and hours of major water withdrawals by the water supply company*

Tutto ciò premesso, ritornando all'analisi del grafico di figura 29 si osserva come nel periodo compreso tra il 24 giugno ed i primi giorni del mese di agosto i trend di decrescita dei livelli piezometrici nella sorgente di Fruncu 'e Oche e nel sifone S1 di grotta Locoli seguano entrambi un andamento lineare. Dall'inizio del mese d'agosto, i livelli idrici registrati in sorgente iniziano a risentire delle brusche variazioni di livello sopra descritte; tra il 9 agosto ed il 3 settembre, in particolare, tali livelli rimangono costantemente 20 centimetri sotto il livello dello sfioratore mentre in tutto il periodo rappresentato i livelli piezometrici registrati presso il sifone S_1 continuano a disporsi costantemente lungo la stessa retta di decremento. Considerando anche l'elevata trasmissività che caratterizza le condotte sotterranee che collegano grotta "Locoli" con la sorgente di Fruncu 'e Oche, com'è evidente dall'analisi delle curve di svuotamento rappresentate in figura 31, il protrarsi per oltre 24 giorni di un decremento del livello idrico inferiore a 20 centimetri nella sorgente senza che si sia manifestato, neanche al termine del periodo di osservazione, un analogo decremento nel sifone S_1 testimonia l'esistenza di una soglia di permeabilità che determina una compartimentazione netta tra le gallerie profonde allagate di grotta "Locoli" e le condotte carsiche della "Diramazione Siniscola". Questa soglia di permeabilità, uno dei cui punti di sfioro è identificabile nella Sala del Torrente esplorata dagli speleosubacquei nel 2008, è il fattore fisico che regola i deflussi ipogei verso la sorgente di Fruncu 'e Oche con le stesse modalità di una sorgente di trabocco.

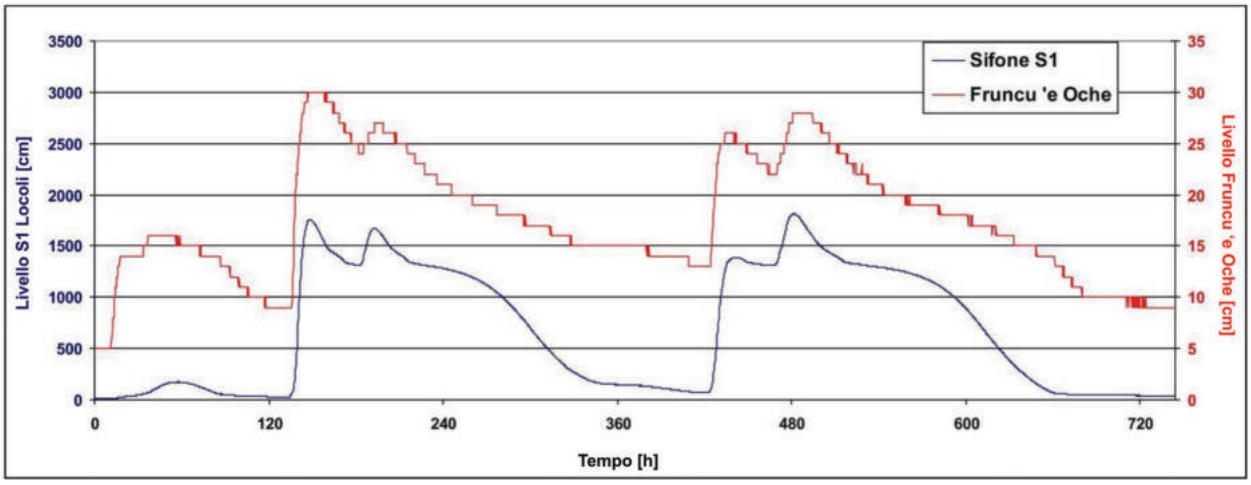

Figura 31: effetto soglia. Le oscillazioni dei livelli idrici registrate simultaneamente nel sifone S_1 di grotta Locoli e presso la sorgente Fruncu 'e Oche dimostrano la stretta connessione idrologica dei due siti in fase di piena e di morbida - *threshold effect. The simultaneous fluctuations of water levels simultaneously recorded in S_1 siphon of Locoli cave and at Fruncu 'e Oche spring demonstrate the close hydrological connection of these two sites during flood and base level flow*

Ulteriori approfondimenti sulla compartimentazione dell'acquifero

Per conseguire nuovi elementi sulla compartimentazione dell'acquifero carsico, nell'estate del 2009 è stata immessa nel torrente ipogeo della Sala del Torrente, in due occasioni distinte e a distanza di 14 giorni l'una dall'altra, una quantità complessiva di fluoresceina sodica pari a 200 grammi. Considerate le modalità con cui il colorante si era trasmesso nell'acquifero durante la colorazione eseguita nell'agosto del 2008 (fig. 22), si poteva ragionevolmente ipotizzare che, nel corso dei due nuovi test, non sarebbero transitati in sorgente eventuali residui della precedente colorazione che potessero sommarsi alle concentrazioni relative i nuovi tracciamenti: infatti, era già noto che ai periodi di magra corrispondessero valori di concentrazione di fluoresceina in sorgente pari a zero. Ad ogni buon conto, per i due nuovi test si è scelto di iniettare una quantità di colorante tale da rendere i relativi picchi di concentrazione assolutamente inconfondibili rispetto ad un eventuale valore di fondo che si fosse manifestato nel periodo di osservazione. Le colorazioni sono state iniettate nei deflussi di magra del torrente ipogeo. Accertata l'esistenza di una netta compartimentazione tra le profonde gallerie allagate di grotta "Locoli" e la sorgente di Fruncu 'e Oche, le successive analisi sono state indirizzate a verificare l'esistenza di ulteriori partizioni eventualmente localizzabili tra la "Diramazione Siniscola" e la stessa sorgente. Gli speleosub hanno stimato una portata del flusso ipogeo, in occasione di entrambe le iniezioni e con metodi speditivi, intorno ai 100 l/s. Nel grafico di figura 32, le variazioni di concentrazione relative alle colorazioni sono messe a confronto con le oscillazioni dei livelli piezometrici misurati nella sorgente di Fruncu 'e Oche.

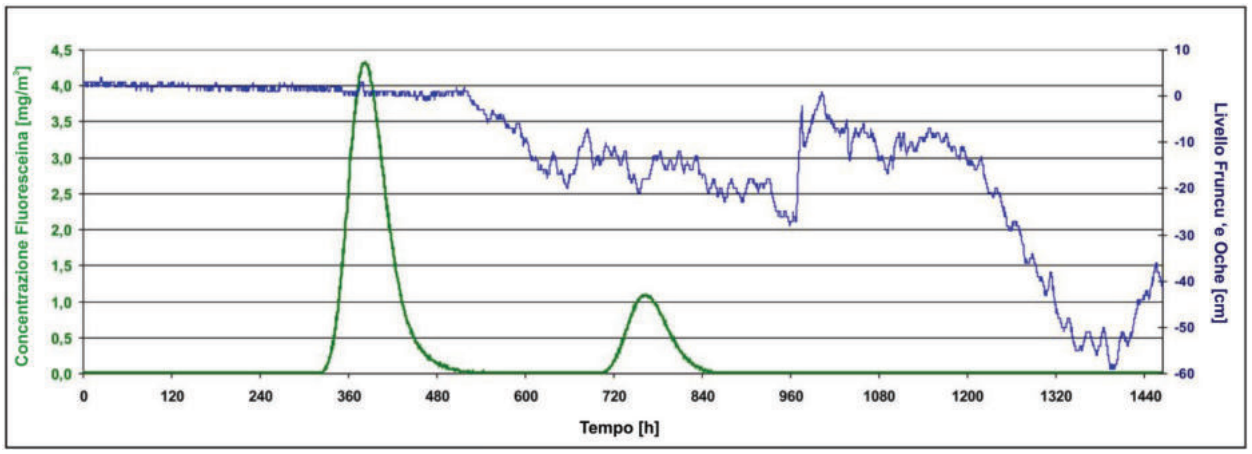

Figura 32: test di colorazione successivi effettuati presso la "Sala del Torrente" in fase di magra. I picchi d'arrivo delle due iniezioni messi a confronto con i livelli idrici registrati in sorgente - *successive dye tests performed at the "Sala del Torrente" during base level flow. The tracer peaks of the two injections are compared with the water levels recorded at the spring*

Nel grafico di figura 33, le curve di restituzione sono rappresentate facendo coincidere all'origine i tempi iniziali d'iniezione. La prima colorazione, iniettata il 28 giugno, ha iniziato a transitare in sorgente il 12 luglio, dopo oltre 13 giorni dall'immissione nei circuiti idrici sotterranei. La presenza del colorante, transitato nell'acquifero con una velocità di 0,41 m/h, si è protratta per circa 10 giorni con un picco di concentrazione pari a 4,33 mg/m^3, manifestatosi dopo circa 382 ore dalla sua immissione nei circuiti sotterranei. La seconda colorazione, iniettata il 12 luglio, ha iniziato a transitare in sorgente il 28 luglio dopo circa 16 giorni dall'immissione nei circuiti idrici sotterranei. In questo caso, la presenza del colorante, transitato nell'acquifero con una velocità di 0,35 m/h, si è protratta per circa 6 giorni, con un picco di concentrazione pari a 1,1 mg/m^3, manifestatosi dopo circa 432 ore dalla sua immissione nei circuiti sotterranei.

I valori di concentrazione rappresentati in figura 32 accreditano le scelte operative adottate per il buon esito dei due test eseguiti: infatti, i valori di fluoresceina risultano pari a zero almeno nei 13 giorni precedenti l'arrivo del colorante in sorgente ed almeno nei 25 giorni successivi al completo esaurimento dello stesso mentre i valori dei due picchi risultano rispettivamente 14,4 e 3,6 volte superiori rispetto al massimo valore di concentrazione misurato in sorgente in occasione dei tracciamenti eseguiti in periodo di magra (Fig. 26).

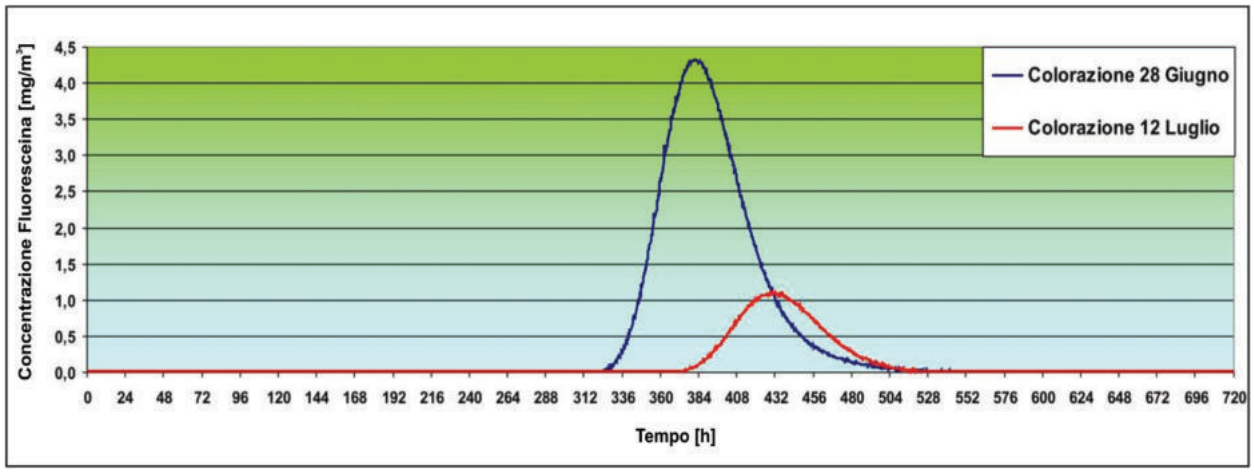

Figura 33: test di colorazione successivi effettuati presso la "Sala del Torrente" in fase di magra. Nel grafico, costruito facendo coincidere i tempi d'iniezione, risulta evidente il ritardo d'arrivo in sorgente del secondo picco di concentrazione rispetto al primo e, quindi, il decremento della velocità di deflusso nell'acquifero durante l'esaurimento - *successive dye tests performed on the "Sala del Torrente" during base level flow. In the graph, in whitch the time of injection was made coincident, the delay of arrival in the spring of the second peak is evident corresponding to the decrease of flow velocity in the aquifer during exhaustion*

Le modalità con cui si presentano entrambe le curve di restituzione è tipica dei rilasci di tracciante ad impulso definito (VIGNA, 2007), caratteristico dei circuiti drenanti impostati prevalentemente su singole direttrici idriche che non intercettano, nel loro percorso, bacini di accumulo di volume tale da rallentare i deflussi dall'acquifero in modo significativo. La velocità di scorrimento rilevata è stata in entrambi casi molto bassa e, comunque, oltre 250 volte inferiore rispetto a quella registrata nel corso di un analogo tracciamento effettuato nel medesimo sito nel maggio 2008, in regime di morbida. Confrontando le velocità di arrivo del tracciante relative alle singole colorazioni, risulta evidente come il secondo impulso, più lento, sia transitato in sorgente con un ritardo di oltre 2 giorni rispetto al primo. Questa osservazione è riconducibile ai graduali decrementi delle portate idriche registrate in sorgente nel periodo di osservazione (Fig. 34) e, quindi, ad apporti progressivamente inferiori dal carso saturo di grotta "Locoli" verso la sorgente di Fruncu 'e Oche. Nella tabella 4 sono elencati i dati sopra esposti insieme ad altri parametri calcolati rapportando le portate misurate ai valori di peso e di concentrazione del tracciante iniettato e transitato in sorgente.

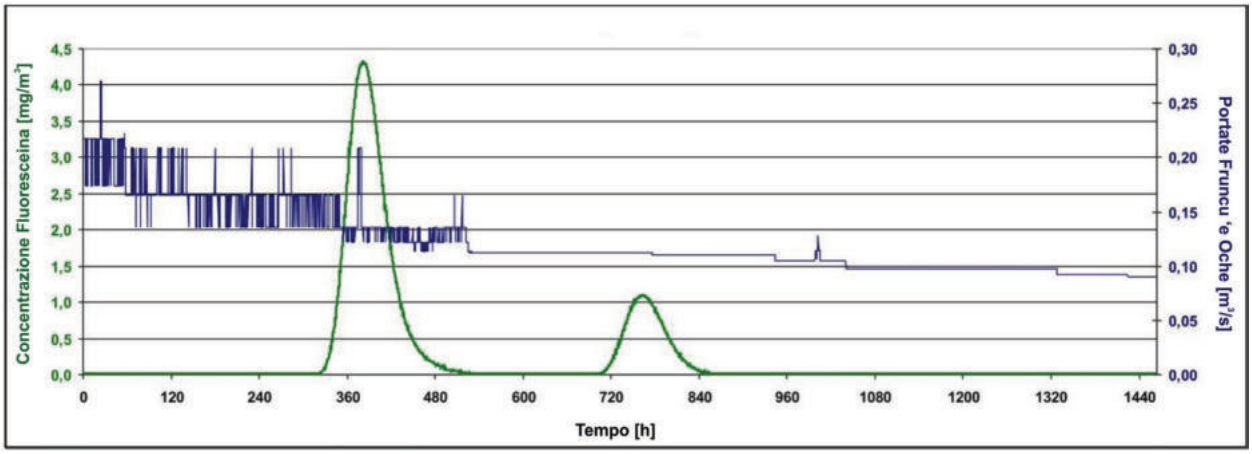

Figura 34: test di colorazione successivi effettuati presso la "Sala del Torrente" in fase di magra. Nel grafico appare evidente un anomalo incremento di portata in corrispondenza del primo picco relativo alla concentrazione di fluoresceina in sorgente - *successive dye tests performed at the "Sala del Torrente" during base level flow. In the graph an abnormal increase of flow in correspondence of the first fluorescein peak is evident*

COLORAZIONI "SALA DEL TORRENTE" - TABELLA DATI	
Peso totale della fluoresceina iniettata nei due test (mg)	200.000
Distanza punto d'iniezione - sorgente (m)	7.850
Data e ora della prima iniezione	28/06/2009 - h. 16.00
Tempo di arrivo (ore)	321,50
Velocità (m/h)	0,407
Tempo di residenza (ore)	234,25
Tempo di arrivo del picco (ore)	382,00
Peso fluoresceina emessa (mg)	135.549
Percentuale emessa sul totale	67,77%
Data e ora della seconda iniezione	12/07/2009 - h. 12.00
Tempo di arrivo (ore)	372,00
Velocità (m/h)	0,352
Tempo di residenza (ore)	155,50
Tempo di arrivo del picco (ore)	432,25
Peso fluoresceina emessa (mg)	28.285
Percentuale emessa sul totale	14,14%
Peso totale fluoresceina transitata da Fruncu 'e Oche (mg)	163.834
Percentuale fluorescina transitata sul totale iniettato	81,92%
Fruncu 'e Oche - portata media misurata (m^3/s)	0,123
Volume idrico transitato misurato (m^3)	173.048
Fruncu 'e Oche - portata media calcolata (m^3/s)	0,161
Volume idrico transitato calcolato (m^3)	226.323
Differenza tra portata calcolata e misurata (m^3/s)	0,038

Tabella 4: dati di base e parametri idrogeologici calcolati relativi alle colorazioni effettuate nella Sala del Torrente di Grotta Locoli in regime di magra - *data and hydrogeological parameters related to the two dye tracing tests performed from the "Sala del Torrente" in Locoli cave*

Analizzando le percentuali di restituzione del colorante esposte in tabella 4 si evidenzia come circa l'82% della fluoresceina immessa nel circuito sotterraneo sia transitato in sorgente. L'analisi comparata delle portate medie di Fruncu 'e Oche, quella misurata e quella calcolata assumendo che tutto il colorante possa essere defluito dall'acquifero, portano a valutare una differenza tra i deflussi medi considerati pari a 0,038 m^3/s, valore questo compatibile con i deflussi di subalveo che il gestore dell'impianto acquedottistico capta in un pozzo allestito immediatamente a valle della captazione in sorgente, con eduzioni di 25/30 l/s, nei periodi di massima magra. I dettagli sulle modalità di acquisizione dei dati di portata sono riportati nel paragrafo dedicato alla caratterizzazione della sorgente di Fruncu 'e Oche.

Nel grafico di figura 34 si rileva un particolare interessante, ovvero un repentino incremento di portata idrica in sorgente, passata da 0,135 l/s a 209 l/s, che si osserva in corrispondenza con il picco di concentrazione della fluoresceina. Lo stesso anomalo incremento rilevato sulle portate lo si può osservare anche nel grafico di figura 35, nel quale i tenori di fluoresceina transitata in sorgente tra il 28 di giugno ed il 28 agosto sono messi a confronto con la concentrazione residua della precedente iniezione di Tinopal® effettuata il 27 aprile 2009 nell'inghiottitoio di Nuscalè; nel grafico, al picco di fluoresceina si sovrappone perfettamente un anomalo picco di Tinopal®. Considerati i diversi possibili fattori di perturbazione dell'acquifero, la corrispondenza degli incrementi dei valori sia di portata che di concentrazione del Tinopal® coincidenti con il picco della fluoresceina possono essere messi in relazione con le operazioni di tracciamento eseguite dagli speleosubacquei, la cui presenza nell'acquifero carsico potrebbe avere interferito con il naturale andamento del deflusso delle acque provocando una sorta di "effetto onda" che, a sua volta, ha provocato un'eccedenza di alimentazione idrica nelle antistanti condotte drenanti e, quindi, un incremento del tenore di Tinopal® CBS-X verso la sorgente di Fruncu 'e Oche simultaneo all'iniezione di fluoresceina.

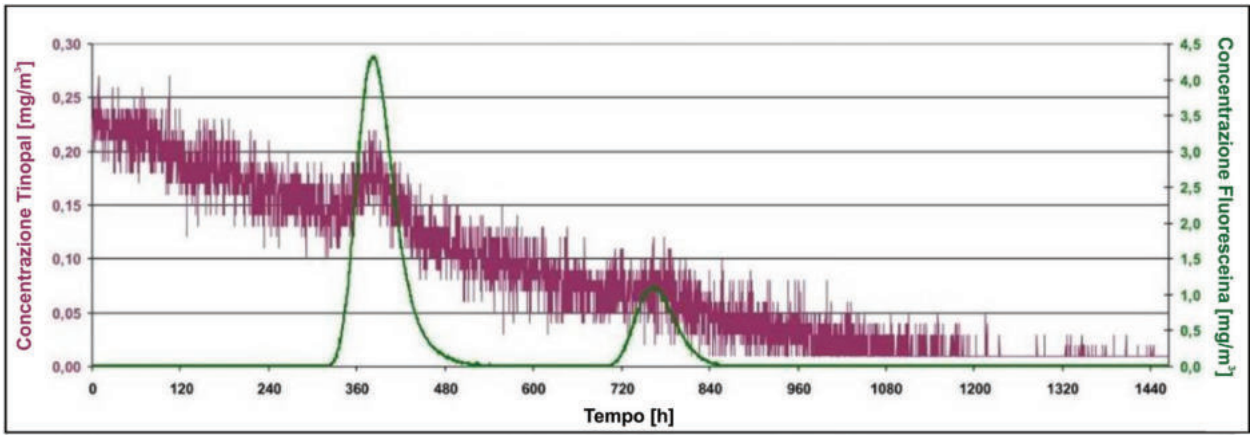

Figura 35: test di colorazione successivi effettuati presso la "Sala del Torrente" in fase di magra. Nel grafico risulta evidente un anomalo incremento nella concentrazione di Tinopal® in corrispondenza di entrambi i picchi di concentrazione di fluoresceina; l'anomalia è riconducibile alla perturbazione dell'acquifero connessa alla presenza degli speleosub durante le operazioni di iniezione del colorante - *successive dye tests performed at the "Sala del Torrente" during base flow. In the graph an abnormal increase of Tinopal® concentration for both fluorescein peaks is evident; this was induced by an aquifer disturbance connected with the presence of cave divers in the sumps during the operations of dye injection*

Per quanto sopra, quindi, nei circuiti sotterranei di deflusso posti tra la "Diramazione Siniscola" e la sorgente di Fruncu 'e Oche non sembrerebbero presenti altri bacini di immagazzinamento idrico ipogei in grado di contenere i deflussi provenienti dal carso saturo ma solo condotte carsiche deputate al drenaggio delle acque sotterranee verso la sorgente. Inoltre, il grafico di figura 36 indica chiaramente come i contributi alle portate di Fruncu 'e Oche provenienti dal carso saturo tendano, durante i mesi estivi, a ridursi sensibilmente se non proprio ad estinguersi. In tali periodi, i deflussi in sorgente potrebbero essere, in prevalenza, quelli provenienti dalla porzione di acquifero carsico a cui fa capo la rete di drenaggio ipogeo connessa alla faglia di Schiriddè e, quindi, all'inghiottitoio di Bonaetè.

L'illustrazione completa dei dati relativi alle colorazioni eseguite tra marzo 2009 e marzo 2012 è rappresentata in figura 37.

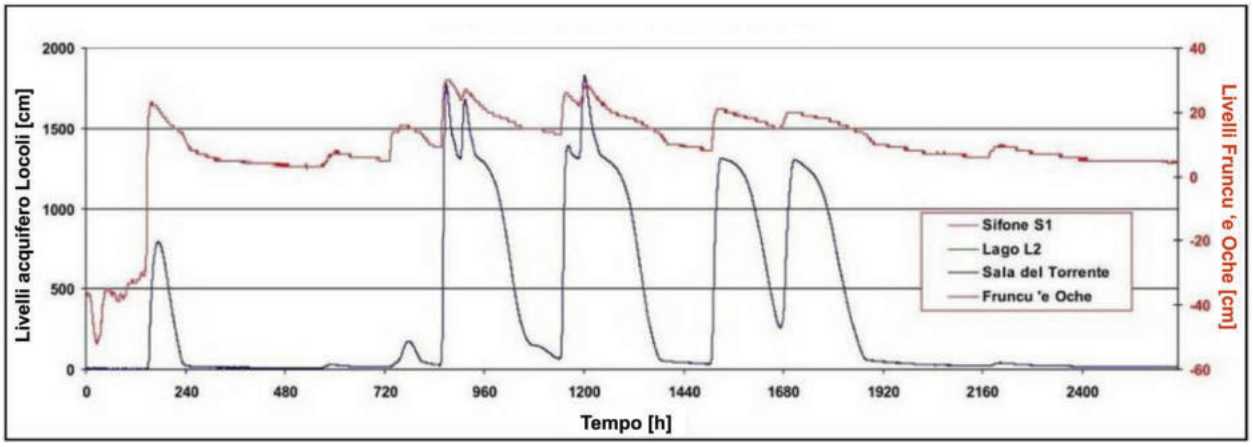

Figura 36: quadro di sintesi sulla variazione dei livelli idrici nell'acquifero carsico dal 08 dicembre 2009 - *synthesis of the water levels variation in the karst aquifer from 08 December 2009*

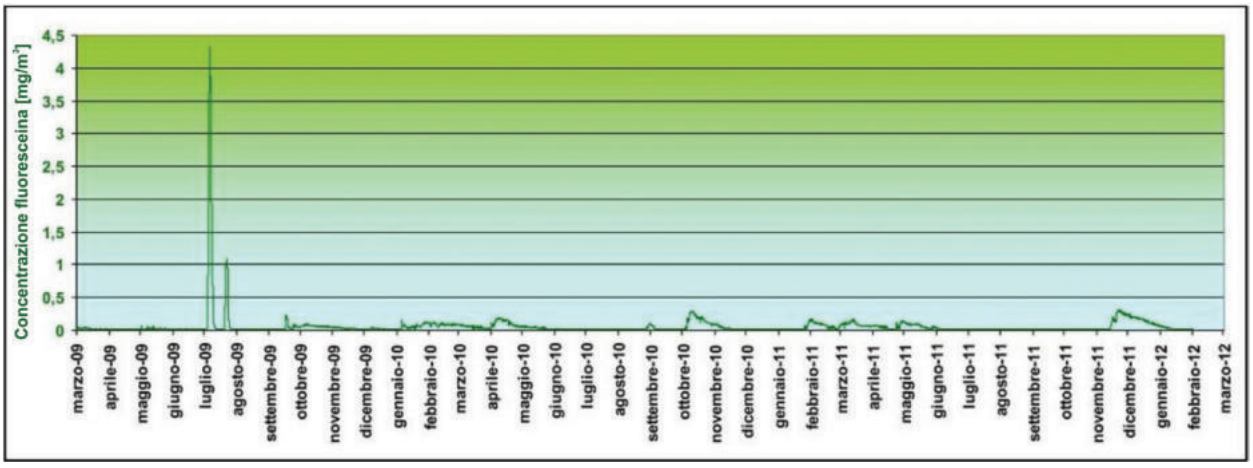

Figura 37: quadro complessivo dei dati di concentrazione relativi ai test di tracciamento eseguiti tra marzo 2009 e marzo 2012 - *overall graph of concentration data related to dye tests performed between March 2009 and March 2012*

Ulteriori approfondimenti sulle modalità di deflusso idrico sotterraneo

Al fine di poter disporre di ulteriori elementi utili alla definizione delle modalità di deflusso idrico nell'acquifero carsico, nel periodo tra l'8 dicembre 2009 ed il 28 marzo 2010 è stato eseguito un monitoraggio di dettaglio delle variazioni di livello idrico, temperatura e conducibilità elettrica in due nuove stazioni di campionamento localizzate nelle gallerie carsiche allagate di grotta "Locoli". A tal fine, gli speleosubacquei hanno provveduto a collocare un primo sensore multiparametrico presso il lago L_2, in una porzione d'acquifero rappresentativa del carso saturo, ed il secondo nella Sala del Torrente, che ha monitorato gli scorrimenti idrici nelle condotte di deflusso. La disponibilità dei nuovi dati di monitoraggio, acquisiti con una cadenza di 15 minuti, ha permesso di valutare le variazioni dei parametri registrati sia in regime di piena sia in quello di morbida. Nel grafico di figura 36, che illustra il quadro complessivo delle variazioni di livello registrate dai 4 sensori disposti nell'acquifero, risulta che nel periodo d'osservazione si siano succeduti 6 eventi che hanno prodotto la fuoriuscita della piena da grotta "Locoli", 2 episodi che hanno provocato un sensibile innalzamento dei livelli idrici senza provocare il trabocco delle acque dalla medesima grotta ed ulteriori 2 eventi di magnitudo minore. Nello stesso grafico è evidente la stretta simmetria tra le variazioni di livello che si manifestano nel cuore dell'acquifero e nella sorgente di Fruncu 'e Oche nonché l'assoluta corrispondenza, com'era facile attendersi, delle oscillazioni piezometriche nelle diverse porzioni allagate di grotta "Locoli". Per avere un quadro più preciso delle variazioni di livello nell'acquifero, e in particolare per valutarne i picchi, è però necessario estendere l'analisi ad un *range* temporale che abbraccia i 20 mesi da dicembre 2009 ad agosto 2011. Nel grafico di figura 38, rappresentativo di tale *range*, si osserva che i livelli massimi di incremento piezometrico possono superare i 23 metri, come registrato nelle piene di ottobre 2010 e febbraio 2011. Tornando al monitoraggio effettuato tra dicembre 2009 e marzo 2010, è interessante analizzare il dettaglio delle variazioni di livello registrato durante le piene e, in particolare, in quelle occorse tra il 12 ed il 19 gennaio e tra il 24 gennaio ed il 1° febbraio. Nel grafico di figura 39 le curve sono contraddistinte, sia nell'andamento crescente della fase di carica che in quello decrescente della discarica, da due distinti punti di flesso rappresentativi di altrettanti repentini cambi di velocità nelle variazioni piezometriche, individuabili alle quote di 1.480 e 1.345 cm. Tali quote rappresentano i due livelli ai quali si innescano altrettanti sfioratori sovrapposti che scaricano le acque di piena del sistema carsico ipogeo sulla valle di Locoli, il primo individuabile nella bocca più alta di grotta

"Locoli" (Foto 40) ed il secondo nella base del cumulo di frana che si interpone tra l'ingresso alle condotte carsiche e l'alveo di drenaggio superficiale (Foto 41).

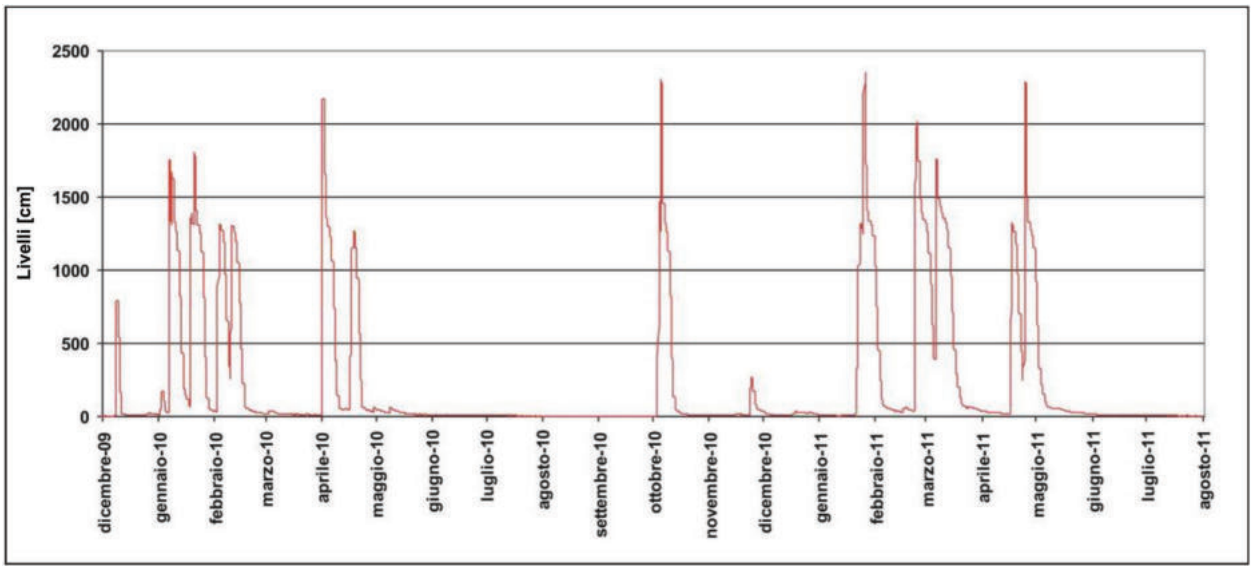

Figura 38: acquifero di grotta Locoli. Quadro complessivo della variazione dei livelli idrici - *Locoli cave aquifer. Variation of water levels*

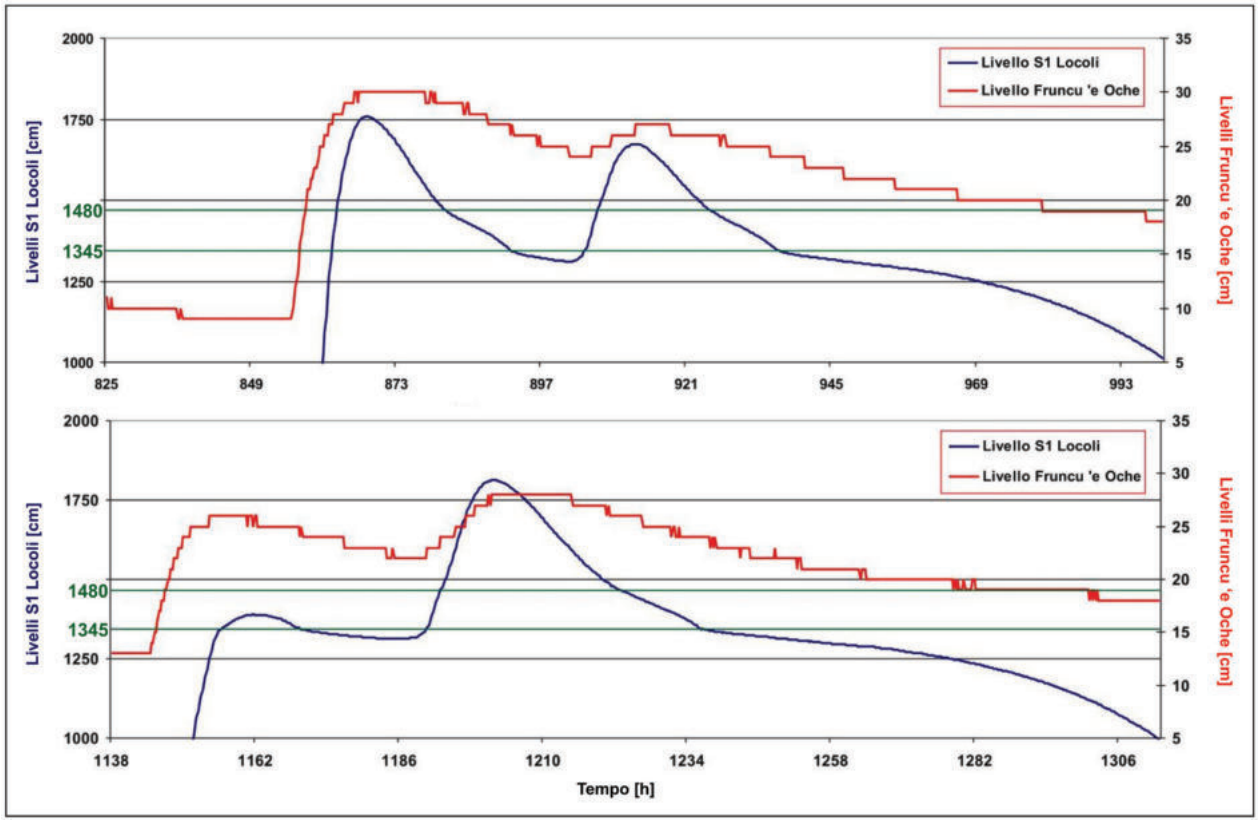

Figura 39: acquifero di grotta Locoli. Individuazione grafica dei livelli di trabocco durante le piene - *Locoli cave aquifer. Graphic detection of overflow levels*

Foto 40: grotta Locoli. Livello di trabocco superiore (Foto: Speleo Club Nuoro) - *Locoli cave. Higher overflow level (Photo: Speleo Club Nuoro)*

Foto 41: grotta Locoli. Livello di trabocco inferiore (Foto: Speleo Club Nuoro) - *Locoli cave. Lower overflow level (Photo: Speleo Club Nuoro)*

Nelle curve di svuotamento, il rallentamento è più marcato sotto quota 1.345 cm., livello sotto il quale il sistema carsico è drenato prevalentemente dalla sorgente di Fruncu 'e Oche. Nei grafici di figura 40 sono rappresentate le variazioni di temperatura e conducibilità misurate in tutte le porzioni dell'acquifero sottoposto a monitoraggio. Al fine di poter riferire le variazioni di tali parametri alle differenti situazioni idrodinamiche, le curve rappresentative di temperatura e conducibilità sono messe a confronto con le oscillazioni del livello piezometrico registrate nell'acquifero di grotta "Locoli". Dall'analisi dei grafici emerge una prima conferma sulla funzionalità idrodinamica del sifone S_1 ipotizzata in precedenza; infatti, la ciclicità delle oscillazioni di temperatura e conducibilità durante le fasi di piena e la sostanziale stabilità degli stessi parametri in quelle di morbida, considerate in rapporto alle variazioni degli stessi parametri rilevate negli altri siti di monitoraggio, convalidano l'ipotesi che il sifone S_1 svolga una funzione sostanzialmente passiva rispetto alla circolazione idrica generale nell'acquifero carsico, subendo effetti di pistonaggio durante le piene ed adempiendo solamente ad una funzione di accumulo idrico nelle altre fasi idrodinamiche.

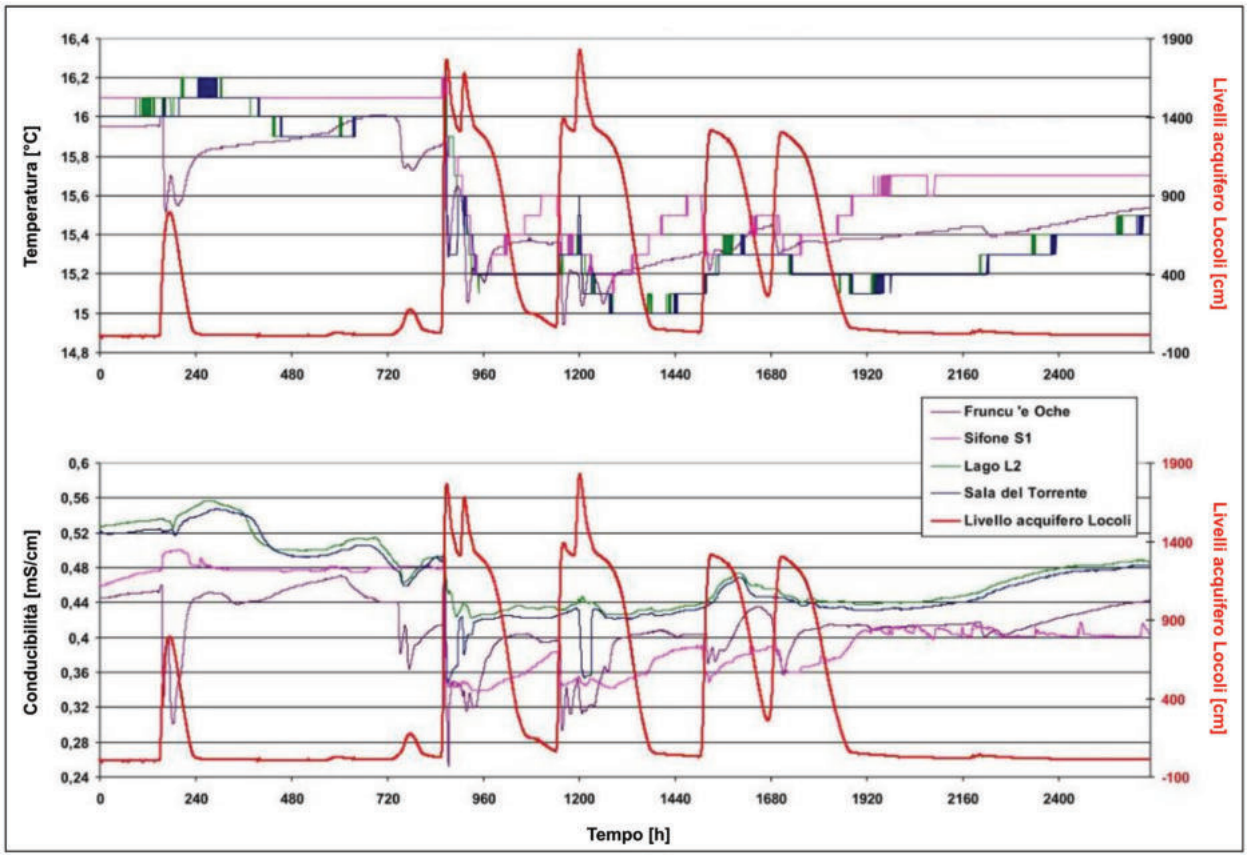

Figura 40: monitoraggio acquifero Locoli. Quadro complessivo dei parametri di monitoraggio - *Locoli aquifer monitoring. Overall summary of monitoring parameters*

Dal confronto tra i dati rilevati nel lago L_2 e nella Sala del Torrente e quelli registrati nella sorgente di Fruncu 'e Oche emerge come quest'ultima sia caratterizzata dagli effetti connessi al passaggio di acque d'infiltrazione recenti e "veloci" intervallati a pistonaggi di acque già residenti nel carso saturo ed in equilibrio con le condizioni fisiche dell'acquifero; ciò risulta evidente considerando le rapide oscillazioni di temperatura e conducibilità elettrica che si manifestano in sorgente durante ogni singolo episodio di piena. Nei grafici di figura 41 è rappresentato un *focus* sulla situazione idrodinamica che si verifica nella porzione di acquifero di grotta "Locoli" durante le piene. Le curve relative ai monitoraggi nel lago L_2 e della Sala del Torrente hanno un andamento sostanzialmente omogeneo sia nei valori di temperatura che di conducibilità elettrica. Tale corrispondenza viene meno durante i picchi di innalzamento piezo-metrico connessi alle piene di maggior entità, in occasione delle quali le acque circolanti nella Sala del Torrente risultano caratterizzate da decrementi di temperatura e conducibilità più rapidi e marcati rispetto a quelli registrati nel lago L_2.

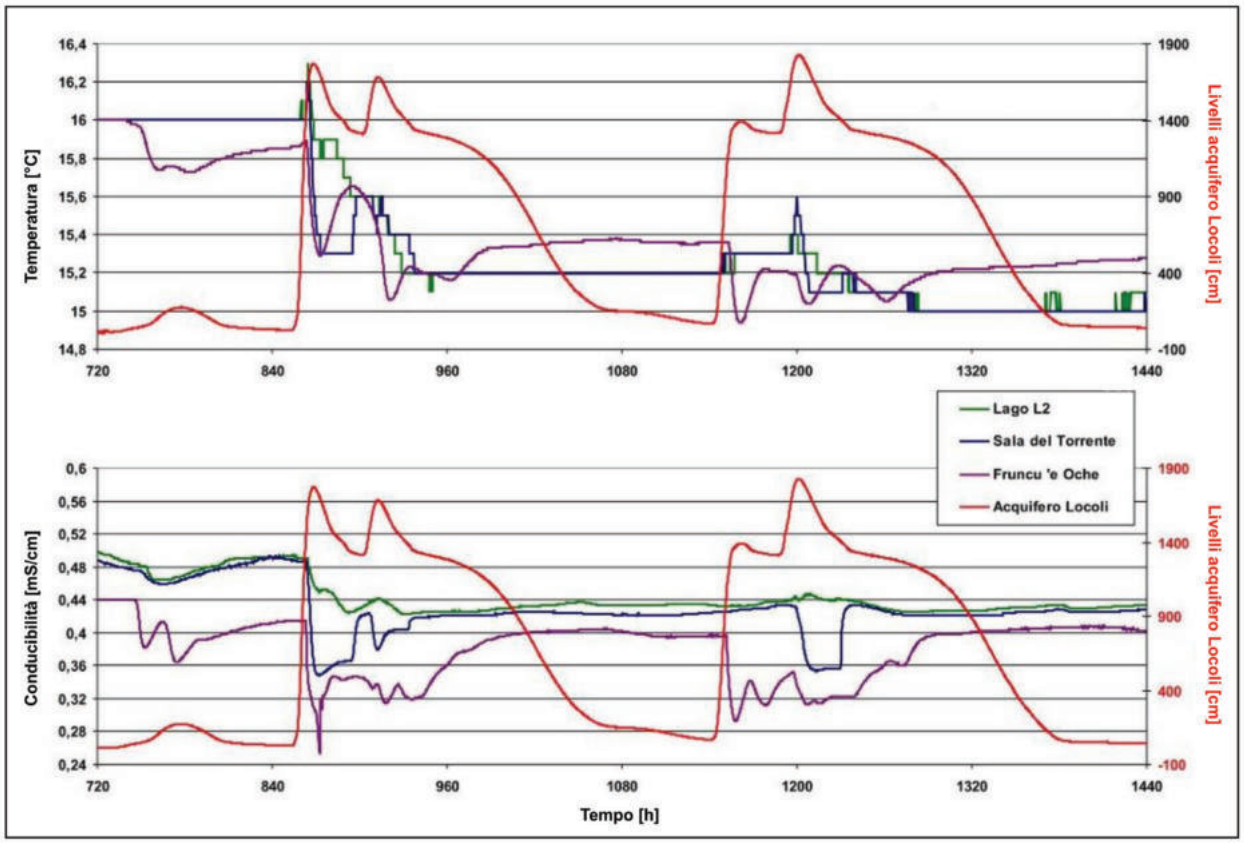

Figura 41: monitoraggio acquifero Locoli. Nel dettaglio dei diversi parametri di monitoraggio si evidenziano le analogie e le differenze dei circuiti idrici nei diversi settori dell'acquifero al variare delle condizioni idrodinamiche - *Locoli aquifer monitoring. The details of the different monitoring parameters highlight similarities and differences of drains while hydrodynamic conditions vary*

Questa particolarità è da porre in relazione al diverso chimismo assunto dalle acque nei due siti in occasione delle piene più intense, durante le quali le acque in equilibrio con l'acquifero provenienti dal carso saturo, e quindi anche dal lago L_2, si miscelano lungo l'alveo sotterraneo a venute d'acqua d'infiltrazione recente che si attivano poco a monte della Sala del Torrente. L'analisi dei dati di questo specifico monitoraggio, quindi, confermano la compartimentazione dell'acquifero tra il carso saturo profondo di grotta "Locoli" e le condotte di deflusso della "Diramazione Siniscola". Inoltre, le variazioni di conducibilità elettrica registrate presso la Sala del Torrente indicano chiaramente l'esistenza di un tributario sotterraneo localizzabile tra il carso saturo e la condotta di deflusso principale che si attiva in occasione degli eventi di piena più intensi.

Approfondimenti sui circuiti di drenaggio carsico secondari

Dalla fine del 2009, l'attività di monitoraggio sull'idrodinamica sotterranea è stata estesa anche ad alcune porzioni della rete di drenaggio ipogeo poste a quote superiori rispetto al carso saturo ed interessate dalla circolazione idrica, per lo più, durante gli eventi di piena. I settori dell'acquifero sottoposti a monitoraggio sono due (Fig. 42), le condotte parzialmente allagate della diramazione "Su Bufalu", ubicate oltre il sifone S_{1ter}, e la polla d'acqua presente in località "Su Romasinu", dalla quale sgorga una risorgente di trabocco durante le piene.

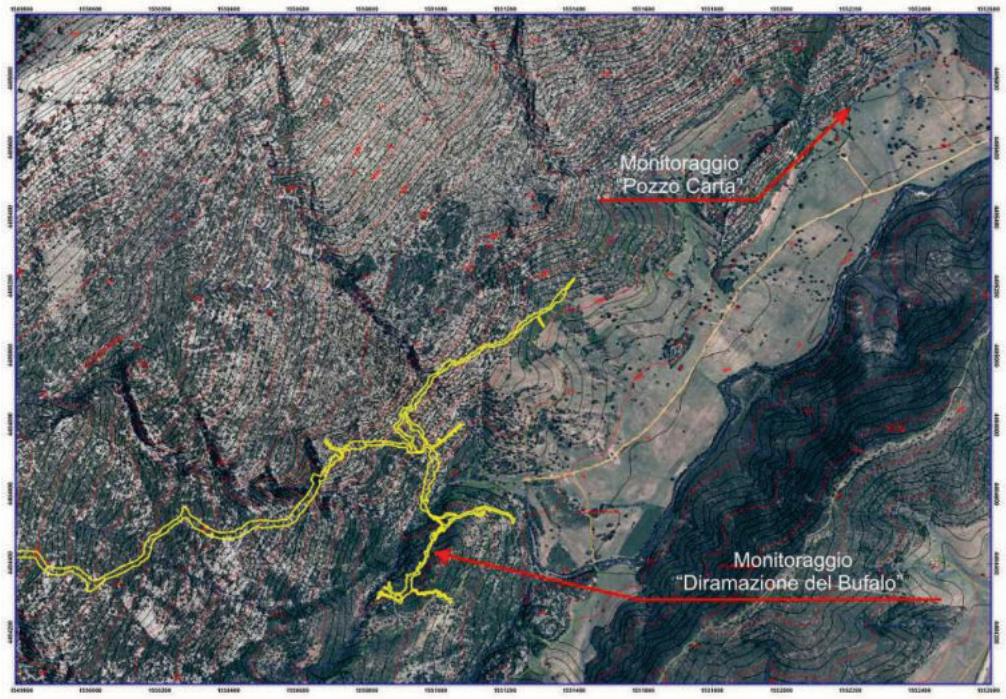

Figura 42: monitoraggio della porzione più elevata dell'acquifero. Localizzazione delle stazioni di monitoraggio *stations* (Base cartografica: Provincia di Nuoro) - *monitoring of the highest aquifer portion. Location of monitoring (cartographic base: Provence of Nuoro)*

Il grafico di figura 43 illustra le variazioni di livello idrico misurate nella diramazione "Su Bufalu" tra il 12 dicembre del 2009 ed il 22 marzo del 2010, messe a confronto, al fine di poterle riferire alle diverse condizioni idrodinamiche succedutesi nell'acquifero, con quelle registrate nel carso saturo nello stesso periodo. Durante il periodo di monitoraggio, nel sistema carsico si sono manifestate 4 piene a cui è conseguito il trabocco dell'acquifero sulla valle di Locoli e 2 piene di magnitudo minore. Fatto salvo il tratto iniziale della curva sino alla progressiva delle 720 ore, fortemente influenzato delle precedenti operazioni di svuotamento artificiale delle gallerie, dall'analisi dei grafici emerge chiaramente come la diramazione "Su Bufalu" sia invasa da consistenti volumi idrici solo in concomitanza con le piene di maggior intensità. Durante le fasi di morbida e di magra, invece, le condotte risultano caratterizzate da un livello idrico che si attesta su valori costanti.

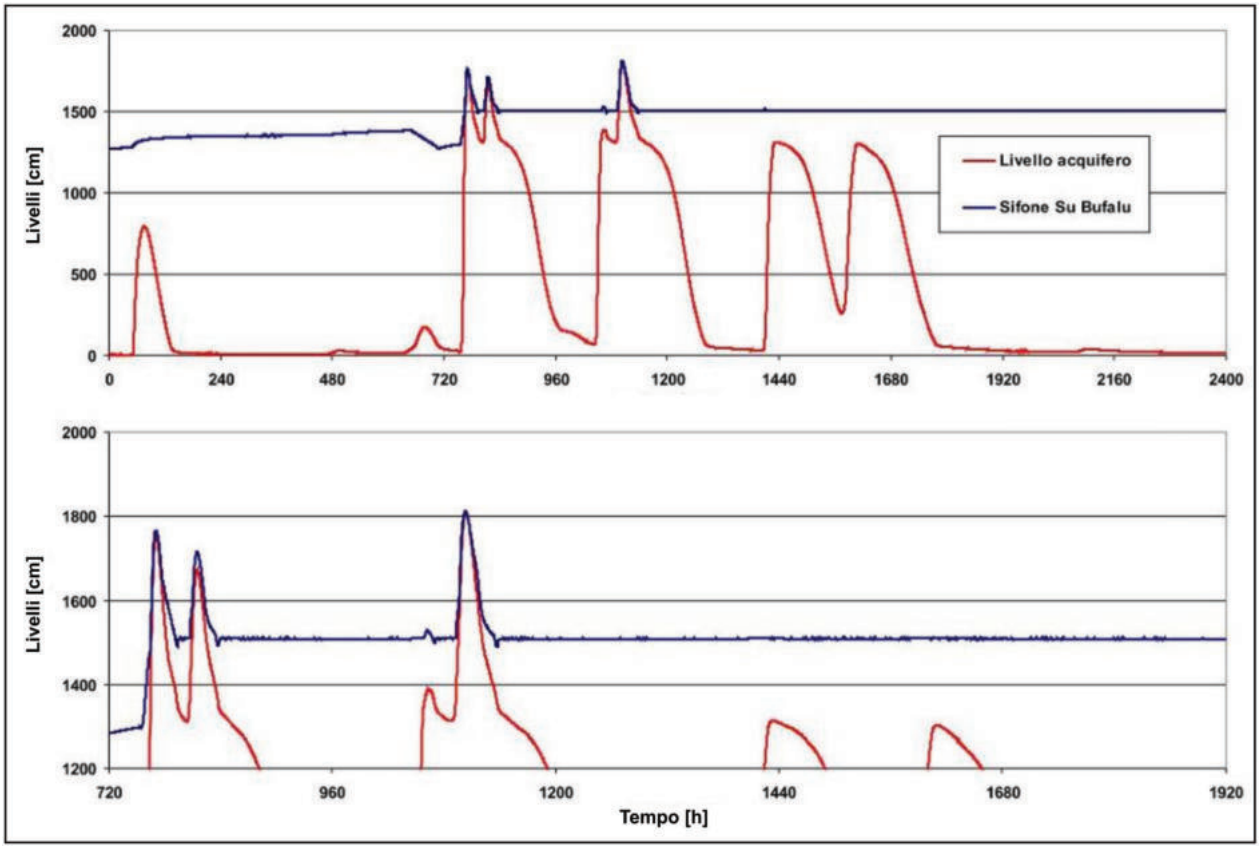

Figura 43: monitoraggio della "Diramazione del Bufalo". Il confronto dei livelli idrici evidenzia come la porzione d'acquifero più elevata sia interessata da una circolazione idrica rilevante solo in occasione delle piene di maggior intensità - *monitoring of "Diramazione del Bufalo". The comparison of water levels shows that the higher aquifer portion is affected by an important water circulation only during the strongest floods*

Analizzando le oscillazioni di livello idrico alla luce delle curve rappresentate nel grafico di figura 44, che rappresentano le variazioni di conducibilità elettrica e temperatura, si evince che le acque delle piene più intense provenienti dal sifone S_1 risalgono ed invadono anche la diramazione "Su Bufalu", dando luogo ad una sostituzione completa delle acque fino a quel momento residenti nelle condotte carsiche. Tale sostituzione risulta evidente considerando i rapidi e consistenti decrementi dei valori di temperatura e conducibilità che si equilibrano rapidamente, nel corso delle piene, ai valori dei medesimi parametri registrati nelle acque del carso saturo. Nelle successive fasi di svuotamento, le acque di piena penetrate nelle condotte sono sostituite, con una progressione esponenziale, da acque di circolazione interstiziale provenienti da una soprastante zona di percolamento dell'acquifero; come illustrato in (Fig. 45), infatti, le acque che si sostituiscono a quelle di piena risultano caratterizzate da un contenuto ionico ben superiore rispetto a quello registrato nelle acque del carso saturo.

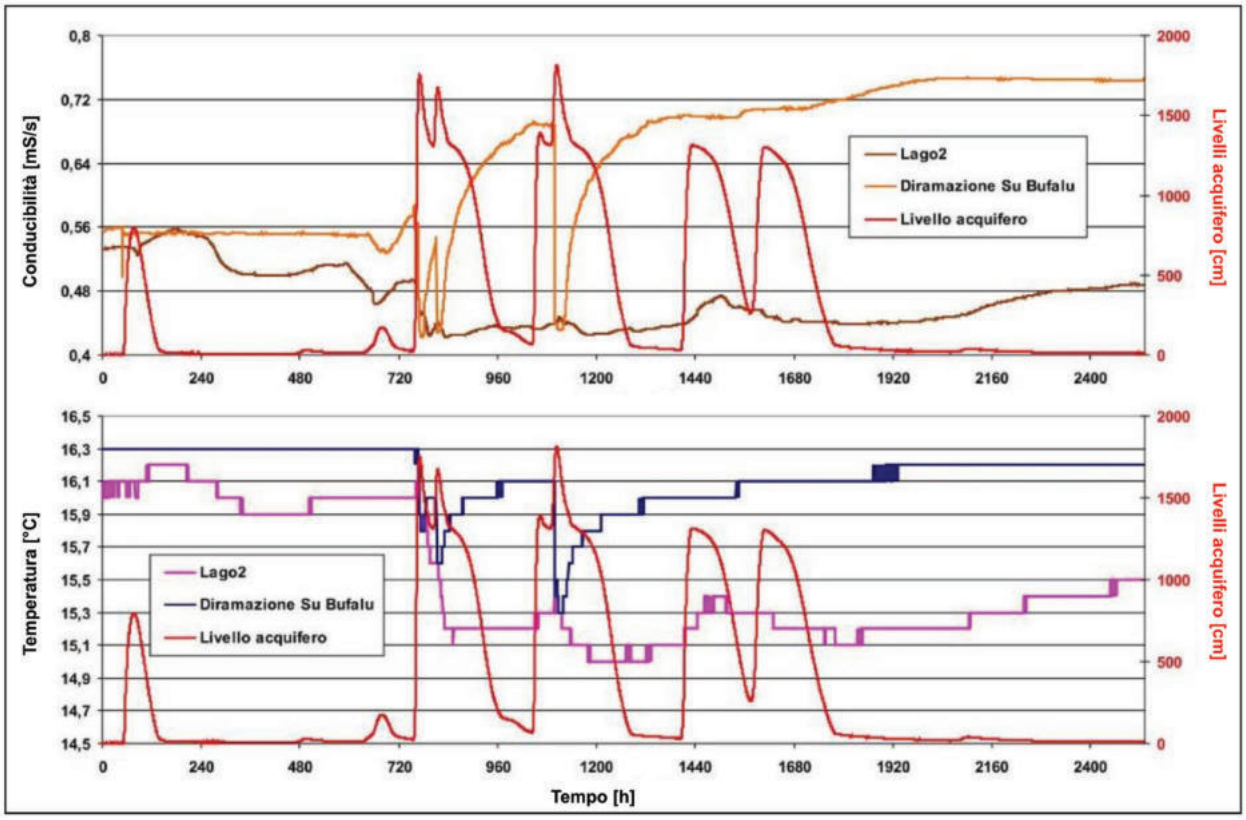

Figura 44: monitoraggio della "Diramazione del Bufalo". Il confronto tra i valori di temperatura e conducibilità della porzione d'acquifero più elevata con gli stessi parametri misurati nei sifoni profondi di grotta Locoli mette in evidenza come i due siti, se non in condizioni di massima piena, siano tra loro ideologicamente indipendenti - *monitoring of "Diramazione del Bufalo". The comparison of the values of temperature and electrical conductivity of the higher aquifer portion with the same parameters measured in the deep sumps of Locoli cave highlights that in absence of floods the two sites are ideologically independent*

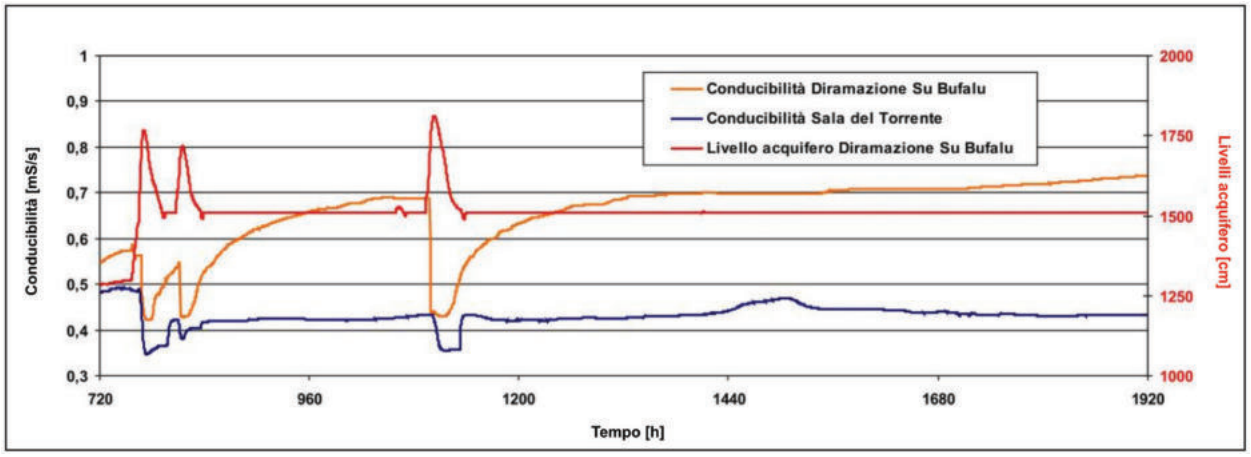

Figura 45: monitoraggio della "Diramazione del Bufalo". Nel dettaglio del confronto tra i parametri rappresentati si evidenzia come, successivamente alle piene di maggior entità, le conducibilità misurate nei diversi tratti del sistema carsico assumano valori decisamente differenti, a conferma della netta separazione idrologica delle due porzioni d'acquifero - *monitoring of "Diramazione del Bufalo". During strongest floods the electrical conductivity measured in the different sections of the karst system have very different values, confirming the hydrological separation of the two aquifer portions*

Quanto sopra riportato, dimostra che il drenaggio dei deflussi che interessano esclusivamente la diramazione "Su Bufalu", per quanto variabili nel tempo, sono caratterizzati da volumi idrici ridotti e comunque tali da essere trasferiti immediatamente nella porzione sottostante d'acquifero senza provocare né rigurgiti né accumuli idrici importanti nelle vie di drenaggio superiori.

Il grafico di figura 46 illustra le variazioni di livello idrico misurate tra il 3 aprile ed il 1 maggio 2010 nel pozzo "Carta" a confronto con le variazioni dello stesso parametro registrate a Fruncu 'e Oche ed al sifone S_1 di grotta "Locoli".

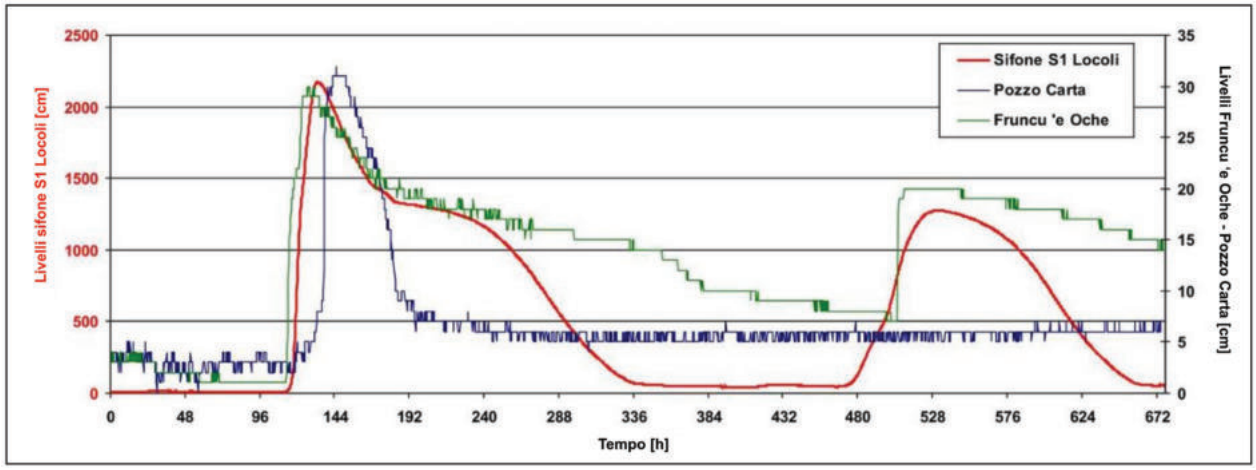

Figura 46: monitoraggio "Pozzo Carta". Il confronto dei livelli idrici evidenzia come la risorgente sia interessata dalla circolazione idrica solo durante le piene di maggior intensità - *monitoring of "Pozzo Carta". The comparison of water levels shows that water flows towards in the spring only during the most strongest floods*

Dalla comparazione tra i valori rappresentati nel grafico, risulta evidente come la polla d'acqua di pozzo "Carta" sia interessata da incrementi di livello idrico solo in occasione di quelle piene che producono anche il trabocco dell'acquifero da grotta "Locoli": infatti, il secondo evento di piena illustrato, che pure ha dato luogo a significativi innalzamenti del livello piezometrico presso il carso saturo di grotta "Locoli" e la sorgente di Fruncu 'e Oche, non ha prodotto alcun effetto nella risorgenza di pozzo "Carta". Nei grafici di figura 47, sono messi a confronto i valori di temperatura e conducibilità misurati simultaneamente nel pozzo "Carta" ed al sifone S_1 di grotta "Locoli". Le variazioni dei parametri mostrano, in corrispondenza della piena di maggior intensità, un andamento simile seppur differente nei valori assoluti mentre in occasione del secondo incremento piezometrico, solo i parametri delle acque nel sifone S_1 di grotta "Locoli" subiscono un decremento. Tale riduzione è imputabile ad un miscelamento tra le acque già residenti nel carso saturo ed apporti idrici d'infiltrazione recente, fenomeno questo che non ha interessato lo specchio d'acqua di pozzo "Carta".

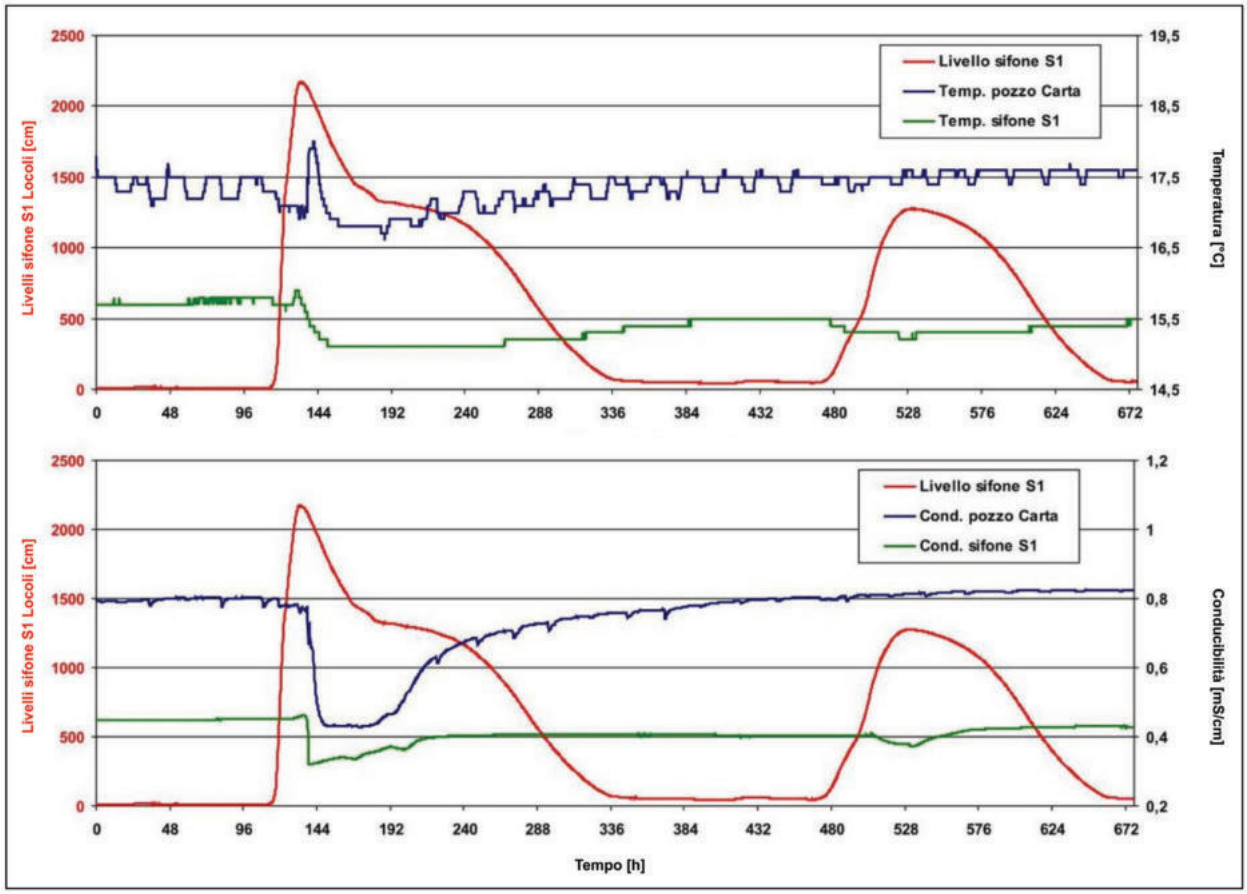

Figura 47: monitoraggio "Pozzo Carta". Il confronto tra i parametri di conducibilità e temperatura rilevate nelle due porzioni d'acquifero considerate (Pozzo Carta e sifone S_1) conferma che una circolazione idrica comune ai due siti sussista solo in occasione delle piene di maggior intensità - *monitoring of "Pozzo Carta". The comparison of the conductivity and temperature parameters in different portions of aquifer (Pozzo Carta and S_1 siphon) confirms that the two sites share the same water only during strongest floods*

Peraltro, la variazione dei valori registrata in questo sito successivamente al primo evento di piena, ed in particolare di quello relativo alla conducibilità elettrica, mostra un andamento esponenziale crescente molto simile a quello rilevato nella diramazione "Su Bufalu". Questa osservazione induce ad ipotizzare che anche le condotte carsiche connesse alla risorgente di pozzo "Carta" abbiano un comportamento passivo rispetto alle piene e che le stesse vengano interessate dalla circolazione idrica solo durante gli eventi di piena più consistenti a seguito del sollevamento generale del livello piezometrico in tutto il sistema carsico ipogeo. Dal punto di vista strettamente speleologico, la stessa osservazione induce ad ipotizzare l'esistenza di condotte carsiche percorribili localizzabili oltre lo specchio d'acqua di pozzo "Carta" e di una possibile via d'accesso, al momento sconosciuta, verso il sottostante sistema di drenaggio principale.

Caratterizzazione della sorgente Fruncu ‘e Oche

La sorgente di Fruncu ‘e Oche, come già evidenziato, può essere classificata come un’emergenza di frattura perenne a regime variabile (Foto 42). Il monitoraggio delle portate idriche, protrattosi dal 26 febbraio 2009 al 30 marzo 2012 con una frequenza di misure pari ad una ogni 15 minuti, consente di valutare tra 4,156 e 0,081 m^3/s il *range* entro il quale variano le portate nel corso dell’anno. Ogni misura di portata è stata ottenuta sommando il valore dei deflussi misurati sugli stramazzi ai prelievi acquedottistici registrati giornalmente dalla società che gestisce la captazione. La portata media della sorgente, valutata sulla base delle misurazioni registrate in due annualità consecutive (ottobre 2009 - settembre 2010 e ottobre 2010 - settembre 2011), è pari a 0,570 m^3/s, valore questo ben superiore rispetto a quello pari a 0,120 m^3/s disponibile in bibliografia.

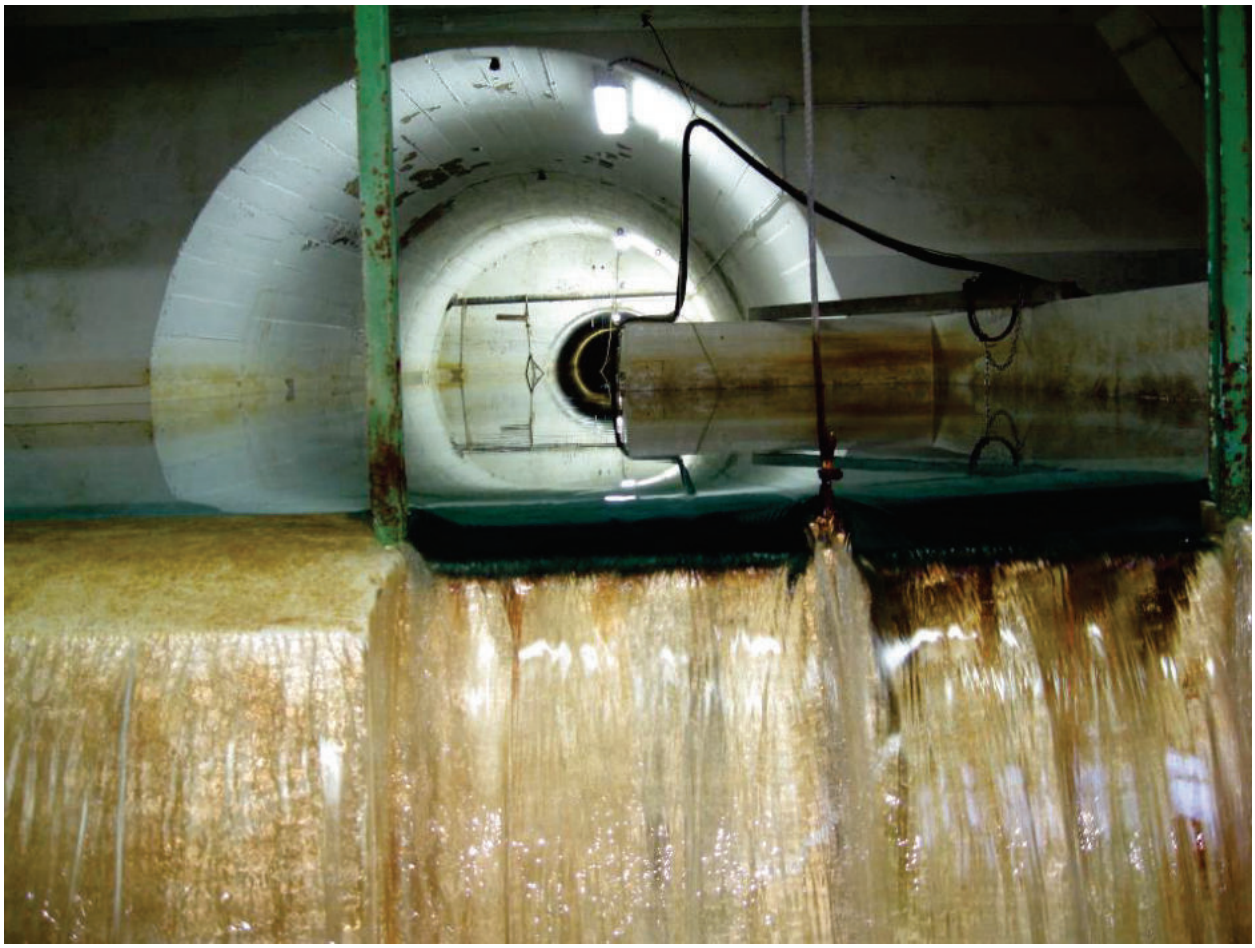

Foto 42: stramazzo nella galleria di drenaggio principale della sorgente di Fruncu ‘e Oche - *weir in the main drainage gallery at Fruncu ‘e Oche spring*

Il grafico di figura 48 offre un quadro generale sull'andamento delle portate registrate in sorgente nei tre anni che intercorrono da marzo 2009 a marzo 2012. In particolare, il grafico di figura 49 mostra il dettaglio delle portate comprese tra il 1° novembre 2010 ed il 31 ottobre 2011 raffrontate alle pluviometrie giornaliere medie registrate nello stesso periodo presso le due stazioni di caserma Monte Pitzinnu e di caserma Guzzurra.

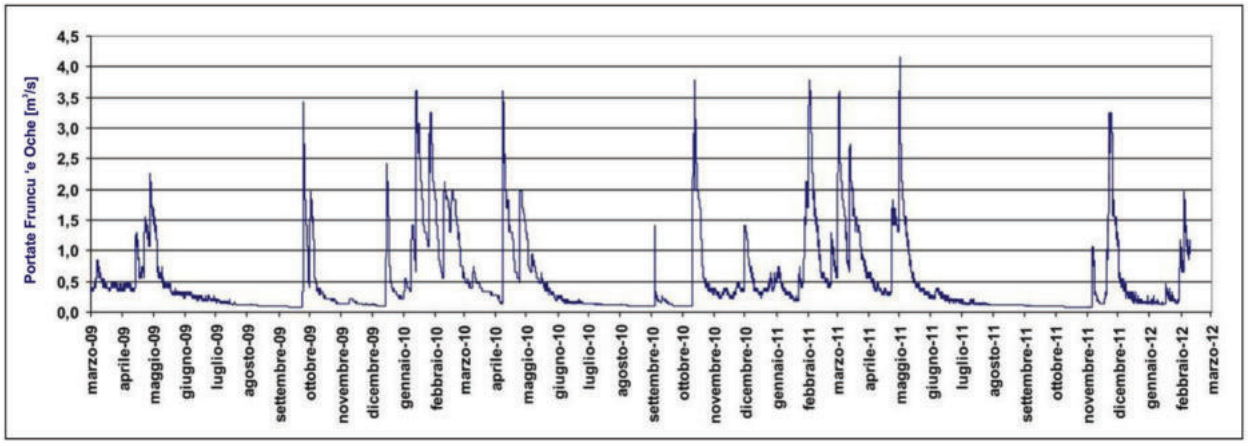

Figura 48: quadro complessivo delle portate registrate a Fruncu 'e Oche nei tre anni di osservazioni - *cumulative graph of flow rates recorded at Fruncu 'e Oche spring during the three-year survey*

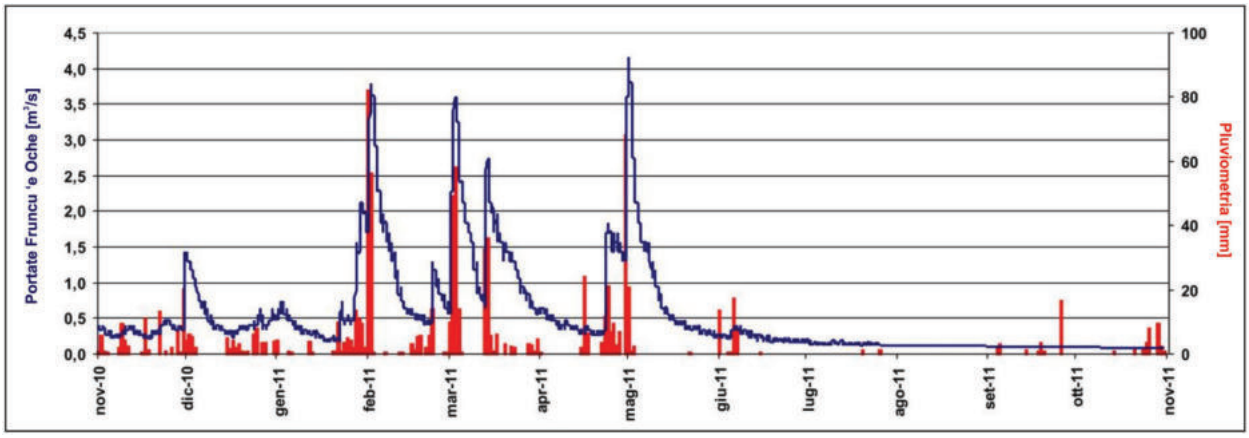

Figura 49: monitoraggio della sorgente di Fruncu 'e Oche. Confronto tra le pluviometrie e le portate registrate tra novembre 2010 ed ottobre 2011 - *monitoring of Fruncu 'e Oche spring. Comparison of rainfalls and flow rates recorded from November 2010 to October 2011*

Com'è facile evincere anche dall'ulteriore dettaglio di figura 50, l'aumento della portata in sorgente segue di 7/10 ore ogni singolo evento meteorologico mentre il picco di portata conseguente all'impulso di pioggia si esaurisce in un tempo di circa 200 ore. Tali evidenze sono da mettere in relazione con la presenza sia di una rete diffusa ed efficace di apparati carsici deputati all'infiltrazione, costituita in prevalenza dagli inghiottitoi distribuiti in tutto il bacino idrogeologico del Monte Albo, sia di una rete di drenaggio idrico ipogeo molto trasmissiva, costituita da condotte carsiche di grandi dimensioni capaci di smaltire, in tempi relativamente brevi, i surplus idrici infiltratisi nell'acquifero. I grafici di figura 51 riportano il confronto tra le portate e le variazioni di conducibilità elettrica e di temperatura misurate nelle acque di sorgente nei tre anni di osservazioni sopra considerati. Questi grafici, ed in particolare il dettaglio di figura 52 nel quale è rappresentato il periodo di monitoraggio dal 23 settembre al 13 ottobre 2009, consentirebbero di ipotizzare lo svolgersi, nelle fasi idrodinamiche di piena e in corrispondenza dell'intero periodo di decremento, di un fenomeno di sostituzione prevalente delle acque che stazionano nel carso saturo con i nuovi apporti idrici d'infiltrazione recente (VIGNA B., 2000). Questo andamento sembrerebbe testimoniato dalla rapida flessione dei valori sia di conducibilità che di temperatura osservabili nel periodo immediatamente successivo agli eventi di piena.

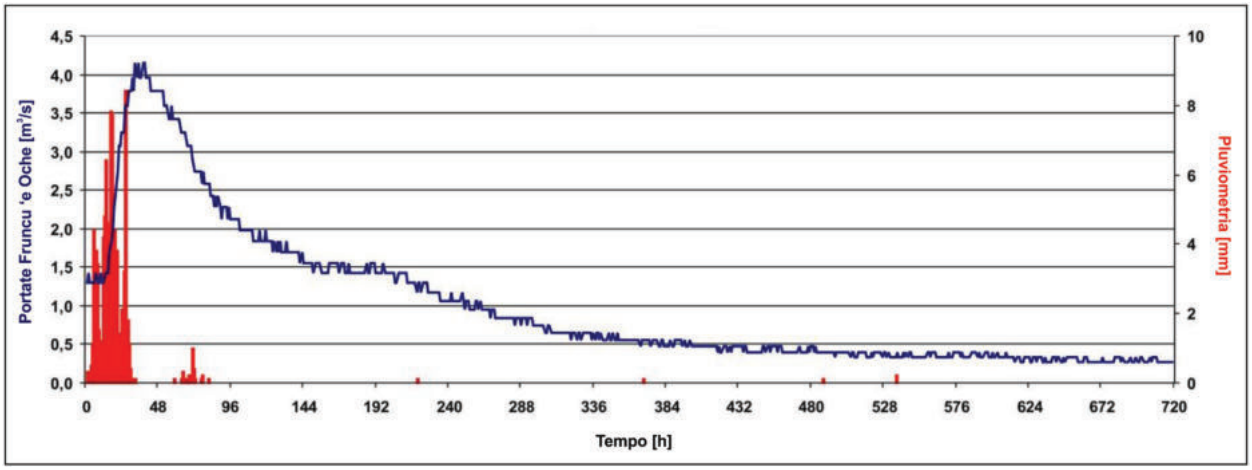

Figura 50: monitoraggio della sorgente di Fruncu 'e Oche. Il dettaglio dei tempi relativi agli input meteorologici ed i massimi di piena concorre ad evidenziare la presenza nel bacino idrogeologico di un diffuso ed efficace sistema di apparati carsici deputati all'infiltrazione e di una rete di drenaggio idrico ipogeo molto trasmissiva - *monitoring of Fruncu 'e Oche spring. The short delay between meteorological inputs and flood peaks evidence the presence of well-developed infiltration network and a very transmissive drainage network*

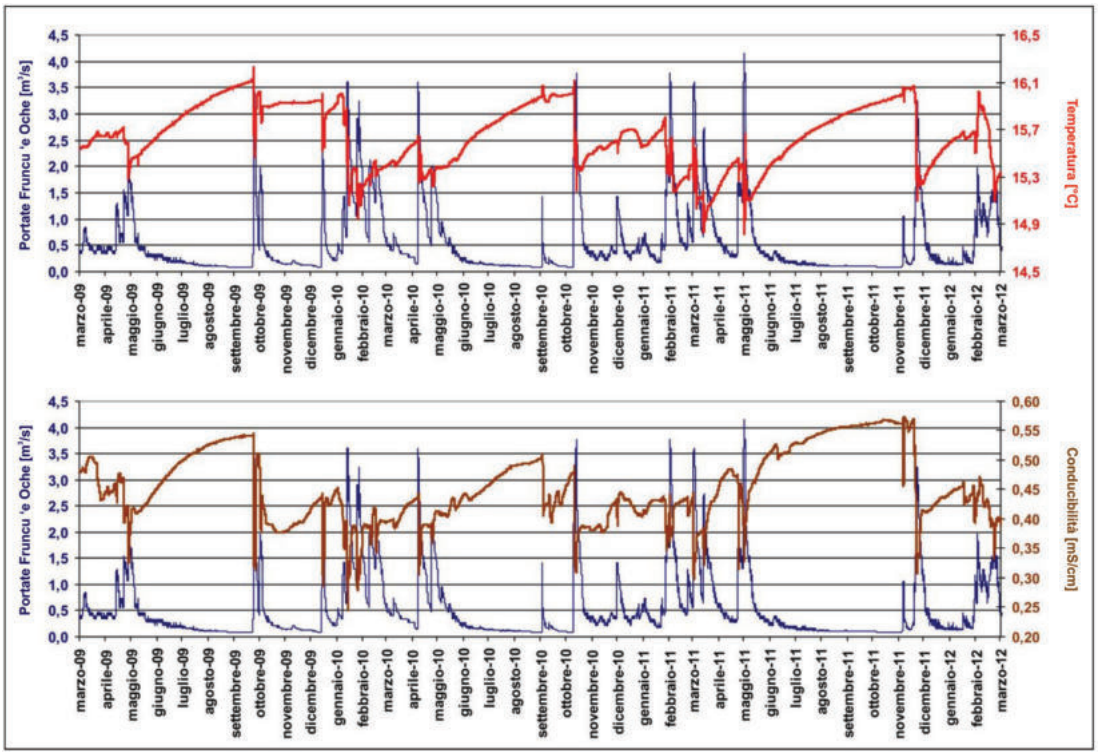

Figura 51: monitoraggio della sorgente di Fruncu 'e Oche. Confronto tra portate, temperature e conducibilità elettrica nei tre anni di osservazioni - *monitoring of Fruncu 'e Oche spring. Comparison of flow rates, temperatures and electrical conductivity during the three-year survey*

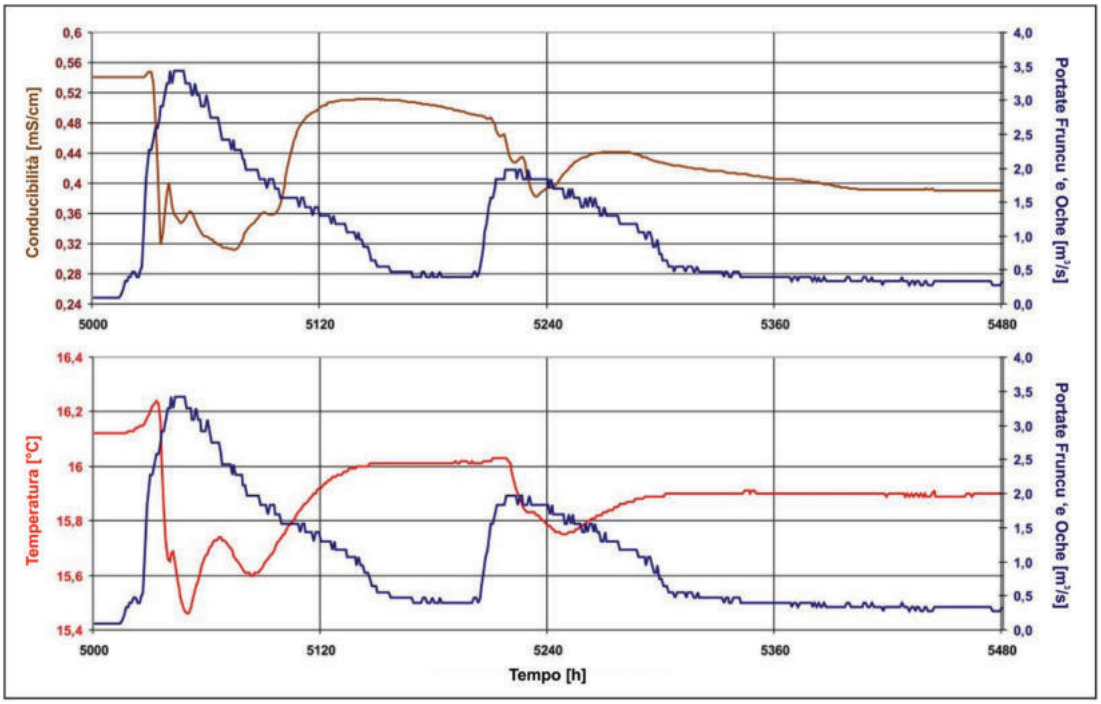

Figura 52: monitoraggio della sorgente di Fruncu 'e Oche. Il dettaglio del confronto tra portate, temperature e conducibilità elettrica è interpretabile con un parziale miscelamento tra acque residenti ed altre di infiltrazione recente, con prevalenza di queste ultime, durante le fasi culminali delle piene. Nella fase di svuotamento i deflussi dalla sorgente, invece, sono costituiti in prevalenza da acque già residenti nell'acquifero carsico - *monitoring of Fruncu 'e Oche spring. The comparison of flow rates, temperatures and electrical conductivity can be interpreted as a partial and limited mixing between resident waters and newly infiltrated ones, being prevalent the latter during heavy floods. In the exhaustion phase the outflows of the spring are mainly made up of waters already resident in the karst aquifer*

Tali decrementi sono anticipati da brevi picchi dei valori di conducibilità e temperatura legati a singoli e modesti episodi di pistonaggio di acque residenti nell'acquifero verso la sorgente di Fruncu 'e Oche. Considerando le variazioni dei parametri di monitoraggio nell'intero ciclo di svuotamento, invece, ciò che si poteva ipotizzare come un fenomeno di sostituzione prevalente appare meglio interpretabile come la conseguenza di un parziale e limitato miscelamento tra acque residenti ed altre di infiltrazione recente con netta prevalenza di queste ultime.

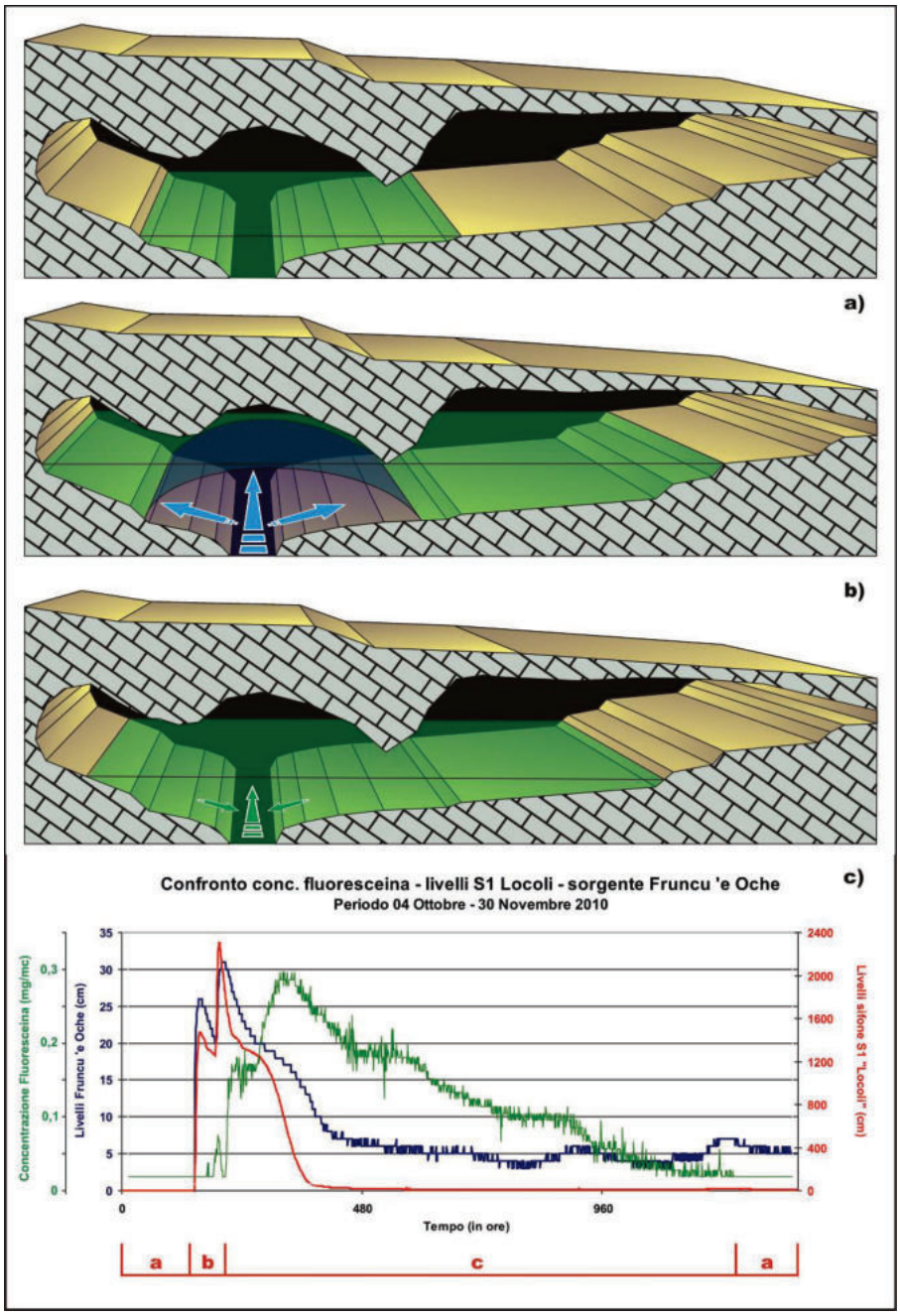

Figura 53: schema di funzionamento idrodinamico dell'acquifero durante le fasi di piena. Durante la fase di svuotamento (C), le acque già residenti nell'acquifero, colorate dal test di tracciamento dell'agosto 2009, subentrano a quelle d'infiltrazione recente non colorate che avevano caratterizzato la fase culminale della piena (B)

hydrodynamic scheme of the aquifer during floods. During the exhaustion phase (C), the waters resident in the aquifer (August 2009 tracing test), replace those of recent infiltration that had marked in the culmination phase of flood (B)

Questo fenomeno era stato già osservato e discusso nell'illustrazione del comportamento idrodinamico delle acque del sifone S_1 di grotta "Locoli" in occasione delle piene. In questi casi si è già dimostrato come le acque residenti nel carso saturo subiscano un'onda di pressione che ne provoca lo spostamento laterale ed il sollevamento nell'acquifero ma non il loro pistonaggio verso le aree di risorgenza, che avviene solamente quando il livello piezometrico raggiunge la quota di trabocco dell'acquifero verso l'esterno (Fig. 28). Ai nuovi input idrici nell'acquifero, quindi, conseguono una rapida emissione dalla sorgente di acque d'infiltrazione recente, non in equilibrio chimico e termico con il serbatoio carsico, e solo un loro parziale miscelamento con le acque già residenti nel carso saturo. Successivamente alle fasi culminali delle piene, i valori di conducibilità e temperatura tendono nuovamente a crescere a causa del rilascio verso la sorgente di volumi idrici costituiti da acque gia in equilibrio chimico e fisico con l'acquifero, prevalenti, miscelate ad acque di infiltrazione recente (Fig 53); è possibile affermare, quindi, che i deflussi legati alle piene transitino nell'acquifero scorrendo sulle acque del carso saturo e interagendo assai poco con quest'ultimo.

Durante la tarda primavera e nel corso dell'estate, i valori di temperatura e conducibilità mostrano di subire incrementi di tipo esponenziale, andando ad approssimarsi, prima dell'arrivo dei nuovi apporti idrici autunnali, ai valori propri delle acque che tendono ad equilibrarsi con il sistema carsico ipogeo che le contiene. Questo riscontro è da mettere in relazione allo svuotamento della riserva regolatrice localizzabile in un magazzino idrico ipogeo costituito da una rete di gallerie carsiche distribuite, assai probabilmente, su una superficie molto estesa.

La serie di osservazioni sopra descritte, combinate a quelle già riportate relative alla compartimentazione dell'acquifero carsico, risulteranno di grandissima importanza in riferimento alle possibilità di potenziamento degli impianti acquedottistici esistenti che sarà trattata nel seguito.

Analisi di bilancio idrologico

Gli strumenti ed i dati di monitoraggio disponibili per questo studio hanno consentito di eseguire un'analisi precisa di alcuni parametri di bilancio idrologico relativi al bacino di alimentazione della sorgente di Fruncu 'e Oche. In particolare, la disponibilità di due centraline pluviometriche dedicate e di una stazione di misura delle portate in sorgente consente di ricostruire un modello afflussi-deflussi assai attendibile, in particolare per ciò che riguarda i parametri delle precipitazioni totali e dell'infiltrazione. Inoltre, le diverse colorazioni eseguite hanno permesso di definire in maniera precisa la superficie del

bacino idrogeologico che alimenta la sorgente, valutata in 56,84 Km^2 sulla base di un rilevamento elaborato con tecnologia Gis alla scala di 1 : 5.000. L'analisi di bilancio si riferisce al periodo ottobre 2010 - settembre 2011 nel quale è stata registrata una pluviometria media complessiva pari a 1.113 mm, che corrisponde ad un afflusso di precipitazioni totali nel bacino di riferimento pari a 63.285.656 m^3. Il totale dei deflussi transitati presso la sorgente di Fruncu 'e Oche è stato pari a 18.939.685 m^3, di cui 3.784.320 m^3, calcolati sommando i volumi di prelievo riportati nei registri giornalieri, derivati per gli usi acquedottistici da Abbanoa Spa e 15.155.365 m^3, calcolati in uscita sugli stramazzi, scaricati sull'alveo naturale ed al Riu Siniscola. La valutazione delle portate di piena defluite dalla grotta "Locoli" nel periodo di riferimento è stata stimata sulla base di una serie di misure di portate effettuate sul Riu Locoli in occasione di una piena verificatasi tra il 21 ed il 24 novembre del 2011 (Fig. 54). Tale monitoraggio ha consentito di calcolare una portata media, riferita all'intero episodio di piena, di 7,56 m^3/s. Tale valore è stato rapportato al periodo in cui la grotta "Locoli" ha traboccato sulla valle antistante tra ottobre 2010 e settembre 2011, pari a circa 445 ore (Fig. 55). Pertanto, il totale i volumi idrici di piena scaricati sul Riu Locoli riferiti al periodo di riferimento è stimabile in 12.111.120 m^3 mentre i deflussi totali dall'acquifero carsico possono valutarsi in 31.050.805 m^3. La tabella 5 riassume i dati sopra illustrati.

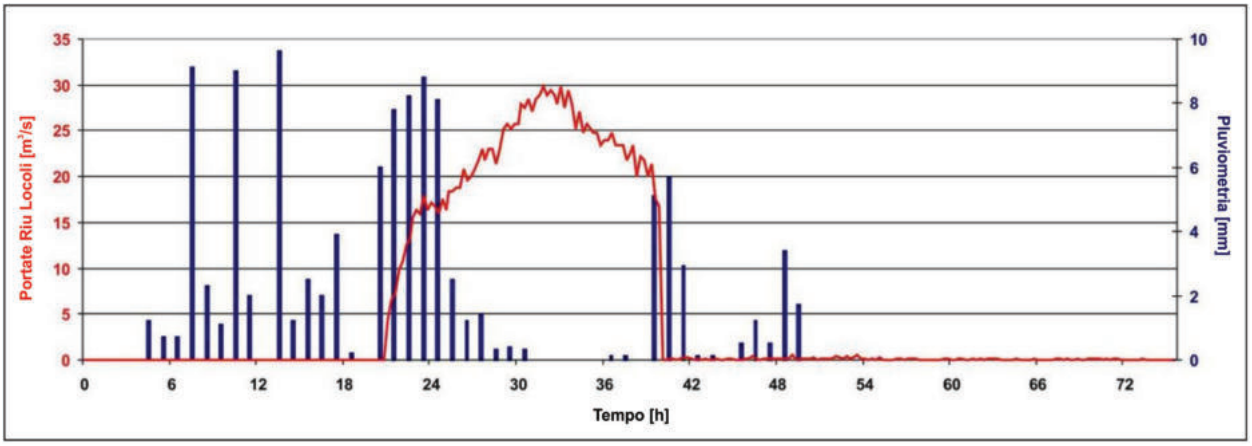

Figura 54: valutazione delle portate di piena. I deflussi registrati nel Rio Locoli durante la piena del novembre 2011 - *evaluation of flood flows. Outflows at Rio Locoli during the flood of November 2011*

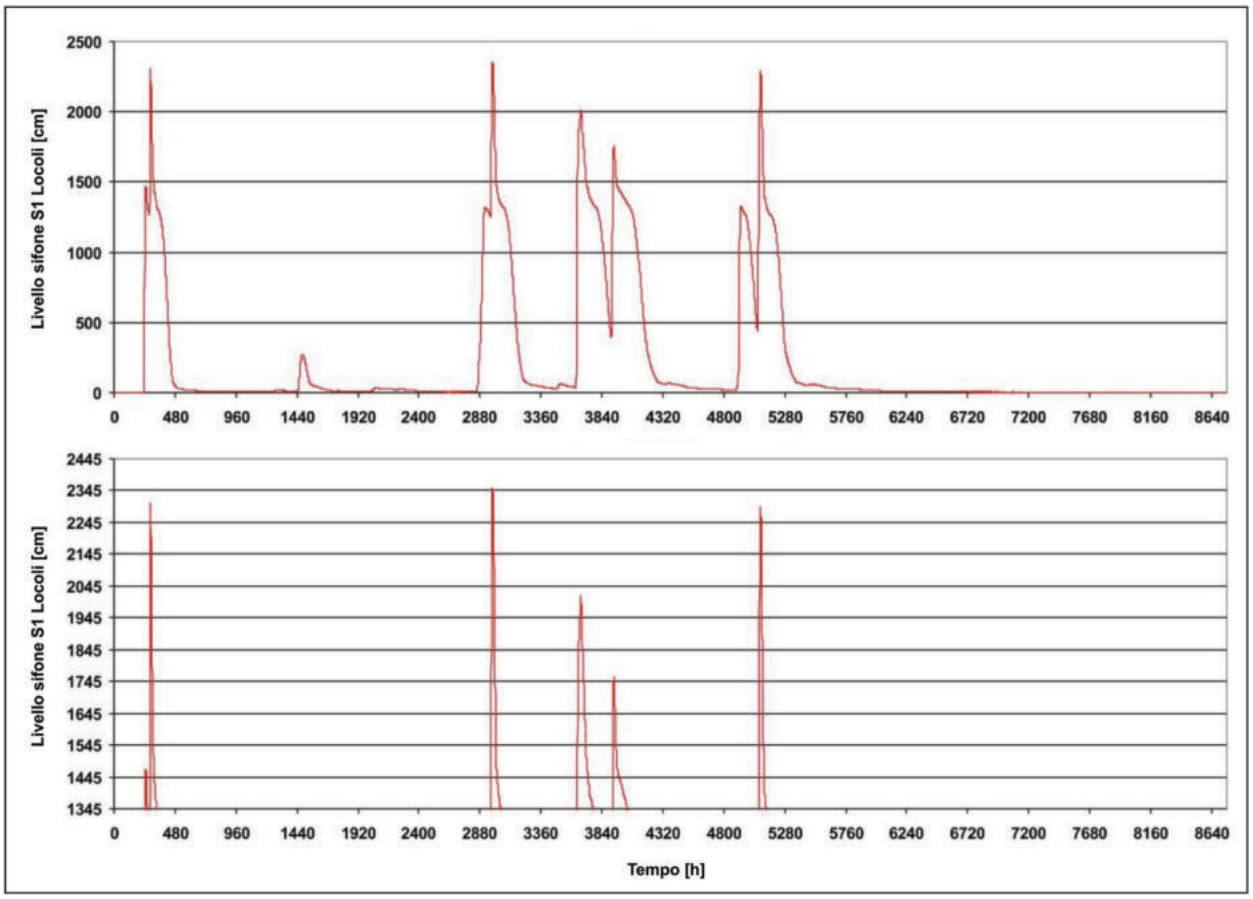

Figura 55: picchi di piena nel sifone S_1 di grotta Locoli. Valutazione del numero di ore in cui le acque contenute nella grotta hanno traboccato nella valle antistante l'ingresso - *peaks of flood in the S_1 siphon of Locoli cave. Evaluation of the hours taken by the water contained in the cave to overflow in the valley*

Pluviometria Monte Albo dal 30/09/10 al 01/10/11 (in mm)		1.113
Superficie bacino idrogeologico (in km^2)		56,84
Afflussi complessivi nel bacino di riferimento (m^3)		63.285.656
Deflussi complessivi da Fruncu 'e Oche (m^3), di cui:		18.939.685
	prelevati per gli usi acquedottistici	3.784.320
	scaricati sul Rio Siniscola	15.155.365
Deflussi di piena scaricati da grotta "Locoli" su Rio Locoli (stima in m^3)		12.111.120
Deflussi totali dall'acquifero carsico (m^3)		31.050.805
Quota di bilancio per deflussi da Fruncu 'e Oche		29,93%
Quota di bilancio per deflussi da Locoli		19,14%
Deflussi - Infiltrazione		49,06%

Tabella 5: dati di bilancio idrologico dell'acquifero carsico che alimenta la Grotta Locoli riferiti all'anno 2010-2011 - *data related to the hydrological balance of the aquifer feeding the Locoli cave for 2010-2011*

Tra quelli elaborati, il dato certamente più interessante dal punto di vista idrologico è quello relativo alla percentuale d'infiltrazione sul totale degli afflussi complessivi nel bacino idrogeologico, superiore al 49%. Sempre in riferimento allo stesso bacino, è rilevante anche la percentuale dei deflussi dalla sorgente di Fruncu 'e Oche, pari a circa il 30% sul totale delle precipitazioni. Questi valori sono rappresentativi della grande potenzialità di ricarica dell'acquifero carsico del Monte Albo ed evidenziano la possibilità di rimodulare le valutazioni sin ora eseguite per un utilizzo ottimale della sorgente di Fruncu 'e Oche sulla base dei nuovi dati disponibili.

Dimensionamento della riserva regolatrice

Lo studio della curva di svuotamento di un sistema carsico può essere scomposta in due parti: il primo tratto, che inizia dal picco di piena e comprende tutta la porzione più ripida dell'allineamento (curva di decremento), corrisponde alla decrescita delle portate della sorgente allorché il sistema carsico è ancora in regime non laminare per il persistere del fenomeno dell'infiltrazione mentre il secondo tratto (curva di esaurimento) corrisponde alle portate sorgentizie in regime laminare.

Per lo studio della curva di svuotamento è largamente utilizzata la funzione composita di Mangin (MANGIN, 1975; CIVITA, PEANO & VIGNA, 1984):

$$Q_t = Q_r * e^{(-\alpha t)} + q_0 * (1-\tau t)/(1-\mu t)$$

dove:

Q_t = portata alle sorgenti a t = 0

Q_r = portate iniziale dell'esaurimento a t = 0

q_0 = portata iniziale dell'infiltrazione a t = 0

t = tempo a inizio svuotamento

α = coefficiente di esaurimento

τ = coefficiente d'infiltrazione

μ = coefficiente di eterogeneità di deflusso

La prima delle due funzioni a secondo membro è l'espressione che rappresenta l'esaurimento del carso saturo in regime laminare mentre la seconda è una funzione empirica che rappresenta lo svuotamento dell'acquifero in presenza di infiltrazione. Quest'ultima funzione si annulla in un tempo:

$$T_i = 1/\tau$$

Il coefficiente d'infiltrazione (τ) determina la velocità media dell'infiltrazione mentre il coefficiente di eterogeneità di deflusso (μ) offre elementi d'analisi circa l'articolazione e le dimensioni degli apparati carsici deputati all'infiltrazione. Integrando la prima parte della funzione si ottiene il volume d'acqua sotterraneo immagazzinato nel sistema di condotte all'inizio dello svuotamento mentre integrando la seconda parte della formula si perviene al volume

d'acqua d'infiltrazione penetrato nel sistema carsico e defluito da esso nel periodo interessato dagli apporti che hanno determinato il picco di piena. La modellizzazione proposta da Mangin ed espressa nella sua formula completa è stata seguita solo in parte in questo studio: infatti, il monitoraggio costante dei valori di portata nonché le osservazioni condotte nel carso saturo, nella zona di percolamento e nel sistema epigeo già trattati nei paragrafi precedenti offrono un quadro esauriente sui meccanismi idrodinamici che regolano gli afflussi e il deflusso delle acque dal sistema carsico del Monte Albo in regime non laminare. Le tre curve di esaurimento rappresentate in figura 56 illustrano i decrementi di portata tra la tarda primavera e l'estate registrati negli anni 2009, 2010 e 2011.

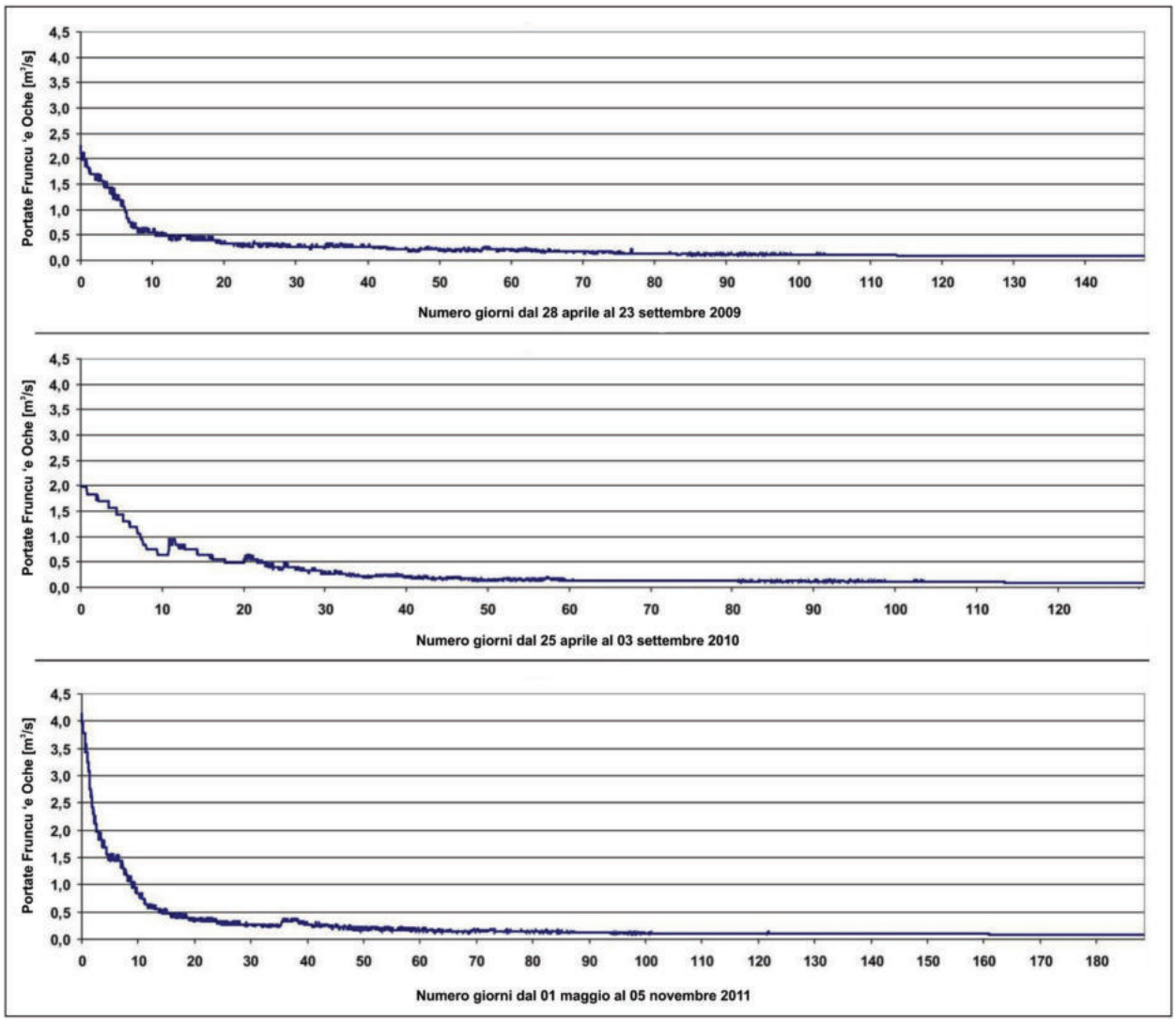

Figura 56: dimensionamento della riserva regolatrice della sorgente di Fruncu 'e Oche. Rappresentazione delle curve di esaurimento - *evaluation of regulating reserve of Fruncu 'e Oche spring. Representation of depletion curves*

Riportando i valori delle portate su un diagramma semilogaritmico si rilevano i valori dei tempi oltre i quali si riscontra un buon allineamento di punti di ognuna delle tre curve (Fig. 57). Proseguendo l'allineamento di punti delle diverse curve si ottengono le *best fitting* dei punti rappresentativi le portate delle sorgenti; tali rette, condotte sino ad intercettare l'asse delle portate, staccano su quest'asse i valori Q_0 delle portate iniziali dell'esaurimento. La stessa retta e lo stesso valore si ottengono analiticamente calcolando la curva d'esaurimento utilizzando la formula di Maillet.

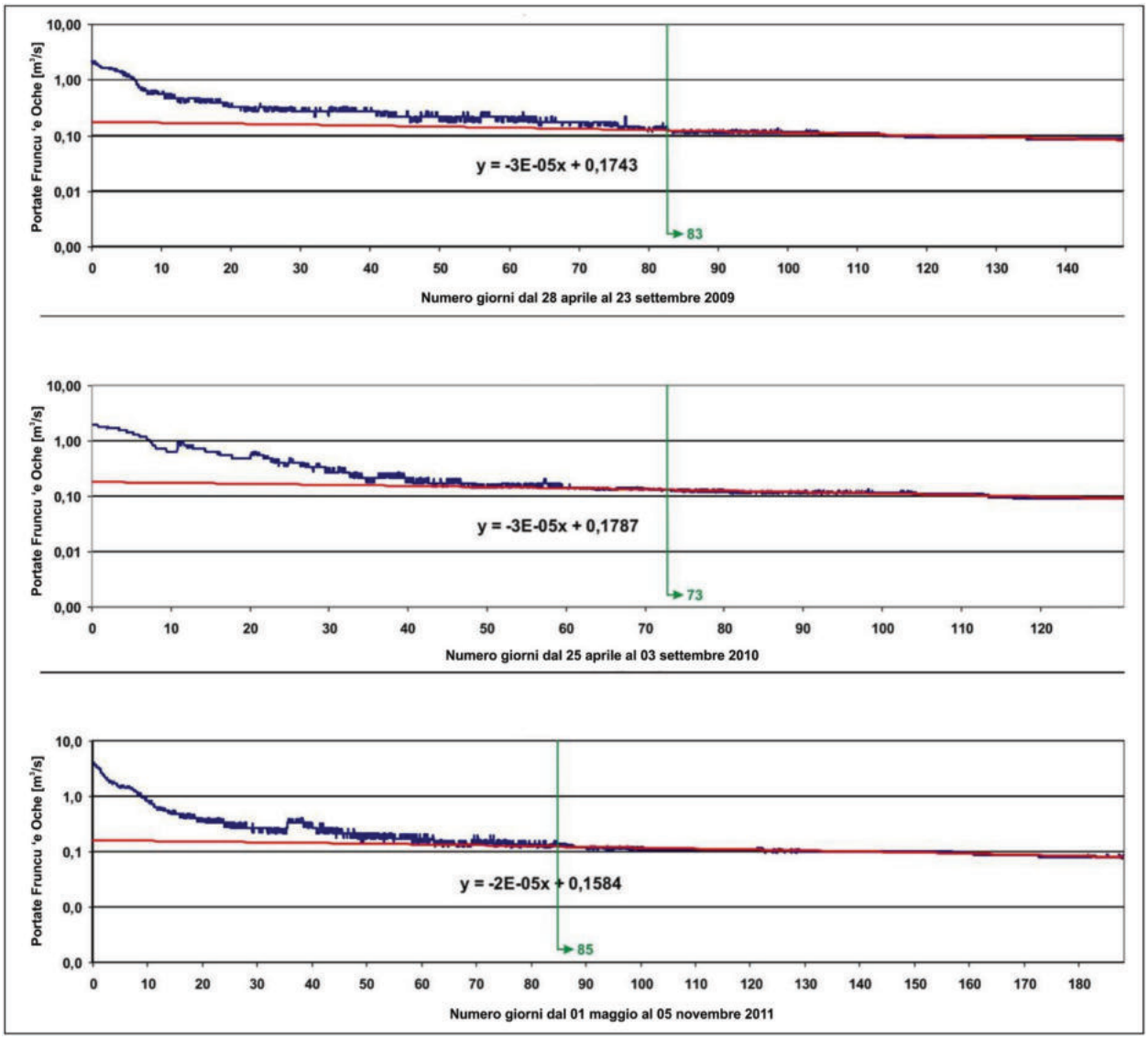

Figura 57: dimensionamento della riserva regolatrice della sorgente di Fruncu 'e Oche. Rappresentazione delle *best fitting* relative alle curve di esaurimento considerate ed analisi grafica dei valori Q_0 e t - *evaluation of regulating reserve of Fruncu 'e Oche spring. Representation of the best fitting whit respect to the examined depletion curves and graphical analysis of Q_0 and t values*

	2009	2010	2011	Medie
Q_0	0,174	0,179	0,158	0,170
Q_t	0,087	0,092	0,081	0,087
t	148	131	188	156
$logQ_0$	-0,759	-0,748	-0,800	-0,768
$logQ_t$	-1,060	-1,036	-1,092	-1,062
α	0,0047	0,0051	0,0036	0,0043

Tabella 6: parametri della formula di Maillet calcolati e medie dei loro valori - *calculated parameters of Maillet formula and average data*

Inserendo il valore Q_0 e quello della portata finale Q_t nella formula di Maillet:

$$Q_t = Q_0 \, e^{(-\alpha t)}$$

e applicando la formula:

$$\text{Log } Q_t = \text{Log } Q_0 - 0{,}4343\alpha t$$

è possibile calcolare i valori dei coefficienti di esaurimento α riferiti ad ogni singola curva e la loro media riportati nella tabella 6. Utilizzando tali coefficienti è quindi possibile quantificare la media del volume d'acqua W immagazzinato nel sistema carsico del Monte Albo soprastante la quota della sorgente di Fruncu 'e Oche all'inizio dell'esaurimento.

Dalla formula:

$$W = \int Q_r * e^{-\alpha t} \, dt$$

si ottiene:

$$W = Q_0 * 1/\alpha$$

$$W = 3{,}39 \times 10^6 \, m^3$$

che rappresenta la riserva regolatrice della sorgente di Fruncu 'e Oche. L'entità di questo volume, piuttosto ridotto se rapportato a quelli complessivi circolanti nel Monte Albo in un anno idrologico, è coerente con l'elevata trasmissività dell'acquifero e la scarsa potenzialità d'immagazzinamento che caratterizza le condotte carsiche localizzabili alle quote superiori a quella di sfioro della sorgente di Fruncu 'e Oche e poste a valle di grotta "Locoli". Tali caratteristiche confermano quanto già emerso dall'analisi dei dati relativi ai due tracciamenti effettuati nella Sala del Torrente il 28 giugno ed il 12 luglio del 2009.

Dimensionamento della riserva geologica

Dalle analisi svolte sul volume della riserva regolatrice e dalle evidenze sulla limitata capienza del carso saturo localizzabile nelle gallerie tra grotta "Locoli" e la sorgente di Fruncu 'e Oche è possibile dedurre che i volumi idrici della riserva geologica nell'acquifero del Monte Albo si concentrino prevalentemente nelle cavità profonde connesse alla grotta "Locoli": la compartimentazione dell'acquifero già emersa nel corso della precedente trattazione, infatti, implica l'esistenza di una soglia di permeabilità che separa le gallerie profonde allagate esplorate dagli speleosub dalle condotte che alimentano la sorgente di Fruncu 'e Oche (Fig. 58).

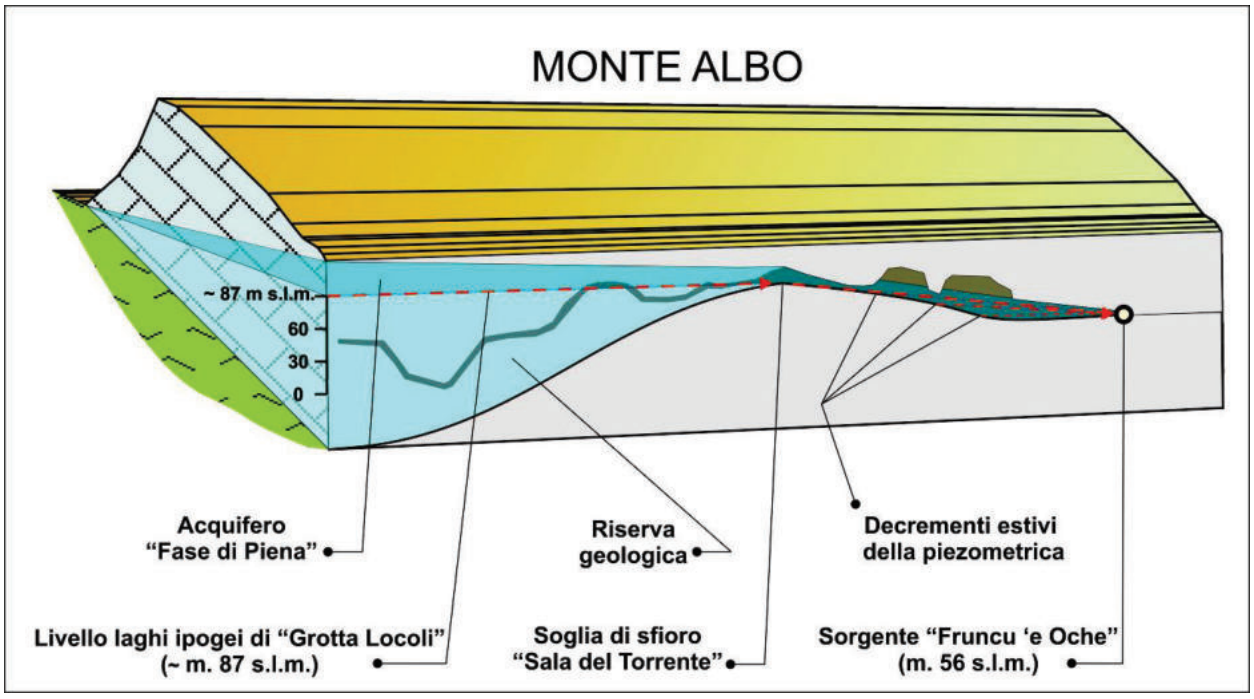

Figura 58: schema di funzionamento dell'acquifero carsico. Quadro di sintesi degli elementi rappresentativi dell'idrodinamica generale - *scheme of karst aquifer. Sketch of the general hydrodynamic representative elements*

In generale, il calcolo delle risorse idriche interessate da un tracciamento idrogeochimico può essere valutato considerando il valore di concentrazione media di un tracciante immesso nell'acquifero rilevato in sorgente. Applicando la formula:

$$W_{col} = P_{col} / C_m$$

dove:

W_{col} = volume acquifero colorato
P_{col} = peso del colorante immesso nell'acquifero
C_m = media delle concentrazioni rilevate in sorgente

è possibile valutare con buona approssimazione il volume della riserva geologica quando il colorante iniettato che transita nelle condotte carsiche si diluisce uniformemente in tutto l'acquifero senza dare luogo a fenomeni di accumulo all'interno dello stesso. Tali condizioni non sono riscontrabili nel sistema carsico del Monte Albo: com'è già stato dimostrato, infatti, i tracciamenti effettuati in periodo di magra hanno interessato principalmente le condotte profonde che fanno capo alla grotta "Locoli" mentre la porzione più settentrionale dell'acquifero è stata attraversata solo ciclicamente dal fluido colorato (Fig. 59), nei momenti in cui gli innalzamenti piezometrici connessi alle piene hanno causato consistenti travasi di acque residenti nelle condotte allagate sulle antistanti vie di deflusso che alimentano la sorgente di Fruncu 'e Oche.

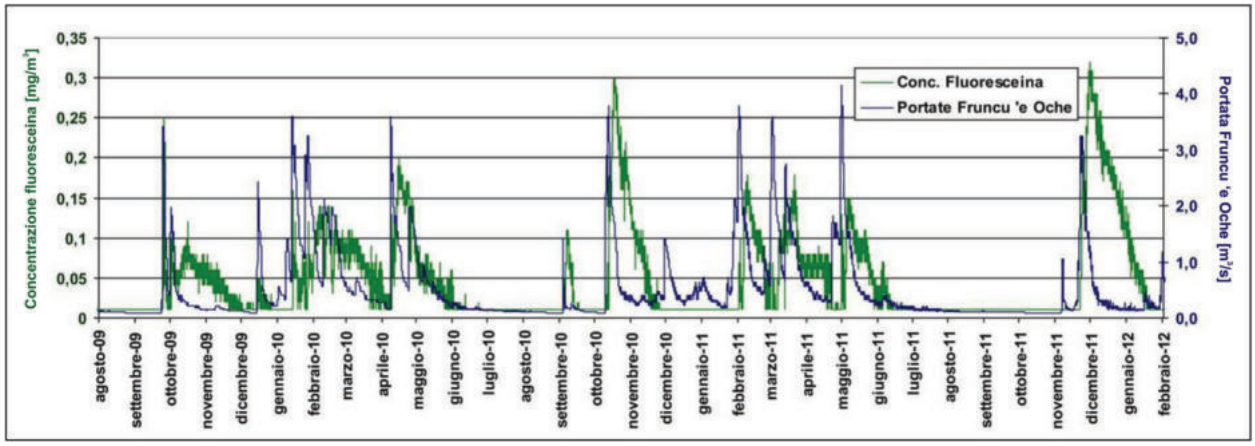

Figura 59: dimensionamento della riserva geologica. Quadro generale dei travasi dal carso saturo di grotta Locoli verso la sorgente di Fruncu 'e Oche in corrispondenza dei periodi in cui la fluoresceina transita in sorgente - *evaluation of geological reserve. The transfers from the saturated karst in the Locoli cave to the Fruncu 'e Oche spring as recorded by the dye tracer flow at the spring*

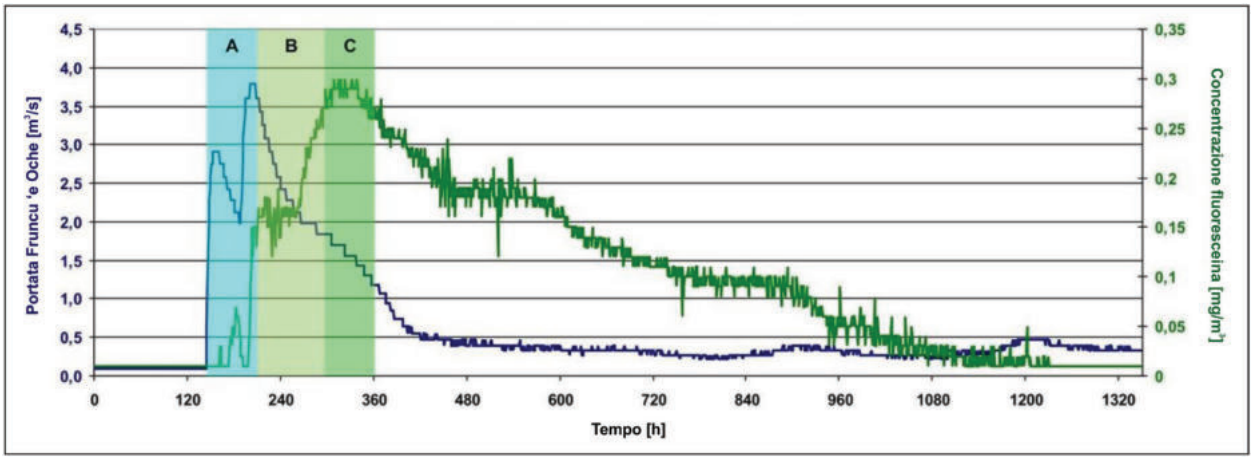

Figura 60: dimensionamento della riserva geologica. Le modalità del transito della fluoresceina in sorgente testimoniano che il colorante non si è distribuito in modo uniforme in tutto il carso saturo - *evaluation of the geological reserve. The transit of tracer in the spring show that the dye is not homogeneously distributed throughout the saturated karst*

Pertanto, i valori di concentrazione del tracciante misurati in sorgente possono essere considerati, in prima istanza, come il risultato di una miscelazione tra acque colorate residenti nella riserva geologica ed acque d'infiltrazione più recente. Analizzando il grafico di figura 60, e considerando i meccanismi idrodinamici che regolano le piene illustrati in precedenza, è possibile affermare che durante le fasi di rimonta delle piene (area A del grafico) la miscela delle acque emesse dalla sorgente di Fruncu 'e Oche sia costituita in prevalenza da acque di infiltrazione recente. Nei momenti culminali delle piene (area B del grafico), a cui corrispondono i minimi valori di concentrazione del tracciante registrati in sorgente, tale prevalenza pare essere assoluta. La concentrazione del tracciante nelle acque tende a crescere solo dopo le fasi culmi-

nali delle piene (area C del grafico), quando nei deflussi dalla sorgente risultano prevalere le acque colorate, "sollevate" durante la piena e gradualmente rilasciate verso Fruncu 'e Oche. A questa disomogeneità strutturale si accompagna l'effettiva impossibilità che il colorante possa essersi diffuso in tutto l'acquifero e in modo omogeneo; pertanto, le condizioni di applicazione della procedura analitica sopra esposta non sono applicabili al sistema carsico in studio. Tutto quanto sopra considerato, al fine di stimare la volumetria della riserva geologica dell'acquifero del Monte Albo è stata elaborata una procedura d'analisi basata su valutazioni di carattere geometrico che ha comportato il calcolo delle velocità di svuotamento in condizioni di deflusso laminare, della porzione di riserva regolatrice che fa capo al dominio idrogeologico di grotta "Locoli", i decrementi dei livelli piezometrici registrati nella stessa porzione d'acquifero ed i volumi dei deflussi connessi a tali decrementi. L'analisi prende spunto dal confronto tra i valori di portata riconducibili all'infiltrazione registrati tra aprile e settembre 2010, calcolati utilizzando la formula di Maillet, e gli abbassamenti del livello piezometrico registrati simultaneamente nel sifone S_1 di grotta "Locoli", indicativi delle variazioni di livello piezometrico nel carso saturo (Fig. 61). Dal grafico, risulta evidente come sussista una buona corrispondenza dei tempi tra gli incrementi di portata e gli innalzamenti piezometrici, quando il sistema carsico è in regime non laminare (settore A in figura).

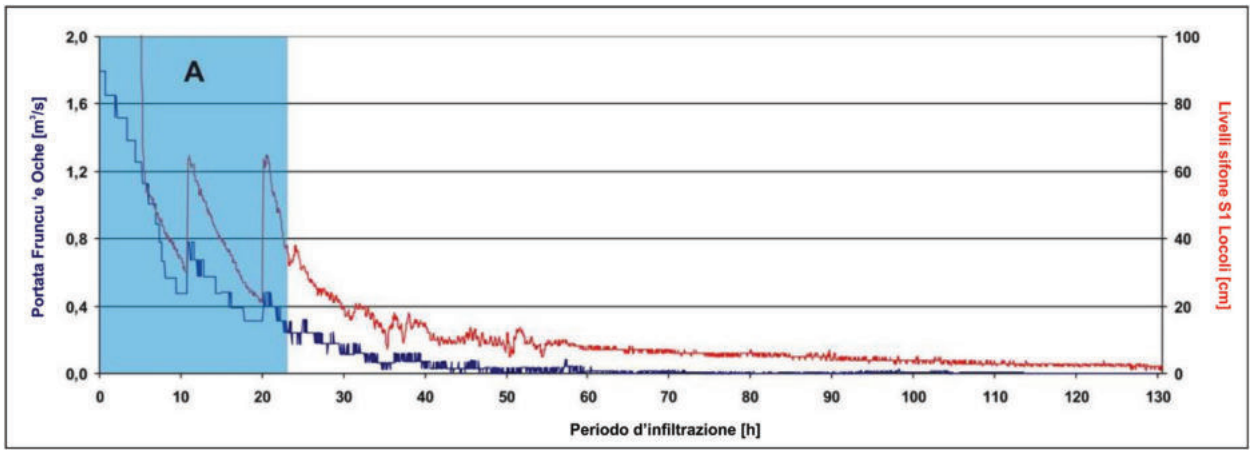

Figura 61: dimensionamento della riserva geologica. Dall'analisi grafica dei tempi relativi alle portate registrate presso la sorgente di Fruncu 'e Oche ed ai decrementi dei livelli idrici misurati nel sifone S_1 di grotta Locoli risulta che sussista una buona sincronia solamente nelle prime fasi di svuotamento (A) - *evaluation of the geological reserve. The water flows recorded in Fruncu 'e Oche spring and the water levels measured in the S_1 siphon of the Locoli cave evidence that there is a good synchrony only in the early phases of depletion (A)*

La stessa corrispondenza non si riscontra quando il regime idrodinamico nell'acquifero carsico diviene laminare: com'è evidente dal grafico di figura 33, e dall'associata analisi sulle velocità di arrivo del colorante nei due test di tracciamento eseguiti tra i mesi di giugno e luglio 2009, al subentro del regime laminare nell'acquifero consegue un rallentamento nella trasmissione dei deflussi dall'area di Locoli verso Fruncu 'e Oche; ciò comporta un ritardo tra i livelli piezometrici registrati nel sifone S_1 e le portate misurate in sorgente. Le differenti velocità calcolate sui tempi di arrivo dei tracciamenti sopra menzionati, rapportate ai valori di portata misurati nel medesimo tempo, consente di ottenere una funzione, lineare considerato il regime idrico laminare, che ci permette di valutare il ritardo tra la portata T_0 alla fine del periodo d'infiltrazione ed il corrispondente valore piezometrico registrato nell'acquifero. La tabella 7 contiene i dati relativi ad alcuni dei parametri sopra descritti.

Portata (m^3/s)	Velocità (m/s)	Ritardo (h)
0,217	0,407	321,9
0,135	0,352	372,3
0,092	0,323	405,5

Tabella 7: velocità e ritardi nell'acquifero carsico in regime laminare (misurati in nero, calcolati in rosso) - *speed and delays in laminar regime of karst aquifer (measured in black, calculated in red)*

Il grafico di figura 62 illustra la retta rappresentativa del decremento di velocità nell'acquifero in regime di deflusso laminare. Su tale retta è stato possibile determinare il valore della velocità di deflusso corrispondente alla portata di 0,092 m^3/s registrata al tempo T_0 di chiusura del periodo d'infiltrazione. Tale velocità, pari a 0,323 m/s, corrisponde ad un ritardo di circa 405 ore tra la misura dei livelli piezometrici e le portate registrate in sorgente. Questo dato consente di approssimare meglio la sincronizzazione tra le curve rappresentative dei livelli misurati al sifone S_1 di Locoli e delle portate d'infiltrazione calcolate con la formula di Mangin, come rappresentato nella successiva figura 63.

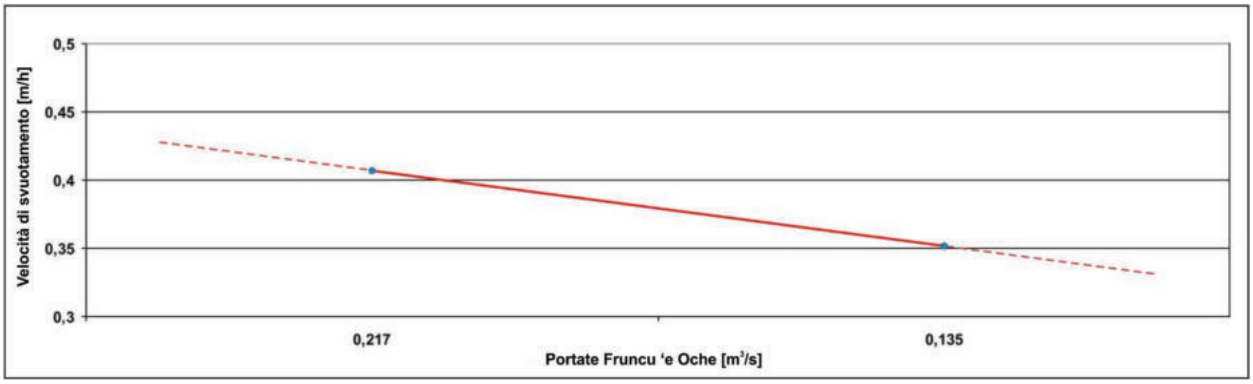

Figura 62: dimensionamento della riserva geologica. Analisi grafica della velocità di svuotamento del carso saturo di grotta Locoli - *evaluation of the geological reserve. Graphical analysis of the depletion speed of the saturated karst in Locoli cave*

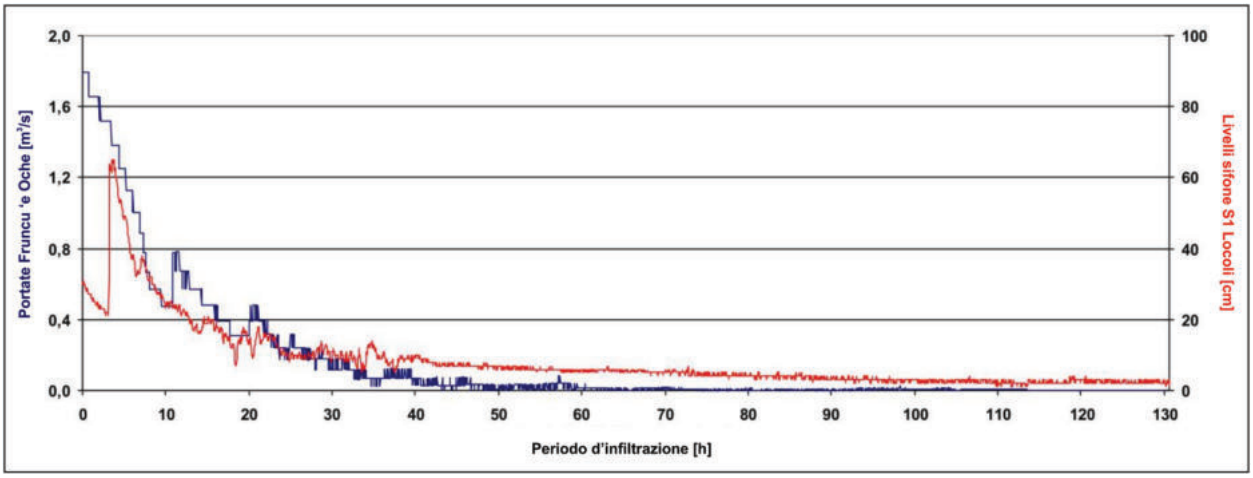

Figura 63: dimensionamento della riserva geologica. Rappresentazione grafica della sincronizzazione tra le portate della porzione finale della curva d'infiltrazione ed i concomitanti livelli idrici registrati nel sifone S_1 di grotta Locoli - *evaluation of the geological reserve. Graphical representation of the flow rates synchronization of the infiltration curve final portion and the concomitant water levels recorded in the S_1 siphon of Locoli cave*

Riportando il grafico su un diagramma semilogaritmico (Fig. 64), si osserva un buon allineamento dei valori di livello a partire dal 42° giorno dall'inizio dell'infiltrazione. La retta *best fitting* che rappresenta tale allineamento intercetta il tempo T_i dell'inizio dell'infiltrazione in corrispondenza di una quota piezometrica di poco inferiore ai 10 cm. Sommando i volumi d'infiltrazione emessi dalla sorgente di Fruncu 'e Oche per valori di livello piezometrico registrati nel sifone S_1 di grotta "Locoli" uguali o inferiori a 10 cm si perviene al volume d'acquifero dell'area d'infiltrazione che transita dalla sorgente di Fruncu 'e Oche in regime laminare; tale volume è valutabile in circa 217.800 m^3 che, rapportato ai circa 10 cm di depressione piezometrica considerata, corrisponde ad una superficie complessiva di gallerie drenanti di circa 2,17 Km^2.

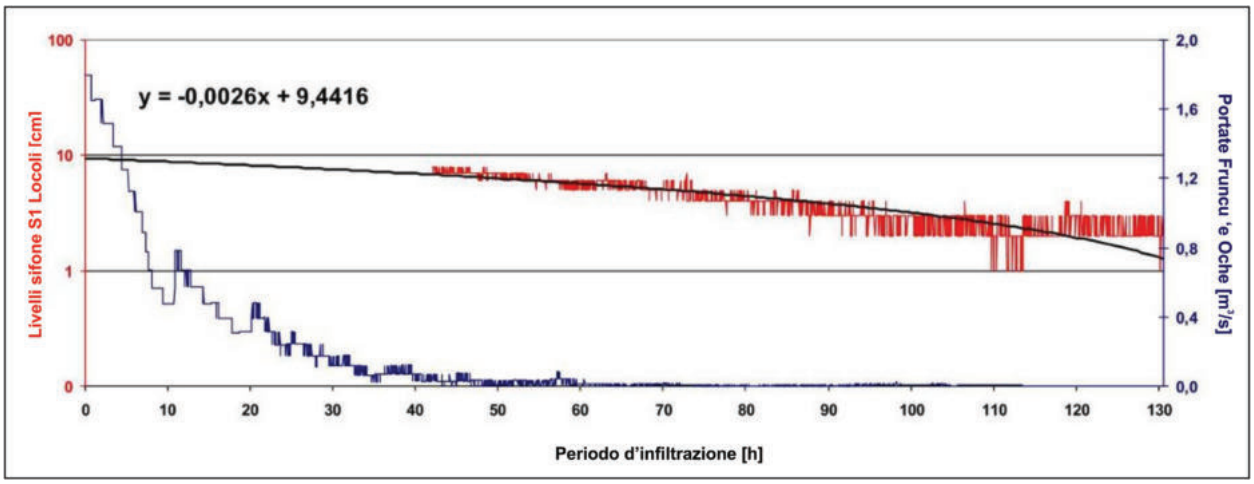

Figura 64: dimensionamento della riserva geologica. Retta *best fitting* relativa alla variazione dei livelli idrici registrati nel sifone S_1 di grotta Locoli nel periodo di svuotamento - *evaluation of the geological reserve. Best fitting of the water levels variation recorded in the S_1 siphon of Locoli cave during depletion phase*

Considerando l'omogeneità delle morfologie e le geometrie dei vuoti allagati osservate durante le numerose esplorazioni speleosubacquee, è possibile ipotizzare che la superficie drenante sopra calcolata rimanga costante sino ad una profondità di almeno 20 metri, sul totale degli oltre 90 sinora esplorati, dalla quota di 87 m s.l.m. che segna il livello di massima magra riscontrabile nel sifone S_1. Supponendo, quindi, che questa porzione d'acquifero contribuisca anche solo per la metà ai deflussi dalla sorgente di Fruncu 'e Oche, è possibile stimare che la riserva geologica stoccata nei primi 20 metri di gallerie allagate di grotta "Locoli" contenga un volume d'acqua di almeno 25 Mm^3 mentre quella complessiva di tutto l'acquifero potrebbe superare i 100 Mm^3. Queste valutazioni sono confortate anche dall'osservazione di come le piene immediatamente successive al periodo di massima magra si trasmettano e si distribuiscano all'interno dell'acquifero carsico. Tale osservazione si può dedurre dall'analisi dei grafici di figura 65, che mettono a confronto le portate della sorgente di Fruncu 'e Oche con le pluviometrie giornaliere ed i livelli idrici registrati nel sifone S_1 nel periodo dal 01 giugno al 31 dicembre 2010. Dal confronto dei grafici si osserva come le piene susseguitesi da ottobre a dicembre si manifestino nell'acquifero con picchi di portata e di incrementi piezometrici sincroni e ben definiti mentre alla prima piena successiva alla magra estiva, registrata all'inizio del mese di settembre a seguito di un'intensa precipitazione atmosferica verificatasi tra il giorno 2 ed il 3, ad un picco di portata di circa 1,42 m^3/s nella sorgente di Fruncu 'e Oche non corrisponde alcun significativo incremento piezometrico nelle gallerie allagate di grotta "Locoli". Il dettaglio dei decrementi piezometrici registrati nello stesso periodo, esposto nel grafico di figura 66, consente di meglio interpretare l'idrodinamica che ha interessato la medesima porzione d'acquifero durante la piena: nel grafico, infatti, è illustrata la retta che interpola i decrementi di livello idrico nel sifone S_1 che, in corrispondenza del picco di piena registrato a Fruncu 'e Oche, presenta una netta discontinuità ed un drastico cambio di pendenza. Questo andamento è correlabile ad un cambio di regime nell'idrodinamica sotterranea che, a seguito degli afflussi conseguenti l'input di precipitazione, passa da una fase di svuotamento finale dell'acquifero ad una di ricarica delle riserve e, immediatamente dopo, ad una nuova fase di esaurimento delle riserve accumulate.

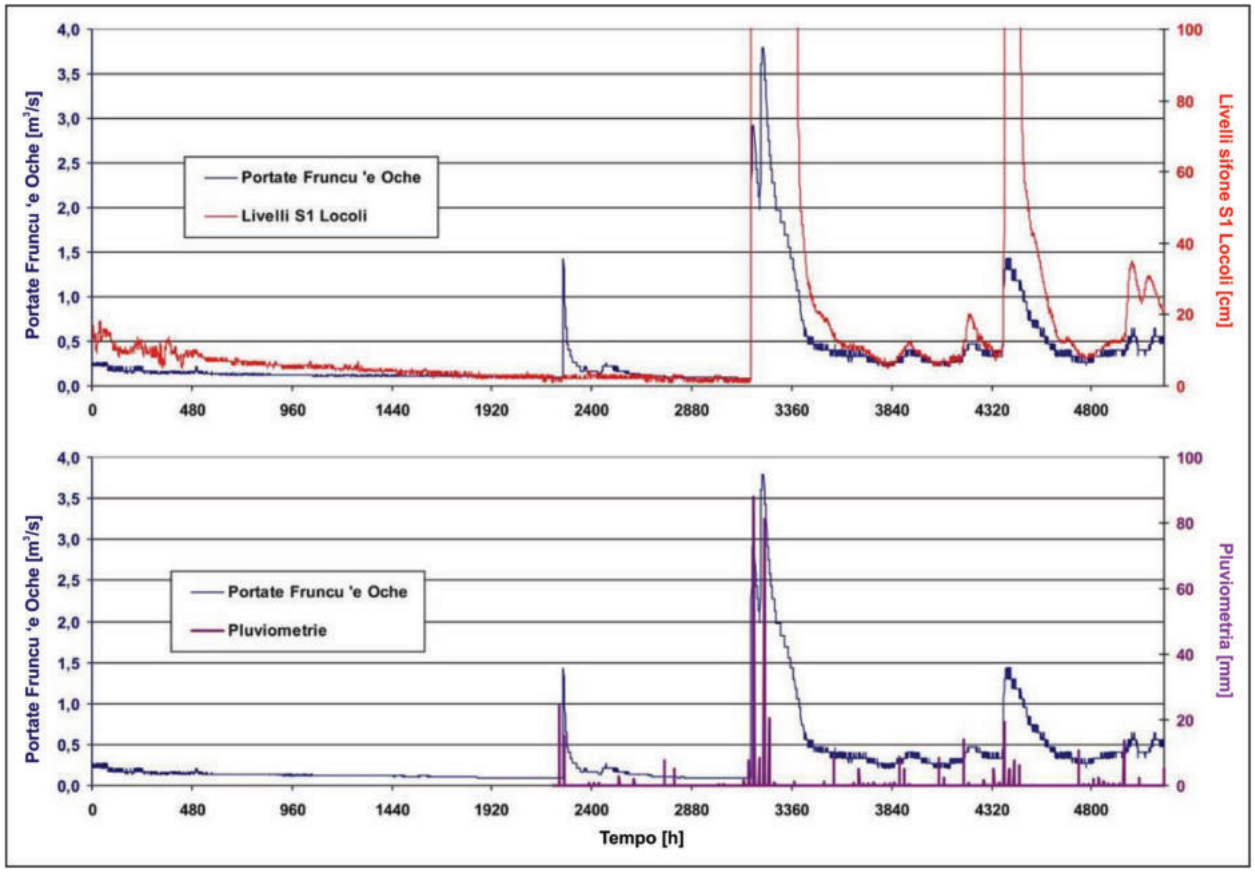

Figura 65: dimensionamento della riserva geologica. Analisi grafica delle portate relative alla piene successive alla fase di massima magra a confronto con i decrementi di livello idrico registrati nel sifone S_1 di grotta Locoli - *evaluation of the geological reserve. Graphical analysis of flows referring to the floods subsequent to the base level flow compared with the decrease of the water levels registered in the S_1 siphon at Locoli cave*

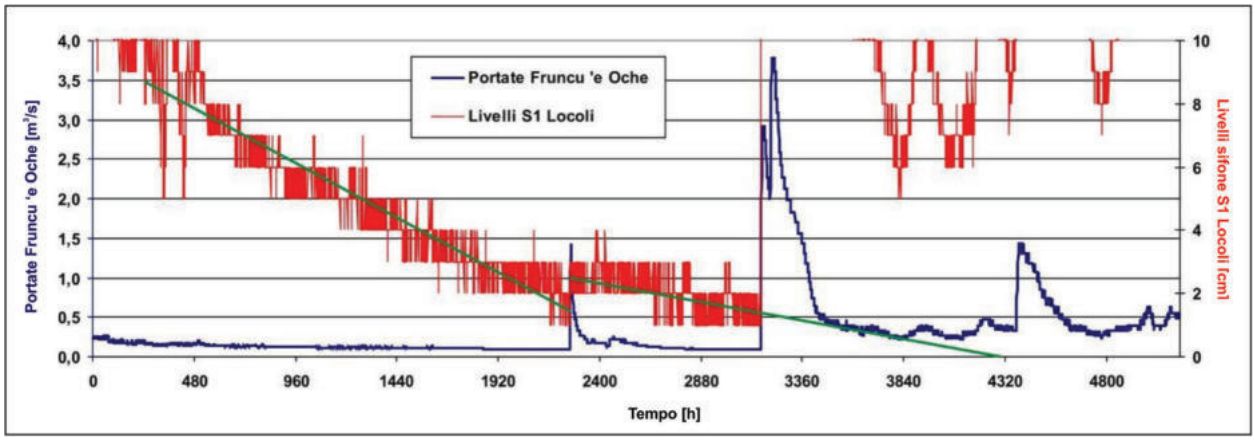

Figura 66: dimensionamento della riserva geologica. Dettaglio del confronto di figura 65 ed analisi grafica del cambio di pendenza dei decrementi di livello idrico registrati nel sifone S_1 di grotta Locoli concomitante con l'arrivo del primo episodio di piena successivo alla fase di massima magra - *evaluation of the geological reserve. Details of the comparison in Figure 65 and graphical analysis of the slope change in the water levels recorded in the S_1 siphon of the Locoli cave which is coincident with the arrival of the first flood after a base level flow period*

La tabella 8 di seguito esposta contiene alcuni dati di bilancio idrogeologico che si riferiscono alla piena verificatasi alla fine dell'estate del 2010.

Pluviometria (in mm)	40,2
Superficie bacino idrogeologico (in Km^2)	56,84
Afflussi complessivi nel bacino di riferimento (m^3)	2.284.968
Deflussi complessivi da Fruncu 'e Oche dal 03/09/10 al 09/10/10 (m^3)	496.085
Percentuale dei deflussi in rapporto agli afflussi complessivi	21,7%

Tabella 8: dati sperimentali di bilancio idrogeologico relativi alle precipitazioni del 2 e 3 settembre 2010 - *experimental data for the hydrogeological balance for the rainfall of 2 and 3 September 2010*

In relazione al dato pluviometrico, si è scelto di rapportare l'analisi ai soli 40,2 mm registrati nel corso dell'intenso evento d'inizio settembre anziché ai complessivi 60,4 mm di pioggia caduti dal 03/09/10 al 09/10/10, ovvero nell'intero periodo di esaurimento considerato per la valutazione dei deflussi. Nonostante la sovrastima che tale scelta comporta sul valore percentuale dei deflussi in rapporto agli afflussi complessivi, la stessa percentuale, pari al 21,7 %, risulta assai minore rispetto a quella, prossima al 50%, già calcolata in relazione ad un intero anno idrogeologico. La differenza tra queste due percentuali è imputabile principalmente alla maggior incidenza dell'evapotraspirazione durante l'estate sui parametri di bilancio. Una quota della stessa differenza, certamente rilevante ma non meglio definibile con i dati sinora a disposizione, è comunque da attribuire alla capacità di immagazzinamento del sistema carsico ipogeo che, limitatamente alla fase di massima magra, ha la possibilità di accumulare alcune centinaia di migliaia di metri cubi di risorsa idrica distribuendoli in pochi centimetri di spessore d'acquifero.

Caratterizzazione generale dell'acquifero del Monte Albo

Lo schema idrogeologico di figura 67 sintetizza alcune delle evidenze emerse in questo studio: l'acquifero del Monte Albo è alimentato da una rete diffusa di infiltrazione superficiale costituita da fratture elaborate dal carsismo e da apparati localizzati d'infiltrazione, come l'inghiottitoio di Bonaetè che drena rapidamente le acque di piena verso la sorgente di Fruncu 'e Oche, e gli inghiottitoi di Nuscalè e Su Bufalu che immettono nell'acquifero profondo le acque catturate sul reticolo idrografico superficiale prima che le stesse vadano ad alimentare le porzioni terminali delle vie di drenaggio sotterranee.

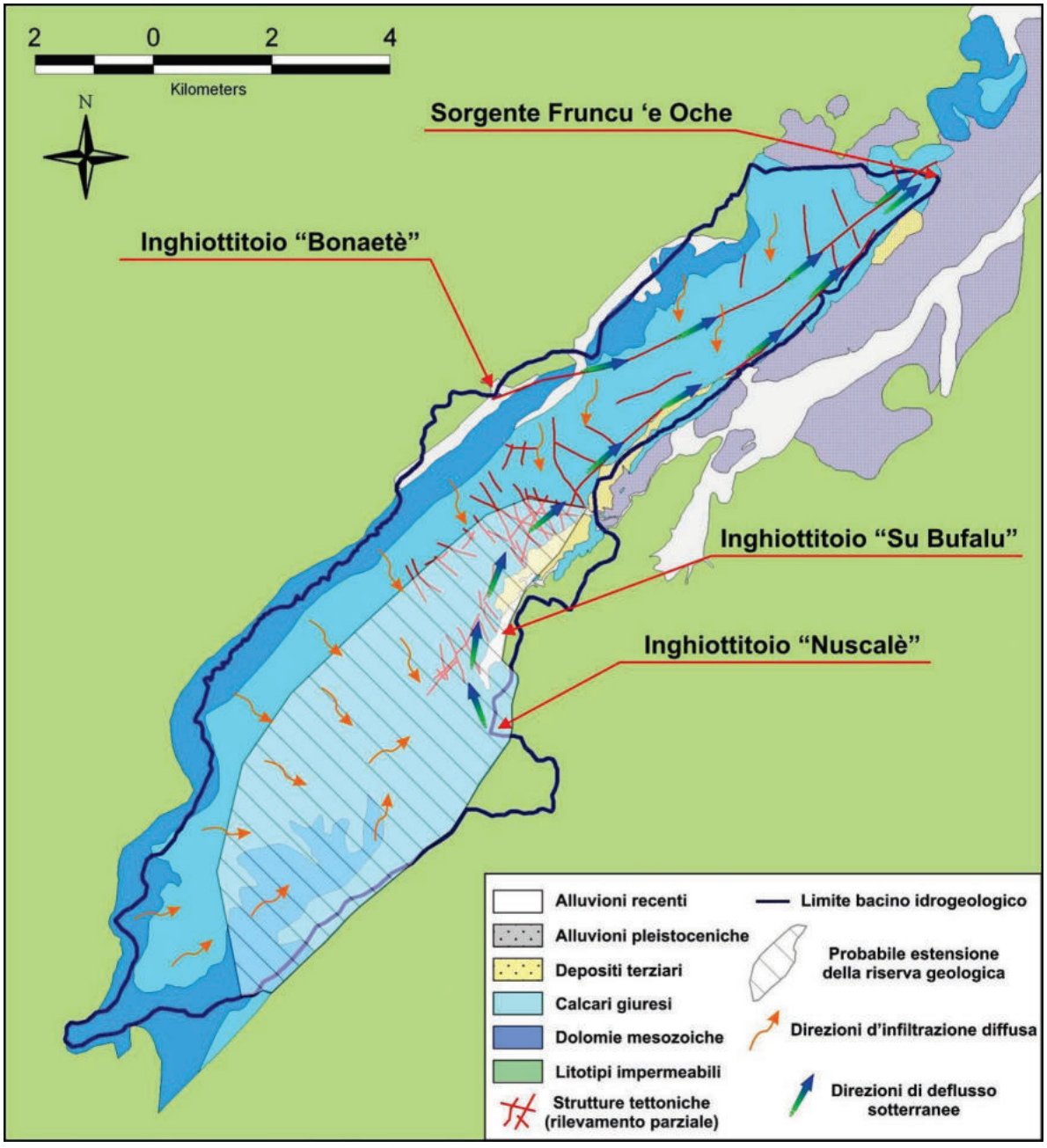

Figura 67: schema idrogeologico di sintesi dell'area del Monte Albo (Base cartografica: Provincia di Nuoro) - *hydrogeologic sketch of Monte Albo area (cartographic base: Provence of Nuoro)*

Alla luce dei dati di bilancio idrogeologico si può affermare che gli apparati carsici superficiali deputati all'infiltrazione siano tanto efficaci da assumere nell'acquifero, annualmente, quasi il 50% delle precipitazioni che interessano il bacino idrogeologico della sorgente di Fruncu 'e Oche. Le analisi sull'idrodinamica sotterranea hanno evidenziato che, in fase di piena, i circuiti idrici sotterranei del Monte Albo sono in grado di smaltire gli afflussi di acque di infiltrazione recente in tempi rapidissimi mentre nelle fasi di morbida e di magra, gli stessi circuiti risentano di una loro forte compartimentazione che ha come effetto una marcata laminazione della riserva regolatrice stoccata nell'acquifero, valutata in circa 3,39 Mm^3, e la regolazione delle portate di esaurimento della sorgente di Fruncu 'e Oche. Lo schema rappresentato nella figura 68 illustra il dettaglio dell'ipotesi di compartimentazione sopra citata: in base a tale ipotesi, la porzione meridionale dell'acquifero che fa capo alle gallerie sommerse di grotta "Locoli" risulta caratterizzata da un'estesa rete di condotte carsiche sommerse sede di una riserva geologica di dimensioni imponenti, valutata in circa 25 Mm^3 nei suoi primi 20 metri di spessore e stimabile in oltre 100 Mm^3 nel suo complesso. La porzione più settentrionale dell'acquifero, invece, è caratterizzata dalla presenza di condotte drenanti che mettono in comunicazione, attraverso uno sfioratore sotterraneo, l'acquifero localizzato nelle gallerie di grotta "Locoli" con la sorgente di Fruncu 'e Oche.

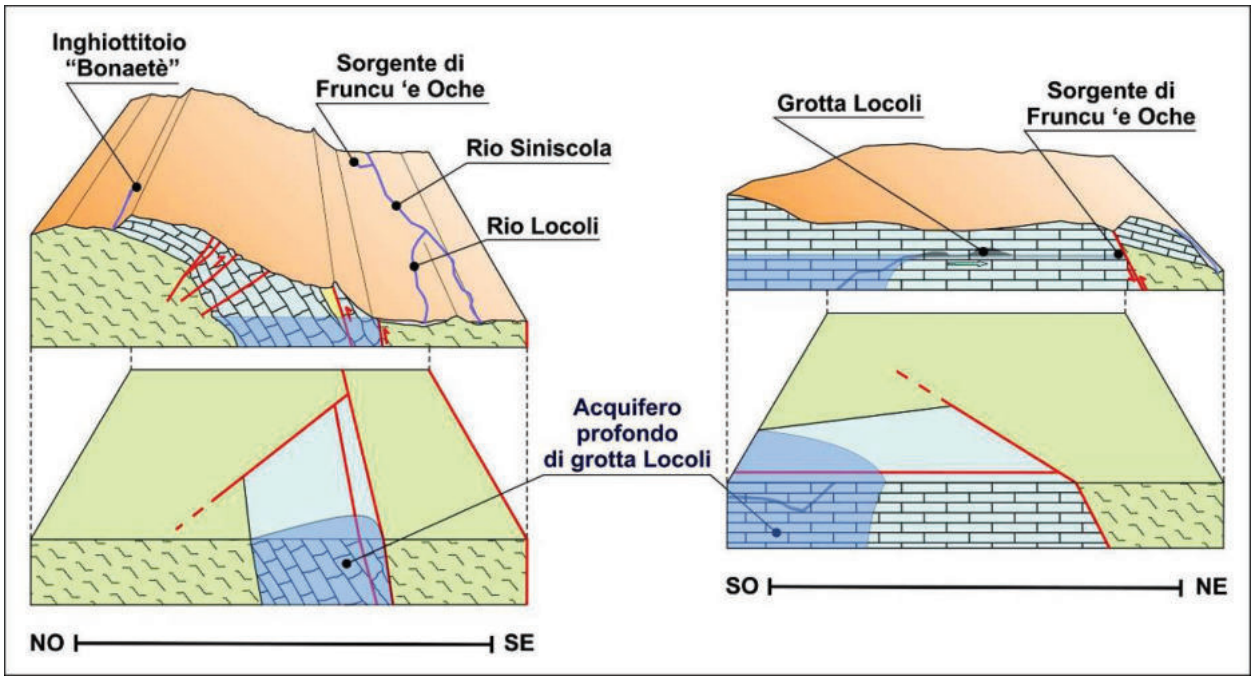

Figura 68: schema generale dei rapporti tra acquifero carsico ed assetto geologico strutturale nell'area del Monte Albo - *general sketch of the connection between karst aquifer and geologic structure in the Monte Albo area*

Implicazioni sulla pianificazione territoriale locale

Le novità emerse nel corso di questo studio consentono di analizzare le possibili applicazioni dei risultati conseguiti in relazione al miglioramento dell'approvvigionamento idropotabile nella costa nord orientale della Sardegna e, in particolare, nel territorio baroniese. Per affrontare in maniera efficace questo approfondimento è necessario, dapprima, definire le problematiche territoriali a cui sarà possibile dare risposte attraverso una valorizzazione ottimale delle riserve idriche individuate nell'acquifero del Monte Albo. Tali risposte, in ogni caso, dovranno essere assolutamente compatibili con le prioritarie esigenze di tutela e di salvaguardia dei delicati e complessi equilibri ecologici ed idrogeologici che caratterizzano ogni area carsica.

La fascia costiera della Provincia di Nuoro è l'area che, in controtendenza rispetto al resto del territorio provinciale, ha mantenuto negli ultimi decenni un trend demografico positivo a seguito delle opportunità economiche connesse soprattutto allo sviluppo del settore turistico. La conseguente crescita del fabbisogno idropotabile è stata supportata solo in parte da un adeguato potenziamento delle infrastrutture idriche, che ha riguardato principalmente la realizzazione di alcuni bacini artificiali quali quelli sul Rio Posada e sul fiume Cedrino. Gli invasi realizzati, pur corrispondendo alle esigenze territoriali relative alla quantità di risorsa disponibile, non hanno dato risposte adeguate in relazione alla qualità dell'acqua immessa in rete ed all'economicità del servizio offerto all'utenza; le tariffe del servizio idrico, infatti, risentono fortemente dei costi necessari per la potabilizzazione delle acque stoccate nei bacini superficiali che, nel territorio nuorese, risultano particolarmente impattate dai reflui urbani malamente trattati all'origine. Questa problematica, pur generale, raggiunge la criticità massima nel lago di Preda 'e Othoni che invasa le acque del fiume Cedrino; in questo bacino, in particolare nel periodo estivo, le quantità di nutrienti nell'acqua raggiungono livelli tali da rendere il lago ipertrofico (PADEDDA & SECHI, 2008). Negli ultimi anni, e a più riprese, tale condizione ha favorito la produzione di specie algali tossiche difficilmente trattabili anche con i sistemi di potabilizzazione più spinti ed onerosi, creando seri problemi di approvvigionamento idrico sia alle popolazioni residenti nella bassa valle del Cedrino che all'intera economia dell'area.

Considerate le problematiche sopra citate, quindi, la possibilità di ottimizzare l'utilizzo degli acquiferi carsici assume un ruolo strategico nel contesto dello sviluppo territoriale locale.

Elementi d'analisi territoriale connessi alla valorizzazione dell'acquifero del Monte Albo

Nel 2009, a seguito dei primi positivi risultati emersi nel corso dello studio idrogeologico sull'acquifero del Monte Albo ed al fine di sollecitare i competenti uffici regionali a considerare opportunamente tali risultati, la Provincia di Nuoro ha trasmesso alla Regione Sardegna una dettagliata relazione tecnica sullo stato d'avanzamento dello studio. Questa comunicazione è avvenuta nell'ambito delle osservazioni al redigendo Piano di Distretto Idrografico della Sardegna. La Regione ha risposto positivamente alle osservazioni trasmesse, recependo le stesse e comunicando che le nuove conoscenze sul bacino di alimentazione della sorgente carsica di Fruncu'e Oche sarebbero state tenute nel debito conto nelle fasi revisionali del Nuovo Piano Regolatore Generale degli Acquedotti. Nella stessa risposta, la Regione Sardegna ha invitato la Provincia di Nuoro a completare lo studio in corso con le necessarie analisi sul bilancio idrico dell'acquifero carsico del Monte Albo, sollecitazione a cui si è data risposta nei contenuti della presente pubblicazione.

Per fornire ulteriori elementi d'analisi utili ad una futura ed auspicabile valorizzazione dell'acquifero carsico, è stato effettuato un approfondimento sui possibili fruitori delle risorse idriche in esame prendendo come base i dati contenuti nel Nuovo Piano Regolatore Generale degli Acquedotti, lo strumento di pianificazione che, dal 2006, regola la fornitura delle risorse idropotabili in Sardegna. L'area sulla quale verte l'approfondimento di pianificazione territoriale comprende 10 comuni localizzati nella costa nord orientale della Sardegna ovvero Budoni, Galtellì, Irgoli, Loculi, Onifai, Orosei, Posada, Siniscola, S. Teodoro, Torpè, che rientrano negli schemi 8 Siniscola e 10 Cedrino dell'NPRGA. I dati territoriali relativi a questi comuni sono stati aggregati in due diversi scenari in relazione alle infrastrutture di distribuzione idrica attualmente esistenti e a due differenti direttrici di adduzione aventi entrambe come origine la captazione acquedottistica nella sorgente di Fruncu 'e Oche (Fig. 69).

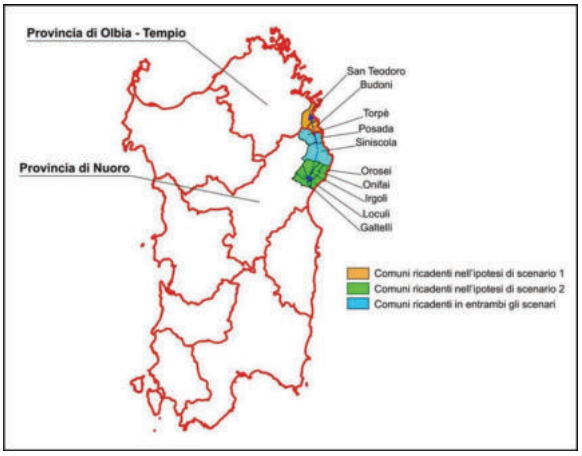

Figura 69: ipotesi sui possibili scenari territoriali per il futuro approvvigionamento idrico dei comuni costieri della Provincia di Nuoro - *hypotheses about the possible territorial scenarios for the future water supply of coastal municipalities in the Nuoro Province*

Nelle tabelle 9 e 10 sono riportati i dati territoriali relativi alle previsioni dell'NPRGA per i due scenari considerati stimate al 2041.

SCENARIO 1				
Comune	**Abitanti**		**Dotazione (l/ab./g)**	**Fabbisogno (l/s)**
Budoni	Residenti	6.073	350	24,60
	Stagionali	34.845	460	185,52
	Porto			4,00
	Totale	**40.918**		**214,12**
Posada	Residenti	3.272	350	13,25
	Stagionali	11.965	460	63,70
	Totale	**15.237**		**76,96**
Siniscola	Residenti	14.882	350	60,29
	Stagionali	19.747	460	105,13
	Porto			4,00
	Totale	**34.629**		**169,42**
S. Teodoro	Residenti	5.761	350	23,34
	Stagionali	46.336	460	246,70
	Porto			4,00
	Totale	**52.097**		**274,03**
Torpè	Residenti	3.034	350	12,29
	Stagionali	1.893	460	10,08
	Totale	**4.927**		**22,37**
Totale utenze residenti		**33.022**	**Fabbisogno residenti (l/s)**	**145,77**
Totale utenze stagionali		**114.786**	**Fabbisogno stagionali (l/s)**	**611,13**
Totale presenze di punta		**147.808**	**Fabbisogno di punta (l/s)**	**756,90**
			Volumi necessari (Ottobre - Giugno) (Mm^3)	**4,60**
			Volumi necessari (Luglio - Settembre) (Mm^3)	**5,97**

Tabella 9: previsioni al 2041 del Nuovo Piano Regolatore Regionale degli Acquedotti (NPRGA) per il fabbisogno di acqua potabile nei comuni compresi nello scenario 1 - *data of the general aqueducts plan provisions estimated at 2041 for the towns of scenario 1*

SCENARIO 2				
Comune	**Abitanti**		**Dotazione (l/ab./di)**	**Fabbisogno (l/s)**
Galtellì	Residenti	3.194	350	12,94
	Stagionali	1.536	460	8,18
	Totale	**4.730**		**21,12**
Irgoli	Residenti	3.079	350	12,47
	Stagionali	915	460	4,87
	Totale	**3.994**		**17,34**
Loculi	Residenti	654	350	2,65
	Stagionali	-	460	0,00
	Totale	**654**		**2,65**
Onifai	Residenti	906	350	3,67
	Stagionali	-	460	0,00
	Totale	**906**		**3,67**
Orosei	Residenti	8.284	400	38,35
	Stagionali	17.088	460	90,98
	Totale	**25.372**		**129,33**
Posada	Residenti	3.272	350	13,25
	Stagionali	11.965	460	63,70
	Totale	**15.237**		**76,96**
Siniscola	Residenti	14.882	350	60,29
	Stagionali	19.747	460	105,13
	Porto			4,00
	Totale	**34.629**		**169,42**
Torpè	Residenti	3.034	350	12,29
	Stagionali	1.893	460	10,08
	Totale	**4.927**		**22,37**
Totale utenze residenti		**37.305**	**Fabbisogno residenti (l/s)**	**159,91**
Totale utenze stagionali		**53.144**	**Fabbisogno stagionali (l/s)**	**282,94**
Totale presenze di punta		**90.449**	**Fabbisogno di punta (l/s)**	**442,86**
			Volumi necessari (Ottobre - Giugno) (Mm^3)	**5,04**
			Volumi necessari (Luglio - Settembre) (Mm^3)	**3,49**

Tabella 10: previsioni al 2041 del Nuovo Piano Regolatore Regionale degli Acquedotti (NPRGA) per il fabbisogno di acqua potabile nei comuni compresi nello scenario 2 - *data of the general aqueducts plan provisions estimated at 2041 for the towns of scenario 2*

In entrambi gli scenari territoriali considerati, i valori dei fabbisogni residenziali e dei volumi idrici necessari a coprire le necessità idropotabili nel periodo che intercorre tra il mese di ottobre e quello di giugno sono compatibili con il normale regime dei deflussi della sorgente di Fruncu 'e Oche. Più complesso è il discorso che riguarda il periodo che va dal mese di luglio a quello di settembre quando, per soddisfare le esigenze idropotabili delle due aggregazioni territoriali considerate, ai deficit di deflusso che si manifestano in sorgente si renderebbe necessario sopperire con l'emungimento artificiale dell'intera riserva regolatrice e di porzioni variabili di quella geologica in funzione dello scenario valutato. Considerando che all'inizio del mese di luglio la riserva regolatrice residua è stimabile in circa 2,54 Mm^3, a fronte dei 3,39 Mm^3 dell'inizio dello svuotamento, che la riserva geologica è stimata in circa 25 Mm^3 e che il volume della stessa riserva è stimata in 217.800 m^3 per ogni 10 cm di acquifero, è possibile valutare i volumi idrici che sarà necessario prelevare dalla riserva geologica in relazione ai diversi scenari considerati, le relative percentuali sul totale della risorsa e le massime depressioni dell'acquifero attese. Nell'ipotesi che sia la riserva regolatrice sia quella geologica siano localizzabili principalmente nel carso saturo di grotta "Locoli", quelli che seguono in tabella 11 sono i dati relativi agli emungimenti necessari dall'acquifero del Monte Albo. Nella tabella 12, invece, si riportano i dati di deflusso dall'acquifero carsico calcolati in funzione delle diverse condizioni di afflusso ipotizzabili nel bacino idrogeologico di riferimento.

Periodo luglio - settembre	Volumi necessari complessivi (Mm^3)	Volumi necessari da riserva geologica (Mm^3)	% di riserva geologica da edurre sul volume totale	Depressione massima attesa (m)
SCENARIO 1	5,97	3,42	13,69%	1,56
SCENARIO 2	3,49	0,95	3,78%	2,74

Tabella 11: volumi di attingimento dalla riserva geologica, loro percentuali sul totale della riserva e relative depressioni piezometriche attese - *water withdrawal volumes from geological reserve, their percentages to this reserve and supposed groundwater depression*

Pluviometria Monte Albo (mm)	1.113	900	800	700	600	500
Afflussi complessivi (Mm^3)	63,26	51,16	45,47	39,79	34,10	28,42
Deflussi da Fruncu 'e Oche (Mm^3)	18,94	15,31	13,61	11,91	10,21	8,51
Deflussi sul Rio Locoli (Mm^3)	12,11	9,79	8,71	7,62	6,53	5,44
Deflussi totali dall'acquifero (Mm^3)	31,05	25,10	22,32	19,53	16,74	13,95

Tabella 12: dati di deflusso dall'acquifero carsico calcolati in funzione delle diverse condizioni di afflusso ipotizzabili nel bacino idrogeologico - *discharges karst aquifer as a function of the difference supposed inflow conditions*

I volumi di prelievo dall'acquifero carsico prevedibili, pari a 10,57 Mm^3 annui nell'ipotesi di "Scenario 1" e di 8,53 Mm^3 annui in quella di "Scenario 2", risultano quindi sostenibili con i parametri di bilancio idrologico anche nel caso in cui le pluviometrie nel bacino idrogeologico del Monte Albo siano limitate a soli 500 mm annui, ovvero inferiori di oltre il 50% rispetto a quelle misurate nell'anno idrologico 2010-2011. La stessa sostenibilità non è ugualmente assicurata considerando la necessità di salvaguardare le peculiarità ambientali del sistema carsico ipogeo del Monte Albo. Limitatamente al caso in cui si adottino le scelte previste nello scenario 1, e in condizioni di deficit d'afflusso, è possibile che le piene invernali vadano a ripristinare esclusivamente i volumi idrici del carso saturo prelevati durante l'estate, annullando la possibilità che le acque di piena possano risalire ed invadere le porzioni più elevate di grotta "Locoli"; ciò impedirebbe il ricambio idrico nei piccoli ristagni che inframmezzano la cavità carsica e potrebbe indurre squilibri in quella porzione dell'ecosistema ipogeo. La Provincia di Nuoro, proprio al fine di poter valutare compiutamente queste potenziali situazioni di rischio ambientale, ha già indetto un bando per l'acquisizione di uno studio biologico sulle faune ipogee presenti nell'acquifero carsico del Monte Albo utilizzando i finanziamenti previsti dalla L.R. 4/2007 sulla tutela e la valorizzazione del patrimonio carsico regionale.

Valorizzazione dell'acquifero: le soluzioni tecniche allo studio

Per dar seguito ad un'ottimale valorizzazione dell'acquifero carsico del Monte Albo, nel 2010 la Provincia di Nuoro ha acquisito uno studio di fattibilità per la realizzazione di un impianto di captazione pilota nella valle di Locoli finalizzato alla valutazione dei prelievi idrici sostenibili e modulabili dall'acquifero carsico. In questo studio sono stati esaminati gli aspetti tecnici per il dimensionamento e l'ubicazione dell'impianto nonché gli investimenti finanziari necessari per la realizzazione della captazione pilota e per l'esecuzione delle prove di portata previste. L'analisi delle variazioni di livello piezometrico che si registreranno nell'acquifero a seguito degli emungimenti effettuati consentirà di accertare la funzionalità tecnica del punto di attingimento previsto nello studio di fattibilità, di verificare i valori delle depressioni attese e di definire le scelte tecniche più efficaci ed economiche per potenziare la captazione acquedottistica. Riguardo quest'ultimo aspetto, tra le soluzioni possibili c'è quella di realizzare un by pass che consenta di superare la soglia di permeabilità individuata nelle condotte

carsiche ipogee, prelevando la risorsa idrica necessaria nel carso saturo con un impianto di eduzione e reimmettendo la stessa risorsa nelle condotte di deflusso naturali a valle della soglia di permeabilità. Una seconda soluzione prevede la realizzazione di un sistema sifonante da allestire direttamente nella Sala del Torrente di grotta "Locoli" che consenta di drenare il carso saturo al di sotto della naturale quota di sfioro; quest'ultima soluzione, la cui gestione a regime potrebbe risultare molto più economica rispetto alla prima, imporrebbe un utilizzo assai ridotto della riserva geologica e limiterebbe la possibilità di modulare le portate indotte verso la captazione acquedottistica di Fruncu 'e Oche. Per la realizzazione della captazione pilota, la Provincia di Nuoro ha già provveduto a richiedere i finanziamenti necessari ai competenti uffici della Regione Sardegna.

Implicazioni sulla gestione delle riserve idriche strategiche nelle aree mediterranee

I rapporti delle principali agenzie europee che trattano dei fabbisogni idropotabili stimano che oltre 30 milioni di persone residenti nei territori che si affacciano sul Mediterraneo non hanno accesso all'acqua potabile. Gli stessi documenti, inoltre, pongono sempre più spesso l'accento sui rischi crescenti a cui sono esposti gli approvvigionamenti idrici nell'area mediterranea a causa dei fenomeni connessi ai cambiamenti climatici. In particolare, la concentrazione delle precipitazioni in occasione di sporadici eventi alluvionali è considerata come un fattore che incide assai negativamente su una sufficiente ed omogenea disponibilità di risorsa nel corso dell'anno.

Più di vent'anni fa, le valutazioni sulle risorse idriche condotte dall'Unesco e dalla Fao nell'area mediterranea già stimavano che circa due terzi dell'acqua potabile provenissero da pozzi di pianura ed un terzo dalle montagne calcaree (FORTI, 1998). Le stesse valutazioni prevedevano che nel 2025, a causa dell'inquinamento delle falde alluvionali dovuto alla crescente antropizzazione delle pianure, quel rapporto si sarebbe invertito. Le stime di importanti istituzioni internazionali come Unisco e Fao, quindi, attribuiscono già da tempo un ruolo strategico alle risorse idriche degli acquiferi carsici, un ruolo che, anche nella prospettiva dei più recenti ed infausti scenari, è quanto mai opportuno definire negli aspetti teorici ed operativi. In tal senso, l'efficienza degli apparati infiltrativi dei calcari, capaci di trasferire nelle condotte carsiche ipogee anche oltre il 50% delle precipitazioni che cadono nei bacini idrogeologici, è una prima considerazione di grande rilevanza: infatti, i valori del coefficiente d'infiltrazione nei calcari carsificati, assai superiori agli stessi coefficienti che generalmente caratterizzano gli altri litotipi, attribuiscono agli acquiferi carbonatici una grande potenzialità di ricarica. Nei calcari, quindi, le risorse stoccate nelle riserve geologiche eventualmente sottoposte ad emungimento potrebbero essere facilmente ripristinate anche nel corso di quegli eventi alluvionali che sembrano caratterizzare sempre più il clima mediterraneo. Il condizionale, in questo caso, è d'obbligo e le captazioni che dovessero attestarsi nel carso saturo, comunque, dovranno essere preventivamente dimensionate in funzione dei parametri di bilancio idrologico definiti per ogni singolo acquifero.

Un altro aspetto particolarmente rilevante che potrebbe mitigare il minaccioso scenario che si prospetta sul Mediterraneo è quello che riguarda la concreta possibilità di individuare, nei contesti carsici, riserve geologiche di dimensioni imponenti. Questa

possibilità emerge con forza anche nei contenuti di questa pubblicazione, nella quale l'evoluzione morfogenetica connessa alla "Crisi Messiniana" è individuata come uno dei fattori che potrebbero aver agevolato la costituzione dell'imponente riserva geologica individuata nell'acquifero del Monte Albo. Ulteriori approfondimenti analitici su tali fenomeni, molti dei quali già descritti dal compianto ing. Giuliano Perna in molti contesti territoriali mediterranei (PERNA, 1994; PERNA, 1995; PERNA, 1996; PERNA, 1997), potrebbero dare risposte utili per affrontare i cupi scenari di crisi idrica che si prospettano per il futuro delle popolazioni mediterranee anche con l'applicazione del know-how acquisito in questo studio.

Ringraziamenti

Al termine di questo lavoro voglio ringraziare i tanti speleologi, sardi e non, che hanno dato il loro personale contributo a questo studio. In particolare ringrazio gli speleologi dello Speleo Club di Nuoro e dello Speleo Club Oristanese, che hanno messo tanta passione nelle esplorazioni effettuate nei bui sentieri del Monte Albo; senza il loro entusiasmo e la volontà di lavorare insieme su un obiettivo comune ci sarebbero stati molti meno risultati da divulgare e tanti segreti ancora da scoprire, nascosti nel rifugio del dragone.

Ringrazio inoltre Jo De Waele, Paolo Forti e Bartolomeo Vigna per la revisione critica del manoscritto.

Bibliografia

ALVAREZ W. & COCOZZA T. 1974 - The tectonics of central-eastern Sardinia and the possible continuation of the Alpine Chain to the South of Corsica. In: Cherchi Pomesano A. (Ed): Paleogeografia del Terziario Sardo nell'ambito del Mediterraneo Occidentale, volume monografico, Cagliari 23 - 27 luglio 1973, 5-34.

CALVINO F., DIENI I., FERASIN F. & PICCOLI G. 1958 - Relazione preliminare sui rilevamenti geologici del foglio "195" Orosei (Sardegna). Boll. Soc. Geol, Ital., 77, 71-89.

CALVINO F., DIENI I., FERASIN F. & PICCOLI G. 1972 - Note illustrative della Carta Geologia d'Italia alla scala 1 : 100.000, Foglio 195 Orosei, 39 pp.

CAMARDA I. 1984 - Ambiente e flora del Monte Albo - Editrice "Il Portico" s.a.s,

CARMIGNANI L., COCOZZA T., GHEZZO C., PERTUSATI P. C & RICCI C.A. 1986 - Outlines of the Hercynian basement of Sardinia. In: Carmignani et al. (Eds.) Guide-book to the excursion on the Paleozoic basement of Sardinia. IGCP project N. 5, Newsletter, special issue, 11.21.

CARMIGNANI L., CAROSI R., DISPERATI L., FUNEDDA A., MUSUMECI G., PASCI S. E PERTUSATI P.C. 1992 - Tertiary transpressional tectonics in Ne Sardinia, Italy. In: Contribution to the geology of Italy with special regard to the Paleozoic basements. A volume dedicated to Tommaso Cocozza (L. Carmignani & F.P. Sassi Editors). IGCP No. 276, Newsletter, vol. 5, Siena, 83-96.

CHABRIER G. 1970 - Tectonique de socle d'age alpin en Sardigne centro-orientale. C. R. Acad. Sc. Paris. 271, 1252-1255.

CITA M. B., 1973 - Mediterranean evaporite: paleontological arguments for a deep-basin desiccation mode. Messinian events in Mediterranean, pp. 206-223, ff. 8, tt. 4, Koniklijke Nederlandse Akademie Van Wetenschappen, Amsterdam.

CITA M. B. & CORSELLI C., 1993 - Messiniano: vent'anni dopo. Mem. Soc. Geol. It., 49, pp. 145-164, ff. 12, Roma.

CIVITA M., COCOZZA T., FORTI P., PERNA G., TURI B. 1983 - Idrogeologia del bacino minerario dell'Iglesiente (Sardegna sud occidentale). Mem. Ist. Naz. Spel., Serie 2, Vol. 2, 137 p.

CIVITA M., PEANO G., VIGNA B., 1984 - La stazione sperimentale della Grotta di Bossea nel quadro delle ricerche idrogeologiche sui sistemi carsici del Monregalese., Memorie della Società Geologica Italiana, 1984, Vol. 29, pagine 187-207

CIVITA M., COCOZZA T., FORTI P., PERNA G. & TURI B., 1986 - Identification of groudwater flow parameters of karstic aquifer in the mining district of Iglesiente (Sardinia - Italy). Comm. European Communities, Rep. EUR 10572 EN, 56 pp. ff.19, Brussels.

CIVITA M., 2005 - Idrogeologia applicata e ambientale. Casa Editrice Ambrosiana, Milano.

DIENI I., MASSARI F., 1965 - Precisazioni sull'età di alcuni conglomerati affioranti presso Siniscola, Orosei e Dorgali (Sardegna orientale). Acc. Naz. Lincei. Rend. Cl. Sc. Fis. Mat. Nat., 40, 205-211.

DIENI I. MASSARI F., 1970 - Tettogenesi gravitativa di età oligocenica nella Sardegna centro orientale. Boll. Soc. Geol. Ital., 89, 57-64.

DIENI I. & MASSARI F., 1985 - Marine Paleocene of Eastern Sardinia. In: CHERCHI A. (Ed.) 19th European Micropaleontological Colloquium, Sardinia, October 1-10, 1985, Agip, 79.

DIENI I., MASSARI F. & PROTO DECIMA F., 1987 - Excursion dans le Crétaceé de la Sardigne Orientale, Mt. Albo: Carrierè de S'Ozzastru (Siniscola). In: CHERCHI A. (Ed.) Groupe française du Crétacé, Excursion en Sardigne, 24-29 may, 1987, Dipartimento di Scienze della Terra di Cagliari e Progemisa Spa, Cagliari, 145-149.

DE WAELE J., MURGIA F., 1999 - Le sorgenti e gli acquiferi profondi della Sardegna – Atti del convegno "Fourth European Seminary on Geography of Water" – Cagliari

FORTI P., 1998 - Gli acquiferi carsici: problematiche per il loro studio ed utilizzo - Atti del convegno nazionale sull'inquinamento delle grotte e degli acquiferi carsici e possibili ricadute sulla collettività. Ponte di Brenta (PD), pp. 13-39.

GARCIA-CASTELLANOS D., ESTRADA F., JIMÉNEZ-MUNT I., GORINI C., FERNÀNDEZ M., VERGÉS J. & DE VICENTE R., 2009 - Catastrophic flood of the Mediterranean after the Messinian salinity crisis. Nature 462, 778-781

GARGANI, J., & C. RIGOLLET, 2007 - Mediterranean Sea level variations during the Messinian salinity crisis, Geophys. Res. Lett., 34, L10405, doi: 10.1029/2007GL029885.

GARGANI J., RIGOLLET C. & SCARSELLI S., 2010 - Isostatic response and geomorphological evolution of the Nile Valley during the Messinian salinity crisis. Bulletin de la Societe Geologique de France, 181(1):19-26

GOLDSCHEIDER N., & DREW D. 2007 - Methods in karst hydrogeology. International contributions to Hydrogeology: London, Taylor & Francis 264 p.

HSÜ K.J. 1973 - Quando il Mediterraneo si dissecò, Le scienze, 1973 (56), pp. 19-29, Milano.

MAILLARD A., GORINI C., MAUFFRET A., SAGE F., LOFI J., GAULLIER V. 2006 - Offshore evidence of polyphase erosion in the Valencia Basin (Northwestern Mediterranean): Scenario for the Messinian Salinity Crisis Original Research Article. Sedimentary Geology, Volumes 188–189, 15 Pages 69-91

MANGIN A. 1975 - Contribution a l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques -Troisieme partie: constitution et fonctionnement des aquifères karstiques. Ann. Speleol. 30 (1): 21-124

MURGIA F. 1996 - Implicazioni idrogeologiche tra acquifero carbonatico, morfologie di carso coperto e acquifero alluvionale nella porzione nord-orientale del Monte Albo (Sardegna Nord- Orientale). Geologia Tecnica & Ambientale, Roma

MURGIA F. 2008 - Risorse idriche sotterranee ed acquiferi carsici in Provincia di Nuoro. Natura in Sardegna, 30, 60-68.

MURGIA F., 2010 - Primi risultati dei tracciamenti idrogeochimici condotti nell'acquifero carsico del Monte Albo (Sardegna nord-orientale). Società Speleologica Italiana - L'acqua che berremo - Speciale Provincia di Nuoro, Terza Edizione pp. 51-62

OGGIANO G., PASCI S. & FUNEDDA A., 1998 - Rapporti tra tettonica e sedimentazione lungo le fasce trascorrenti oligo-aquitaniane della Sardegna NE. Boll. Soc. Geol. It.: 117, 443-453, Roma.

PADEDDA B. & SECHI N., 2008 - Condizioni del lago Cedrino e relazioni con il suo bacino versante. Natura in Sardegna, 30, 42-48.

PASCI S., 1997 - Tertiary transcurrent tectonics of North – Central Sardinia. Bulletin de la Société Geologique de France, 168, 301-312.

PERNA G., 1994 - Il Carsismo profondo nel Sulcis - Iglesiente (Sardegna Sud Occidentale) e nel Trentino - Veneto (Alpi Orientali Italiane). "Carsismo Messiniano": esempi di carsimo profondo correlati con il livello del Mediterraneo nel Messinano. Ann. Musei civici Rovereto, 10/1944, pp. 327-378 19 ff., Rovereto.

PERNA G., 1995 - Il carsismo messiniano e la circolazione profonda delle acque nel Sulcis - Iglesiente (Sardegna Sud Occidentale). Mem. Associaz. Mineraria Sarda, 2, pp. 27-38, ff. 2, Iglesias.

PERNA G., 1996 - Il Carsismo Messiniano nell'area del Mediterraneo. Speleologia, 34, pp. 5-12, ff. 10, Milano.

PERNA G., 1997 - Deep Messinian Karst in Mediterranean Area. Proceed. of the 12th Intern. Congress of Speleology, La Chaux-de-Fonds, 1, pp. 397-399, ff. 4. 129-131.

REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA, ASSESSORATO DEI LAVORO PUBBLICI, 2006 - Piano Regolatore Generale degli Acquedotti della Sardegna - Revisione 2006

VARDABASSO S. 1948 - Il Mesozoico della Sardegna orientale. Rend. Sem. Fac. Univ. Cagliari, 16, 41-93.

VARDABASSO S. 1959 - Il Mesozoico epicontinentale della Sardegna. Acc. Naz. Lincei, Rend. Cl. Sc. Fis. Mat., s. 8, 27 (5), 178-184.

VIGNA B., 2000 - Schemi e funzionamento dei sistemi carsici. In: I Fiumi Della Notte, M.Vianelli, Bollati Boringhieri Edizioni, pag. 37-42.

VIGNA B., 2007 - Schematizzazione e funzionamento degli acquiferi in rocce carbonatiche, Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia. Serie Geologica e Geofisica, pp. 6, 2007, Vol. 19, pagine 21-26.