



**Progetto alta velocità Bologna-Firenze
Attuazione Addendum
all'Accordo Procedimentale
Primo Programma di Interventi**

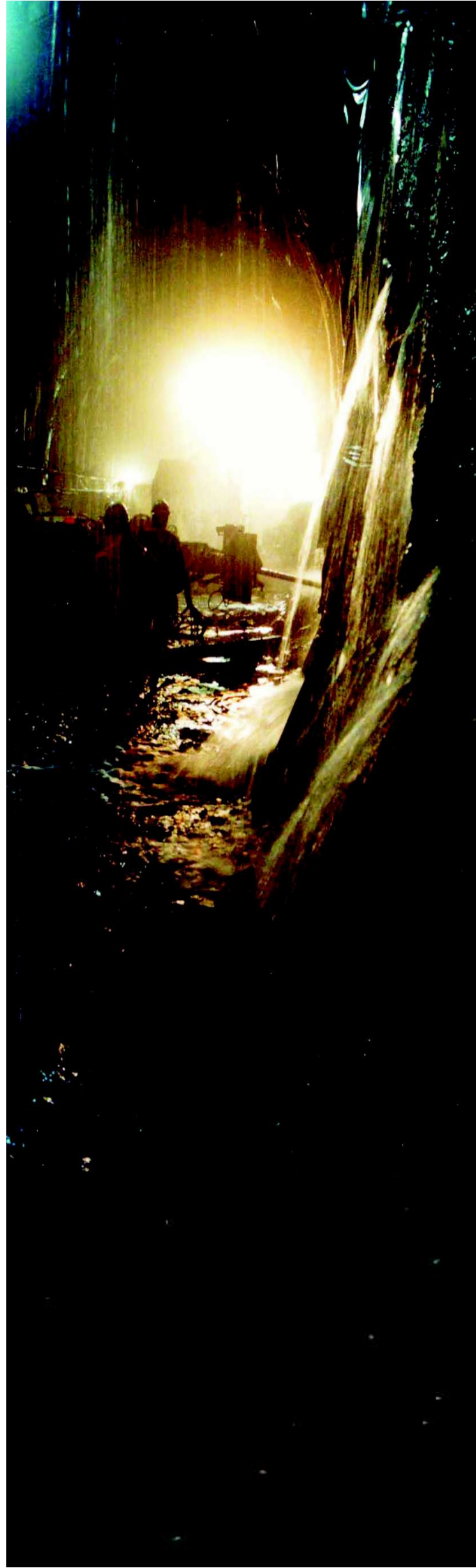
GALLERIA FIRENZUOLA

**PROGETTO DI CARATTERIZZAZIONE
GEOCHIMICO-ISOTOPICA
DELLE ACQUE SOTTERRANEE DEL
SISTEMA IDROGEOLOGICO DI
MARZANO-OSTETO**

SECONDA FASE

REPORT FINALE

GIUGNO 2008



ARPAT



ARPAT - Agenzia Regionale per la
Protezione Ambientale della Toscana,
area VIA/VAS-GIM



CNR - Consiglio Nazionale delle Ricerche, Area della
Ricerca di Pisa, Istituto di Geoscienze e Georisorse

**Progetto alta velocità Bologna-Firenze
Attuazione Addendum all'Accordo Procedimentale
Primo Programma di Interventi**

GALLERIA FIRENZUOLA

**PROGETTO DI CARATTERIZZAZIONE
GEOCHIMICO-ISOTOPICA DEL SISTEMA
IDROGEOLOGICO MARZANO-OSTETO
- SECONDA FASE -**

REPORT FINALE

Giugno 2008



Indice

PREMESSA	3
INTRODUZIONE	6
I risultati della prima fase (2004)	6
Risorse coinvolte	7
LA GALLERIA FIRENZUOLA	8
Inquadramento geologico regionale	8
Galleria Firenzuola: assetto geologico ed impatti registrati	8
Assetto geologico-strutturale ed idrogeologico generale nell'area della galleria	8
Tratto nord	9
Tratto sud	11
GEOCHIMICA ISOTOPICA: VANTAGGI E LIMITI	12
Metodologia	12
Vantaggi e limiti del metodo	14
IL PROGETTO E SUO SVILUPPO	15
Sviluppo del progetto	15
Attività svolta	16
PRESENTAZIONE E DISCUSSIONE DEI DATI	17
Dati chimici	17
Presentazione dei dati	17
Classificazione chimica	18
Diagrammi di correlazione chimica	24
Considerazioni termodinamiche e simulazioni numeriche	30
Composizione isotopica	33
Contenuto in O-18 e deuterio	33
Concentrazione di Tritio	37
Valutazione dei tempi di circolazione sotterranea	45
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	51
Bibliografia essenziale	53



PREMESSA

Nell'ambito della realizzazione della linea Alta Velocità/Alta Capacità per collegare il sud al nord Italia e ai paesi confinanti, nel tratto Bologna-Firenze è in via di completamento la cosiddetta "Tratta appenninica", che si distingue dalle altre tratte per le caratteristiche morfologiche della catena appenninica. I lavori di realizzazione sono iniziati nel 1996, ed adesso sono in via di completamento (probabile inizio esercizio anno 2010).

La parte toscana della Tratta Bologna-Firenze (fig. 1) si sviluppa per circa 50 Km e conta 6 gallerie di linea (di cui tre con lunghezza superiore ai 15 Km), oltre a 14 Km di gallerie di servizio, le cosiddette "finestre", ed attraversa un territorio ad un tempo geologicamente difficile e ad alta sensibilità ambientale. L'area di intervento è caratterizzata dalla presenza di rilievi montuosi relativamente acclivi, con quote massime intorno ai 1000/1100 metri s.l.m..

La realizzazione in sotterraneo del tracciato, per quasi il 90% del suo sviluppo, trova le sue ragioni sia nella morfologia del rilievo appenninico, sia in una scelta di tipo tecnico-politico volta a limitare gli impatti paesaggistico ed acustico. Di contro, tale scelta ha comportato il manifestarsi di impatti sulla risorsa idrica superficiale e sotterranea.

Il presente studio è stato commissionato dalla Regione Toscana ad ARPAT (Ente attuatore) attraverso la Commissione Tecnica appositamente costituita per l'attuazione del "Primo programma d'interventi", previsto dall'Addendum (2002) all'Accordo Procedimentale (1995).

Una prima fase di questo progetto fu realizzata nel 2004, con il fine di fornire nuovi elementi a supporto degli approfondimenti geologici, geostrutturali ed idrogeologici eseguiti in corso d'opera per definire i meccanismi che sono stati alla base del manifestarsi degli impatti attraverso l'utilizzo di un approccio di tipo geochemico-isotopico.

I risultati ottenuti in questa prima fase hanno consentito di formulare ipotesi, sia sui circuiti di alimentazione dei punti d'acqua impattati, sia sui tempi di ricarica di detti circuiti. Attraverso l'integrazione di tutte le informazioni disponibili è stato possibile elaborare un modello concettuale più circostanziato della circolazione idrica sotterranea, basato sul riconoscimento ed il tracciamento di contributi idrici di origine ed età differenti nelle acque intercettate dai lavori di scavo delle gallerie ferroviarie.

L'interesse suscitato ha suggerito alla Regione Toscana di proseguire nell'attività di approfondimento con una seconda fase di studio.

Il presente report viene redatto a conclusione di questa seconda fase, svoltasi essenzialmente nel 2007, e che ha visto la ripetizione di campionamenti su buona parte dei punti già presenti nella prima fase 2004, nonché l'ampliamento della zona di indagine ad est ed ovest di quella precedentemente indagata.

Con la conclusione di questa seconda fase riteniamo si porti un ulteriore contributo alla comprensione dei circuiti idrogeologici all'origine delle venute idriche manifestatisi nella galleria Firenzuola durante le operazioni di scavo nell'area Marzano-Osteto.



Fig. 1 - Tracciato TAV tratta Toscana - sono evidenziati anche i principali cantieri e i nomi delle gallerie

Tratta AV Bologna-Firenze

Cantierizzazione

- Cantiere
- Cava
- Deposito
- PREVAM

nuova ferrovia

- Gallerie
- Trattati all'aperto



0 2 4 6 8 Kilometers

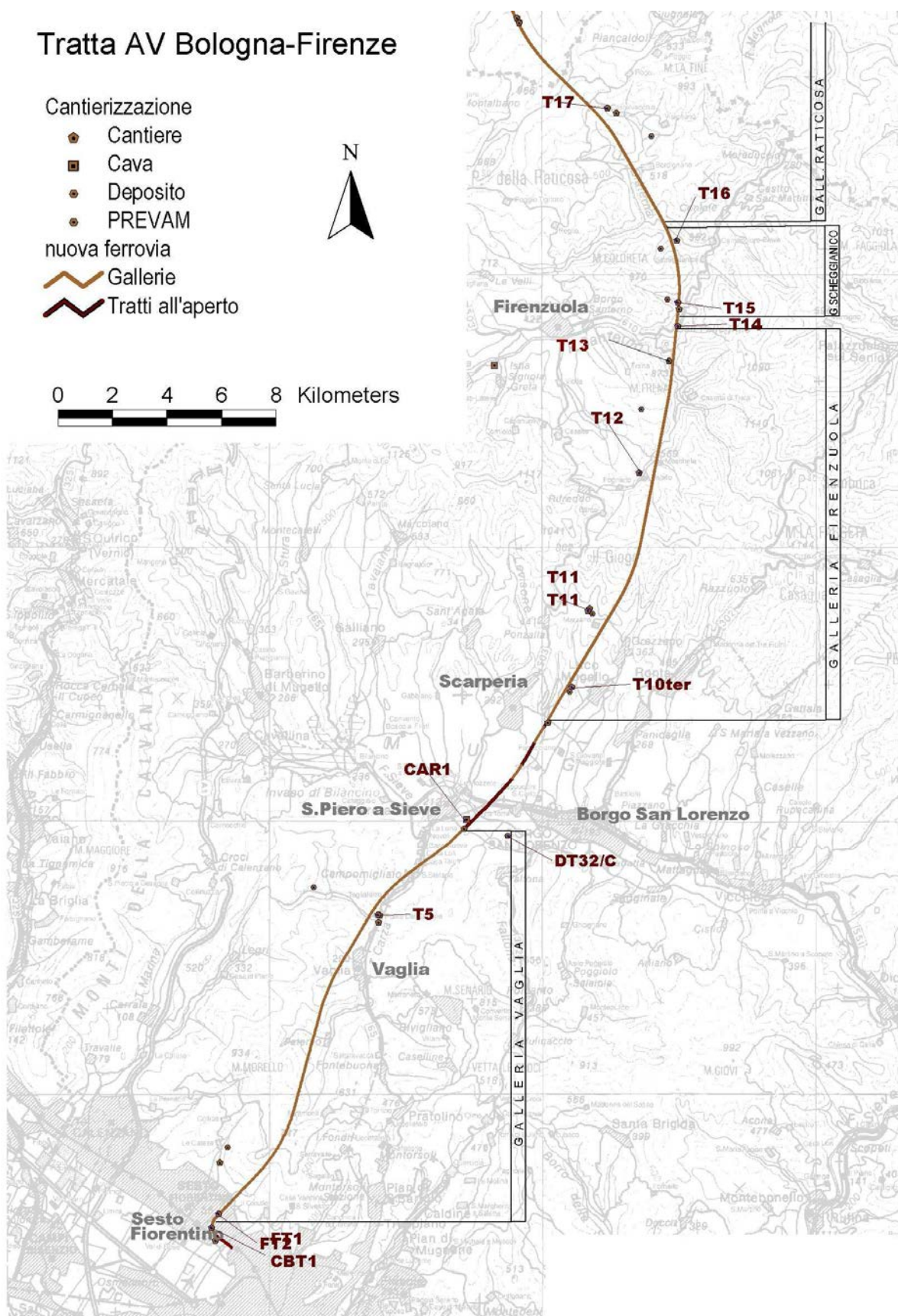
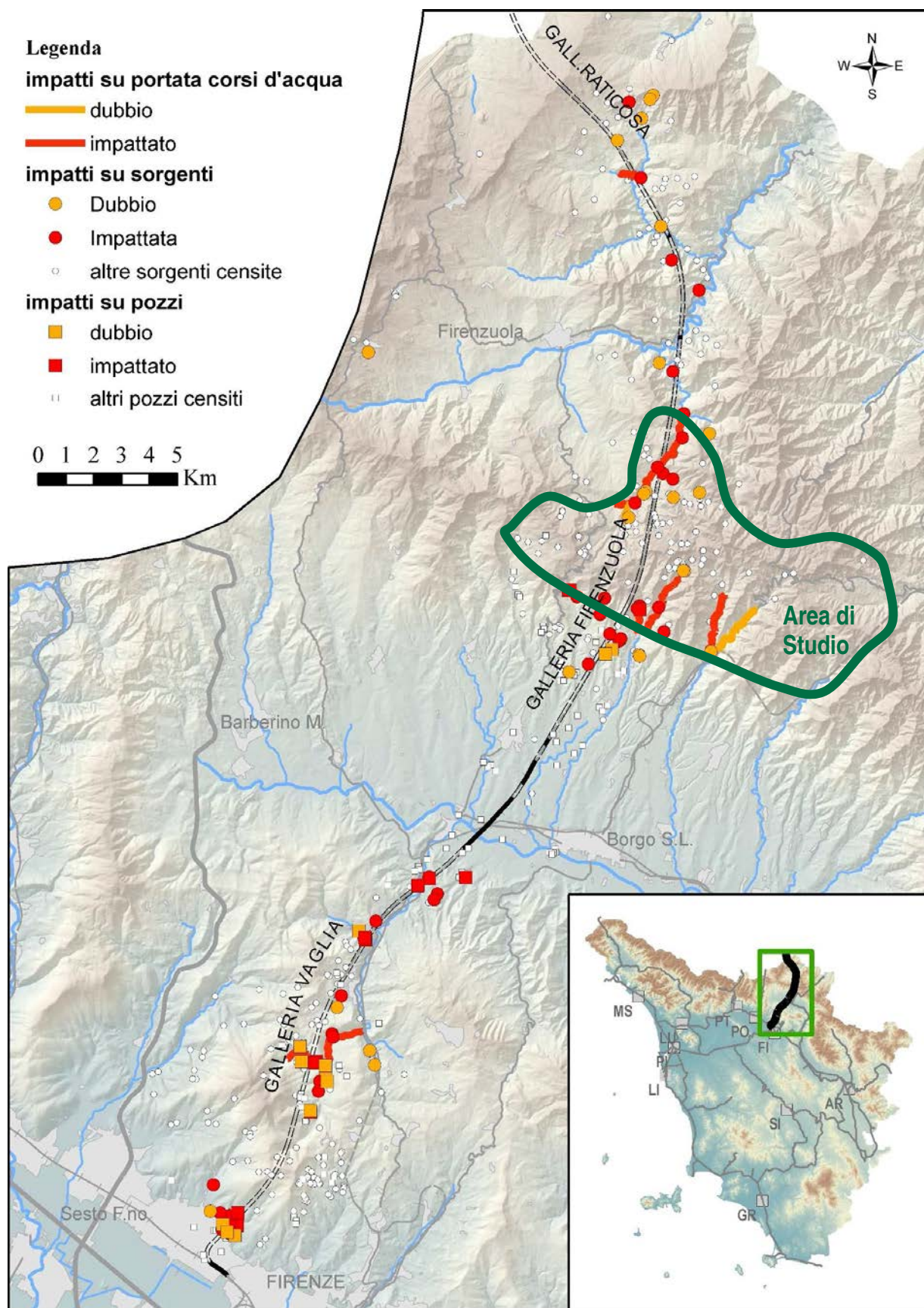




Fig. 2 - Tracciato TAV tratta Toscana – mappa sintetica degli impatti idrogeologici e localizzazione dell'area di studio





INTRODUZIONE

Fra le note problematiche idrogeologiche venutesi a creare nell'ambito della costruzione del quadruplicamento ferroviario veloce Bologna-Firenze, lo scavo della galleria Firenzuola è risultato senz'altro il principale fattore di criticità e d'interferenza sul sistema idrogeologico della porzione nord-orientale del Mugello. Gli scavi della galleria di linea e delle relative finestre di servizio hanno avuto documentate ripercussioni sui regimi di sorgenti e corsi d'acqua, nonché sulla produttività di alcuni pozzi in un'area che possiamo sinteticamente indicare come "Marzano-Osteto". Tale zona (fig 2) è posta a cavallo dello spartiacque appenninico, ed è delimitabile indicativamente, a Sud dalla località Marzano (versante idrografico della Sieve), e a Nord dalle località di Osteto e Moscheta (versante idrografico del Santerno). Ad Ovest la zona trova un suo possibile limite nel tracciato della S.S. del Giogo di Scarperia, mentre ad Est si può assumere immediatamente oltre il Torrente Ensa.

Gli studi idrogeologici prodotti in sede di SIA e di progettazione esecutiva della Tratta appenninica AV, hanno evidenziato la necessità di sostanziali integrazioni ed approfondimenti effettuati dal Consorzio costruttore (CAVET) sulla base delle richieste pervenute dall'Osservatorio Ambientale per definire le principali dinamiche idrogeologiche dell'area e per consentire di comprendere le connessioni fra la galleria ed i punti d'acqua superficiali (pozzi, sorgenti, corsi d'acqua). Tuttavia, tali approfondimenti hanno lasciato ancora aperte alcune problematiche relative alla natura dei circuiti idrogeologici di alimentazione delle venute in galleria e, quindi, alle interconnessioni con i punti d'acqua superficiali.

Nella prima fase (2004) del presente progetto si è migliorato il livello di definizione del sistema idrogeologico indagato, attraverso il ricorso ad un approccio geochemico-isotopico, metodologia diversa da quelle fino ad allora impiegate per le stesse finalità.

Nella seconda fase, in accordo alle indicazioni della sopra citata Commissione Tecnica, ci si è posti l'obiettivo di effettuare ulteriori verifiche a conferma del modello proposto nel 2004, di ampliare l'area di studio (ad est fino alla valle Muccione e Casaglia, nonché ripetizioni su galleria Faentina e ad ovest fino ai pozzi del Molinuccio).

I risultati della prima fase (2004)

La combinazione dei dati di tipo geologico, idrogeologico e geochemico ha fornito, nella prima fase, importanti elementi di conoscenza sulla circolazione idrica sotterranea dell'area esaminata, interessata dai lavori di scavo per l'Alta Velocità ferroviaria. Fra gli elementi più significativi emersi nella prima fase (2004) del progetto possiamo citare quelli che seguono:

- la classificazione chimica delle acque ha permesso di evidenziare che l'interazione tra le acque sotterranee e le rocce incassanti determina una variazione di facies chimica da acque di tipo Ca-HCO_3 ad acque di tipo Na-HCO_3 ; questa variazione è accompagnata da un progressivo incremento del valore di pH fino a valori marcatamente alcalini (fino a 9,4), come riscontrato nel tratto intermedio della galleria (punti di prelievo G3-G5); le acque delle sorgenti e dei torrenti, invece, hanno una facies chimica più omogenea di tipo Ca-HCO_3 , e valori di pH da neutri a mediamente alcalini (fino a 8,5);
- la classificazione isotopica delle acque, effettuata in base ai valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, evidenzia una sostanziale omogeneità composizionale tra le diverse tipologie di manifestazioni campionate; i due parametri $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ sono approssimativamente correlati da una relazione lineare analoga a quella delle precipitazioni meteoriche dell'Italia centrale; le acque di galleria hanno i valori isotopicamente più negativi tra quelli osservati nell'area, in accordo con il fatto che la maggior parte della ricarica della circolazione sotterranea avviene a spese delle precipitazioni che cadono nel



periodo compreso tra autunno e primavera; non sono, invece, evidenti correlazioni tra la variazione di composizione isotopica e la quota di emergenza delle acque campionate, in accordo con il fatto che le differenze di quota osservate nell'area in esame sono ridotte (generalmente entro 400 m);

- la distribuzione spaziale e temporale dei valori di concentrazione del Tritio ha evidenziato l'esistenza di circolazioni sotterranee separate e di processi di mescolamento, particolarmente evidenti nel tratto intermedio della galleria (punti di prelievo G3-G5), tra acque di recente infiltrazione ed acque infiltratesi durante il periodo pre-termonucleare;
- le informazioni ottenute per applicazione di metodologie geochemico-isotopiche hanno condotto ad una revisione della zonazione idrogeologica del sistema indagato;
- l'area in esame può essere innanzitutto suddivisa in due parti principali, in base alla posizione rispetto al setto impermeabile costituito dalle formazioni del Complesso Caotico e dell'Olistostroma, intercettate dalla galleria tra le progressive 49+500 e 50+300; la porzione a nord di questa barriera di permeabilità è dominata dalla presenza di acque di recente infiltrazione, mentre la parte a sud ha un comportamento più variegato e può essere ulteriormente divisa in altre due sottozone; l'area a ridosso della barriera di permeabilità ha un tipo di circolazione sotterranea dominato da acque con età idrologica > 50 anni, presenti in percentuali variabili stimate tra il 50% ed il 100%; la parte più a sud della galleria è invece sede di mescolamento tra acque di lunga circolazione sotterranea ed acque di recente infiltrazione.

Risorse coinvolte

Il progetto, nella sua seconda fase, ha visto la partecipazione del personale sotto riportato.

- CNR - Consiglio Nazionale delle Ricerche, Area della Ricerca di Pisa, Istituto di Geoscienze e Georisorse:
 - Dott. Fabrizio Gherardi (raccolta, elaborazione e valutazione dei dati isotopici, analisi incrociata con i dati idrogeologici)
 - Laboratorio del CNR (analisi isotopiche)
- ARPAT - Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana:
 - Dott. Stefano Rossi (coordinatore);
 - Dott. Luca Ranfagni (implementazione e gestione database e GIS, prelievo campioni, analisi geologica e idrogeologica dell'area, analisi incrociata con i dati chimici ed isotopici)
 - P.I. Rosello Cecchi (prelievo campioni)
 - Laboratorio Chimico Dipartimento ARPAT di Firenze (Responsabile Dott. Cioni, esperti di settore Dott.ssa E. Pezzatini, Dott. F. Mantelli): analisi chimiche
 - Personale Area VIA/VAS-GIM: supporto ai campionamenti, supporto amministrativo.

Le attività di campionamento si sono svolte nei tempi previsti dal programma, salvo alcuni aggiustamenti nelle frequenze di campionamento e nei punti da campionare (vedi oltre). Inoltre, la valutazione dei dati analitici, da incrociare con i risultati della precedente fase, si è rivelata più complessa di quanto inizialmente preventivato.

Prima di entrare nel merito dei contenuti dello studio oggetto della presente relazione si è ritenuto opportuno fornire, nel successivo capitolo, alcuni dati essenziali riguardo la geologia della galleria Firenzuola da mettere in relazione con impatti registrati nell'area Marzano-Osteto in modo da fornire un quadro dello stato dell'arte delle conoscenze ante realizzazione dello studio.



LA GALLERIA FIRENZUOLA

Di seguito si riporta un inquadramento geologico sintetico della galleria Firenzuola, rimandando per maggiori dettagli al report (2005) della prima fase.

Inquadramento geologico regionale

L'Appennino settentrionale costituisce la porzione affiorante di una larga catena orogenica associata alla subduzione della placca Adriatica sotto quella Iberica. Sono presenti diverse tipologie litologiche: alternanze di marne e arenarie in facies di flysch, calcari marnosi, complessi caotici essenzialmente argillitici con inclusioni di calcari marnosi e ofioliti. L'inizio del sollevamento può essere datato al tardo Cretaceo, con una fase tettonica compressiva, seguita da una fase distensiva Plio-Pleistocenica. Strettamente legata a questi episodi orogenici è la formazione di alcune discontinuità di varia persistenza (da pochi metri a più chilometri), e orientate in due direzioni principali: WNW-ESE e NNE-SSW

Galleria Firenzuola: assetto geologico ed impatti registrati

Assetto geologico-strutturale ed idrogeologico generale nell'area della galleria

Formazioni affioranti

La galleria Firenzuola costituisce il tratto da progressiva Km 44+500 a progressiva Km 59+600 della nuova tratta ferroviaria Bologna-Firenze (le progressive chilometriche vengono misurate da nord verso sud).

La galleria è stata scavata principalmente nella formazione Marnoso-Arenacea, datata al Langhiano-Tortoniano (basso-medio Miocene). Si tratta di una formazione in facies di flysch, schematizzabile come una alternanza di livelli arenacei e livelli marnosi, e, subordinatamente, siltitici e argillitici. Lo spessore degli strati va da pochi decimetri a qualche metro, come un rapporto arenaria/marna variabile.

In un'area più ridotta affiorano la formazione di Castel Guerrino ed il Complesso Caotico. La formazione di Castel Guerrino ha composizione simile alla Marnoso Arenacea, ma ha strati più fini e un maggior contenuto in marne ed argilliti, che le conferisce una minor permeabilità. Il Complesso Caotico (appartenente alle unità liguridi sovrascorse alla serie Toscana e Romagna) è costituito essenzialmente da argilliti con inclusi litici di varia litologia, ed è, quindi, caratterizzato da permeabilità molto bassa.

Tettonica

La storia tettonica dell'area è schematicamente ascrivibile, così come accennato precedentemente, ad una prima fase compressiva, che ha causato sovrascorrimenti e formazione di pieghe anticlinali e sinclinali nella Formazione Marnoso-Arenacea con asse indicativamente ESE-WNW, alle quali sono associate fratturazioni in cerniera. La seconda fase distensiva, ha causato l'apertura del Bacino intramontano del Mugello e la conseguente deposizione dei depositi fluvio-lacustri. La stessa fase distensiva pare abbia causato la riattivazione delle fratture già formatesi durante la fase compressiva. Le fratture con orientazione appenninica (ESE-WNW) si ritrovano, in genere, più aperte, mentre le meno frequenti fratture in direzione antiappenninica (NNE-SSW) sono il più delle volte riempite da calcite o con giunti serrati.



Idrogeologia

La formazione più rilevante dal punto di vista idrogeologico è risultata la Marnoso-Arenacea. In questa formazione la permeabilità per porosità è molto bassa, ma vi sono zone dell'ammasso roccioso a permeabilità maggiore, principalmente dovuta a fratture e discontinuità.

In generale, queste fratture sono contenute negli strati arenacei, che causano una limitata circolazione idrica "interstrato". Meno frequentemente, però, sono presenti fratture più persistenti del singolo strato, che permettono l'instaurarsi di una circolazione su più vasta scala. Questa circolazione è strettamente legata all'orientazione delle discontinuità, principalmente appenninica (WNW-ESE), subordinatamente antiappenninica (SSW-NNE). Le fratture sono più frequenti in corrispondenza di strutture tettoniche come assi anticlinali e sinclinali o faglie, fatto che causa la presenza di fasce fratturate di larghezza 50÷200 m e di lunghezza anche di alcuni chilometri, che vanno a costituire degli acquiferi tabulari in posizione subverticale e orientamento appenninico. Ognuno di questi acquiferi può, il più delle volte, essere considerato separato idraulicamente dagli altri, ma non mancano i casi in cui è risultata una connessione, seppur a permeabilità minore, fra diversi acquiferi, a causa di fratture sviluppatesi in direzione antiappenninica o della fratturazione interstrato.

Di seguito si descrivono più nel dettaglio le caratteristiche geologico strutturali ed idrogeologiche della galleria Firenzuola, suddividendola in due tratti separati dalla progressiva 50+650, dove è la massima quota altimetrica della galleria (cambio di livelletta 361 m s.l.m.).

Tratto nord

Assetto geologico-strutturale

Questa parte della galleria è scavata principalmente nell'Unità di Castellaccio della Formazione Marnoso-Arenacea. Un lembo di Complesso Caotico, sovrascorso sulla Marnoso-arenacea e rimasto coinvolto nei piegamenti e sovrascorimenti di quest'ultima, è presente in superficie a sud di Badia Moscheta, e, in galleria, a sud di progressiva 49+500. L'assetto della formazione Marnoso-Arenacea in questa area è caratterizzato dalla presenza di una anticlinale con asse E-W e fianchi inclinati di circa 20°, seguita da una sinclinale ampia, con il fianco nord a bassa inclinazione. Sono, inoltre, presenti numerose faglie e fratture, fra le quali rilevante è la cosiddetta "Linea dell'Isola", intercettata dalla galleria intorno alla progressiva 49+000.

Il lembo di Complesso Caotico sopra descritto costituisce una linea di demarcazione idrogeologica fra le porzioni di territorio a Nord di Moscheta ed a sud di Osteto.

A sud della progressiva 49+900, il complesso caotico lascia di nuovo il posto alla marnoso-arenacea, che mostra qui una serie fitta di pieghe, con assetto degli strati spesso subverticale, e faglie. In questa zona è presente anche l'olistostroma di Sambucheto, potente alcune decine di metri, con notevole continuità laterale verso ESE. Oltre l'Olistostroma, la Marnoso Arenacea è in posizione sub-verticale, fino al thrust di Fognano. La Marnoso-Arenacea a sud del thrust è interessata da una struttura di piega frontale legata al sovrascorimento dell'unità di Monte Nero sull'unità di Castellaccio, che in superficie si ritrova intorno alla loc. Pratelle ed in galleria intorno a progr. 51+000.

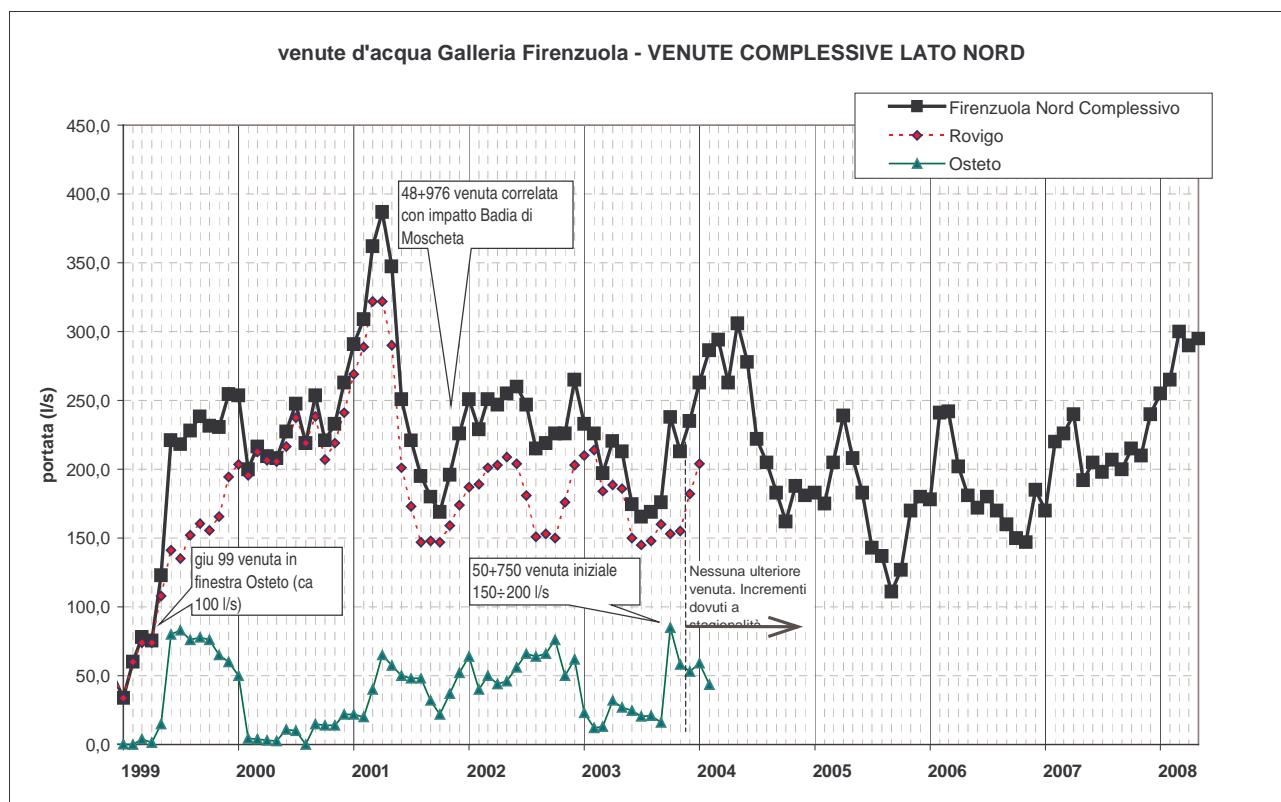
Idrogeologia ed impatti

Il tratto a nord del complesso caotico ha visto, durante gli scavi, portate che complessivamente, a livello di galleria, hanno raggiunto e mantenuto valori intorno ai 200 l/s. Ciò nonostante pochi sono gli impatti su singole sorgenti verificati con certezza: le sorgenti Veccione 1 e 3 (primo semestre 2001), la sorgente Badia di Moscheta (dicembre 2001). L'impatto sulla storica sorgente di Badia di Moscheta, ad uso acquedottistico, è



legato all'intercettazione, al Km 48+970 della citata "Linea dell'Isola", una persistente lineazione con direzione appenninica.

Fig. 3 - Grafico delle portate per il tratto della galleria Firenzuola a nord del cambio di livelletta



Di contro, si sono verificate rilevanti variazioni di portata sul Torrente Veccione. Dalle misure di monitoraggio si evidenzia, nel tratto di corso corrispondente alla "Valle dell'Inferno" (circa 2 Km), un potenziale drenante in magra superiore ai 20 l/s, che causa una completa perdita di deflusso in un lungo tratto a monte della confluenza del T. Rovigo. Tale potenziale drenante arriva anche oltre i 100 l/s in piena, con l'aumentare della sezione bagnata. Questo è stato interpretato con la originaria presenza, all'interno della "Valle dell'Inferno" di acquiferi contenuti nelle fasce fratturate che costituivano una alimentazione (anche se probabilmente di limitata entità) al torrente Veccione fino all'inizio dei lavori di scavo. Al momento in cui questi acquiferi sono stati intercettati dagli scavi, il livello piezometrico si è abbassato al di sotto della quota dell'alveo del torrente. Di conseguenza, il torrente è stato privato di una parte delle alimentazioni, e, inoltre, le zone di frattura sono diventate delle vie preferenziali di connessione idraulica fra la galleria e il torrente, catturando parte della portata proveniente dalla porzione più alta del bacino del Veccione. Analoga interpretazione può essere data per i drenaggi dagli altri corsi d'acqua (Rampolli, Canaticce, Farfereta), richiamati più avanti.

Nel tratto a sud del Complesso Caotico, lo scavo della finestra Osteto ha causato consistenti venute d'acqua, di circa 100 l/s, nel giugno 1999. Tali venute hanno causato l'impatto sulla sorgente Molino di Fognano e, forse, parzialmente sulla sorgente Felciaione. Gli scavi sono poi proseguiti su un tracciato di variante che non ha intercettato rilevanti venute idriche.

Raggiunta la quota dell'innesto, è iniziato, quindi, lo scavo della galleria di linea, dapprima verso Nord (dove il fronte si è congiunto con quello proveniente da T13 - v. sopra), con poche venute di scarso rilievo. Qui la Marnoso Arenacea è caratterizzata da un rapporto arenaria/marna più basso, ed è fortemente tettonizzata



Successivamente è stato attaccato il fronte verso sud, che nel primo tratto ha evidenziato caratteristiche simili a quelle del fronte scavato verso nord, per poi passare ad un assetto a strati subverticali. In questo tratto si sono verificate poche venute di limitata entità, ma alcune delle quali hanno avuto notevole persistenza nel tempo (es. venuta a 50+530).

Più a sud, alla progr. 50+733 è stata intercettata una venuta di 200 l/s, legata ad un thrust interno alla Marnoso-Arenacea. In pratica, si è trattato dello stesso fascio di fratture già intercettato dalla finestra Osteto, nel tratto poi abbandonato: quest'ultimo si è, infatti, svuotato dopo poche decine di ore dall'intercettazione della venuta in galleria di linea. Procedendo ulteriormente verso sud, lo scavo ha intercettato altre venute, sempre legate alle stesse strutture, ma di entità più limitata. Oltre la progr. 50+900 non sono state intercettate ulteriori venute. Ancora più a sud, intorno a 51+150, l'assetto della stratificazione passa bruscamente ad una monoclinale inclinata approssimativamente 10° verso NNE, fino al congiungimento (progr. 51+625) con il tratto sud.

Le venute principali, essenzialmente legate al thrust, hanno causato un parziale decremento nella portata di due rami alti del Veccione (per complessivi circa 1÷1.5 l/s), e l'impatto sulla sorgente Molino di Fognano.

Tratto sud

Assetto geologico-strutturale

Proseguendo da nord verso sud, oltre la progressiva 51+150 lo scavo ha interessato l'Unità di Monte Nero della Formazione Marnoso-Arenacea, costituita da alternanze di livelli arenacei e marnosi di potenza da decimetrica a metrica, con rapporto arenaria/marna variabile da 0.2 a 2. L'assetto è inizialmente una monoclinale a basso angolo, inclinata verso NNE, interessata solo da alcune lievi ondulazioni. Si incontrano successivamente una serie di blande strutture con alternanza di sinclinali ed anticlinali, con associata presenza di sistemi di discontinuità. Queste strutture plicative, come l'anticlinale Incisa – Casa d'Erci, la sinclinale F.so del Mandrio Nord – Casa d'Erci Nord, l'anticlinale M. Verruca Nord – Frassineta Nord, presentano piani assiali subverticali o immergenti ad angolo elevato verso SSW. Sui fianchi delle pieghe della Marnoso-Arenacea la stratificazione ha inclinazioni basse, intorno ai 10°-15°. Per le pieghe si hanno continuità laterali diverse, con fenomeni di vicarianza. Associate alle pieghe sono i fasci di fratture in cerniera, che hanno larghezza variabile tra i 50÷200 m ed estensione laterale anche superiore ai 5 km.

Più a sud, in corrispondenza della progr. 54+700, si ha una piega rovesciata di sottorampa in corrispondenza del thrust Marnoso Arenacea - formazione di Castel Guerrino.

Idrogeologia ed impatti

Nel tratto interessato dalla monoclinale (51+150 - 52+100) non sono state rinvenute intercettazioni d'acqua.

Fra il Km 52+100 e 52+800 alcune venute (fino a circa 100 l/s) sono state intercettate, ma non appaiono evidenti impatti in superficie connessi con esse (fig 4)

Fra le progressive 52+800 e 54+150 sono state intercettate in galleria diverse venute d'acqua (fino a massimi intorno ai 300 l/s per una singola venuta) con evidenti conseguenze in superficie, quali essiccamento di sorgenti e di tratti di corsi d'acqua (fig. 4)

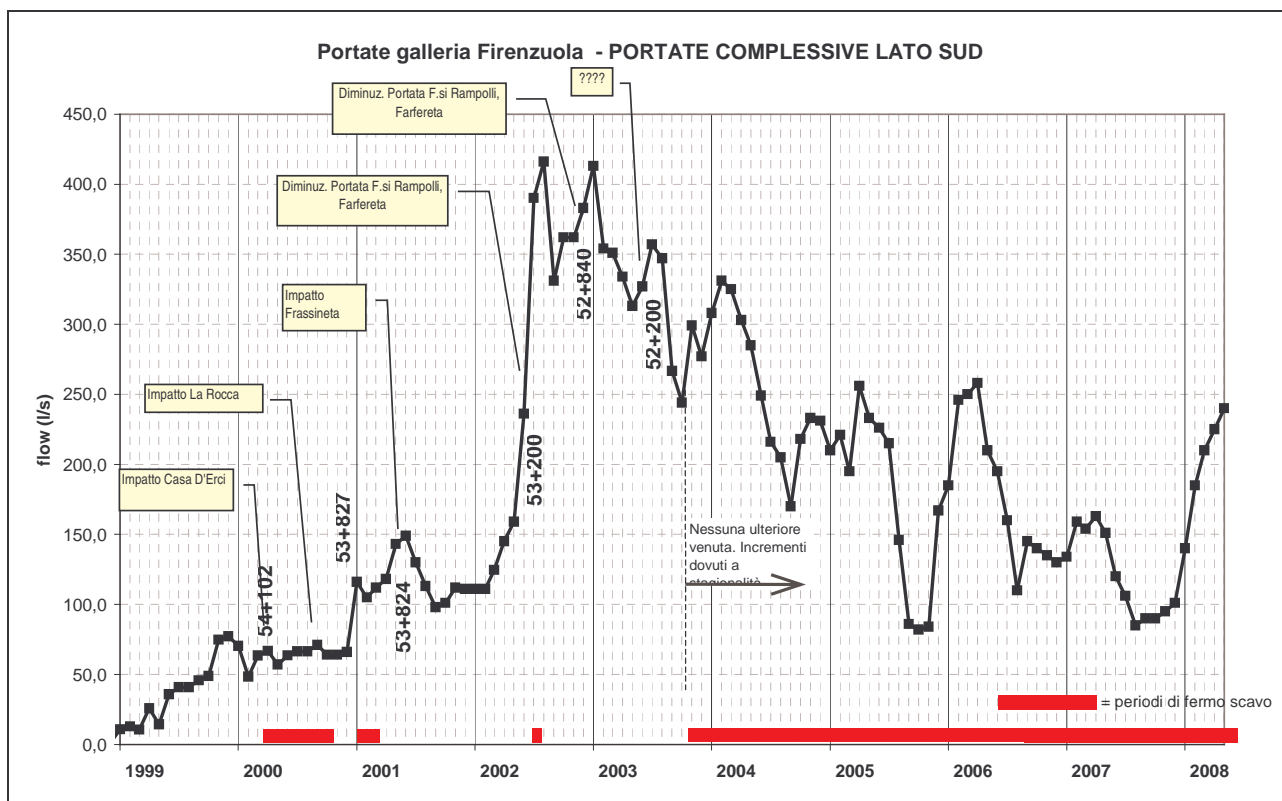
A questo tratto sono riconducibili gli impatti sulle sorgenti Casa D'Erci 1 e 2 (primavera 2000), La Rocca (estate 2000), Buca delle Fate (estate 2000), Alicelle-Largignana (primavera 2001), Frassineta (primavera 2001). E' stata, inoltre, probabilmente impattata una sorgente sulfurea nei pressi dello sbocco della valle del T.Farfereta. Risultano impattati anche i pozzi Incisa 1 e 2 ed il pozzo di Casa D'Erci, quest'ultimo perforato per sopperire temporaneamente all'impatto verificatosi sulle omonime sorgenti. Dall'estate 2001 si sono anche verificati impatti su corsi d'acqua, più evidenti in periodo di magra:

- il fosso Rampolli risulta privo di portata per un tratto di circa 1,5 Km da quota 650 a quota 400;



- il fosso Cannaticce risulta privo di portata per tutto il suo tratto ed è stato alimentato da bypass provenienti dal cantiere T11 fino a tutta l'estate 2007;
- il fosso Farfereta risulta anch'esso privo di portata per un tratto di circa 1.5 km a valle di quota 630;
- in ultimo, il torrente Ensa ha evidenziato una perdita di portata intorno ai 3 l/s, che provoca assenza di deflusso per un tratto di circa 500 m a valle di quota 450, ma è, tuttora, da verificare con certezza se l'interferenza per la presenza del sottoattraversamento della Ferrovia faentina, che complica l'interpretazione dei drenaggi dal subalveo.

Fig. 4 - Grafico delle portate per il tratto della galleria Firenzuola a sud del cambio di livelletta



GEOCHIMICA ISOTOPICA: VANTAGGI E LIMITI

Con l'intento di definire il quadro operativo in modo sufficientemente completo, in analogia con il Rapporto finale della fase I del Progetto, a seguire vengono brevemente accennati i principi basilari della metodologia geochimica e geochimico-isotopica utilizzata nell'ambito del presente studio

Metodologia

Una ampia letteratura internazionale testimonia che il corretto utilizzo delle metodologie isotopiche, in particolare se abbinate a quelle chimiche, permette di definire con soddisfacente accuratezza all'interno dei sistemi naturali i meccanismi che controllano l'evoluzione della composizione, le principali linee di flusso, i tempi di percorrenza delle acque sotterranee, nonché il loro rapporto chimico e fisico con quelle superficiali.



L'approccio geochemico-isotopico allo studio dei sistemi idrogeologici si concretizza in una serie di fasi successive, schematicamente così riassumibili:

- campionamento;
- effettuazione di analisi chimiche ed isotopiche delle aliquote di acqua prelevate;
- interpretazione dei dati prodotti.

La finalità è quella di elaborare un modello idrogeochemico in grado di inserirsi armonicamente in un quadro geologico complesso, elaborato parallelamente sulla base di evidenze multidisciplinari ed indipendenti, provenienti dall'applicazione delle altre discipline delle scienze della terra. L'elaborazione dei dati geochemico-isotopici generalmente produce risultati in grado di vincolare in modo quantitativo il modello concettuale del sistema naturale indagato.

Per questa capacità specifica universalmente riconosciuta, già da diversi anni e recentemente in modo sempre più diffuso, la maggior parte delle ricerche effettuate dai paesi tecnologicamente avanzati nel campo dell'idrogeologia fa ricorso in modo sistematico all'utilizzo della geochemica isotopica.

La geochemica isotopica è, infatti, una disciplina a carattere quantitativo che viene applicata in idrogeologia con lo scopo di valutare l'effetto dei processi naturali (come ad esempio l'evaporazione, la condensazione, il mescolamento, l'interazione tra acqua e roccia, ecc.) sulla distribuzione degli isotopi all'interno dell'acqua o di altre determinate specie chimiche.

Gli isotopi rappresentano atomi di uno stesso elemento chimico che contengono un diverso numero di neutroni. La molecola di acqua, ad esempio, formata da atomi di ossigeno e di idrogeno, può presentare concentrazioni relative molto diverse degli isotopi dei due elementi che la compongono a seconda della sua origine e del percorso evolutivo all'interno del ciclo complesso di cui fa parte.

La geochemica isotopica utilizza le relazioni note tra le variazioni relative di concentrazione degli isotopi ed i meccanismi naturali che le hanno determinate, per tracciare l'origine ed il percorso evolutivo dell'acqua. La condizione necessaria per poter procedere a valutazioni di questo tipo è, ovviamente, quella di avere a disposizione il maggior numero possibile di valori di composizione isotopica di campioni rappresentativi.

Gli atomi di ossigeno e di idrogeno hanno ciascuno tre isotopi. Per quanto concerne l'ossigeno, soltanto due di essi, ^{18}O e ^{16}O , sono misurati ed utilizzati sistematicamente sotto forma di rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. L'idrogeno viene invece misurato attraverso il rapporto $^2\text{H}/^1\text{H}$, mentre il rimanente isotopo, ^3H o Tritio, costituisce individualmente un parametro indipendente sfruttato per datare le acque.

Gli isotopi si distinguono in stabili ed instabili, o radioattivi. Mentre ^{18}O , ^{16}O , ^2H ed ^1H sono isotopi stabili, il Tritio è radioattivo, ovvero la sua concentrazione naturale tende a decrescere a partire dal momento della sua formazione secondo una legge esponenziale ben conosciuta.

La composizione degli isotopi stabili, espressa attraverso le notazioni $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, che esprimono una misura della concentrazione del nuclide 18 dell'ossigeno, e del nuclide 2 dell'idrogeno, rispettivamente contenuti nella molecola di H_2O , rappresenta il tracciante naturale più significativo dell'acqua.

Questa constatazione deriva direttamente dai seguenti principi fondamentali:

- la composizione isotopica delle precipitazioni meteoriche varia in modo prevedibile in funzione di parametri fisici, climatici e morfologici misurabili come: la temperatura, la quota, la distanza dal mare, la direzione dei venti prevalenti ecc.;



- le acque sotterranee, una volta infiltratesi, tendono a mantenere inalterata la propria composizione isotopica originaria quando la temperatura di confinamento è prossima a quella dell'ambiente superficiale;
- le acque superficiali, a meno di casi particolari, sono rappresentative della composizione isotopica delle precipitazioni e rappresentano il tramite idrologico diretto tra acque sotterranee ed acque meteoriche.

Da questi principi discende che, essendo la composizione isotopica dell'acqua controllata principalmente da processi meteorici, le acque di alimentazione dei sistemi sotterranei hanno una composizione che è specifica ed indicativa dell'area di ricarica. Perciò, ad aree morfologicamente ben differenziate (ad esempio in termini di quota altimetrica), corrispondono precipitazioni con composizione isotopica diversa, e quindi è lecito attendersi anche che le acque sotterranee ad esse riconducibili conservino la "memoria isotopica" di questa differenza iniziale.

L'utilizzo degli isotopi instabili, quali il tritio (^3H) ed il ^{14}C , in aggiunta a quelli stabili già discussi, può fornire ulteriori indicazioni, principalmente legate alla lunghezza ed ai tempi di percorrenza dei circuiti idrologici investigati, ovvero alle dimensioni dei bacini idrogeologici interessati dalla ricarica.

In particolare, il Tritio oggi viene utilizzato per valutare l'esistenza di infiltrazioni locali, ovvero la presenza di acque che hanno circolato nel sottosuolo per brevi periodi di tempo, generalmente inferiori a circa 50 anni.

Il Carbonio-14, invece, in virtù del suo tempo di dimezzamento piuttosto lungo (circa 5570 anni), viene utilmente impiegato per stimare la presenza di acque relativamente vecchie, con età dell'ordine di diverse migliaia di anni.

Vantaggi e limiti del metodo

Gli isotopi stabili dell'ossigeno e dell'idrogeno sono i migliori traccianti naturali dell'acqua dei sistemi idrogeologici, perché estraggono informazioni sulla sua origine ed evoluzione, nel tempo e nello spazio, direttamente dalla configurazione strutturale della molecola di H_2O . Per questo motivo si può assumere che, in prima approssimazione, essi non risentano di tutta una serie di processi secondari, legati al trasporto dei fluidi nei mezzi porosi e/o fratturati, ai quali si possono assimilare i mezzi geologici (ovvero i suoli e le rocce), che, invece, possono modificare, talvolta in modo anche cospicuo, la composizione dei componenti disciolti in fase acquosa. Questa differenza di comportamento rende ragione della complementarietà degli studi isotopici e chimici programmati.

L'entità delle differenze di composizione isotopica tra acque di origine diversa è generalmente tale da permettere, anche in aree geograficamente ristrette, di discriminare tra eventuali componenti diverse. Al contrario, l'eventuale mancanza di una apprezzabile differenziazione dei valori di composizione isotopica tra acque di diversa provenienza geografica può indurre ad ipotizzare l'esistenza di connessioni sotterranee fra aree non direttamente limitrofe.

Le elevate sensibilità ed accuratezza raggiunte oggi dei metodi di analisi isotopica costituiscono, inoltre, una garanzia ulteriore circa l'efficacia del metodo.

Comunque, nei casi di più difficile interpretazione è spesso efficace abbinare il dato proveniente dalle analisi chimiche a quello isotopico.

Il grado di attendibilità della risposta derivante dall'applicazione delle metodologie geochemiche ed isotopiche, ovvero il contributo da esse fornito alla definizione di un modello idrologico del sistema indagato, è necessariamente legato al numero ed alla significatività dei campioni prelevati, alla qualità delle determinazioni di campagna e delle analisi effettuate, nonché alla disponibilità di un adeguato numero di



informazioni accessorie (geologiche, strutturali, idrogeologiche, ecc.) che contribuiscano ad aumentare il grado di conoscenza generale al contorno.

IL PROGETTO E SUO SVILUPPO

Sviluppo del progetto

Il programma di lavoro è stato inizialmente definito su base annuale. Sono stati preliminarmente previsti cinque campionamenti per punto, al fine di poter individuare le eventuali variazioni stagionali. I punti sono stati selezionati tenendo conto dei risultati ottenuti nella prima fase del Progetto, con l'intento di garantire un ampliamento dell'area di lavoro ed al contempo ottimizzare le attività di terreno.

Il programma di lavoro iniziale ha subito una naturale evoluzione nel tempo. Ferma restando la tipologia di analisi di campo e di laboratorio da effettuare, durante lo svolgimento della seconda parte del Progetto si è agito sul numero e sulle frequenze dei punti da campionare (tabella 1), mantenendo fissi gli obiettivi da perseguire. In particolare:

- si è eliminato dal programma la sorgente Molinuccio, in quanto priva di portata per la maggior parte dell'anno;
- sono stati aggiunti due punti nella valle del Muccione ed alcuni punti nella galleria degli Allocchi (Faentina), campionati "a spot". Trattandosi, infatti, di zone di nuovo inserimento, era necessaria l'esecuzione di qualche punto di campionamento in più in fase iniziale, al fine migliorare la base conoscitiva e di indirizzare meglio i successivi campionamenti;
- sono state riverificate le tempistiche, soprattutto a seguito delle particolari fasi di lavorazione in galleria (termine lavori civili, posa ballast e binari, elettrificazione), che hanno sensibilmente condizionato i campionamenti. Nell'area del Molinuccio, un parziale condizionamento è stato causato dalla necessità dell'ausilio dei tecnici Publiacqua per i campionamenti;
- il particolare interesse dei campionamenti delle acque in galleria, nonché la loro "irripetibilità", ha suggerito l'effettuazione, su tali punti, di un set complessivo di sei campionamenti, anziché cinque, per migliorare la comprensione dell'evoluzione di queste acque.

Si è evidenziata la necessità, in conseguenza delle valutazioni di cui sopra, e al fine di ottenere un dataset finale soddisfacente e significativo, in particolare per i punti di galleria, di effettuare gli ultimi prelievi nel mese di gennaio, con conseguente slittamento nella consegna dei risultati analitici, in particolare della parte isotopica che necessita di tempi di analisi più lunghi.

La mappa dei punti di campionamento è riportata in allegato.



Tabella 1 – programma dei campionamenti, aggiornato

	Progr	Sigla	sigla breve	Nome	gen-07	feb-07	mar-07	apr-07	mag-07	giu-07	lug-07	ago-07	set-07	ott-07	nov-07	dic-07	gen-08
T	53,400	FIP-EN-00	F05	Ensa Basso				1		1			1		1		1
T		FIP-MU-00		Torrente Muccione					1				1				
T	52,500	FIP-RA-01	F02	Rampolli Alto						1			1		1		1
G	47,812	GAL-47+812	G01	Galleria T13-02		1		1			1		1		1		1
G	50,530	GAL-50+530	G03	Galleria T12-00		1		1			1		1		1		1
G	52,175	GAL-52+175	G05	Galleria T11-01		1		1			1		1		1		1
G	52,830	GAL-52+830	G06	Galleria T11-02		1		1			1		1		1		1
G	53,215	GAL-53+215	G07	Galleria T11-04		1		1			1		1		1		1
G	54,116	GAL-54+116	G11	Galleria T11-09		1		1			1		1		1		1
G		GAL-AL-02	GAS	galleria Allocchi imbocco sud				1						1			
G		GAL-AL-03	GAN	Galleria Allocchi imbocco nord				1									
G		GAL-AL-04	GAF	galleria Allocchi fontanello				1									
G		GAL-AL-05	GAA	galleria Allocchi Aereazione 53+500				1						1			
G		GAL-AL-06	GAC	galleria Allocchi Centro 53+050				1									
G		GAL-AL-07	GAE	Galleria Allocchi imbocco nord (l.est)				1									
G		GAL-AL-08	GA1	galleria Allocchi 50+900										1			
P		PSP-SC-91	P01	Pozzo Molinuccio 1				1					1			1	
P		PSP-SC-93	P03	Pozzo Molinuccio 3				1			1		1				
P		PSP-SC-94	P04	Pozzo Molinuccio 4				1			1		1			1	
S	51,910	PSS-BL-17	S07	Fonte Fosso Rampolli				1		1			1		1		1
S	52,415	PSS-BL-18	S08	Capannone Ovest				1		1			1		1		1
S	52,020	PSS-BL-72	S16	Casaglia 4				1		1			1		1		
S	51,020	PSS-FA-20	S03	Fonte del Guardia	1		1		1				1		1		1
S	49,250	PSS-FA-99	S01	Badia Moscheta 2			1						1				1
S		PSS-VI-00	S17	Sorgente Muccione					1				1				
S		PSS-VI-01	S18	Muccione Cinghiali					1*				*				

	=prelievo e analisi chimiche standard
1	=analisi isotopiche
*	=an.chimiche non effettuate x impossibilità campionamento non contaminato

TOTALE PRELIEVI	96
TOTALE ANALISI ISOTOPICHE	93
TOTALE ANALISI CHIMICHE	94

Attività svolta

Nell'arco della seconda fase del progetto (dic 2006- gen 2008) sono stati effettuati prelievi in 26 punti di campionamento, di cui 21 con ripetizioni regolari. In particolare sono stati effettuati:

- 96 campionamenti, per ognuno dei quali, di norma, sono stati raccolti n.1 campione da 1000 ml, n.1 campione da 500 ml e 1 campione da 100 ml, nonché effettuate misure di campagna (pH, conducibilità, temperatura, portata / livello), per un totale di 297 campioni prelevati e 377 parametri di campagna misurati;
- 91 analisi chimiche, determinando pH, Conducibilità, Ca^{2+} , Na^{+} , K^{+} , Cl^{-} , SO_4^{2-} , HCO_3^{2-} , nonché alcune analisi a spot per SiO_2 e NO_3^{-} , per complessivi 828 parametri di laboratorio misurati;
- 93 analisi isotopiche di Tritio e altrettante di O18, oltre a 22 analisi di deuterio, per complessive 205 misure isotopiche;

E' stato rispettato quanto previsto nel progetto iniziale, ed in più sono state effettuate alcune analisi a spot per SiO_2 per completare il quadro conoscitivo.

In totale, fra 1^a e 2^a fase del progetto, sono stati effettuati prelievi in 46 punti di campionamento, di cui 37 punti con analisi ripetute con cadenza regolare e 9 prelevati "una tantum" per situazioni particolari (es. campioni di controllo). Complessivamente, nelle due fasi, sono stati prelevati 732 campioni, effettuate analisi su 2260 parametri chimici di laboratorio, effettuate 861 determinazioni di campagna ed effettuate 559 analisi isotopiche.



I dati sono stati gestiti con database appositamente creato nella prima fase (cui si rimanda per i dettagli), al quale sono state apportate alcune modifiche funzionali. E' stato, inoltre, trasferito il precedente sistema GIS su piattaforma ArcGis.

PRESENTAZIONE E DISCUSSIONE DEI DATI

Nella presente sezione vengono illustrati e discussi i dati rilevati nella seconda fase del progetto, anche in relazione ai dati del 2004, per i punti già campionati nella prima fase, con l'aggiunta di considerazioni specifiche per i punti di nuovo campionamento.

In particolare, i dati vengono presentati e discussi fornendo:

- informazioni d'insieme utili alla caratterizzazione generale del sistema, ovvero presentando diagrammi utili alla descrizione della variabilità geochemica complessiva osservata nell'arco, sia della prima, che della seconda fase del progetto;
- informazioni aggiuntive derivanti dall'interpretazione dei dati raccolti nell'ambito della seconda fase del Progetto, ponendo attenzione alle variazioni di comportamento del sistema desunte sulla base dei dati più recenti.

Per garantire coerenza con il Rapporto finale della prima fase del Progetto, laddove è stato ritenuto tecnicamente rilevante, si è proceduto a mantenere la stessa sequenza di elaborazioni presentata nel precedente Rapporto.

Dati chimici

Presentazione dei dati

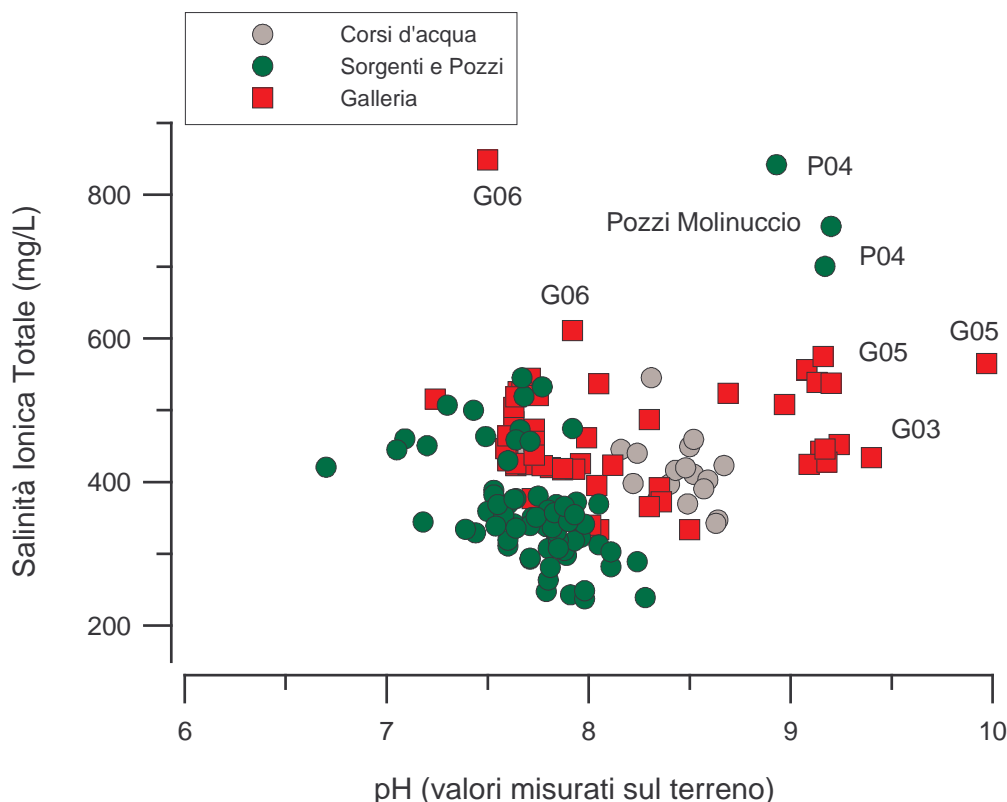
Una preliminare valutazione delle caratteristiche chimiche delle acque campionate viene effettuata attraverso l'analisi delle variazioni dei valori di pH e della salinità ionica totale, misurati in sito.

I dati relativi sono riportati in figura 5.

La dispersione dei punti all'interno del diagramma non evidenzia alcuna correlazione tra i due parametri, ma permette di individuare alcuni aspetti chimici caratterizzanti e diverse anomalie significative descritte a seguire:

- la variazione di pH considerata su tutti i campioni disponibili, senza distinzioni in base al tipo di manifestazione campionata, è molto ampia; i valori di questo parametro cadono all'interno dell'intervallo 6,7-10 e sono indicativi di condizioni variabili da neutre a fortemente alcaline; tale intervallo si riduce significativamente quando le acque di galleria (6,7-10) e del pozzo P04 della zona del Molinuccio (valori compresi tra 8.8 e 9.3) vengono escluse dal conteggio: l'intervallo delle sorgenti è, infatti, compreso tra un minimo di 6,8 ed un massimo di 8,4, mentre quello dei corsi d'acqua oscilla tra 7,8 ed 8,7;

Figura 5 – grafico Salinità / pH



- la variazione della salinità ionica è relativamente ristretta, con valori compresi tra 237 e 848 mg/L; le acque della galleria (330-581 mg/L) e del pozzo P04 della zona del Molinuccio (tra 700 e 841 mg/L) sono generalmente più saline di quelle delle sorgenti (238-508 mg/L), mentre quelle dei corsi d'acqua superficiali tendono ad avere valori di salinità intermedia (314-574 mg/L); tra le acque di galleria si segnala la forte variabilità di salinità del punto G06, corrispondente alla progressiva 52+830, dove sono stati misurati valori compresi tra 427 ed 848 mg/L;
- una peculiarità chimica del sistema in esame è la presenza in galleria di alcune acque con valori di pH fortemente alcalini (>8,5, fino a 10); questi campioni sono riconducibili ad acque prelevate in corrispondenza di due soli punti di monitoraggio (G3 e G5), ubicati nella porzione centrale della galleria (progressive 50+530 e 52+150); queste acque sono caratterizzate da tenori di salinità tra loro significativamente diversi (G3=438±14 mg/L; G5=560±22 mg/L), ma costanti nel tempo;
- un'altra anomalia di rilievo è rappresentata dalla presenza di quattro campioni di acque superficiali (corsi d'acqua) con salinità elevata (circa 555±10 mg/L); tutti questi campioni sono riconducibili allo stesso punto di prelievo F3, ma in questo caso il comportamento anomalo ha carattere discontinuo nel tempo, come testimonia la presenza di altri due campioni prelevati dallo stesso punto, con valori di pH simili (8,0 e 8,1 contro 8,3), ma salinità decisamente più basse (402-421 mg/L).

Classificazione chimica

La classificazione chimica delle acque campionate viene effettuata attraverso una serie di diagrammi triangolari (figg. 6 e 7) e quadrati di Langelier-Ludwig (figg. 8÷10)



I diagrammi triangolari contengono tutti i campioni disponibili senza distinzione di periodo di campionamento, e sono proposti con l'intento di mettere in risalto le differenze di facies idrochimica tra le tre principali famiglie di acque prese in considerazione in questo studio: galleria, sorgenti e pozzi, corsi d'acqua.

I diagrammi quadrati di Langelier-Ludwig, invece, sono stati elaborati separatamente per ciascuna delle tre famiglie di acque in modo da distinguere i campioni disponibili in funzione del periodo di campionamento. Questa modalità di rappresentazione permette di mettere in risalto la variabilità/stabilità composizionale del sistema in funzione del tempo (confronto di campioni analizzati, sia nella prima, che nella seconda fase del Progetto), e l'omogeneità/disomogeneità composizionale dei punti di prelievo di nuovo campionamento rispetto a quelli già studiati nella prima fase del Progetto.

Le concentrazioni relative degli anioni (fig. 6) mostrano una marcata prevalenza degli ioni carbonato e bicarbonato rispetto al solfato ed ai cloruri, indipendentemente dal tipo di manifestazione presa in considerazione. È rilevante osservare che a causa degli elevati valori di pH riscontrati (fino ad un massimo di circa 10 in galleria) le condizioni di speciazione variano in modo considerevole e con esse anche i rapporti di predominanza delle diverse forme del carbonio inorganico disciolto in soluzione acquosa (prevalenza di HCO_3^- per valori di pH prossimi alla neutralità, prevalenza di CO_3^{2-} per valori marcatamente alcalini). Per questo motivo, anche se nella successiva trattazione verrà usato lo ione bicarbonato (HCO_3^-) come specie rappresentativa del carbonio inorganico totale disciolto (TDIC), sarà sempre necessario tenere in considerazione che questa è una rappresentazione di mera convenienza che sottintende le considerazioni di speciazioni sopra citate.

Una caratteristica comune a tutte le acque dell'area investigata è, inoltre, la presenza di bassi tenori di cloruro, indipendentemente dalle presunte differenze dei tempi di circolazione sotterranea delle manifestazioni campionate. Questo conferma (vedere Rapporto finale della prima fase del progetto) che la clorinità non può essere utilizzata come parametro rappresentativo della progressiva "maturazione" geochemica delle acque circolanti nel sottosuolo. La piccola anomalia positiva di Cl riscontrata in un punto di prelievo di un corso d'acqua (campione F1 - Torrente Veccione) è stata già discussa nel Rapporto finale della prima fase del Progetto, ed è attribuibile a probabili fenomeni di contaminazione antropica.

La variabilità dei tenori in solfato è principalmente ascrivibile alla presenza di una anomalia positiva associata al punto di prelievo G06 in galleria. Questo punto è contraddistinto da valori di salinità ionica totale elevati in valore assoluto e molto variabili nel tempo. La natura di questa anomalia non può essere discussa sulla base dei dati attualmente a disposizione e rappresenta un aspetto di possibile approfondimento per eventuali ulteriori studi idrogeologici e geochemici. Tra le ulteriori analisi necessarie per affrontare il tema specifico potrebbero essere messe in preventivo determinazioni di composizione chimica e mineralogica delle rocce, e misure di composizione isotopica dei solfati in fase acquosa ($\delta^{18}\text{O}\text{-SO}_4$ e $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4$) e dello zolfo minerale eventualmente presente nel sottosuolo (solfuri e/o solfati). Il fatto che, comunque, questa anomalia non si registrasse nella prima fase del progetto, unita all'ampia variabilità dei valori registrati nella seconda fase, pone la necessità di focalizzare l'attenzione anche su fattori non geologici. È infatti plausibile per questo punto una possibile contaminazione dei campioni data la difficoltà di campionamento, così come è da considerare la possibilità di rilasci in soluzione acquosa di elementi estranei provenienti dagli interventi effettuati per l'installazione delle valvole del sistema a drenaggio controllato.



Fig. 6 – diagramma ternario anioni

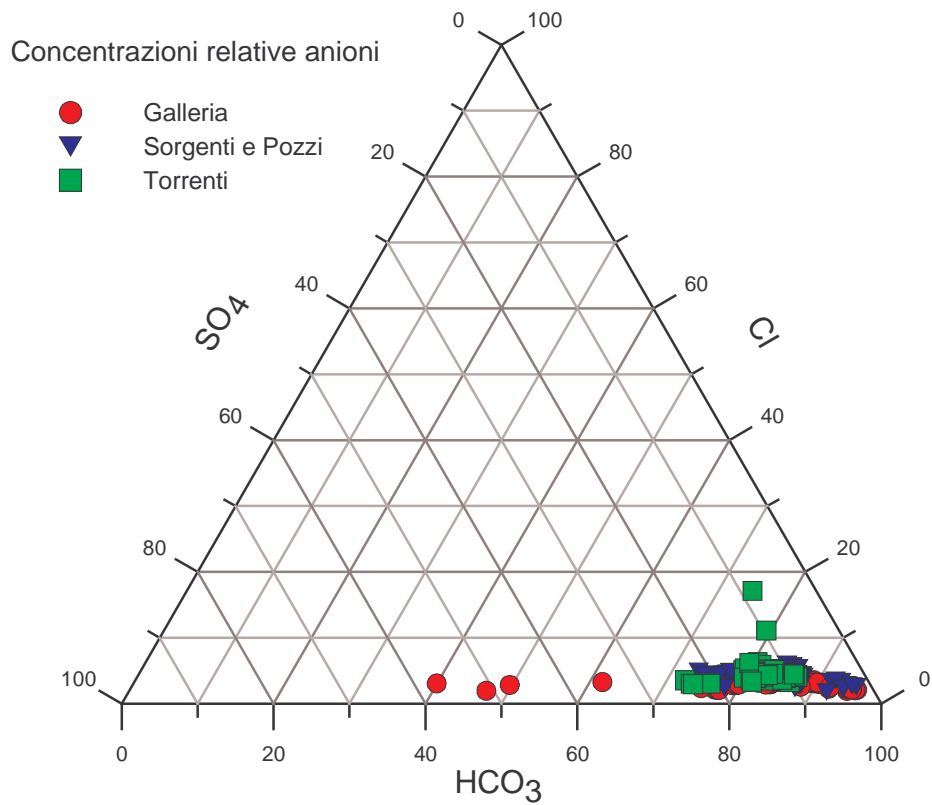
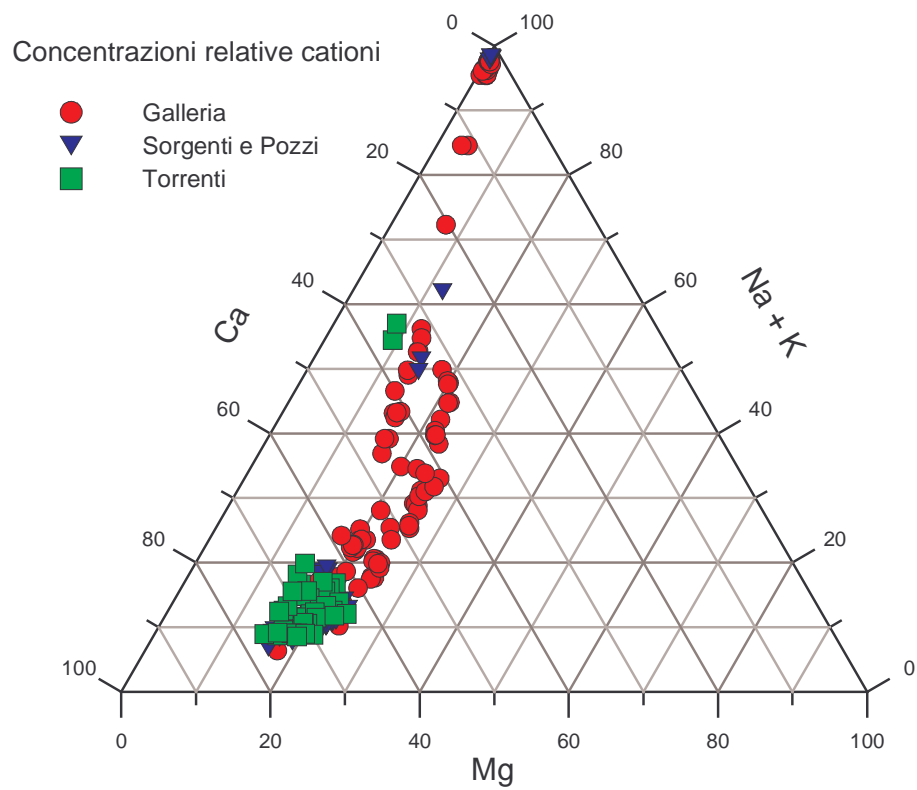


Fig. 7 – diagramma ternario cationi





Le concentrazioni relative dei cationi (fig.7) mostrano l'esistenza di una significativa dispersione dei punti rappresentativi tra il termine calcico ed il termine alcalino (con Na largamente predominante su K in tutte le acque analizzate).

In particolare, si osserva che:

- la maggioranza delle acque di scorrimento superficiale e delle sorgenti ricade nel campo di predominanza del Ca;
- le acque sotterranee di galleria definiscono una nube di punti che va dalla zona delle acque superficiali fino al vertice degli alcali;
- le acque dei pozzi del Molinuccio (*in primis* il punto P04, ed *in secundis* il punto P03) sono caratterizzate da anomali arricchimenti in alcali.

Questi andamenti sono coerenti con il quadro compositivo definito nella prima fase del Progetto, e suggeriscono l'esistenza di una affinità geochemica significativa, da sottoporre ad ulteriori verifiche, tra le acque della parte più centrale della galleria (punti G03, G04, G05) e quelle della zona del Molinuccio.

I diagrammi quadrati di Langelier-Ludwig riportati nelle figure 8, 9 e 10 sintetizzano le osservazioni fatte in precedenza fornendo una classificazione chimica quantitativa delle acque.

La posizione dei campioni all'interno di questi grafici è ottenuta innanzitutto calcolando la somma degli equivalenti cationici (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+) ed anionici (HCO_3^- , CO_3^{-2} , Cl^- , SO_4^{-2}) principali:

$$\begin{aligned}\text{cationi} &= \text{EQUIV}_{\text{Ca}^{+2}} + \text{EQUIV}_{\text{Mg}^{+2}} + \text{EQUIV}_{\text{Na}^+} + \text{EQUIV}_{\text{K}^+} \\ \text{anioni} &= \text{EQUIV}_{\text{HCO}_3^-} + \text{EQUIV}_{\text{CO}_3^{-2}} + \text{EQUIV}_{\text{Cl}^-} + \text{EQUIV}_{\text{SO}_4^{-2}}\end{aligned}$$

dove la sigla EQUIV sta ad indicare le concentrazioni in eq/L dei singoli ioni,

e successivamente le percentuali di ciascun catione o anione, come descritto a seguire per le variabili Na e $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$ utilizzate nei diagrammi delle figure 8, 9, 10:

$$\begin{aligned}\text{Na} &= 50 [\text{EQUIV}_{\text{Na}^+}] / \text{cationi} \\ \text{HCO}_3 + \text{CO}_3 &= 50 [\text{EQUIV}_{\text{HCO}_3^-} + \text{EQUIV}_{\text{CO}_3^{-2}}] / \text{anioni}\end{aligned}$$



Fig. 8 - diagramma di Langelier-Ludwig – corsi d'acqua (in grigio campioni fase I, in colore campioni fase II)

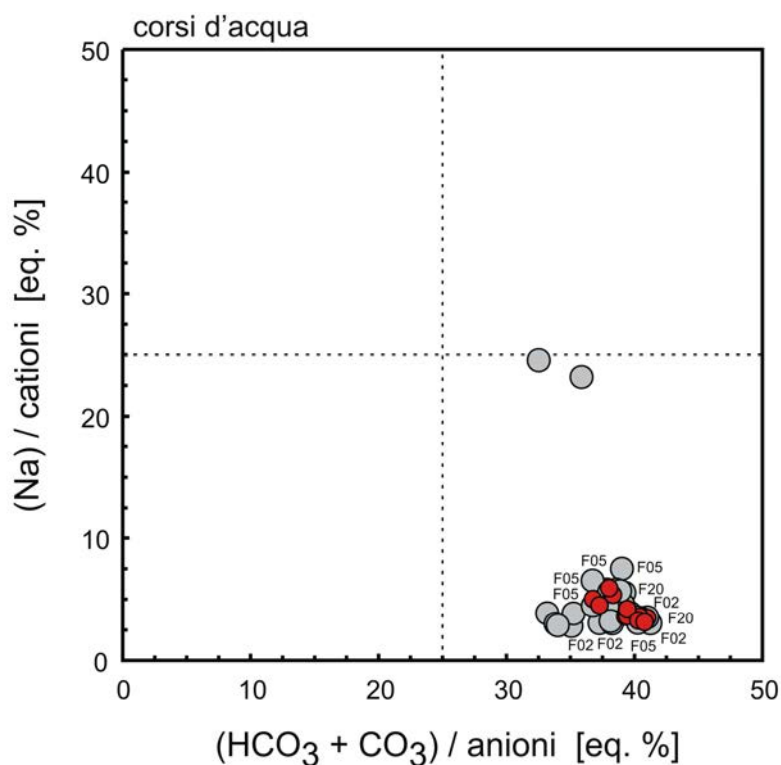


Fig. 9 - diagramma di Langelier-Ludwig – sorgenti e pozzi (in grigio campioni fase I, in colore campioni fase II)

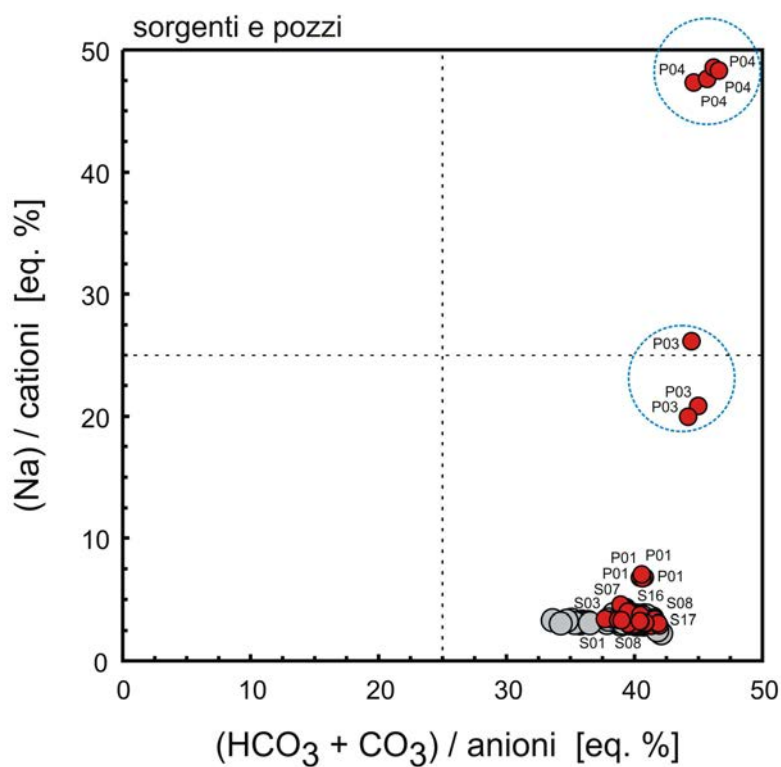
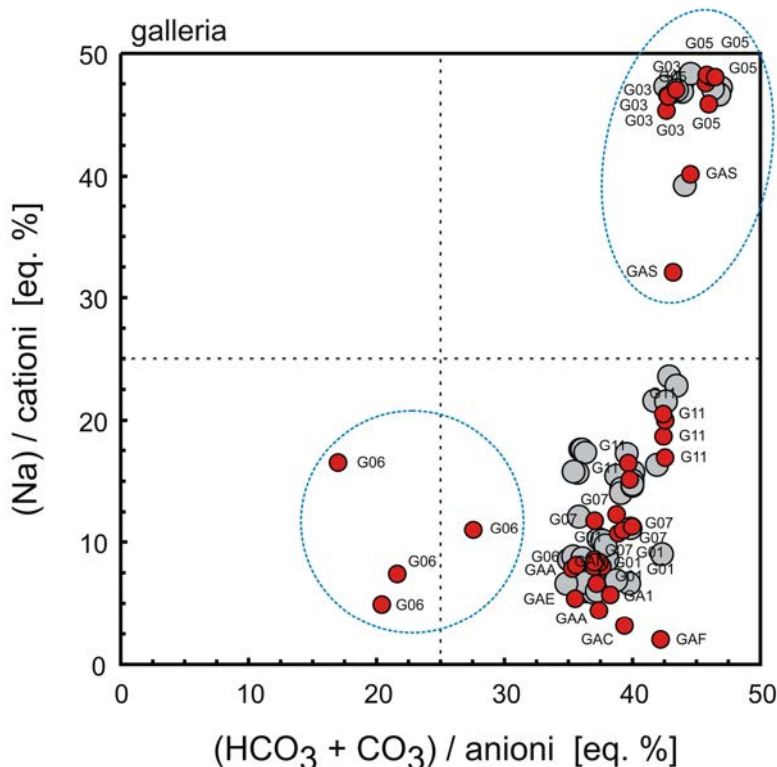




Fig. 10 - diagramma di Langelier-Ludwig – punti in galleria (in grigio campioni fase I, in colore campioni fase II)



Sulla base di questi diagrammi è possibile effettuare le seguenti osservazioni significative:

- già nella prima fase del progetto le acque dei corsi d'acqua superficiali hanno mostrato la tendenza a raggrupparsi nel campo di predominanza Ca-HCO₃-CO₃, definendo una famiglia sostanzialmente omogenea rispetto alla quale soltanto 2 campioni del punto F1 (Veccione Basso) hanno mostrato un comportamento anomalo, probabilmente in conseguenza di contaminazione antropica, come rilevato nel report della prima fase; i campioni prelevati durante la seconda fase del progetto, relativi ai punti F02 - Rampolli, F05 – Ensa ed al punto di nuovo inserimento F20 - Muccione (simboli rossi in figura 8) confermano questo andamento;
- le acque delle sorgenti costituiscono una famiglia idrochimica omogenea di tipo Ca-HCO₃-CO₃; soltanto i punti S10 (sorgente Razzuolo) ed S11 (sorgente Fontefredda) si differenziano per valori del rapporto (HCO₃-CO₃)/(SO₄-Cl) meno elevati del valore medio degli altri campioni; i campioni prelevati durante la seconda fase del progetto, relativi ai punti S01 – Badia Moscheta, S03 – Fonte del Guardia, S07 – Fosso Rampolli, S08 – Capannone Ovest, (simboli rossi in figura 9) confermano questo andamento; anche i punti di nuovo inserimento (sorgente Muccione S17, sorgente Casaglia S16) si pongono in quest'ambito di valori;
- le acque di galleria sono contraddistinte da una maggiore variabilità composizionale, e si distribuiscono nei campi di predominanza Ca-HCO₃-CO₃ ed Na-HCO₃-CO₃; questa variabilità è adeguatamente descritta in termini di variazione del rapporto Ca/Na, che passa da un valore massimo di circa 4,3 ad uno minimo di circa 0,02; questa variabilità ha, inoltre, una chiara connotazione areale, poiché la prevalenza della componente sodica si manifesta (con discontinuità spaziale) in modo più evidente nelle acque prelevate in concomitanza dei punti di prelievo G11, G3 e G5 (fig.10);

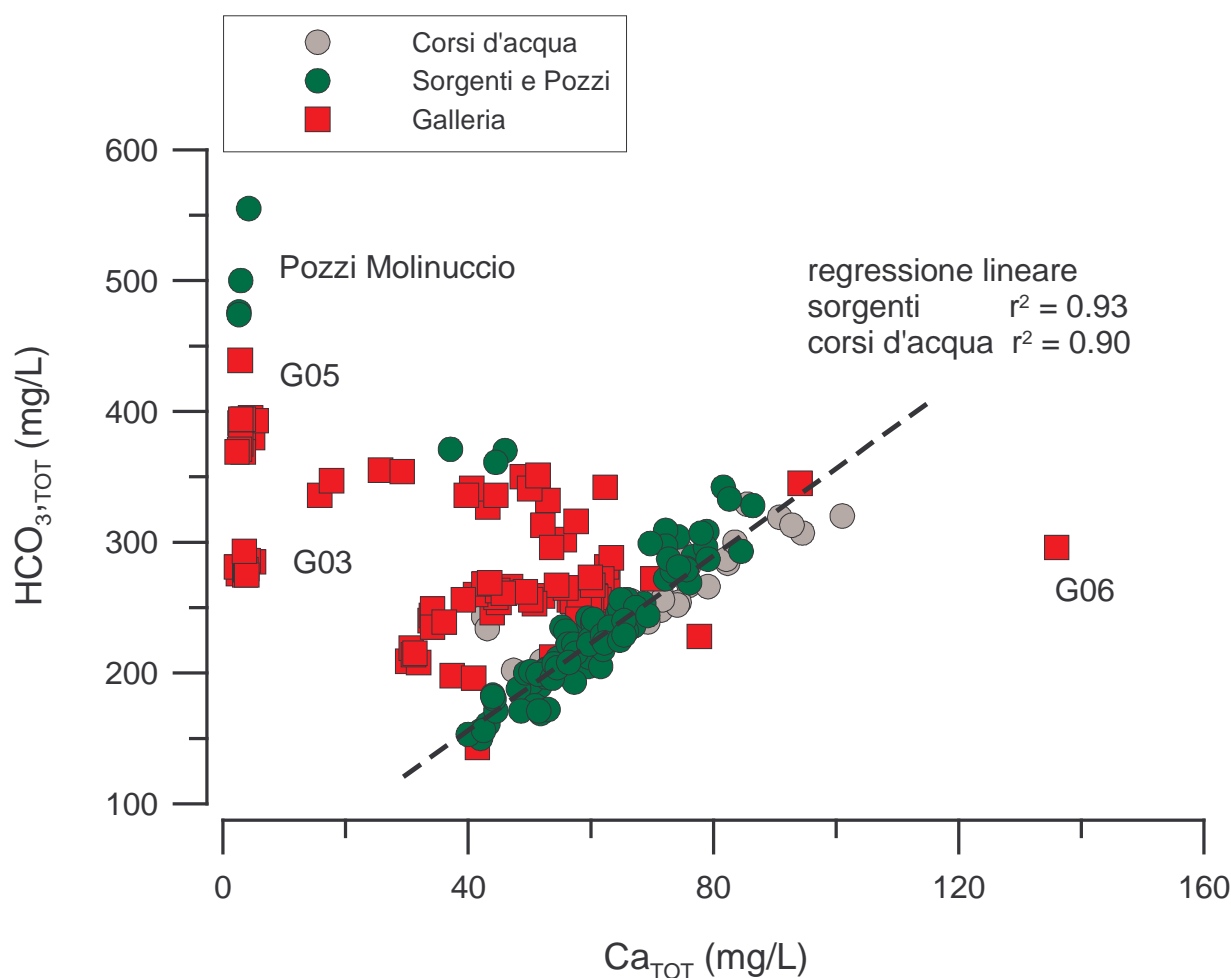


- le acque dei tre pozzi del Molinuccio si pongono in tre zone nettamente diverse e ben definite: pozzo 1 più vicino al campo $\text{Ca-HCO}_3\text{-CO}_3$ tipico delle acque superficiali, mentre il pozzo 4 si pone nettamente all'interno del campo di predominanza $\text{Na-HCO}_3\text{-CO}_3$, più tipico delle acque "mature" di galleria; il pozzo 3 si pone in posizione intermedia (fig.9);
- riguardo i campioni prelevati in corrispondenza della Galleria degli Allocchi (o Galleria dell'Appennino) lungo la tratta ferroviaria Faentina si nota come praticamente tutti i punti del lato nord si pongano nel campo $\text{Ca-HCO}_3\text{-CO}_3$ tipico delle acque superficiali, mentre il punto GAS (imbocco sud), già prelevato nella prima fase del progetto, conferma una ubicazione nel campo $\text{Na-HCO}_3\text{-CO}_3$ (fig.10).

Diagrammi di correlazione chimica

In considerazione della prevalenza della facies bicarbonato calcica delle acque campionate, una preliminare valutazione dei meccanismi naturali che controllano la composizione chimica delle acque viene effettuata attraverso il diagramma di correlazione Ca-HCO_3 di figura 11.

Fig. 11 - diagramma di correlazione Ca-HCO_3



I campioni delle sorgenti e dei corsi d'acqua si dispongono lungo rette con pendenza simile ed elevato coefficiente di correlazione ($r^2 = 0,93$ e $0,90$ rispettivamente per le sorgenti ed i corsi d'acqua). Ciò suggerisce



che il chimismo di queste acque è verosimilmente controllato da reazioni di idrolisi che interessano fasi mineralogiche di tipo carbonatico, in primis calcite. Sfuggono a questa correlazione soltanto due campioni prelevati in corrispondenza del punto F1, del cui comportamento anomalo è già fatto cenno in precedenza, e che per coerenza sono stati esclusi dalla regressione.

Le acque di galleria si discostano da questo trend di correlazione e mostrano un apprezzabile arricchimento in HCO_3^- associato a valori di concentrazione di Ca^{+2} progressivamente più bassi.

Queste evidenze indicano che il chimismo delle acque sotterranee drenate dalla galleria è controllato da meccanismi di reazione più complessi che vanno al di là del semplice equilibrio del sistema carbonatico. L'andamento complessivo elaborato sulla base di tutti i dati a disposizione ricalca quello già osservato durante la prima fase del progetto, e conferma l'esistenza di un spostamento arealmente più o meno marcato della composizione chimica delle acque di galleria dal termine composizionale carbonatico, tipico delle acque di scorrimento superficiale e delle sorgenti, verso un termine geochimicamente "più maturo", a caratterizzazione sodico-carbonatica. L'unica eccezione rispetto a questo andamento generalizzato è rappresentato dal campione G06, cui sono associati marcate variazioni temporali di composizione chimica, isotopica e di salinità, le cui cause, come accennato più sopra (pag. 19) possono essere legate a problemi di campionamento.

L'importanza della concentrazione del Na^+ come parametro caratterizzante del chimismo delle acque di galleria è testimoniata da una serie di elaborati già discussi nel Rapporto di fase I e di cui vengono qui richiamati soltanto gli elementi interpretativi più salienti. In particolare, in base ai tenori di Na, si possono individuare tre raggruppamenti principali di campioni di galleria con composizione omogenea nel tempo, rappresentati dalle acque dei punti G5, G3 e G11. Le prime sono più concentrate ed hanno tenori di Na^+ variabili tra 145 e 155 mg/L, mentre le ultime sono più diluite, ed hanno concentrazioni di Na^+ comprese tra 64 e 69 mg/L.

Come già discusso nel rapporto finale della prima fase del Progetto, cui si rimanda per i dettagli, si è tendenzialmente esclusa, sulla base dei dati a disposizione, la possibilità per il sodio di una eventuale origine di tipo antropico, in quanto le procedure di stabilizzazione del fronte di scavo tramite applicazione in pressione di silicati di Na inerti ("spritz"), sono state effettuate con le stesse modalità lungo l'intera galleria, ed è stato escluso dal costruttore l'utilizzo di altri composti e/o additivi chimici in grado di fornire in modo selettivo Na^+ alle soluzioni acquose circolanti.

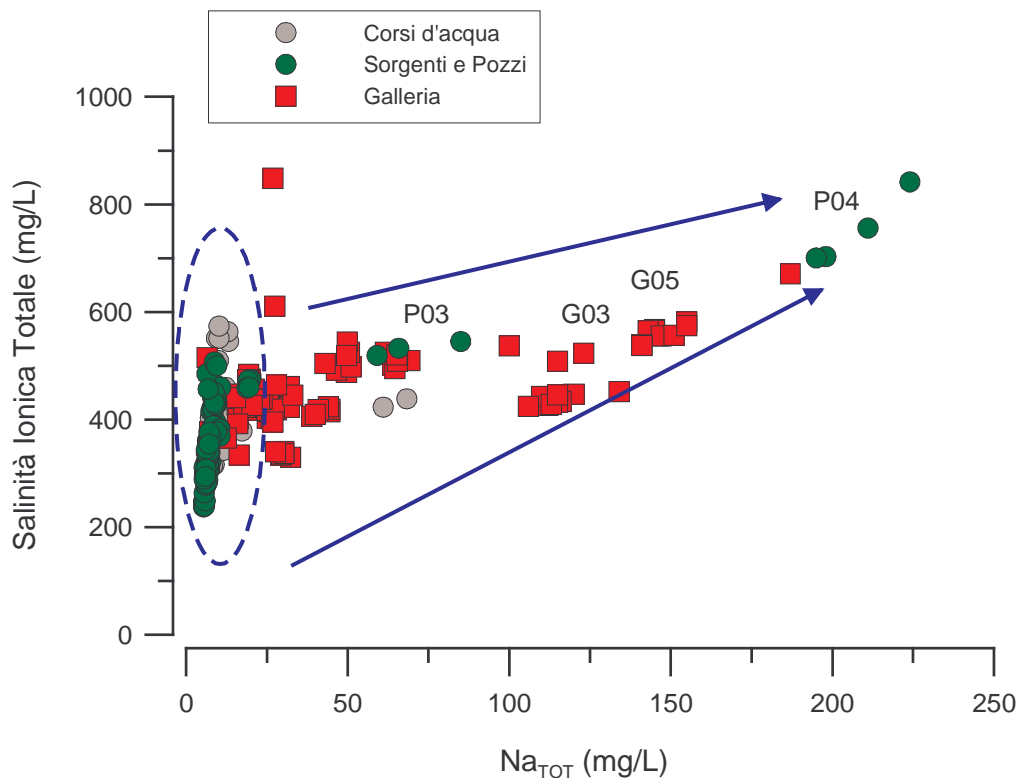
I diagrammi di correlazione Na-salinità (Figura 12) fornisce alcune ulteriori informazioni sulla circolazione sotterranea, riassumibili nel modo che segue:

- le acque prelevate in corrispondenza del punto G2, nel tratto di galleria a nord del sovrascorrimento tra Marnoso Arenacea e Complesso Caotico, rappresentano il termine estremo più diluito delle acque di galleria;
- le acque prelevate in corrispondenza dei punti G3 e G5, nel tratto intermedio di galleria compreso tra l'olistostroma e la Faglia di Ronta, hanno elevata salinità (la più alta dell'intera galleria, nel caso del punto G5, se si esclude il campione a comportamento anomalo G06), facies chimica Na-dominante, ed in virtù della loro stretta correlazione chimica possono essere ritenute rappresentative di una circolazione separata;
- le acque prelevate in corrispondenza dei punti G10 e G11 hanno una elevata salinità, ma anche una diversa correlazione Na-salinità rispetto ai punti G3 e G5; tali acque possono essere perciò ritenute rappresentative di percorsi di circolazione prolungati in condizioni diverse da quelle incontrate nel tratto intermedio della galleria;
- ad eccezione del punto anomalo G06 già discusso, tutte le acque di galleria analizzate nella seconda fase del progetto si dispongono all'interno del diagramma in modo coerente rispetto a questi andamenti generali;



- i campioni dei pozzi della zona del Molinuccio mostrano in qs. Grafico una dispersione allineata secondo il “trend di maturazione geochemica” identificato per i punti di galleria (v.oltre).

Fig. 12 – diagramma Na - salinità



I diagrammi di correlazione Ca-Na (Figura 13) e $\text{HCO}_3\text{-Na}$ (Figura 14) mettono in risalto come il processo di maturazione chimica delle acque, dovuto ad una prolungata circolazione sotterranea, sia accompagnato, oltre che da un incremento di Na^+ , anche da un aumento di concentrazione del HCO_3^- ed una diminuzione del Ca^{+2} . Il processo evolutivo è, inoltre, caratterizzato anche da un incremento del pH, che raggiunge valori decisamente alcalini (9,4), e da una diminuzione del contenuto in SO_4^{-2} ed in Mg^{+2} .

I minori discostamenti temporali osservati rispetto a questi andamenti generali non alterano il quadro interpretativo e sono per lo più imputabili a meccanismi di mescolamento con acque di più rapida infiltrazione e di più basso contenuto salino.

Come dimostrato in precedenza attraverso l'uso di diagrammi di correlazione binaria, questo andamento complessivo non può essere spiegato attraverso relazioni di equilibrio termodinamico all'interno di sottosistemi mineralogici semplificati, tipo quelli carbonatico, anidritico o feldspato-plagioclasico.



Fig. 13 – diagramma Ca-Na

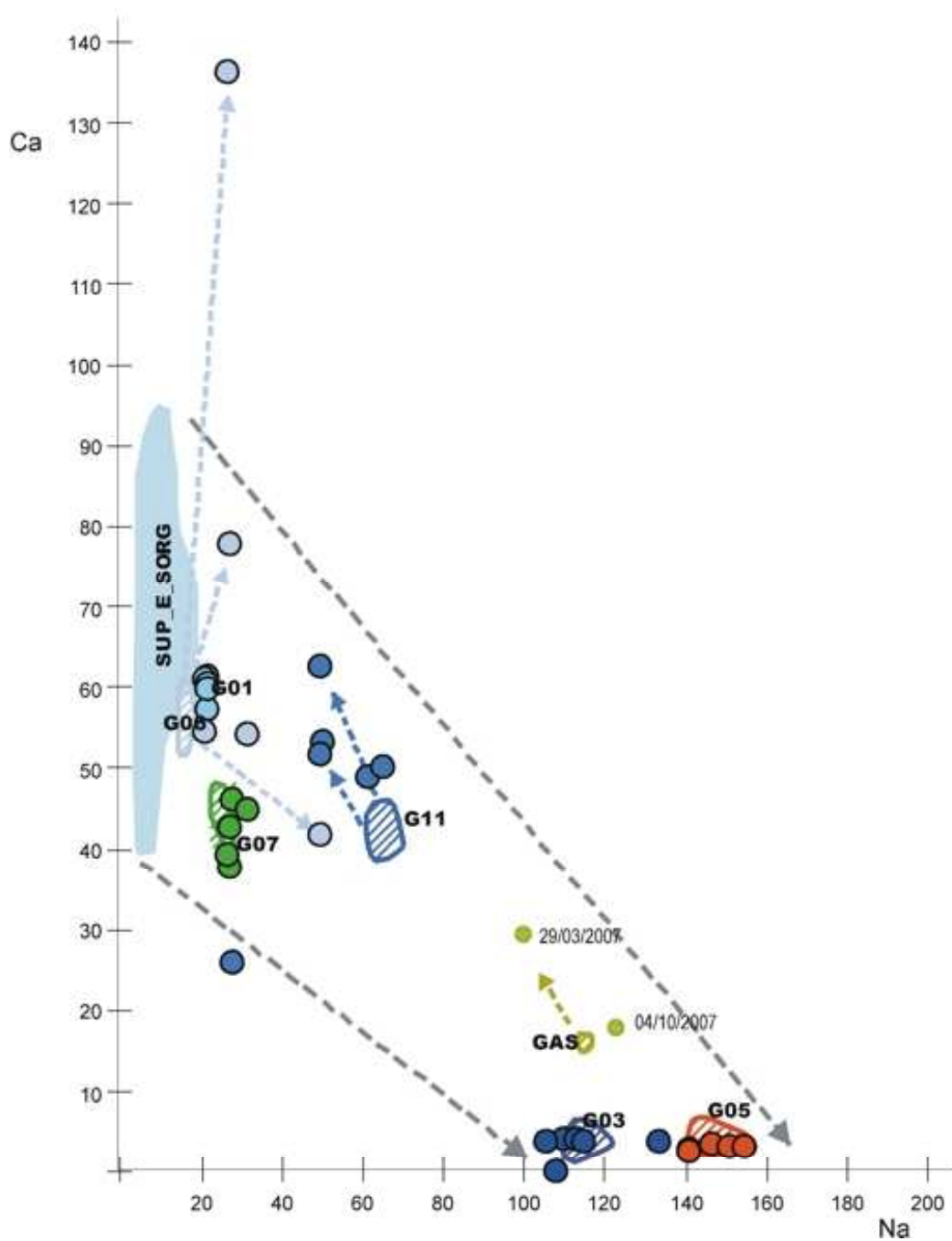
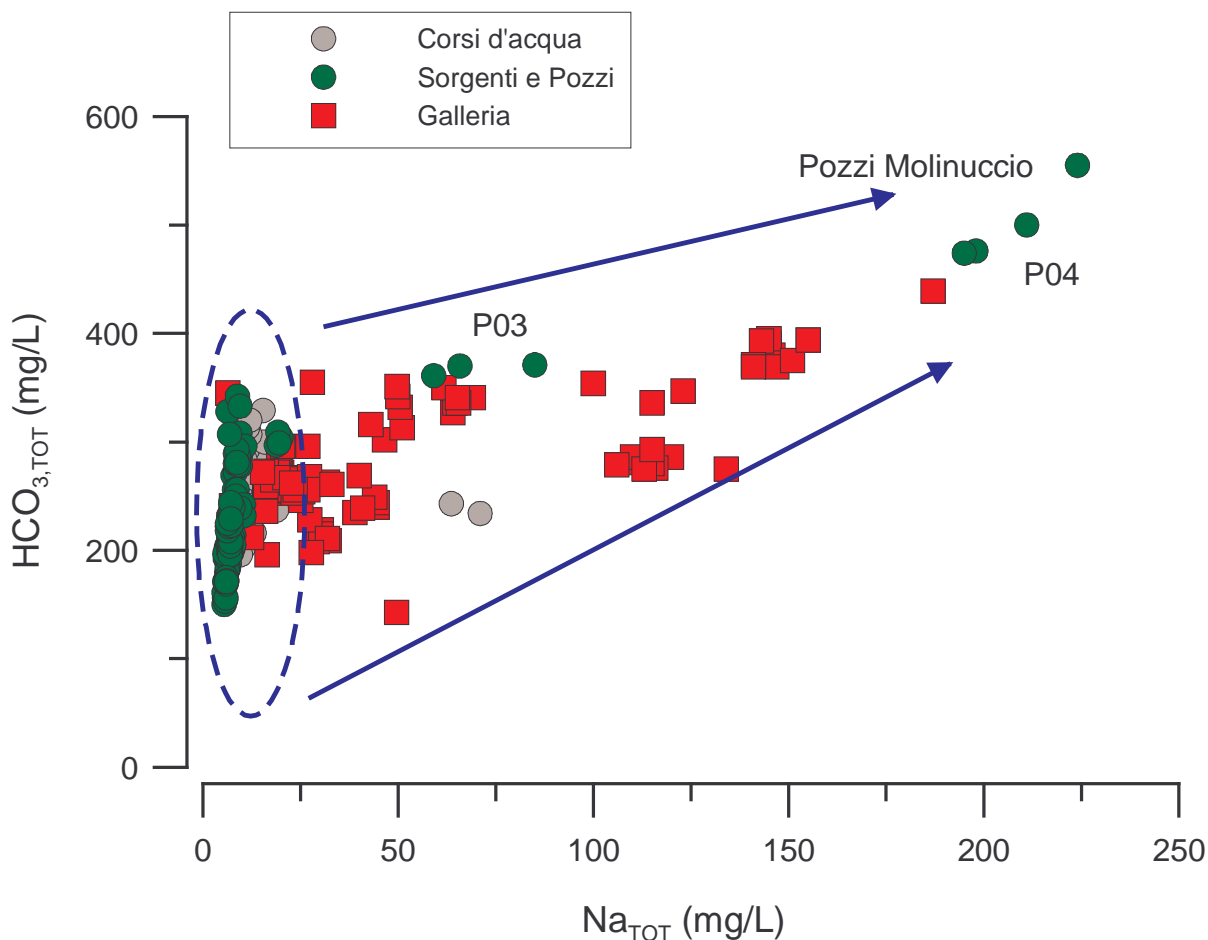


fig. 14 - Diagramma $\text{HCO}_3 - \text{Na}$



Pozzi Molinuccio

I pozzi dell'area del Molinuccio si pongono in un'area caratterizzata da particolare complessità. In questa zona si hanno, infatti, sovrascorrimenti ravvicinati che coinvolgono diverse unità indicate sulle cartografie CAVET come Marnoso Arenacea, Formazione di Castel Guerrino, Arenarie del Cervarola, Marne di Baigno, Complesso Caotico, e rispettivamente individuate sulla Cartografia Regionale come Formazione Marnoso Arenacea (membro di Premilcuore), Formazione del T.Carigiola, Formazione dell'Acquerino, Breccie Argillose del Giogo, Breccie Argillose poligeniche.

I dati del pozzo molinuccio 1 paiono indicare acque di rapida circolazione, insufficienti ad una "maturazione" chimica delle acque a contatto con le litologie attraversate.

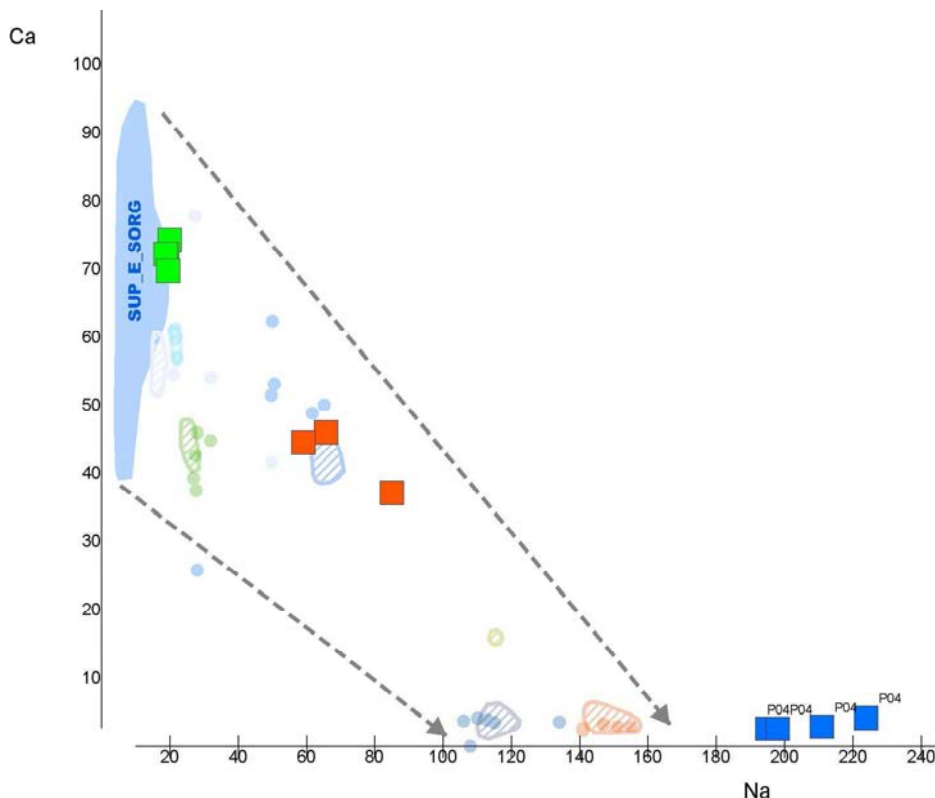
Il pozzo 3 risulta essere perforato per la quasi totalità nella formazione Marnoso Arenacea. Visti i valori registrati, pare opportuna una analogia con la galleria Firenzuola: i valori registrati dai pozzi si pongono infatti costantemente, sia a livello di facies idrochimica che nei diagrammi di correlazione chimica, in una posizione intermedia fra le acque superficiali e le acque più mature di galleria. Ciò può indicare che il pozzo estrae acque di media maturità, oppure, dato che il pozzo è fenestrato su più livelli, che le acque pompate siano il risultato di una miscela di acque più mature con acque di rapida infiltrazione.

Più complessa è l'analisi del pozzo 4. Tale pozzo mostra una facies idrochimica di tipo $\text{Na-HCO}_3\text{-CO}_3$ tipico delle acque più mature del tratto intermedio della galleria (G03, G05) della galleria Firenzuola TAV, così come analoghe indicazioni vengono dai diagrammi di correlazione chimica Na-Salinità e Na- HCO_3 (figg. 12 e 13),



che paiono addirittura suggerire il pozzo P04 come interessato da acque ancora più mature di quelle intercettate in galleria Firenzuola. Tuttavia, nel grafico Ca-Na (fig.15) i valori si pongono in posizione estrema, pressoché al di fuori del trend individuato nella prima fase del progetto, ed analoghe indicazioni vengono dal diagramma UT-Na (pag.43). Va considerato che il pozzo Molinuccio 4 è stato perforato formazioni diverse da quelle di galleria, e non è chiaro dai log di perforazione se abbia interessato la Formazione Marnoso Arenacea almeno nel suo ultimo tratto, o se, al contrario, non l'abbia interessata per niente. Pertanto questa "deriva" dei valori del pozzo Molinuccio 4 è verosimilmente ascrivibile alla diversità delle litologie acquifere da cui trae alimentazione.

fig. 15 - Diagramma Ca – Na con evidenziati i pozzi Molinuccio



Galleria Allocchi (Faentina)

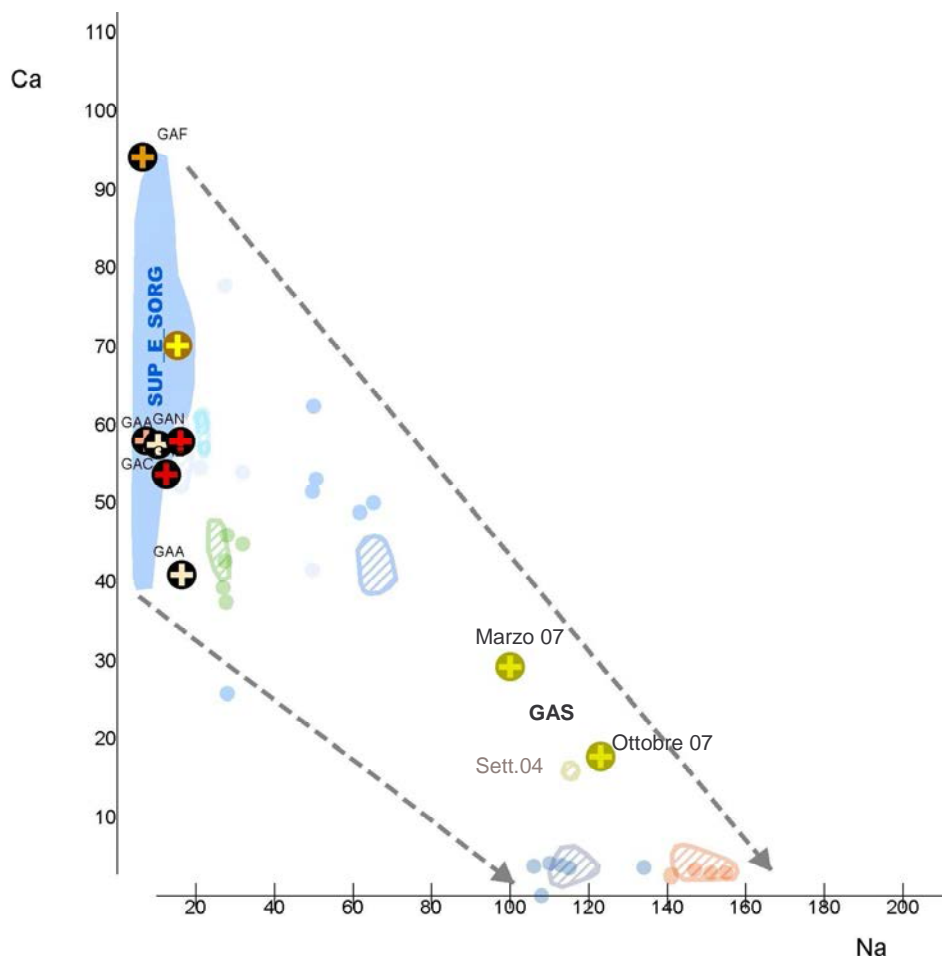
Il quadro chimico dell'area è completato dai campioni prelevati in corrispondenza della Galleria degli Allocchi (o Galleria dell'Appennino) lungo la tratta ferroviaria Faentina da Borgo San Lorenzo a Marradi (fra le stazioni di Ronta e Crespino nel Lamone).

Per questa galleria era già stato effettuato un unico campionamento nel 2004 nel punto GAS, corrispondente all'imbocco sud. Nella seconda fase si è effettuata la ripetizione del campionamento, e si è ricercata la possibilità di effettuare campionamenti su altri punti della galleria.

E' stato possibile effettuare campionamenti su alcuni punti del tratto a nord del cambio di livelletta (GAC, GAA, GAE, GAF, GAN), che hanno dato risultati nel campo tipico delle acque superficiali (fig. 16).



fig. 16 - Diagramma Ca – Na con evidenziati i dati relativi alla galleria Allocchi (Faentina)



Nel tratto sud si è ripetuto il campionamento presso il punto GAS , corrispondente alla canaletta di scarico della Galleria degli Allocchi. Questo campione non è riconducibile ad una singola manifestazione o venuta, e come tale può essere al massimo ritenuto rappresentativo di “condizioni medie” valide per il tratto di galleria (circa 2,5 Km) drenato dalla canaletta, a sud del cambio di livelletta. Questo punto ha confermato caratteristica di pH alcalino, salinità ionica totale e da una facies idrochimica di tipo $\text{Na-HCO}_3\text{-CO}_3$ (fig.10) comparabile con quella delle acque più mature (G03, G05) della galleria Firenzuola TAV. I tre campionamenti disponibili mostrano anche un andamento in accordo alla stagionalità, con valori più prossimi ad acque mature nel periodo di magra (sett.'04 e ott.'07) (fig.16) e valori significativi di un maggior contributo di acque superficiali nel periodo di ricarica (marzo '07). Date queste conferme si è anche tentato di trovare un possibile punto di campionamento in galleria legato a singola venuta: l'unico punto che è stato possibile campionare singolarmente nel tratto sud (GA1) ha reso valori ricadenti nel range delle acque superficiali, confermando per le acque del punto GAS un mescolamento con acque più mature provenienti da altri tratti del settore sud della galleria.

Considerazioni termodinamiche e simulazioni numeriche

Calcoli termodinamici più complessi, mirati alla descrizione delle interazioni chimiche che si sviluppano all'interfaccia tra rocce con composizione mineralogica analoga a quella della formazione Marnoso-Arenacea, ed una soluzione acquosa avente la composizione chimica media delle locali acque di sorgente, dimostrano che l'evoluzione dei principali componenti della fase acquosa (Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , SO_4^{-2} , HCO_3^- , pH) è coerente



con meccanismi di contemporanea dissoluzione di minerali come il quarzo, l'albite, la calcite, la dolomite, il K-feldspato e la clorite.

Il modello di reazione proposto è validato dal fatto che i minerali sopra citati fanno parte della suite mineralogica della Marnosa Arenacea, che come indicato da Gandolfi et. al. (1982), pur essendo dominata dalla frazione silicatica (quarzo, albite K-feldspato), è contraddistinta anche dalla presenza di abbondante cemento carbonatico interstiziale.

Descrizione dell'approccio metodologico

I calcoli sono stati effettuati utilizzando la composizione chimica media delle acque di ruscellamento superficiale ottenuta dalle analisi chimiche effettuate sui torrenti come soluzione acquosa iniziale.

Quest'acqua è stata fatta reagire (in termini di simulazione numerica) con quantitativi variabili di una ipotetica roccia tipo rappresentativa delle litologie presenti nella zona, *in primis* la Marnosa-Arenacea.

Questi quantitativi sono stati fatti variare iterativamente fino al raggiungimento di condizioni di *best fitting*. L'approccio utilizzato nei calcoli è di tipo termodinamico, ovvero è stato immaginato che il percorso reattivo avvenga secondo gradini di avanzamento infinitesimali che non dipendono dalle cinetiche di reazione dei diversi minerali, ma soltanto dalle quantità di minerali disponibili ad interagire con le soluzioni acquose.

Risultati

Il diagramma di figura 17 descrive i risultati di questi calcoli, esprimendo la variazione di concentrazione delle principali specie acquose in funzione della variazione del pH. I simboli (cerchi pieni) presenti all'interno del diagramma di figura 17 sono grossomodo rappresentativi, entro un margine quantificato dalla legenda, della composizione media delle acque del tratto centrale della galleria.

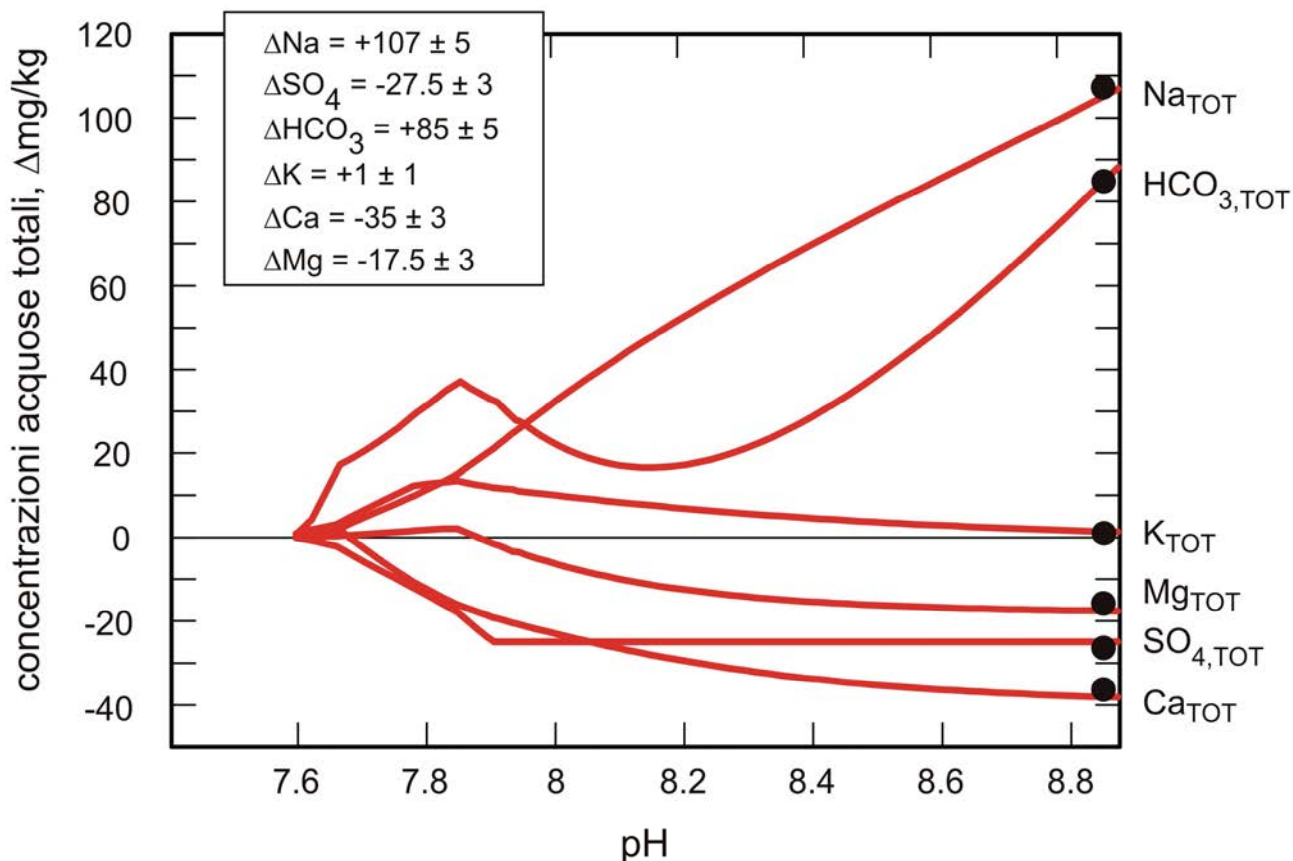
L'accordo tra questi valori analitici e quelli numerici rappresentati dalle curve evolutive della singole specie chimiche prese in considerazione, è un elemento a favore della plausibilità del modello geochemico evolutivo proposto per le acque di più lunga circolazione sotterranea. In altri termini, gli andamenti riportati nel diagramma mostrano che il progredire delle reazioni di idrolisi dei minerali della Marnosa Arenacea può portare ad acque marcatamente alcaline come quelle riscontrate nel tratto intermedio della galleria (punti G3 e G5).

Un dato interessante rispetto ai risultati di queste simulazioni numeriche è la relativa robustezza del modello rispetto a variabili difficilmente quantificabili sul terreno, ma geochemicamente rilevanti, come la pressione parziale di CO₂ (P_{CO2}). Questo si traduce nel fatto che il percorso reattivo calcolato risulta sostanzialmente stabile al variare della (P_{CO2}) entro valori tipicamente rappresentativi di condizioni subsuperficiali o sotterranee in contesti non termali, grossomodo compresi tra $10^{-5} < \log P_{CO2} < 10^{-2.5}$.

I limiti di questo approccio numerico sono innanzitutto legati alla scarsità di dati a disposizione sull'effettiva composizione mineralogica delle rocce dell'area di studio e sulla sua variabilità spaziale. Scenari evolutivi significativamente diversi potrebbero essere perciò predetti variando non solo questo tipo di dato di input, ma anche introducendo considerazioni di tipo cinetico.

Nonostante questo, il raggiungimento di un ragionevole *fitting* tra dato analitico e dato numerico in condizioni operative coerenti rispetto all'attuale grado di conoscenza del sistema naturale investigato (disponibilità di informazioni sul tipo di litologie interessate e composizione chimica dei fluidi), rappresenta un elemento rilevante a sostegno del modello concettuale di circolazione idrica proposto, basato sull'interpretazione del chimismo complessivo delle acque del tratto centrale della galleria come risultato di prolungate reazioni di scambio acqua-roccia.

fig. 17 – Variazione delle concentrazioni totali dei principali componenti disciolti in fase in relazione al pH secondo il modello teorico. Con cerchi neri sono evidenziati i valori medi misurati per le acque più mature di galleria.

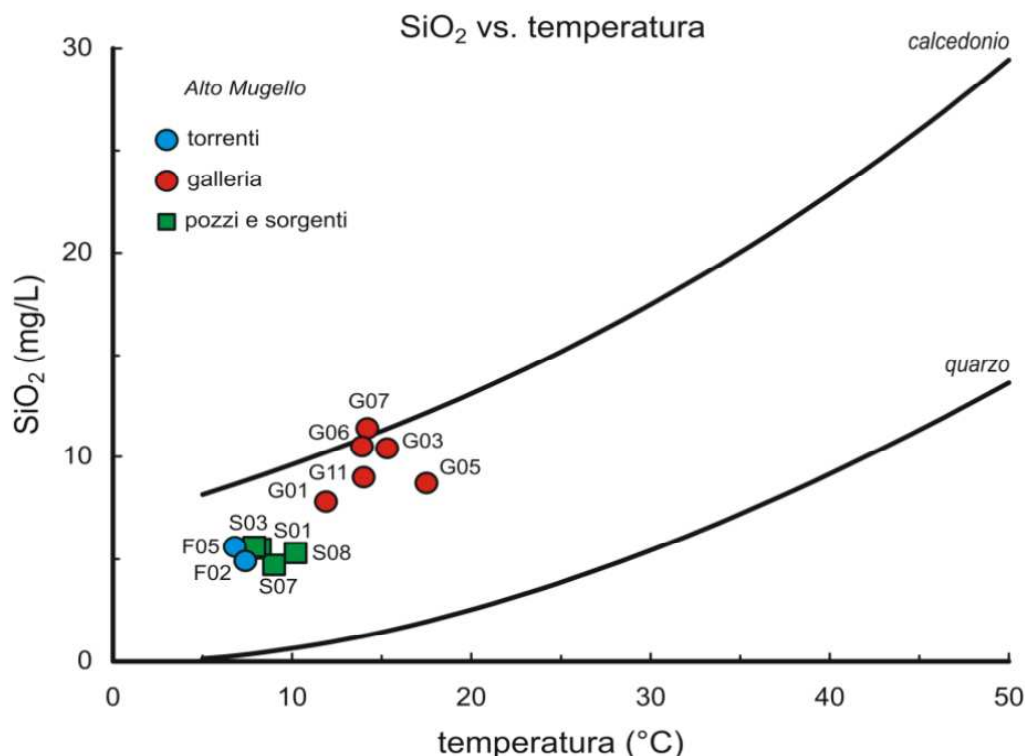


Anche il diagramma di figura 18, che riporta le concentrazioni di silice totale per un numero ristretto di campioni, fornisce indicazioni coerenti rispetto a questo quadro interpretativo. In particolare, la collocazione dei campioni di galleria in prossimità della curva di solubilità del calcedonio, indica che queste acque hanno avuto il tempo necessario per raggiungere una condizione molto vicina a quella di equilibrio termodinamico rispetto a questo polimorfo della silice, che alle basse temperature del sistema indagato risulta cineticamente favorito rispetto al quarzo.

Le acque delle sorgenti e dei corsi d'acqua si collocano in posizione più distale rispetto alla curva di equilibrio, suggerendo che le acque di queste manifestazioni non hanno avuto il tempo necessario di interagire con le rocce (e quindi di circolare nel sottosuolo) per poter raggiungere lo stato di equilibrio.



fig. 18 – Correlazione Silice / temperatura , con riportate le curve di equilibrio per quarzo e calcedonio



Composizione isotopica

Contenuto in O-18 e deuterio

La classificazione isotopica delle acque viene effettuata attraverso il diagramma $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ di Figura 19. I dati raccolti nella seconda parte del Progetto non modificano il quadro interpretativo fornito a coronamento della prima parte del Progetto. Con l'intento di garantire al presente rapporto sufficiente completezza si ritiene, perciò, utile, su questo tema specifico, riportare le osservazioni prodotte nel precedente rapporto.

Considerati nella loro totalità, i campioni dell'Alto Mugello definiscono un intervallo compositivo caratterizzato da valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ rispettivamente compresi tra -8,7 e -7,0‰ e tra -55 e -42‰. I punti rappresentativi si addensano in prossimità di una retta meteorica contrassegnata dalla sigla "+15" avente la seguente equazione:

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 15,$$

rappresentativa su scala regionale delle piogge dell'Italia centrale.

La maggior parte dei discostamenti mostrati dai campioni rispetto a tale retta sono numericamente trascurabili, in quanto dello stesso ordine di grandezza delle differenze di composizione isotopica dovute a variazioni climatiche di tipo stagionale. L'entità di questo effetto stagionale è approssimativamente riprodotta all'interno del diagramma dall'area compresa tra le due rette meteoriche contrassegnate dalle sigle "+10" e "+20". Queste rette sono identificate dalle equazioni descritte a seguire:

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10 \quad \text{e} \quad \delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 20,$$

rappresentative, in prima approssimazione, del limite compositivo atteso in condizioni climatiche rispettivamente più umide e piovose, e più calde e secche della media.



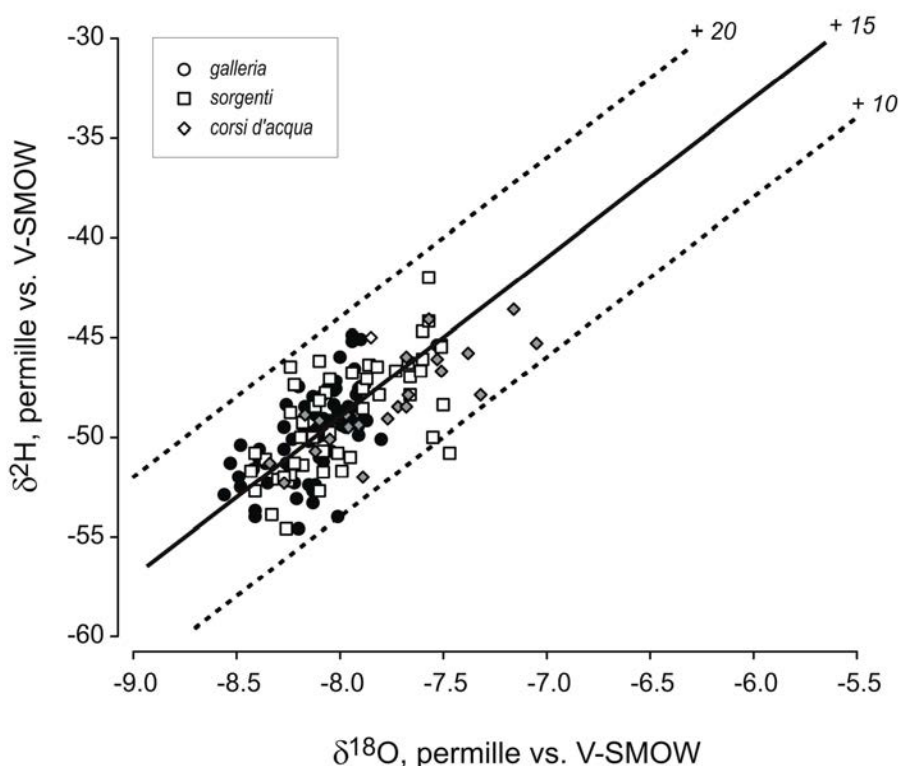
Le acque delle sorgenti e dei corsi d'acqua mostrano la maggiore dispersione di valori, poiché risentono in modo diretto delle variazioni stagionali di composizione delle piogge.

I punti rappresentativi delle acque di galleria si concentrano invece in un'area leggermente più ristretta, contraddistinta da valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ compresi rispettivamente tra -7,5 e -8,5‰ e tra -45 e -55‰. Tuttavia, considerato che la maggior parte dei campioni è caratterizzata da valori di $\delta^{18}\text{O}$ e di $\delta^2\text{H}$ minori di -7,8‰ e -48‰, si può osservare che l'intervallo composizionale delle acque di galleria coincide con i valori più negativi riscontrati nelle acque dei corsi d'acqua e delle sorgenti.

Questo conferma che la maggior parte della ricarica superficiale dei circuiti profondi avviene a spese di precipitazioni locali che cadono durante il periodo compreso tra il tardo autunno e la primavera.

Il fatto che anche il campione prelevato in corrispondenza della Galleria degli Allocchi, caratterizzato da valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ rispettivamente uguali a -8,15 e -52,4‰, cada all'interno di questo intervallo più ristretto di valori, suggerisce che questa sostanziale omogeneità dei meccanismi di infiltrazione e ricarica interessa tutta l'area in esame.

Fig. 19 – correlazione $\delta^{18}\text{O}$ / $\delta^2\text{H}$



Le ridotte variazioni di composizione isotopica osservate per l'ossigeno e l'idrogeno non permettono, invece, di elaborare una chiara correlazione tra composizione isotopica e quota di infiltrazione. Questa evidenza è coerente con le ridotte differenze di quota altimetrica (circa 400 m) che sussistono tra le aree di presunta infiltrazione e quelle di nuovo recapito in superficie, in corrispondenza delle sorgenti.

I valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ delle sorgenti e dei corsi d'acqua mostrano una certa variazione areale. L'andamento temporale della composizione isotopica dell'ossigeno nei diversi punti monitorati è più stabile di quello dell'idrogeno. Il dato più significativo inerente la distribuzione spaziale dei valori isotopici è che le acque del versante a nord del crinale, grossomodo corrispondente all'area di Poggio Roncone, appaiono sistematicamente più negative di quelle del versante meridionale. Anche in questo caso le differenze di composizione sono minime, e si passa da valori massimi di circa -7‰ in corrispondenza del punto F3, sul torrente Rampolli (Rampolli Basso), a sud del crinale, a minimi di -8,4‰ in corrispondenza della sorgente S1



(sorgente Badia Moscheta 2), a nord dello spartiacque morfologico. Nelle aree più prossime al crinale si osservano invece valori intermedi di $\delta^{18}\text{O}$.

Rispetto a questo quadro generale, la parte orientale dell'area in esame mostra un comportamento leggermente anomalo, poiché in corrispondenza del torrente Ensa, che scorre sul versante meridionale del rilievo, viene osservata una maggiore variabilità stagionale della composizione isotopica, con valori generalmente più negativi. Si osserva, infatti, che i campioni F4, prelevati a quota più elevata sul torrente Ensa (punto Ensa Alto), hanno valori di $\delta^{18}\text{O}$ variabili tra -8,0‰ e -8,7‰, mentre i campioni F5 (punto Ensa Basso), prelevati a valle del punto F4, sono generalmente più positivi di soli 0,1-0,3 ‰ rispetto ad F4.

Anche la vicina sorgente S10 (sorgente Razzuolo), posta a quota più elevata in direzione del crinale, ma sempre sul versante meridionale del rilievo, mostra valori isotopici leggermente più negativi di quelli riscontrati, sempre sullo stesso versante, in posizione più centrale, lungo la linea di sviluppo della galleria tra Grezzano e Badia di Moscheta.

Questo dato assume un certo rilievo se si tiene conto che nella parte occidentale dell'area esistono valori di composizione isotopica decisamente più positivi. In questo caso il riferimento è costituito dalle acque della sorgente S11 (sorgente Fontefredda), che scaturiscono dalla formazione di Castel Guerrino, sul versante meridionale del rilievo. I campioni prelevati da questa sorgente sono infatti caratterizzati da valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ non solo più positivi, ma anche decisamente più stabili su scala stagionale di quelli finora discussi, come dimostrano i ristretti intervalli composizionali compresi rispettivamente tra -7,5 e -7,7‰ e tra -44,7 e -47,0‰.

Queste evidenze suggeriscono alcune ipotesi di interesse che sono riportate a seguire:

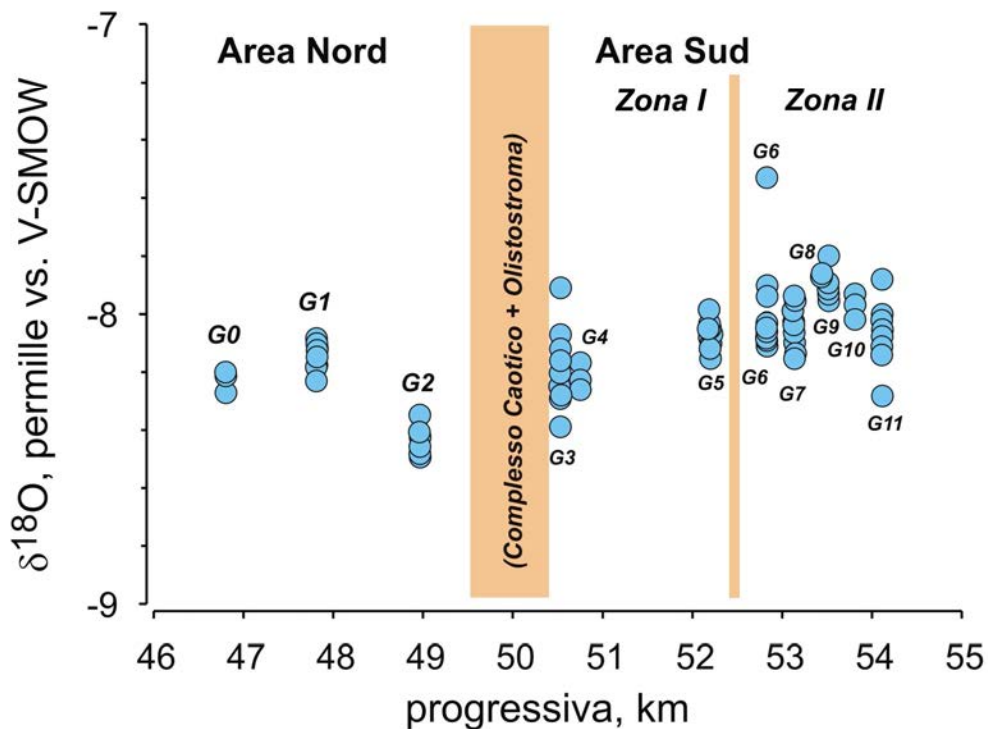
- la porzione occidentale del comprensorio pare essere sede di una circolazione sotterranea più ampia rispetto a quella delle altre sorgenti monitorate; questa conclusione è suffragata dal regime idrologico perenne, dalle portate relativamente elevate (100 l/min in condizioni di magra, contro valori generalmente compresi tra 1 l/min, come nel caso delle sorgenti S1-Badia di Moscheta 2 ed S4-Pratelle, e 40 l/min, come nel caso delle sorgenti S2-Osteto-Isola ed S3-Fonte del Guardia), e dalla stabilità temporale della composizione isotopica delle acque della sorgente S11-Fontefredda; l'assenza di impatti suggerisce che questo sistema idrologico non è in connessione con i livelli profondi drenati dalla galleria;
- la porzione orientale del comprensorio pare essere sede di una circolazione sotterranea di minore ampiezza, non in connessione con i livelli profondi drenati dalla galleria, che si estende prevalentemente a quote elevate a ridosso del crinale; rientrano in quest'area la sorgente Razzuolo (S10) ed il punto di prelievo F4 (Ensa Alto) sul torrente Ensa; l'impatto della galleria viene percepito in questa parte del comprensorio solo più a valle, a partire dal punto di prelievo F5 (Ensa Basso) sul torrente Ensa;
- la distribuzione areale della composizione isotopica delle acque delle sorgenti e dei torrenti indica che esiste un apparente trend di impoverimento isotopico in direzione ovest-est, ed in direzione sud-nord in corrispondenza dello scavallamento del crinale; anche se i dati attualmente a disposizione non permettono speculazioni di ulteriore dettaglio, una preliminare spiegazione di questo andamento potrebbe risiedere nel fatto che la ricarica idrologica sia prevalentemente a carico di precipitazioni meteoriche legate alle perturbazioni di origine tirrenica; in base a questo schema, infatti, in accordo con la variazione spaziale osservata, i fronti nuvolosi provenienti dall'area a sud-ovest del crinale originerebbero piogge isotopicamente arricchite sul versante meridionale dell'area montuosa, e piogge isotopicamente impoverite in fase di discesa, lungo il versante settentrionale.



La variazione della composizione isotopica all'interno della galleria è descritta attraverso la correlazioni tra $\delta^{18}\text{O}$ e progressiva, come mostrato dal diagramma di figura 20. Gli elementi salienti che emergono dall'analisi di questo grafico sono descritti a seguire:

- considerando la dispersione dei valori isotopici su scala temporale per i diversi punti campionati, si osserva una significativa stabilità dei valori di $\delta^{18}\text{O}$ per tutti i campioni ad eccezione dei punti G3 e G6 (che corrispondono rispettivamente alle progressive 48+ e 52+830); i campioni con maggiore variabilità, punto G6 in primis, possono essere ritenuti indicativi di meccanismi di rapida infiltrazione delle acque meteoriche attraverso condotti di percolazione preferenziale, verosimilmente rappresentati da faglie e/o zone ad elevata fratturazione;
- la apprezzabile omogeneità composizionale delle acque di galleria è suffragata dalla presenza di variazioni di composizione isotopica con la distanza dello stesso ordine di grandezza rispetto a quelle riscontrate nel tempo per i diversi punti monitorati; questo dato è indicativo del fatto che le acque di galleria hanno una comune area di alimentazione che, in base alle osservazioni fatte in precedenza sulla sovrapposibilità degli intervalli composizionali delle sorgenti, dei corsi d'acqua e delle venute in galleria, ha verosimilmente estensione locale;
- la variabilità temporale riscontrata in concomitanza del punto G3 indica una possibile evoluzione del sistema verso condizioni di diversa alimentazione, con crescente contributo di acque di più breve circolazione sotterranea; questa ipotesi viene verificata nella sezione successiva attraverso l'integrazione dei dati di composizione isotopica del tritio.

Fig. 20 – valori $\delta^{18}\text{O}$ in relazione alla progressiva della galleria





Concentrazione di Tritio

Considerazioni generali

La concentrazione di Tritio misurata nelle acque dei torrenti e delle sorgenti varia tra un minimo di 4 UT ed un massimo di 6,5 UT, mentre l'intervallo delle acque di galleria è più ampio, ed è compreso tra 6,7 e 0 UT.

In assenza di dati inerenti le precipitazioni, l'analisi della concentrazione del Tritio nelle acque campionate, permette di:

- caratterizzare la composizione media delle acque meteoriche di ricarica;
- identificare l'esistenza di eventuali circolazioni sotterranee prolungate.

La determinazione della concentrazione di Tritio della locale ricarica meteorica viene effettuata a partire dai dati di composizione delle acque dei torrenti e delle sorgenti più vicine al crinale. Questo approccio è giustificato dal fatto che i punti di campionamento lungo i corsi d'acqua sono a quote elevate, in prossimità dell'area di presunta infiltrazione della ricarica meteorica. Ciò garantisce ridotti tempi di residenza nel sottosuolo da parte delle acque di alimentazione sotterranea del deflusso in alveo, da cui consegue una sostanziale inefficacia del meccanismo di decadimento radioattivo, e, quindi, una pressoché totale preservazione dell'originario contenuto di Tritio al momento dell'infiltrazione, nella componente attuale di ruscellamento superficiale.

Sulla base di questi criteri è stato individuato un valore di circa 6,4 UT come mediamente rappresentativo del componente meteorico più recente.

I dati relativi alle manifestazioni superficiali sono stati incrociati con quelli delle precipitazioni campionate nelle tre stazioni pluviometriche più vicine attrezzate anche per il monitoraggio dei contenuti in Tritio delle piogge. Le stazioni di riferimento sono quelle di Genova Sestri, Lago Brasimone e San Pellegrino in Alpe, ed i dati isotopici ad esse relativi sono archiviati presso l'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica di Vienna (IAEA, www.iaea.org).

L'analisi delle misure sulle piogge, disponibili con lacune per il periodo 1961-1995, ha evidenziato che a partire grossomodo dal 1990, la concentrazione media pesata di Tritio nelle precipitazioni si è stabilizzata, nell'area appenninica e sub-appenninica dell'Italia Centro-Settentrionale, attorno a valori compresi tra 5 e 10 UT, in linea con quelli naturali osservati nel periodo precedente l'inizio degli esperimenti –termonucleari in atmosfera (1950 circa).

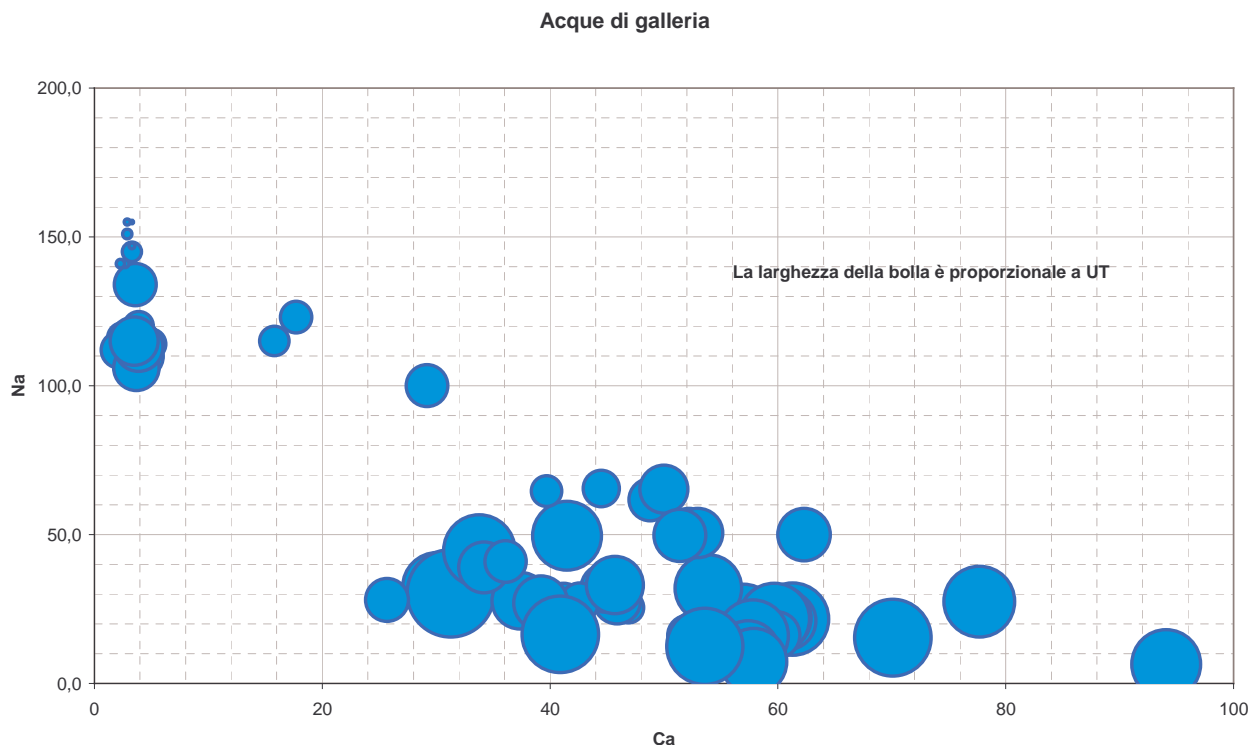
Le concentrazioni di ^3H misurate localmente nelle sorgenti e nei corsi d'acqua, ed il valore medio di 6,4 UT ritenuto rappresentativo del componente meteorico locale nelle acque circolanti nel sottosuolo, sono perciò coerenti con l'andamento complessivo del Tritio nelle precipitazioni.

La presenza di valori di Tritio molto bassi, grossomodo compresi tra 3 UT e 0 UT, nelle acque del tunnel, è, perciò, indicativa della presenza di acque che hanno lungamente circolato nel sottosuolo prima del recapito in galleria, così come sembrano indicare anche i bassi valori di concentrazione del Tritio (2,3 UT) osservati nelle acque drenate dalla Galleria degli Allocchi della Ferrovia Faentina.

Mettendo in relazione i dati di tutti i campioni disponibili relativi al contenuto in tritio con i valori di concentrazione di Na e Ca (fig 21), viene confermata l'esistenza, già preliminarmente individuata nella prima fase, di una correlazione inversa tra contenuto in tritio e concentrazione di Ca e diretta tra contenuto in tritio e concentrazione di Na. E', inoltre, confermata la presenza di correlazione inversa fra contenuto in tritio e concentrazione di HCO_3 (fig 25).

La presenza di queste correlazioni è rilevante, perché indica che l'esistenza di acque con tempi di circolazione sotterranea prolungata è suffragata sia attraverso lo strumento chimico che attraverso quello isotopico.

Fig. 21 – Valori di Ca e Na in relazione al contenuto in tritio (UT)



Evoluzione del contenuto in tritio nelle acque di galleria dal 2004 al 2007

Per quanto non continui e riferiti ad un periodo di osservazione relativamente ristretto, i cronogrammi relativi alla variazione della concentrazione del Tritio nei diversi punti di recapito in galleria (figg. 22 e 23) permettono di evidenziare come le acque drenate dal tunnel siano il risultato di un mescolamento tra acque di circolazione sotterranea ed acque meteoriche di più rapida infiltrazione. Questo viene desunto sulla base degli andamenti sinusoidali dei valori di concentrazione misurati, che riflettono il contributo di piogge cadute in stagioni diverse, ovvero caratterizzate da abbondanze e segnali isotopici differenti.

L'andamento relativamente piatto, ovvero con escursioni relativamente ridotte della sinusoide composizionale, ricostruito per il punto G03, indica invece che la circolazione idrica di questo settore avviene secondo condizioni dinamiche che favoriscono il completo miscelamento dei vari contributi recepiti. L'ipotesi di un percorso sotterraneo relativamente prolungato resta sostenibile anche alla luce dei valori di salinità ionica totale grossomodo costanti nel tempo. Lo spostamento dei valori medi di Tritio misurati verso valori più elevati (compresi tra 3 e 4 UT) è, invece, indicativo di un contributo percentualmente più significativo da parte delle acque di più rapida infiltrazione rispetto al bilancio totale.

Il G05 sembra essere il punto più stabile in termini di composizione isotopica dell'intera galleria. La contemporanea presenza di una sinusoide molto schiacciata e di valori medi di Tritio sistematicamente compresi tra 0 e circa 2 UT sostiene, invece, l'ipotesi di una circolazione idrica prolungata e di un ridotto o nullo mescolamento delle acque sotterranee con acque meteoriche di rapida infiltrazione.



Fig 22 – Valori di UT in relazione alla data di campionamento per la galleria Firenzuola, tratto a sud del cambio di livelletta

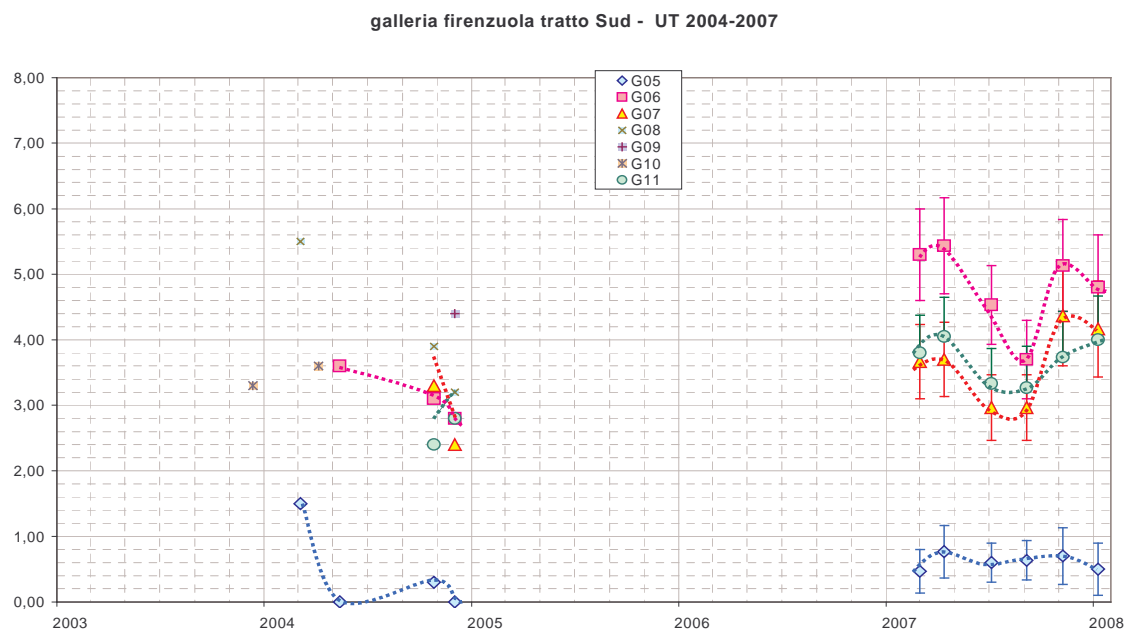
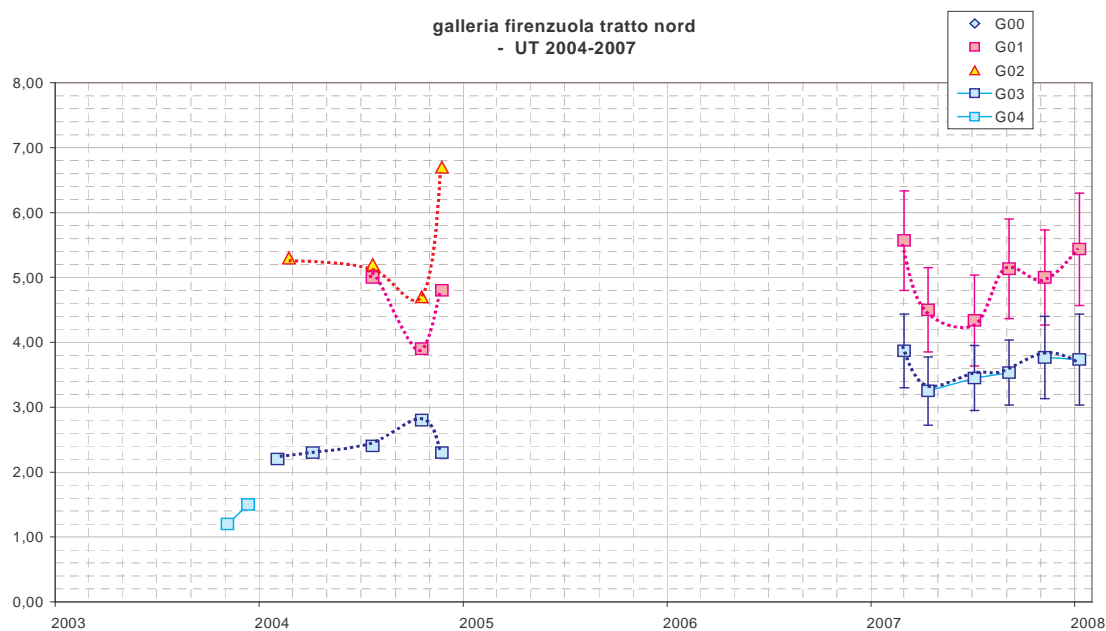


Fig 23 – Valori di UT in relazione alla data di campionamento la galleria Firenzuola tratto a nord del cambio di livelletta



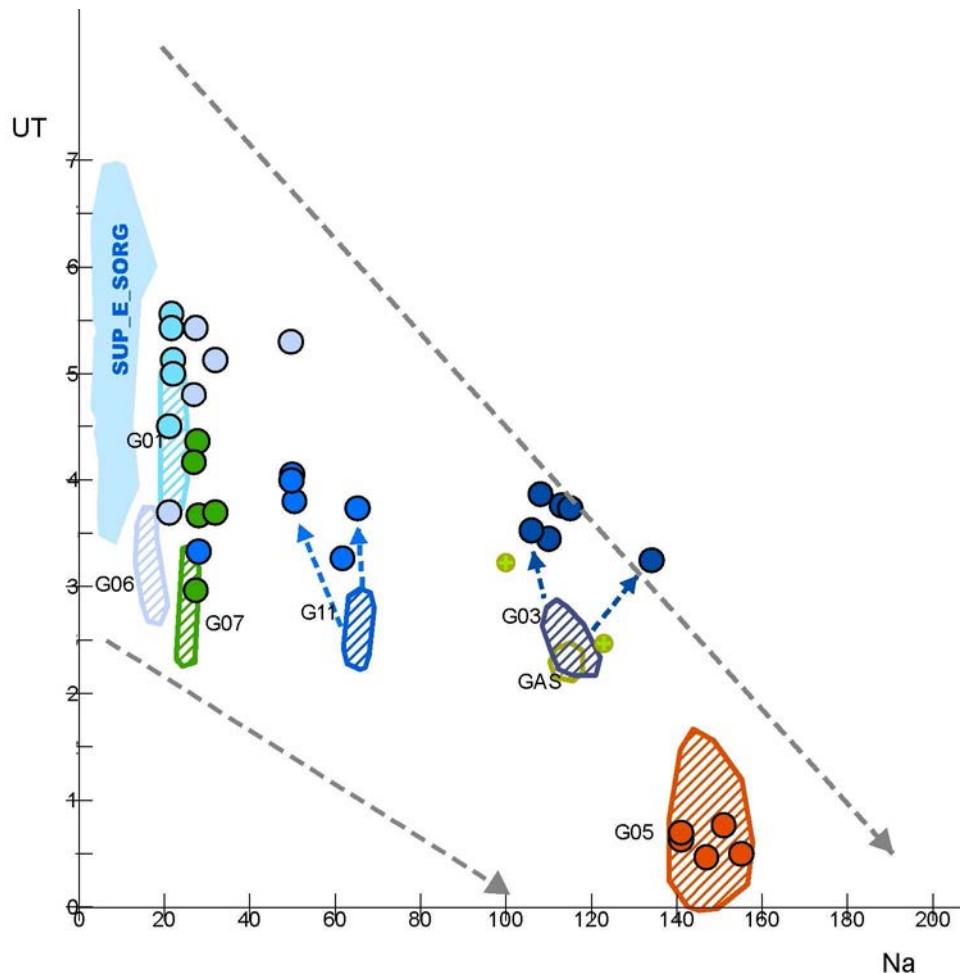
Correlazioni chimico-isotopiche delle acque di galleria Firenzuola

I diagrammi di correlazione del Tritio con il Na^+ (Figura 24) ed il HCO_3^- (Figura 25) descrivono la variabilità composizionale del Tritio nelle manifestazioni campionate, e permettono di mettere in relazione i processi di “maturazione chimica” discussi nei precedenti paragrafi, con l’incremento dei tempi apparenti di residenza nel



sottosuolo desunti sulla base delle variazioni di concentrazioni di Tritio. In queste figure si è ritenuto utile, per una migliore leggibilità delle evoluzioni, riportare i valori rilevati nella campagna di campionamenti 2004 (prima fase) come area nella quale i valori ricadevano, mentre sono stati riportati come punti i valori della seconda fase.

Fig. 24 – diagramma Na – UT



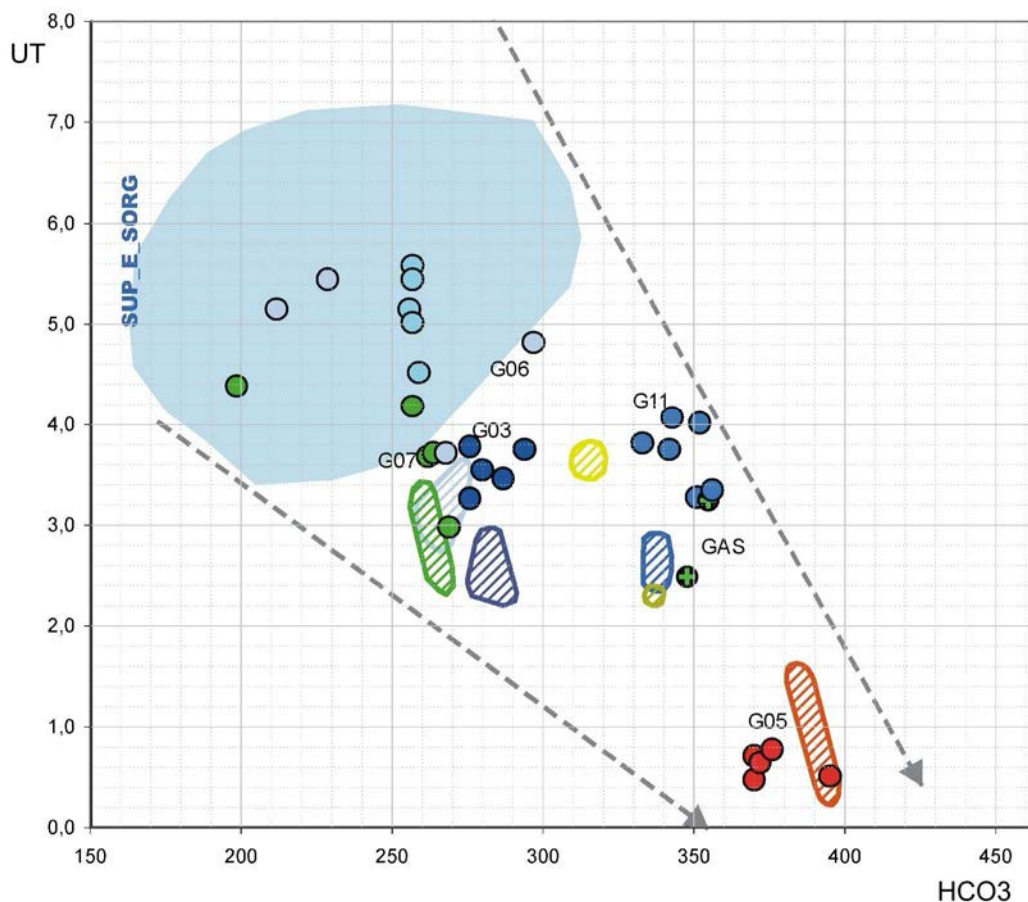
Dall'analisi del grafico Na/UT si evidenzia per diversi punti uno spostamento verso acque meno mature: si verifica in parte per G01, G07, e, più marcatamente per G11 e G03.

Questo conferma una sostanziale diminuzione dell'apporto di acque di lunga circolazione. Fa eccezione il punto G05 che, come visto anche nei grafici precedenti, mantiene una composizione geochemico-isotopica in linea con il 2004 e tipica di acque di lunga circolazione.

Analoghe informazioni si ricavano dal diagramma UT-HCO₃, anche se con un dataset più disperso.

Il fatto che gran parte dei punti di galleria si siano spostati nel campo tipico delle acque di rapida infiltrazione, (figg. 22 e 23), fa ritenere oramai prevalente il contributo delle acque di ricarica rispetto a quelle di riserva geologica, il cui drenaggio pare oramai sostanzialmente esaurito. Se incrociamo questi dati con l'analisi delle portate in galleria, che mostrano (sia per il lato sud che per il lato nord) una sostanziale stabilizzazione dei valori su una sinusoide legata alla stagionalità, si può ritenere plausibile che vi sia un avvicinamento sostanziale ad una nuova situazione di equilibrio, e, pertanto, i valori di portata drenata attualmente dalla galleria possono essere considerati prossimi quelli "a regime".

Fig. 25 – diagramma HCO_3 – UT



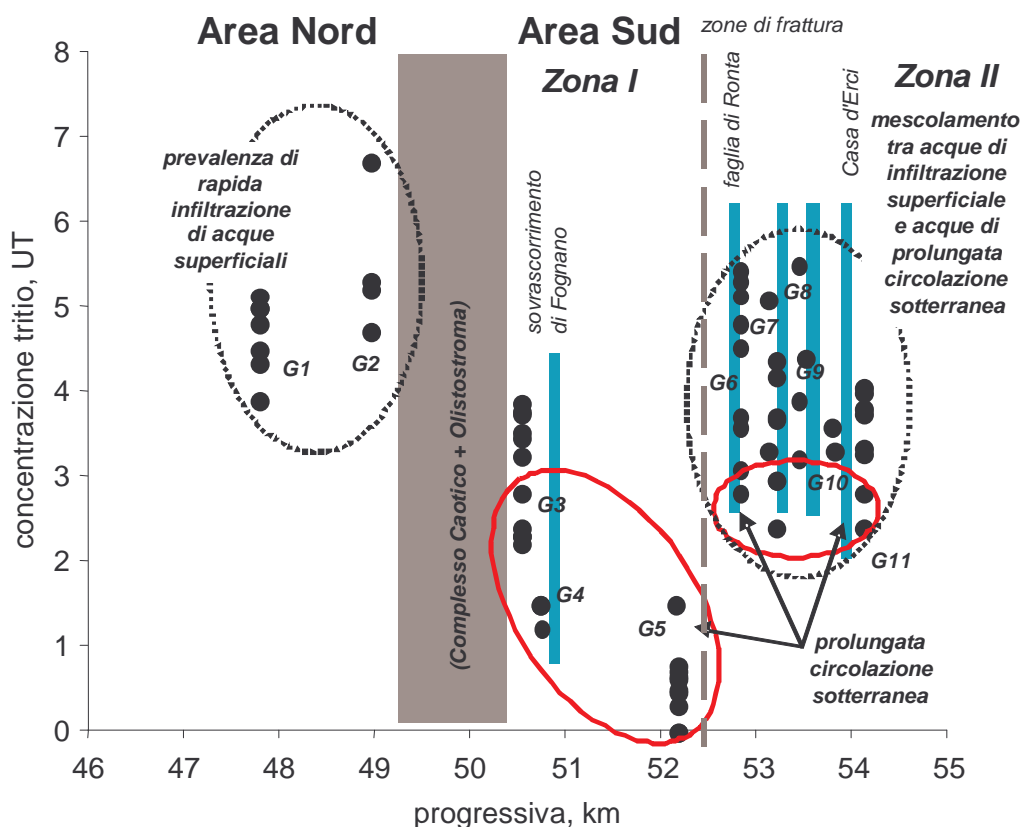
L'analisi della correlazione tra concentrazione di Tritio nelle acque di galleria e progressiva lungo l'asse della galleria stessa (fig.26), permette di individuare importanti elementi caratterizzanti della locale circolazione sotterranea. Le osservazioni più significative, legate all'esame, sia della variazione di concentrazione lungo la galleria, che alle variazioni temporali nei diversi punti di prelievo, sono riassunte a seguire:

- a causa della ridotta permeabilità, la formazione del Complesso Caotico e l'Olistostroma costituiscono una barriera idraulica nel tratto di galleria compreso tra le progressive 49+500 e 50+300; questa discontinuità divide il sistema in due macroaree con caratteristiche idrogeologiche ed isotopiche distinte; le due aree, che convenzionalmente abbiamo definito Area Nord ed Area Sud, sono interessate da sistemi di circolazione sotterranea ad estensione locale tra loro indipendenti;
- nella parte a nord del limite di permeabilità (Area Nord) prevalgono condizioni di rapida infiltrazione della ricarica meteorica, testimoniate dalla presenza di valori di concentrazione in Tritio elevati (tra 4 UT e 6,7 UT, punti G1 e G2); da un punto di vista chimico le acque campionate in questo settore sono caratterizzate da valori più bassi della salinità totale, e da una facies di tipo carbonato-calcico;
- nella parte a sud del limite di permeabilità (Area Sud) possono essere individuate due ulteriori settori a comportamento idrogeologico e geochimico distinto: questi settori sono stati convenzionalmente denominati Zona I e Zona II già nella prima fase del progetto;
- nella parte immediatamente a sud della discontinuità Complesso Caotico+Olistostroma (Zona I) prevale il contributo di acque a prolungata circolazione sotterranea; nel periodo di osservazione

2003-2004 in questo settore sono stati infatti riscontrati i valori di Tritio più bassi dell'intera area (tra 3 UT e 0 UT); questa situazione è poi andata progressivamente modificandosi in corrispondenza del settore G03, dove i dati più recenti, raccolti durante la fase II del Progetto, hanno evidenziato un leggero, ma significativo (perché apparentemente sistematico) spostamento verso valori medi di Tritio più alti, compresi tra 3,3 e 3,9 UT; come già discusso in precedenza, questo andamento è da attribuire a nuove condizioni di alimentazione contraddistinte da apporti percentualmente più significativi di acque meteoriche di rapida infiltrazione; per il punto G05 si è avuto, invece, il mantenimento di valori particolarmente bassi compresi fra 0 e 1 UT. Il punto G05 è posto poco a sud del crinale appenninico, dove affiora un membro a basso rapporto arenaria/marna e a giacitura sub-orizzontale, che verosimilmente funge da separatore fra le circolazioni superficiali e quelle profonde;

- la parte in posizione più distale rispetto alla discontinuità Complesso Caotico+Olistostroma (Zona II), ha invece un comportamento idrodinamico più eterogeneo, dominato da processi di miscelamento tra acque di rapida infiltrazione ed acque di più prolungata circolazione sotterranea; questo schema è supportato dalla presenza di concentrazioni di Tritio intermedie rispetto a quelle degli settori della galleria, comprese tra 2,4 e 5,5 UT;

fig. 26 – valori di UT in relazione alla progressiva della galleria



- all'interno della Zona II sussistono evidenze per procedere ad una ulteriore suddivisione su base isotopica; i campioni prelevati nel tratto di galleria compreso tra le progressive 52+700 e 54+000, sono riconducibili a condizioni di circolazione "mista"; il contributo di acque di recente infiltrazione è testimoniato, sia da valori massimi di concentrazione relativamente elevati (6 UT), che da una



ampia variabilità temporale riscontrata, soprattutto, in corrispondenza dei punti G7 e G8 (delta rispettivamente pari a 2,7 e 2,3 UT);

- i campioni del punto G11, invece, nei pressi della fascia fratturata di Casa d'Erci, sono contraddistinti da basse concentrazioni di tritio (tra 2,4 UT e 2,8 UT) relativamente costanti nel tempo; questa evidenza è indicativa della presenza di una ulteriore zona di circolazione sotterranea all'interno della quale il contributo di acque relativamente "vecchie" appare predominante;

La zonazione geochemico-idrologica precedentemente discussa appare scandita da importanti elementi geologico strutturali, quali la presenza di litologie a bassa permeabilità che agiscono come barriera idraulica (Complesso Caotico e Olistostroma), e zone di fratturazione che costituiscono una via preferenziale di circolazione sotterranea per i fluidi di infiltrazione superficiale (zone fratturate di Monte Verruca Nord e Casa d'Erci).

Peraltro, la suddetta zonazione trova riscontro anche negli impatti sinora registrati in superficie:

- nell'area Nord, la presenza di acque di rapida infiltrazione pare dare ulteriore conferma delle infiltrazioni di acqua dal subalveo del torrente Veccione, e che quella parte delle acque di infiltrazione che scaturivano da alcune sorgenti concentrate (es. Veccione 1 e 3, Badia di Moscheta) sono adesso recapitate in galleria; è anche possibile che siano adesso recapitate in galleria le acque che scaturivano da sorgenti diffuse, non individuabili, lungo i corsi d'acqua.
- nella Zona I dell'area Sud, la presenza preponderante di acque di lunga circolazione suggerisce la presenza di circolazioni separate, o parzialmente separate, fra la superficie e la profondità. Ad esempio, nella zona di Fognano, corrispondente al punto G03 in galleria, sono stati rilevati impatti in superficie (quali essiccamento di una piccola sorgente e perdita di portata del T. Veccione di circa 1 l/s), ma di entità non paragonabile alle venute in galleria (max 150 l/s da venuta concentrata); peraltro, in questa stessa area non hanno subito impatto, né la sorgente fonte del Guardia (S3), né la sorgente Pratelle 3 (S4), che si trova quasi sulla verticale della galleria; più a sud, non mostra per adesso segni di impatto la Fonte Fosso Rampolli (S7), nonostante in quell'area si siano registrate venute in galleria anche rilevanti (zona del punto G05); questo può essere messo anche in relazione alla presenza di una porzione di ammasso (ved. sezione fuori testo) a più basso rapporto arenaria/marna;
- nella Zona II dell'area Sud, la presenza di un rilevante porzione di acque superficiali dà conferma degli evidenti impatti occorsi in questa area, in particolare dei drenaggi dal subalveo dei corsi d'acqua con la contemporanea presenza di acque di circolazione profonda, il cui contributo pare essersi notevolmente ridotto dal 2004 al 2007, suggerendo un sostanziale avvicinamento ad una situazione "a regime";

Pozzi Molinuccio

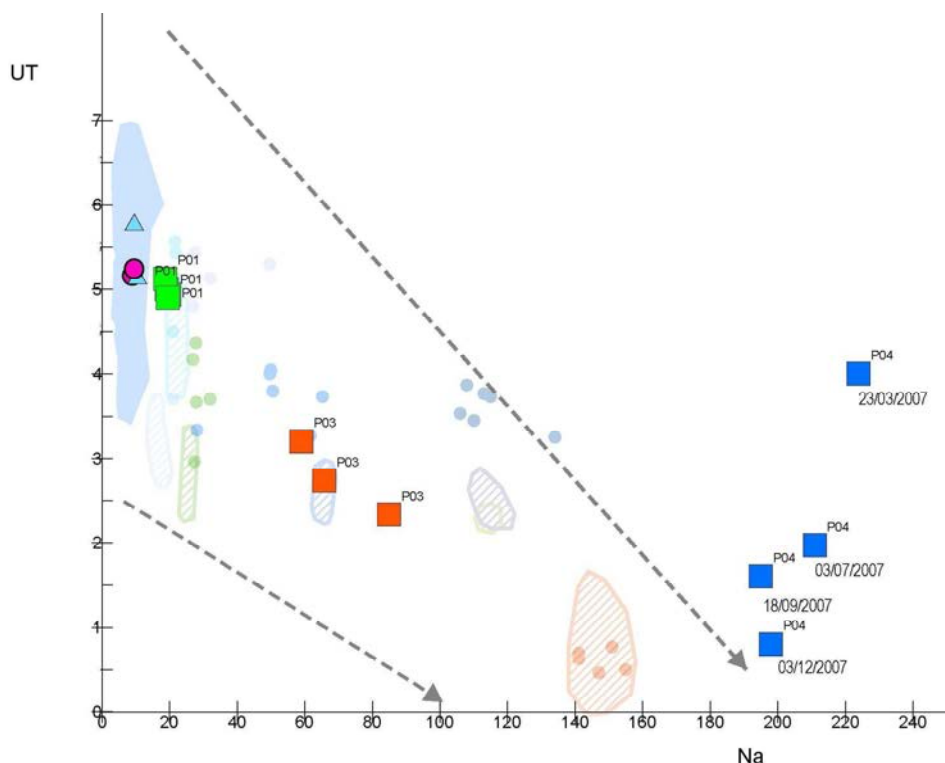
Nel grafico UT/Na relativo ai pozzi Molinuccio (fig. 27) si evidenzia, analogamente alle correlazioni chimiche (pag 28) come il pozzo1 (quello di più vecchia realizzazione) restituisca valori congrui con acque di rapida ricarica, mentre il pozzo 3 si ponga in posizione di media maturità, notevolmente affini ai valori rilevati in galleria per acque di mescolamento lunga/breve circolazione o di media maturità.

Il pozzo 4 dà invece valori al di fuori del trend generale individuato per gli altri punti, con elevati valori di Na e variazioni rilevanti di UT nell'arco dell'anno. Come già rilevato in precedenza, la perforazione ha interessato formazioni diverse dalla Marnoso Arenacea, variandone complessivamente la composizione chimica. In merito alla composizione isotopica, un primo dato rilevabile è comunque la presenza di almeno un parziale contributo di acque di lunga circolazione, ma rilevante variazione del contenuto in Tritio meriterebbe un monitoraggio di



più lungo termine, che potrebbe chiarire maggiormente le dinamiche di questo pozzo e dell'area del Molinuccio in generale.

Fig. 27 – diagramma UT – Na con evidenziati i valori dei pozzi Molinuccio



Galleria Allocchi (Faentina)

Il grafico UT/Na (fig. 28) per i punti della galleria Allocchi della Ferrovia Faentina conferma sostanzialmente quanto rilevato nel grafico di correlazione Ca/Na (pag 44). Si rileva infatti l'annidamento di tutti i campioni nell'area delle acque superficiali, salvo che per il punto GAS.

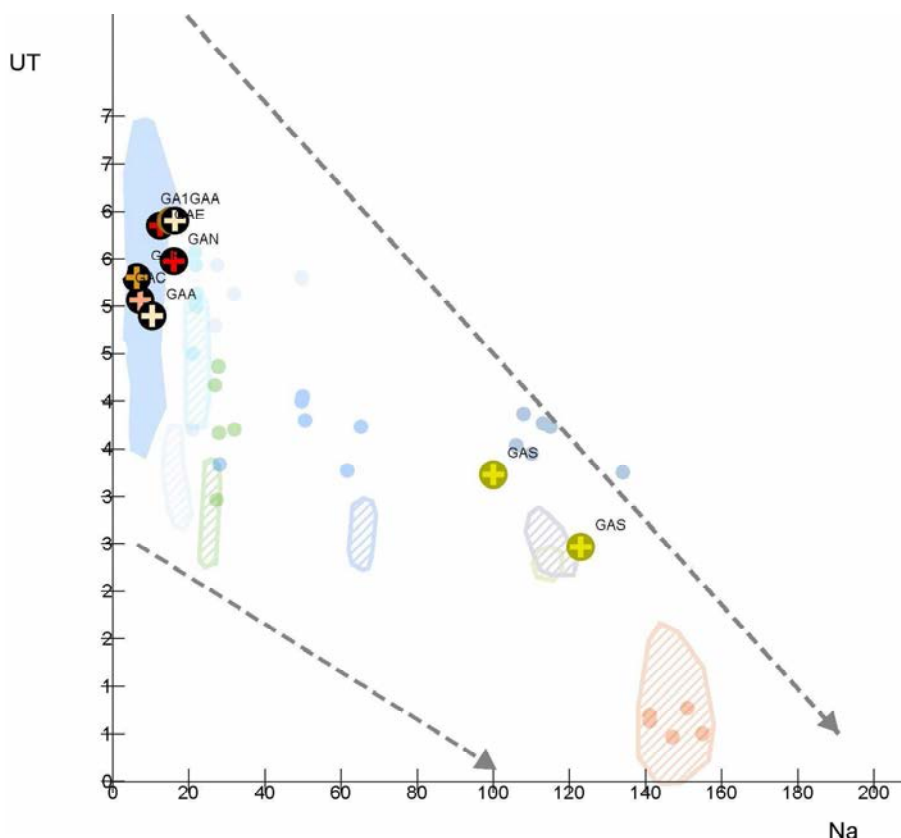
Come già rilevato in precedenza, nel punto GAS non si campiona una singola venuta, ma tutta l'acqua drenata complessivamente dal tratto sud. Si tratta quindi di un campione di mescolamento di acque mature con acque superficiali, come confermato anche dall'unica venuta che si è potuto campionare singolarmente su questo tratto (GA1), che è risultato cadere nel campo delle acque superficiali. Visti i valori di queste acque di mescolamento, tipici di acque piuttosto mature, si può ritenere che un contributo cospicuo debba essere dato da acque anche decisamente mature.

La galleria Allocchi è stata scavata più di 100 anni fa. Il fatto che nel tratto sud di essa permanga un contributo cospicuo di acque mature (probabilmente qualche litro/sec, visto che complessivamente in estate drena sui 5÷10 l/s) fa ritenere che essa non abbia intercettato delle sacche di acque "vecchie" ad esaurimento, ma che si tratti invece di lunghe circolazioni continuamente alimentate.

E', quindi, possibile che anche alcune acque drenate dalla galleria Firenzuola nel tratto centrale (in particolare G05) possano riferirsi a lunghe circolazioni continuamente alimentate (e non a "sacche" di acque di riserva geologica ad esaurimento).



Fig. 28 – diagramma UT – Na con evidenziati i valori relativi alla galleria degli allocchi /Ferrovia Faentina)



Valutazione dei tempi di circolazione sotterranea

Elementi di teoria ed applicazione di modelli semplificati

L'età media di un'acqua sotterranea, dove con età si intende il tempo di residenza nel sottosuolo calcolato a partire dal momento di infiltrazione, in linea generale, non può essere calcolata per diretta applicazione della legge di decadimento radioattivo al contenuto di Tritio misurato nel campione prelevato sul terreno.

Questo perché nei sistemi naturali le acque sotterranee sono generalmente miscele di acque di età diversa, e la concentrazione misurata nel campione naturale, soltanto in condizioni particolarmente favorevoli è rappresentativa di un input ben definito nel tempo. Nella maggior parte dei casi, tale concentrazione è, invece, il risultato del contributo ponderato dei diversi tipi di acque, ciascuno con il proprio valore di Tritio e la propria età idrologica, che vanno a determinare la miscela finale prelevata per le analisi. In altri termini, vale la seguente relazione:

$$età_{MEDIA} = \sum_{i=1,n} X_i età_i,$$

dove "X_i" rappresenta la frazione di acqua con tempo di residenza "età_i" all'interno della miscela.

Variazioni stagionali della concentrazione di ³H nelle piogge, così come variazioni nell'abbondanza delle precipitazioni e dei tassi di infiltrazione, rendono complicata la valutazione della cosiddetta "funzione di input", ovvero della concentrazione iniziale di Tritio da adoperare nell'applicazione dei modelli di calcolo dell'età di circolazione sotterranea.



Informazioni di dettaglio sulla variazione del contenuto in Tritio nelle precipitazioni atmosferiche, sulla loro abbondanza e sul coefficiente di infiltrazione efficace delle rocce locali sono generalmente un requisito indispensabile per poter ottenere valori accurati del parametro “età_{MEDIA}”. In condizioni ideali, questo tipo di dati dovrebbe essere, infatti, determinato con cadenza mensile e per un numero di anni più esteso possibile. In mancanza di queste informazioni, la datazione delle acque sotterranee può essere condotta soltanto in modo approssimato. Coerentemente con queste premesse, i dati di Tritio raccolti nell’ambito del presente studio sono stati, perciò, utilizzati per ottenere valori di soglia indicativi, massimo e minimo, dell’età media di circolazione sotterranea.

Le stime dei tempi di circolazione sotterranea sono state effettuate tramite applicazione di un modello semplificato ad input costante, utilizzando come riferimento due diverse formulazioni matematiche:

- modello del flusso a pistone,
- modello esponenziale.

Il modello di flusso a pistone assume che il movimento di penetrazione delle acque nel sottosuolo avvenga in assenza di miscelamento tra acque di origine diversa, per l’intero percorso compreso tra il punto di ricarica a quello di scarica. Il modello presume, inoltre, che i processi di dispersione e diffusione siano inefficaci nel controllo della concentrazione del tracciante.

In questo caso il contenuto di Tritio in uscita dipende esclusivamente dal tempo di residenza e dal contenuto di Tritio dell’acqua di ricarica. La dipendenza formale da questi parametri è espressa dalla equazione del decadimento radioattivo sotto riportata:

$$C_{OUT,t} = C_{IN,t-\tau} \exp(-\lambda \tau)$$

In modello “esponenziale”, assume, invece, che le linee di flusso nel sottosuolo siano caratterizzate da una distribuzione esponenziale dei tempi di residenza/percorrenza. Questo equivale a dire che non esiste scambio del tracciante tra una linea di flusso e quelle ad essa adiacente, e che i tempi di percorrenza variano tra un minimo teorico pari a zero ed un massimo teorico pari ad infinito.

In questo caso, i valori del tempo di residenza, del contenuto di Tritio iniziale e finale sono legati dalla seguente relazione:

$$C_{OUT,t} = C_{IN,t-\tau} / (1 + \lambda \tau)$$

Concettualmente il modello esponenziale descrive condizioni limite opposte a quelle del flusso a pistone, e può essere ritenuto equivalente alla rappresentazione matematica del comportamento di un “serbatoio perfettamente miscelato”

I modelli sono stati applicati al sistema della galleria con l’intento di valutare i tempi di percorrenza teorici necessari, nelle condizioni semplificate implicite nell’applicazione degli stessi modelli, per ottenere le concentrazioni di Tritio più basse (comprese tra 0 e 3 UT), tipiche della porzione centrale del tunnel (punti G3-G5).

Il diagramma di figura 29 permette di individuare nel valore di 3 UT una soglia al di sotto della quale è possibile scendere soltanto tramite il mescolamento di acque di età diversa, e in presenza di un componente impoverito di età precedente all’inizio delle esplosioni termonucleari nell’atmosfera (1952).



Fig. 29 – curve di decadimento del Tritio

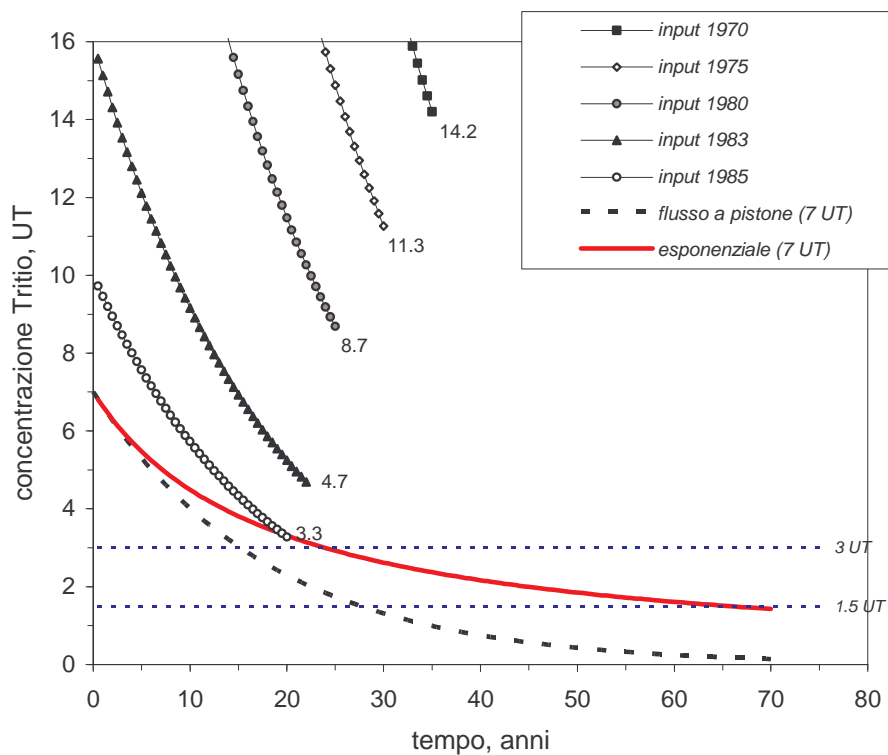
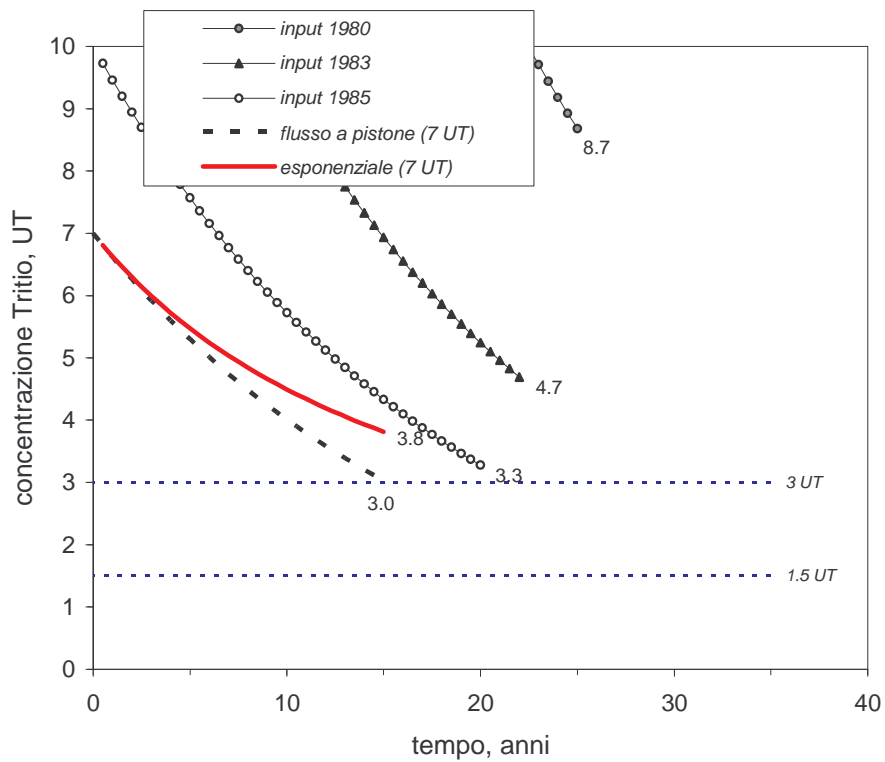


Fig. 30 – curve di decadimento del Tritio - dettaglio





Le curve riportate all'interno dei diagrammi mostrano, infatti, che, applicando il modello di flusso tipo pistone, le precipitazioni cadute nel periodo compreso tra gli anni 1970 e 1985 ed aventi la stessa composizione isotopica pesata delle piogge cadute nella stazione di Genova Sestri, oggi avrebbero concentrazioni di tritio residue variabili tra 14,2 e 3,3 UT. L'applicazione del modello esponenziale fornirebbe stime ancora più conservative, con valori di concentrazione residua più elevati.

D'altra parte, piogge di età più recente (per le quali è stato cautelativamente assunto nei calcoli un valore iniziale di 7 UT, leggermente più elevato del 6,4 suggerito dai dati relativi alle sorgenti ed ai corsi d'acqua locali), determinerebbero, per semplice decadimento radioattivo, contenuti in tritio residui dello stesso ordine di grandezza o più elevati di quelli legati alle piogge di infiltrazione più antica (tra 3 e 3,8 UT, Figura 30).

Modello di perfetto miscelamento

Con l'intento di raffinare ulteriormente le stime precedentemente fornite, è stato fatto un ulteriore calcolo dei valori di concentrazione di Tritio attesi nel punto di campionamento, assumendo che durante la circolazione sotterranea i contributi delle diverse acque infiltratesi vengano perfettamente miscelati e che il segnale isotopico risultante sia il risultato ponderato dei diversi segnali isotopici delle acque di ricarica, modificato in funzione dei diversi tempi di residenza nel serbatoio e dell'intensità della ricarica.

Anche in questo caso il modello adottato rappresenta una semplificazione forte della complessa realtà naturale. Le maggiori approssimazioni sono legate al fatto che nel modello non vengono tenute in considerazione le eterogeneità spaziali di una serie di parametri rilevanti, ma difficilmente determinabili con la necessaria accuratezza nei sistemi naturali, quali la porosità, la conducibilità idraulica, la distribuzione e l'efficienza di eventuali barriere di permeabilità o la trasmissività di zone fratturate e/o faglie.

Nel caso in esame quello che viene applicato è un modello di tipo "scatola chiusa" basato sulla semplice relazione $T=V/R$, dove T è il tempo medio di residenza delle acque nel sottosuolo, V il volume del sistema ed R la ricarica.

Le equazioni di bilancio di massa alla base del modello sono di tipo recursivo ed hanno la seguente forma generale valida per una serie di celle interconnesse:

$$UT_{(i+1)} V_{(i+1)} = UT_{(i)} * V_{(i)} + UT_{(Pi)} * P_{(i)} + UT_{(Ii)} * I_{(i)} - UT_{(i)} * E_{(i)} - \lambda * V_{(i)} * UT_{(i)} \quad (eq.1)$$

$$V_{(i+1)} = V_{(i)} + P_{(i)} + I_{(i)} - E_{(i)} \quad (eq.2)$$

dove "UT" è la concentrazione di Tritio in una data cella di volume "V", "P" è la ricarica meteorica, "I" il flusso in entrata dalla cella "a monte", "E" il flusso in uscita verso la cella "a valle", "λ" la costante di decadimento dell'isotopo radioattivo, mentre gli indici "i+1" ed "i" sono rispettivamente l'intervallo temporale di integrazione attuale e precedente.

L'equazione 1 rappresenta l'equazione di bilancio del Tritio, mentre l'equazione 2 rappresenta l'equazione di bilancio del solvente acquoso.

In mancanza di informazioni sull'estensione spaziale dei sistemi acquiferi, e quindi nell'impossibilità di procedere ad una ragionevole discretizzazione del sistema, nell'ambito di questo studio è stata adottata una soluzione semplificata ad una sola cella, in cui i termini di volume (V), ricarica (P), *inflow* (I) ed *outflow* (E) vengono ritenuti costanti e ponderati attraverso una sorta di variabile integrata rappresentativa del tempo di residenza delle acque nel sottosuolo.

Da un punto di vista concettuale, il tempo di residenza rappresenta il tempo trascorso da ciascuna aliquota di acqua all'interno del sistema prima del campionamento o del suo recapito in superficie. Durante questo intervallo temporale si assume che tutte le aliquote di acqua vengano completamente miscelate determinando un valore medio finale della composizione isotopica che dipende da: I) il valore isotopico iniziale di ogni singola aliquota e II) dalla quantità relativa penetrata all'interno del sistema.

Seguendo questo approccio, sono state calcolate una serie di curve che forniscono la variazione temporale delle concentrazioni di Tritio attese al variare dei tempi di residenza.



Queste curve, riportate nei diagrammi di figure 31 e 32, indicano che anche applicando un modello di perfetto miscelamento, nel periodo di osservazione 2003-2007 cui questo studio si riferisce, i valori di concentrazione di Tritio attesi dopo tempi di residenza variabili tra 2 (ipotesi di sistema con ridotta inerzia idrodinamica) e 100 anni (ipotesi di sistema poco trasmissivo o relativamente esteso), sono compresi tra circa 7 e 4 UT.

Sempre sulla base di questo modello semplificato si calcola anche che la presenza di valori di Tritio inferiori alle 3 UT nelle acque di galleria richieda tempi di residenza di 200 o più anni, mentre quella di valori compresi tra 2 ed 1 UT sia indicativa di tempi di ricambio nell'ordine dei 500 anni.

Viene perciò confermato che le concentrazioni di Tritio misurate nel settore centrale della galleria, in corrispondenza del punto di prelievo G05, sono indicative della presenza di acque "vecchie", con tempi di residenza del sottosuolo indicativamente superiori ai 100 anni. Il principale interesse legato a questa informazione è che essa ha una validità generale indipendente dal modello numerico e concettuale che si intende applicare nello studio del sistema.

La presenza di dinamiche di riequilibrio idrologico in atto all'interno del sistema, ipotizzata sulla base della variazione di comportamento (già discussa nei paragrafi precedenti) del punto di prelievo G03, suggerisce invece che l'applicazione contemporanea di diverse metodologie di datazione (aventi tempi di risposta tra loro diversi) ai punti di recapito in galleria sarebbe un'opzione necessaria per poter tentare stime più accurate dei tempi di residenza delle acque nel sottosuolo. Questo dovrebbe essere fatto in parallelo al monitoraggio dei contenuti di Tritio già iniziato nel corso della fase II di questo Progetto.

Fig. 31 – variazione di contenuto in tritio calcolata

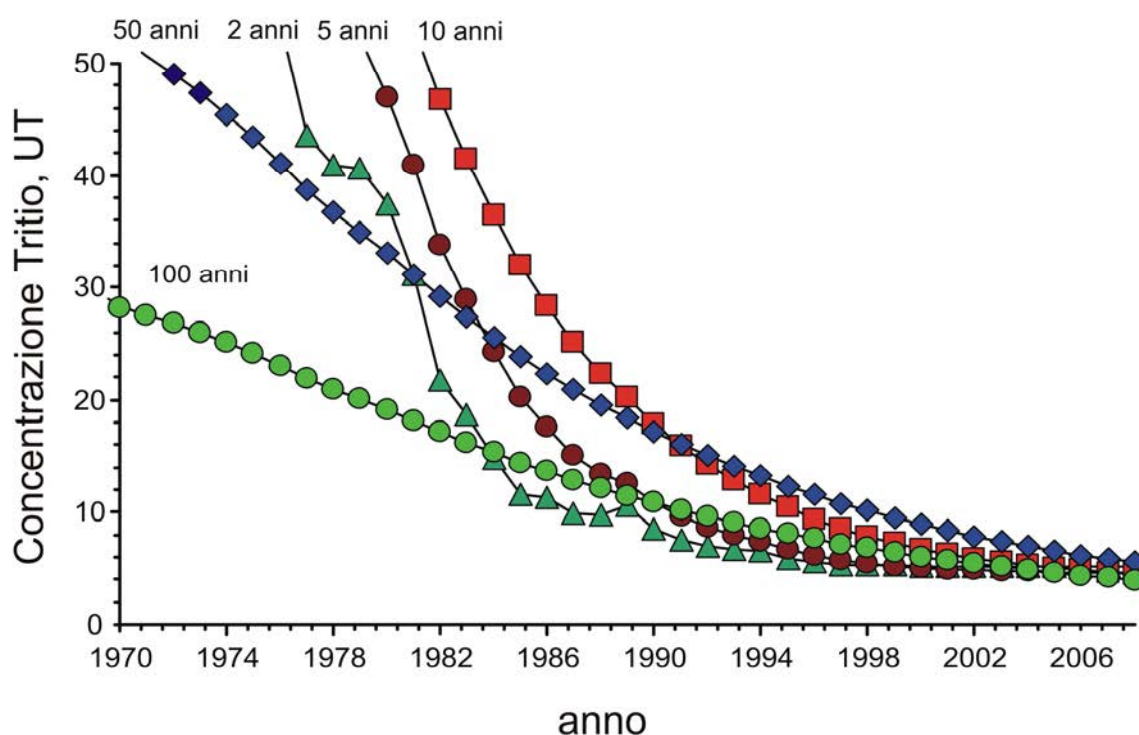
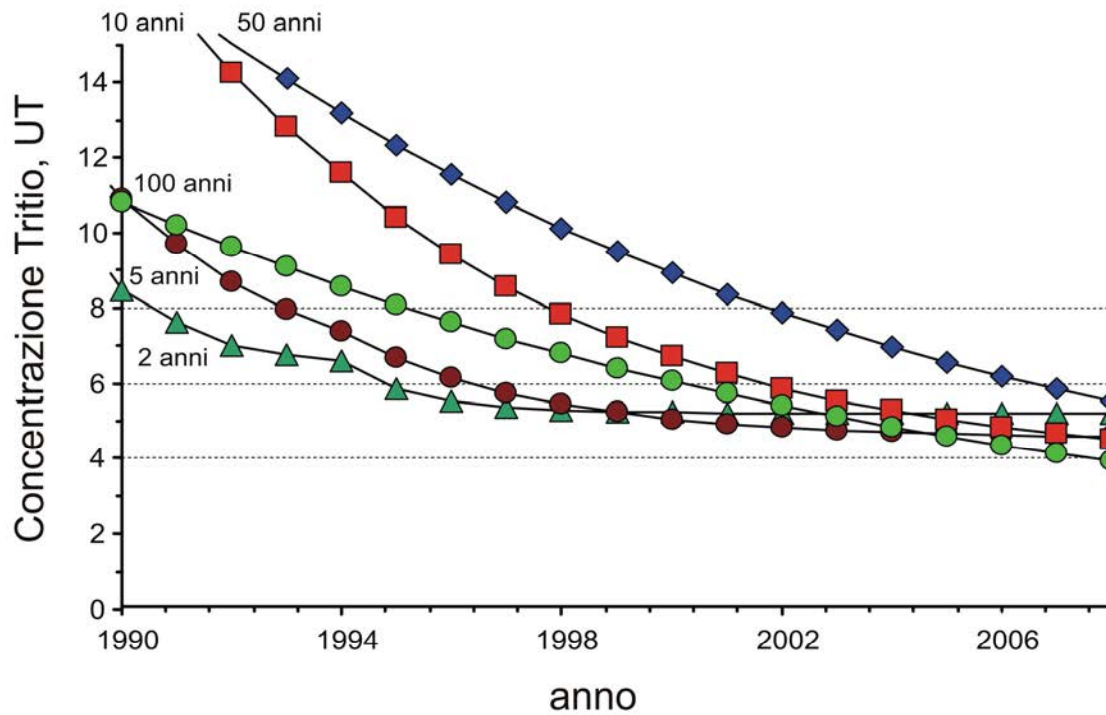




Fig. 32 – variazione di contenuto in tritio calcolata - dettaglio



Queste considerazioni suggeriscono perciò che, per spiegare le concentrazioni di tritio più basse misurate nei campioni di galleria, è indispensabile introdurre nel modello il mescolamento con acque di età antecedente l'inizio dei test nucleari in atmosfera



CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

In conclusione, si rileva che le attività relative alla seconda fase del Progetto si sono sostanzialmente svolte secondo il programma previsto, salvo limitati aggiustamenti dovuti alla “naturale” evoluzione del progetto ed a problematiche contingenti di campionamento.

In merito ai risultati raggiunti, considerati tutti i dati e le elaborazioni riportati nei capitoli precedenti (cui si rimanda per i dettagli), si possono riportare in sintesi le seguenti considerazioni conclusive:

- fra i punti di nuovo inserimento, quelli relativi alla galleria Allocchi della ferrovia Faentina mostrano, sul lato nord, acque con facies idrochimica bicarbonato calcica ed elevati valori di Tritio, a dimostrare un contributo pressoché esclusivo di acque di rapida infiltrazione. E' invece rilevante la conferma, sul lato sud, della presenza di acque con facies bicarbonato sodica e bassi valori di Tritio. Si tratta di un punto in cui vengono campionate le acque complessivamente drenate dal lato sud, ma nonostante si tratti di una miscela di acque drenate in diversi punti della galleria, si evidenzia un contributo particolarmente rilevante di acque di lunga circolazione;
- sempre fra i punti di nuovo inserimento, nell'area del Molinuccio, si evidenzia, per il pozzo Molinuccio 1, la presenza di acque con facies idrochimica bicarbonato calcica e elevati valori di Tritio, ad indicare che il pozzo emunge essenzialmente acque di rapida infiltrazione. Nel pozzo 3 sono emunte acque con chimismo intermedio (bicarbonato sodico/calcico) e valori medi in Tritio, ad indicare un mescolamento fra acque mature e di rapida infiltrazione. Il pozzo 4 mostra, invece, acque con facies bicarbonato sodica, tuttavia i valori particolarmente elevati di Sodio e l'andamento particolarmente variabile del Tritio, con valori anche elevati, suggerisce che queste acque si pongano al di fuori del trend di maturazione generale individuato, e ciò può essere verosimilmente messo in relazione al fatto che questo pozzo è perforato essenzialmente in litologie diverse dalla Marnoso Arenacea.;
- le acque di sorgente e dei corsi d'acqua confermano un annidamento su valori bicarbonato calcici ed elevato contenuto in Tritio. Anche i punti di nuovo inserimento S16, S17, S18 e F20 si pongono all'interno degli stessi intervalli di valori;
- per la galleria Firenzuola le analisi chimiche confermano differenze sostanziali fra i diversi punti di campionamento, con facies che vanno da bicarbonato calciche a bicarbonato sodiche. I diagrammi di correlazione chimica e chimico-isotopica, confrontati con i valori della prima fase (2004), mostrano, però, un complessivo spostamento verso valori caratteristici di acque meno mature, più evidente per i punti G03 (zona Fognano) e G11 (zona Casa d'Erci). Inoltre, l'analisi della variazione temporale del contenuto in Tritio mostra, per quasi tutti i punti, un andamento fortemente legato alle ricariche stagionali. Ciò pare quindi indicare un complessivo decremento del contributo delle acque di lunga circolazione, probabilmente dovuto al progressivo svuotamento delle riserve di acque mature intercettate dalla galleria;
- rispetto alle variazioni descritte nel punto precedente fa eccezione il punto G05, per il quale si è avuto il netto mantenimento dei valori su acque bicarbonato sodiche e con valori in Tritio particolarmente bassi. Il punto di campionamento è posto poco a sud del crinale appenninico, dove affiora un membro a più basso rapporto arenaria/marna, che verosimilmente funge da separatore fra le circolazioni superficiali e quelle profonde. La costante presenza di queste acque decisamente mature a livello galleria fa ipotizzare, per questo punto, la presenza di una circolazione di lungo



periodo soggetta a continua alimentazione, in analogia a quanto si può ipotizzare per il lato sud della galleria Allocchi, nella quale permangono acque di lunga circolazione a distanza di più di cento anni dallo scavo;

- per spiegare la presenza di acque con valori in Tritio particolarmente bassi, tuttora riscontrati in alcuni punti di galleria, i modelli di calcolo utilizzati suggeriscono la necessità di un contributo di acque meteoriche infiltratesi nel periodo antecedente gli esperimenti termonucleari in atmosfera, probabilmente con età fra i 50 e i 100 anni;

Come meglio analizzato nel dettaglio a pag 40, i dati geochimici ed isotopici fanno ritenere che, nelle acque drenate dalla galleria, sia oramai prevalente il contributo delle acque di ricarica rispetto a quelle di riserva geologica. Incrociando questi dati con l'analisi delle portate drenate dalla galleria, che mostrano una sostanziale stabilizzazione su una sinusoide legata alla stagionalità, si può ritenere plausibile che vi sia un avvicinamento sostanziale ad una nuova situazione di equilibrio, e che pertanto i valori di portata attualmente misurati in uscita dalla galleria possano essere quantomeno prossimi a quelli a regime.



Bibliografia essenziale

AA.VV. (1983) *"Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology"* IAEA Technical Reports Series No. 91, Wien.

AA.VV. (1983). *"Isotope Hydrology"* Wien, IAEA-SM-270/19.

Agnelli A., Canuti P., Garavoglia S., Gargini A., Innocenti P. (1999), *"Monitoraggio e vulnerabilità idrogeologica delle risorse idriche sotterranee lungo il tunnel ferroviario appenninico Alta Velocità Bologna-Firenze"*, Atti 3° Convegno nazionale protezione e gestione delle acque sotterranee per il III millennio, Parma, ottobre 1999, Pitagora Ed.

Berchi M., Landuzzi A., Minelli G. and Pialli G. (2001), *"Outer Northern Apennines"*, in *"Anatomy of an orogen: the Apennines and adjacent Mediterranean basins"*, pp.215-254, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (NL).

Bruni P. and Pandeli E. (1992). *"Le unità detritiche"*. In: *"Guide Geologiche Regionali - 4 - Appennino Tosco Emiliano"*, pp.31-35, Be-Ma. Ed. – Milano

Capozzi R., Landuzzi A., Negri A., Vai G.B. (1992), *"Domino Umbro-Romagnolo e Marchigiano-Adriatico"* in *"Guide Geologiche Regionali - 4 - Appennino Tosco Emiliano"*, pp.19-26, Be-Ma. Ed. – Milano

De Jager J. (1979) – *"The relation between tectonics and sedimentation along the Sillaro line"*. *Geologica Ultraiectina*, 19, pp.93.

Doni A., Ranfagni L., Rossi S., *"Schema procedurale per la previsione e il monitoraggio degli impatti sulle risorse idriche sotterranee nella costruzione di gallerie"*, atti del congresso *"La geologia ambientale, strategie per il nuovo millennio"*, Genova (Italy) Luglio 2002.

Doni A., Ranfagni L., Rodolfi G., Rossi S., *"APENNINE TUNNELING WORKS: IMPACTS ON THE SURFACE AND UNDERGROUND WATER RESOURCES"* - D08 Field Trip Guidebook, 32nd International Geological Congress - Florence (Italy) 20-28 august 2004

Faure G. (1986). *"Principles of Isotope Geology"*, 2nd edition. John Wiley and Sons, New York.

Federico F. (1984), *"Il processo di drenaggio da una galleria in avanzamento"*, *Rivista Italiana di Geotecnica*, 4, 191-208

Franceschini F., Gherardi F., Montanari D., Panichi C., Ranfagni L., Rossi S., *"HYDROGEOLOGICAL AND GEOCHEMICAL STUDY OF A TUNNEL-IMPACTED AREA: THE CASE OF FIRENZUOLA TUNNEL IN THE MUGELLO REGION (Northern Apennines, Central Italy)"* - Poster presented at the 32nd International Geological Congress - Florence (Italy) 20-28 august 2004

Fritz P. and Fontes J.C. (1986) *"Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol.II"*, The Terrestrial Environment, Elsevier.

Gambelli C. (2002), *"Experience of tunnel Driving to the Florence-Bologna High -speed railway line, Italy"*, proceedings of IUT '02 seminar, 28-42.



Gat J.R. and Gonfiantini R. (1981). "*Stable Isotope Hydrology, Deuterium and oxygen-18 in the Water Cycle*" IAEA Technical Reports Series No. 210, Wien.

Hoefs J. (1987). "*Stable Isotope Geochemistry*", 3rd edition. Springer Verlag, Berlin.

Kendall C. and McDonnell, J.J. (1998) "*Isotope Tracers in Catchment Hydrology*" Elsevier.

Martini I.P., Sagri M & Colella A., (2001) "*Neogene-Quaternary basins of the inner Apennines and Calabrian arc*", in : G.B. Vai & I.P. Martini, "Anatomy of an Orogen: the Apennines and adjacent Mediterranean basins", Kluwer Academic Publishers, 375-400.

Ribacchi R., Graziani A. & Boldini D. (2002), "*Previsione degli afflussi d'acqua in galleria e influenza sull'ambiente*", MIR 2002, Politecnico di Torino.

Rossi S. , Ranfagni L., Biancalani P., Calzolari L. (2001), "*Geological and hydrogeological analysis in large scale tunnelling and impact forecasting on groundwater resources: Bologna-Firenze high speed railway (Italy)*", in "Progress in tunnelling after 2000, proceedings of the AITES-ITA 2001 world tunnel congress" Milano (Italy) 10th-13th june 2001, vol. I, pp.649-656.

Stumm W. and Morgan, J.J. (1981). "*Aquatic chemistry*", 3rd edition. John Wiley and Sons, New York.

Treves B. (1992), "*Inquadramento geodinamico*", in: "Guide Geologiche Regionali - 4 - Appennino Tosco Emiliano", pp.79-85, Be-Ma. Ed. – Milano

Manahan S.E. (1994). "*Environmental Chemistry*", 6th edition. CRC Press, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.

E' stata inoltre presa in considerazione la documentazione prodotta, sia da ARPAT, sia da CAVET, che da altri Enti, in sede di Osservatorio Ambientale sulla tratta AV Bologna-Firenze ed in sede di Commissione Tecnica per la realizzazione dell'Addendum.



Allegati:

1. Tabella di tutti i risultati analitici
2. Carta dell'ubicazione dei punti di campionamento
3. Schema geologico
4. sezione schematica riepilogativa

