



NODO STRADALE E AUTOSTRADALE DI GENOVA
Adeguamento del sistema
A7 – A10 – A12

ATTIVITA' DI STUDIO IDROGEOLOGICO FINALIZZATE ALLA PERIMETRAZIONE DELLE AREE DI ALIMENTAZIONE DI UN GRUPPO DI SORGENTI PARTICOLARMENTE SIGNIFICATIVE NELL'AMBITO DELL'OTTEMPERANZA ALLE RICHIESTE DELLA PRESCRIZIONE "A19" DEL DECRETO DI COMPATIBILITA' AMBIENTALE

Relazione

3625 - 0 1 - 0 0 1 0 1 . DOC

01	OTT. 21	M.BERSANO BEGEY	M.BERSANO BEGEY	F.GROSSO	
00	SET. 21	M.BERSANO BEGEY	M.BERSANO BEGEY	F.GROSSO	
REV.	DATA	REDAZIONE	VERIFICA	AUTORIZZAZIONE	MODIFICHE

INDICE

1. PREMESSA	1
2. SELEZIONE DI SORGENTI SIGNIFICATIVE PER LO STUDIO E DELIMITAZIONE DEI BACINI DI RICARICA	1
3. METODOLOGIA APPLICATA E DETTAGLIO DELLE ATTIVITA'	3
4. INTEGRAZIONE DEL QUADRO CONOSCITIVO DI SUPPORTO ALL'APPLICAZIONE DEL METODO PER LA DELIMITAZIONE DEI BACINI IMBRIFERI	9
4.1 Integrazione degli elementi geologico strutturali	9
4.1.1 Quadro di riferimento	9
4.1.2 Integrazione a scala di dettaglio degli elementi strutturali	10
4.2 Integrazione dei dati quantitativi: monitoraggio per campagne e in continuo delle portate	13
4.3 Integrazione dei dati qualità delle acque: monitoraggio idrochimico	20
5. DELIMITAZIONE DEI BACINI DI RICARICA	24
5.1 Delimitazione preliminare	24
5.2 Checklist di verifica e delimitazione definitiva	26
5.2.1 Ridelimitazione imbriferi sorgenti con anomalia di bilancio idrogeologico	27
5.2.1.1 Sorgente S218	27
5.2.1.2 Sorgente S290	27
5.2.1.3 Sorgente S320	28
5.2.1.4 Sorgente S333	28
5.2.1.5 Sorgente S339	29
5.2.1.6 Sorgente S355	29
5.2.1.7 Sorgente S358	30
5.2.1.8 Sorgente S359	30
5.2.1.9 Sorgente S375-298	31
5.2.1.10 Sorgente S610	32
5.2.1.11 Sorgente S645	32
5.2.1.12 Sorgente S660	33
5.2.2 Verifica imbriferi sorgenti con bilancio idrogeologico compatibile	33
5.2.2.1 Sorgente S026	33
5.2.2.2 Sorgente S027	33
5.2.2.3 Sorgente S646	33
6. CONCLUSIONI	36

1. PREMESSA

All'interno del Parere n.6 delle prescrizioni A19 del Decreto di Compatibilità Ambientale n.28 del 23 gennaio 2014, viene sottolineata la necessità di definire un quadro conoscitivo adeguato alle finalità previste dalle stesse prescrizioni; in particolare viene ribadito che la definizione dei bacini di alimentazione delle sorgenti più a rischio di interferenza con lo scavo delle gallerie sia compiutamente realizzabile solo a seguito di un congruo periodo di monitoraggio.

In tale ambito è stato individuato un ampio gruppo di sorgenti caratterizzate da rischio di impatto più elevato ($R > 0.4$)¹, oppure da un'elevata significatività idrogeologica, e/o rilevanza socio-economica per l'utenza servita, che in relazione a tali caratteristiche di rilevanza sono inserite nel Progetto di Monitoraggio Ambientale PMA in corso. Per tale selezione di sorgenti significative è stata messa a punto una metodologia volta alla definizione dell'area di ricarica sotteso da ognuna delle sorgenti stesse.

La metodologia, come descritto in dettaglio nei punti successivi, rappresenta la sintesi di approcci metodologici da letteratura tecnica accreditata, specificamente adattati alla tipologia complessa ed eterogenea dei circuiti idrogeologici nel settore in esame. La stessa si basa sulle seguenti attività di studio:

- individuazione delle principali strutture tettoniche di interesse idrogeologico che hanno ruolo nella definizione dei bacini di alimentazione delle sorgenti più a rischio sulla base del modello DHI;
- caratterizzazione dei fattori idrogeologici che determinano le risorgive;
- caratterizzazione chimico-fisica, correlazione del chimismo con la natura geochemica della roccia serbatoio, valutazione dello stile di circolazione (corticale, intermedia, profonda) da linee evolutive del chimismo;
- caratterizzazione quantitativa (indici di variabilità, curve di esaurimento, calcolo del volume di riserva dinamica);
- sintesi dei dati geologico-strutturali, idrochimici e quantitativi, per la definizione dei bacini di alimentazione delle sorgenti, o, in caso di delimitazione non univoca, della configurazione più cautelativa ovvero tale da comprendere tutti i settori di possibile infiltrazione per la ricarica delle sorgenti stesse.

In fase di progettazione definitiva ed esecutiva erano state già state svolte indagini e valutazioni rispondenti alle suddette finalità, anche se necessariamente estese alla scala dell'intero territorio di indagine (circa 85 km² su cui sono stati censiti più di 550 punti d'acqua e misurati 45 corsi d'acqua superficiali): l'attività di monitoraggio e le specifiche valutazioni su un numero opportunamente scelto di sorgenti significative ha l'obiettivo di fornire, quindi, il necessario affinamento e dettaglio delle conoscenze rispetto agli studi di progetto.

2. SELEZIONE DI SORGENTI SIGNIFICATIVE PER LO STUDIO E DELIMITAZIONE DEI BACINI DI RICARICA

In Tabella 1 viene individuato un elenco di 50 sorgenti ritenute particolarmente significative per le finalità dello studio.

¹ sulla base del c.d. modello DHI, Drawdown Hazard Index utilizzato per la valutazione del rischio di interferenza con le opere in galleria da PD e PE

Con riferimento a quanto riportato in premessa, nella stessa tabella vengono indicate le motivazioni della scelta riguardo alla rilevanza della sorgente, sia per motivi idrogeologici (portata relativamente elevata, acque solfuree ecc.), che per valore socio-economico nell'ambito degli approvvigionamenti idrici locali ed in riferimento al rischio di interferenza.

CODICE	R	Litologia	Galleria interferente	Denominazione area critica	Significatività nel contesto indagato
S601	0.0890	Calcescisti	Borgonuovo	Neighè	Rappresentativa circolazione in calcescisti entro incisione/struttura tettonica; sorgente ad uso privato domestico (3 famiglie), in area non raggiunta dalla rete di pubblico acquedotto.
S165	0.4856	Calcescisti	Borgonuovo	Crevari	Rappresentativa circolazione in calcescisti entro incisione/struttura tettonica; portata elevata per contesto idrogeologico locale importanza acquedottistica pubblica per approvvigionamento area Crevari
S253	0.4225	Calcescisti	Borgonuovo	Agriturismo Pietre Turchine	a rischio elevato in quanto sulla verticale del tracciato in progetto; Rilevante importanza socio economica in quanto alimenta struttura ricettiva (agriturismo)
S194	0.4225	Calcescisti	Borgonuovo	rio Fontanelle	Rappresentativa circolazione in calcescisti entro incisione/struttura tettonica;
S209	0.3535	Calcescisti - serpentinite Voltri	Borgonuovo	Borgonuovo	Rilevante importanza socio economica in quanto alimenta consorzio per uso irriguo; è il drenaggio della esistente galleria Borgonuovo e costituisce verosimilmente l'insieme di piùvenute idriche è rappresentativa dell'interferenza degli scavi in progetto sul tratto di versante sotteso dalla vecchia galleria
S247	0.5125	Calcescisti	Delle Grazie	Voltri	Rappresentativa circolazione in calcescisti entro incisione/struttura tettonica; sorgente ad uso privato domestico (3 famiglie), in area non sempre raggiunta dalla rete di pubblico acquedotto; a rischio elevato in quanto sulla verticale del tracciato in progetto;
S072	0.4232	Serpentiniti Voltri - Calcescisti	Amandola	via Piccardo	Rappresentativa circolazione in calcescisti e nelle scaglie di serpentiniti; a rischio in quanto sulla verticale del tracciato in progetto ed in prossimità faglia intercettabile dallo scavo;
S218	0.5443	Calcescisti - Serpentinite Voltri	Amandola	via Piccardo	Rappresentativa circolazione in calcescisti e nelle scaglie di serpentiniti; impattata da sondaggio nel 2011; sorgente ad uso privato domestico (6 utenze), in area non raggiunta dalla rete di pubblico acquedotto.
S302	0.5464	Serpentiniti Voltri	Amandola	via Piccardo	Rappresentativa circolazione in calcescisti e nelle scaglie di serpentiniti; a rischio in quanto sulla verticale del tracciato in progetto ed in prossimità di faglia intercettabile dallo scavo;
S027	0.2031	Serpentiniti Voltri	Amandola	Acque solfuree - Branega	particolarmente rappresentativa tra le sorgenti solfuree in quanto caratterizzata da portata rilevante e costante nel tempo; possibile diritto di concessione appartenente alle Terme di Genova;
S026	0.8414	Serpentiniti Voltri	Amandola	Branega	sorgente ad uso privato domestico (2 famiglie), in area non raggiunta dalla rete di pubblico acquedotto.
S174	0.4079	Serpentiniti Voltri	Amandola	Acque solfuree - Terme Acquasanta	Particolarmente significativa in quanto storica sorgente che alimenta le Terme di Genova
S393	0.1282	Brecce - Depositi di versante	Amandola	Galleria FFSS Pietralunga	E' il drenaggio della galleria FFSS "Pietralunga" della linea Ovada Genova; rappresentativa della circolazione entro materiale detritico che caratterizza la parte superficiale del versante
S297	0.0996	Serpentiniti Voltri - depositi di versante	Amandola	Stazione Acquasanta	importante per approvvigionamento acquedotto pubblico; rappresentativa della circolazione entro serpentiniti ed entro detrito di versante; possibile apporto da corso d'acqua superficiale;
S612	0.6421	Lerzholiti	Amandola	Branega - Lische, rio Pian delle Figlie	rappresentativa di area caratterizzata da diverse sorgenti con asse di alimentazione coincidente con il rio delle Figlie; attualmente non utilizzate (ex acquedotto pubblico Lische), se non impattate potrebbero costituire fonte alternativa
S036	0.2189	Serpentiniti Voltri	Amandola	via Torrazza	sorgente ad uso privato domestico (2 famiglie); rappresentativa della circolazione in corrispondenza di faglia che viene intercettata dal tracciato della galleria
S084	0.5708	Serpentiniti Voltri	Amandola	via Scarpanto - case Fico	rappresentativa circolazione idrica lungo sistema faglie N-S, potenzialmente intercettabile dalla galleria; rilevante importanza socio economica in quanto alimenta consorzio irriguo con 20 utenze;
S086	0.5516	Serpentiniti Voltri	Amandola	via Scarpanto - case Fico	rappresentativa circolazione idrica lungo sistema faglie N-S, potenzialmente intercettabile dalla galleria;
S093	0.5516	Serpentiniti Voltri	Amandola	via Scarpanto - case Fico	
S105	0.5779	Serpentiniti Voltri	Amandola	via Scarpanto - case Fico	
S111	0.5516	Serpentiniti Voltri	Amandola	via Scarpanto - case Fico	
S108	0.9940	Serpentiniti Voltri	Amandola	Bric delle Monache - Bric Boessa	di grande importanza socio economica in quanto la sorgente alimenta l'acquedotto di Villa Pallavicini che approvvigiona la stessa Villa ed almeno altre 5 utenze; sorgente caratterizzata da importante portata per il contesto in oggetto; rappresentativa della circolazione lungo faglie e lungo versante di Bric Boessa;
S237	0.6213	Serpentiniti Voltri	Amandola	Ronco - Bric Boessa	sorgenti di grande importanza in quanto ad uso privato domestico (10 famiglie complessive), in area molto distante dalla rete di pubblico acquedotto.
S250	0.5970	Serpentiniti Voltri	Amandola	Ronco - Bric Boessa	
S646	0.7970	Serpentiniti Voltri	Amandola	Acque solfuree - rio Boessa	acque solforose in sorgente storica nel fondovalle

CODICE	R	Litologia	Galleria interferente	Denominazione area critica	Significatività nel contesto indagato
S158	0.4510	Serpentiniti Voltri	Monterosso	Monte Contessa - Peucan	Rappresentativa circolazione nelle serpentiniti di Monte Contessa, emergenza idrica in corrispondenza importante limite permeabilità tra serpentiniti e calcescisti;
S298	0.4007	Serpentiniti Voltri	Monterosso	Monte Contessa - Villa Page	
S375	0.7453	Serpentiniti Voltri	Monterosso	Monte Contessa - Sant'Alberto	
S660	0.5293	Serpentiniti Voltri	Monterosso	Monte Contessa - C. del Bosco	
S262	0.6567	Serpentiniti Voltaggio	Monterosso	Monte Timone	Gruppo di sorgenti alimentate da circolazione lungo faglie N-S che vengono intercettate dallo scavo della galleria; sorgenti ad uso privato domestico, in area non ancora raggiunta dalla rete di pubblico acquedotto.
S275	0.6567	Serpentiniti Voltaggio	Monterosso	Monte Timone Gherfa	
S277	0.6567	Serpentiniti Voltaggio	Monterosso	Monte Timone - Bianchetta	
S355	0.5779	Serpentiniti Voltaggio - Metabasalti	Monterosso	Monte Timone - S.Pietro ai Prati	
S359	0.4378	Serpentiniti Voltaggio	Monterosso	Monte Timone - S.Pietro ai Prati	
S320	0.7618	Serpentiniti Voltaggio	Monterosso	Monte Timone	
S321	0.7618	Serpentiniti Voltaggio - Scisti Gallaneto	Monterosso	Monte Timone	
S358	0.4378	Dolome di Monte Gazzo	Monterosso	Monte Timone - S.Pietro ai Prati	Particolarmente rappresentativa in quanto sorgente di origine carsica; di interesse come fonte alternativa nel caso non venisse interessata dallo scavo;
S353	0.6681	Serpentiniti Figogna - Metabasalti	Monterosso	Scarpino - Acquedotto Cassinelle	sorgente molto significativa in quanto alimentata da ammasso serpentinitico molto fratturato con probabile apporto dagli adiacenti metabasalti; sorgente a servizio dell'importante acquedotto consortile "Cassinelle" (55 utenze) già drenata da sondaggio VB7bis che attualmente provvede ad alimentare l'acquedotto;
S610	0.7207	Metabasalti	Monterosso	Murta - Case Gazzo Acquedotto Gasetto	sorgente rappresentativa delle emergenze idriche che avvengono in corrispondenza dell'importante contatto tettonico tra metabasalti e argilliti; rilevante importanza nell'approvvigionamento idrico locale in quanto alimenta acquedotto consortile del Gasetto a servizio di 4 famiglie non allacciate alla rete di pubblico acquedotto.
S290	0.4232	Metabasalti	Monterosso	Murta Case Gazzo - acquedotto Roggerone	sorgente rappresentativa delle emergenze idriche che avvengono in corrispondenza dell'importante contatto tettonico tra metabasalti e argilliti; rilevante importanza nell'approvvigionamento idrico locale in quanto alimenta acquedotto consortile Roggerone a servizio di 2 famiglie non allacciate alla rete di pubblico acquedotto.
S344	0.6348	Metabasalti	Monterosso	Murta Acquedotto Ciliegio	sorgente rappresentativa delle emergenze idriche che avvengono in corrispondenza dell'importante contatto tettonico tra metabasalti e argilliti; rilevante importanza nell'approvvigionamento idrico locale in quanto alimenta acquedotto consortile Ciliegio a servizio di 10 famiglie non allacciate alla rete di pubblico acquedotto.
S339	0.3642	Metabasalti	Monterosso	Murta Carpinello	sorgente rappresentativa delle emergenze idriche che avvengono in corrispondenza dell'importante contatto tettonico tra metabasalti e argilliti;
S333	0.6150	Metabasalti	Monterosso	Trasta - Acquedotto Noce Stretta	sorgente rappresentativa delle emergenze idriche che avvengono in corrispondenza dell'importante contatto tettonico tra metabasalti e argilliti; rilevante importanza nell'approvvigionamento idrico locale in quanto alimenta acquedotto consortile Noce Stretta con 45 utenze per circa 30 abitazioni non allacciate alla rete di pubblico acquedotto.
S645	0.5928	Metabasalti	Monterosso	stabilimento imbottigliamento fonte Madonna Guardia	Storica Fonte Madonna della Guardia
S270-SXP	0.0508	Formazione Ronco	SX Polcevera	Goresina	Rappresentativa circolazione in formazioni terrigene entro incisione/struttura tettonica;
S293-SXP	0.4666	Argilliti Montanesi	SX Polcevera	Sx Polcevera Baccan Beugio	sorgente ad uso privato domestico, in area non raggiunta dalla rete di pubblico acquedotto.
S301-SXP	0.2378	Formazione Ronco	SX Polcevera	Sx Polcevera	a rischio elevato in quanto sulla verticale del tracciato in progetto;
S303-SXP	0.4553	Formazione Ronco	SX Polcevera	Sx Polcevera - Bruc du Ventu	a rischio elevato in quanto sulla verticale del tracciato in progetto;
S307-SXP	0.0427	Formazione Ronco	SX Polcevera	Sx Polcevera Begato Torbella	Rappresentativa circolazione in formazioni terrigene entro incisione/struttura tettonica;
S638	0.5464	Formazione Ronco	SX Polcevera	Torbella	a rischio elevato in quanto sulla verticale del tracciato in progetto; sorgente ad uso privato domestico (2 famiglie), in area non raggiunta dalla rete di pubblico acquedotto.

Tabella 1 - Caratteristiche e significatività / criterio di selezione delle sorgenti oggetto dello studio

3. METODOLOGIA APPLICATA E DETTAGLIO DELLE ATTIVITA'

La delimitazione del bacino di alimentazione delle sorgenti è stata effettuata applicando, in forma incrociata e di verifica / checklist, differenti approcci di analisi idrogeologica ampiamente validati in letteratura tecnica.

La prima base conoscitiva per le elaborazioni è costituita dallo studio geologico e idrogeologico di progetto, da cui è stato reso disponibile un "modello" generale di circolazione sotterranea per differenti contesti strutturali e gruppi specifici di sorgenti, tale da definirne in modo più o meno accurato lo schema e le aree di alimentazione.

L'ulteriore approfondimento, per l'effettiva delimitazione dell'area di ricarica, è consistito nella verifica di compatibilità di modelli di circolazione e dei bacini di alimentazione preliminarmente definiti, con l'andamento dei parametri di regime idrologico e idrochimico, derivati dalle attività di monitoraggio integrative. Ulteriori indicazioni sono derivate, per alcuni specifici casi, dall'attività di approfondimento locale del rilievo geologico-idrogeologico tramite fotointerpretazioni e attività in sito.

La procedura "checklist" per la delimitazione dei bacini di alimentazione, si basa su attività concatenate e conseguenti attraverso le quali è possibile affinare o correggere delimitazioni preliminari, sintetizzate nello schema a blocchi di Figura 2.

Lo schema di attività deriva dalla trasposizione di metodologie idrogeologiche di frequente applicazione da letteratura tecnico-scientifica, allo specifico ambito geologico-strutturale del settore in esame, ovvero in coerenza con gli schemi di circolazione sotterranea definiti a partire dagli studi idrogeologici di Progetto Definitivo ed Esecutivo.

Con riferimento allo schema a blocchi, il criterio generale per la delimitazione preliminare, ovvero di primo tentativo, dei bacini di alimentazione, si basa sulla delimitazione dei bacini imbriferi sottesi dalle sorgenti, con riferimento agli spartiacque principali.

Tale principio, assunto puramente a base preliminare (blocco "di partenza" dello schema) è alla base dei cosiddetti "metodi morfologico altimetrici" (Piacentini 1993, Borsari et al. 1994).

Il principio del metodo si basa sull'osservazione che in un massiccio a bassa permeabilità, e per sola circolazione in rete di fratture la circolazione sotterranea stessa segue di norma un andamento parietale, in cui vi è una sostanziale coincidenza tra spartiacque sotterranei e superficiali, ovvero la congruenza tra bacini imbriferi principali e bacini idrogeologici.

Ancora a livello di schema complessivo, la circolazione in "falda di versante" avviene secondo una "zonazione idrogeologica verticale", di norma corrispondente ad una *stratificazione idrochimica delle acque*, da cui, a livello ancora di massima schematizzazione dei fenomeni, la possibilità di suddivisione tra:

- una circolazione corticale epidermica ("local" in Figura 1) nella fascia di decompressione delle fratture, di norma particolarmente attiva orientativamente nei primi 20-50 m dal piano campagna, con regime dei circuiti fortemente variabile in funzione della ricarica stagionale ma influenzata sostanzialmente anche delle precipitazioni brevi e intense;
- una circolazione più profonda ("intermediate" e "regional"), generalmente più lenta e con tempi di residenza sotterranei più elevati, scarsamente variabile o influenzata solo dai cicli di ricarica stagionali. Tale circolazione è più attiva nei settori tettonizzati, e prevalentemente nelle dislocazioni in regime trascorrente o distensivo, dove la fratturazione risulta maggiormente pervasiva in profondità.

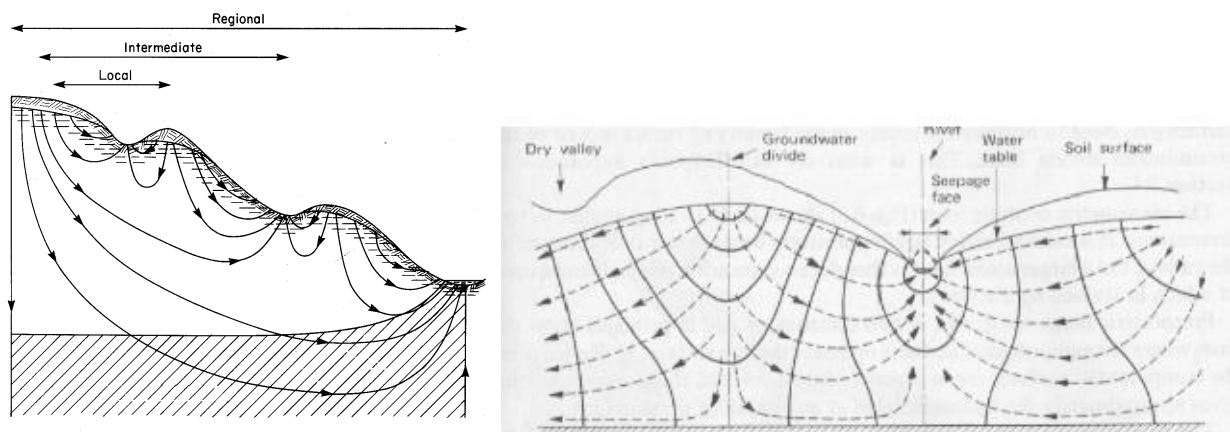


Figura 1 - Schema generale di circolazione idrica entro un complesso fratturato a bassa permeabilità.

La delimitazione generale alla base del “blocco di partenza” (scenario di coincidenza tra bacino imbrifero ed idrogeologico) può risultare non accurata in relazione a complicazioni del modello di circolazione, che da Studio Idrogeologico di progetto risultano sostanzialmente correlabili a:

1) circolazione in Unità con permeabilità mista per fratturazione e carsismo, condizione in cui ricadono unità costituite da litotipi carbonatici in cui è possibile sia lo sviluppo di grandi vuoti in ambiente carsico (Calcarei di Erzelli - ERZ, Dolomia di Monte Gazzo - MDG, Calcarei della Serie di Gallareto-Lencisa SGL); relativamente ai litotipi flyshoidi (Calcarei del Monte Antola - FAN) caratterizzati da sviluppo dei fenomeni carsici più limitato e localizzato, già in fase di modello concettuale di PD si è considerato valido il modello di circolazione in rete di fratture con coincidenza di bacino imbrifero e idrogeologico, seppure con permeabilità per fratturazione che può risultare localmente incrementata da fenomeni chimico-dissolutivi.

2) Controllo tettonico, circolazione in linee di faglia, con particolare riferimento alle strutture distensive post plioceniche con andamento circa N-S; la sussistenza di una circolazione preferenziale nell'ambito delle linee tettoniche NNE-SSW è evidenziata dall' allineamento di sorgenti, frequentemente con chimismo caratteristico di circuiti intermedi e profondi (cfr. anche localizzazione delle sorgenti “solforose”). Tali allineamenti di risorgive interessano tutti i sistemi di faglia vicarianti. La massima densità di sorgenti si osserva all'intersezione tra le suddette faglie, entro complessi metabasitici e ultramafitici per riduzione di permeabilità e risalita di acque profonde al contatto con i calcescisti, questi ultimi caratterizzati da diffuso intasamento delle fratture con argille di alterazione e conseguente circolazione maggiormente limitata al settore corticale.

In tale contesto, a valle della delimitazione preliminare lo schema a blocchi prevede una fase di verifica basata sulla verifica di congruenza con il bilancio idrologico e idrogeologico a scala dei bacini “di primo tentativo”.

La verifica prende spunto dalle metodologie basate su *“mass balance approach” / “infiltration method” (US EPA, 1987)*. Il bilancio di massa si fonda sul principio di equilibrio tra volumi infiltrati sul bacino di ricarica e restituiti dalla sorgente.

Premesso che dal punto di vista teorico il bilancio risente dell'approssimazione del non equilibrio, ovvero del susseguirsi di transitori di ricarica ed esaurimento a diversa scala temporale, la migliore applicazione può essere riferita ad un intero anno idrologico, con inizio e termine a fine esaurimento del regime di portata delle sorgenti.

A riguardo ci si è basati per la stima sui regimi di portata nell'ambito dell'anno idrologico le date 17/09/2019 – 17/09/2020, periodo in prima approssimazione compreso nelle condizioni idrologiche sopraindicate, al termine di periodi annuali di esaurimento tardo estivo.

In considerazione della significatività a livello di ordine dimensionale della verifica, si è ritenuto di privilegiare la completezza del set di dati di bilancio, considerando sia i dati derivanti da misure per campagne che quelli acquisiti con stazioni automatiche. Nel primo caso il volume restituito dalle sorgenti è stato ricavato sulla base della portata media dalle campagne di misura integrato per il periodo annuale di riferimento; dove disponibili i dati "in continuo" il volume è derivato dall'integrale dell'idrogramma nel medesimo periodo.

Il coefficiente di infiltrazione (adim.) è definito dal rapporto tra il volume di afflusso per precipitazione totale sul bacino e il volume defluito dalla sorgente o gruppo di sorgenti sotteso

Il metodo di "mass balance approach", applicato nel procedimento di verifica a checklist (vedi schema a blocchi) è finalizzato alla sola verifica di compatibilità tra bacino di ricarica e bilancio dei volumi. A riguardo sono da considerare "attendibili" (percorso a sinistra dello schema a blocchi) valori anche molto bassi del coefficiente di infiltrazione, evidenza di una eventuale sovrastima del bacino di ricarica, mentre "NON attendibili" (a destra dello schema a blocchi) sono considerati valori elevati dello stesso, indicativi di una delimitazione eventualmente non comprensiva dell'intera area di ricarica. Il limite è stato definito tenendo conto delle condizioni complessive di bassa permeabilità dei litotipi, in coerenza con quanto già valutato negli studi geologici per il Progetto Definitivo. Le stime di bilancio da Progetto Definitivo valutavano coefficienti di infiltrazione dell'ordine massimo del 10-11%. I modelli numerici a larga scala in ambito di Progetto Esecutivo, si caratterizzavano per input in media significativamente inferiori, ma fino localmente all'ordine del 12-15% della precipitazione totale. Nel caso in esame, vista la presenza di diverse sorgenti con verosimile contributo occulto da subalveo o infiltrazione di acque superficiali nelle coperture detritiche, si è deciso a livello di checklist di mantenere in prima analisi il valore soglia massimo al 15% della precipitazione totale, rimandando ai "blocchi" di verifica successivi la conferma o meno dell'attendibilità della delimitazione o viceversa la ridefinizione.

A valle della verifica di compatibilità con il bilancio idrologico, la conferma della delimitazione ovvero la coincidenza tra bacino idrologico e bacino imbrifero sotteso passa attraverso le successive verifiche dello schema a blocchi in sinistra, di tipo geologico strutturale ovvero l'assenza di discontinuità significative o fasce con acquiferi carbonatici potenzialmente carsificati (precedenti punti 1, 2), ovvero il non riscontro di un assetto delle strutture potenzialmente favorevole alla messa in comunicazione di differenti bacini imbriferi-idrogeologici.

Ulteriori elementi di verifica nel procedimento di checklist in Figura 2, fino all'eventuale conferma della condizione di coincidenza bacino imbrifero = bacino idrogeologico, derivano dai riscontri relativi all'indice di variabilità delle portate che in tali condizioni risulta di norma elevato, ed al (basso) grado relativo di maturità idrochimica lungo le linee evolutive del chimismo. Si tratta di approcci di tipo quantitativo e idrochimico, indicativi di circuiti di alimentazione corticali/parietali, ma che è necessario interpretare in un quadro più complessivo geologico-strutturale, da cui la posizione subordinata nello schema a blocchi di verifica.

A riguardo, le sorgenti nella linea centrale dello schema a blocchi (circolazione profonda in sistemi di faglie, acquiferi non carbonatici), presentano un valore medio dell'indice di variabilità $I_v = 167\%$, a fronte di un valore medio complessivo per tutte le altre sorgenti in esame pari a 810% . Per valutazione nella procedura di schema a blocchi, è stato preso a riferimento un valore indicativo di $I_v = 250\%$. Il criterio è in ogni caso stato considerato valido a livello di indicazione generale di circolazione corticale (coincidenza bacino idrogeologico e imbrifero),

da valutare nel quadro complessivo, ma non costituisce un criterio assoluto di inclusione o esclusione, riscontrandosi anche nella medesima categoria sorgenti con indici di variabilità I_v relativamente bassi $I_v < 250\%$.

Ulteriore elemento indicativo nello schema a blocchi è costituito dall'andamento delle curve di esaurimento, che è stato possibile ricostruire relativamente ai punti monitorati in continuo con strumentazione automatica. In accordo con le valutazioni dello Studio Idrogeologico di Progetto Definitivo-Esecutivo, è considerato indicativo di circolazione corticale un basso immagazzinamento, che si evidenzia anche da bassi valori di portata di magra tardo estivi, al termine dell'esaurimento, per ridotto immagazzinamento e capacità di regolazione. Sempre in accordo con gli studi di PD è stato preso a riferimento per la circolazione esclusivamente corticale (coincidenza bacino idrogeologico e imbrifero) il valore di $Q < 40$ l/min (valore medio + dev. Standard) per le unità prevalentemente metamorfiche in destra Polcevera e $Q < 7$ l/min per le unità prevalentemente flyshoidi in sinistra del Polcevera stesso.

Analogamente, il criterio di bassa "maturità idrochimica" è indicativo di circolazione corticale e basso tempo di residenza nell'acquifero, pertinente con la colonna in sinistra dello schema a blocchi (coincidenza bacino idrogeologico e imbrifero). Tuttavia, come per l'indice di variabilità I_v , il criterio è indicativo ed eventualmente confermativo nell'ambito della valutazione di un quadro completo, ma non è criterio di esclusione dalla checklist. Per "maturità idrochimica" si è fatto riferimento, in coerenza con gli studi pregressi, alla linea evolutiva caratteristica da facies bicarbonato-calcio-magnesiache verso facies più tipicamente clorurato e solfato calciche e magnesiache) e i relativi rapporti caratteristici tra specie ioniche.

In particolare è considerata indicativa la posizione nel campo caratteristico di maggiore maturità delle acque lungo le linee evolutive definite dai rapporti caratteristici (espressi in meq/l) $\text{HCO}_3^- / \text{SO}_4^{2-}$, $\text{Mg}^{++} / \text{Ca}^{++}$, $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ lungo i classici diagrammi di Piper (Figura 10). Analogamente, sulla base della caratterizzazione da PD sono state correlate a probabile risalita lungo linee di faglia pervasive, e dunque con infiltrazione non necessariamente collegata al bacino imbrifero di pertinenza, le acque da risorgive caratterizzate da valori estremi di pH ($\text{pH} > 9$) riscontrabili nelle sorgenti entro le ofioliti del "Gruppo di Voltri Auct.", sulla base delle specifiche valutazioni idrogeologiche riportate dalla letteratura tecnica accreditata², oltre alle sorgenti con anomalie di temperatura, presumibilmente connesse a risalita di acque profonde.

A partire dalla **delimitazione preliminare** dei bacini idrogeologici di ricarica, basata sulla coincidenza con gli imbriferi sottesi dalle sorgenti, il percorso di checklist descritto e riportato in Figura 2, guida alle opzioni di **delimitazione definitiva**, ovvero, dalla colonna di sinistra a quella di destra:

- conferma delimitazione preliminare ("A")
- ridelimitazione con inclusione, oltre all'imbrifero sotteso, delle porzioni di bacino afferenti all'idrostruttura/discontinuità, a quota superiore alla risorgiva ("B1");
- ridelimitazione con inclusione, oltre all'imbrifero sotteso, delle porzioni di bacino afferente alla fascia carbonatica / acquifero carsico ("B2").

In sintesi, nelle condizioni di verosimile non coincidenza del bacino di ricarica con l'imbrifero sotteso secondo il modello di circolazione corticale e di versante (Figura 1), si assume che possano risultare contribuenti per infiltrazione tutte porzioni che sottendono la struttura geologica o linea tettonica di rilevanza per il controllo della

² Cipolli F., Gambardella B., Marini L., Ottonello G., Vetuschi Zuccolini M.: "Geochemistry of high-pH waters from serpentinites of the Gruppo di Voltri (Genova, Italy) and reaction path modeling of CO₂ sequestration in serpentinite aquifers", Applied Geochemistry 19 (2004).

circolazione sotterranea, fino come limite inferiore alla quota della risorgiva (applicazione del “metodo topografico-altimetrico”).

In questo modo, per linee di faglia e strutture/fasce carbonatiche pervasive, si giunge ad una delimitazione di tipo cautelativo, in cui sono comprese aree anche significativamente estese di possibile contributo all'alimentazione delle sorgenti.

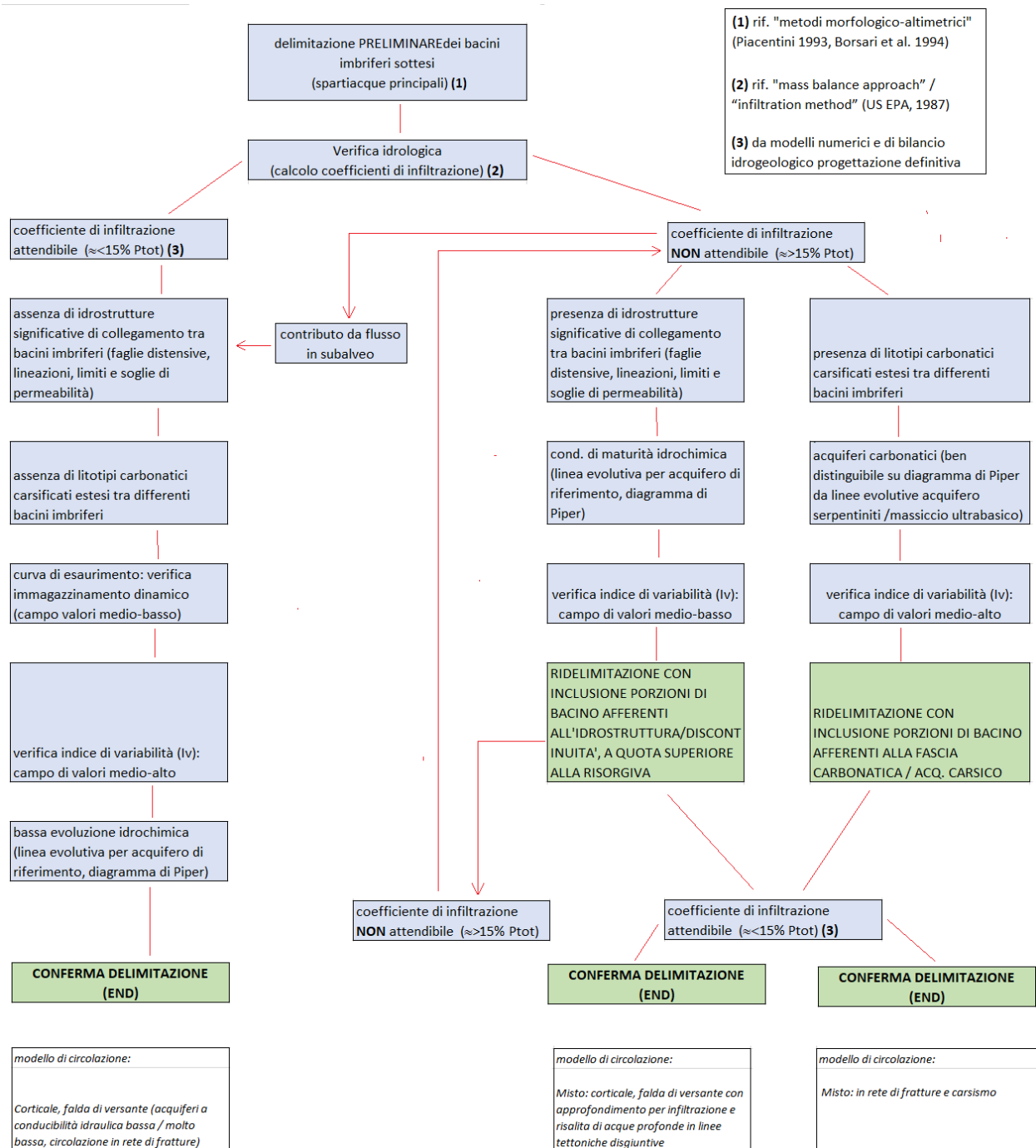


Figura 2 – Metodologia operativa workflow per la delimitazione dei bacini di ricarica delle sorgenti

4. INTEGRAZIONE DEL QUADRO CONOSCITIVO DI SUPPORTO ALL'APPLICAZIONE DEL METODO PER LA DELIMITAZIONE DEI BACINI IMBRIFERI

Nell'ambito degli studi idrogeologici di PD e PE è stato posto uno specifico focus sull'alimentazione delle sorgenti finalizzato alla determinazione delle possibili interferenze con le opere in progetto, in particolare nei tratti drenanti, e viceversa alle condizioni di sfruttabilità "in sicurezza" nel quadro della ricerca di fonti integrative e alternative. A supporto di tali valutazioni, effettuate con metodi semi quantitativi (elaborazione di indici di rischio tipo DHI Drawdown Hazard Index) e localmente quantitativi (modelli numerici tridimensionali), è stato costruito un modello concettuale basato su un approfondito quadro conoscitivo di tipo geologico-strutturale, idrogeochimico, e di monitoraggio dei parametri di portata.

Il quadro conoscitivo acquisito dagli studi ed elaborati idrologici di progetto, a cui si rimanda integralmente, costituisce dunque base conoscitiva principale anche per le attività specifiche di approfondimento di cui al presente studio.

Partendo da tale quadro, nell'ambito del presente studio sono stati condotti approfondimenti basati sui dati acquisiti nell'ambito del Piano di Monitoraggio Ambientale per la tratta in esame, specificamente finalizzati all'applicazione del workflow di Figura 2, e in particolare:

- rilievo in fotointerpretazione e verifica in campo di lineamenti strutturali significativi
- monitoraggio per campagne e in continuo delle portate, per verifica idrologica, con riferimento al dettaglio della suddetta metodologia, dei coefficienti di infiltrazione derivanti dalla delimitazione preliminare, oltre che più in generale per la distinzione tra circolazioni corticali variabili e circuiti profondi stabili;
- monitoraggio idrochimico delle specie ioniche principali in riferimento alla valutazione di compatibilità con la litologia dell'acquifero e alla distinzione di circuiti profondi stabili.

4.1 Integrazione degli elementi geologico strutturali

4.1.1 Quadro di riferimento

Con riferimento a quanto riportato in dettaglio nella relazione idrogeologica di progetto, a cui si rimanda, l'area in esame si inserisce in un settore di grande complessità strutturale, che tradizionalmente giustappone il dominio orogenico alpino a quello appenninico. Rimandando a descrizioni più approfondite nella Relazione Geologica, in sintesi, procedendo da Ovest verso Est, sono riconoscibili tre settori con caratteristiche geologiche e strutturali peculiari (Figura 31):

- il Gruppo di Voltri;
- la Zona Sestri Voltaggio;
- il Dominio dei Flisch Appenninici.

Sono inoltre presenti depositi tardo e post orogenici attribuibili al Bacino Terziario Ligure-Piemontese e depositi marini e continentali di differenti età che hanno in parte coperto le unità del substrato e colmato le paleovalli.

Il Gruppo di Voltri e la Zona Sestri - Voltaggio, sono separati da un lineamento strutturale diretto N-S, noto in bibliografia come "Linea Sestri Voltaggio", alla quale viene fatto corrispondere il limite fisico tra Alpi ed Appennini. Tale lineamento tettonico è stato variamente interpretato in letteratura come faglia trasforme (Elter, Pertusati, 1973), come thrust (Cortesogno e Haccard, 1984) o come faglia estensionale (Hoogerduijn, 1994). Attualmente è riconosciuta come parte di un complesso sistema con differenti cinematismi.

Gruppo di Voltri

Le successioni appartenenti a questo Gruppo sono riferibili al Dominio Piemontese-Ligure ovvero ad un bacino oceanico, costituito da originarie rocce intrusive ed effusive e da sedimenti di vario tipo depositi sopra le lave basaltiche; in letteratura sono state distinte al suo interno numerose Unità Tettonometamorfiche riconducibili tradizionalmente a due insiemi principali:

- unità costituite prevalentemente da rocce metagabbriiche e serpentinitiche (Unità Beigua, Unità Ponzema, Unità S. Luca Colma);
- unità costituite da prevalenti calcescisti e prasiniti (metabasiti), ma anche da subordinate rocce di origine mantellina quali serpentiniti e peridotiti (Unità Alpicella, Unità Palmaro-Caffarella [cod. 9 in Figura 32], Unità Voltri-Rossiglione)

Zona Sestri - Voltaggio

Interessa la dorsale montuosa che costituisce la parte alta del versante in destra idrografica della Val Polcevera e comprende Unità Tettonometamorfiche estremamente differenti per litologia e livello di metamorfismo:

- U.T. del Monte Gazzo [cod. 8 in Figura 32], costituita da dolomie e calcari triassici;
- U.T. Cravasco - Voltaggio [7], costituita da serpentiniti, meta basalti, calcari e scisti filladici;
- U.T. del M.Figogna [6], costituita da serpentiniti, meta basiti e argilloscisti, talora con livelli carbonatici e silicoclastici fini.

Dominio dei Flysch appenninici

Interessa la valle del Torrente Polcevera e comprende una serie di Unità Tettoniche e Tettonometamorfiche assai omogenee dal punto di vista litologico, con un grado di metamorfismo progressivamente decrescente procedendo da W verso E [2, 3, 4, 5 in Figura 32]; le Unità in sinistra idrografica del Torrente Polcevera possono essere considerate non metamorfiche. Queste unità si presentano impilate con vergenza da Est verso Ovest, e occupano grossomodo fasce allungate in senso N-S lungo la Val Polcevera.

4.1.2 Integrazione a scala di dettaglio degli elementi strutturali

Rimandando per il dettaglio agli elaborati dello studio idrogeologico di progetto, è evidente il controllo delle strutture tettoniche fragili sulle condizioni di alimentazione e di riemersione delle acque sotterranee, come desumibile anche dagli allineamenti di sorgenti con le lineazioni strutturali, in riferimento al complesso delle sorgenti censite in fase di progetto come specificamente della selezione di sorgenti principali oggetto del presente studio.

Nella cartografia idrogeologica di PE sono state definite 3 categorie in funzione dei caratteri primari, cioè in termini di effetto macroscopico più o meno fortemente idroconduttivo o tamponante:

- faglie 1: strutture fortemente idroconduttive caratterizzabili con permeabilità da elevate a medie;
- faglie 2: strutture idroconduttive caratterizzabili con permeabilità da medie a basse;
- faglie 3: strutture tamponanti caratterizzabili con permeabilità da basse a molto basse.

La cartografia geologica e idrogeologica di progetto, per le strutture non interferenti in modo diretto con le opere in galleria e pertanto di significativa rilevanza geotecnica, è generalmente focalizzata sulle macrostrutture principali.

Peraltro le macrostrutture presentano fasce di ripetizioni e vicarianti strutturali, di norma con analogo comportamento e ruolo di condizionamento idrogeologico, tali da risultare significativi nello schema di alimentazione (faglie 1-2 idroconduttive) e di risorgenza (faglie 3 tamponanti) dei punti censiti.

Pertanto l'approfondimento ha riguardato, dove evidente un ruolo di controllo idrogeologico-strutturale, la definizione e delimitazione di strutture vicarianti attraverso un'analisi di dettaglio locale, basata su:

- fotointerpretazione in ambiente GIS, su immagini aeree in proiezione tridimensionale (per sovrapposizione a base DTM lidar e incremento della scala delle altezze);
- verifica in campo sulla base di misure della giacitura e del campo delle fratture sulla base delle usuali tecniche di geologia strutturale.

Tutte le strutture di nuovo censimento sono riportate nella cartografia dei bacini idrogeologici, quest'ultima basata per chiarezza di analisi sulla cartografia geologica e strutturale di progetto esecutivo.

La descrizione delle strutture locali inserite nella cartografia, è riportata in riferimento alle singole sorgenti e gruppi di risorgive studiati, con riferimento a quanto riportato nel dettaglio al successivo punto 5.2.

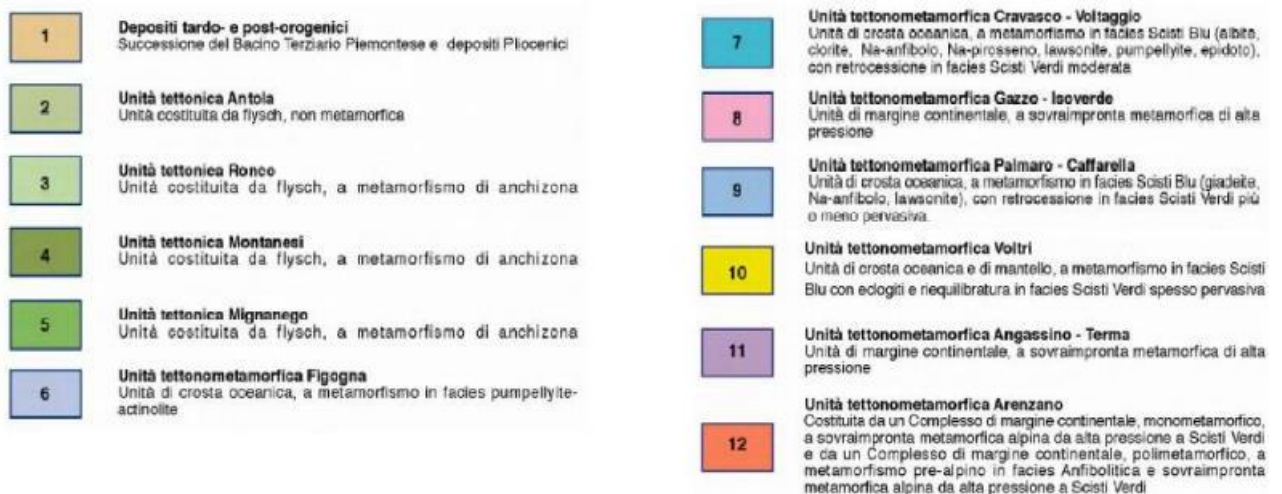


Figura 3 – Schema strutturale, legenda (Figura 4)

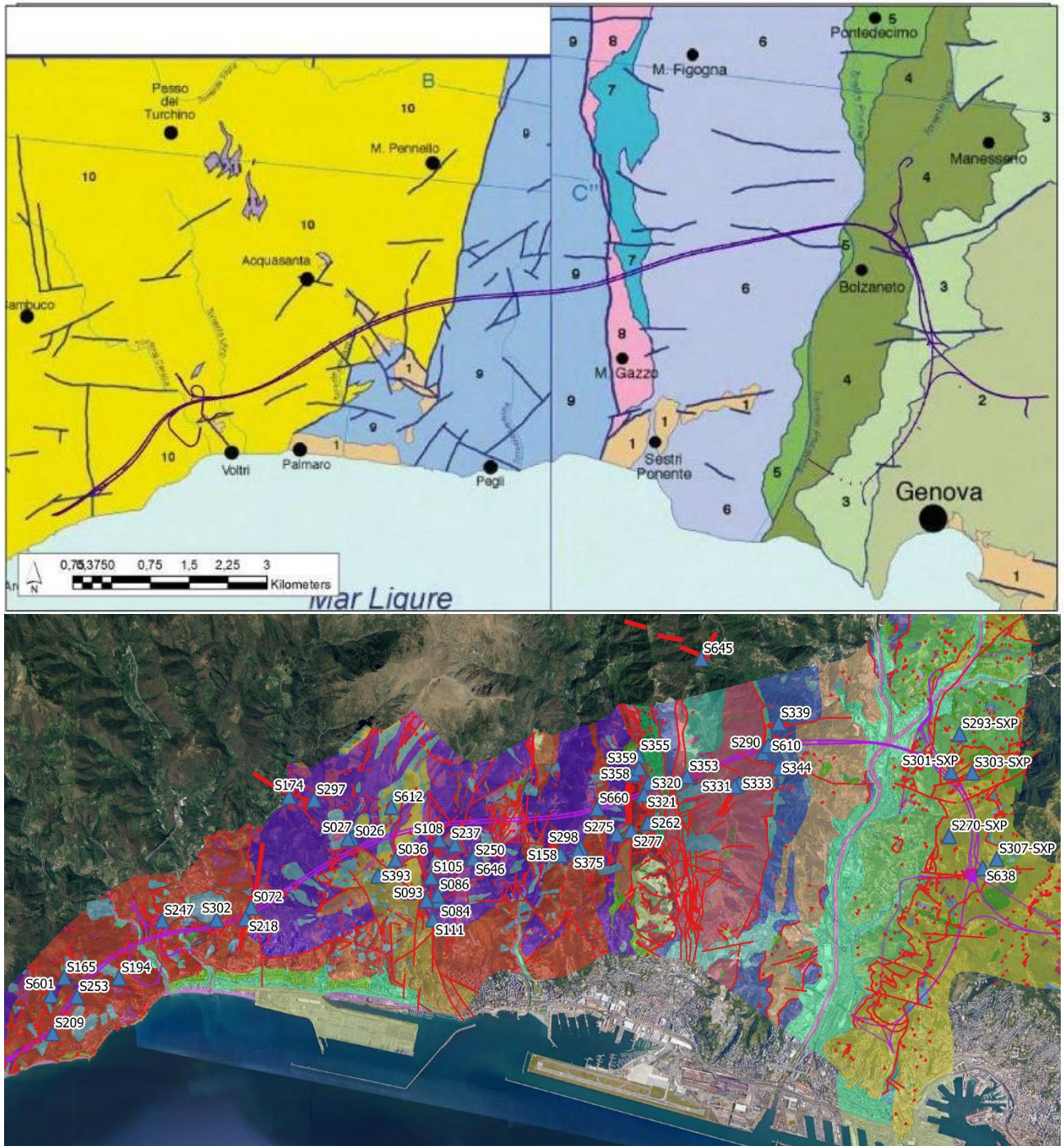


Figura 4 – Schema strutturale del settore in esame e localizzazione su cartografia geologica PE delle sorgenti in esame (nota: immagine esemplificativa d'insieme. Rif. base di dettaglio scala 1:5.000, Elaborato 2 – 6; tavole 1 - 5).

4.2 Integrazione dei dati quantitativi: monitoraggio per campagne e in continuo delle portate

L'applicazione del metodo di delimitazione secondo il workflow di Figura 2 richiede una conoscenza delle condizioni di afflusso e deflusso di supporto alla valutazione della verifica idrologica / calcolo dei coefficienti di infiltrazione, come da citato approccio US EPA (1987).

Sono stati pertanto acquisiti sulla base del PMA i dati relativi a:

- precipitazioni, per la stazione meteo di Genova Pegli;
- misure di portata per le stazioni monitorate in continuo con installazioni fisse, o dove non disponibili, per campagne con cadenza stagionale (trimestrale).

La localizzazione delle sorgenti e la modalità di monitoraggio (in continuo/ manuale per campagne) è riportata in Figura 5, con riferimento al quadro di sintesi in Tabella 4.

Come già precedentemente evidenziato, premesso che dal punto di vista teorico il bilancio idrogeologico risente dell'approssimazione del non equilibrio, ovvero del susseguirsi di transitori di ricarica ed esaurimento a diversa scala temporale, la migliore applicazione può essere riferita ad un intero anno idrologico, con inizio e termine a fine esaurimento del regime di portata delle sorgenti.

A riguardo, rimandando ancora alle valutazioni già svolte, ci si è basati per la stima sui regimi di portata nell'ambito dell'anno idrologico compreso tra le date 17/09/2019 – 17/09/2020, periodo in prima approssimazione compreso nelle condizioni idrologiche sopraindicate, al termine di periodi annuali di esaurimento tardo estivo.

In Figura 6 sono riportati grafici esemplificativi del regime di portata misurato da stazioni fisse per le sorgenti suddette, in correlazione con i dati di precipitazione giornalieri. Si può notare, in coerenza con lo stile di circolazione già evidenziato dagli studi idrogeologici di progetto, la risposta rapida della portata all'andamento delle precipitazioni per incremento della pressione di falda alla zona di ricarica, rendendo significativo per il bilancio idrogeologico il riferimento al medesimo periodo temporale riguardo a afflussi da precipitazione e deflussi da sorgenti.

Per l'elaborazione dei dati quantitativi funzionali all'applicazione della checklist di Figura 2 e, in generale, del metodo US EPA 1987, viene fatto riferimento a Tabella 4:

- per l'anno idrologico di riferimento, portate Q_{max} , Q_{med} , Q_{min} , e relativo indice di variabilità $(Q_{max} - Q_{min})/Q_{med}\%$;
- per il periodo di esaurimento, portate $Q_{max}(t=0)$, Q_{min} (finale), Q_{med} , volume immagazzinato W_{tot} (integrale curva di esaurimento rispetto al tempo).

Per l'anno idrologico di riferimento il valore dell'altezza di infiltrazione I (mm/a) è ricavato, considerando il principio di equivalenza nell'anno idrologico tra l'infiltrazione efficace sul bacino di ricarica e il deflusso alle sorgenti dal medesimo bacino (alla base del metodo US EPA), come rapporto tra la portata media annuale Q_{med} e la superficie S del bacino stesso:

$$I \text{ (mm/a)} = 1000 * Q_{med} \text{ (m}^3\text{/a)} / S \text{ (m}^2\text{)}$$

Il coefficiente di infiltrazione I_c (adim.) è invece ricavato dal rapporto tra la stessa altezza di infiltrazione I e l'afflusso totale da precipitazione sul bacino di ricarica P_{tot} per il periodo di riferimento:

$$I_c (-) = I \text{ (mm/a)} / P_{tot} \text{ (mm/a)}$$

Per l'elaborazione dei parametri suddetti, funzionali al metodo US EPA 87, è stato fatto riferimento all'anno idrologico nell'intervallo 17/09/19÷17/09/20.

Il valore di Q_{med} è stato ricavato per il periodo annuale di riferimento sulla base degli andamenti registrati delle portate, per le stazioni attrezzate con strumentazione fissa. Dove non disponibili registrazioni in continuo delle portate (rif. Figura 5 e campi in grigio di Tabella 4), si è fatto riferimento per i valori di Q_{med} alla campagna del 24/06/2020, in quanto, sulla base di quanto complessivamente osservabile per le stazioni fisse, corrispondenti alla condizione intermedia circa del tratto di esaurimento, e non influenzati da picchi di precipitazione immediatamente precedenti.

Peraltro, l'approssimazione si ritiene compatibile con la finalità, come detto, di prima valutazione dell'ordine dimensionale del bilancio idrogeologico e conseguente compatibilità con il bacino di ricarica, consentendo l'utilizzo nell'ambito della metodologia di Figura 2 anche dei dati acquisiti per campagne stagionali.

Il periodo di esaurimento a cui riferire i medesimi calcoli di portata oltre che del volume W_{tot} , è stato definito per singola sorgente, nell'ambito di un periodo variabile in funzione del singolo regime idrologico, compreso nel periodo annuale di riferimento.

E' significativo rilevare che la tendenza complessiva per l'anno idrologico considerato, è riferibile ad un ciclo di ricarica ed esaurimento principale di lunga durata, a singola stagionalità di ricarica, ovvero con ricarica invernale fino alla fine dicembre 2019, e successivo esaurimento per un periodo fino a 270 giorni, ovvero, fino alla fine di settembre 2020 coincidente con un nuovo periodo di ricarica autunnale-invernale.

Questo andamento è ben riconoscibile anche nei diagrammi esemplificativi riportati Figura 6, in riferimento a un flusso di base di esaurimento della ricarica autunnale-invernale, a cui si sovrappone il marcato "disturbo" correlato a input di precipitazione brevi e intensi, peraltro attivi sulla componente di ricarica corticale e non sullo storage profondo di riferimento per la definizione dei volumi immagazzinati nel periodo di ricarica.

Pertanto, per il calcolo dei parametri della curva di esaurimento e conseguente W_{tot} , si è fatto riferimento per ogni sorgente a una curva ricampionata sui valori del flusso di base, al netto degli input di ricarica brevi e poco influenti sul flusso di base medesimo.

Da notare che per alcune stazioni, oltre ai "disturbi" dei cicli brevi di ricarica si sono riscontrate anche temporanee problematiche tecniche, correlate alla fase di "taratura" delle stazioni, come in particolare l'adeguamento della scala di deflusso in relazione, necessariamente, alla non conoscenza pregressa delle portate di picco.

In alcuni casi si è dunque optato per la ricostruzione delle curve al netto, ad esempio, di picchi fuori scala o interruzioni temporanee, considerando la finalità di valutazione dell'ordine dimensionale del bilancio idrogeologico e la conseguente valutazione di compatibilità con il bacino di ricarica.

Nella Figura 9 sono riportate le curve di esaurimento relative agli idrogrammi di Figura 6, Figura 7 e Figura 8, ricostruite sulla base dei criteri indicati.

Per i punti dove non sono disponibili le registrazioni in continuo delle portate (rif. Figura 5 e campi in grigio di Tabella 4), si è fatto riferimento alle campagne del 24/06/20 e 25/11/20, sulla base di quanto osservabile sulle stazioni fisse corrispondenti alla condizione intermedia rispettivamente dei tratti di esaurimento e di ricarica, non influenzati da picchi di precipitazione immediatamente precedenti.

E' stato dunque assunto, dal confronto delle misure per campagne con quelle in continuo, la media di queste due misure in campagne in condizioni idrologiche "intermedie" come più significativa rispetto al dato medio delle quattro campagne annuali. Per altro, l'approssimazione si ritiene compatibile con la finalità, come detto, di prima valutazione dell'ordine dimensionale del bilancio idrogeologico e conseguente compatibilità con il bacino di ricarica, consentendo l'utilizzo, nell'ambito della metodologia di Figura 2, anche dei dati acquisiti per campagne stagionali. Per questi punti non è stato evidentemente effettuato alcun calcolo relativo a W_{tot} e I_v .

Si rileva come per 8 delle 50 sorgenti in esame (S093, S253, S293-XP, S353, S359, S646, S298-S375, S638), per le quali sono previste da PMA misure di portata per campagne, non sono in realtà stati acquisiti nel periodo di riferimento dati di misura, in relazione a problematiche tecniche od operative. Per tali sorgenti nell'ambito della metodologia di Figura 2 si è considerato cautelativamente una condizione a priori di non compatibilità con il bilancio idrogeologico, e in conseguenza la revisione della delimitazione in favore della massima possibile estensione del bacino di ricarica in funzione degli elementi geologico-strutturali.



Figura 5 – Monitoraggio della portata per le sorgenti in esame. Tipologia dei dati.

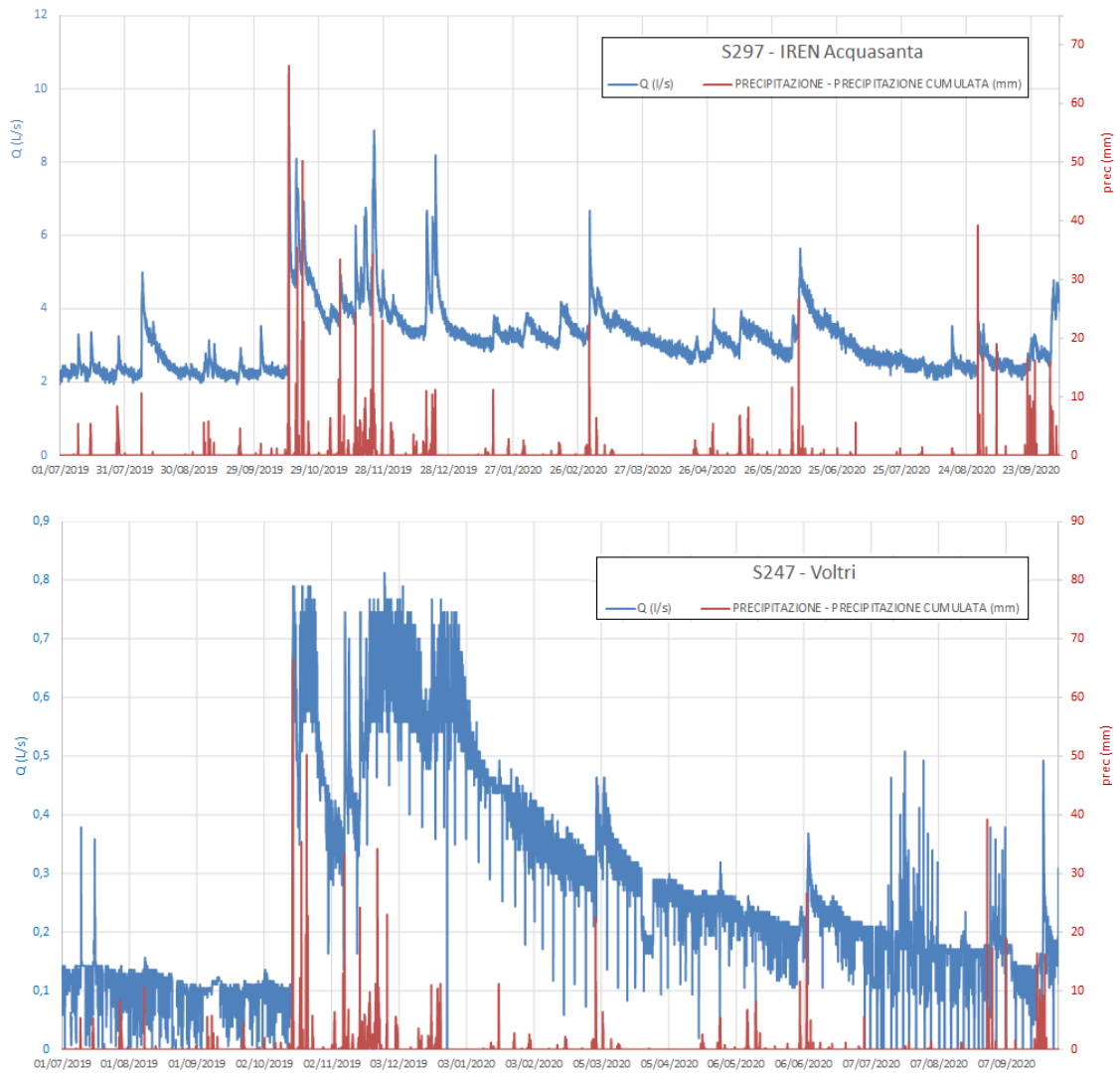


Figura 6 – Diagrammi di portata per le stazioni fisse S297, S247, in correlazione con le precipitazioni giornaliere alla stazione meteo di GE-Pegli.

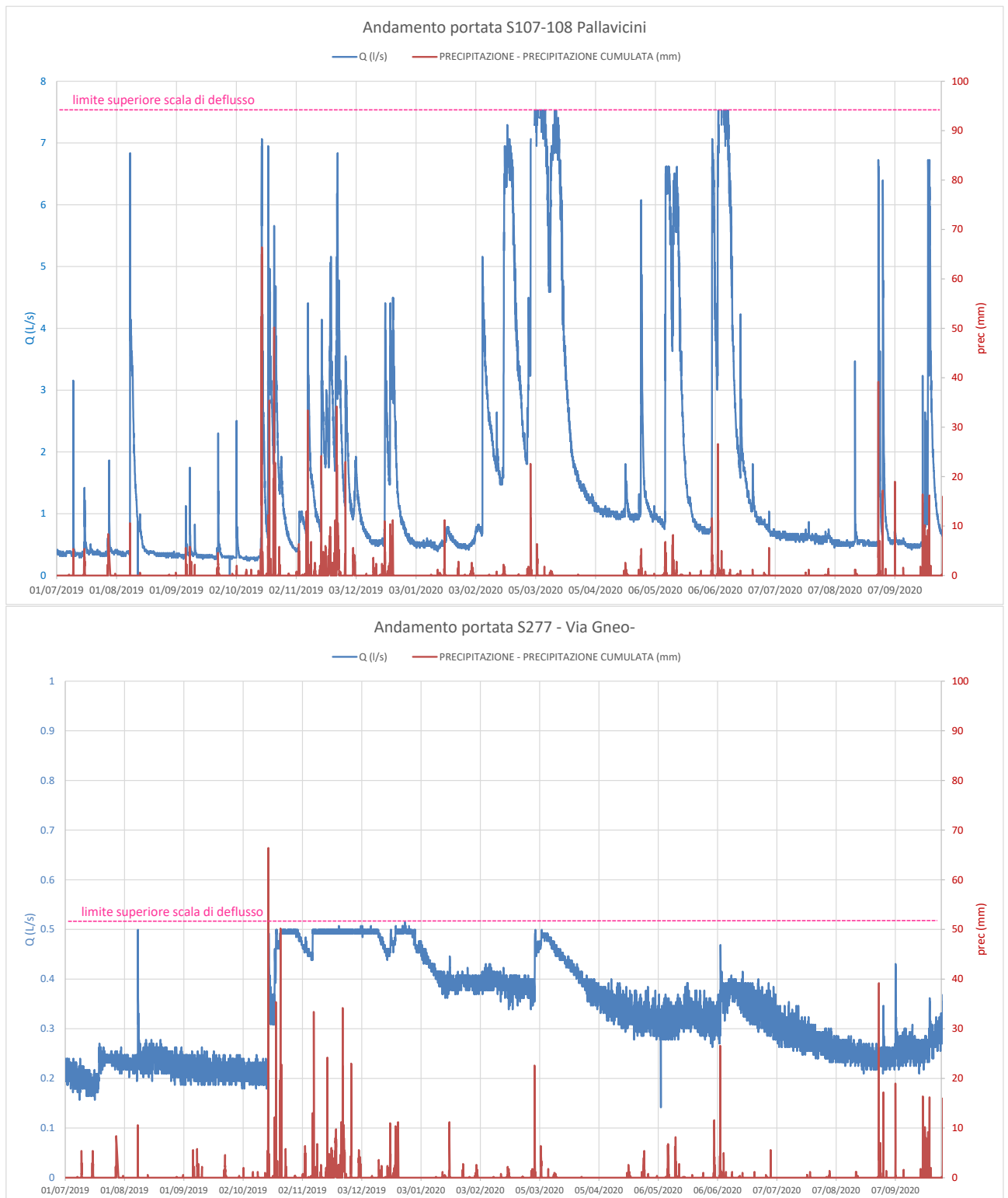


Figura 7 – Diagrammi di portata per le stazioni fisse S107-108, S277, in correlazione con le precipitazioni giornaliere alla stazione meteo di GE-Pegli.

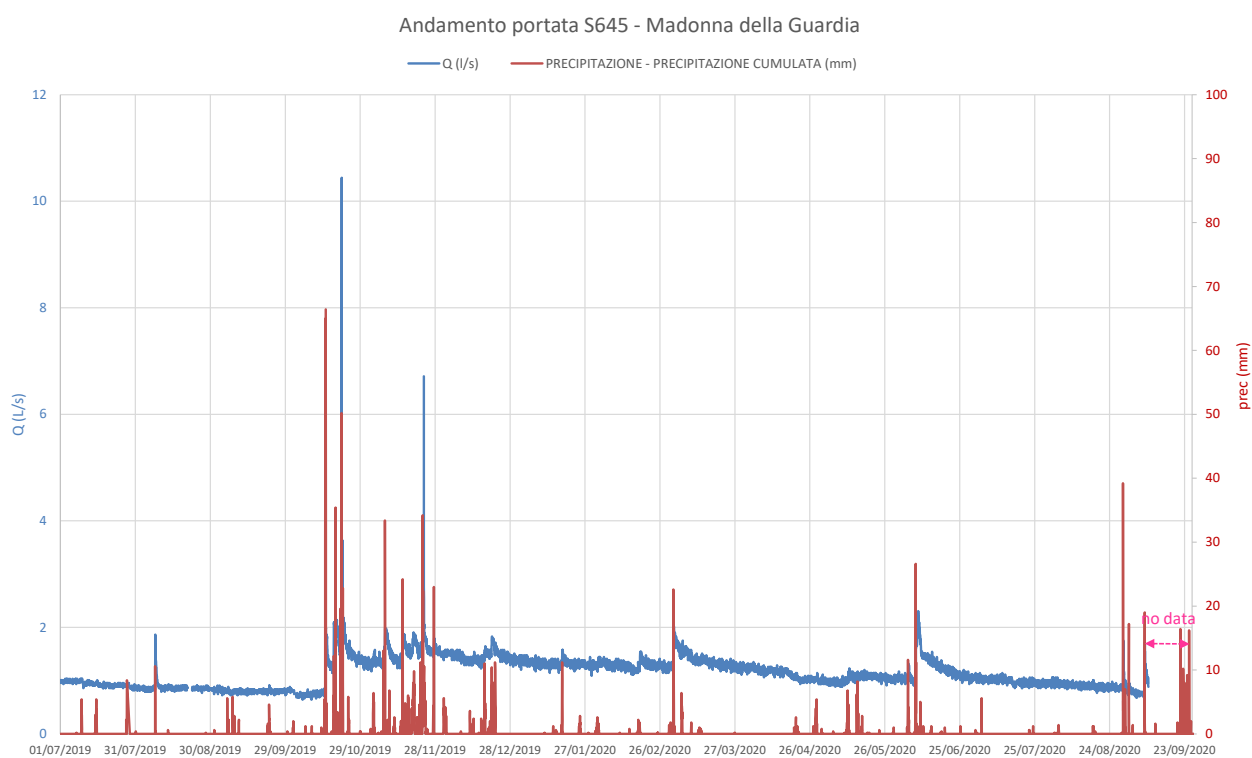
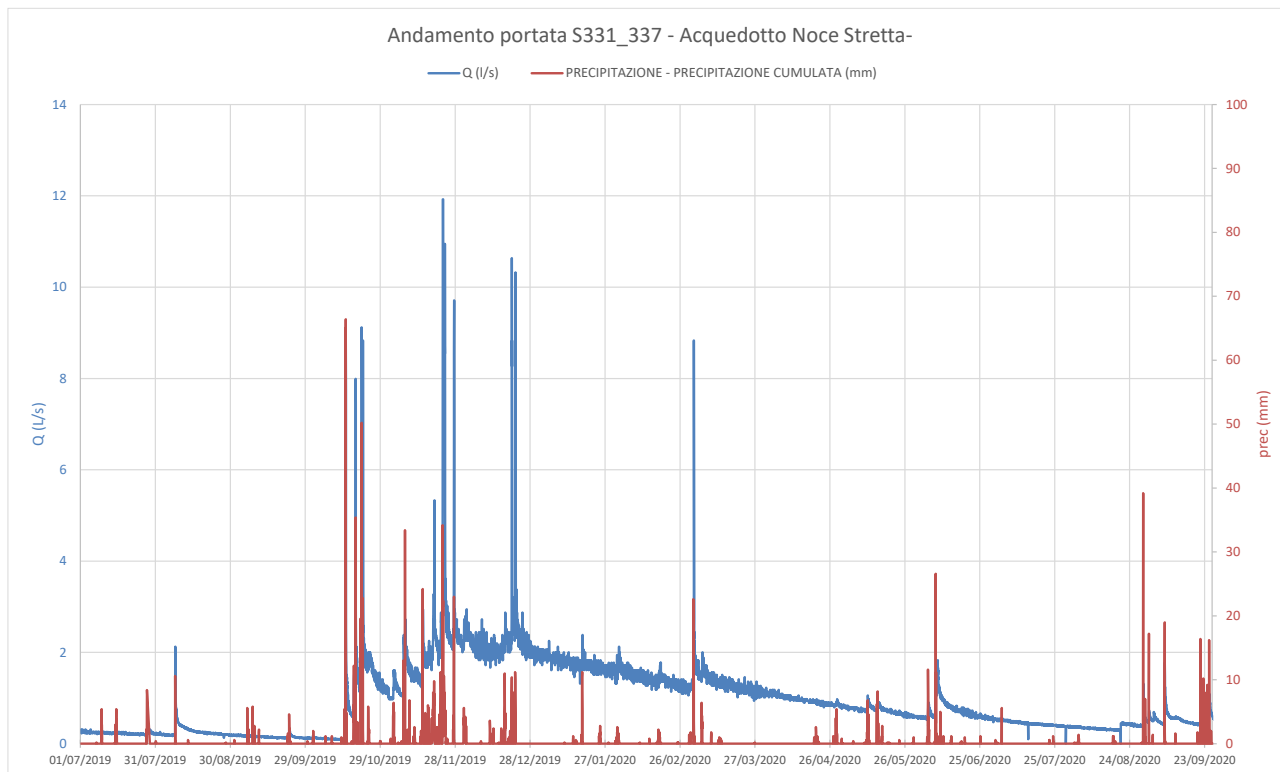


Figura 8 – Diagrammi di portata per le stazioni fisse S331-337, S645, in correlazione con le precipitazioni giornaliere alla stazione meteo di GE-Pegli.

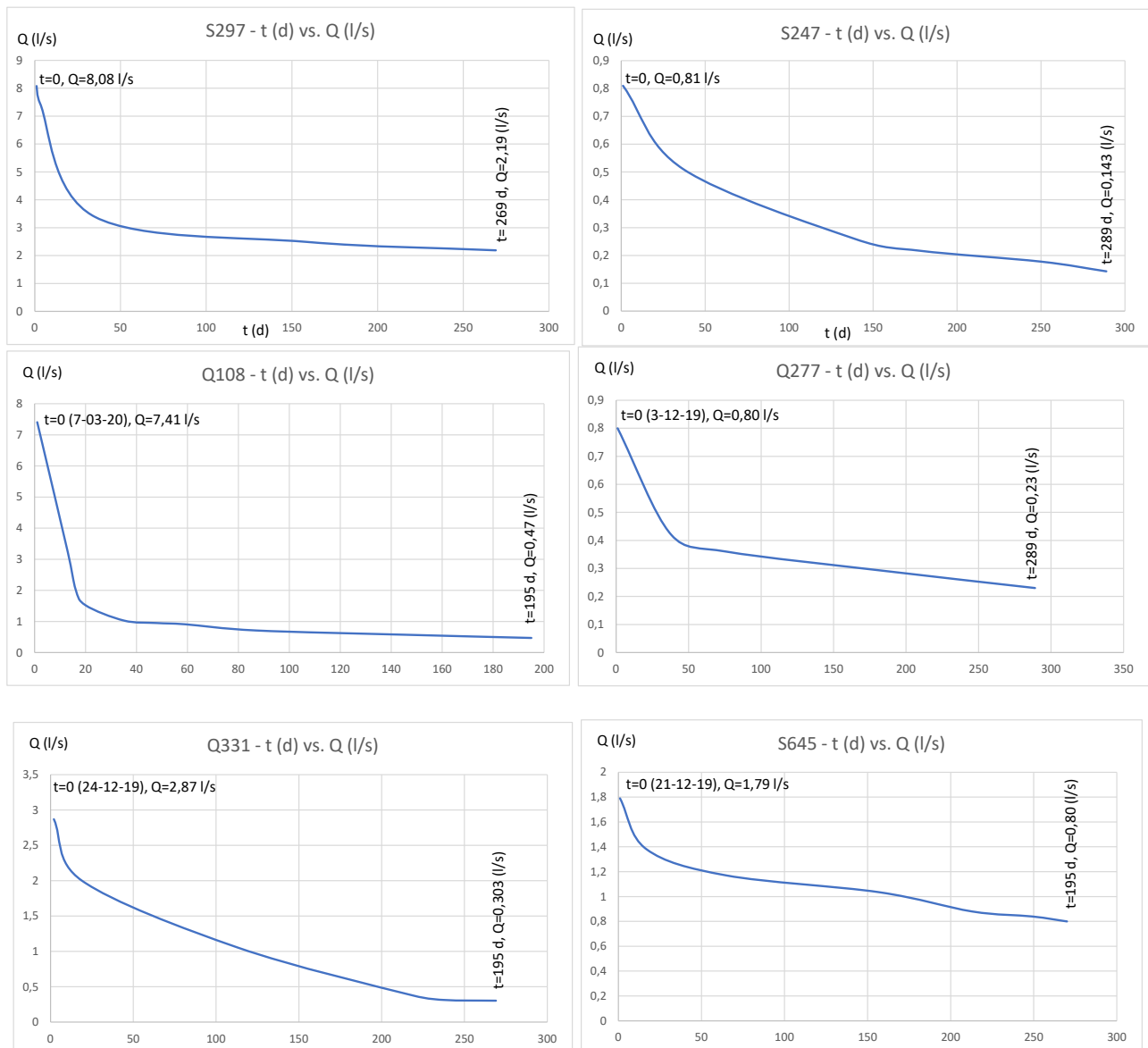


Figura 9 – Elaborazione di curve di esaurimento per le sorgenti riportate in Figura 6, Figura 7 e Figura 8, filtrate dei picchi temporanei (solo flusso di base)

4.3 Integrazione dei dati qualità delle acque: monitoraggio idrochimico

Con riferimento al workflow di Figura 2 la valutazione delle caratteristiche idrochimiche è criterio accessorio per la conferma dei tre “percorsi” ovvero dei differenti criteri operativi di delimitazione dei bacini di ricarica.

In particolare, la valutazione alla base del metodo proposto è finalizzata, sulla base delle usuali e consolidate tecniche in campo idrogeologico, a:

- correlare le caratteristiche di un gruppo di acque sotterranee con quelle della roccia serbatoio e del flusso sotterraneo, come “marker” del bacino di ricarica;

- definire “linee evolutive” caratteristiche del chimismo di base delle acque, in facies primaria e da eventuali mescolamenti con acque di differenti origine; ciò al fine di valutare il posizionamento del campione di acque sorgive lungo linea evolutiva che connota il passaggio da acque “giovani”, a chimismo scarsamente evoluto, di norma correlabili a circuiti idrogeologici brevi e superficiali (coincidenza di bacino imbrifero e idrogeologico, colonna a sinistra del workflow di Figura 2), verso acque “mature”, in equilibrio idrochimico con la matrice solida, queste ultime di norma caratterizzanti circuiti di alimentazione più profondi (colonna centrale destra in Figura 2);
- evidenziare chimismo fortemente bicarbonato-calcico dove tipico del contributo da acquiferi carbonatici più o meno carsificati (colonna a destra in Figura 2).

Un ulteriore contributo conoscitivo per la distinzione del bacino di ricarica deriva secondo la metodologia di riferimento dalla distinzione specifica del chimismo per le cosiddette “acque solforose”. Si tratta in particolare di acque di origine profonda legate quindi ad un termalismo di bassa temperatura. Nel caso in questione la caratteristica principale non risiede tanto nel cachet chimico in genere, che comunque presenta alcuni tratti peculiari, né nella temperatura che solo in alcuni casi si scosta di alcuni gradi dalla media, quanto piuttosto dalla presenza di un pH notevolmente elevato.

Rimandando alle tecniche di elaborazione dei dati idrochimici descritte in dettaglio nello studio idrogeologico del PD e PE, in ultimo il contributo del metodo è legato alla coerenza del chimismo con stili di circolazione sotterranea precedentemente definiti (rif. schema di Figura 1) “local” (circolazione corticale bacino idrologico e idrogeologico di norma coincidenti), “intermediate”, o “regional” (circolazione profonda, bacino di ricarica esteso, controllato dagli elementi strutturali pervasivi).

A riguardo, l'evoluzione idrochimica si caratterizza per il fenomeno cosiddetto della “convergenza idrochimica”.

In particolare, il fenomeno cosiddetto della convergenza della composizione chimica delle acque sotterranee, porta ad un aumento progressivo della concentrazione in sali ed alla conseguente evoluzione del chimismo secondo la sequenza anionica che segue (Shoeller, 1934; Castany, 1968):



Ne deriva, in base alla seguente linea evolutiva, una *zonaltà idrochimica verticale*, per cui si ha una stratificazione di acque a salinità (TDS, conducibilità elettrica specifica) crescente, dall'alto verso il basso, con facies chimiche che riflettono l'evoluzione sopradescritta (rif. precedente Figura 1), ovvero:

- zona superiore (circolazione corticale “local”) in facies carbonatica, ovvero dove l'acqua contiene il HCO_3^- come anione dominante ed ha uno scarso contenuto di TDS;
- zona intermedia in facies solfatica, ovvero con SO_4^{2-} come anione dominante;
- zona profonda (circolazione “regional”), caratterizzata di norma da circuiti lunghi e lenti, con un elevato contenuto in TDS e Cl^- come anione dominante

ai fini della delimitazione del bacino di ricarica, si evidenzia nelle condizioni in esame, come già dettagliato dagli studi pregressi di PD e PE, una circolazione idrica in prevalenza sostanzialmente superficiale (“local” di pertinenza dell'imbrifero), a cui sono riconducibili la grande maggioranza delle sorgenti, in cui i tempi di circolazione nel sottosuolo non sono verosimilmente sufficienti per aversi un'evoluzione del chimismo anionico come quella descritta sopra, e delle acque di circolazione profonda, ovvero le sorgenti solforose, che risalgono attraverso talune linee tettoniche (“regional”, estendendo il bacino di ricarica oltre i limiti dell'imbrifero stesso), e

che presentano come carattere saliente un pH elevato in misura anomala (9-11 unità), un potenziale redox decisamente negativo e conseguentemente valori di ossigeno molto bassi.

Le condizioni “intermedie”, dove evidenziate dagli altri fattori combinati del workflow di Figura 2 possono contribuire come co-fattori distintivi per delimitazioni estese a comprendere elementi idrogeologici esterni al bacino imbrifero di riferimento.

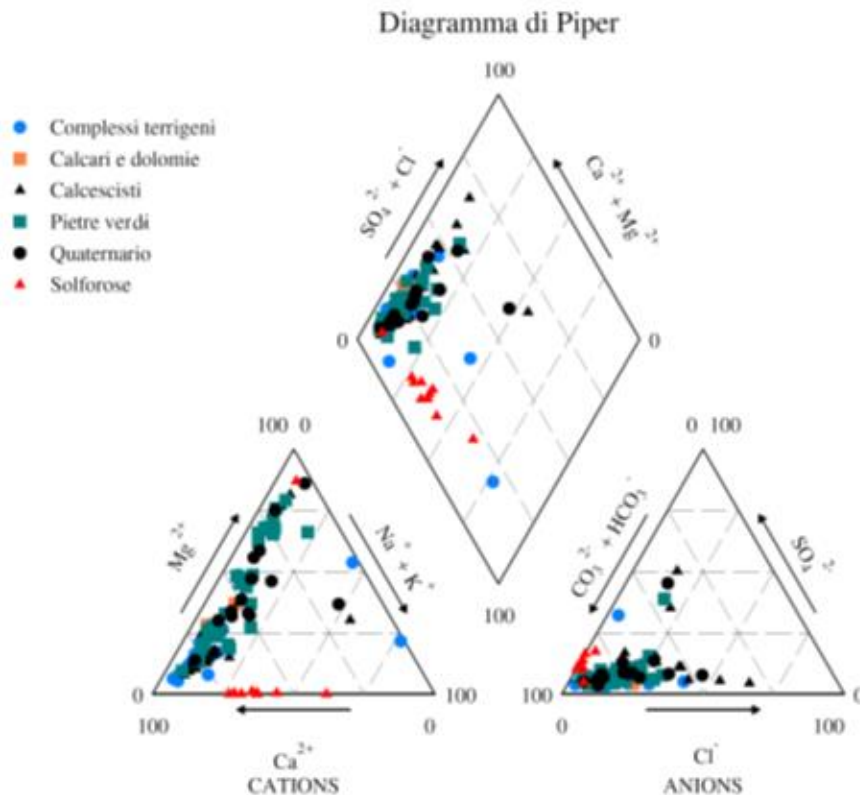


Figura 10 - Diagramma di Piper, relativo al set completo dei campioni prelevati nell'ambito del PE, distinti per roccia serbatoio

Nell'ambito del presente studio, si è fatto riferimento ai dati idrochimici disponibili dai campionamenti nell'ambito del Piano di Monitoraggio Ambientale.

Le determinazioni disponibili per le sorgenti in esame nel presente studio fanno riferimento ai set standard riportati in Tabella 2.

I parametri di misura comprendono un set standard (B1+B2) rilevato su tutti i punti in occasione di ogni campagna e due set di parametri specifici aggiuntivi (B3 e B4) finalizzato alla valutazione delle eventuali problematiche di interferenza qualitativa tra acquifero ed opere in sottoterraneo; è inoltre previsto uno specifico set di parametri (B5) da effettuare in corrispondenza degli imbocchi delle gallerie in progetto, finalizzato al monitoraggio qualitativo delle acque intercettate dalle gallerie.

Nella Figura 11 vengono riepilogati i set dei parametri di monitoraggio, in riferimento ai punti di misura e campionamento di Tabella 2 e Tabella 3.

La descrizione delle caratteristiche idrochimiche, in relazione alle valutazioni prevista dalla metodologia adottata (Figura 2), è riportata per le singole sorgenti e gruppi di risorgive studiati, con riferimento a quanto riportato nel dettaglio al successivo punto 5.2.

Tutte le valutazioni sono riferite all'elaborazione dei dati per la campagna 06/2020. Come precedentemente detto, tale campagna corrisponde, nell'ambito dell'anno idrologico esaminato, alla condizione idrologica di approssimativa portata media, ovvero nel punto circa intermedio della curva di esaurimento per le sorgenti monitorate in continuo con stazioni fisse. Per le finalità e considerato il contributo solo indicativo del dato idrochimico, non si è ritenuta significativa l'elaborazione dei dati di ulteriori campagne.

CODICE SET FUNZIONALE	CODICE E DEFINIZIONE PARAMETRI DI MONITORAGGIO
B1	LP – livello piezometrico o QV – portata volumetrica
B2	T – Temperatura acqua PH – Concentrazione ioni idrogeno COND – Conducibilità elettrica specifica OD-OD% Potenziale Redox
B3	Bicarbonato Calcio Sodio Magnesio Potassio Solfati Cloruri Nitrati Silice
B4	Escherichia coli
B5	Metalli (Alluminio, Cromo, Cromo VI Ferro, Manganese, Rame) Nitrati Bicarbonato Calcio Sodio Magnesio Potassio Solfati Cloruri Idrocarburi totali

Tabella 2 – parametri di monitoraggio

Nella tabella seguente vengono riepilogate le frequenze di misura delle stazioni.

Set di misura	Ante Operam	Corso d'opera	Post Operam
B1, B2	mensile	mensile	bimestrale
B3, B4	trimestrale	trimestrale	semestrale
B5	-	trimestrale	semestrale

Tabella 3 - Frequenza di misura per i vari set di parametri funzionali

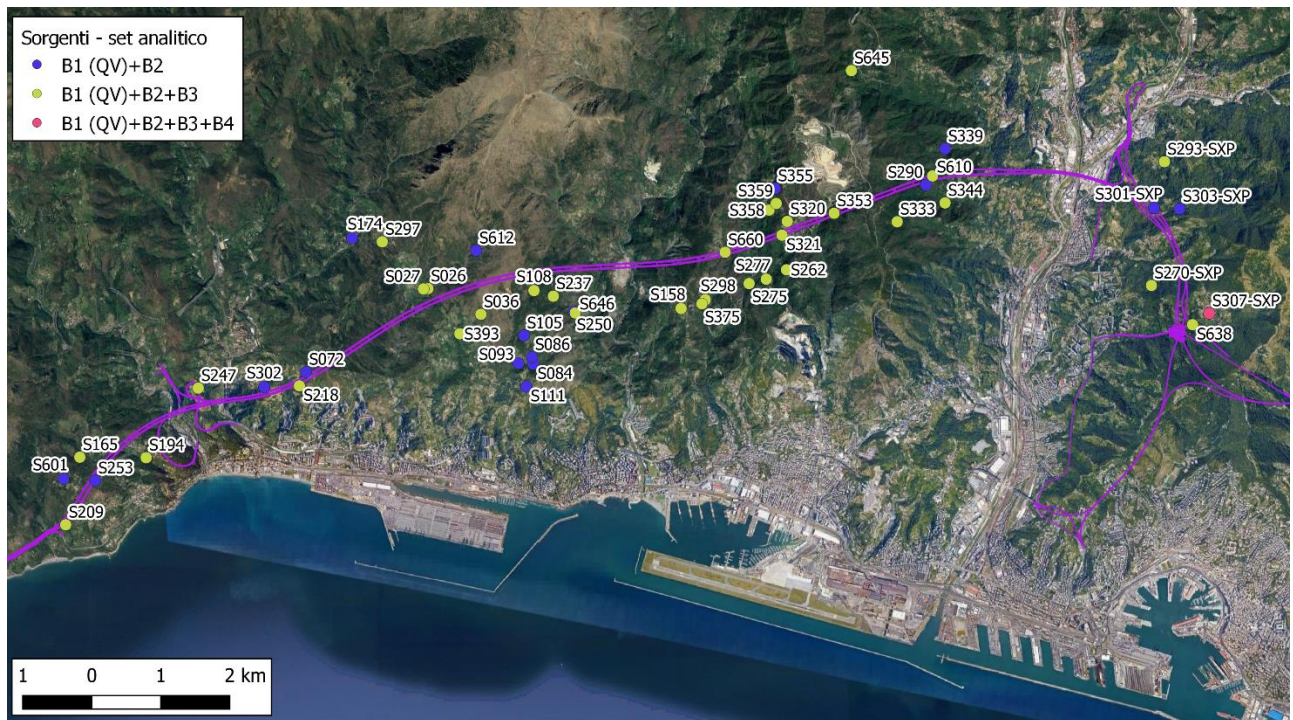


Figura 11 – Set di parametri quantitativi e chimico analitici da PMA per le sorgenti in studio

5. DELIMITAZIONE DEI BACINI DI RICARICA

5.1 Delimitazione preliminare

La delimitazione preliminare corrisponde come detto allo scenario semplificato di coincidenza del bacino di ricarica con il bacino idrologico principale, sulla base del modello di circolazione di versante (Figura 1).

Si tratta come precedentemente dettagliato di uno scenario frequentemente verificato in ammassi cristallini a bassa permeabilità, come per lo più risultano gli acquiferi nel settore in esame.

Pertanto, in coerenza con la metodologia operativa di Figura 2, per tutte le sorgenti allo studio, la prima delimitazione è coincisa con l'andamento degli imbriferi principali. Tale delimitazione basata sul bacino idrologico sotteso è riportata nella cartografia dei bacini (Elaborato 2 – 6; Tavole 1 – 5), sia dove definitiva che come base per le successive modifiche dall'applicazione della metodologia operativa di Figura 2.

In Nota: in campo bianco le stazioni di misura con disponibilità di registrazioni giornaliere, in grigio stazioni con rilevamento per campagne è riportata l'estensione dei bacini medesimi (colonna "1° tracc." Corrispondente alla delimitazione preliminare), da cui il calcolo del coefficiente di infiltrazione teorico per l'anno idrologico di riferimento (17/09/2019=2020, rif. par. 4.2).

In coerenza con la metodologia operativa adottata, a seguito del percorso di verifica della compatibilità della delimitazione preliminare sulla base degli elementi quantitativi, idrochimici e geologico-strutturali, che riguarda tutte le sorgenti in esame, si è proceduto alla delimitazione definitiva per tutte le condizioni di incompatibilità con il quadro dei dati medesimo, e comunque per tutti punti dove l'incompatibilità della delimitazione preliminare su

base idrologica è evidenziata dal calcolo di un primo coefficiente di deflusso non adeguato (valori in rosso in Nota: in campo bianco le stazioni di misura con disponibilità di registrazioni giornaliere, in grigio stazioni con rilevamento per campagne).

cod_s	I° tracc. S_m2	Anno idrologico 17/09/19-17/09/20 P=2266 mm				Esaurimento 28/12/19 - 17/09/20					I° tracc. l (mm/a)	coeff. Infiltrazione (I°) [-]
		Qmax (l/s)	Qmin (l/s)	Qmed (l/s)	Iv (Qmax-Qmin)/Qmed%	d	Qmax (ini) (l/s)	Qmin (end) (l/s)	Qmed (l/s)	Wtot (m3)		
S026	592911	1,35	0,56	1,145	69,00%	264	1,35	1,13	1,27	2,90E+04	60,90	0,027
S027	592911			0,8							42,55	0,019
S036	107475	1,76	0,0078	0,0417	4195,00%						12,24	0,005
S072	33156			0,032							30,44	0,013
S084	71972	0,34	0,025	0,177	177,97%	264	0,34	0,043	0,19	4,37E+03	77,56	0,034
S086	108103			0,017							4,96	0,002
S093	9441											
S105	25718			0,057							69,89	0,031
S108	272302	7,52	0,24	1,61	452,17%	195	7,41	0,47	1,26	2,12E+04	186,46	0,082
S111	8921			0,013							45,96	0,020
S158	33306			0,027							25,57	0,011
S165	114075			1,232							340,59	0,150
S174	317384	1,676	0,183	1,0484	142,41%						104,17	0,046
S194 (rio)	1049803			0,018							0,54	0,000
S209	143290	7,34	0,17328	1,5455	463,71%						340,14	0,150
S218	7991			0,208							820,86	0,362
S237	24891			0,212							268,60	0,119
S247	54603	0,812	0,00048	0,311	260,72%	289	0,81	0,143	0,58	1,44E+04	179,62	0,079
S250-(S646)	95660			0,047							15,49	0,007
S253	10452											
S262	15176			0,066							137,15	0,061
S270-SXP	17089			0,046							84,89	0,037
S275	64597			0,241							117,66	0,052
S277	50682	0,8	0,142	0,36	182,78%	289	0,8	0,23	0,39	9,74E+03	224,00	0,099
S290	8273	0,69	0,22	0,47	100,21%						1803,04	0,796
S293-SXP	9810											
S297 (rio)	895812	8,86	1,94	3,30	209,95%	269				6,65E+04	116,03	0,051
S298 S375	79479											
S301-SXP	22302			0,184							260,18	0,115
S302	10934			0,036							103,83	0,046
S303-SXP	15589			0,06							121,38	0,054
S307-SXP	23221			0,218							296,06	0,131
S320	806			0,016							626,02	0,276
S321	11352			0,009							25,00	0,011
S331	75242	11,92	0,08	1,12	1061,88%	269	10,32	0,303	1,00	2,32E+04	467,33	0,206
S333	28825			1,03							1126,87	0,497
S339	15266			0,29							599,07	0,264
S344 (rio)	712301			0,34							15,05	0,007
S353	29815											
S355	10318			0,48							1473,19	0,650
S358	19069	53,46	0,00	3,39	1578,41%						5599,71	2,471
S359	10179											
S375 - S298	79479	14,42	2,41	2,90	413,93%						1150,67	0,508
S393	92660			1,01							345,11	0,152
S601	34503			0,09							85,00	0,038
S610	6643			0,16								
S612	287887			0,54							59,15	0,026
S638	111127											
S645	22454	10,44	0,64	1,20	814,01%	270	1,79	0,8	1,18	2,75E+04	1689,58	0,746
S646												
S660	52204	18,55	0,00	2,01	921,97%						1215,43	0,536

Nota: in campo bianco le stazioni di misura con disponibilità di registrazioni giornaliere, in grigio stazioni con rilevamento per campagne

Tabella 4 - Valutazione dei coefficienti di infiltrazione calcolati sulla base del regime idrologico delle sorgenti (metodo US EPA, 1987) per lo scenario di delimitazione preliminare dei bacini di ricarica (coincidenza del bacino idrogeologico con il bacino idrologico sotteso).

5.2 Checklist di verifica e delimitazione definitiva

Il procedimento per la delimitazione definitiva deriva da un'analisi dettagliata per singole sorgenti e gruppi di sorgenti omogenee, a partire dall'analisi idrogeologica applicata al contesto specifico, per tutti i bacini in esame effettuata sulla base dello schema operativo di Figura 2.

La carta dei bacini (Elaborato 2 – 6; Tavole 1 – 5, stralcio esemplificativo in Figura 12) costituisce l'elaborato di analisi e di sintesi del presente studio, riportando dunque per ogni sorgente oltre alla delimitazione definitiva del bacino idrogeologico, la delimitazione a partire dallo scenario preliminare di coincidenza con il bacino idrologico di pertinenza. Il criterio seguito per le differenti delimitazioni è descritto singolarmente in dettaglio ai seguenti paragrafi 5.2.1-5.2.2.

La prima linea di verifica ha riguardato la revisione e ridelimitazione per gli imbriferi che non risultano compatibili con il bilancio idrogeologico, ovvero con coefficiente di infiltrazione $I > 15\%$ valutato come rapporto percentuale tra l'afflusso per precipitazione e il volume restituito dalle sorgenti (valori evidenziati in rosso in Tabella 4), sulla base dei criteri nella colonna centrale e destra dello schema a blocchi.

Successivamente, anche dove la delimitazione con criterio morfologico altimetrico risulta compatibile con il criterio idrologico ($I < 15\%$), sono state condotte le attività di verifica per la conferma ovvero la revisione della delimitazione stessa.

Le verifiche effettuate rispondono a criteri di caratterizzazione locale per singole sorgenti e gruppi di sorgenti, per cui sono oggetto di specifica trattazione nei punti a seguire.

A livello di sintesi complessiva le anomalie rispetto alla delimitazione "di bacino" da tracciamento preliminare si ritengono correlate alle seguenti condizioni idrogeologiche e di assetto idro-strutturale:

- contributo da circolazione di subalveo, risorgenza di acque subsuperficiali da corpi frana e depositi alluvionali, da cui un rapporto più elevato tra afflusso e deflusso sorgivo (es. sorgente S645, S660);
- contributo da deflusso e risalita di acque profonde al contatto tra Serpentiniti di Voltri e calcescisti, dove determinata da linee tettoniche distensive con andamento medio N-S e conseguente fratturazione più pervasiva entro le serpentiniti medesime, condizione osservata in particolare per le sorgenti S298, S375; più in generale l'anomalia del bilancio id ricarica, indicativa di un contributo "esterno" all'imbrifero di riferimento, è riconosciuto per diverse sorgenti localizzate su sistemi distensivi di faglia N-S o NNW-SSE, lungo l'ampia fascia di disturbo tettonico ad andamento coerente con la linea Sestri-Voltaggio (es. S320, S358, S359);
- contributo da contatto Dolomie di M.Gazzo / serpentiniti, per circolazione in faglia e rete di fratture con permeabilità incrementata da fenomeni carsici (es. sorgente S358).

Con riferimento al quadro di cui sopra, vengono nel seguito descritte le valutazioni effettuate per la delimitazione definitiva dei bacini delle sorgenti "anomale", ovvero con indicazione di non congruenza tra bacino di ricarica superficiale e bacino idrogeologico.

A valle della ridelimitazione, come da metodologia di Figura 2, in Tabella 5. sono riportati i coefficienti di infiltrazione ricalcolati per i nuovi bacini.

5.2.1 Ridelimitazione imbriferi sorgenti con anomalia di bilancio idrogeologico

5.2.1.1 Sorgente S218

La sorgente S218 si localizza lungo un'estesa lineazione con andamento NNE-SSW, parte del sistema di faglie vicarianti subparallelo al contatto strutturale tra i calcescisti e le Serpentiniti di Voltri. Stante il ruolo di idrostruttura evidenziato dagli studi idrogeologici di progetto e la non compatibilità con lo schema di alimentazione da solo bacino idrogeologico, si ritiene coerente lo scenario di infiltrazione, flusso e risalita di acque profonde lungo la superficie di faglia, e verosimilmente lungo il contatto con le serpentiniti.

Schema di alimentazione profonda risulta congruente con il basso indice di variabilità calcolato per il periodo di riferimento (20.1%).

Dal punto di vista idrochimico, la scarsa differenziazione lungo la linea evolutiva dei calcescisti non consente valutazioni significative basate sul grado di "maturità" delle acque. Si osserva peraltro come per S218 risulti massimo nel gruppo delle acque da risorgive in calcescisti il rapporto Mg^{++}/Ca^{++} , condizione ritenuta indicativa di contributo da serpentiniti lungo la linea di contatto.

Ridelimitazione bacino di ricarica

Ridelimitazione con inclusione, oltre all'imbrifero sotteso, delle porzioni di bacino afferenti all'idrostruttura/discontinuità, a quota superiore alla risorgiva ("B1")

5.2.1.2 Sorgente S290

La sorgente è localizzata in prossimità della linea tettonica regionale con andamento circa N-S, coerente con la linea Sestri-Vtaggio, e che nel settore specifico pone a contatto basalti e calcari di Erzelli, all'intersezione con linea del sistema ad andamento WNW-ESE, quest'ultimo in prevalenza trascorrente.

Sulla base dei dati di monitoraggio delle portate, riferiti a periodi significativi ma discontinui per problematiche tecniche), risulterebbe un significativo flusso di base, con portate subvariabili ($Iv \approx 100\%$), con sovrapposizione di brevi picchi in coincidenza con precipitazioni intense anche occasionali o giornaliere.

Nelle condizioni sopra evidenziate, e stante la non delimitabilità su base topografica di un imbrifero sotteso di estensione significativa, si ritengono significativi i seguenti contributi di ricarica:

- per drenaggio, filtrazione di acque profonde lungo il sistema di faglie N-S, con risalita all'intersezione con il sistema trascorrente che determina condizioni di soglia di permeabilità;
- per infiltrazione e circolazione nella fascia dei calcari di Erzelli, in rete di fratture con conducibilità idraulica incrementata da carsismo (anche con circuiti rapidi a cui sono attribuiti i brevi picchi di portata).

Nota: il bacino di ricarica risulta coincidente con quello di S610, in quanto tracciato con il medesimo criterio e con entrambi i punti di risorgenza posti alla medesima quota. Si veda a riguardo nota specifica, par. 5.2.1.10.

Ridelimitazione bacino di ricarica

Ridelimitazione con inclusione, oltre all'imbrifero sotteso, delle porzioni di bacino afferenti all'idrostruttura/discontinuità N-S e comprendente la fascia dei calcari di Erzelli, a quota superiore alla risorgiva ("B1"), ovvero fino alle quote minime compatibili con la ricarica della sorgente.

5.2.1.3 Sorgente S320

la sorgente è localizzata in posizione incompatibile con la delimitazione su base topografica di un bacino di ricarica subsuperficiale (imbrifero/idrogeologico). Risulta dunque evidente e univoco il rapporto di alimentazione per risalita acque profonde dal sistema di faglie NNW-SSE correlato alla linea Sestri-Voltaggio, e alla specifica faglia che interessa direttamente il punto di risorgiva, come da studio geologico di progetto.

Schema di alimentazione profonda risulta congruente l'indice di variabilità ancora relativamente basso per acquiferi fratturati a bassa permeabilità, calcolato per il periodo di riferimento (46%).

Dal punto di vista idrochimico si osserva posizione sul diagramma di Piper al limite superiore nella linea evolutiva delle acque in serbatoi da serpentiniti/rocce ultramafiche, condizione compatibile con circolazione e risalita di acque profonde.

Ridelimitazione bacino di ricarica

Ridelimitazione con inclusione, oltre all'imbrifero sotteso, delle porzioni di bacino afferenti all'idrostruttura/discontinuità, a quota superiore alla risorgiva ("B1")

5.2.1.4 Sorgente S333

La sorgente è parte di un gruppo di con bacino di ricarica subsuperficiale di estensione minima, in assoluto non congruente con la portata totale Q_{tot} e i volumi di immagazzinamento.

La sorgente è localizzata all'intersezione tra due evidenti lineazioni strutturali, di cui sono individuate vicarianti già dallo studio idrogeologico di progetto, e di pertinenza di due sistemi distinti: NE-SW, coerente con alcuni tratti del sistema Sestri-Voltaggio, ed ESE-WNW, sistema quest'ultimo recente, in fase tensionale o trascorrente, di dislocazione successiva della linea Sestri-Voltaggio.

Un contributo di alimentazione profonda o quanto meno di alimentazione non esclusivamente "local" risulta congruente l'indice di variabilità molto ridotto per il contesto in esame, calcolato per il periodo di riferimento (15%), oltre che con la permanenza nell'anno idrologico di portate significative, prossime a 1 l/s.

Dal punto di vista idrochimico, il quadro di circolazione profonda è coerente con la maturità delle acque evidenziata dalla posizione sul diagramma di Piper, al limite superiore delle acque nella linea evolutiva delle serpentiniti / rocce ultramafiche, con valori massimi nella categoria di rocce serbatoio specifica per il rapporto molare tra Cl^- / SO_4^{--} , Cl^- / HCO_3^{--}

Ridelimitazione bacino di ricarica

Ridelimitazione con inclusione, oltre all'imbrifero sotteso, delle porzioni di bacino afferenti alle due idrostrutture in intersezione, a quota superiore alla risorgiva ("B1"). Il bacino di ricarica risulta in parte condiviso con S331.

5.2.1.5 Sorgente S339

La sorgente "geologica" ovvero l'effettivo punto di risorgenza si localizza in corrispondenza di uno spartiacque morfologico secondario, per cui l'estensione del bacino imbrifero sotteso è minima, e come visto incompatibile con il regime idrologico della stessa.

La sorgente si localizza in corrispondenza di un'estesa linea di faglia con andamento E-W, e cinematismo in prevalenza trascorrente, come evidenziato già dallo studio geologico di progetto.

Premesso che i litotipi parte dell'unità degli "Argilloscisti di Costagutta" non presentano caratteristiche favorevoli ad una circolazione profonda anche in zone di faglia, si ritiene possibile a spiegare l'anomalia di bilancio idrogeologico un moderato contributo per flusso e risalita di acque lungo tale struttura fragile. L'imbrifero già nella prima delimitazione risulta in parte interessare l'Unità dei Calcari di Erzelli, in cui è possibile vi sia una circolazione maggiormente attiva per processi chimico-dissolutivi nelle reti di fratture. Non vi sono peraltro evidenze di zone di infiltrazione di tipo carsico, che possano risultare rilevanti nel favorire l'infiltrazione entro il settore di bacino sotteso.

Un contributo di alimentazione profonda o quanto meno di alimentazione non esclusivamente "local" risulta peraltro congruente l'indice di variabilità ridotto per il contesto in esame (costituito da litotipi a permeabilità molto bassa e rapido clogging delle fratture in profondità), calcolato per il periodo di riferimento (27%), oltre che con la permanenza nell'anno idrologico di portate significative, prossime a 0.3 l/s.

Ridelimitazione bacino di ricarica

Ridelimitazione con inclusione, oltre all'imbrifero sotteso, delle porzioni di bacino afferenti all'idrostruttura/discontinuità, a quota superiore alla risorgiva ("B1").

5.2.1.6 Sorgente S355

La sorgente S355 è localizzata in prossimità di spartiacque principale, in posizione dunque incompatibile con uno scenario di ricarica subsuperficiale con coincidenza dei bacini imbrifero e idrogeologico.

La sorgente risulta peraltro localizzata in corrispondenza dell'esteso allineamento N-S di sorgenti, in corrispondenza del sistema di faglie con il medesimo andamento, geneticamente correlate alla linea Sestri-Voltaggio, con un ruolo ben identificato già dagli studi idrogeologici di progetto come idrostruttura di flusso preferenziale e risalita di acque profonde.

L'indice di variabilità delle portate risulta "medio", con un valore del 125% circa, compatibile con differenti ipotesi di alimentazione, ma verosimilmente correlato ad un'alimentazione "mista" da circuiti subsuperficiali e circolazione in faglia. Non sono disponibili dati chimico-analitici.

Ridelimitazione bacino di ricarica

Ridelimitazione con inclusione, oltre all'imbrifero sotteso, delle porzioni di bacino afferenti all'idrostruttura/discontinuità, a quota superiore alla risorgiva ("B1").

Nota: Considerata l'estensione rilevante della faglia verso N, con quote più elevate della sorgente e dunque di potenziale ricarica, ne deriva un tracciamento necessariamente conservativo ovvero tale da massimizzare la superficie del bacino stesso.

5.2.1.7 Sorgente S358

La sorgente S358 si colloca in un contesto strutturale che non consente di delimitare il bacino di ricarica come equivalente all'imbrifero, condizione già evidenziata dall'anomalia di bilancio idrogeologico. In particolare la sorgente si localizza in corrispondenza della fascia con andamento N-S costituita dalle Dolomie del M.Gazzo e dai Gessi del rio Riasso, litotipi interessati da carsismo profondo, come da studio idrogeologico del Progetto Definitivo. Il settore è interessato dalla fascia di faglie geneticamente correlate alla linea Sestri-Voltaggio, di contatto tra la fascia di dolomie-gessi e le serpentiniti di Voltri.

Il chimismo, tipicamente bicarbonato-calcico-magnesiaca conferma la natura del serbatoio e il flusso nella fascia carbonatica, per fratturazione e carsismo.

Dal monitoraggio delle portate, eseguito in continuo, si conferma un modello di oscillazione delle portate basato su picchi brevi, risposta rapida agli eventi di ricarica e rapido esaurimento, tipico di un prevalente contributo per carsismo alla permeabilità per fratturazione. A riguardo si riscontra un indice di variabilità estremamente elevato (1578%), e brevi picchi con una portata massima molto elevata, $Q_{max} = 53$ l/s nel periodo di riferimento.

sorgente di contatto Dolomie Gazzo / serpentiniti: bacino da estendere a volume acquifero dolomie (karst)

Ridelimitazione bacino di ricarica

Ridelimitazione con inclusione, oltre all'imbrifero sotteso, delle porzioni di bacino afferenti all'idrostruttura/discontinuità N-S e comprendente la fascia gessi-dolomie, a quota superiore alla risorgiva ("B1"), ovvero fino alle quote minime compatibili con la ricarica della sorgente.

5.2.1.8 Sorgente S359

La sorgente S359 è localizzata in prossimità di spartiacque principale, in posizione dunque incompatibile con uno scenario di ricarica subsuperficiale con coincidenza dei bacini imbrifero e idrogeologico.

La sorgente risulta peraltro localizzata in corrispondenza dell'esteso allineamento N-S di sorgenti, in corrispondenza del sistema di faglie con il medesimo andamento, geneticamente correlate alla linea Sestri-Voltaggio, con un ruolo ben identificato già dagli studi idrogeologici di progetto come idrostruttura di flusso preferenziale e risalita di acque profonde.

L'indice di variabilità delle portate risulta "medio", con un valore del 125% circa, compatibile con differenti ipotesi di alimentazione, ma verosimilmente correlato ad un'alimentazione "mista" da circuiti subsuperficiali e circolazione in faglia. Non sono disponibili dati chimico-analitici.

Ridelimitazione bacino di ricarica

Ridelimitazione con inclusione, oltre all'imbrifero sotteso, delle porzioni di bacino afferenti all'idrostruttura/discontinuità, a quota superiore alla risorgiva ("B1").

Nota: il bacino di ricarica risulta in parte sovrapponibile a quello di S355, localizzata lungo la medesima linea strutturale e a quota compatibile con la ricarica anche di S358. Nella delimitazione sono stati peraltro distinti i due bacini di ricarica, nello scenario che S355 e S359 costituiscano due punti di risalita di acque di infiltrazione e circolazione in faglia.

5.2.1.9 Sorgente S375-298

La sorgente S375 si caratterizza per un bilancio in assoluto incompatibile con la ricarica sull'imbrifero sotteso; portate massime e di magra a fine esaurimento, e volumi immagazzinati W_{tot} non sono peraltro compatibili con uno schema di alimentazione corticale/subsuperficiale.

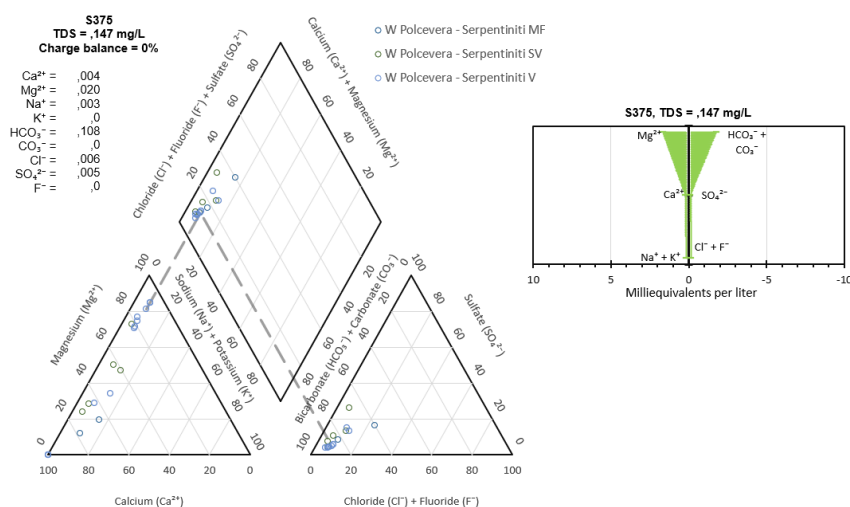
La sorgente S375, come la S298, si localizza sul contatto tra i calcescisti (verso valle idrogeologico) e le serpentiniti di Voltri, verso monte idrogeologico e dunque con imbrifero esclusivamente in quest'ultima litologia. Dal punto di vista idrochimico le acque si caratterizzano per il massimo grado di evoluzione evidenziato già dagli studi di progetto per i circuiti idrogeologici in acquiferi entro serpentiniti/ultramafiti, ovvero caratterizzato dal massimo incremento del rapporto molare Mg^{++}/Ca^{++} , come evidenziato anche dalla linea evolutiva sul diagramma di Piper.

E' dunque evidente un ruolo della fascia serpentinitica più fratturata di contatto con i calcescisti nella nell'infiltrazione e deflusso preferenziale, sia nel ruolo di soglia di permeabilità dei calcescisti stessi, a valle idrogeologico, con risalita e risorgenza di acque profonde.

La fascia di contatto può essere peraltro compatibile con la ricarica nel solo tratto con sviluppo verso NW (monte), mentre verso SE non risulta altimetricamente compatibile.

Ridelimitazione bacino di ricarica

Ridelimitazione con inclusione, oltre all'imbrifero sotteso, delle porzioni di bacino afferenti al contatto Serpentiniti/Calcescisti, limitatamente alla porzione verso NE, a quota superiore alla risorgiva e dunque altimetricamente compatibile con la ricarica ("B1").



5.2.1.10 Sorgente S610

La sorgente S610 si localizza nell'ambito della fascia con estensione N-S, parallela ai contatti strutturali, costituita dall'affioramento dei Calcari di Erzelli.

Il chimismo delle acque si presenta tipicamente bicarbonato calcico con basso rapporto molare Mg^{++}/Ca^{++} . Il regime idrologico si caratterizza per un'estrema variabilità ($Iv \approx 922\%$) con portate significative (fino a ≈ 19 l/s) limitatamente a brevi cicli di ricarica in stretta e rapida correlazione con le precipitazioni, e viceversa minimo immagazzinamento dinamico e portate di magra.

Tali condizioni sono compatibili con un'alimentazione da circuiti carsici ad elevata trasmissività e minimo storage, con infiltrazione e circolazione limitata dunque alla fascia dei Calcari di Erzelli per tutto lo sviluppo della stessa a quote superiori alla risorgiva.

Ridelimitazione bacino di ricarica

Ridelimitazione con inclusione, oltre all'imbrifero sotteso, delle porzioni di bacino afferenti all'idrostruttura/discontinuità N-S e comprendente la fascia dei calcari di Erzelli, a quota superiore alla risorgiva ("B1"), ovvero fino alle quote minime compatibili con la ricarica della sorgente.

Nota: il bacino di ricarica risulta coincidente con quello di S290, in quanto tracciato con il medesimo criterio e con entrambi i punti di risorgenza posti alla medesima quota. E' evidente che nel dettaglio reale le due sorgenti possono avere alimentazioni di origine differente, in quanto S610 si caratterizza per un rapido e localizzato circuito di tipo carsico. Quest'ultimo non può peraltro evidentemente essere definito in dettaglio, come di norma in percorsi di flusso sotterraneo carsici, per cui l'estensione cautelativa del bacino a comprendere l'intera fascia dei Calcari di Erzelli a quota altimetrica compatibile, da cui la coincidenza delle delimitazioni

5.2.1.11 Sorgente S645

La sorgente è localizzata in prossimità del rio dell'Acqua Fredda, in settore dell'incisione interessato da depositi torrentizi e detritici. La sorgente, come da registrazione con stazione fissa, si caratterizza per una risposta estremamente rapida alle precipitazioni brevi e intense, da cui un elevato indice di variabilità $Iv=814\%$, ma mantiene un flusso di base con portate di magra pressochè e rapida stabilizzazione della curva di esaurimento. Da fotointerpretazione, l'andamento della rete idrografica e in particolare il "gomito" nell'andamento del rio Acquafredda, evidenziano l'intersezione tra due sistemi di lineazioni strutturali con andamento ricorrente a larga scala e con ruolo riconosciuto sul controllo della circolazione idrica sotterranea.

Nel dettaglio, in corrispondenza della sorgente S645, si riscontra l'intersezione tra il sistema NNE-SSW correlabile alla linea Sestri-Voltaggio e il sistema circa ortogonale WNW-ESE, quest'ultimo con dinamica in prevalenza trascorrente.

Il regime idrologico sopra descritto evidenzia la probabile sovrapposizione di circolazioni sotterranee con di origine differente schema di alimentazione (flusso di base da circuiti profondi, picchi e rapida risposta all'input di ricarica da circuiti subsuperficiali), condizione compatibile con l'assetto strutturale.

Si ritiene dunque, considerata la prossimità, un contributo per scambio tra il rio e le alluvioni di subalveo, sovrapposto al contributo per circolazione più profonda nelle linee di faglia, da cui la bassa variabilità e la portata del flusso di base.

Ridelimitazione bacino di ricarica

Ridelimitazione cautelativa sulla base delle componenti subsuperficiale e profonda di alimentazione. E' incluso l'intero bacino imbrifero del rio Acqua Fredda (comprendente anche il sistema di faglie trascorrente), e (in tratteggio) le porzioni di bacino afferenti al sistema di faglie NNE-SSW, limitatamente alla porzione verso NE, a quota superiore alla risorgiva e dunque altimetricamente compatibile con la ricarica ("B1").

5.2.1.12 Sorgente S660

La sorgente S660, si localizza, analogamente a S375, S298, sul contatto tra i calcescisti (verso valle idrogeologico) e le serpentiniti di Voltri, verso monte idrogeologico e dunque con imbrifero esclusivamente in quest'ultima litologia. I calcescisti corrispondono con evidenza a una soglia di permeabilità, determinando la risorgenza, come già osservato per le sorgenti sopraccitate.

La sorgente è localizzata in prossimità del rio, in corrispondenza di un lembo detritico. La portata di magra è in assoluto bassa (0,14 l/s) nel quadro delle sorgenti entro l'acquifero delle serpentiniti, e, a differenza di S375, non si riscontra un chimismo evoluto in riferimento alla linea di maturazione per flusso in acquiferi entro serpentiniti / ultramafiti, ovvero nel campo dei valori più elevati del rapporto molare Mg^{++}/Ca^{++} .

Sulla base degli elementi disponibili, si ritiene probabile (e ipotesi più conservativa per la ridelimitazione del bacino di ricarica) la sovrapposizione di circolazioni sotterranee con differente schema di alimentazione, ovvero da infiltrazione e flusso nella fascia fratturata in fregio al contatto, oltre a circuiti subsuperficiali anche per dispersione del corso d'acqua entro il subalveo detritico.

Ridelimitazione bacino di ricarica

Ridelimitazione cautelativa sulla base delle componenti subsuperficiale e profonda di alimentazione. E' incluso, oltre al bacino imbrifero del rio, le porzioni di bacino afferenti al contatto con i calcescisti, a quota superiore alla risorgiva e dunque altimetricamente compatibile con la ricarica ("B1").

5.2.2 Verifica imbriferi sorgenti con bilancio idrogeologico compatibile

5.2.2.1 Sorgente S026

5.2.2.2 Sorgente S027

5.2.2.3 Sorgente S646

Le sorgenti S027 e S646 presentano il chimismo tipico delle "acque sulfuree", per le quali in letteratura scientifica e come confermato dallo studio idrogeologico di PD è riconosciuto un contributo per flusso e risalita di acque profonde nel sistema tettonico distensivo NNW-SSE. Nei casi in esame il bacino idrogeologico, a partire dalla delimitazione preliminare, è stato ampliato a comprendere l'imbrifero che sottende alle strutture di faglia medesime, per tutta l'estensione riconosciuta delle stesse e con limite inferiore fino alla quota di risorgenza, nello scenario cautelativo di un possibile contributo di ricarica lungo l'intero sviluppo della struttura tettonica stessa.

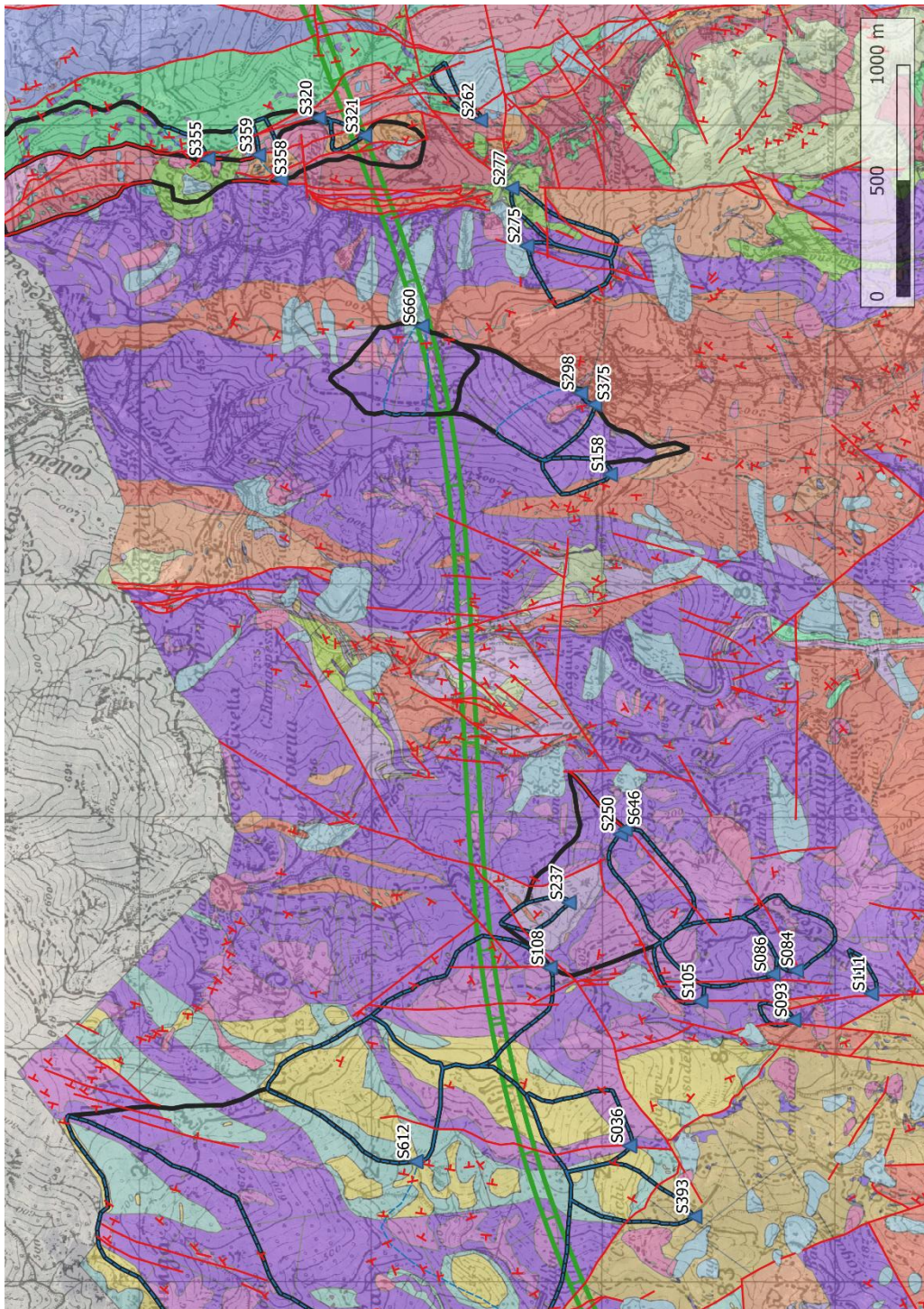


Figura 12 – stralcio esemplificativo cartografia dei bacini. In tratteggio blu sono riportate le delimitazioni su base idrologica (prima delimitazione), in nero le ridelimitazioni definitive a valle della verifica di congruenza del bilancio idrogeologico, metodo US EPA, 1987

	I° tracc.	coeff. Infiltrazione (I°)		II° tracc.	coeff. Infiltrazione (II°)
cod_s	S_m2	[-]		S_m2	[-]
S026	592911	0,027		1457681	0,011
S027	592911	0,019		1457681	0,008
S036	107475	0,005		107475	0,005
S072	33156	0,013		33156	0,013
S084	71972	0,034		71972	0,034
S086	108103	0,002		108103	0,002
S093	9441			9441	
S105	25718	0,031		25718	0,031
S108	272302	0,082		272302	0,082
S111	8921	0,020		8921	0,020
S158	33306	0,011		33306	0,011
S165	114075	0,150		114075	0,150
S174	317384	0,046		248776	0,059
S194 (rio)	1049803	0,000		1049803	0,000
S209	143290	0,150		143290	0,150
S218	7991	0,362		98974	0,029
S237	24891	0,119		24891	0,119
S247	54603	0,079		54603	0,079
S250-(S646)	95660	0,007		95660	0,007
S253	10452			10452	
S262	15176	0,061		15176	0,061
S270-SXP	17089	0,037		17089	0,037
S275	64597	0,052		64597	0,052
S277	50682	0,099		50682	0,099
S290	8273	0,796		188174	0,035
S293-SXP	9810			9810	
S297 (rio)	895812	0,051		895812	0,051
S298 S375	79479			79479	
S301-SXP	22302	0,115		22302	0,115
S302	10934	0,046		10934	0,046
S303-SXP	15589	0,054		15589	0,054
S307-SXP	23221	0,131		23221	0,131
S320	806	0,276		15049	0,015
S321	11352	0,011		11352	0,011
S331	75242	0,206		75242	0,206
S333	28825	0,497		196396	0,073
S339	15266	0,264		51527	0,078
S344 (rio)	712301	0,007		712301	0,007
S353	29815			29815	
S355	10318	0,650		148168	0,045
S358	19069	2,471		338611	0,139
S359	10179			31395	
S375 - S298	79479	0,508		223522	0,181
S393	92660	0,152		92660	0,152
S601	34503	0,038		34503	0,038
S610	6643			6643	
S612	287887	0,026		287887	0,026
S638	111127			111127	
S645	22454	0,746		1289520	0,013
S646				359864	
S660	52204	0,536		174085	0,161

Note: Valori anomali I% (I° e II° tracciamento) per S331 da probabile contributo acque superficiali;

Tabella 5 – coefficienti di infiltrazione da ridelimitazione definitiva dei bacini (II°)

6. CONCLUSIONI

All'interno del Parere n.6 delle prescrizioni A19 del Decreto di Compatibilità Ambientale n.28 del 23 gennaio 2014, viene sottolineata la necessità di definire un quadro conoscitivo adeguato alle finalità previste dalle stesse prescrizioni; in particolare viene ribadito che la definizione dei bacini di alimentazione delle sorgenti più a rischio di interferenza con lo scavo delle gallerie sia compiutamente realizzabile solo a seguito di un congruo periodo di monitoraggio.

In tale ambito è stato individuato un ampio gruppo di sorgenti caratterizzate da rischio di impatto più elevato ($R > 0.4$)³, oppure da un'elevata significatività idrogeologica, e/o rilevanza socio-economica per l'utenza servita.

Per tale selezione di sorgenti significative è stata messa a punto una metodologia volta alla definizione dell'area di ricarica, ovvero del bacino idrogeologico sotteso da ognuna delle sorgenti stesse. Tale metodologia, rappresenta la sintesi di approcci metodologici da letteratura tecnica accreditata, specificamente adattati alla tipologia complessa ed eterogenea dei circuiti idrogeologici nel settore in esame.

La delimitazione si basa sul primo tracciamento con criterio idrologico, considerando i limiti dell'imbrifero superficiale, e successiva ridelimitazione includendo le aree di ricarica afferenti a idrostrutture significative. L'elemento di controllo è costituito dalla compatibilità della delimitazione stessa con il bilancio idrogeologico, valutato secondo il classico metodo di equivalenza idrologica tra volumi di infiltrazione sulla superficie del bacino e volumi restituiti dalla sorgente (Castany, 1966; US EPA 1987).

La pervasività ovvero estensione lineare delle strutture, con particolare riferimento agli allineamenti circa N-S e secondariamente WSW-ENE, determina, dove significative, estensioni rilevanti dei bacini di ricarica. Tali bacini sono dunque da intendersi come di potenziale contributo alle idrostrutture di alimentazione delle sorgenti, sulla base di criteri cautelativi di delimitazione che possono portare a locale sovrastima degli stessi, come evidenziato anche dalla marcata variabilità del coefficiente di infiltrazione calcolato per i differenti ambiti.

Un gruppo di bacini di ricarica interessa direttamente la verticale del tracciato in progetto, e a tali condizioni, con riferimento alle sorgenti evidenziate in Tabella 6, si correlano evidentemente quelle di maggior rischio di isterilimento.

A riguardo le interferenze dirette (impronta del bacino di ricarica con asse gallerie) riportate in Tabella 6 sono distinte con diverso colore relativo alle differenti condizioni riscontrate, a cui si ritiene corrispondere un grado probabilistico di rischio crescente:

a - in colore **blu** i bacini di ricarica di circuiti idrogeologici subsuperficiali, corticali (bacino di ricarica coincidente con il bacino imbrifero "local");

b - in colore **arancio** i bacini di ricarica di circuiti idrogeologici da circolazione intermedia o profonda, determinati da limiti o soglie di permeabilità relativa (con particolare riferimento ai contatti serpentiniti-calcescisti con sviluppo ortogonale alle gallerie) che si estendono a intersecare le opere in galleria;

c - in colore **rosso** i bacini di ricarica da circolazione intermedia o profonda, ovvero con delimitazione correlata all'andamento di faglie drenanti (prevalenti sistemi N-S e WSW-ENE) intersecanti l'asse gallerie.

³ sulla base del c.d. modello DHI, Drawdown Hazard Index utilizzato per la valutazione del rischio di interferenza con le opere in galleria da PD e PE

Oltre a tali condizioni di interferenza diretta con i bacini di ricarica, sono evidenziate **in grassetto** le sorgenti nelle condizioni di cui al punto precedente c, con interferenza delle strutture drenanti con l'asse gallerie, lungo il prolungamento delle strutture stesse all'esterno dello specifico ambito del bacino di ricarica.

Peraltro, va osservato che la non intersezione con il bacino di ricarica non ha in assoluto significato di non interferenza, in quanto il drenaggio profondo in galleria può modificare le condizioni della falda di base o il carico piezometrico nelle linee tettoniche, con eventuale effetto, nell'ambito di un'area estesa di impronta dinamica, sulle circolazioni profonde che sostengono la falda corticale risorgente.

In questo senso i bacini delimitati e le relative sorgenti non vanno intesi come parte di sistemi idrogeologici isolati e a se stante, ma costituiscono le porzioni di ricarica locale, attraverso il contributo da infiltrazione della risorsa dinamica W_{tot} , di circolazioni potenzialmente sostenute da acque profonde, anche in condizioni semi-statiche e potenzialmente interferenti con il drenaggio in galleria.

Si ritiene dunque cautelativamente corretta la scelta adottata fin dallo sviluppo degli elaborati di PD di valutare il rischio sulla base di un indice quantitativo, probabilistico, basato su criteri idrogeologici più estesi rispetto alla sola interferenza con il bacino di ricarica, oltre che da questo l'elaborazione di un indice di rischio funzione di valutazioni più ampie di rilevanza socio-economica della risorsa.

CODICE (*)	R	Litologia	Galleria interferente	Denominazione area critica	Significatività nel contesto indagato
S253	0.4225	Calcescisti	Borgonuovo	Agriturismo Pietre Turchine	a rischio elevato in quanto sulla verticale del tracciato in progetto; Rilevante importanza socio economica in quanto alimenta struttura ricettiva (agriturismo)
S194	0.4225	Calcescisti	Borgonuovo	rio Fontanelle	Rappresentativa circolazione in calcescisti entro incisione/struttura tettonica;
S209	0.3535	Calcescisti - serpentinite Voltri	Borgonuovo	Borgonuovo	Rilevante importanza socio economica in quanto alimenta consorzio per uso irriguo; è il drenaggio della esistente galleria Borgonuovo e costituisce verosimilmente l'insieme di piùvenute idriche è rappresentativa dell'interferenza degli scavi in progetto sul tratto di versante sotteso dalla vecchia galleria
S247	0.5125	Calcescisti	Delle Grazie	Voltri	Rappresentativa circolazione in calcescisti entro incisione/struttura tettonica; sorgente ad uso privato domestico (3 famiglie), in area non sempre raggiunta dalla rete di pubblico acquedotto; a rischio elevato in quanto sulla verticale del tracciato in progetto;
S072	0.4232	Serpentiniti Voltri - Calcescisti	Amandola	via Piccardo	Rappresentativa circolazione in calcescisti e nelle scaglie di serpentiniti; a rischio in quanto sulla verticale del tracciato in progetto ed in prossimità faglia intercettabile dallo scavo;
S218	0.5443	Calcescisti - Serpentinite Voltri	Amandola	via Piccardo	Rappresentativa circolazione in calcescisti e nelle scaglie di serpentiniti;impattata da sondaggio nel 2011; sorgente ad uso privato domestico (6 utenze), in area non raggiunta dalla rete di pubblico acquedotto.
S302	0.5464	Serpentiniti Voltri	Amandola	via Piccardo	Rappresentativa circolazione in calcescisti e nelle scaglie di serpentiniti; a rischio in quanto sulla verticale del tracciato in progetto ed in prossimità di faglia intercettabile dallo scavo;
S027	0.2031	Serpentiniti Voltri	Amandola	Acque sulfuree - Branega	particolarmente rappresentativa tra le sorgenti solfuree in quanto caratterizzata da portata rilevante e costante nel tempo; possibile diritto di concessione appartenente alle Terme di Genova;
S026	0.8414	Serpentiniti Voltri	Amandola	Branega	sorgente ad uso privato domestico (2 famiglie), in area non raggiunta dalla rete di pubblico acquedotto.
S036	0.2189	Serpentiniti Voltri	Amandola	viaTorrazza	sorgente ad uso privato domestico (2 famiglie); rappresentativa della circolazione in corrispondenza di faglia che viene intercettata dal tracciato della galleria
S108	0.9940	Serpentiniti Voltri	Amandola	Bric delle Monache - Bric Boessa	di grande importanza socio economica in quanto la sorgente alimenta l'acquedotto di Villa Pallavicini che approvvigiona la stessa Villa ed almeno altre 5 utenze; sorgente caratterizzata da importante portata per il contesto in oggetto; rappresentativa della circolazione lungo faglie e lungo versante di Bric Boessa;
S298	0.4007	Serpentiniti Voltri	Monterosso	Monte Contessa - Villa Page	Gruppo di sorgenti alimentate da circolazione lungo faglie N-S che vengono intercettate dallo scavo della galleria; sorgenti ad uso privato domestico, in area non ancora raggiunta dalla rete di pubblico acquedotto.
S375	0.7453	Serpentiniti Voltri	Monterosso	Monte Contessa - Sant'Alberto	
S660	0.5293	Serpentiniti Voltri	Monterosso	Monte Contessa - C. del Bosco	
S262	0.6567	Serpentiniti Voltaggio	Monterosso	Monte Timone	
S275	0.6567	Serpentiniti Voltaggio	Monterosso	Monte Timone Gherfa	
S277	0.6567	Serpentiniti Voltaggio	Monterosso	Monte Timone - Bianchetta	
S355	0.5779	Serpentiniti Voltaggio - Metabasalti	Monterosso	Monte Timone - S.Pietro ai Prati	
S359	0.4378	Serpentiniti Voltaggio	Monterosso	Monte Timone - S.Pietro ai Prati	

S320	0.7618	Serpentiniti Voltaggio	Monterosso	Monte Timone	
S321	0.7618	Serpentiniti Voltaggio - Scisti Gallaneto	Monterosso	Monte Timone	
S358	0.4378	Dolome di Monte Gazzo	Monterosso	Monte Timone - S.Pietro ai Prati	Particolarmente rappresentativa in quanto sorgente di origine carsica; di interesse come fonte alternativa nel caso non venisse interessata dallo scavo;
S353	0.6681	Serpentiniti Figogna - Metabasalti	Monterosso	Scarpino - Acquedotto Cassinelle	sorgente molto significativa in quanto alimentata da ammasso serpentinitico molto fratturato con probabile apporto dagli adiacenti metabasalti; sorgente a servizio dell'importante acquedotto consortile "Cassinelle" (55 utenze) già drenata da sondaggio VB7bis che attualmente provvede ad alimentare l'acquedotto;
S610	0.7207	Metabasalti	Monterosso	Murta - Case Gazzo Acquedotto Gassetto	sorgente rappresentativa delle emergenze idriche che avvengono in corrispondenza dell'importante contatto tettonico tra metabasalti e argilliti; rilevante importanza nell'approvvigionamento idrico locale in quanto alimenta acquedotto consortile del Gassetto a servizio di 4 famiglie non allacciate alla rete di pubblico acquedotto.
S290	0.4232	Metabasalti	Monterosso	Murta Case Gazzo - acquedotto Roggerone	sorgente rappresentativa delle emergenze idriche che avvengono in corrispondenza dell'importante contatto tettonico tra metabasalti e argilliti; rilevante importanza nell'approvvigionamento idrico locale in quanto alimenta acquedotto consortile Roggerone a servizio di 2 famiglie non allacciate alla rete di pubblico acquedotto.
S339	0.3642	Metabasalti	Monterosso	Murta Carpinello	sorgente rappresentativa delle emergenze idriche che avvengono in corrispondenza dell'importante contatto tettonico tra metabasalti e argilliti;
S344	0.6348	Metabasalti	Monterosso	Murta Acquedotto Ciliegio	sorgente rappresentativa delle emergenze idriche che avvengono in corrispondenza dell'importante contatto tettonico tra metabasalti e argilliti; rilevante importanza nell'approvvigionamento idrico locale in quanto alimenta acquedotto consortile Ciliegio a servizio di 10 famiglie non allacciate alla rete di pubblico acquedotto.
S301-SXP	0.2378	Formazione Ronco	SX Polcevera	Sx Polcevera	a rischio elevato in quanto sulla verticale del tracciato in progetto;
S303-SXP	0.4553	Formazione Ronco	SX Polcevera	Sx Polcevera - Bruc du Ventu	a rischio elevato in quanto sulla verticale del tracciato in progetto;
S638	0.5464	Formazione Ronco	SX Polcevera	Torbella	a rischio elevato in quanto sulla verticale del tracciato in progetto; sorgente ad uso privato domestico (2 famiglie), in area non raggiunta dalla rete di pubblico acquedotto.

(*) Vedi testo per la legenda dei colori

Tabella 6 – Sintesi delle condizioni di interferenza tra bacini di alimentazione delle sorgenti con l'asse gallerie