Variante R.U. 2018 Comune di San Vincenzo
Per la Tenuta di Rimigliano

MODELLO PREVISIONALE IDROGEOLOGICO E DI SIMULAZIONE DELL'INTRUSIONE SALINA ASSOCIATE ALL'EVENTUALE MESSA IN OPERA DI TRE POZZI AD USO CIVILE NELL'AMBITO DEGLI INTERVENTI PREVISTI NELLA VARIANTE AL R.U. 2018 COMUNALE PER LA TENUTA DI RIMIGLIANO NEL COMUNE DI SAN VINCENZO (LI)

Maggio 2018

IdroGeo Service srl – via S. Pellico, 14/16 – 50052 Certaldo (Firenze) Italia – tel e fax +39 0571 651312
info@idrogeosrl.it – www.idrogeosrl.it

Indice

1 - PREMESSA **3**

2 – SINTESI DELLE FASI DI SVILUPPO DELLA MODELLAZIONE **4**

2.1. - Modello concettuale *4*
2.2 - Modello matematico *7*
2.3 - Software utilizzati per la modellazione *8*

3 – INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO **10**

4 – INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO **17**

5 - DESCRIZIONE DEL PROGETTO **21**

6 – MODELLO CONCETTUALE E MODELLO MATEMATICO **25**

6.1 – Dominio tridimensionale del modello concettuale *25*
6.2 – Parametrizzazione del modello concettuale *28*
6.2.1 – Parametri idrogeologici 29
6.2.2 — Parametri chimici 31
6.3 – Condizioni ai limiti del modello *33*
6.3.1 – Condizioni di carico idraulico imposto (di primo tipo o di Dirichlet) 34
6.3.2 - Condizioni ai limiti di flusso imposto 36
6.3.3 - Condizioni ai limiti di transfer 36
6.3.4 - Condizioni ai limiti di portata 36
6.4 – Fattore tempo – modello in condizioni transienti *39*
6.5 – Calibrazione e validazione del modello *40*
6.6 – Simulazione delle condizioni di progetto *46*

BIBLIOGRAFIA **56**

MODELLO PREVISIONALE IDROGEOLOGICO E DI SIMULAZIONE DELL'INTRUSIONE SALINA ASSOCIATE ALL'EVENTUALE MESSA IN OPERA DI TRE POZZI AD USO CIVILE NELL'AMBITO DEGLI INTERVENTI PREVISTI NELLA VARIANTE AL R.U. COMUNALE PER LA TENUTA DI RIMIGLIANO NEL COMUNE DI SAN VINCENZO (LI)

1 - PREMESSA

Su incarico della Soc. Tenuta di Rimigliano S.r.l., nell'ambito del procedimento di richiesta di Variante al R.U. comunale "Tenuta di Rimigliano" per le opere progettuali previste all'interno dei terreni di proprietà della committenza sono stati realizzati dei modelli matematici idrogeologici e di simulazione dell'intrusione salina al fine di simulare la risposta chimica e idrogeologica della porzione di acquifero di San Vincenzo interessata dall'eventuale messa in opera di tre pozzi ad uso civile a servizio delle opere progettuali suddette.

L'ipotesi progettuale prevede la messa in opera di tre pozzi ad uso civile, nella porzione centro nord della proprietà della committenza, ognuno della profondità di circa 60 m (profondità da verificare con indagini di dettaglio nell'area di interesse) e prelevanti ciascuno circa 3 l/sec (per un totale di circa 9 l/sec) per un periodo annuale di circa 5 mesi (da maggio a settembre).

La presente relazione, in particolare, descriverà gli effetti, di tipo idrogeologico e di tipo chimico (contenuto di cloruri nelle acque di falda), sulla matrice acqua, che deriveranno dal pompaggio di acqua di falda dai pozzi progettuali in oggetto.

La ricostruzione dei suddetti effetti è stata eseguita tramite l'impiego dei codici di calcolo MODFLOW2000 e MT3DMS della U.S.G.S. su interfaccia GROUNDWATER VISTAS 4.0.

La ricostruzione del comportamento idrogeologico e chimico tramite l'impiego di un modello matematico è un utile strumento nel processo decisionale che porta alla valutazione delle effettive conseguenze dell'applicazione del progetto in oggetto in termini di abbassamento del livello della falda, modifica delle isopiezometriche (modifica della circolazione idrica sotterranea) e propagazione dell'intrusione salina indotta dalla messa in funzione delle opere di progetto.

Preme sottolineare che la modellazione descritta nel presente elaborato, rappresenta una schematizzazione del contesto attuale e delle conseguenze derivanti dalla messa in funzione delle eventuali opere di progetto, in quanto le informazioni, allo stato attuale, in nostro possesso, in termini di numero di pozzi esistenti, pompaggio effettivo dei pozzi esistenti, livelli piezometrici dei pozzi esistenti, contenuto di cloruri delle acque prelevate dai pozzi esistenti, nonché dell'assetto

geologico e litologico del comparto in esame derivano da pubblicazioni presenti in letteratura che si riferiscono ad un contesto di area vasta (acquifero di San Vincenzo e della Val di Cornia) piuttosto che ad un contesto sito specifico come nel caso in esame ("Tenuta di Rimigliano").

2 – SINTESI DELLE FASI DI SVILUPPO DELLA MODELLAZIONE

L'implementazione di un modello matematico si articola in più fasi di lavoro (Fig. 1); una volta focalizzato l'obiettivo della modellazione si deve creare un modello concettuale del sistema acquifero in esame che equivale ad una schematizzazione del sistema geologico, idrogeologico e, nel nostro caso anche chimico (contenuto di cloruri), individuato nell'areale di studio.

Il passo successivo è rappresentato dalla progettazione vera e propria del modello, che include:

- la scelta della griglia di discretizzazione,
- la definizione delle condizioni al contorno e di quelle iniziali,
- l'assegnazione di valori sito-specifici ai diversi parametri idrogeologici e fisici che contraddistinguono i vari orizzonti che costituiscono il sistema idrogeologico individuato nell'area e alle varie sollecitazioni individuate internamente al sistema (es. pozzi, precipitazioni, ecc.).

La calibrazione in regime sia stazionario che transitorio del modello e la capacità di simulare le condizioni di riferimento costituiscono infine il passaggio fondamentale per poterne poi prevedere l'impiego ai fini progettuali.

2.1. - Modello concettuale

Il modello concettuale rappresenta una semplificazione del sistema reale ma sufficientemente rappresentativa delle proprietà funzionali e del comportamento del sistema reale.

La costruzione del modello concettuale prevede la schematizzazione dell'acquifero che consente di rappresentare in modo semplificato, ma comunque efficace, il reale sistema idrico e chimico sotterraneo. Ciò presuppone la raccolta e l'elaborazione di tutti i dati che contribuiscono a definire l'acquifero sia dal punto di vista geometrico-strutturale, (stratigrafie, sezioni geologiche, parametri idrogeologici, permeabilità, trasmissività, ecc..) sia dinamico, ossia secondo quei fattori naturali (es. piogge, chimismo delle acque, ecc..), antropico (es. prelievi, ricariche, ecc.) e fisico (contenuto di cloruri) variabili nel tempo che incidono sulle caratteristiche di flusso (idrogeologico e chimico) della falda. (Fig. 2).

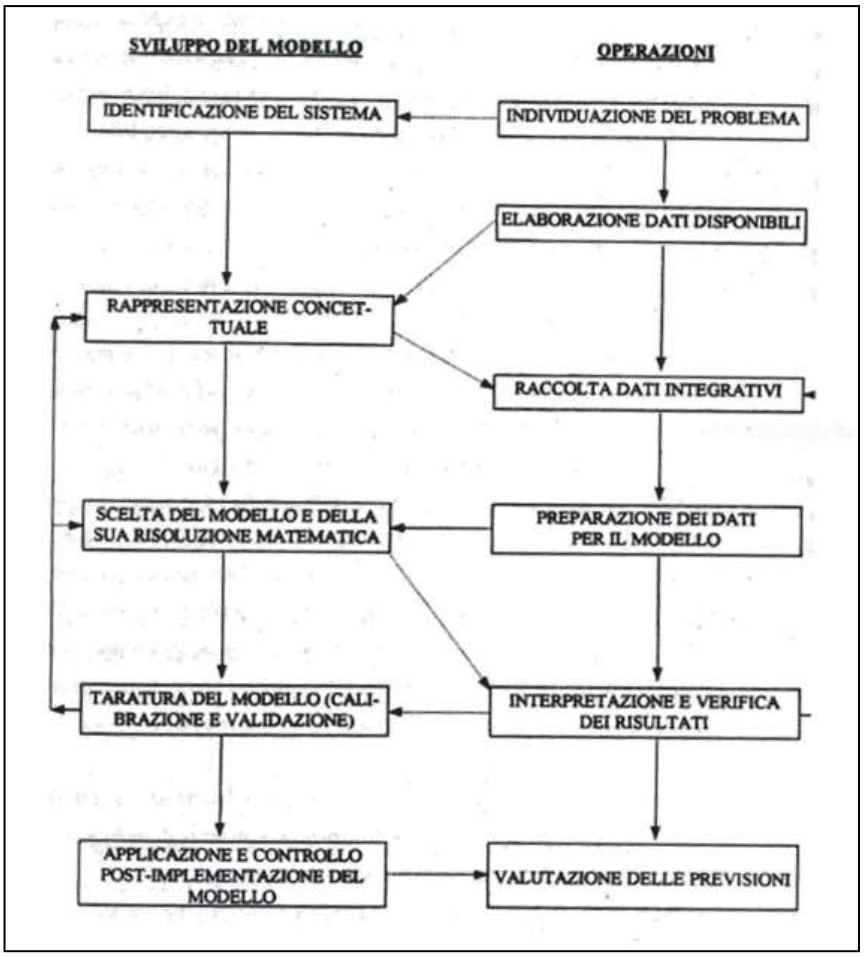


Fig. 1 - Algoritmo per la costruzione di un modello di simulazione (M. Salleolini, 2000)

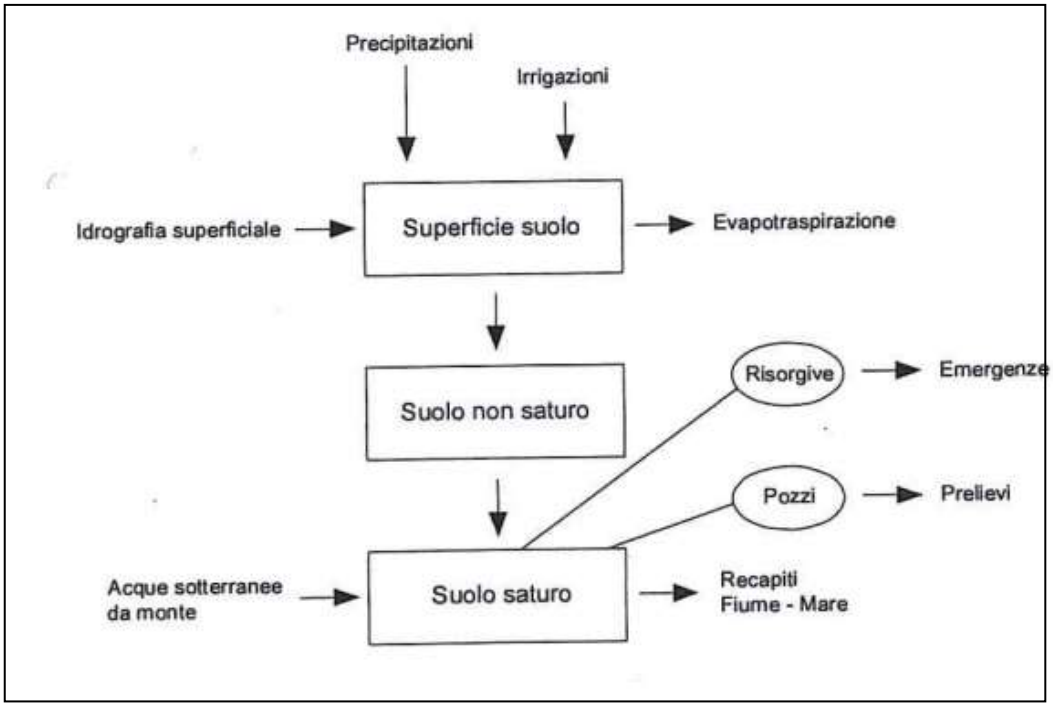


Fig. 2 - Schema modello concettuale (M.Salleolini, 2000)

Lo schema da seguire prevede le seguenti fasi:

Schematizzazione dell'acquifero:

- definizione del problema e condizioni al contorno;
- ricostruzione dell'assetto geologico - strutturale del volume di terreno in studio sulla base di carte geologiche, sezioni idrogeologiche, stratigrafie di pozzi e sondaggi, ecc...;
- definizione dei parametri idrogeologici attraverso carte piezometriche e prove di pompaggio;
- definizione delle caratteristiche dei corpi idrici superficiali presenti all'interno dell'area del modello (es. profondità dell'alveo di un fiume);
- definizione delle sollecitazioni a cui il sistema viene sottoposto (prelievi, ricariche, drenaggi, ecc...);
- definizioni delle caratteristiche fisiche e chimiche delle matrici acqua e terra presenti nel contesto di modellazione (ph, concentrazioni …);
- definizione della scelta del tipo di modello (areale bidimensionale, quasi tridimensionale, pienamente tridimensionale, profilo bidimensionale).

Definizione del modello concettuale:

- discretizzazione dello spazio di modellazione sia orizzontale che verticale;
- individuazione e definizione matematica delle condizioni al contorno;
- rappresentazione di tutte le variabili e sollecitazioni interne al sistema idrogeologico:
  - prelievi
  - ricariche
  - drenaggi
  - proprietà idrauliche di ciascuna cella
  - proprietà idrauliche dei corpi idrici superficiali o dei dreni
  - proprietà fisiche e chimiche di ciascuna cella

Preme sottolineare che il modello concettuale, come tutte le tipologie di modello, è una rappresentazione della realtà che si focalizza su determinati aspetti di interesse, utili ai fini del raggiungimento dell'obiettivo del lavoro, per cui, come riportato sopra, esso rappresenta una semplificazione dell'infinita eterogeneità di aspetti che caratterizzano la realtà fisica in studio.

2.2 - Modello matematico

Un modello matematico è un insieme di relazioni (algebriche, differenziali, integrali) rappresentanti il comportamento di un sistema, i legami funzionali esistenti fra le varie componenti, le condizioni ai limiti ed iniziali ed i vincoli esterni.

I modelli matematici possono essere classificati secondo vari criteri ma due sono di interesse per la presente nota:

- **obiettivi da perseguire:**
  - modelli di simulazione:
    - modelli che riproducono il comportamento del sistema al fine di determinare la risposta del sistema stesso a sollecitazioni di input a partire da uno stato iniziale imposto;
  - modelli di gestione ottimale della risorsa idrica sotterranea:
    - modelli eseguiti al fine di ottenere risultati ottimali e prefissati in base ad esigenze economiche ed ingegneristiche. L'intervento esterno in questi casi si focalizza sulle trasformazioni di stato che il sistema subisce a seguito di sollecitazioni esterne al fine di veicolare la risposta verso obiettivi prefissati;
  - modelli di identificazione parametrica:
    - modelli che, a partire dal loro comportamento, hanno la finalità di stimare indirettamente le proprietà del sistema al fine di colmare le lacune di dati sperimentali;
  - modelli di elaborazione dati:
    - modelli atti a selezionare, analizzare e sintetizzare i dati di input per modelli di simulazione, di gestione o identificazione parametrica.

- **Tipologia di processi:**
  - modelli di flusso idrico:
    - Trattano problemi di gestione delle risorse idriche tenendo conto delle interazioni fra circolazione superficiale e sotterranea;
  - modelli di trasporto di soluti:
    - trattano problemi di intrusione salina negli acquiferi, inquinamento da fonti diffuse o localizzate, stoccaggio di rifiuti;
  - modelli di trasporto di calore:
    - esaminano le potenzialità dei campi geotermici, l'inquinamento da reflui termici;
  - modelli di deformazione:
    - trattano problemi di deformazione per subsidenza a seguito dell'estrazione di fluidi dal sottosuolo.

La modellazione oggetto della presente relazione è classificabile come modello di simulazione del flusso idrico e modello di trasporto di soluti (intrusione salina).

2.3 - Software utilizzati per la modellazione

Per l'implementazione del modello matematico sono stati scelti i codici di calcolo MODFLOW2000 e MT3DMS sviluppati dal Servizio Geologico degli Stati Uniti (United States Geological Survey - USGS). Il motivo di tale scelta va ricercata nelle enormi potenzialità di questo software e nella grande diffusione raggiunta a livello mondiale, tale da essere diventato uno standard di riferimento.

Si tratta di codici di calcolo che permettono di ricostruire un modello alle differenze finite tridimensionale (sviluppato da McDonald e Harbaugh nel 1988) e in grado di simulare il flusso delle acque sotterranee e dell'intrusione salina attraverso modelli bi- e tridimensionali.

Questo consente di tenere in considerazione la complessità idrogeologica del sito in esame, considerando la distribuzione tridimensionale della permeabilità, l'interazione con i copri idrici superficiali, gli effetti dei pozzi e delle strutture/barriere sotterranee. Ciò è possibile attraverso una serie di componenti chiamati "packages" (pacchetti), ognuno dei quali viene utilizzato per simulare uno specifico aspetto. Il modello, attraverso questi pacchetti, offre la possibilità di simulare:

- le diverse caratteristiche del sistema idrogeologico oggetto di studio quali ad esempio: il flusso da fiumi, il flusso da corpi idrici superficiali a livello costante (mari, laghi, ecc..), ecc..;

- i flussi associati con agenti artificiali e naturali quali pozzi, ricarica areale dovuta alle precipitazioni, evapotraspirazione, drenaggi;

- i differenti tipi di acquifero: libero, confinato, semiconfinato;

- l'eventuale anisotropia nelle caratteristiche idrauliche dell'acquifero.

- i flussi di contaminanti chimici o dell'intrusione salina.

MODFLOW2000 e MT3DMS sono in grado di simulare sia lo stato stazionario sia quello transitorio, offrono la possibilità di impostare una grande varietà di condizioni al contorno e di proprietà, e costituiscono la base di partenza per la progettazione, andando ad evidenziare aspetti positivi e criticità del sistema in studio.

Nello sviluppo del presente studio i codici di calcolo MODFLOW2000 e MT3DMS sono stati utilizzati su interfaccia GROUNDWATER VISTAS V.4. (prodotto ESI licenza ESU082201299), il quale costituisce un completo ambiente di lavoro per la modellazione delle acque sotterranee, e fornisce una serie completa di strumenti sia per la fase di sviluppo del modello sia per la fase di analisi dei risultati.

A supporto del suddetto pacchetto software sono stati utilizzati i seguenti software di uso comune per la gestione dei dati raccolti, lo sviluppo di cartografie esplicative, l'interpolazione dei dati puntuali e la creazione di database geografici:

- ArcGIS 10.0 (ESRI licenza ESU082201299);
    - software utilizzato per la gestione dei dati spaziali, la creazione di database geografici e creazione delle tavole esplicative dei risultati del modello e la regionalizzazione dei dati puntuali attraverso tecniche di interpolazione di dati puntuali
- Notepad ++ v7.3.3 (Don Ho);
    - software utilizzato per l'editing di file di testo (tipo .txt) propedeutico all'upload dei dati su software di modellazione.

3 – INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

Dal punto di vista geomorfologico l'area in esame, localizzata lungo la costa di Rimigliano (fra San Vincenzo e Baratti), risulta pressoché pianeggiante, con leggera pendenza da monte verso mare (da Est verso Ovest). La piana costiera di San Vincenzo (al cui interno ricade la tenuta di Rimigliano) presenta una forma triangolare ed è delimitata ad Est dai rilievi mesozoici di Campiglia Marittima. A Sud Est, invece, essa passa, senza soluzione di continuità morfologica nella piana della Val di Cornia.

La zona, ad oggi si presenta con un'impronta decisamente agricola, ad eccezione dei due centri urbani principali, San Vincenzo a Nord (distanza del centro urbano dal margine di proprietà della committenza, circa 4 Km) e Venturina ad Est (distanza del centro urbano dal margine di proprietà della committenza, circa 3,4 Km) che presentano invece un'impronta più abitativa e soprattutto turistico-ricettiva.

Dal punto di vista geologico, il comparto in esame si inserisce all'interno della piana costiera olocenica di San Vincenzo caratterizzata da depositi sedimentari lagunari, lacustri e marini frutto delle oscillazioni eustatiche quaternarie del livello marino. Tali sedimenti poggiano su depositi marini mesozoici appartenenti all'Unità Ligure e alla Serie Toscana. I depositi mesozoici sono riscontrabili in affioramento ad Est dell'area oggetto di modellazione, in corrispondenza dei rilievi collinari di Campiglia Marittima (Fig. 3) Unica eccezione al contesto marino di substrato è rappresentato da rocce magmatiche neogeniche e quaternarie che affiorano immediatamente a monte dell'abitato di San Vincenzo.

Tale assetto geologico è frutto di un processo tettonico iniziato circa 300 milioni di anni fa quando il super continente Pangea ha iniziato a subire un movimento di trazione con direzionalità Est-Ovest che progressivamente ha portato al formarsi del mare Tetide. In questo nuovo mare, a partire dal Giurassico, hanno iniziato a sedimentarsi i depositi marini facenti parte della Serie Toscana con le varie granulometrie e litologie che caratterizzano le Formazioni componenti la Serie, queste ultime, funzione a sua volta dei vari ambienti e delle varie profondità di sedimentazione che si sono susseguite nel corso della storia del mare Tetide fino al tardo Miocene. A partire dal Miocene è iniziata la chiusura del mare Tetide con conseguente apertura dell'oceano Atlantico. Le pressioni in gioco hanno portato ad un accavallamento dei depositi sedimentari summenzionati con contestuale formazione della catena Appenninica. Al termine del Miocene si conclude la fase orogenetica appenninica ed inizia una fase distensiva che ha portato alla creazione di faglie dirette e alla nascita dei bacini e delle fosse tettoniche tipiche del contesto geologico e tettonico toscano. La laminazione della crosta, con contestuale risalita del mantello, ha portato alla parziale e localizzata fusione delle rocce della crosta profonda. Questo evento è alla base degli affioramenti di rocce magmatiche nella

zona di San Vincenzo, frutto della risalita di magma, avvenuta, nel caso specifico, circa a metà del Pliocene.

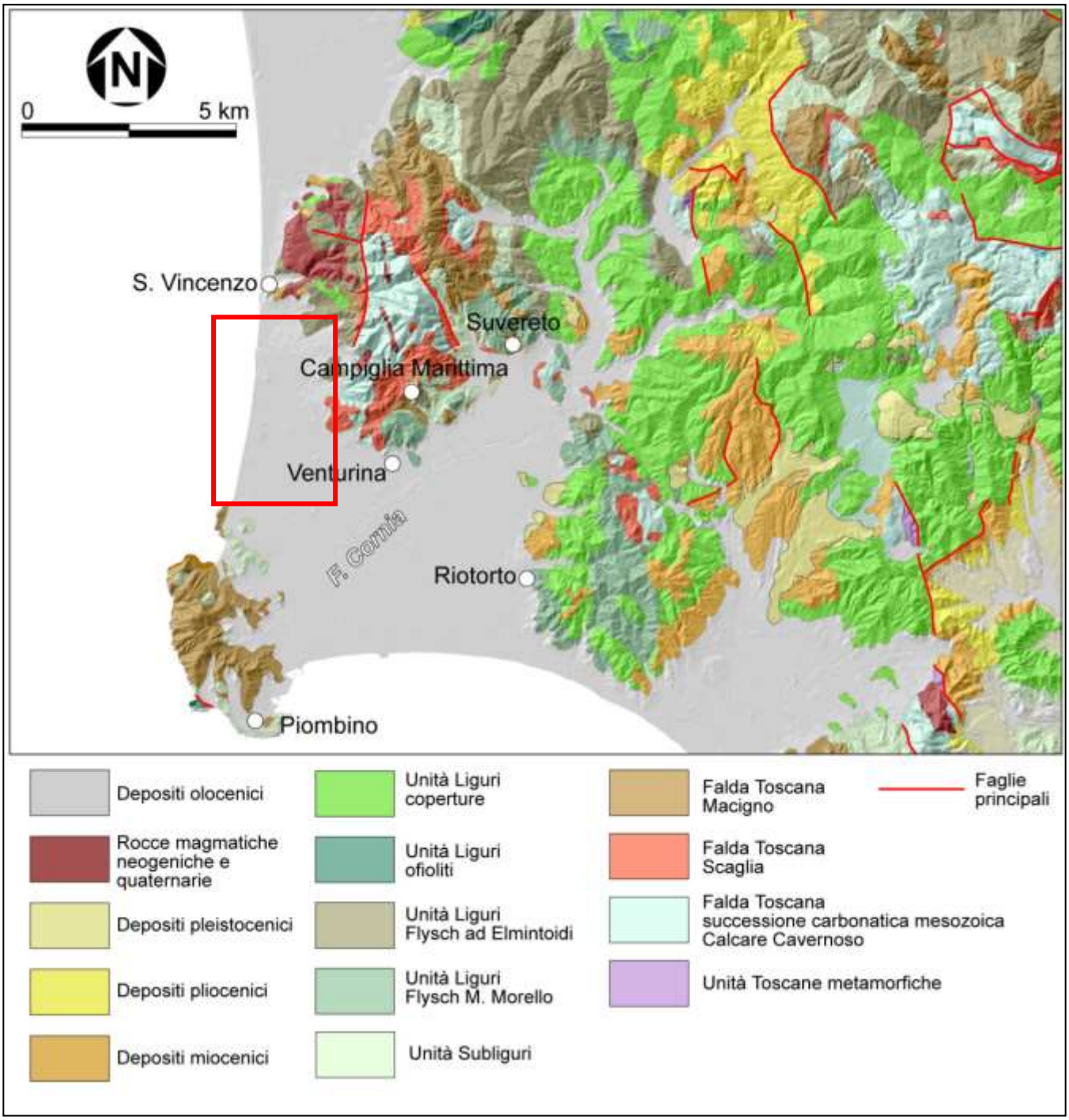


Fig. 3- Schema geologico semplificato dell'area oggetto di studio (CNR-IGG e Consorzio LAMMA, 2009). In rosso l'area di modellazione.

Sul basamento, appena descritto si sono sedimentati i depositi neoautoctoni. Il processo di sedimentazione è fortemente influenzato dalle oscillazioni eustatiche del livello del mare a sua volta conseguenza delle oscillazioni climatiche (alternanza di periodi glaciali e interglaciali).

Nel complesso, da circa 120 mila anni fa a circa 10 mila anni fa, si sono susseguite tre fasi trasgressive e tre fasi regressive qui di seguito brevemente riassunte (Fig. 4):

- Tirreniano I (trasgressione)
- Würm I (regressione)
- Tirreniano II (trasgressione)
- Würm II (regressione)
- Tirreniano III (trasgressione)
- Würm III (regressione)

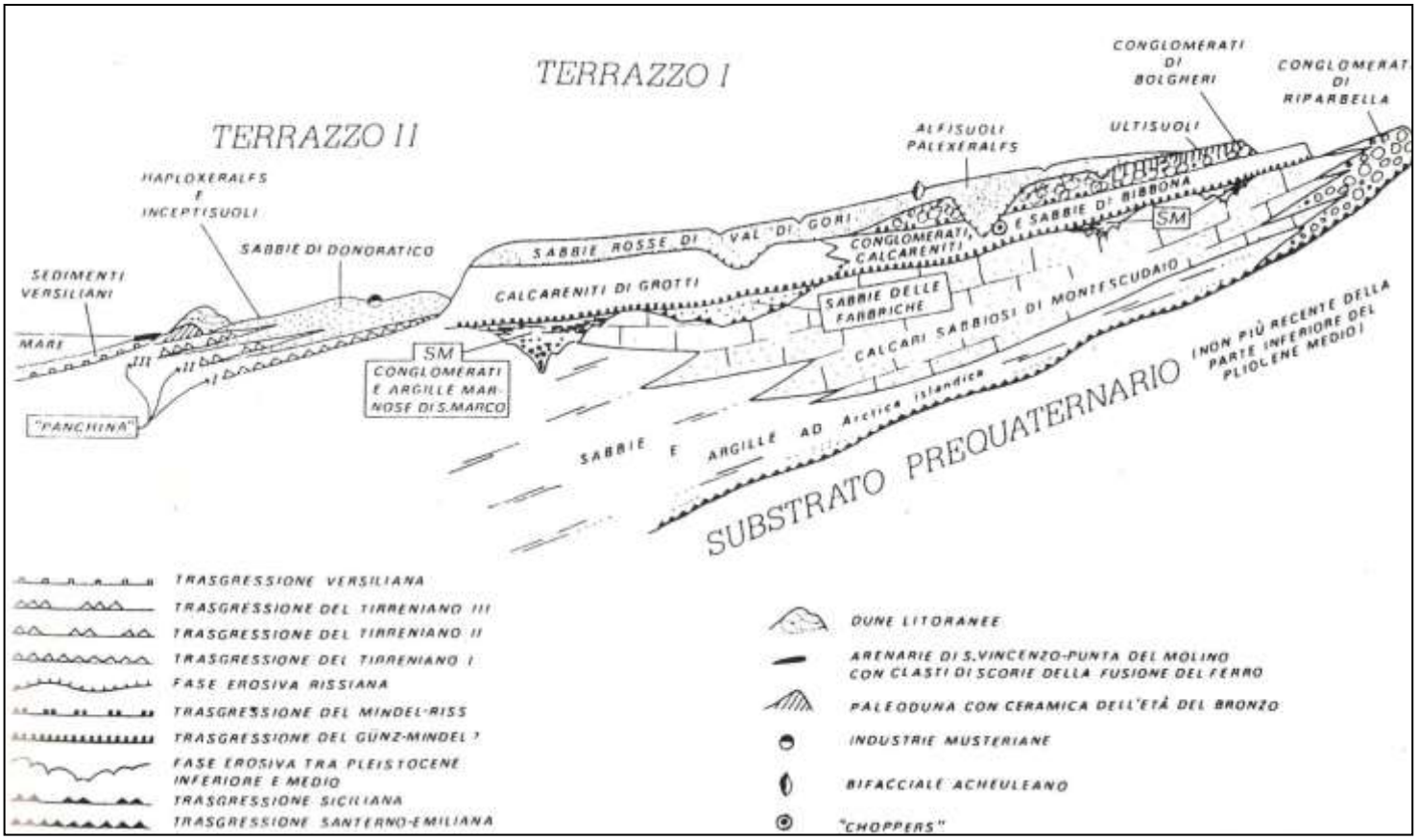


Fig. 4- Schema stratigrafico del Quaternario della Bassa Val di Cecina (Mazzanti & Sanesi, 1987)

Entrando nel dettaglio, l'area oggetto di modellazione vede in affioramento depositi quaternari prevalentemente a grana sabbiosa appartenente al Complesso Neoautoctono del Pleistocene medio – superiore (QMCa – Sabbie di Donoratico e QMCb – Panchina). Lungo la costa al di sopra dei depositi pleistocenici si rinvengono depositi eolici componenti nel loro complesso la forma morfologica di una duna. Sempre nell'area di interesse ed in particolare nella porzione centro Sud

del perimetro in Variante è presente un deposito lacustre, paludoso ad andamento circa SO- NE ricalcante la geometria del paleolago di Rimigliano formatosi nell'ultima fase trasgressiva quaternaria (Tirreniano III - Fig. 5) ed attualmente prosciugato.

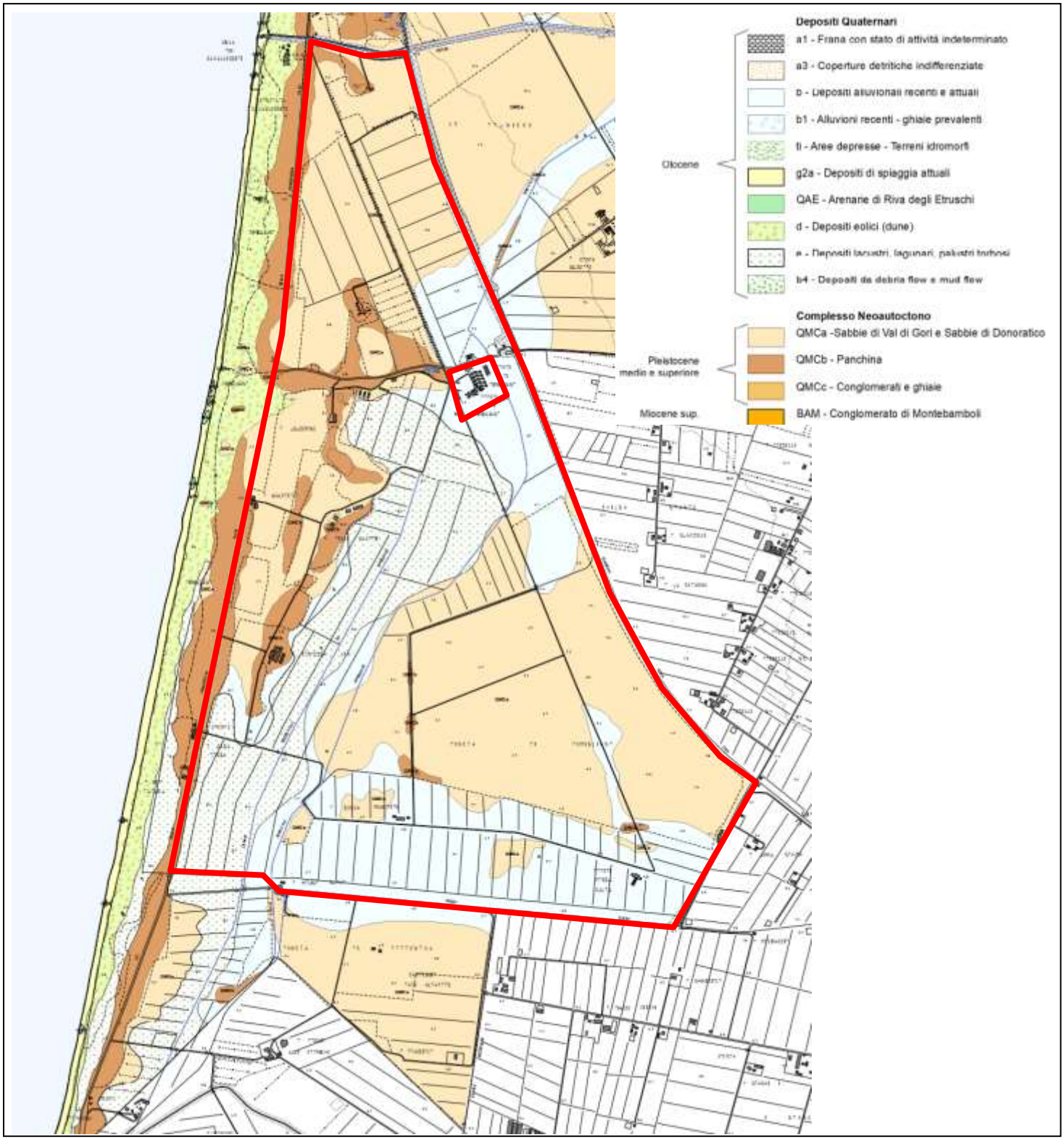


Fig. 5- Estratto Carta Geologica del vigente P.S. comunale. Il perimetro rosso rappresenta il limite di Variante (P.S. comunale, 2013)

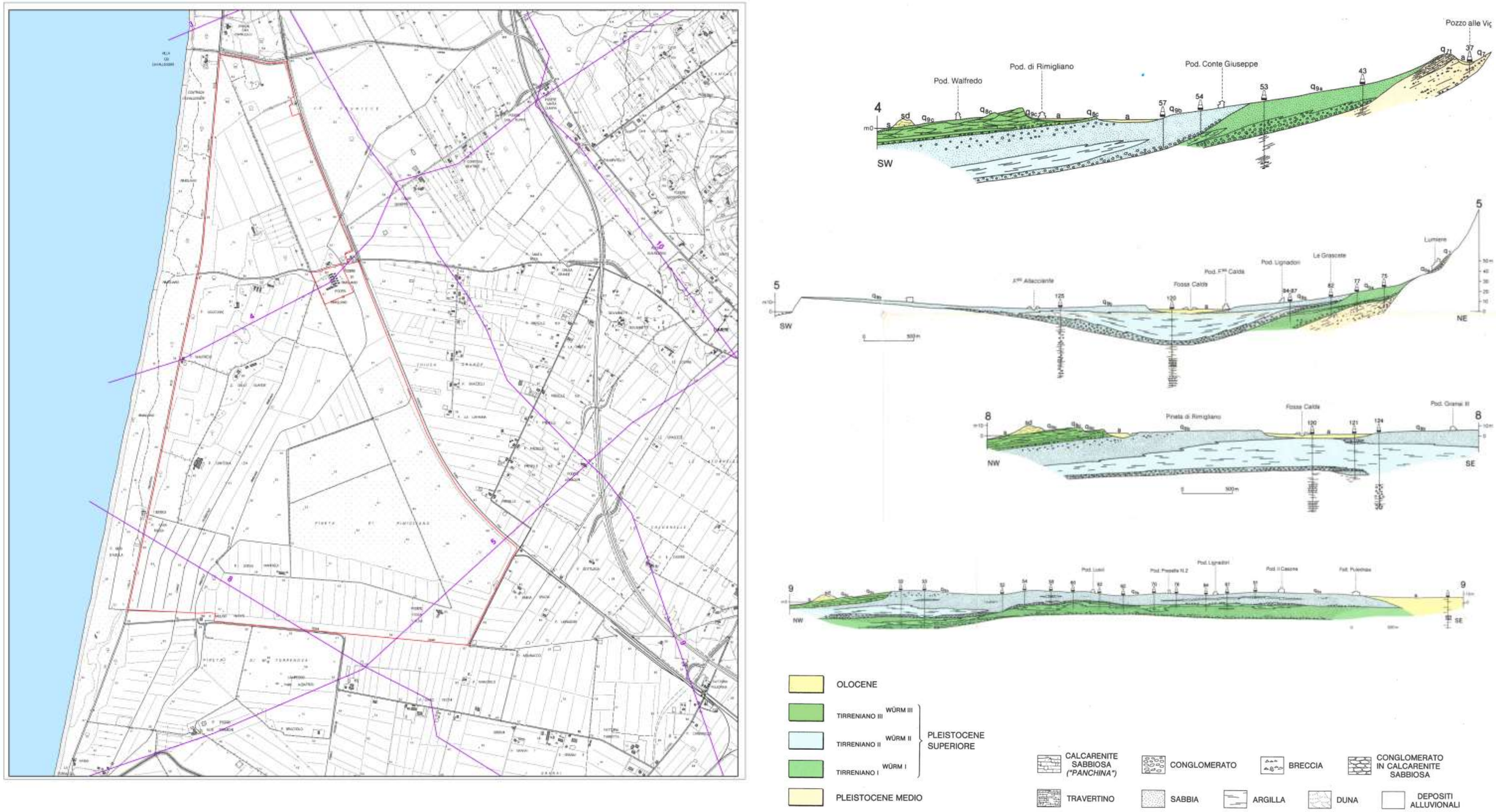


Fig. 6- A sinistra, ubicazione delle tracce di sezione geologica (in viola). In rosso il limite della Variante in oggetto. A destra le sezioni geologiche di interesse per il modello (Costantini A. et. al, 1993)

Il suddetto assetto geologico di affioramento presenta uno pattern stratigrafico in sezione così schematizzabile (

Fig. 6): a livello superficiale, e per uno spessore medio di circa 10 m (con picchi massimi di 20 m, nella porzione settentrionale dell'area oggetto di modellazione) è presente un primo orizzonte di depositi prevalentemente sabbiosi costituenti, da un punto di vista idrogeologico, l'acquifero freatico (Fig. 7).

Scendendo si riscontra un secondo orizzonte discontinuo costituito prevalentemente da depositi limoso argillosi anch'esso dello spessore medio (dove presente) di circa 10 m.

Al di sotto è presente un acquifero multistrato incluso all'interno di una successione lito-stratigrafica caratterizzata da un'alternanza di livelli prevalentemente ghiaiosi e livelli prevalentemente limoso/argillosi. Nel complesso i livelli ghiaiosi messi in evidenza nel contesto di area vasta della Val di Cornia e della piana di San Vincenzo sono in totale cinque, anch'essi, dello spessore medio di circa 10 m ciascuno (Ghezzi et.al, 1993).

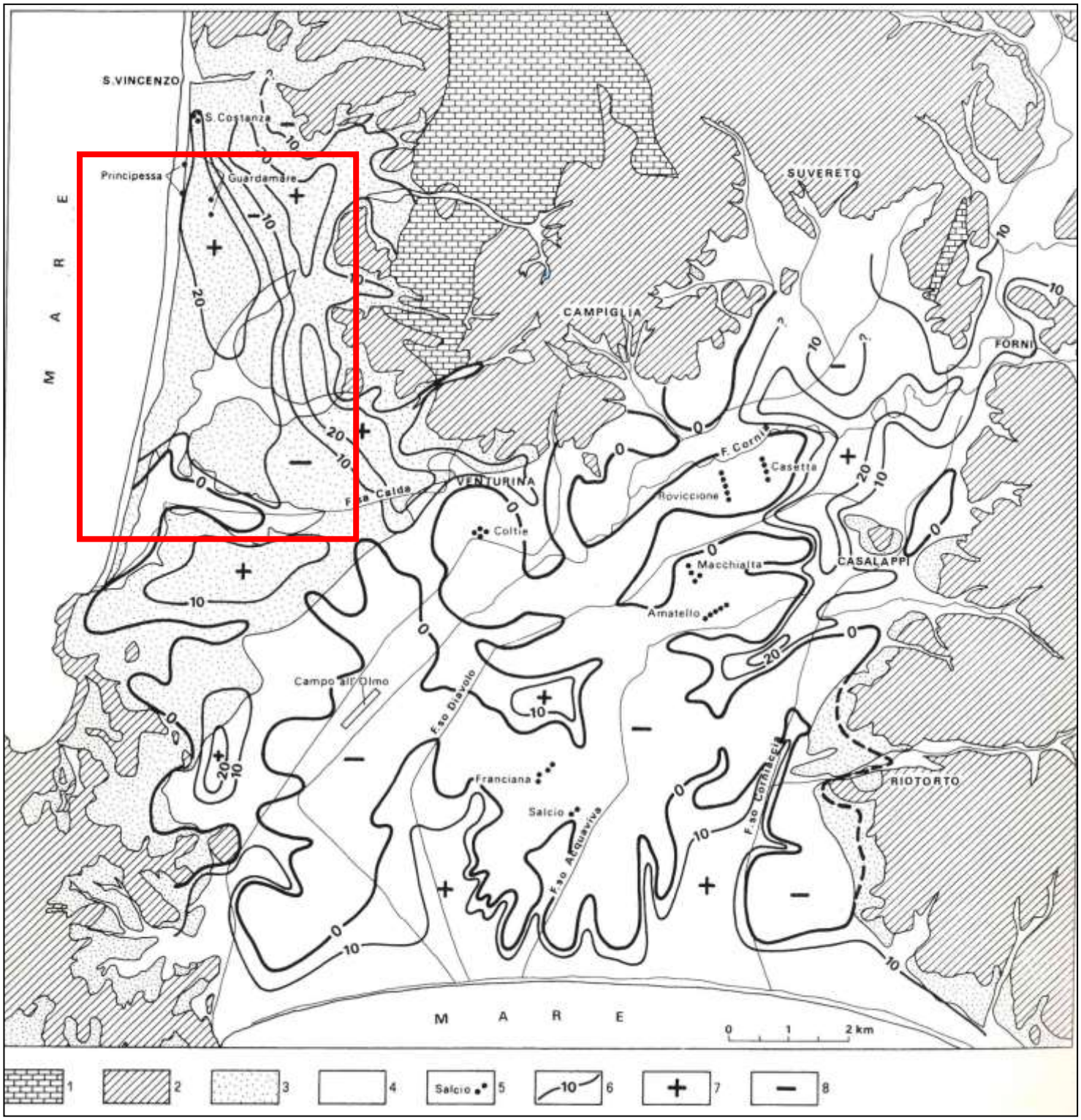


Fig. 7- Acquifero freatico. Carta delle isopache del netto poroso. 1-2-3-4- acquifero freatico, 6 – curve isopache del netto poroso (m), 7 – zone di massimo spessore relativo, 8 – zone di minimo spessore relativo. In rosso il limite del modello in oggetto (Ghezzi. et. al, 1993)

4 – INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

Da un punto di vista idrogeologico, come conseguenza dell'assetto geologico sopra descritto (vedi § 3), il sottosuolo della Piana di San Vincenzo è caratterizzato, nell'insieme, da un sistema acquifero multistrato, sormontato da un acquifero freatico di scarsa produttività (Ghezzi et al., 1993) e separato da quest'ultimo da uno strato discontinuo di materiale limoso/argilloso.

Il contesto in studio presenta quindi due acquiferi di interesse:

- Acquifero freatico prevalentemente sabbioso, scarsamente produttivo ed asciutto per buona parte dell'anno (Ghezzi et al., 1993)
- Acquifero semi-confinato multistrato costituito da un'alternanza di almeno cinque strati ghiaiosi alternati da altrettanti strati argillosi (Ghezzi et al., 1993).

Preme sottolineare che nell'area oggetto di modellazione, partendo dalle sezioni geologiche realizzate da Costantini et al, 1993, non è riscontrabile un separatore idrogeologico continuo (strato argilloso) fra il primo e il secondo acquifero e quindi al fine di mettere in evidenza la possibile inter-comunicazione verticale fra i due acquiferi in oggetto, in fase di modellazione, l'acquifero multistrato profondo è stato classificato come non confinato.

Sempre all'interno dello studio di Ghezzi et al, 1993, sia per l'acquifero freatico che per l'acquifero multistrato profondo sono riportati i risultati di alcune prove di portata / Lefranc eseguite in alcuni pozzi nella zona di San Vincenzo (Tabb. 1 e 2).

Pozzo n°	Località	B (s/m^2)	Trasmissività (m^2/s) T	Trasmissività (m^2/s) T (B)*	Storage	Spessore (m)	Permeabilità (m/s)	Storage specifico (1/m)
Parametri da prove di portata nella zona dei campi pozzi di S. Vincenzo								
304	Guardamare	86	2.7×10^{-2}			21	1.3×10^{-3}	
305	Guardamare		1.1×10^{-2}		1.0×10^{-2}	20	5.5×10^{-4}	
306	Guardamare	140		5.6×10^{-3}		20	2.8×10^{-4}	
309	S. Costanza		8.0×10^{-3}		$> 1.2 \times 10^{-2}$	10	8.0×10^{-4}	
Sondaggi con prove Lefranc nella zona di S. Vincenzo								
298	Ch.a Grande						1.5×10^{-5}	
299	C.te Ascanio						4.0×10^{-6}	
300	S. Giuseppe						4.5×10^{-6}	

* - Trasmissività stimata in base al valore del coefficiente B (s/m^2)

Tab. 1- Parametri idraulici dell'acquifero freatico di San Vincenzo (Ghezzi. et. al, 1993)

Pozzo n°	Località	B (s/m²)	Trasmissività (m²/s) T	Trasmissività (m²/s) T (B)	Storage	Spessore (m)	Permeabilità (m/s)	Storage specifico (1/m)
Parametri da prove di portata nella zona dei campi pozzi di S. Vincenzo								
368	Casetta	28	3.6×10^{-2}		8.5×10^{-4}	24	1.5×10^{-3}	3.5×10^{-5}
373	Roviccione	37	4.0×10^{-2}		6.3×10^{-4}	22	1.8×10^{-3}	2.9×10^{-5}
375	Roviccione	81	2.2×10^{-2}		8.5×10^{-4}	20	1.1×10^{-3}	4.2×10^{-5}
376	Roviccione	70	2.8×10^{-2}		8.5×10^{-4}	16	1.7×10^{-3}	5.3×10^{-5}
379	Macchialta	52	3.8×10^{-2}		7.5×10^{-5}	19	2.1×10^{-3}	3.9×10^{-6}
385	Amatello	40	4.1×10^{-2}		5.0×10^{-5}	18	2.3×10^{-3}	2.8×10^{-6}

Tab. 2- Parametri idraulici dell'acquifero confinato di San Vincenzo (Ghezzi. et. al, 1993)

Vari lavori in passato (Ghezzi et. al, 1993, Piano Strutturale Comunale di San Vincenzo e Campiglia Marittima, 2013) hanno provveduto alla realizzazione di mappe piezometriche relative alla all'area di interesse (Figg. 8 e 9).

Nell'insieme le varie piezometrie presentano una morfologia simile. In particolare, si riscontrano due punti in comune:

- Flusso di alimentazione da N-E verso il Mare
- Flusso in uscita a S-E dalla piana di San Vincenzo verso la Val di Cornia.

Il flusso in uscita, dovuto molto probabilmente ad una barriera idrogeologica posta lungo la costa, comporta un flusso di acqua dolce verso l'entroterra a cui si aggiunge una porzione rilevante di acqua salmastra derivante dalla contestuale ingressione salina. Infatti, la porzione meridionale dell'area di modellazione presenta valori piezometri sotto il livello del mare ed un chimismo dell'acqua di falda con un contenuto di cloruri compresi fra 200 e 5000 mg/l (Ghezzi et al, 1993 -Fig. 8).

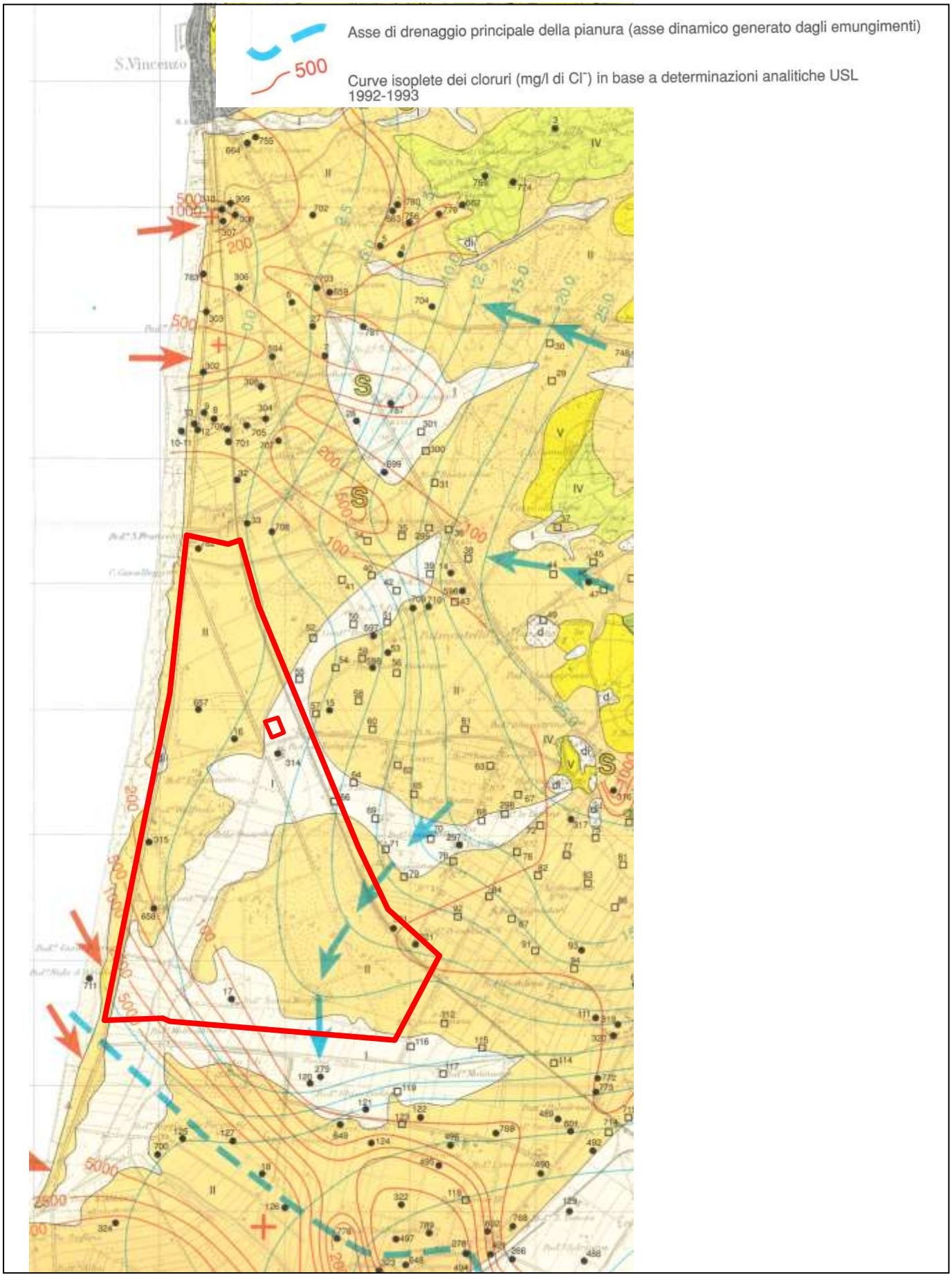


Fig. 8- Estratto della Carta Idrogeologica della Piana di Piombino (Ghezzi et al, 1993). Il limite rosso rappresenta il limite della variante in oggetto

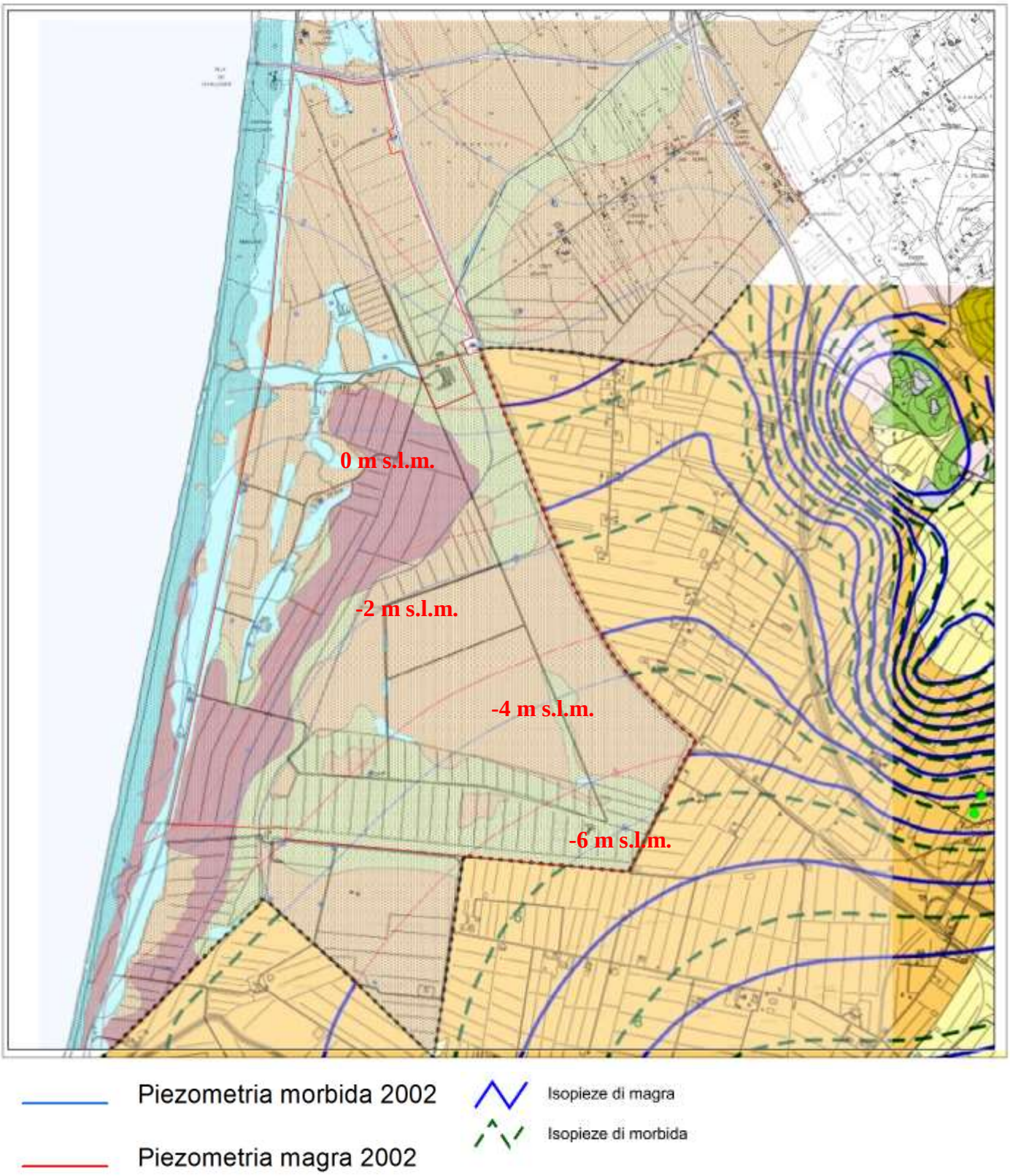


Fig. 9- Estratto delle Carte Idrogeologiche sovrapposte dei Piani Strutturali vigenti di San Vincenzo e di Campiglia Marittima. Il limite rosso rappresenta il limite della variante in oggetto

5 - DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Con l'obiettivo di valorizzare l'ambito territoriale di Rimigliano attraverso la riqualificazione agricolo-ambientale di tutta la tenuta e il suo sviluppo turistico, per la tenuta di Rimigliano sono stati ridefiniti gli strumenti di pianificazione urbanistica (Piano Strutturale 1998 e variante del 26.09.2008 D.C.C. 81) e di governo del territorio (variante R.U. 03.10.2011 D.C.C. n. 83 e D.C.C. n. 57 del 26.06.2012). Tuttavia, l'attuazione delle previsioni urbanistiche vigenti non risulta ad oggi più in linea con gli obiettivi sia della proprietà che dell'amministrazione comunale. È stato pertanto elaborato un nuovo master-plan teso a valorizzare e riqualificare l'ambito agricolo della Tenuta, riducendo le "volumetrie" previste dalla precedente variante ed elevando la qualità sia degli interventi sotto il profilo architettonico/paesaggistico/ambientale che dell'offerta turistica con ricadute socioeconomiche di lungo periodo. Nel dettaglio la Variante prevede la modifica degli ambiti insediativi dei nuclei poderali esistenti all'interno della tenuta e la realizzazione di una struttura a destinazione turistico ricettiva, con annessi parcheggi, attrezzature sportive ed aree a verde, nonché interventi di ristrutturazione e sostituzione edilizia sugli edifici esistenti distribuiti in corrispondenza dei poderi della tenuta (Fig.10)

Per l'approvvigionamento idrico del quadro progettuale, schematicamente descritto sopra, oltre a ritenere come appropriati e sicuramente da privilegiare sistemi di raccolta delle acque piovane, e sistemi di riciclo e riuso di acque di scarico e facendo presente che la Soc. "Tenuta di Rimigliano" risulta titolare di una concessione di derivazione dalla fossa Calda per circa 200.000 m^3/anno, sono state valutate anche ulteriori ipotesi e alternative progettuali, quali la realizzazione di nuovi pozzi.

Per la precisione è stato ipotizzato la terebrazione e messa in opera di tre nuovi pozzi nella porzione nord dei terreni di proprietà della committenza. I pozzi avranno una distribuzione spaziale lineare lungo una direzione arcuata circa ENE – OSO (Fig. 11). La scelta della direzionalità dell'allineamento dei pozzi si è basata sull'osservazione del quadro dell'assetto idrogeologico della porzione di piana costiera di interesse, riportato quest'ultimo, sia su gli strumenti urbanistici di San Vincenzo e Campiglia Marittima (dati del 2003) sia sullo studio di Ghezzi et al del 1993. Il quadro idrogeologico suddetto mostra un flusso idrogeologico in ingresso nella porzione di piana costiera di interesse da NNE. Posizionando i pozzi con la direzionalità summenzionata, ovvero trasversalmente al flusso è possibile garantire il massimo apporto di acqua durante le fasi di pompaggio senza portare ad un'interferenza di tipo "monte-valle" fra un pozzo e l'altro. Successivamente i pozzi di progetto sono stati opportunamente spaziati, lungo la direttrice di emungimento, attraverso l'osservazione dei risultati della modellazione

Ciascun pozzo raggiungerà una profondità di circa -60 m da p.c. attuale (valore da verificare a livello sito specifico attraverso indagini geognostiche adeguate) e sarà filtrato solamente nei primi due strati sabbioso/ghiaiosi dell'acquifero profondo multistrato (eventualmente potrebbero essere coinvolti anche ulteriori strati ghiaiosi profondi, non verrà assolutamente coinvolta la falda freatica superficiale che presenta condizioni idrogeologiche instabili nel corso dell'anno con picchi di scarsa produttività).

Al fine di simulare il massimo di stress idrogeologico associato alla messa in opera dei pozzi di progetto, questi ultimi sono stati impostati, nella modellazione di seguito descritta, con un pompaggio cadauno di 3 l/sec per una durata complessiva dello stress idrogeologico di 24 h giornaliere.

La simulazione, nelle condizioni di progetto, su richiesta esplicita di A.R.P.A.T. (parere del 06/04/2018 in risposta alla richiesta di contributo da parte del comune di San Vincenzo, nell'ambito dell'avvio del procedimento di Variante del R.U. "Tenuta di Rimigliano), è stata protratta per 10 anni complessivi andando a monitorare, in particolare, l'evoluzione idrogeologica e salina delle acque sotterranee, nelle condizioni di progetto, dopo il 1°, il 3° e il 10° anno di simulazione.

Fig. 10 – Carta dei perimetri oggetto di Variante al R.U. In viola limite dell'ambito della tenuta di Rimigliano, linea tratteggiata rossa - ambito insediativo dei nuclei poderali, linea arancione tratteggiata - aree pubbliche standard

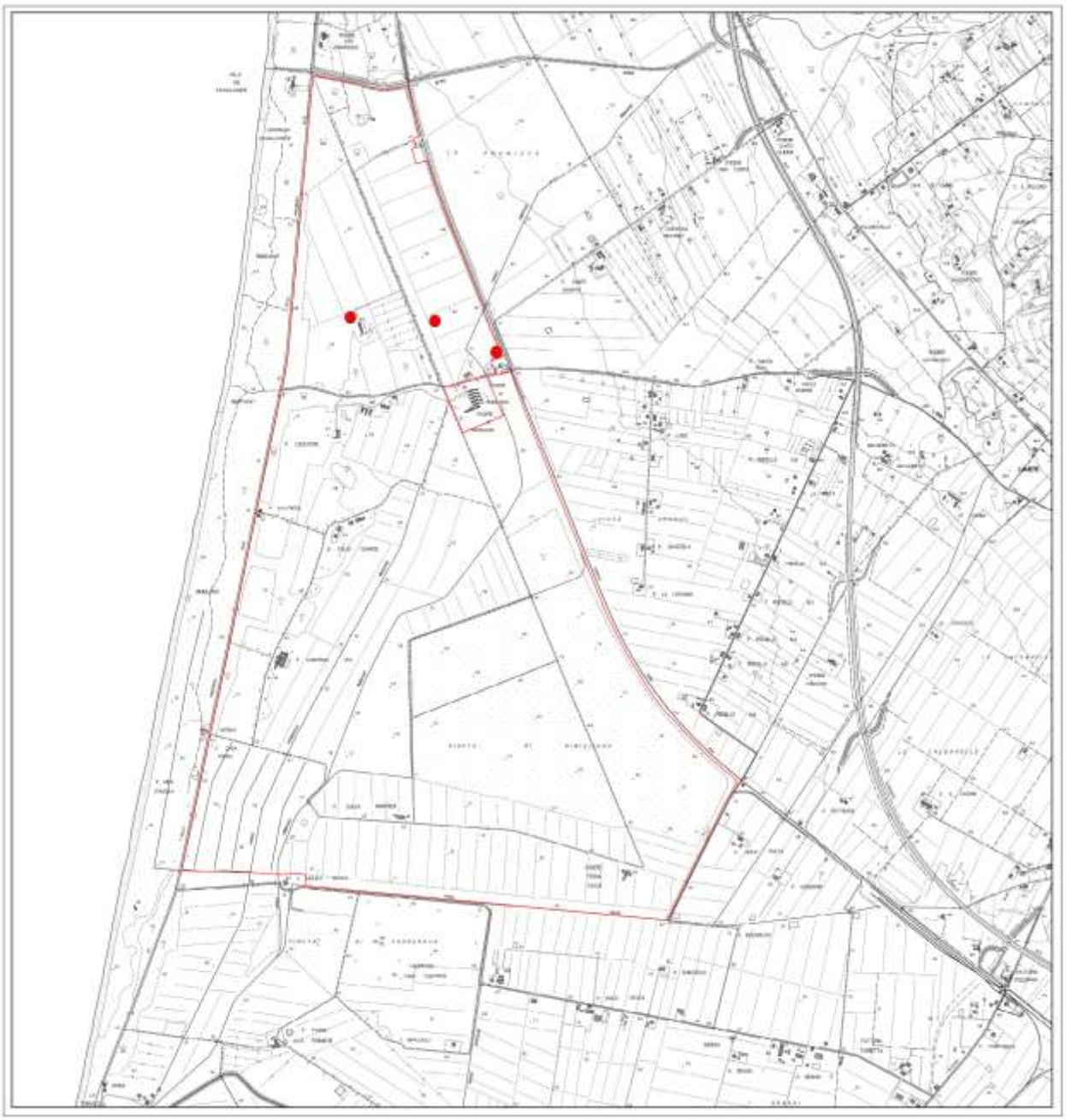


Fig. 11 Ubicazione dei pozzi di progetto, filtrati sia nel layer 3 che nel layer 5. Il limite rosso rappresenta il limite della variante in oggetto.

6 – MODELLO CONCETTUALE E MODELLO MATEMATICO

Per la costruzione del modello idrogeologico e chimico, in fase preliminare, si è reso necessario, a seguito della definizione del dominio tridimensionale di studio (scheletro del modello), la ricostruzione della struttura geologica del volume di terreno in studio. Tale struttura ha rappresentato il punto di partenza del modello all'interno del quale sono stati poi inseriti i parametri idrogeologici e chimici e le condizioni al contorno.

6.1 – Dominio tridimensionale del modello concettuale

L'area in studio, oggetto del presente elaborato, copre una superficie di circa 2.574 ha (area rettangolare di dimensioni circa 4,9 km x 5,2 km) ed è incentrata sul perimetro della Variante in oggetto (vedi § 5 e Fig. 12). Lo spazio modellato è stato discretizzato con una griglia a maglie rettangolari di dimensioni 50 m x 50 m successivamente raffinata fino a 5 m x 5 m in corrispondenza dell'area di interesse per la messa in opera dei pozzi di progetto.

A livello di piano campagna, il comparto in studio presenta quote altimetriche variabili da circa 110 m s.l.m. a 0 m s.l.m. con altimetria discendente da NE (lato monte) ad O e SO (lato mare). Le acclività, naturalmente, sono scarse, essendo il contesto in studio facente parte di un dominio di piana costiera. La ricostruzione dell'andamento morfologico del piano campagna del comparto in studio è stata realizzata utilizzando come dati di base la nuvola dei punti associate al rilievo LIDAR (volo del 2008). I suddetti punti sono stati successivamente interpolati tramite metodo "kriging" (figg. 12 e 13).

In termini tridimensionali, prendendo in considerazioni gli studi effettuati sulla piana riportati in letteratura e sulla base delle stratigrafie associate ai pozzi censiti nell'archivio ISPRA (http://sgi.isprambiente.it/GMV2/index.html, è stato scelto, ai fini della modellazione oggetto del presente studio, di suddividere il dominio tridimensionale in studio in sei strati: acquifero superficiale freatico (layer 1), con spessore medio di circa 20 m; acquitardo (layer 2) dello spessore medio di circa 10 m, primo strato dell'acquifero multistrato profondo (layer 3) dello spessore medio di circa 10 m, primo acquitardo (layer 4) separatore dell'acquifero multistrato profondo, dello spessore medio di circa 20 m, secondo strato produttivo dell'acquifero profondo dello spessore medio di circa 15 m ed infine uno strato impermeabile di chiusura del modello (Fig. 14).

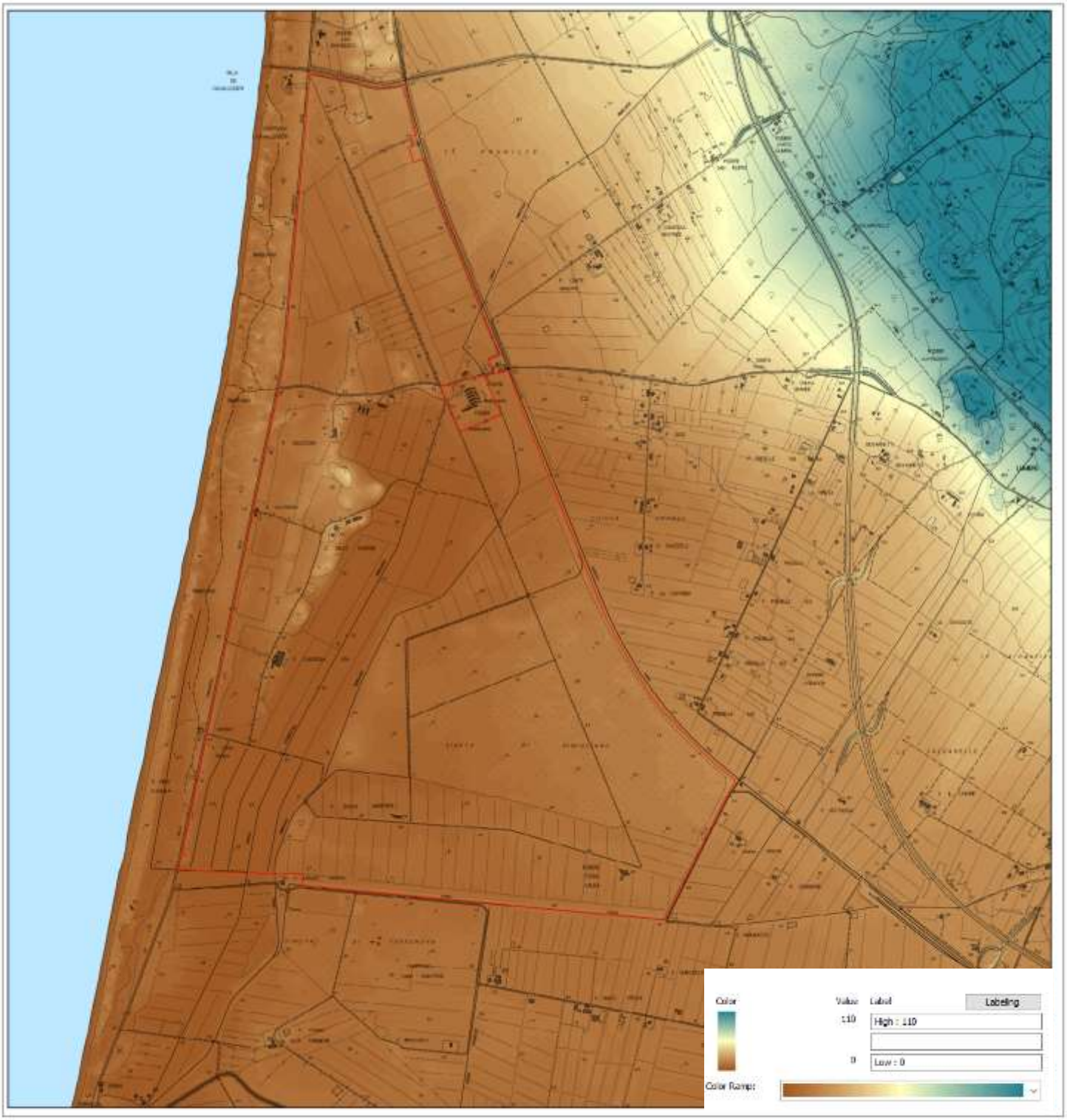


Fig. 12 Modello bidimensionale DEM del P.C. ricostruito su base LIDAR. Il limite rosso rappresenta il limite della variante in oggetto. I valori a destra sono quote in metri s.l.m.

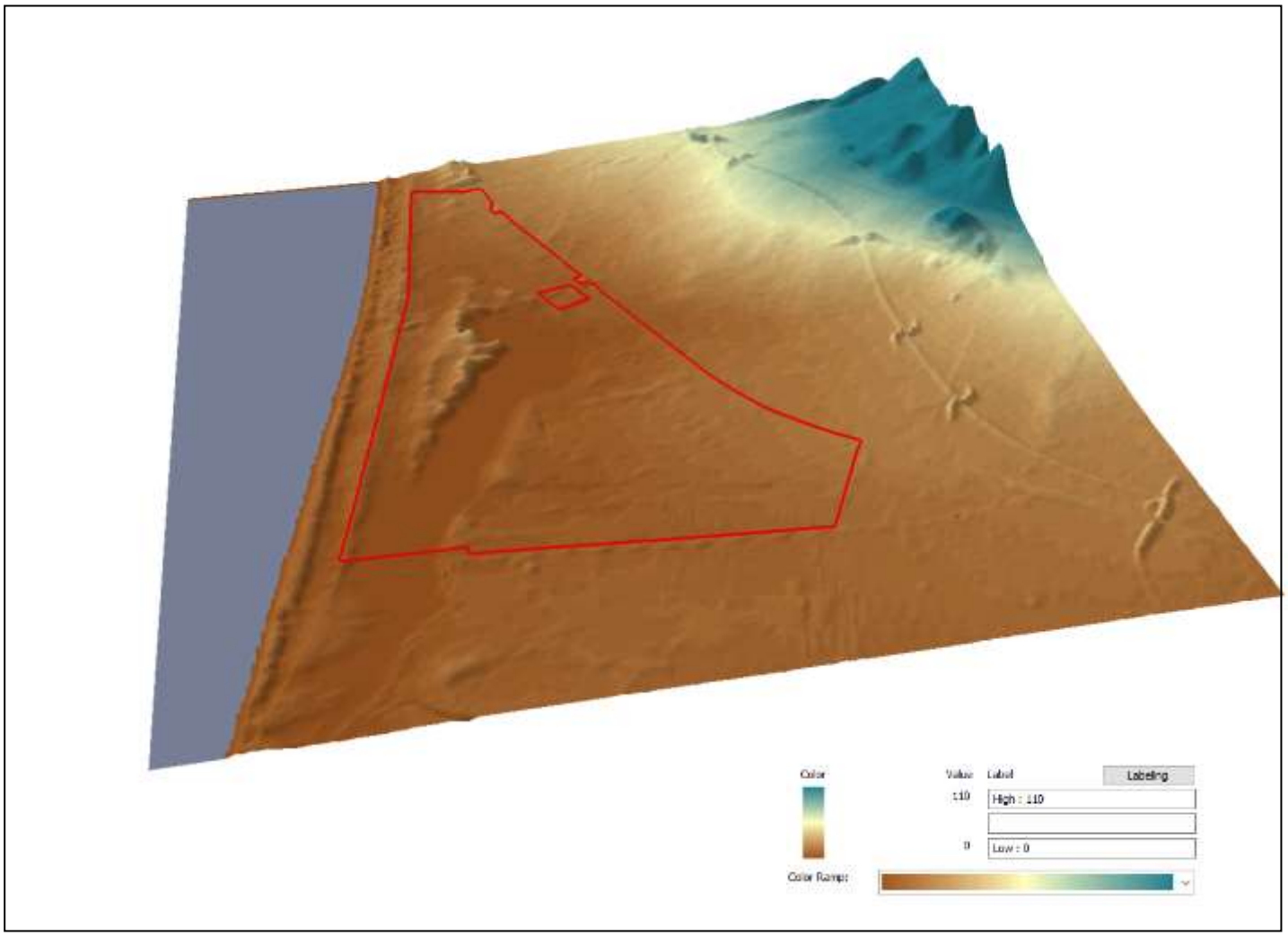


Fig. 13 Modello tridimensionale DEM del P.C. ricostruito su base LIDAR. Il limite rosso rappresenta il limite della variante in oggetto. I valori a destra sono quote in metri s.l.m.

Il modello concettuale e conseguentemente il modello matematico è stato costruito su i suddetti 6 layer anche se, come descritto nel § 3 l'acquifero multistrato profondo è caratterizzato da almeno 5 strati ghiaiosi produttivi (Ghezzi et al, 1993). La scelta è dovuta alle conoscenze a nostra disposizione che al momento si spingono in termini di spessore e/o profondità dei contatti stratigrafici ai soli primi due layer produttivi dell'acquifero multistrato profondo, oltre naturalmente all'acquifero freatico superficiale.

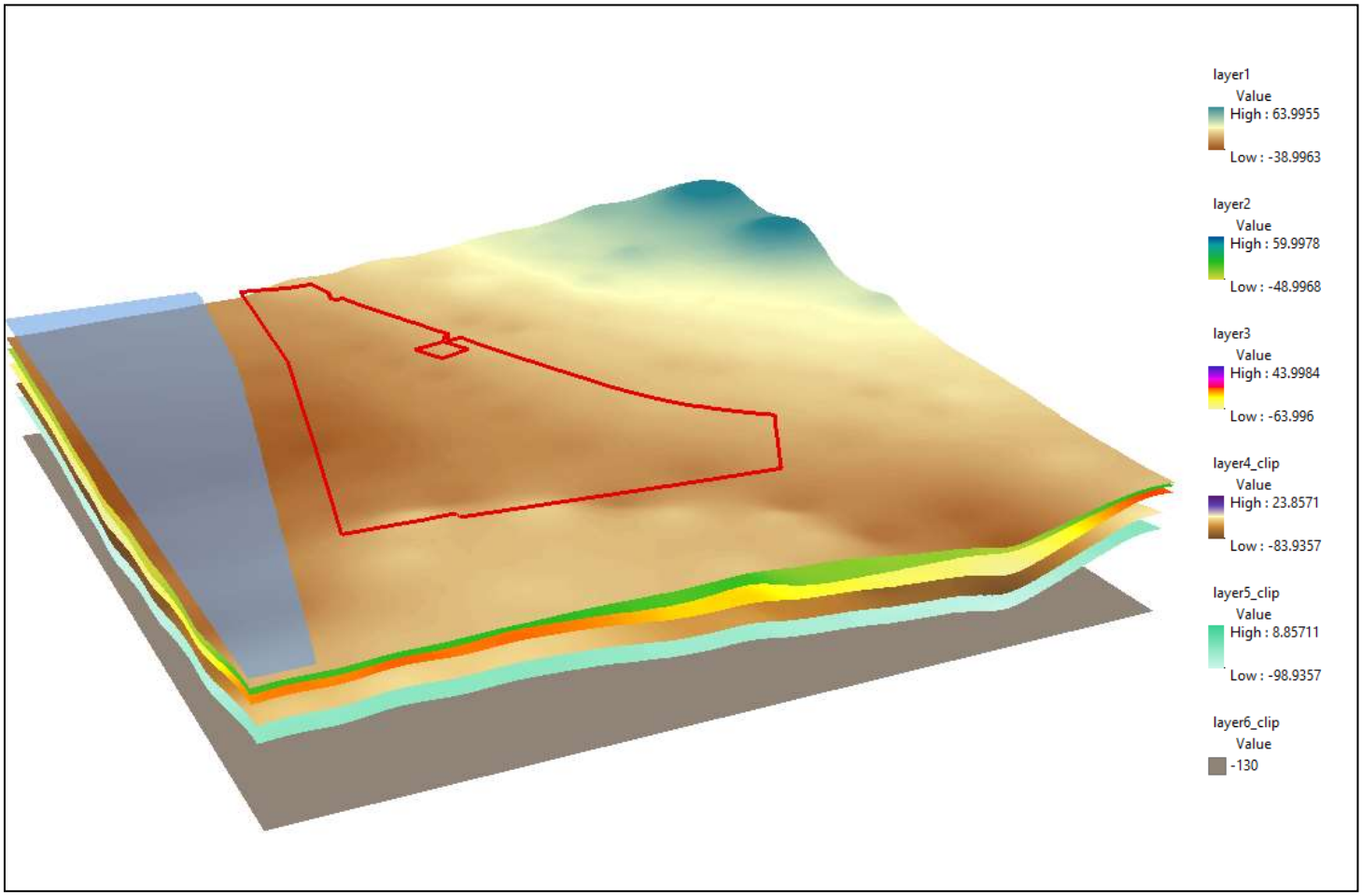


Fig. 14 Modello tridimensionale DEM del modello concettuale e del modello matematico – base layers 1,2, 3, 4, 5 e 6. Il limite rosso rappresenta il limite della variante in oggetto. I valori a destra sono quote in metri s.l.m.

6.2 – Parametrizzazione del modello concettuale

Il modello concettuale, definito sotto l'aspetto geolitologico e idrogeologico nei capitoli precedenti, rappresenta la base in cui inserire i parametri idrogeologici e chimici necessari alle simulazioni in oggetto. La determinazione dei parametri idrogeologici e chimici che caratterizzano i layer definiti nei capitoli precedenti, da un punto di vista quantitativo, e non solo qualitativo, ha permesso di passare da un semplice modello concettuale ad una prima bozza di modello matematico.

6.2.1 – PARAMETRI IDROGEOLOGICI

Per l'assegnazione dei parametri idrogeologici, ed in particolare dei coefficienti di permeabilità (k) dei layer produttivi (acquifero superficiale – layer 1 e acquifero multistrato profondo – layer 3 e 5) sono stati presi a riferimento i dati raccolti nello studio di Ghezzi et al, 1993 riportati nelle tabb 1 e 2 del § 4 del presente elaborato. Per quanto riguarda invece i layer che svolgono la funzione di acquitardo (layer 2 e 4) è stato preso a riferimento lo studio di Custodio et al., 2005. Al layer 6 è stato assegnato un valore di input volutamente molto basso al fine di chiudere il modello e non avere dispersioni di acqua verso il basso che porterebbero ad uno squilibrio del bilancio idrogeologico finale. Qui di seguito si riportano i valori di coefficiente di permeabilità di input suddivisi per layer e per direzionalità del coefficiente di permeabilità (orizzontale $k_{x\ e\ y}$ e verticale k_z - Tab. 3)

Layer1	Kx (m/sec)	Ky(m/sec)	Kz (m/sec)
1	7.8E-06	7.8E-06	7.8E-06
2	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08
3	1.8E-04	1.8E-04	1.8E-04
4	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08
5	1.8E-04	1.8E-04	1.8E-04
6	1.0E-10	1.0E-10	1.0E-10

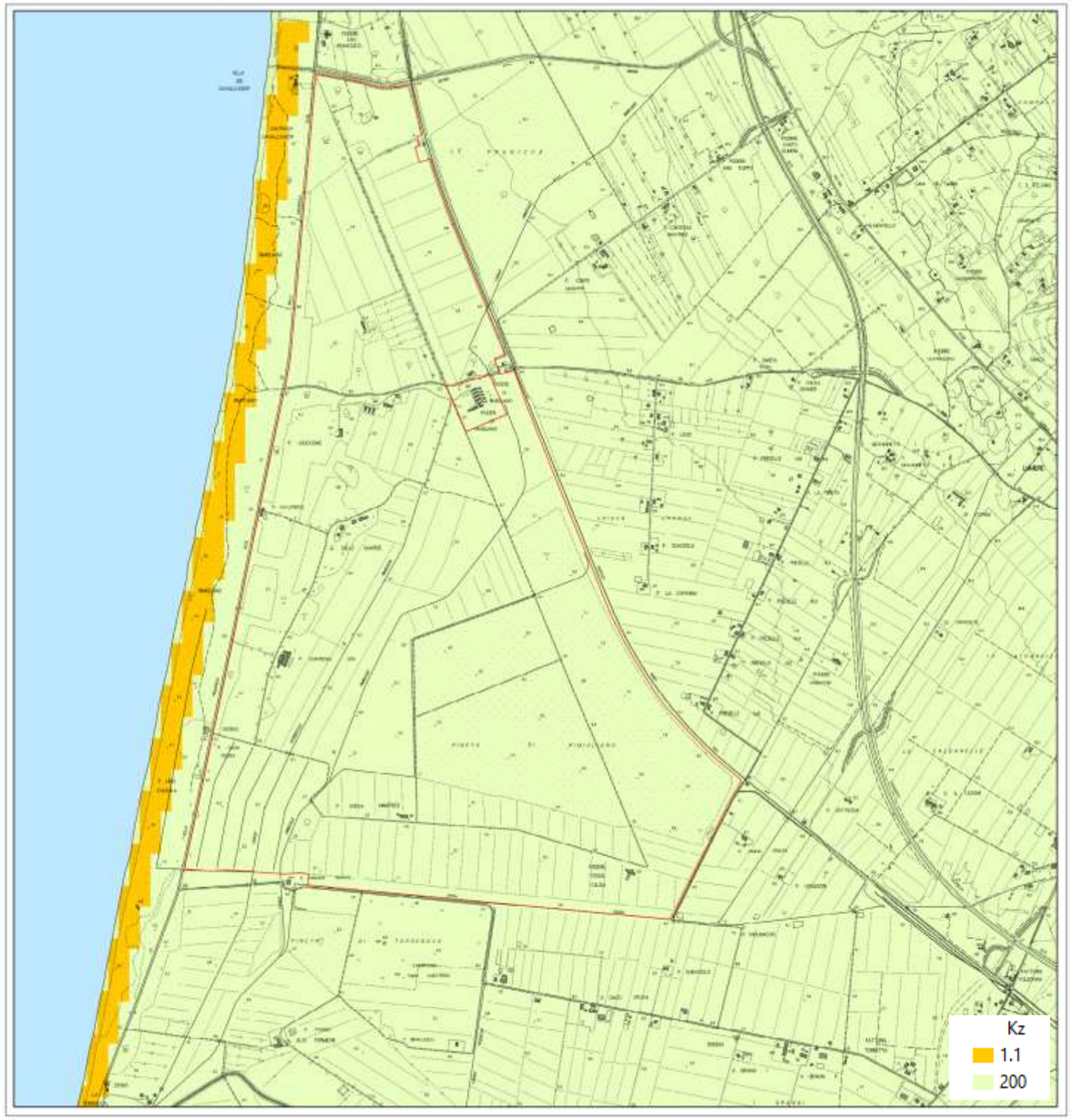
Tab. 3 – Tabella dei coefficienti di permeabilità di input

A seguito del processo di calibrazione del modello matematico i valori hanno subito una leggera modifica come riportato nella (tab.4).

Layer1	Kx (m/sec)	Ky(m/sec)	Kz (m/sec)
1	7.9E-06	7.9E-06	7.9E-06
2	4.6E-08	4.6E-08	4.6E-08
3	3.5E-04	3.5E-04	2.3E-03
4	4.6E-08	4.6E-08	4.6E-08
5	3.5E-04	3.5E-04	2.3E-03
6	1.0E-10	1.0E-10	1.0E-10

Tab. 4 – Tabella dei coefficienti di permeabilità di input

In aggiunta alle permeabilità descritte sopra è stata inserita, su tutti i layer, una striscia lungo la costa, a bassa permeabilità al fine di simulare la barriera idrogeologica descritta nel § 4 del presente elaborato e che genera il flusso di acqua verso la Val di Cornia, flusso a sua volta rinforzato dallo stress idrogeologico presente nel contesto in oggetto. A tale striscia è stato assegnato un valore di coefficiente di permeabilità pari a 1,3 x 10^{-5} m/sec (pari a circa 1/10 della permeabilità orizzontale dei layer 3 e 5).



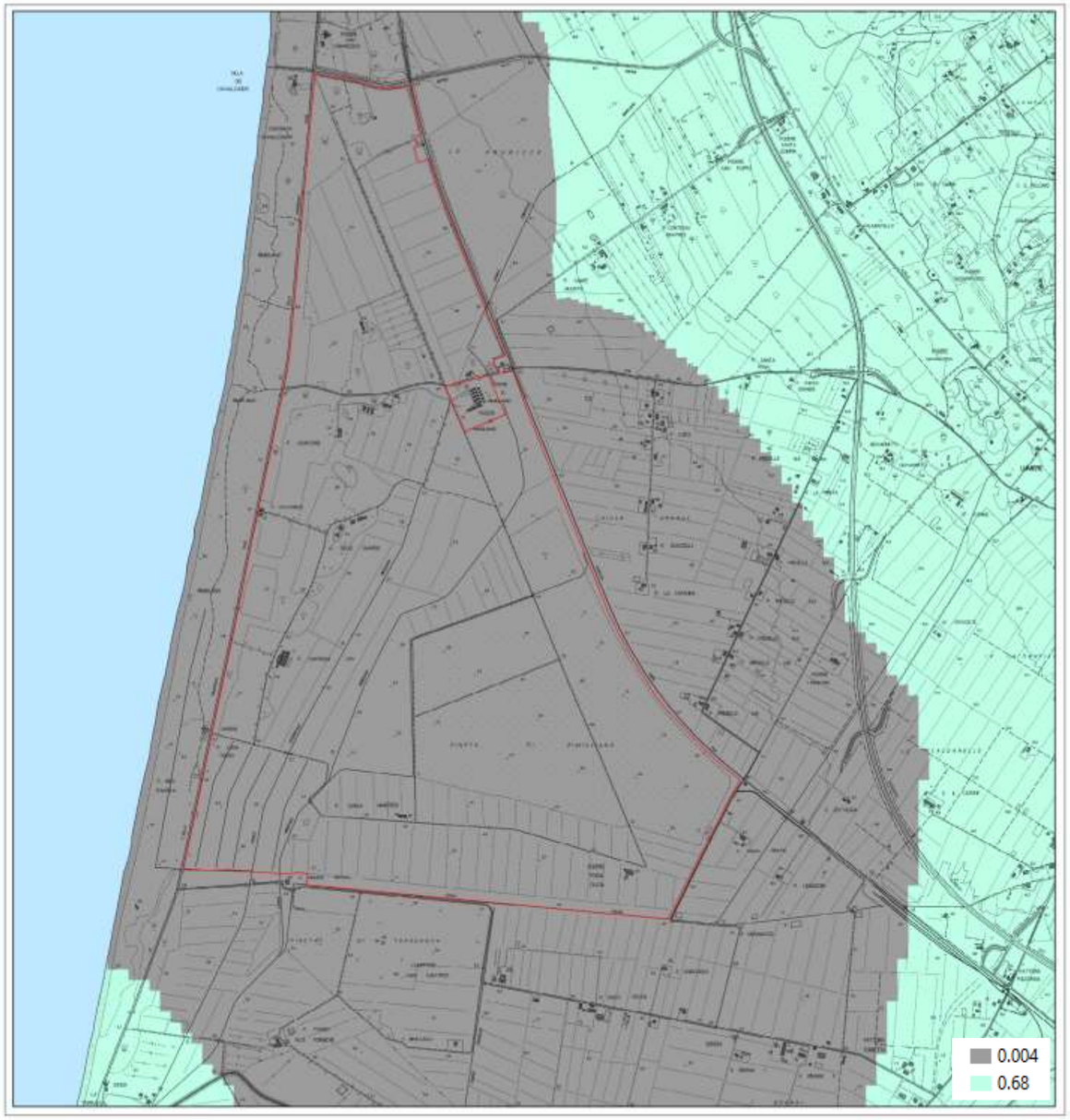


Fig. 15 A sinistra, mappa della distribuzione dei coefficienti di permeabilità dei layer 3 e 5. A destra mappa di distribuzione dei coefficienti di permeabilità dei layer 2 e 4. Nel layer 6 i coefficienti riportati nella tab. 4 sono distribuiti uniformemente su tutta l'area di modellazione. Nel layer 1 la distribuzione è uguale a quella dei layer 3 e 5 con la variante di una permeabilità di base (ad eccezione della barriera costiera) più bassa e pari a quella indicata nella tab.4. Il limite rosso rappresenta il limite della variante in oggetto. I valori riportati nelle figure sono espressi in m/gg.

6.2.2 — PARAMETRI CHIMICI

I parametri chimici necessari per la definizione di un modello di simulazione dell'ingressione salina, come quello in oggetto sono i seguenti:

- Concentrazione di cloruri dell'acqua di mare e dell'acqua di falda;
- Densità del mezzo poroso (ρ_b);
- Coefficiente di distribuzione

Il codice di calcolo utilizzato per la simulazione dell'ingressione salina è l'MT3DMSsviluppato dall'U.S.G.S. (United States Geological Survey). L'equazione che sta alla base del codice di calcolo è la seguente (Tab. 5):

$$\left(1+\frac{\rho_b K_d}{\theta}\right)\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\theta D_{ij}\frac{\partial C^k}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial}{\partial x_i}(\theta v_i C^k)+q_s C_s^k$$

Per la definizione del contenuto di cloruri all'interno dell'acqua di mare e dell'acqua di falda è stata presa a riferimento la carta idrogeologica della Piana di Piombino redatta da Ghezzi nel 1993 (Fig. 8). In particolare, al mare è stato assegnato un valore iniziale di concentrazione dei cloruri pari a 32.000 mg/l, mentre al resto della piana costiera è stato assegnato un valore iniziale di 100 mg/l. La ricostruzione della distribuzione delle concentrazioni dei cloruri fino alle condizioni illustrate nel lavoro di Ghezzi et al 1993 (Fig. 8) è stata eseguita attraverso la simulazione del modello in condizioni transienti tramite una "long run" di 20 anni (1973 – 1993) senza l'attivazione dei pozzi di progetto. La Considerando che nel periodo 1993 – 2002 (date di riferimento per l'assetto idrogeologico della porzione di piana in modellazione) l'assetto idrogeologico non ha mostrato modifiche sostanziali, soprattutto in termini di geometria dei flussi (pattern delle isopiezometriche del 2002 - Fig. 9, è confrontabile con l'assetto del 1993 - Fig. 8), la scelta della durata della "long run" (20 anni) si è basata sull'ipotesi che lo stato di stress idrogeologico e di ingressione salina registrato nella cartografia idrogeologica del 1993 (Fig. 8 - Ghezzi et al, 1993) si sia sviluppato nel periodo ('70 - '90).

Per quanto riguarda i valori di densità e di coefficiente di distribuzione sono stati utilizzati i valori citati in uno studio della Geo-Logo realizzato a supporto del progetto di impianto goetermico di tipo "*open loop"* per un'attività commerciale inserito in un contesto geolitologico paragonabile al contesto della Piana di San Vincenzo (Tab. 6).

Symbol	Variable	Unit
C	Thermal capacity per unit volume	$J/(m^3K)$
C^*	Dissolved mass concentration	kg/m^3
C_s	Concentration of the sources or sinks	kg/m^3
c_s , c_w	Specific heat capacity of the solid or water	J/kg/K
D^*	Molecular diffusion coefficient/Thermal diffusion coefficient	m^2/s
D_{ij}	Diffusion-dispersion tensor	m^2/s
Δt_i	Time step	S
θ	Volumetric water content	-
h	Convective coefficient	$W/(m^2K)$
K_d	Distribution coefficient	m^3/kg
k_{T0}	Effective thermal conductivity of the porous medium	W/(m×K)
k_{Tp} ,k_{Ts} , k_{Tw}	Pipe or solid or water thermal conductivity	W/(m×K)
I	Identity tensor	-
L	Side of the pipe represented by square section	M
L_c	Characteristic length	M
m_i	Mass flow rate at time i	Kg/h
π	Energy source/sink rate per unit volume	W/m^3
Q_i	Thermal power at time i	W
q_s	Volumetric flow rate per unit volume of aquifer representing sources and sinks	$m^3/s/m^3$
R	Thermal resistance per unit length	m×K/W
R_n	Retardation factor	-
r	Radius	M
r_b	Porous medium bulk density	kg/m^3
r_s , r_w	Density of the solid material or water	kg/m^3
s	Thickness	M
T, T_s	Temperature, temperature of the source	K
$T_{fin,i}$, $T_{fout,i}$	Heat carrier fluid inlet and outlet temperatures at time i	K
t	Time	S
v_i	Seepage velocity	m/s

Tab. 5 - Lista dei simboli e dei parametri utilizzati nella formula di simulazione dell'ingressione salina in MT3DMS (L. Alberti et al. 2011)

Materiale	Densità (Kg/m³)	Coefficiente di distribuzione (m³/Kg)	Dispersività longitudinale (m)
Argilla	2000	0,0002	5
Limo-sabbioso	1400	0,0002	5
Sabbia ghiaiosa	1600	0,0002	5

Tab. 6 – Tabella dei parametri fisici utilizzati per lo studio della Geo.Logo del 2012

6.3 – Condizioni ai limiti del modello

Una volta ricostruita la struttura del modello e averne definito le proprietà idrogeologiche e chimiche (contenuto di cloruri), siamo passati a definire le condizioni ai limiti, cioè ad assegnare ai limiti del modello determinati flussi in entrata e/o in uscita di acqua.

Per quanto riguarda le condizioni ai limiti del modello le possibili condizioni sono le seguenti:

- **Condizioni di carico idraulico imposto (di primo tipo o di Dirichlet)**
- **Condizioni ai limiti di flusso imposto (di secondo tipo o di Neumann)**
- **Condizioni ai limiti di transfer (di terzo tipo o di Cauchy)**
- **Condizioni ai limiti di portata (di quarto tipo)**

6.3.1 – CONDIZIONI DI CARICO IDRAULICO IMPOSTO (DI PRIMO TIPO O DI DIRICHLET)

La condizione di 1° tipo permette all'utente di assegnare a determinate aree del modello valori noti di carico idraulico.

Il carico è stato definito solo per i layer potenzialmente produttivi, ovvero i layer 1, 3 e 5 in quanto essi rappresentano gli strati di riferimento per la modellazione e gli unici acquiferi presenti nel modello.

Per definire il suddetto carico idraulico sono stati presi a riferimento gli studi eseguiti dal geologo Dott. Sileoni per il P.S. di San Vincenzo (Maggio 2010) e dai Dott. Geol. Frullini, Spinacci e Sinatti per il P.S. del comune di Campiglia Marittima (Febbraio 2007) entrambi basati a sua volta su un monitoraggio piezometrico della falda di San Vincenzo eseguito nell'anno 2002. (Fig. 9).

In particolare, al fine di ricostruire sia i carichi idraulici presenti nell'area di modellazione sia la geometria di flusso così come riportato nelle cartografie idrogeologiche realizzate a supporto dei Piani Strutturali di San Vincenzo e Campiglia Marittima, a sua volta descriventi una condizione idrogeologica del 2002, sono stati inseriti le seguenti condizioni ai limiti per i layer 1, 3 e 5.

A monte, ovvero nella porzione Nord del modello è stato inserito un carico idraulico pari a 9 m s.l.m. A Sud Est un carico idraulico pari a -14 m s.l.m. ad Ovest il carico idraulico rappresentante il mare ovvero 0 m s.l.m. (Fig. 16).

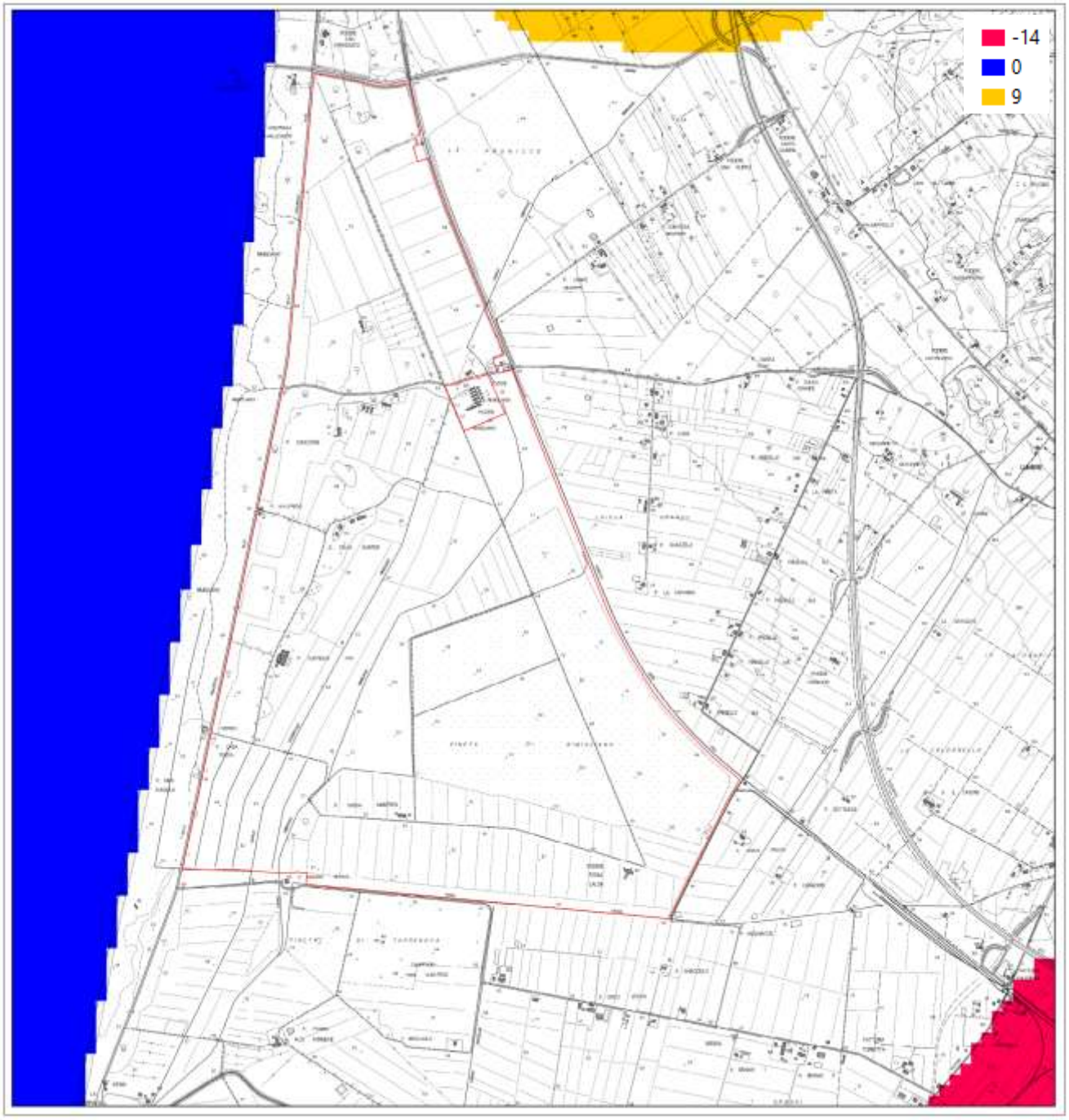


Fig. 16 Distribuzione dei carichi idraulici al contorno del modello. Il limite rosso rappresenta il limite della variante in oggetto Le quote espresse sono in m s.l.m.

6.3.2 - CONDIZIONI AI LIMITI DI FLUSSO IMPOSTO

Questa condizione di limite permette di definire gli scambi idrici fra il modello e l'esterno in termini di flusso.

Questo tipo di condizione ai limiti non è stata definita nel modello concettuale, e conseguentemente nel modello matematico, in quanto è stato preferito lasciarla calcolare dal modello matematico.

6.3.3 - CONDIZIONI AI LIMITI DI TRANSFER

Questo tipo di limite permette di mettere in evidenza domini idrici (laghi, fiumi, ...) che risultano essere parzialmente sospesi rispetto all'acquifero in analisi. Questo tipo di limite non è stato utilizzato in questa fase di modellazione.

6.3.4 - CONDIZIONI AI LIMITI DI PORTATA

Questo tipo di limite consente di mettere in evidenza punti di immissione o di estrazione d'acqua.

L'area oggetto di modellazione è caratterizzata da un uso della falda idrica, soprattutto a fini agricoli. I pozzi presenti nel dominio di studio sono stati estrapolati, in termini di ubicazione geografica, dal database del Consorzio LAMMA (B.D.S.R.I. – Banca Dati Sottosuolo e Risorsa Idrica del 2012).

Nel complesso, all’interno del dominio di studio, sono presenti in totale n.190 pozzi. Dal valore completo, riportato nel geodatabase suddetto, sono stati esclusi i pozzi all’interno del perimetro oggetto di Variante (terreni di proprietà della Tenuta di Rimigliano) in quanto la proprietà ha dichiarato che i pozzi di sua competenza non sono al momento in uso. (Fig. 17).

Le quantità in emungimento complessive per l’area della Piana di San Vincenzo sono pari a circa 2,2 milioni di m^3/anno (De Filippis et al. 2017). Considerato che il suddetto valore prende a riferimento un’area molto più vasta di quella oggetto di modellazione (intera piana di San Vincenzo) e cercando di simulare una condizione di stress idrogeologico, il più alto possibile (condizione di massima cautela) è stato impostato un valore di pompaggio complessivo dai pozzi esistenti pari a circa 1,1 milioni di m^3/anno ovvero circa la metà del valore dell’intera piana.

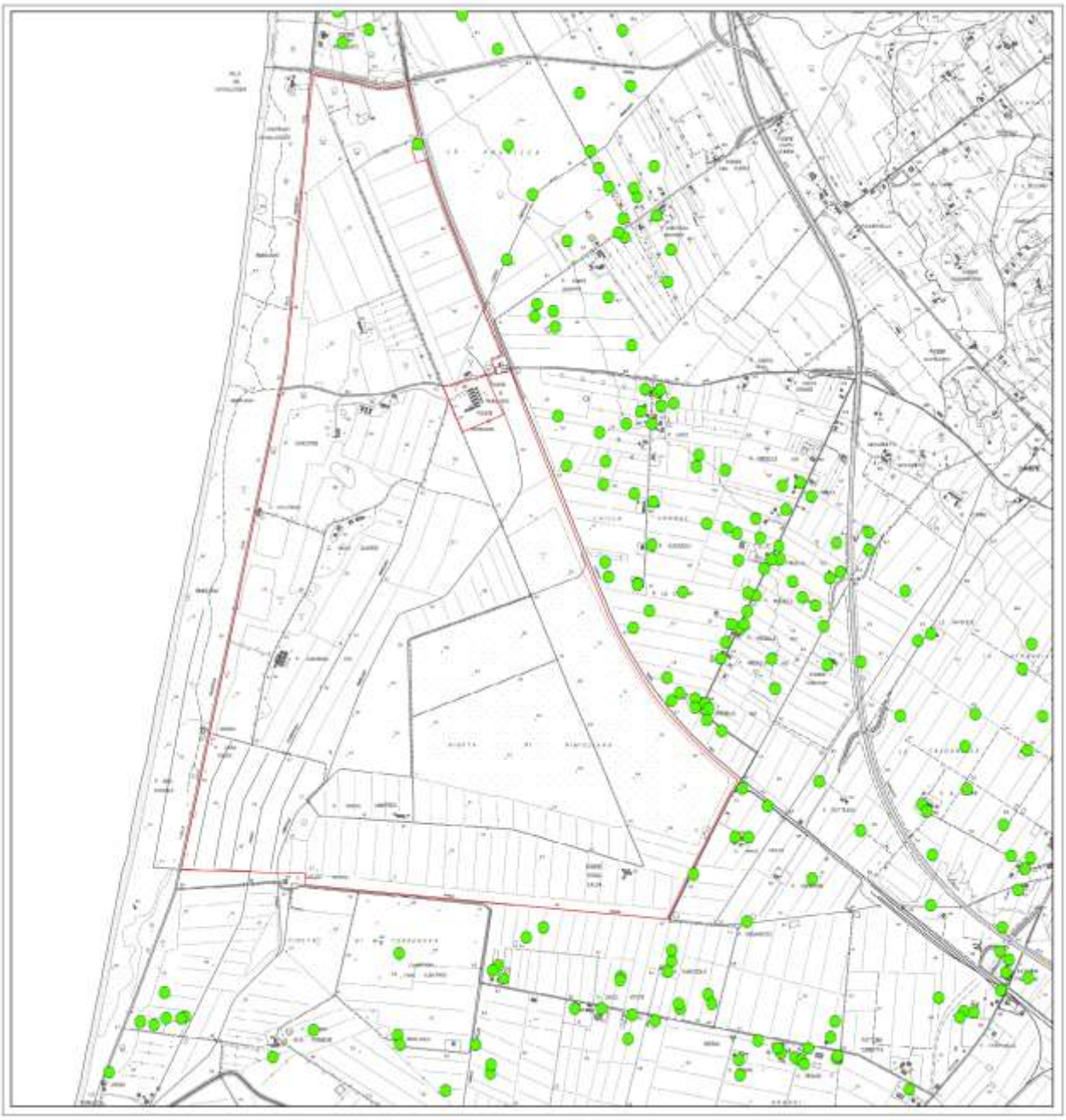


Fig. 17- Distribuzione dei pozzi teoricamente in uso nell'area di modellazione (fonte: geodatabase del Consorzio Lamma 2012). Il limite rosso rappresenta il limite della variante in oggetto.

Al suddetto contesto di stress idrogeologico, che rappresenta la "condizione attuale" (2012), si vanno ad aggiungere le portate emunte degli eventuali pozzi di progetto, che come riportato nel § 5 del presente elaborato, saranno in totale 3 (Fig. 18) ed avranno un prelievo giornaliero cadauno di circa 259,2 m^3 corrispondente a circa 3 l/s per un uso h24.

La scelta di simulare un emungimento h24 è una scelta che va nella direzione di simulare la peggiore condizione di stress idrogeologico di progetto.

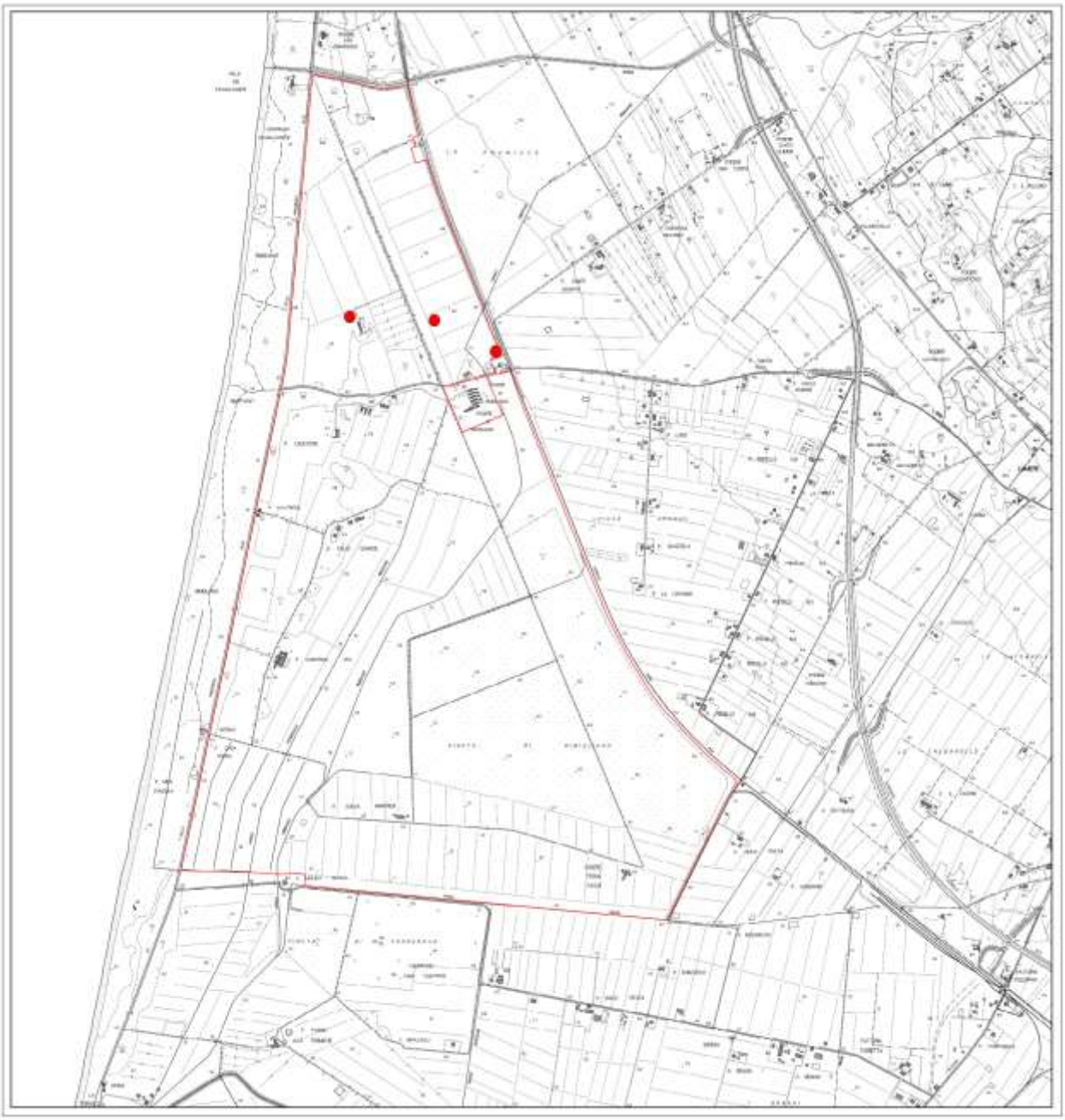


Fig. 18- Ubicazione dei pozzi di progetto, filtrati sia nel layer 3 che nel layer 5. Il limite rosso rappresenta il limite della variante in oggetto

6.4 – Fattore tempo – modello in condizioni transienti

La modellazione, oggetto del presente elaborato, si pone l'obiettivo di definire la risposta idrogeologica e chimica (ingressione salina) del sistema esistente a seguito dell'eventuale messa in opera, nel dominio in studio, dei pozzi di progetto. Al fine di avere una simulazione, la più realistica possibile, al netto delle informazioni attualmente in nostro possesso, e su richiesta dell'agenzia A.R.P.A.T., come da contributo del 06/04/2018 al procedimento di Variante al R.U. "Tenuta di Rimigliano" (risposta alla richiesta di parere da parte del Comune di San Vincenzo nell'ambito del procedimento della suddetta Variante – prot. 7210 del 10/03/2018), sono state eseguite run in condizioni transienti, ovvero con determinate condizioni al contorno variabili in funzione del tempo.

In particolare, l'Agenzia A.R.P.A.T. ha richiesto quanto segue:

"in particolare, il modello idrogeologico digitale dell'area che il Proponente intende sviluppare dovrà quantificare chiaramente i prelievi attuali e quelli di progetto ed essere condotto valutando sia lo scenario a breve termine proposto (3 anni) sia uno a più lungo periodo (almeno 10 anni) al fine di valutare e minimizzare le alterazioni indotte".

Per far questo sono stati inseriti in totale 120 periodi di stress con suddivisione giornaliera degli stessi (Tab. 7).

Stress Period	Time Steps	
1	31	Gennaio
2	28	Febbraio
3	31	Marzo
4	30	Aprile
5	31	Maggio
6	30	Giugno
7	31	Luglio
8	31	Agosto
9	30	Settembre
10	31	Ottobre
11	30	Novembre
12	31	Dicembre

Tab. 7 – Tabella dei periodi di stress per il primo anno di simulazione in condizioni di progetto.

I suddetti periodo di stress si vanno ad aggiungere, come suddetto, ad una simulazione della durata totale di 20 anni eseguita al fine di ricostruire sia la distribuzione dei carichi idraulici, come da assetto del 2002 (paragonabile a quella definita nelle tavole di Ghezzi et al,1993 Fig. 9) sia la distribuzione delle concentrazioni dei cloruri, come da assetto del 1993 (Fig. 8).

6.5 – Calibrazione e validazione del modello

La fase di taratura del modello si pone come obiettivo quello di minimizzare lo scarto esistente fra le risposte date dal sistema reale e quelle date dal modello creato a seguito di una medesima sollecitazione. La taratura è composta di due fasi (Fig. 19):

- **Calibrazione**
- **Validazione**

La calibrazione consiste nel modulare le variabili caratterizzanti il sistema fino a che il modello non fornisce risultati il più possibili attendibili con quelli reali.

La validazione rappresenta, invece, la capacità del modello di eseguire delle previsioni a lungo termine ovvero di riprodurre una serie storica nota.

La fase di calibrazione termina in modo arbitrario, ovvero quanto lo scarto fra risposta del modello e risposta del sistema reale ad una medesima sollecitazione rimane sotto una soglia ritenuta accettabile.

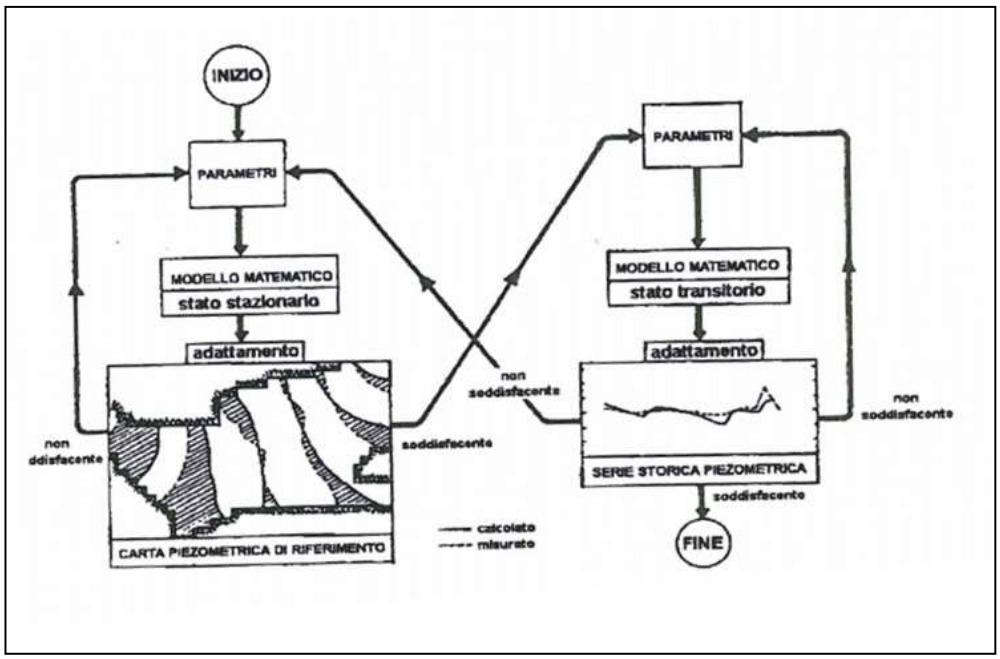


Fig. 19 - Schematizzazione della fase di calibrazione del modello (M. Salleolini, 2000)

Nello specifico del modello in oggetto, la calibrazione si è sviluppata in due fasi. Una prima fase in cui si sono calibrate le falde in oggetto (falda superficiale freatica e falda profonda multistrato in termini di carico idraulico (dati riferiti alle carte idrogeologiche realizzate a supporto dei P.S. vigenti dei comuni di San Vincenzo e Campiglia Marittima e ricostruenti una condizione idrogeologica del 2002 - Fig. 9) attraverso la modulazione dei coefficienti di permeabilità (k) ed una seconda fase in cui si sono calibrate le concentrazioni di cloruri nelle acque della piana rispetto alla condizione illustrata nello studio di Ghezzi et al, 1993 (Fig. 8) sempre attraverso la modulazione dei coefficienti di permeabilità (k). Come specificato nei capitoli precedenti, i risultati della modellazione presi a riferimento per la calibrazione, sia idrogeologica che chimica (ingressione salina), sono quelli prodotti al termina della "run" in condizioni transienti della durata complessiva di 20 anni. Considerando che nel periodo 1993 – 2002 (date di riferimento per l'assetto idrogeologico della porzione di piana in modellazione) l'assetto idrogeologico non ha mostrato modifiche sostanziali, soprattutto in termini di geometria dei flussi (pattern delle isopiezometriche del 2002 - Fig. 9, è confrontabile con l'assetto del 1993 - Fig. 8), la scelta della durata della "long run" (20 anni) si è basata sull'ipotesi che lo stato di stress idrogeologico e di ingressione salina registrato nella cartografia idrogeologica del 1993 (Fig. 8 - Ghezzi et al, 1993) si sia sviluppato nel periodo ('70 - '90).

Per eseguire la verifica di controllo sono stati inseriti nella fase di "post-run" dei target di controllo ricalcanti le isolinee delle concentrazioni e delle piezometriche citate sopra.

La calibrazione idrogeologica ha prodotto, per la falda profonda multistrato un assetto delle curve isopiezometriche, sia in termini qualitativi (morfologia delle curve) che quantitativi (quote s.l.m.) molto simile a quella riportata nelle cartografie idrogeologiche realizzate a supporto dei vigenti P.S. dei comuni di San Vincenzo e Campiglia Marittima (Fig. 20). Il grado di raffinatezza del processo di calibrazione è riportato nella tabella e nei grafici di Fig. 22 e Fig. 23.

Per quanto riguarda la falda superficiale freatica, essa al termine della run di calibrazione ha mostrato una prevalente condizione "dry". Ciò è compatibile con quanto riportato nello studio di Ghezzi et al, 1993 dove si riporta quanto segue: "*…lo spessore netto dell'acquifero freatico … è asciutto per diversi mesi all'anno*…" (Fig. 21*)*

La non affidabilità, in termini di produttività, dell'acquifero freatico, confermata anche dalla modellazione, è stata la motivazione principale che ha portato a scegliere di simulare una condizione di progetto in filtraggio solo dai layer 3 e 5 facenti parte dell'acquifero profondo multistrato.

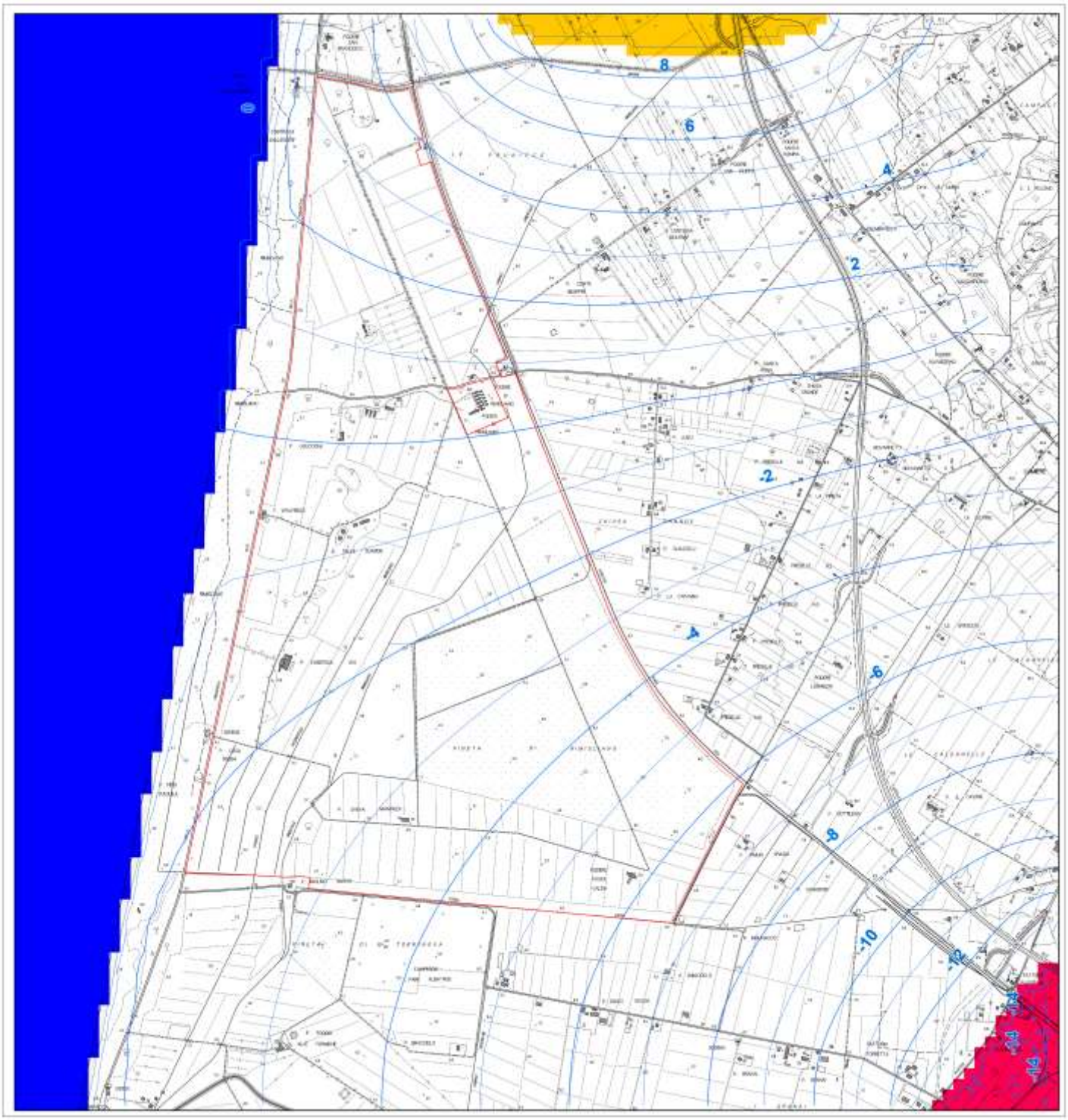


Fig. 20 –Assetto idrogeologico della falda profonda multistrato al termine della "long run" di 20 anni. Ricostruzione dello "stato attuale" (2003). In giallo, blu e rosso le condizioni di carico idraulico imposto ai limiti del modello. Il limite rosso rappresenta il limite della variante in oggetto

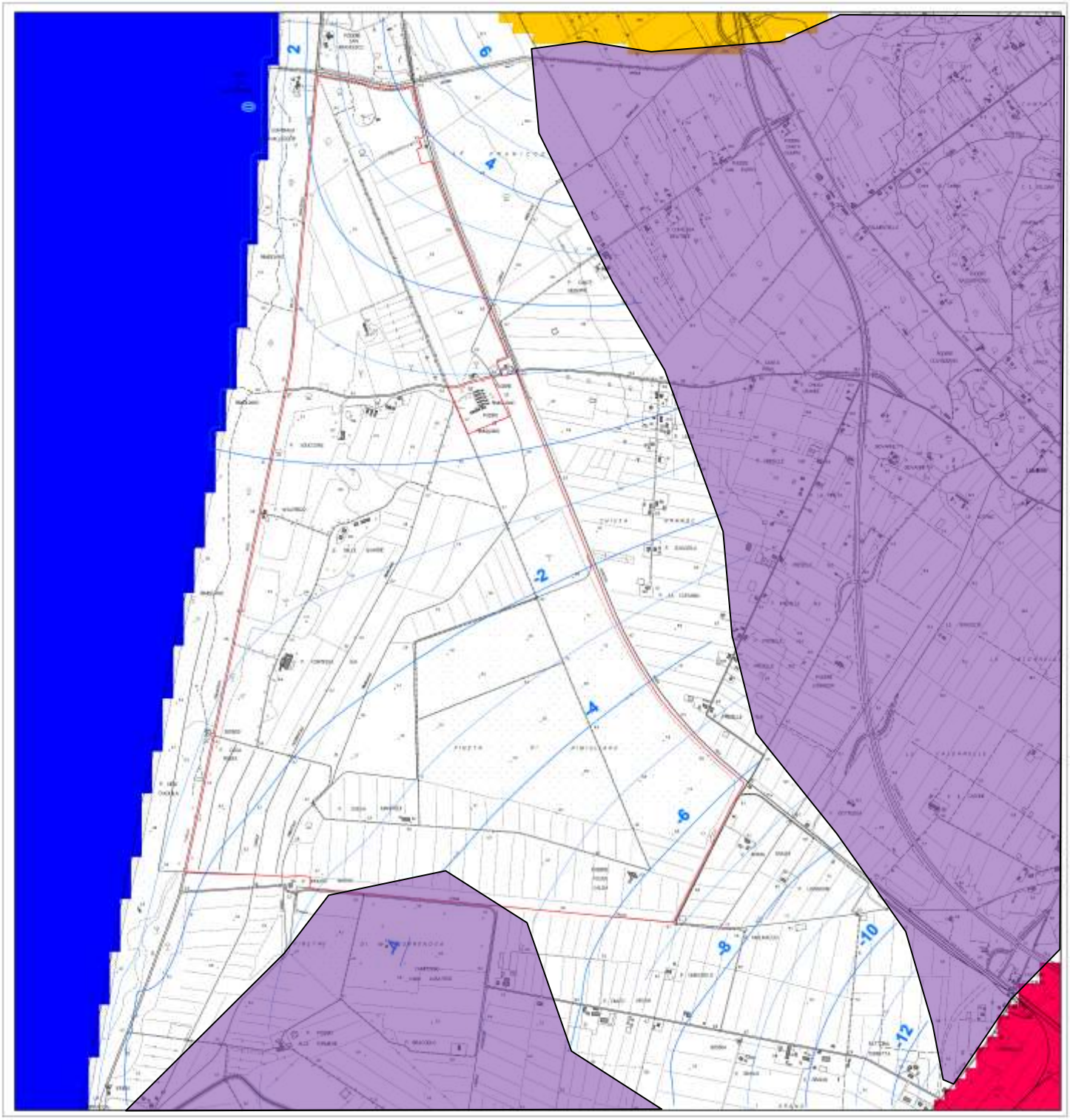
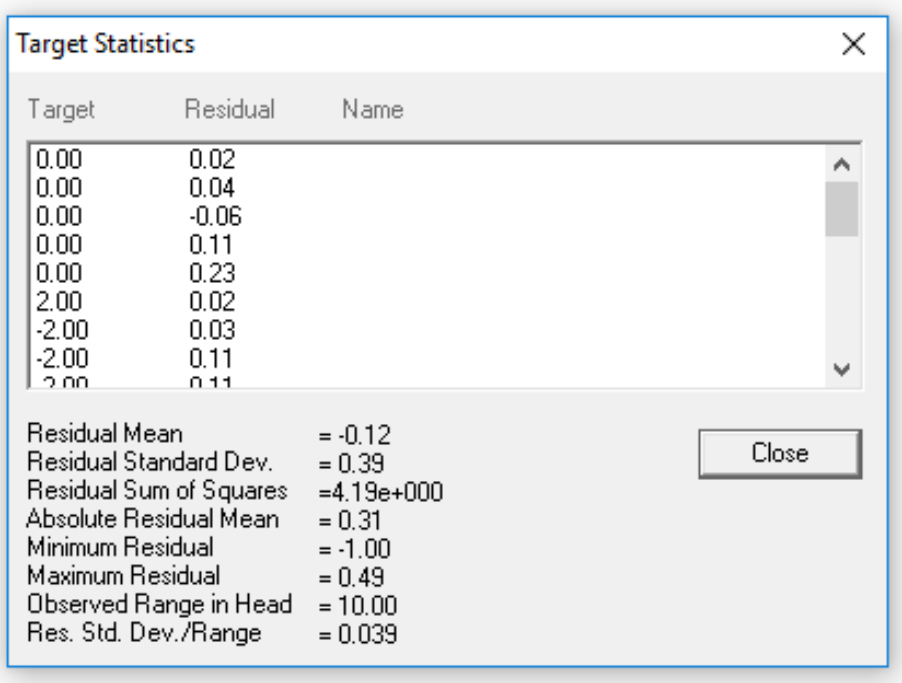


Fig. 21 –Assetto idrogeologico della falda superficiale freatica al termine della "long run" di 20 anni. In giallo, blu e rosso le condizioni di carico idraulico imposto ai limiti del modello. Le aree viola rappresentano le zone asciutte dell'acquifero superficiale. Il limite rosso rappresenta il limite della variante in oggetto



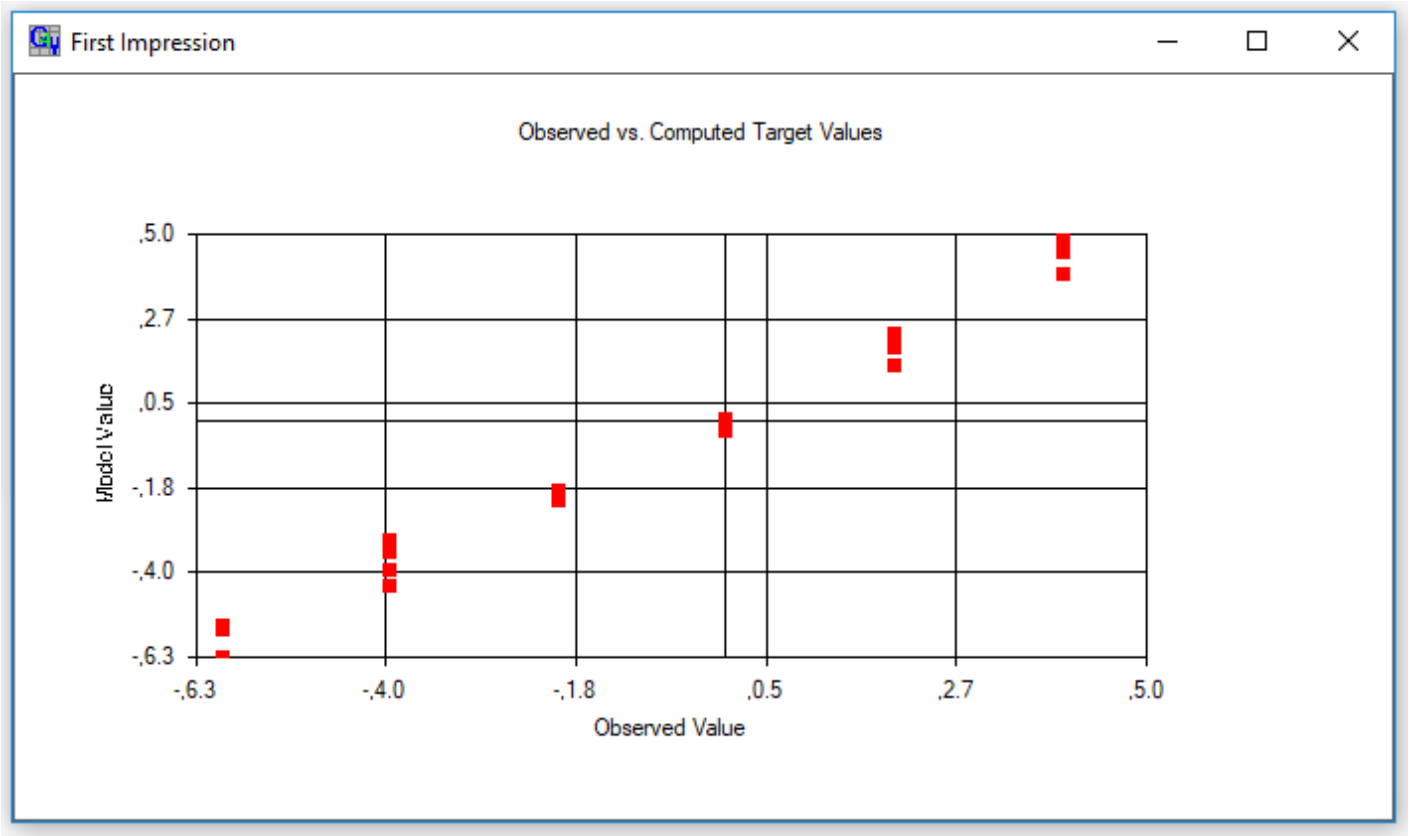
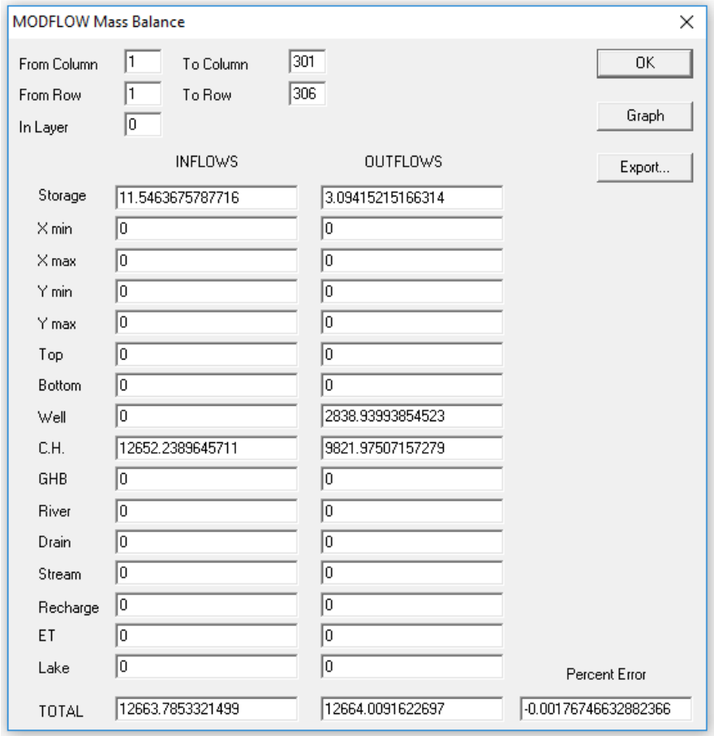
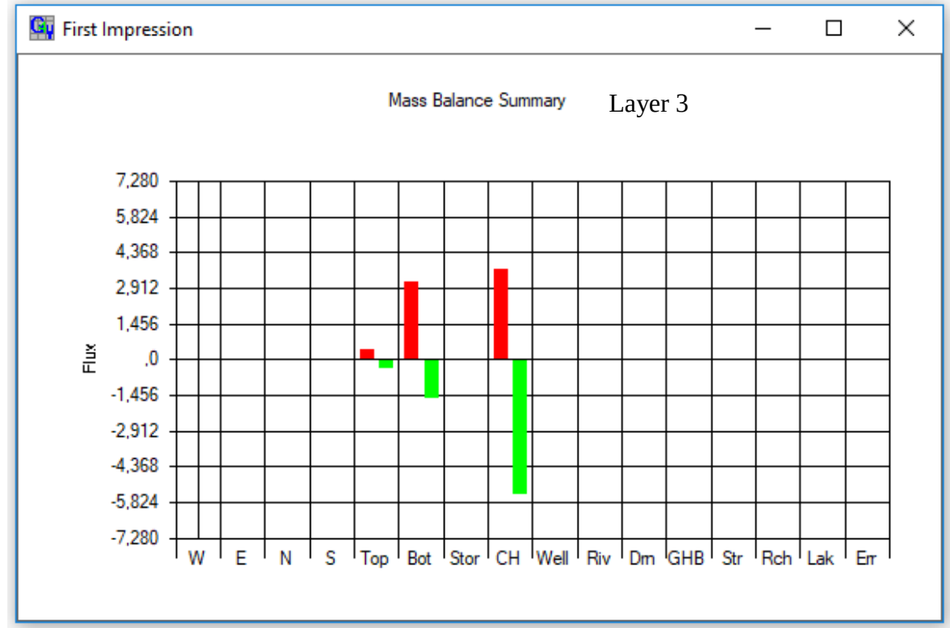
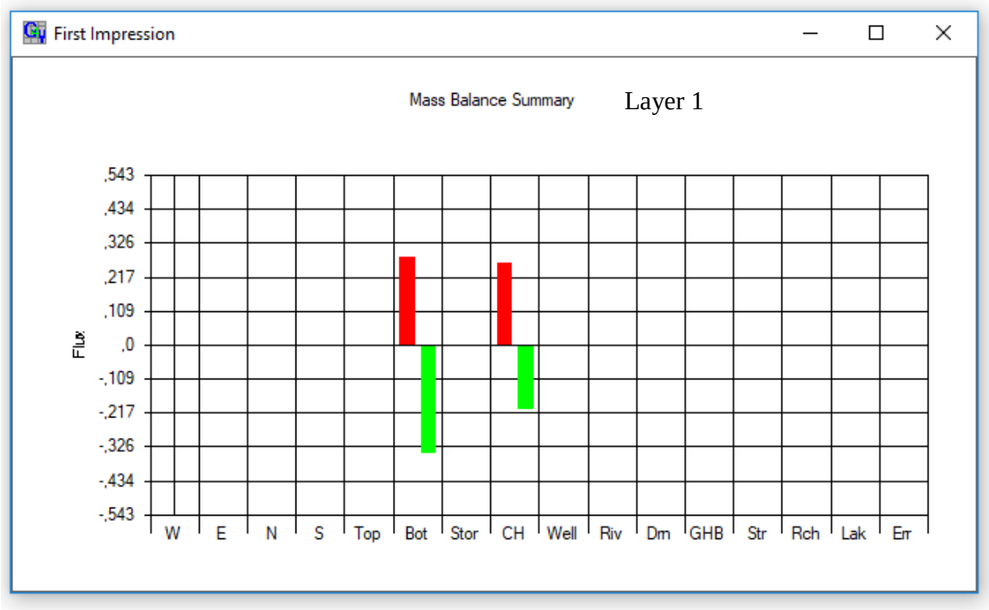


Fig. 22 – Grafici e tabelle di calibrazione della falda profonda multistrato. In alto valori statistici del grado di calibrazione del modello. In basso grafico valori osservati (linee isopiezometriche del 2003 - Fig. 9) vs valori calcolati.







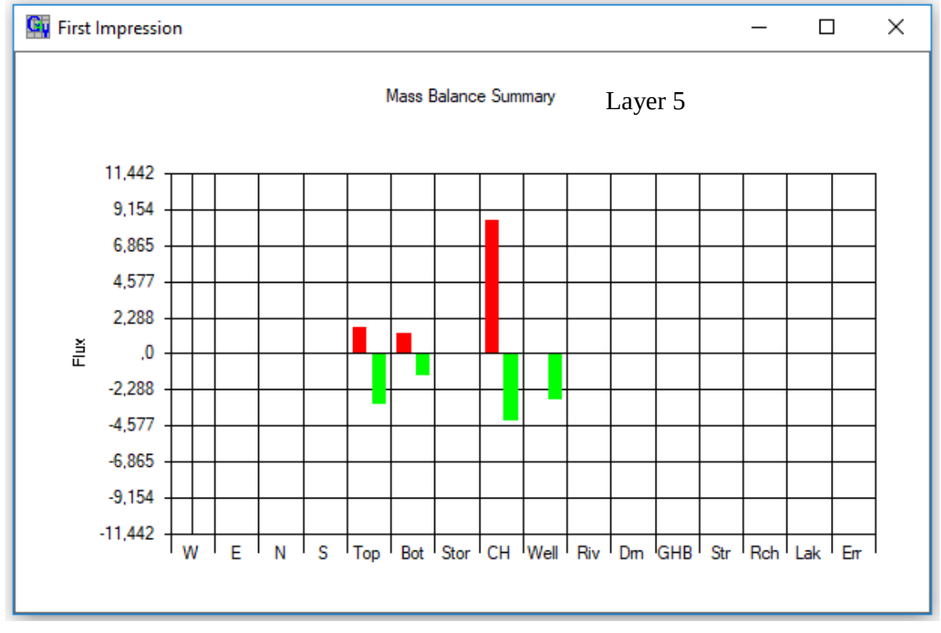


Fig. 23 –bilancio dell'intero modello e grafici di bilancio dei layer 1, 3 e 5 (falda freatica e falda profonda multistrato). Valori espressi in m³/gg

La calibrazione del modello di simulazione di ingressione salina si è sviluppata in modalità simile alla calibrazione idrogeologica sopra descritta. In particolare, è stata eseguita una run di 20 anni e i risultati dell'ingressione salina simulata sono stati confrontati con i valori di concentrazione di cloruri riportati nella Carta Idrogeologica della Piana di Piombino di Ghezzi et al, 1993 (Fig. 8). In particolare, come dato di confronto è stato preso il limite di 200 mg/l in quanto, come riportato nel suddetto studio "…*l'isolinea dei 200 mg/l, nell'area di San Vincenzo e nella pianura, definisce le zone in cui l'intrusione salina di acqua marina, …, è responsabile di inquinamento da cloruri nelle acque di falda".* Come visibile nella Fig. 24, la simulazione ha ricostruito un assetto di ingressione salina sufficientemente confrontabile con la condizione illustrata nello studio di Ghezzi et al del 1993.

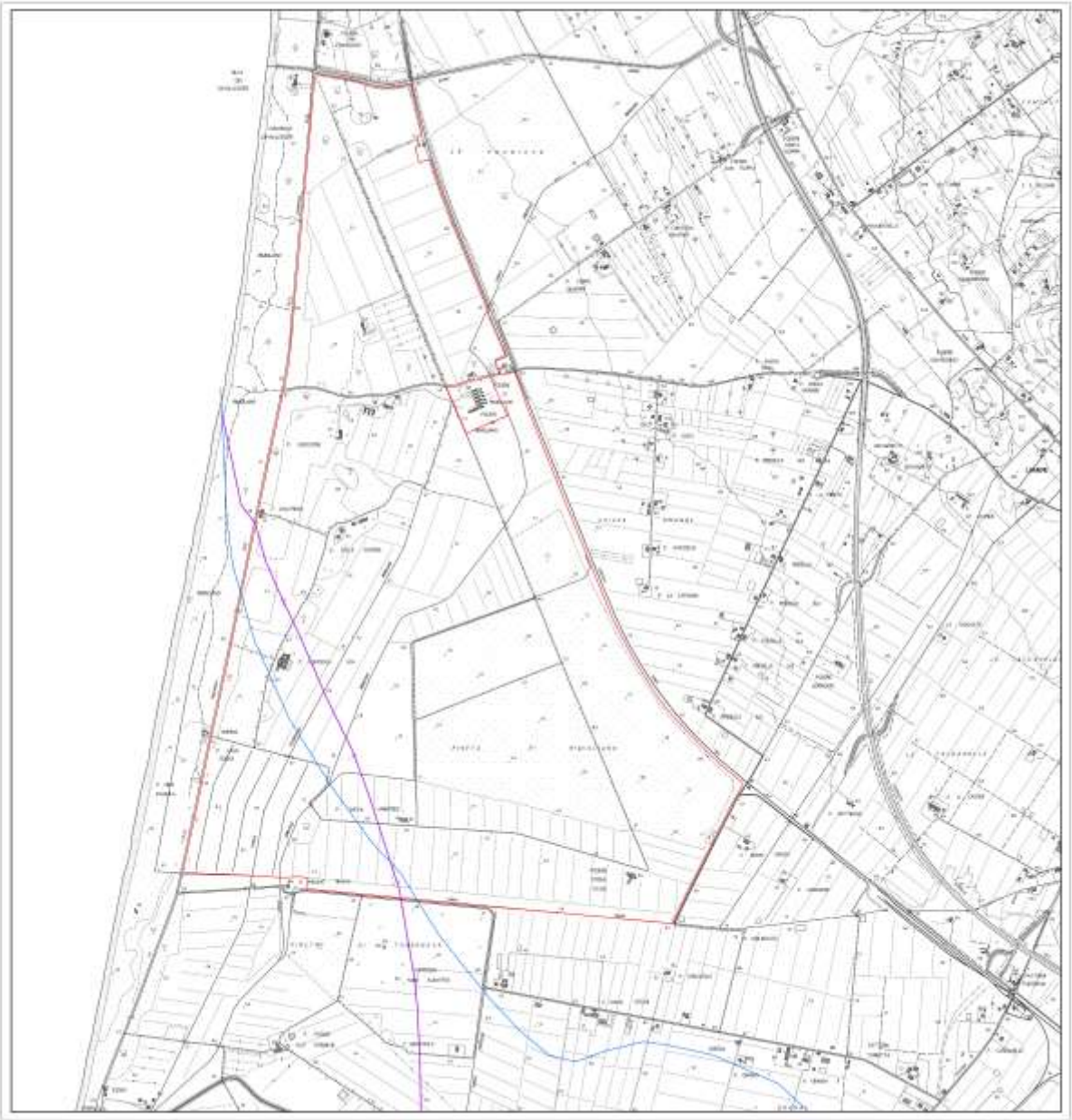


Fig. 24 – Carta di calibrazione dell'ingressione salina. In blu il limite di 200 mg/l di cloruri riportato nello studio di Ghezzi et al, 1993, in viola la ricostruzione con la simulazione long run di 20 anni. Il limite rosso rappresenta il limite della variante in oggetto

6.6 – Simulazione delle condizioni di progetto

Una volta terminata la fase di calibrazione idrogeologica e di ingressione salina si è passati alla simulazione sia del flusso idrogeologico che del flusso salino in condizioni transienti di progetto, ovvero con i parametri idrogeologici e chimici di input e il flusso idrogeologico e salino del modello derivante dalla fase di running del modello, dipendenti dal fattore tempo.

Come indicato nei §§ 5 e 6.4 del presente elaborato, gli eventuali pozzi di progetto, se terebrati, saranno ubicati nella porzione settentrionale della proprietà "Tenuta di Rimigliano", circa 100/300 m a Nord dal toponimo "Podere di Rimigliano" riportato nella CTR 1:10.000 (Fig. 18). La loro orientazione relativa (ENE – OSO) è frutto dell'analisi delle condizioni idrogeologiche attuali (2002) che hanno mostrato un flusso, nella porzione nord della proprietà in oggetto, con direzione NNE – SSO. L'orientazione scelta per i pozzi di progetto, essendo, quindi, trasversale al flusso di acqua sotterranea, permette di raccogliere il massimo dell'acqua sotterranea possibile senza portare ad un'interferenza relativa di un pozzo con l'altro.

I pozzi di progetto avranno una profondità ciascuno di circa 60 m da p.c. e saranno filtrati solo nei due layer superficiali dell'acquifero profondo multistrato. Al fine di simulare la peggiore condizione di stress idrogeologico di progetto possibile è stato impostato un prelievo costante (h24) di acqua per cinque mesi l'anno (da Maggio a Settembre) con una portata per pozzo di circa 3 l/sec.

La simulazione, in condizioni di progetto, è durata complessivamente 10 anni in quanto, su richiesta di parere ad A.R.P.A.T. da parte del Comune di San Vincenzo (richiesta del 10/03/2018) nell'ambito dell'avvio del procedimento di Variante al Regolamento Urbanistico denominata "Tenuta di Rimigliano", A.R.P.A.T. ha risposto come segue:"

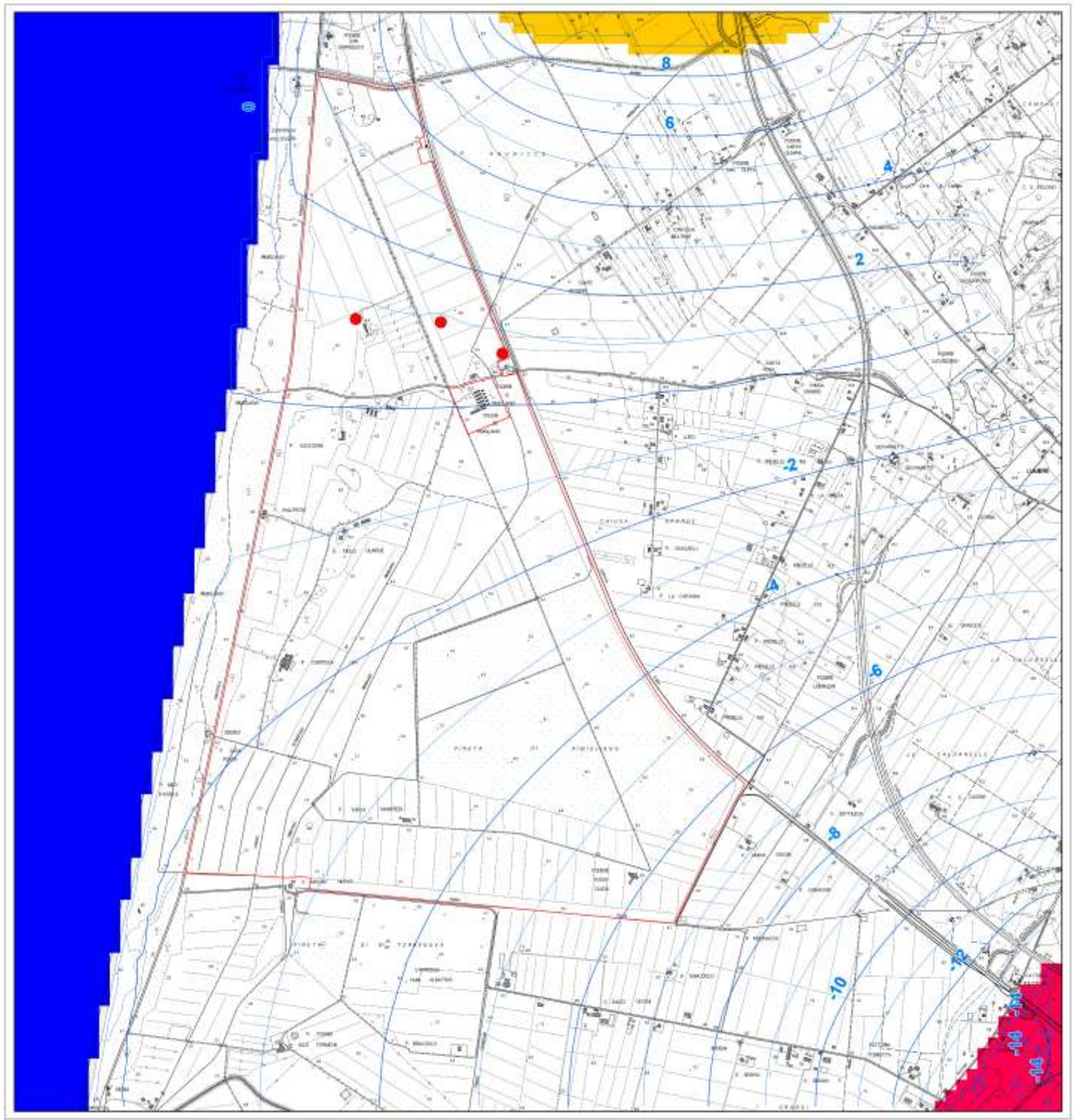
"in particolare, il modello idrogeologico digitale dell'area che il Proponente intende sviluppare dovrà quantificare chiaramente i prelievi attuali e quelli di progetto ed essere condotto valutando sia lo scenario a breve termine proposto (3 anni) sia uno a più lungo periodo (almeno 10 anni) al fine di valutare e minimizzare le alterazioni indotte

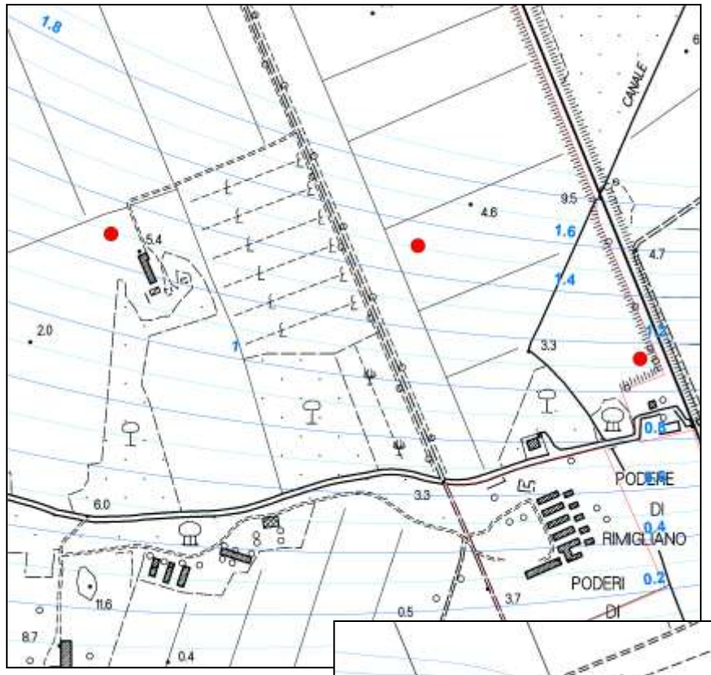
Ha seguito della run di simulazione in condizioni di progetto abbiamo ottenuto i seguenti risultati.

Da un punto di vista idrogeologico l'accensione dei pozzi di progetto produce un abbassamento medio nei pozzi di circa 0,92 m (Fig. 25), con valori piezometrici in dinamico sempre superiori al livello del mare (valore minimo 0,23 m s.l.m.) e con un'alterazione dell'assetto idrogeologico ristretta ad una piccola area circoscritta ai singoli pozzi e quindi non percepibile in termini di area vasta. Il suddetto abbassamento indotto dai pozzi di progetto è compatibile anche con l'unico valore di abbassamento a nostra disposizione, ovvero l'abbassamento registrato in uno dei pozzi del database dell'I.S.P.R.A. presente nell'areale di modellazione (pozzo posto immediatamente a sud del limite di proprietà della committenza). Nella scheda tecnica del pozzo è riportato un abbassamento di circa 0,42 m con una portata in emungimento di circa 2 l/s (Fig. 26).

L'abbassamento massimo registrato dopo la prima accensione si mantiene costante anche nelle successive sessioni di pompaggio, per cui l'assetto idrogeologico al 3° anno di pompaggio e al 10° di pompaggio è identico a quello registrato al 1° anno di pompaggio. Lo scenario è dovuto al fatto che il pompaggio di progetto produce un'alterazione dello stress idrogeologico esistente totalmente trascurabile tale per cui il sistema idrogeologico di area vasta riesce in tempi brevi a sopperire al surplus di richiesta idrica, inoltre al termine di ogni sessione annuale di pompaggio si registra una ri-equilibriatura dell'assetto idrogeologico nelle condizioni pre-pompaggio nell'arco delle 24 ore successive allo spegnimento delle pompe.

Preme sottolineare, come suddetto, che il pompaggio di progetto, al netto di tutti i possibili difetti di calibrazione del modello, produce degli abbassamenti in condizioni dinamiche sempre superiori al livello del mare. Questo comporta che i pozzi di progetti, nelle condizioni descritte nel modello, e derivanti dallo stato delle conoscenze geologiche e idrogeologiche attuali a nostra disposizione, non comporta pompaggio di acqua di mare e, non andando ad alterare l'assetto idrogeologico di area vasta, la sua influenza sull'evolversi dell'ingressione salina della piana e del tutto irrilevante.





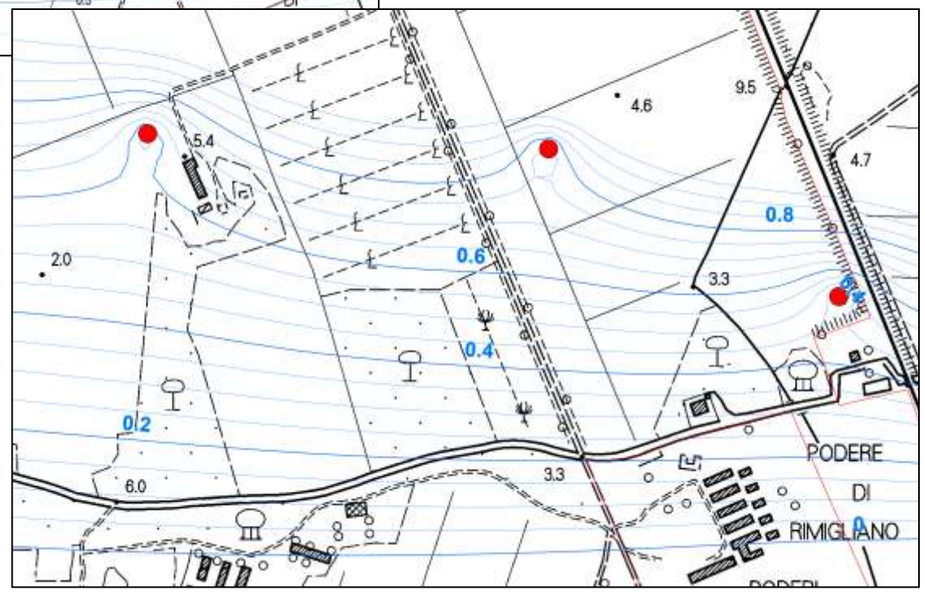


Fig. 25 – A sinistra assetto idrogeologico della falda profonda multistrato al termine del 1° anno di sessione di pompaggio – area vasta. In giallo, blu e rosso le condizioni di carico idraulico imposto ai limiti del modello. Il limite rosso rappresenta il limite della variante in oggetto A destra in alto dettaglio dell'assetto idrogeologico intorno all'area dei pozzi di progetti nelle condizioni pre-accensione delle pompe, in basso dettaglio dell'assetto idrogeologico intorno all'area dei pozzi di progetti nelle condizioni dinamiche (pompaggio di acqua di falda)

ISPRA
Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale

Contatto | Mappa | Ricerca

Indagini nel sottosuolo (L. 464/84

Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo (Legge 464/1984)

Scheda indagine

Codice: 190320
Regione: TOSCANA
Provincia: LIVORNO
Comune: PIOMBINO
Tipologia: PERFORAZIONE
Uso: IRRIGUO
Profondità (m): 60.00
Quota pc slm (m): 3
Anno realizzazione: 1995
Numero diametri: 1
Presenza acqua: SI
Portata massima (l/s): 6
Portata esercizio (l/s): 2
Numero falde: 2
Numero filtri: 1
Numero piezometrie: 1
Stratigrafia: SI
Certificazione(*): SI
Numero strati: 13
Longitudine ED50 (dd): 10.535833
Latitudine ED50 (dd): 43.026390
Longitudine WGS84 (dd): 10.534888
Latitudine WGS84 (dd): 43.025390

(*)Indica la presenza di un professionista nella compilazione della stratigrafia

Ubicazione indicativa dell'area d'indagine

DIAMETRI PERFORAZIONE

Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Lunghezza (m)	Diametro (mm)
1	0	60	60	530

FALDE ACQUIFERE

Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Lunghezza (m)
1	14	16.5	2.5
2	44	53	9

POSIZIONE FILTRI

Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Lunghezza (m)	Diametro (mm)
1	45	52	7	250

MISURE PIEZOMETRICHE

Data rilevamento	Livello statico (m)	Livello dinamico (m)	Abbassamento (m)	Portata (l/s)
LUG / 1995	13.9	14.32	0.42	2

Fig. 26 – Scheda del pozzo 190320 del database I.S.P.R.A.

Per quanto riguarda la simulazione dell'intrusione salina nelle condizioni di progetto, nel corso dei 10 anni di simulazione, si assiste ad un'evoluzione progressiva della stessa con un avanzamento massimo dell'isolinea di concentrazione 200 mg/l, rispetto alla condizione iniziale (1993) di circa 500 m in direzione Est (Fig. 27).

Il suddetto avanzamento avviene indipendentemente dall'accensione dei pozzi di progetto e a livello di modello matematico, è semplicemente associato alla ricerca di un punto di equilibrio nel sistema di salinità di area vasta. In altri termini, essendo costanti le condizioni di carico idraulico/flusso idrogeologico ai bordi del modello, il sistema tende, quindi a portare il plume di salinità dal mare (32.000 mg/l) fino al limite dell'isopiezometrica di 0 m s.l.m seguendo i flussi idrogeologici derivanti dalla simulazione con il codice di calcolo MODFLOW2000. A livello di contesto reale, il suddetto avanzamento potrebbe essere verosimile, se le condizioni di pompaggio impostate nel modello e ricalcanti il quadro di stress idrogeologico del 2002 (paragonabili in termini di area vasta a quelli del 1993), allo stato attuale, (2018) si fossero mantenute constanti. Il quadro potrebbe essere anche peggiore in quanto il modello, per il contesto salino ha teoricamente simulato il periodo 1993 – 2003. Se aggiungiamo ulteriori 15 anni alla simulazione precedentemente descritta, e supponendo che il quadro di stress idrogeologico sia rimasto costante, anche in quest'ultimo periodo, il risultato finale, in termini di salinità dell'acqua di falda potrebbe essere paragonabile a quello attuale (Fig. 28).

L'ipotesi è ulteriormente supportata da quanto riportato nella Carta delle Problematiche Idrogeologiche del vigente P.S. comunale di San Vincenzo, dove è riportato un assetto di concentrazione di cloruri nella piana di San Vincenzo, alla data del 2002, molto somigliante a quella simulata dal modello dopo i primi 20 anni di simulazioni in condizioni non di progetto (1973 – 2003 - Fig. 29)

Naturalmente, quanto suddetto, è un'ipotesi cautelativa, basata sull'assunto che il contesto di stress idrogeologico dell'area di modellazione è rimasto costante nel corso degli anni. Per verificare ciò, e contestualmente, validare o migliorare il grado di calibrazione del modello, è necessario effettuare una campagna di monitoraggio dei pozzi presenti all'interno della tenuta e se possibile anche all'esterno per un'area adeguata al contesto oggetto di modellazione, al fine di avere un quadro aggiornato allo stato attuale dell'intrusione salina. In aggiunta suggerirei di eseguire anche, in tutti o in alcuni pozzi, opportunamente scelti, una misurazione del livello piezometrico in condizioni statiche e dinamiche e delle prove di pompaggio a gradini e a lunga durata, al fine aggiornare anche il quadro idrogeologico di area vasta sia da un punto di vista del carico idraulico, sia da un punto di vista della distribuzione del valore di coefficiente di permeabilità e di trasmissività del sistema acquifero di interesse.

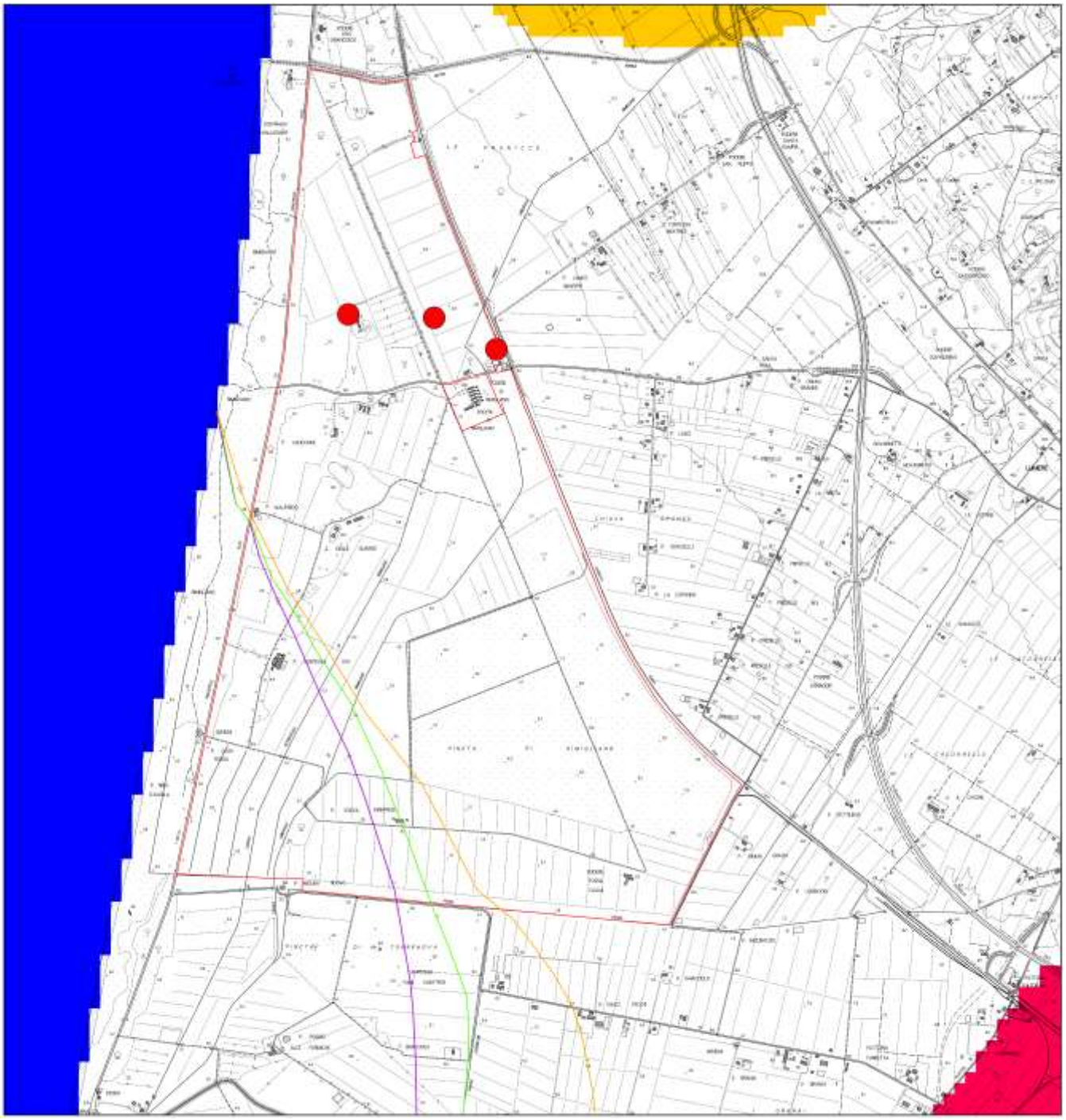


Fig. 27 – Carta dell'evoluzione dell'ingressione salina nei 10 anni di simulazione del modello. In viola linea stato iniziale, verde, linea dopo 3 anni di simulazione, arancione linea dopo 10 anni di simulazione. Il limite rosso rappresenta il limite della variante in oggetto

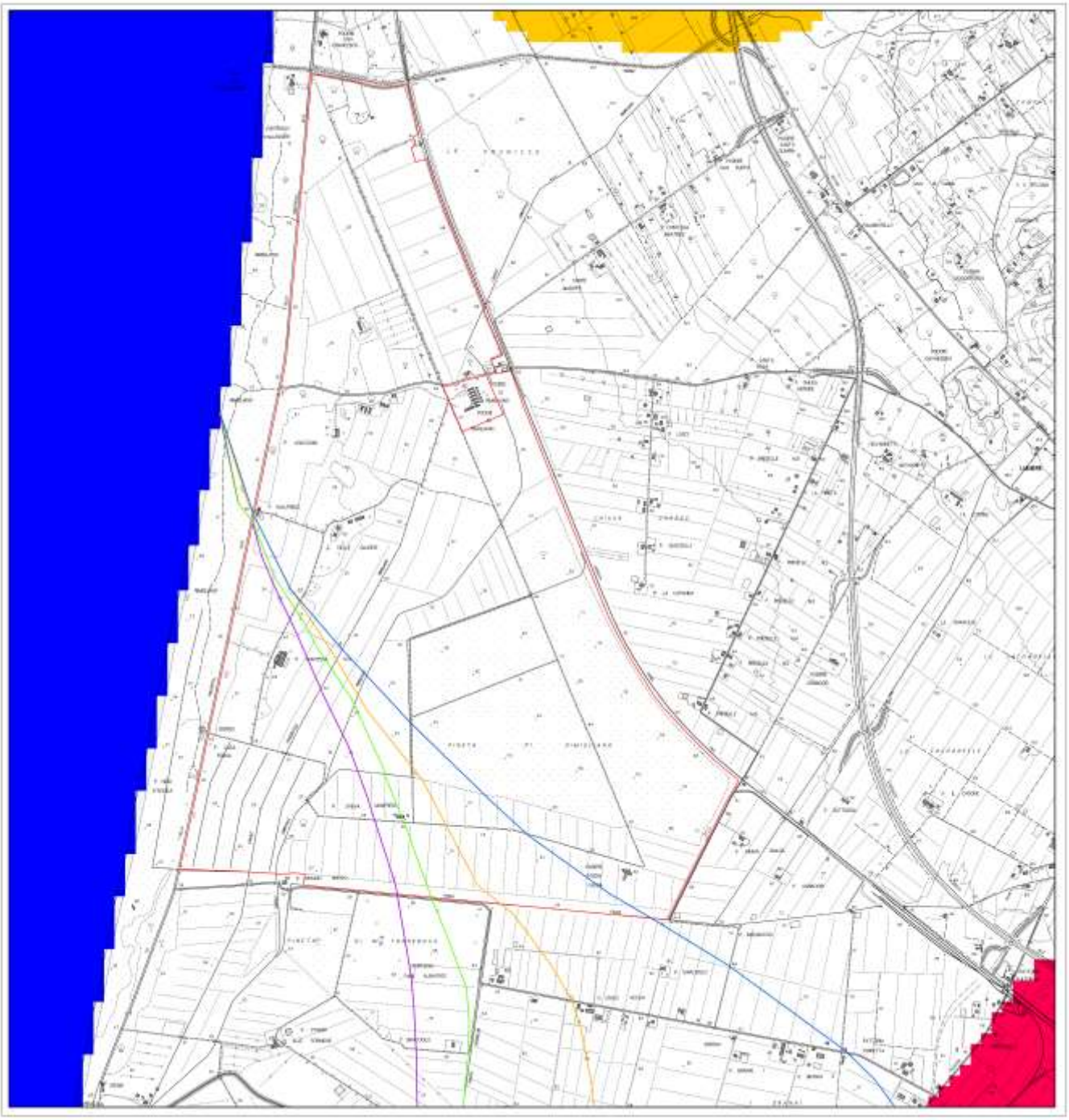


Fig. 28 – Carta dell'evoluzione dell'ingressione salina dal 1993 al 2018 (senza messa in funzione dei pozzi di progetto). In viola linea simulata del quadro salino del 1993, verde, linea simulata del quadro salino 1996, arancione line simulata del quadro salino del 2003, blu line simulata del quadro salino del 2018. Il limite rosso rappresenta il limite della variante in oggetto

Fig. 29 – Estratto della Carta delle Problematiche Idrogeologiche del vigente P.S. comunale di San Vincenzo

Certaldo, MAGGIO 2018

IdroGeo Service S.r.l.
Engineering and Consulting

Il Tecnico Responsabile
Dott. Geol.
Alessandro MURRATZU

Il Direttore Tecnico
Dott. Geol.
Simone FIASCHI

Collaboratore Tecnico
Dott. Geol.
Alessio Calvetti

BIBLIOGRAFIA

- Alberti L, Angelotti A, Antelmi M, La Licata I., Legrenzi C (2012) – Low temperature geothermal energy: heat exchange simulation in acquifers though Modflow/MT3DMS codes

- Costantini A., Lazzarotto A., Maccantelli M., Mazzanti R., Sandrelli F, Tavarnelli E. (1993) – Carta Geologica della Provincia di Livorno a Sud del F.Cecina

- Custodio E. (2005): “Teoria elementare di fluodinamica in mezzi porosi”. In: Idrologia sotterranea, a cura di: Custodio E., Llamas M.R. Dario Flaccovio Editore (Palermo)

- De Filippis G., Marchina C, Sabbatini T, Bonari E, Ercoli L, Rossetto R, Romano D, Ravenna C. (2017): “Gestione sostenibile delle acque della bassa Val di Cornia attraverso la riduzione della domanda idrica, la ricarica della falda e la riqualificazione fluviale (progetto REWAT) – Revisione e aggiornamento del modello numerico per la gestione della risorsa idrica in Val di Cornia”.

- Ghezzi G, Ghezzi R, Muti A. (1993): “Studio Idrogeologico della Pianura di Piombino (Pianura del Fiume Cornia e Terrazzo S.Vincenzo – Palmantello” In: La Scienza della Terra nell’area della Provincia di Livorno a sud del fiume Cecina.

- Salleolini M. (2000). Dispense del corso di Idrogeologica Applicata