



Doc. SICS_210_Integraz
Progetto messa in produzione pozzo
Agosta 1 Dir

INTEGRAZIONI ALLO STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

Allegato 7e.
**Valutazione degli effetti della subsidenza indotta
dalla coltivazione del giacimento Agosta in
relazione alla salinizzazione degli acquiferi**

Luglio 2016

**Contratto Aperto n. 2500017034
OdL n. 4310188044**

**Valutazione degli effetti della subsidenza indotta dalla
coltivazione del giacimento Agosta in relazione alla
salinizzazione degli acquiferi**

Rapporto conclusivo

Giugno 2016

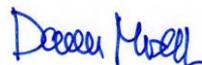
Responsabile del Contratto:

Prof. Renato Posenato



Coordinatore:

Prof. Daniele Masetti



Responsabile scientifico

Dr. Ing. Ph.D Leonardo Schippa



Collaboratori:

Dr. Geol. Ph.D. Valentina Vincenzi

Executive Summary

In riferimento alla apertura e coltivazione del campo "Agosta", lo studio geomeccanico sviluppato da ENI [1] restituisce uno scenario di subsidenza attesa sull'orizzonte temporale del 2030 (data di prevista chiusura del giacimento), caratterizzato da un abbassamento relativo (al periodo 2017-2030 ed alla sola componente indotta dalla coltivazione del giacimento) che rimane essenzialmente confinato su un'area di forma sub-ellittica caratterizzata da assi pari a circa 16 e 6 km con centro sul pozzo di Agosta, con valore massimo di subsidenza di circa 0.17 m (scenario *upper*).

Il presente studio è finalizzato a valutare gli effetti di tale subsidenza sulla porzione di superficie di territorio estesa nell'intorno dell'area subsidente in relazione alla configurazione dell'acquifero freatico costiero.

A tal fine è stato delineato il modello idrogeologico concettuale dell'acquifero costiero, identificando il tetto dell'acquifero e l'organizzazione laterale-verticale delle facies sedimentarie all'interno di questo, ed in particolare la presenza degli orizzonti deposizionali caratteristici di depositi stratificati prevalentemente limosi che costituiscono la barriera impermeabile.

Sull'area di indagine sono state inoltre localizzate e caratterizzate le principali sorgenti di acqua dolce/salata che influenzano la risalita del cuneo marino: da una parte le Valli di Comacchio, caratterizzate da acque salate che contribuiscono all'ingressione del cuneo salino, e dall'altra la rete di bonifica meccanica (in particolare comprensorio del mezzano SE e Valle Pega) che controllano l'orizzonte superiore della falda freatica. A queste si aggiungono i contributi di ricarica di acqua dolce derivanti dalle precipitazioni e dai volumi immessi nella rete a scopo irriguo.

Sono state condotte, modellazioni matematiche mediante modello numerico 2-D in mezzo poroso non omogeneo, anisotropo, di flusso idrodinamico non stazionario a densità variabile, dell'acquifero rappresentativo dell'area di indagine. Il modello, coerente con il modello concettuale di cui sopra, è stato calibrato ricostruendo l'andamento del fronte dolce-salato in considerazione delle misure disponibili effettuate a partire dal 2009 all'interno dei piezometri della rete ARPAE.

Lo scenario previsionale, considera un abbassamento subsidente omogeneo su tutta la porzione territoriale interessata pari al massimo calcolato nello scenario *upper* (-0.17 m).

In conclusione le simulazioni condotte in termini comparativi sullo scenario nello stato attuale ed in quello previsionale evidenziano variazioni del campo idrodinamico ipogeo molto contenute, che restituiscono una modesta distorsione delle linee equipotenziali, , anche se l'andamento del cono di subsidenza suggerisce che lo scostamento massimo previsto, anche in termini di linee

equipotenziali del campo di flusso, vada ulteriormente riducendosi allontanandosi dal vertice (i.e. pozzo di Agosta).

La deformazione del campo delle densità (concentrazioni saline) all'interno dell'acquifero mostra una modesta flessione dei fronti isocori sempre contenuta all'interno del massimo spostamento verticale subsidente previsto (i.e. 0.17 m). Il confronto tra lo stato di fatto e lo stato previsionale in termini di andamento verticale delle concentrazioni saline mostra differenze sostanzialmente inapprezzabili.

Peraltro queste variazioni intervengono all'interno di un acquifero che nel contesto esaminato mostra già nello stato attuale salinità molto elevata, che lo esclude dalla classificazione di "Acqua Dolce" così come operata dalla Regione Emilia Romagna.

Pertanto si può concludere che l'effetto generato dalla subsidenza prodotta dalla coltivazione del campo Agosta valutata sull'orizzonte temporale del 2030 secondo lo scenario di subsidenza *upper* non produce effetti apprezzabili sotto il profilo del peggioramento dello stato di salinizzazione dell'acquifero superficiale.

REPORT FINALE

INDICE

1	Premessa, obiettivi ed attività dello studio	3
2	Il contesto e gli scenari di subsidenza	3
3	Acquisizione dati per la caratterizzazione del contesto fisico.....	6
4	Inquadramento idrogeologico	8
4.1	Modello idrogeologico regionale	8
4.2	Successione idrostratigrafica sull'area di studio	10
4.3	Stato di salinizzazione degli acquiferi confinati.....	12
4.3.1	<i>Caratterizzazione dell'acquifero freatico costiero</i>	<i>13</i>
4.3.2	<i>Premessa</i>	<i>13</i>
4.4	Litologia e geometria dell'acquifero.....	13
4.5	Stato di salinizzazione.....	15
4.6	Sintesi	22
5	Precipitazioni meteoriche	22
6	Corpi idrici superficiali	24
6.1	Rete idrica consortile.....	24
6.2	Valli di Comacchio	37
7	Modellazione numerica	44
7.1	Premessa ed inquadramento dei fenomeni di flusso a densità variabile	44
7.1.1	<i>Carichi piezometrici nel flusso a densità variabile</i>	<i>46</i>
7.1.2	<i>Salinità: parametri e unità di misura</i>	<i>47</i>
7.2	Modello idrogeologico concettuale	48
7.3	Implementazione del modello idrodinamico	50
7.3.1	<i>Dominio e griglia di calcolo</i>	<i>52</i>
7.3.2	<i>Lo stato attuale: condizioni al contorno e iniziali.....</i>	<i>55</i>
7.3.3	<i>Lo stato previsionale: condizioni al contorno e iniziali.....</i>	<i>57</i>
7.3.4	<i>Proprietà dei materiali</i>	<i>59</i>
7.3.5	<i>Simulazioni degli scenari.....</i>	<i>61</i>
7.4	Calibrazione dello scenario dello stato attuale	62
7.5	Implementazione dello scenario previsionale.....	62
7.6	Analisi dei risultati e conclusioni	64
7.6.1	<i>Scenario attuale e calibrazione del modello</i>	<i>64</i>
7.6.2	<i>Scenario previsionale</i>	<i>66</i>
8	Allegato 1	71

9	Bibliografia.....	83
10	Elenco delle Figure.....	85
11	Elenco delle Tabelle.....	89

1 Premessa, obiettivi ed attività dello studio

In riferimento alla apertura e coltivazione del campo "Agosta", lo studio geomeccanico sviluppato da ENI [1] restituisce uno scenario di subsidenza attesa sull'orizzonte temporale del 2030 (data di prevista chiusura del giacimento), caratterizzato da un abbassamento relativo (al periodo 2017-2030 ed alla sola componente indotta dalla coltivazione del giacimento) che rimane essenzialmente confinato su un'area di forma sub-ellittica caratterizzata da assi pari a circa 16 e 6 km con centro sul pozzo di Agosta, con valore massimo di subsidenza di circa 0.17 m (scenario *upper*).

Il presente studio è finalizzato a valutare gli effetti di tale subsidenza sulla porzione di superficie di territorio estesa nell'intorno dell'area subsidente in relazione alla configurazione dell'acquifero freatico costiero.

A tal fine è stato delineato il modello idrogeologico concettuale dell'acquifero costiero, identificando il tetto dell'acquifero e l'organizzazione laterale-verticale delle facies sedimentarie all'interno di questo, ed in particolare la presenza degli orizzonti deposizionali caratteristici di depositi stratificati prevalentemente limosi che costituiscono la barriera impermeabile. Sull'area di indagine sono state inoltre localizzate e caratterizzate le principali sorgenti di acqua dolce/salata che influenzano la risalita del cuneo marino.

E' stata condotta una analisi dei dati misurati presso i pozzi piezometrici significativi per l'area di indagine, al fine di ricostruire l'andamento stagionale del cuneo di ingressione salina, ricercando eventuali correlazioni con l'andamento stagionale delle precipitazioni e dei livelli idrometrici nei corpi d'acqua superficiali, giungendo infine alla definizione di uno scenario rappresentativo della dinamica delle acque superficiali che ha effetto sull'interfaccia acqua dolce-acqua salata all'interno dell'acquifero.

Sono state condotte, infine, modellazioni matematiche mediante modello numerico 2-D in mezzo poroso non omogeneo, anisotropo, di flusso idrodinamico non stazionario a densità variabile, dell'acquifero rappresentativo dell'area di indagine. Il modello, coerente con il modello concettuale di cui sopra, è stato utilizzato al fine di ricostruire l'andamento del fronte dolce-salato negli scenari rappresentativi presi in esame sia nella configurazione dello stato di fatto che in quella corrispondente allo scenario previsionale di subsidenza.

2 Il contesto e gli scenari di subsidenza

Il presente paragrafo si riferisce ai risultati dello studio geomeccanico relativo ai campi di Dosso

degli Angeli, in produzione dal 1971, e di Agosta, la cui messa in produzione è prevista per giugno 2017.

Il campo di Agosta è situato lungo il margine nordoccidentale delle valli di Comacchio, in Provincia di Ferrara, mentre il campo di Dosso degli Angeli si estende nell'area orientale delle medesime valli, a cavallo tra le due province di Ferrara e Ravenna (Figura 1).

La valutazione di subsidenza attesa è stata effettuata da ENI [1] tramite l'applicazione del modello poro-elastoplastico ad elementi finiti proprietario di IsamgeoEngineering GmbH. Le informazioni relative alla geometria dei due giacimenti, le proprietà petrofisiche e l'evoluzione delle pressioni sono state ottenute dagli studi fluido-dinamici di giacimento realizzati da Eni S.p.A. Nello studio citato, in considerazione della separazione delle strutture che ospitano i giacimenti di Agosta e Dosso degli Angeli, è stata esclusa la comunicazione idraulica tra i due giacimenti e sono stati condotti due studi dinamici separati. L'interazione meccanica è stata tenuta in debita considerazione mediante la costruzione di un unico modello integrato che comprende entrambi i giacimenti. La data di fine produzione è stimata dal modello fluido-dinamico e, quindi, dipende anche dalla compressibilità dei pori. In Figura 1 è riportata l'ubicazione dei campi di Dosso degli Angeli e Agosta.



Figura 1 Ubicazione dei campi Dosso degli Angeli e Agosta

Per il campo di Agosta, sono stati considerati tre diversi scenari, basati sulla correlazione regionale[2]. Il termine della produzione è pertanto previsto tra il 2030 e il 2033. Per il giacimento di Dosso degli Angeli invece, date le numerose misurazioni disponibili (CGPS, dati InSar e livellazioni), è stato adottato un unico valore di compressibilità dei pori e la fine della produzione è prevista al 2027. La simulazione è stata protratta per circa 30 anni dopo la chiusura dei campi in modo da considerare la propagazione del disturbo di pressione negli acquiferi connessi alla zona mineralizzata. Per i dettagli si rimanda al citato rapporto.

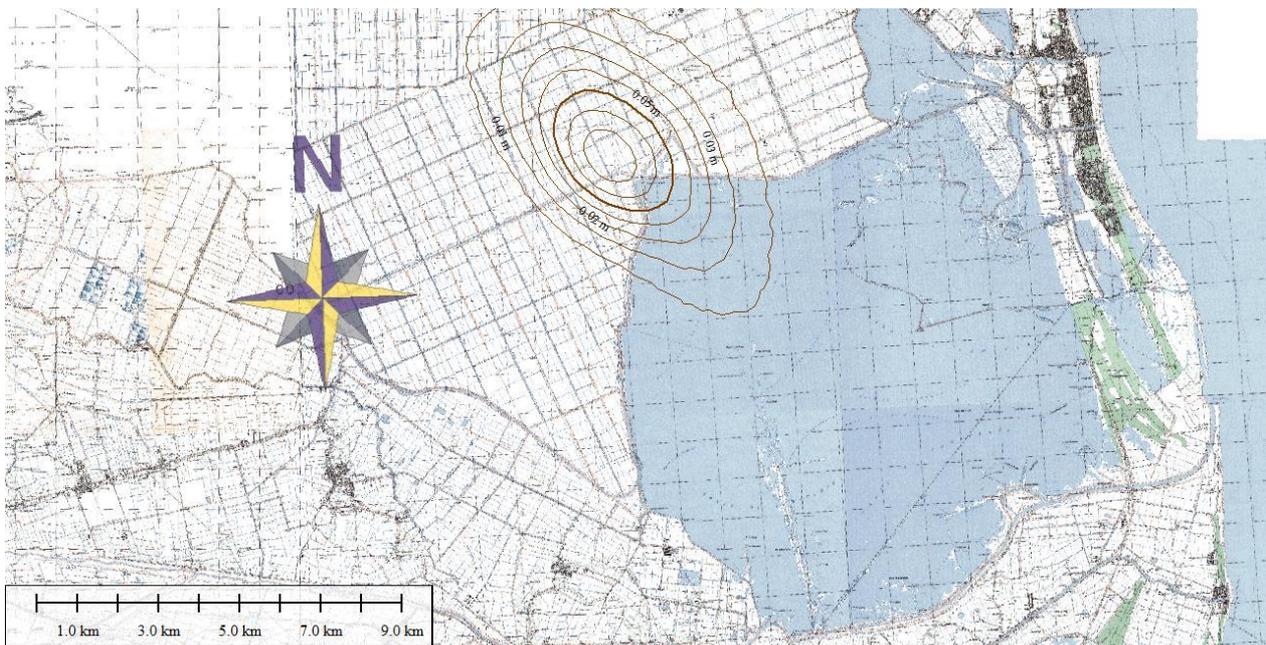


Figura 2 Andamento delle isolinee di subsidenza attesa all'anno 2020

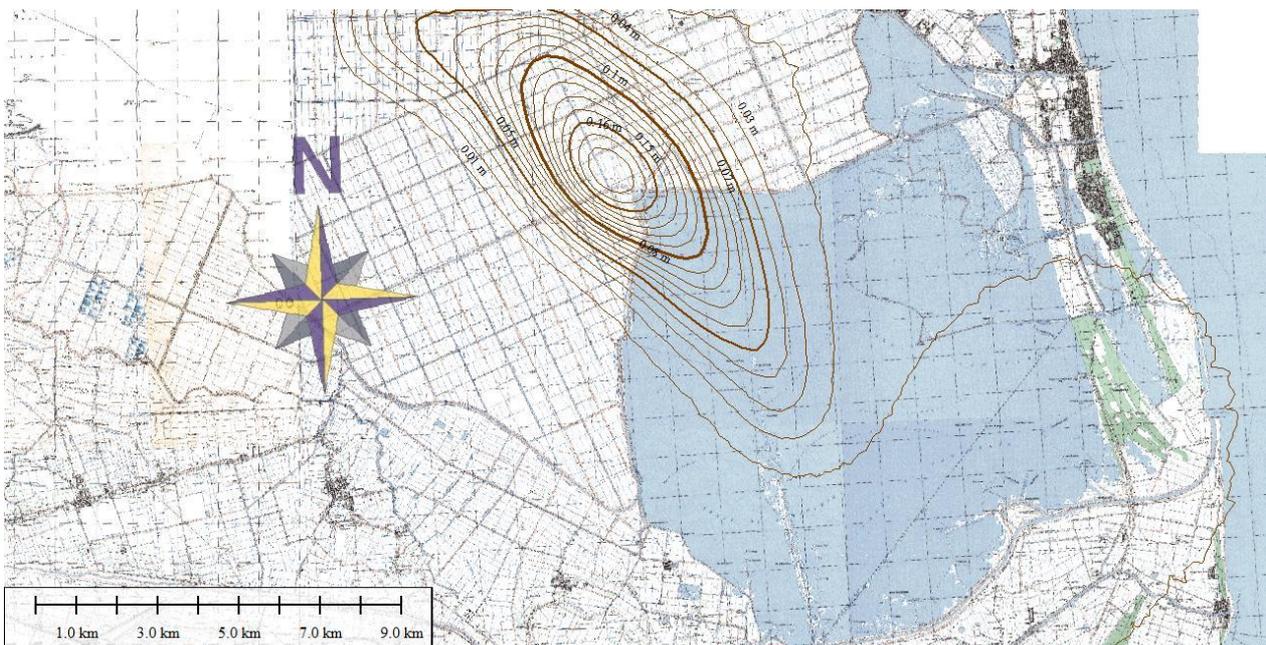


Figura 3 Andamento delle isolinee di subsidenza attesa all'anno 2030

Nelle Figura 2 e Figura 3 si riportano i coni di subsidenza differenziali (rispetto all'anno 2017) previsti sui due orizzonti temporali all'anno 2020 e 2030, avendo assunto l'anno 2017 quale anno di avvio della produzione per il pozzo Agosta.

Nello studio ci riferiremo allo scenario superiore sull'orizzonte temporale del 2030, che restituisce un cono di subsidenza di forma sub ellittica aventi assi pari a 15.0 km e 7.5 km orientati circa NO-SE e NE-SO rispettivamente ed il centro circa 12.0 km distante dalla linea di riva.(vedi Figura 4). In riferimento a questa porzione territoriale verrà definito il modello idrogeologico concettuale ed effettuate le simulazioni previsionali.



Figura 4 Corografia della porzione territoriale coinvolta dal cono di subsidenza (scenario 'upper' anno 2030)

3 Acquisizione dati per la caratterizzazione del contesto fisico

Preliminarmente è stata effettuata una ricerca tesa ad individuare le stazioni di misura utili alla caratterizzazione del contesto fisico in esame.

La ricerca è orientata alla definizione dello stato idrometrico dei corpi idrici superficiali (i.e. Valli di Comacchio e rete di bonifica che insiste nell'intorno dell'area in esame), della salinità delle acque superficiali, dell'andamento di marea, della piovosità e del suo andamento stagionale nonché della

falda freatica e dell'intrusione del cuneo salino. In Figura 5 sono ubicate le stazioni di rilievo relative alla rete di monitoraggio ARPAE e Servizio Geologico Sismico e dei Suoli (SGSS-RER); nella Figura 6 sono riportati gli impianti idrovori a servizio del comprensorio di bonifica ferrarese in prossimità dell'area di studio.

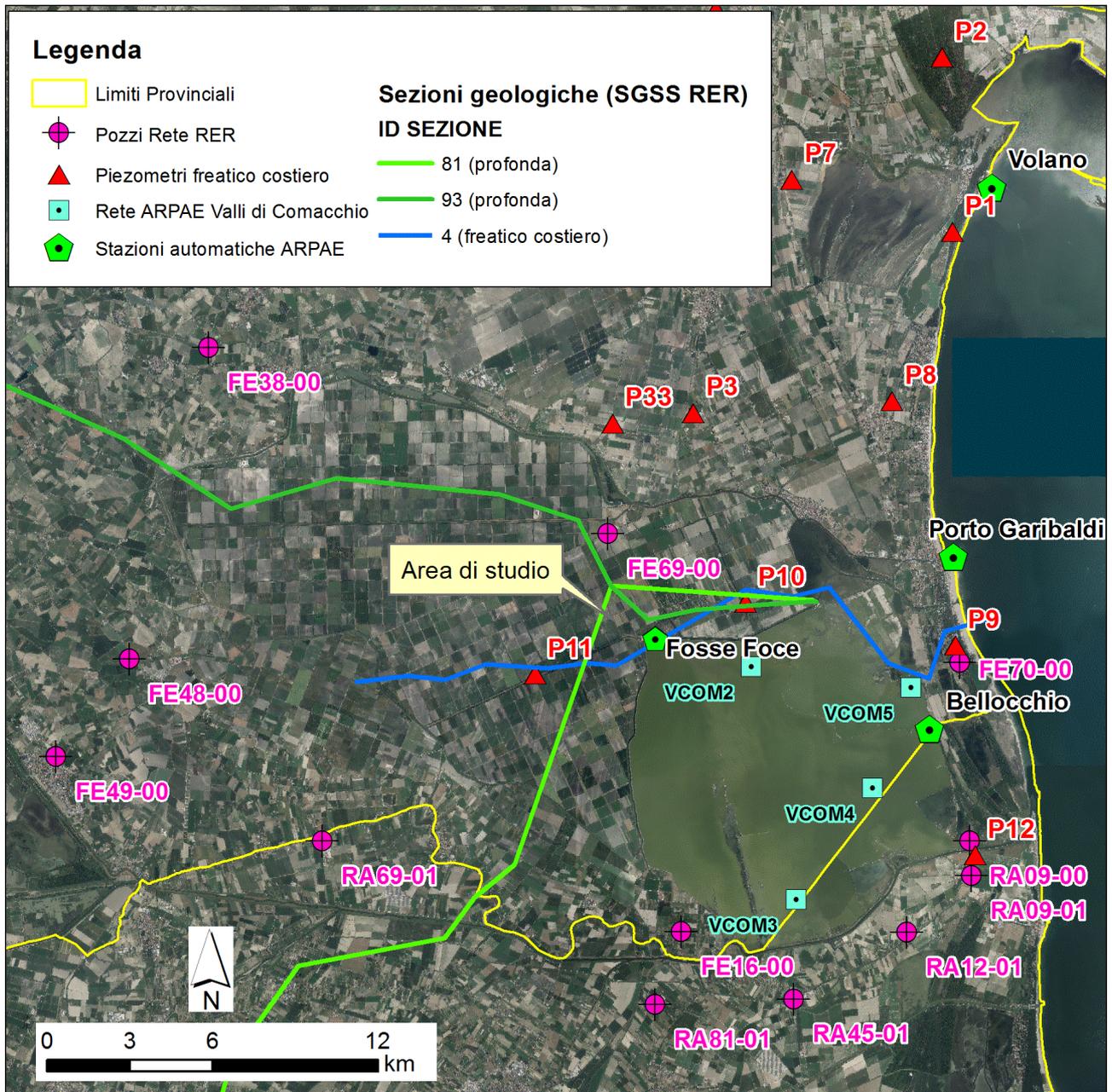


Figura 5. Ubicazione delle stazioni di misura ARPAE e SGSS-RER.

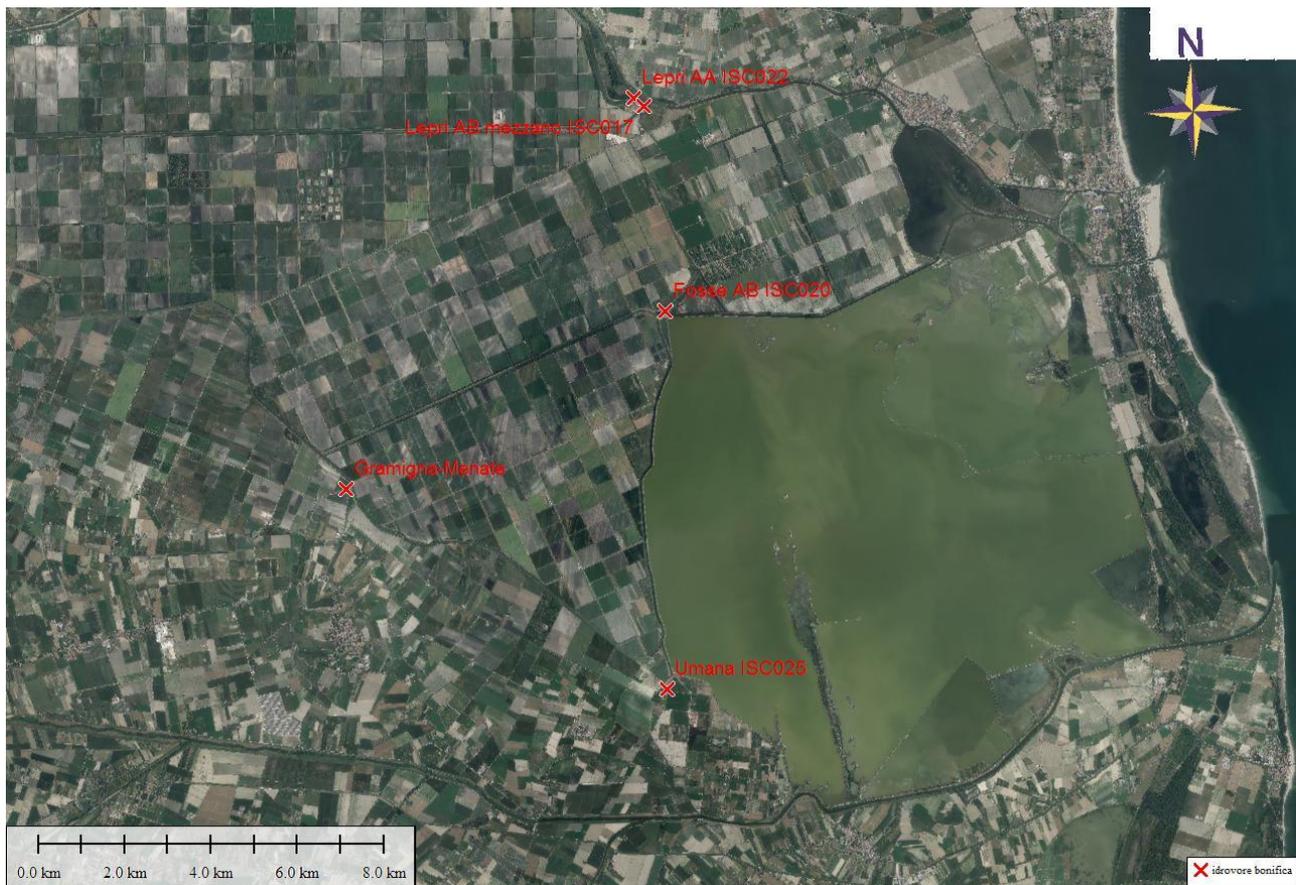


Figura 6 Ubicazione impianti idrovore di bonifica

I dati raccolti presso gli Enti territoriali ed utilizzati nell'ambito del presente studio sono riportati sinteticamente in Appendice 1. Quelli ritenuti più significativi per l'elaborazione del modello idrogeologico concettuale saranno illustrati e discussi nel testo.

4 Inquadramento idrogeologico

4.1 Modello idrogeologico regionale

L'area oggetto dell'intervento ricade all'interno del complesso idrogeologico della pianura alluvionale e deltizia padana della Pianura Padana. Questa si è formata per riempimento sedimentario della Fossa Padano-Adriatica ed è un ampio bacino di sedimentazione quaternario costituito da depositi riferibili ad ambienti deposizionali marini, deltizi, lagunari e fluvio-palustri. Dal punto di vista idrostratigrafico l'alternanza di sedimenti a granulometria variabile ha determinato, su tutta la bassa pianura, la formazione di un sistema acquifero multistrato, con alternanze di acquiferi ad alta permeabilità ed acquitardi/acquicludi a bassa permeabilità.

Due importanti studi definiscono la successione idrostratigrafica del territorio in esame, rispettivamente a scala regionale (Emilia-Romagna) e provinciale (Ferrara).

RER & ENI-AGIP (1998) [15] definisce la stratigrafia fisica del Pleistocene Emiliano-Romagnolo, individuando 3 Gruppi Acquiferi (A, B, e C) e suddividendoli a loro volta in diversi Complessi Acquiferi. Nel Gruppo A individua 5 complessi acquiferi denominati rispettivamente dal basso verso l'alto: A4, A3, A2, A1 (tutti acquiferi confinati, ossia ospitanti falde idriche in pressione) e l'acquifero freatico A0 (Figura 7).

NUOVA STRATIGRAFIA FISICA DEL PLEISTOCENE EMILIANO-ROMAGNOLO							
Unità di sottosuolo		Unità affioranti			ETA' (milioni di anni)	SCALA CRONOSTRATIGRAFICA (milioni di anni)	
Gruppi Acquiferi	Complessi acquiferi						
A	A0		SUPERSISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO	SISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE	AES8	~0.12	PLEISTOCENE SUPERIORE - OLOCENE
	A1	POST TETTONICO			AES7		
	A2	SIN TETTONICO			AES3/6		
	A3	POST TETTONICO			AES2 /5		
	A4	SIN TETTONICO			AES1 /4		
B		POST TETTONICO	SUPERSISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO	SISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE		~0.45	PLEISTOCENE MEDIO
		SIN TETTONICO					
C		POST TETTONICO	SUPERSISTEMA QUATERNARIO MARINO	SUBSISTEMA QUATERNARIO MARINO 7		~0.80	0.94
		SIN TETTONICO		SUBSISTEMA QUATERNARIO MARINO 8			
		POST TETTONICO		SISTEMA DI COSTAMEZZANA			
		SIN TETTONICO		SISTEMA DEL TORRENTE STRONE			
	POST TETTONICO					1.72	PLIOCENE SUPERIORE

Figura 7. Inquadramento geologico-stratigrafico regionale dei depositi quaternari di sottosuolo tratto da [15].

I complessi acquiferi A1 ed A2 sono poi suddivisi con ancora maggior dettaglio, rispettivamente in A1-I, A1-II, A2-I ed A2-II, con A1-II ed A2-II che presentano un'estensione ed uno spessore dei depositi permeabili generalmente inferiore rispetto ai complessi acquiferi A1-I ed A2-I.

L'acquifero confinato sfruttato in Provincia di Ferrara per uso acquedottistico è l'A1-I: i centri di captazione sono ubicati a Stellata, Pontelagoscuro (HERA S.p.A.) e Ro Ferrarese (C.A.D.F. S.p.A.), all'interno o in prossimità di zone golenali dove l'acquifero presenta caratteristiche idrogeochimiche migliori grazie alla ricarica diretta ad opera del Fiume Po [15][9].

Nello studio [9] si ritrova un approfondimento del livello di dettaglio sul territorio della Provincia di

Ferrara; inoltre si rintraccia una analisi che descrive e rappresenta lo stato di salinizzazione dei complessi acquiferi, individuando sia sulle mappe che sulle sezioni la posizione dell'interfaccia acqua dolce/acqua salmastra.

Un'ulteriore interessante riferimento è rappresentato dalle sezioni idrogeologiche profonde elaborate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (SGSS RER) nell'ambito del Progetto CARG (in particolare il Foglio "Comacchio"), scaricabili dal portale webgis-banche dati [11].

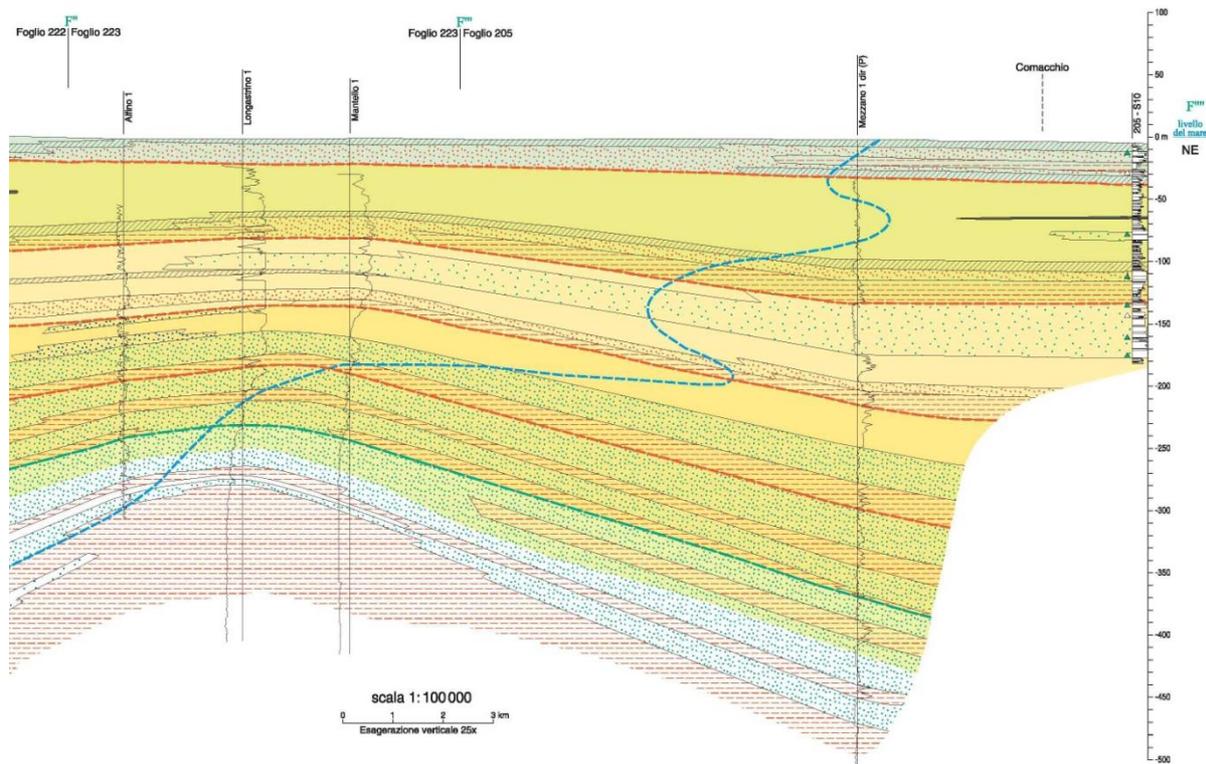
4.2 Successione idrostratigrafica sull'area di studio

Nei pressi dell'area di studio la successione idrostratigrafica può essere derivata dalle sezioni geologiche profonde n. 81 e n.93 (le cui tracce sono rappresentate in Figura 5), in particolare dalla sezione n.81 (riportata in Figura 8) che interessa direttamente l'area di studio (i.e. campo Agosta), ricostruita utilizzando anche i dati stratigrafici ENI-AGIP (tra cui il pozzo Mezzano1-dir).

La sezione illustra l'estensione latero-verticale dei sintemi e sub-sintemi, a cui corrispondono rispettivamente i Gruppi e Complessi Acquiferi, secondo lo schema di Figura 7, definendo inoltre la posizione dei sedimenti poroso-permeabili che costituiscono i corpi acquiferi

Dalla sezione n.81, di cui viene riportato un estratto in Figura 8, si ricava la seguente successione idrostratigrafica:

- Complesso Acquifero A0 (sub-sintema AES8): qui costituisce l'ACQUIFERO FREATICO COSTIERO
- Complesso Acquifero A1-I (sub-sintema AES7): localmente assente
- Complesso Acquifero A1-II (sub-sintema AES7): compreso tra le profondità di circa -105 e -120 m s.l.m. e contenente acque salmastre
- Complesso Acquifero A2-I (sub-sintema AES6): compreso tra le profondità di circa -130 e -170 m s.l.m. e contenente acque salmastre
- Complesso Acquifero A2-II (sub-sintema AES6): situato alla profondità di circa -200 m s.l.m. con uno spessore inferiore ai 10 metri e contenente acque salmastre
- Complesso Acquifero A3 (sub-sintema AES): compreso tra le profondità di circa -250 e -280 m s.l.m. e contenente acque salmastre
- Complesso Acquifero A4 (sub-sintema AES): compreso tra le profondità di circa -300 e -380 m s.l.m. e contenente acque salmastre.



SEZIONE GEOLOGICA PROFONDA

POZZI E CAROTAGGI

- Argille, limi e limi sabbiosi
- Sabbie e sabbie ghiaiose
- Ghiaie, ghiaie sabbiose ed argillose

222-82 Carotaggio 'Progetto CARG'

Campioni di sabbia di provenienza:

- padana
- appenninica
- mista

Alfio T

Log elettrici pozzi AGIP

UNITÀ STRATIGRAFICHE

(a - Elementi proiettati lungo la traccia della sezione dei fianchi vallivi)

- AES₈ - Subsistema di Ravenna
- AES₇ - Subsistema di Villa Verucchio
- AES₆ - Subsistema di Bazzano
- AES - Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore indifferenziato
- AEI - Sistema Emiliano-Romagnolo Inferiore
- IMO - Sabbie di Imola
- Substrato marino mio-plio-pleistocenico
- Area di amalgamazione delle ghiaie (AES indiff.)

Limite di Subsistema e/o di ciclo trasgressivo-regressivo

Limite di Sistema

Interfaccia acqua dolce/salmastra

LITOLOGIE DEI PRINCIPALI AMBIENTI DEPOSIZIONALI

- Ghiaie fluviali
- Sabbie fluviali (provenienza appenninica)
- Sabbie fluviali (provenienza padana)
- Sabbie fluvo-deltizie e di piattaforma indifferenziate (provenienza padana)
- Sabbie deltizie e di piattaforma indifferenziate (provenienza mista appenninica-padana)
- Sabbie di barriera trasgressiva e di cordone litorale
- Argille organiche di palude (piana alluvionale)
- Argille e limi organici di palude-laguna (piana costiera)
- Argille e limi di prodelta e di piattaforma

Figura 8. Estratto della sezione geologica SGSS RER n.81[11].

4.3 Stato di salinizzazione degli acquiferi confinati

La sezione geologica di Figura 8 riporta l'indicazione (linea blu tratteggiata) della posizione dell'interfaccia acqua dolce/acqua salmastra. In effetti tutti gli acquiferi confinati presenti sull'area di studio contengono acque salmastre, in ragione sia della loro genesi (per lo più si tratta di sabbie fluvio-deltizie) e sia della loro vicinanza al mare (ingressione del cuneo marino).

Un'analisi di maggiore dettaglio è stata effettuata utilizzando i dati della Rete ARPAE di monitoraggio delle acque sotterranee [13]. Nello studio citato sono stati acquisiti i dati di tutti i pozzi della rete presenti su un ampio intorno della zona di studio (v. ubicazione dei pozzi in Figura 5) e sono state calcolate le conducibilità elettriche medie sulla serie dati disponibile (Figura 9).

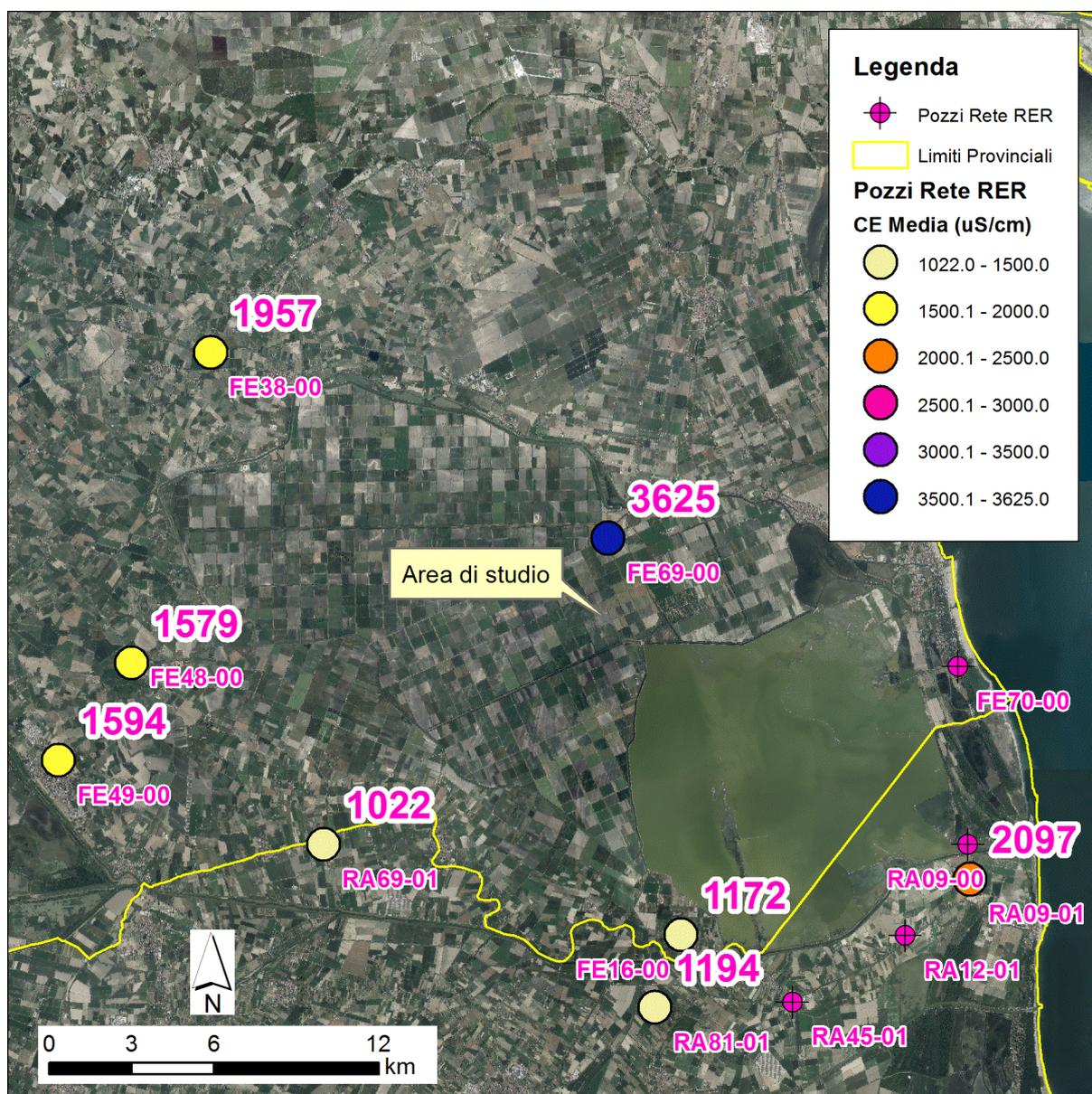


Figura 9. Pozzi della rete ARPAE di monitoraggio delle acque sotterranee [13]: classificazione in base al valore medio di conducibilità elettrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) su tutta la serie dati disponibile.

Il pozzo più vicino al sito di studio è il FE69-00, che presenta al suo interno il tratto filtrato posizionato tra -128 e -145 m dal p.c., ossia all'interno del complesso acquifero A2-I. Su questo si rilevano valori di conducibilità sempre superiori a 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ed un valore medio pari a 3625 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indice di una salinità non trascurabile.

4.3.1 Caratterizzazione dell'acquifero freatico costiero

4.3.2 Premessa

Negli ultimi anni l'acquifero freatico costiero (A0 v. paragrafo 4.2) è stato oggetto di studi approfonditi sull'intero territorio regionale, soprattutto a cura del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (SGSS-RER). Tali studi hanno permesso la definizione di un dettagliato modello geologico-stratigrafico del corpo acquifero, oltre che la valutazione del suo stato di salinizzazione. Nell'ambito di tali studi è stata infatti allestita una rete di monitoraggio composta inizialmente da 30 piezometri (successivamente implementata con altri punti di rilievo), sulla quale è stato eseguito il monitoraggio dei livelli piezometrici e della salinità delle acque sotterranee dal 2009 al 2015. Una sintesi dei primi risultati è disponibile nella pubblicazione Bonzi et al. (2012)[4]. Tutti i dati sono disponibili all'interno del portale webgis-banche dati[11].

4.4 Litologia e geometria dell'acquifero

Le sabbie litorali *s.l.* sono i sedimenti che caratterizzano principalmente l'acquifero freatico costiero: esse si sono sedimentate durante la fase trasgressiva e soprattutto durante quella regressiva, quando nel settore centrale e settentrionale della costa progradavano le foci padane ed appenniniche mentre nel settore meridionale si impostava una sottile piana di sabbia ("*strand plain*"). Da un punto di vista sedimentologico le sabbie litorali *s.l.* risultano assai variabili ed eterogenee, includendo depositi di spiaggia e duna e di fronte deltizio, con intercalazioni locali di depositi più fini di baia, laguna e palude costiera [4].

L'estensione laterale e verticale dell'acquifero può essere ricavata dalle mappe ad isolinee del tetto e del letto, oltre che dalla mappa delle isopache (uguali spessori), di cui si riportano gli estratti sull'area di studio in Figura 10. Sull'intorno dell'area di studio l'acquifero ha il tetto prevalentemente affiorante e la base posizionata a circa 13-15 m di profondità da p.c., anche se presenta notevole variabilità laterale.

Inoltre per l'area di studio può essere presa a riferimento dell'assetto litostratigrafico la sezione n.4 elaborata dal SGSS-RER [11], con orientazione circa O-E, che attraversa la bonifica del Mezzano, passando esattamente per il campo Agosta e poi si dirige circa perpendicolare alla linea di costa lambendo le Valli di Comacchio sul loro limite settentrionale. La sezione viene riportata per

completezza in Figura 11.

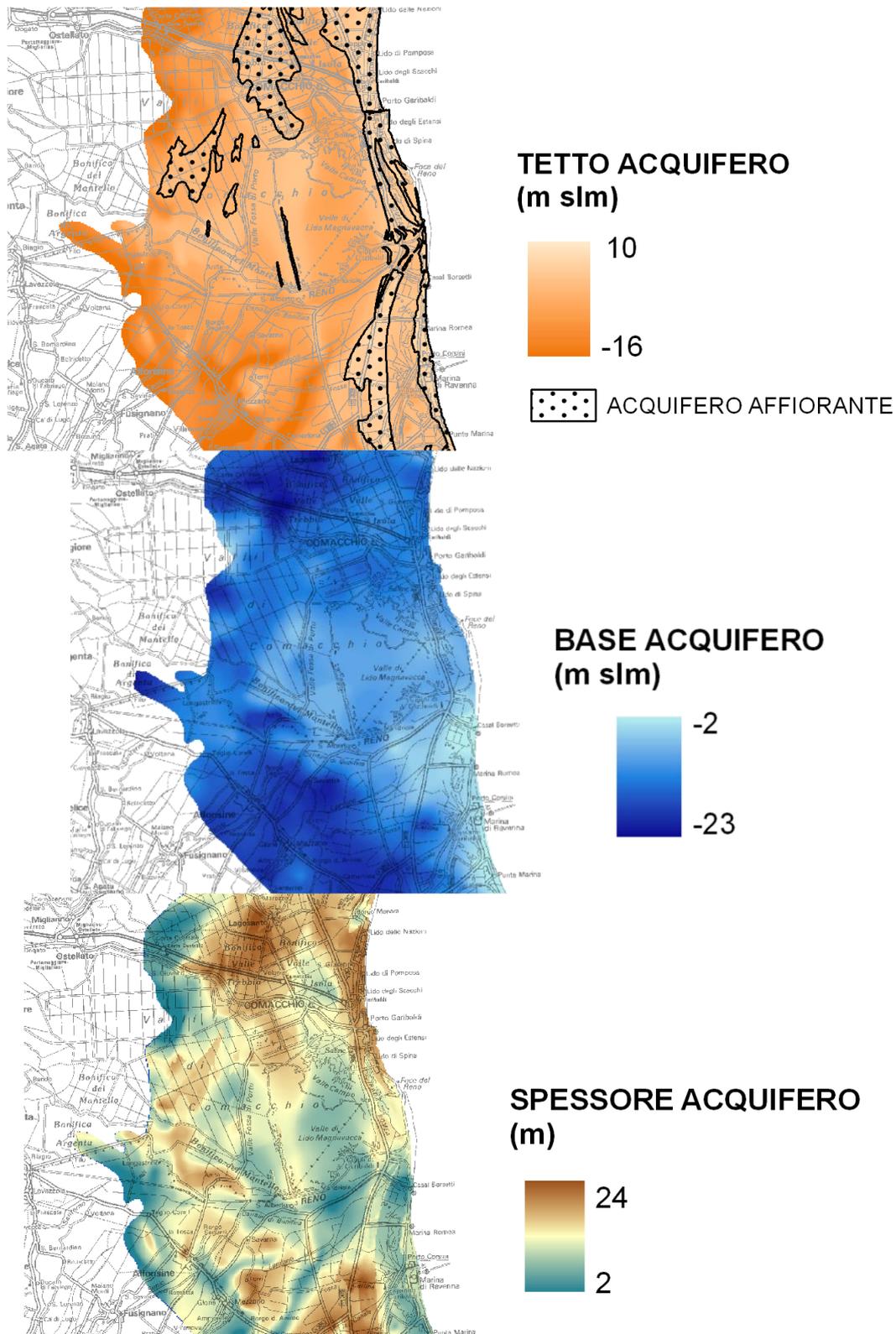


Figura 10. Geometria dell'acquifero freatico costiero; estratti da[4].

I depositi di cordone sono caratterizzati da litologie sabbiose permeabili e costituiscono quindi il

corpo acquifero, mentre i depositi di pro delta e quelli di barriera trasgressiva (colori azzurri) sono caratterizzati da depositi fini a bassa permeabilità e vanno a costituire il corpo acquiclude che delimita l'acquifero al letto.

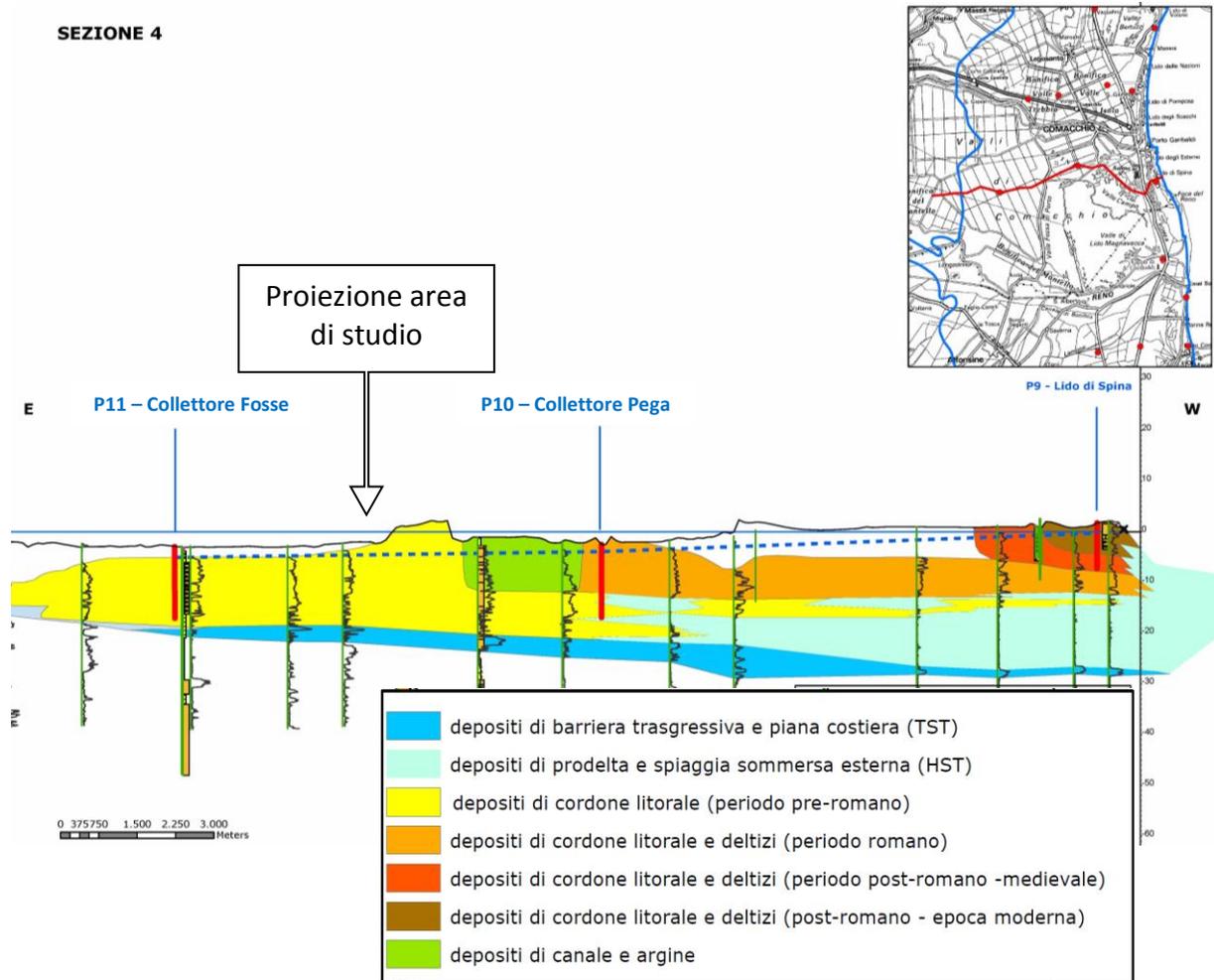


Figura 11. Sezione geologica n.4 sull'acquifero freatico costiero; da [11].

4.5 Stato di salinizzazione

Lo stato di salinizzazione dell'acquifero costiero a scala regionale è stato definito dal SGSS-RER attraverso il confronto di tutti i *logs* di conducibilità elettrica delle acque sotterranee realizzati all'interno della rete di monitoraggio piezometrico.

In particolare è stata analizzata la profondità della zona di transizione tra acqua dolce e acqua salmastra/salata (assumendo un valore di 2,5 mS/cm come rappresentativo della zona di transizione). Il sito oggetto del presente studio ricade all'interno dell'area definita "salata" in quanto sull'intero spessore dell'acquifero l'acqua sotterranea presenta sempre conducibilità superiore ai 2,5 mS/cm, sia nella porzione superiore che inferiore alla zona di transizione (Figura 12).

Per un'analisi di maggior dettaglio è opportuno analizzare i dati del monitoraggio dei singoli piezometri. Da questo punto di vista i piezometri P10 - "Collettore Pega" e P11 - "Collettore Fosse" (entrambi localizzati nelle bonificate Valli del Mezzano) sono particolarmente rappresentativi della condizione del sito di studio, mentre i piezometri P33, P3, P9 e P12 forniscono utili informazioni sul contorno dell'area di studio (v. Figura 5 e Figura 12).

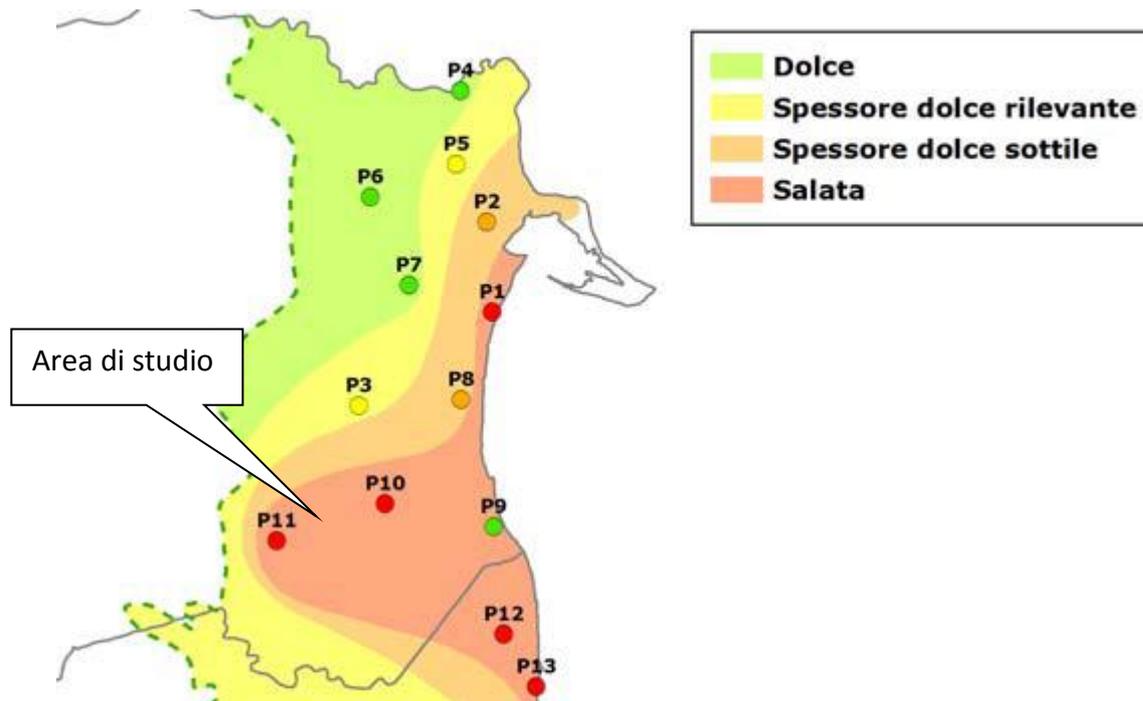


Figura 12. Mappa dello stato di salinizzazione dell'acquifero freatico costiero; estratto da [4].

In Figura 13 sono riportati i profili verticali di conducibilità elettrica delle acque di falda rilevati all'interno del piezometro P11 "Collettore Fosse" dal 2009 al 2011, raggruppati per anno di rilievo.

Si può osservare la presenza costante di una sottile lente di acqua salmastra (conducibilità compresa tra 2 e 10 mS/cm) al di sopra di una colonna di acqua nettamente salata, con conducibilità paragonabile a quella media dell'acqua di mare. La zona di transizione tra le due acque è netta e si attesta a profondità variabili da circa 2,5 a circa 5,0 m sotto p.c. (corrispondenti all'intervallo tra -5,6 e -8,1 m s.l.m.).

L'analisi dell'andamento stagionale dei rilievi suggerisce che la zona di transizione si attesta alle quote minime in corrispondenza dei mesi estivi irrigui e di eventi meteorici significativi ed a quelle massime nel periodo autunno-invernale ed in concomitanza delle fasi siccitose.

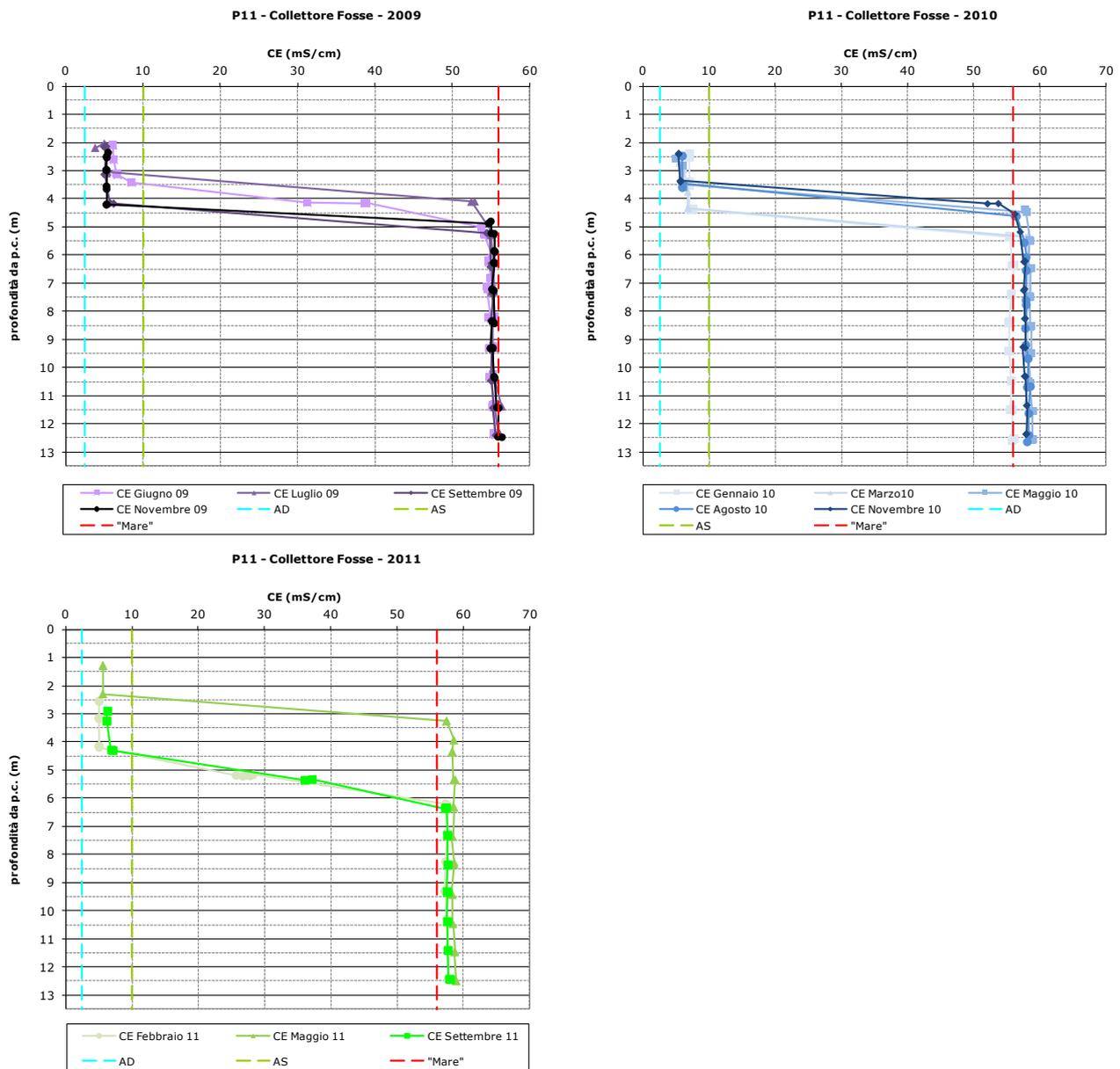


Figura 13. Profili verticali di conducibilità elettrica delle acque sotterranee in P11 (quota p.c. -3,14 m s.l.m.); fonte dati: [11].

In Figura 14 sono riportati i profili verticali di conducibilità elettrica delle acque di falda rilevati all'interno del piezometro P10 "Collettore Pega" dal 2009 al 2014, raggruppati per anno di rilievo.

Si osserva che, a differenza del piezometro precedente P11 "Collettore Fosse", non è sempre presente la sottile lente di acqua salmastra (conducibilità compresa tra 2 e 10 mS/cm) al di sopra della colonna di acqua nettamente salata, con conducibilità simile a quella media dell'acqua di mare. In effetti la sua presenza è rilevabile solo nei rilievi dei mesi di luglio, settembre, novembre 2009 e novembre 2010, laddove la zona di transizione tra le due acque si presenta abbastanza netta e si attesta a profondità variabili da circa 4,5 a circa 5,5 m sotto p.c. (corrispondenti all'intervallo tra -6 e -7 m s.l.m.).

In tutti i restanti rilievi la lente superficiale di acqua a minor conducibilità (seppure salmastra) risulta assente, nonostante talvolta sia possibile individuare una leggera stratificazione all'interno della colonna di acqua salata.

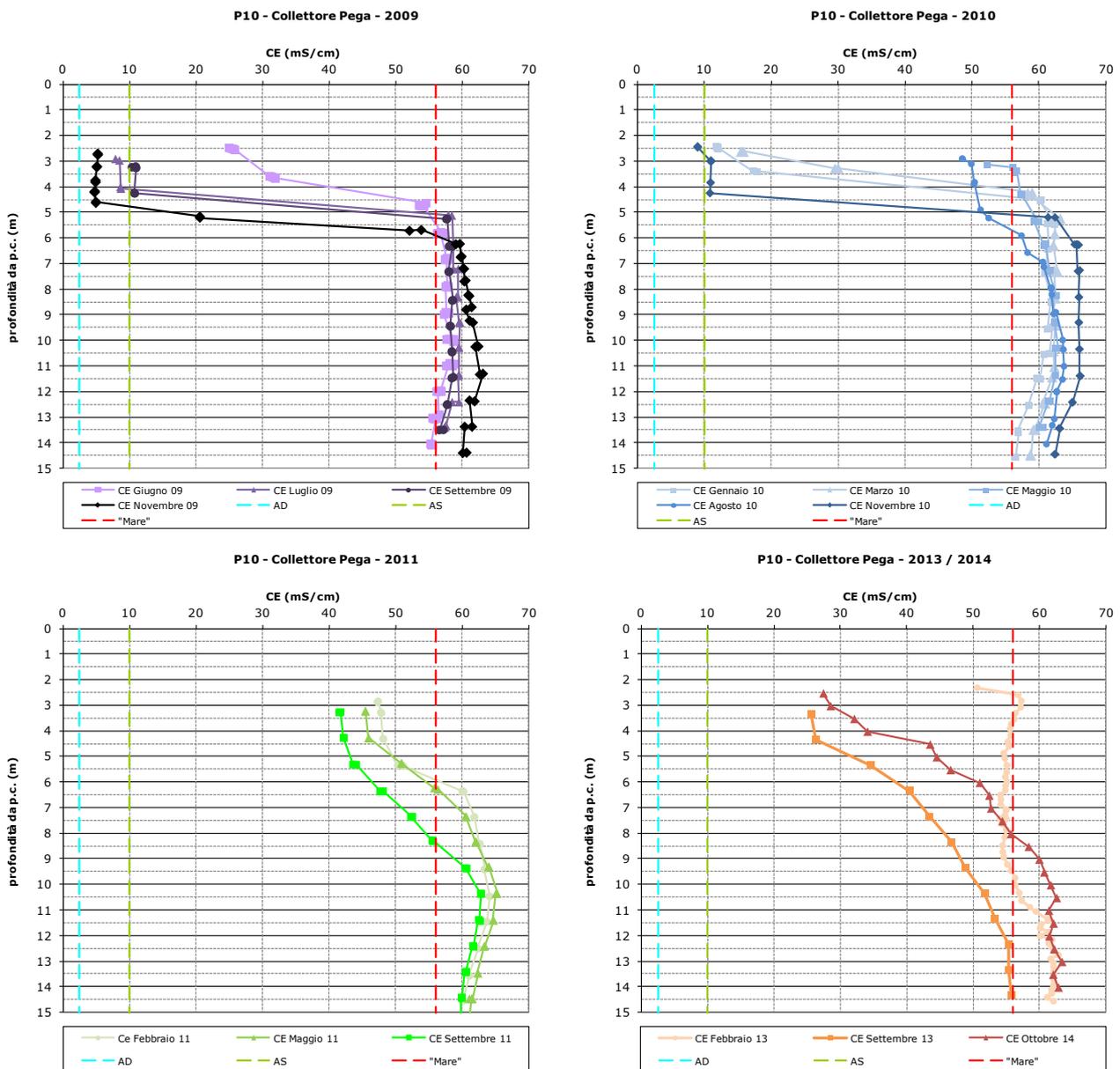


Figura 14. Profili verticali di conducibilità elettrica delle acque sotterranee in P10 (quota p.c. -1,54 m s.l.m.); fonte dati: [11].

Per la sezione geologica n.4 (la cui ubicazione è riportata in Figura 5) è disponibile anche la rappresentazione schematizzata ed interpretata dello stato di salinizzazione nelle due stagioni (Estate e Inverno), elaborata dal SGSS-RER [11] che viene riportata in Figura 15. Nell'intorno

dell'area di studio il livello piezometrico si trova diversi metri sotto il livello del mare e lo stato di salinizzazione è elevato: non si rinviene acqua di falda con conducibilità inferiori a 2,5 mS/cm, mentre localmente può essere presente un sottile strato di acqua a conducibilità comprese tra 2,5 e 10 mS/cm. La maggior parte dello spessore saturo è interessato da acque a salinità prossima a quella dell'acqua di mare (57 mS/cm).

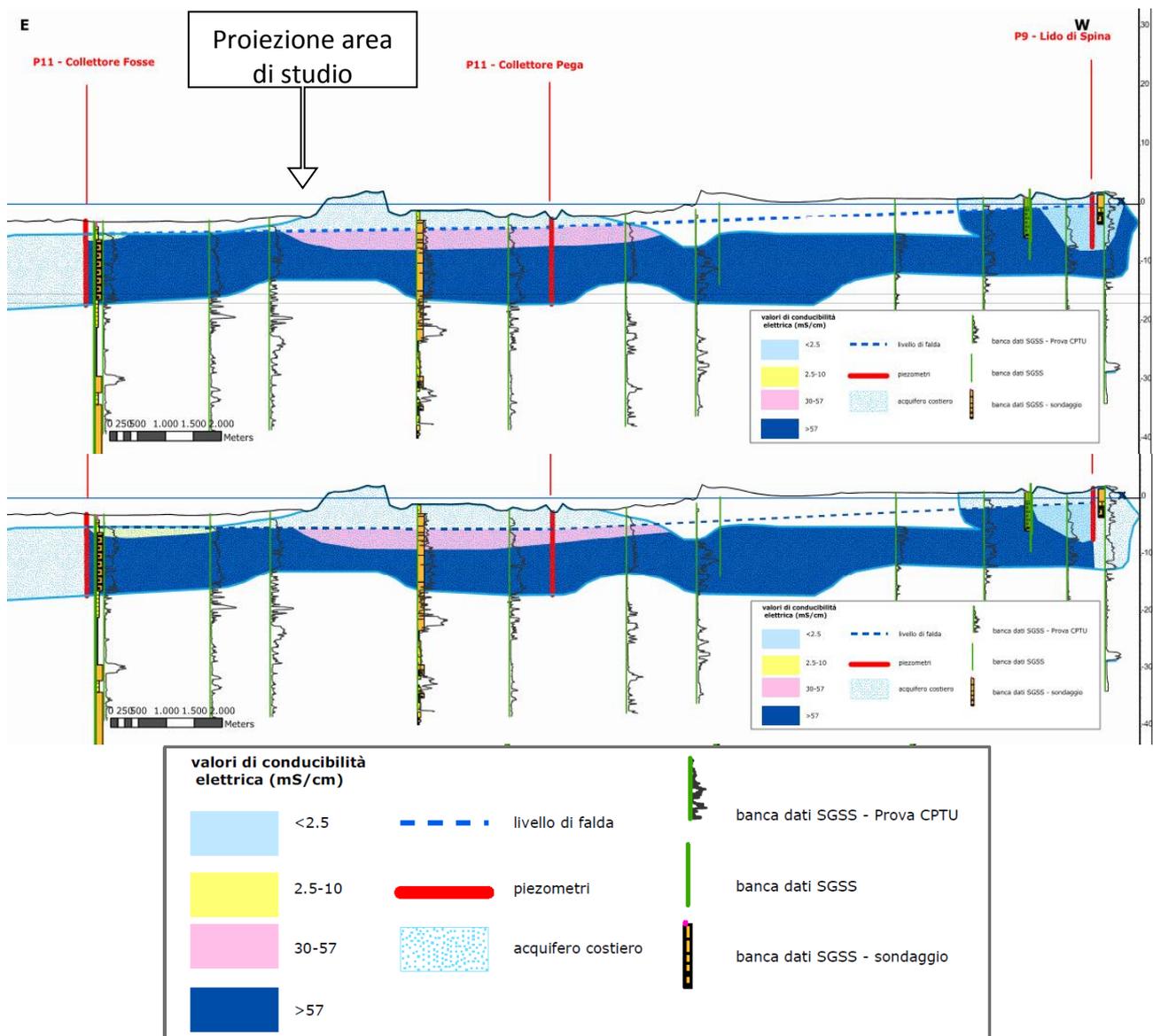


Figura 15. Sezione n.4: stato di salinizzazione dell'acquifero freatico costiero in Estate (sopra) ed Inverno (sotto); fonte dati: [11].

In occasione del presente studio in data 13/6/2016, è stata inoltre effettuata una specifica campagna di misura finalizzata alla verifica dell'andamento delle registrazioni nei piezometri installati da SGSS-RER significativi per l'area di studio (i.e. P10 Collettore Pega e P11 Collettore Fosse).

Dei due piezometri è stato possibile rintracciare il solo P10 "Collettore Pega". All'interno del piezometro P10 è stata eseguita la misura di soggiacenza della falda, che risultava pari a -2.01 m di profondità da p.c. (pari a -3.55 m s.l.m.) ed è stato eseguito un *log* di conducibilità elettrica, i cui risultati sono presentati nel grafico di Figura 17. L'acqua di falda risulta salata su tutta la colonna, con un progressivo aumento dall'alto verso il basso (da circa 47 a circa 53 mS/cm); non è apprezzabile alcuna zona di transizione, confermando quanto già evidenziato nell'analisi del dato storico riferito al periodo 2011-2014.

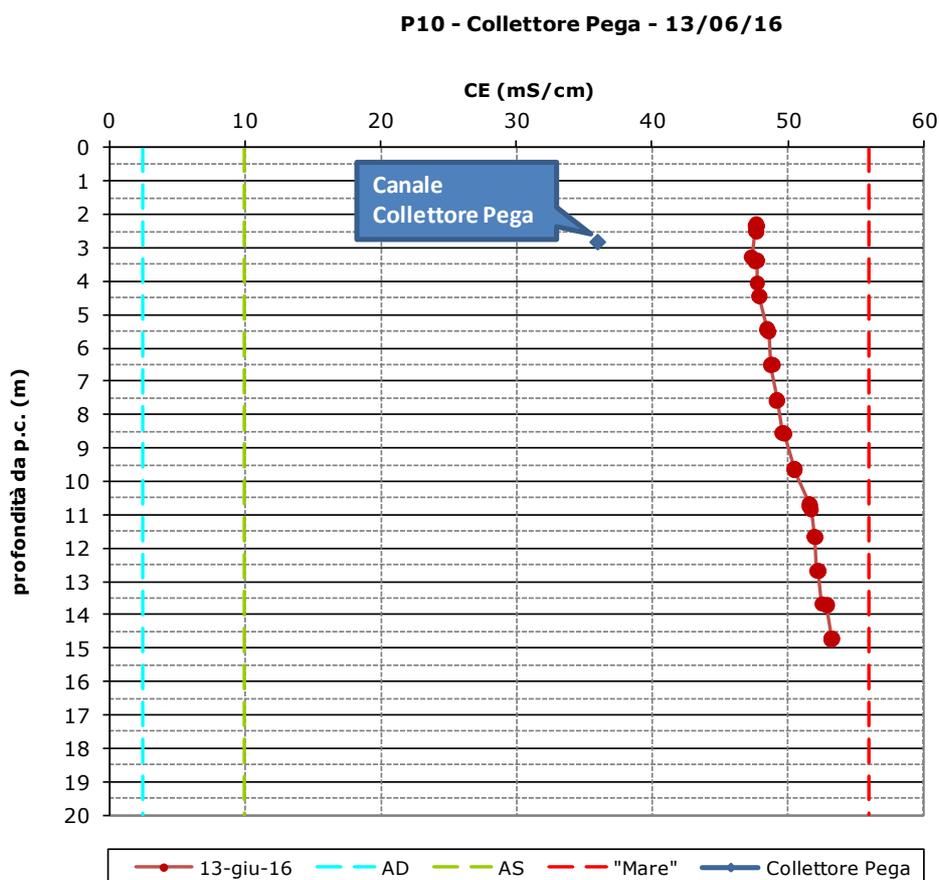


Figura 16. Profilo verticale di conducibilità al piezometro P10 (13/06/2016).

Un'approfondita indagine di caratterizzazione della qualità delle acque sotterranee della falda freatica nell'intorno dell'area di studio è stata eseguita nell'ambito degli studi per la definizione del Quadro Ambientale ed è presentata all'interno dello Studio di Impatto Ambientale [6].

Nel 2006 è stato eseguito il prelievo di 15 campioni d'acqua da pozzi strumentati con piezometri a tubo aperto, che hanno raggiunto una quota di fondo foro compresa tra -3,60 e -5,00 dal piano campagna (ubicazioni in Figura 17).

In Tabella 1 sono riportati i dati di Conducibilità elettrica specifica (alle temperature di riferimento di 20 e 25°C) espressi in $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La conducibilità presenta un ampio intervallo di variabilità (da un minimo di 2344 ad un massimo di 34814 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a @20°C), imputabile sia alla posizione planimetrica dei punti (Figura 17), sia alle diverse profondità dei piezometri; in effetti i piezometri, filtrando i primi metri di falda, intercettano la zona di transizione acque dolci/acqua salate che, nei rilievi esaminati in precedenza relativi ai piezometri installati da ARPAE, hanno mostrato una sensibilità al regime stagionale delle precipitazioni e delle irrigazioni.

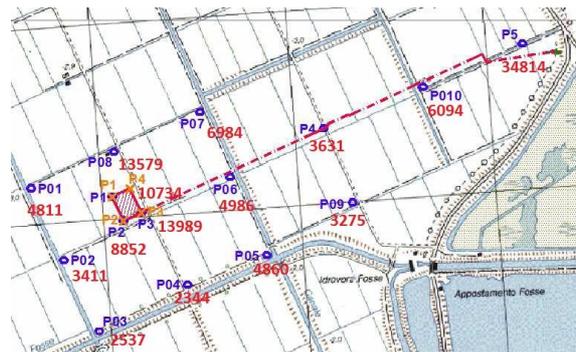


Figura 17. Ubicazione dei piezometri (ID in blu) e conducibilità elettrica @20°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$) (in rosso) rilevata nell'acquifero freatico costiero sull'area di studio; da[6]. L'area campita identifica il Pozzo Agosta.

Tabella 1. Conducibilità elettrica delle acque dell'acquifero freatico costiero sul sito di studio (analisi anno 2006); da Quadro Ambientale[6].

ID piezometro	ID analisi	CE @20°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CE @25°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
P4	603490-001	3631	4034
P10	603490-002	6094	6771
P5	603490-003	34814	38682
P05	603490-004	4860	5400
P06	603490-005	4986	5540
P07	603490-006	6984	7760
P09	603490-007	3275	3639
P01	603490-008	4811	5346
P02	603490-009	3411	3790
P03	603490-010	2537	2819
P04	603490-011	2344	2604
P2	603490-012	8852	9836
P1	603490-013	10734	11927
P3	603490-014	13989	15543
P08	603490-015	13579	15088

4.6 Sintesi

L'acquifero freatico costiero nell'intorno dell'area di studio presenta ad oggi uno stato di salinizzazione elevato su un'ampia porzione di territorio anche notevolmente distante dalla linea di costa attuale. Il solo processo di intrusione marina dalla costa non sembra poter essere responsabile dello stato di salinizzazione delle acque di falda ([4], [10], [8]), bensì occorre considerare anche la più recente storia geologica del sottosuolo caratterizzata da processi (anche recenti) di bonifica di terreni precedentemente invasi dal mare o appartenenti ad ambiti lagunari con presenza di acqua salata. In conseguenza della bonifica, l'utilizzo agricolo del suolo ha comportato una progressiva ricarica di acqua dolce utilizzata a fini irrigui, che ha avviato un processo (lento e progressivo) di sostituzione dell'acqua salata con acqua relativamente dolce negli strati più superficiali dell'acquifero, lasciando negli strati meno superficiali del terreno la presenza di acqua con contenuto salino anche molto elevato.

5 Precipitazioni meteoriche

Il regime delle precipitazioni ha carattere equinoziale, con valori massimi delle precipitazioni in primavera ed in autunno.

Negli ultimi 4 lustri la piovosità ha registrato situazioni alterne e differenziate: infatti ad un primo periodo (anni 1995 – 2000) di notevole piovosità annua, ha fatto seguito una condizione di spiccata siccità, con il culmine nel 2006 che ha fatto registrare una piovosità annua inferiore di circa 30% il dato medio. In questo orizzonte temporale si sono verificati anche scrosci di forte intensità, come quello del Maggio 1996 che ha registrato circa 70 mm di pioggia cumulata nelle 24 ore intorno a Comacchio.

Per caratterizzare il regime pluviometrico della zona sono stati analizzati i dati di precipitazione acquisiti dalla stazione integrata mareografica e meteorologica di Porto Garibaldi, gestita dal Servizio ARPAE e distante dal sito di studio circa 14 km in direzione E (v. Figura 5) nonché la stazione di Volano (caratterizzata da una serie storica più estesa). Quest'ultima è utilizzata a confronto con quella di Porto Garibaldi al fine di valutare la rappresentatività del dato registrato.

I dati disponibili nella stazione di Porto Garibaldi si estendono da Febbraio 2009 ad Aprile 2016; le precipitazioni cumulate mensili sono graficate nell'istogramma di Figura 18.

Sulla serie storica disponibile sono state calcolate le precipitazioni medie cumulate mensili, che sono riportate in Tabella 2, assieme a quelle calcolate sulla stazione di Volano (per la quale è stata scelta la serie storica rappresentativa 2007-2010 parzialmente sovrapponibile con quella

disponibile di Porto Garibaldi). Il confronto, presentato graficamente in Figura 19, mostra differenze sulle cumulate mensili non superiori a 30 mm (si evidenzia che i valori cumulati sono stati calcolati sulla base delle registrazioni senza alcuna analisi di dettaglio in merito alla durata ed all'estensione delle perturbazioni), a fronte di un valore medio annuo del tutto confrontabile.

Pertanto si assume la stazione di Porto Garibaldi (più prossima all'area in esame) quale rappresentativa dell'intorno dell'area di studio.

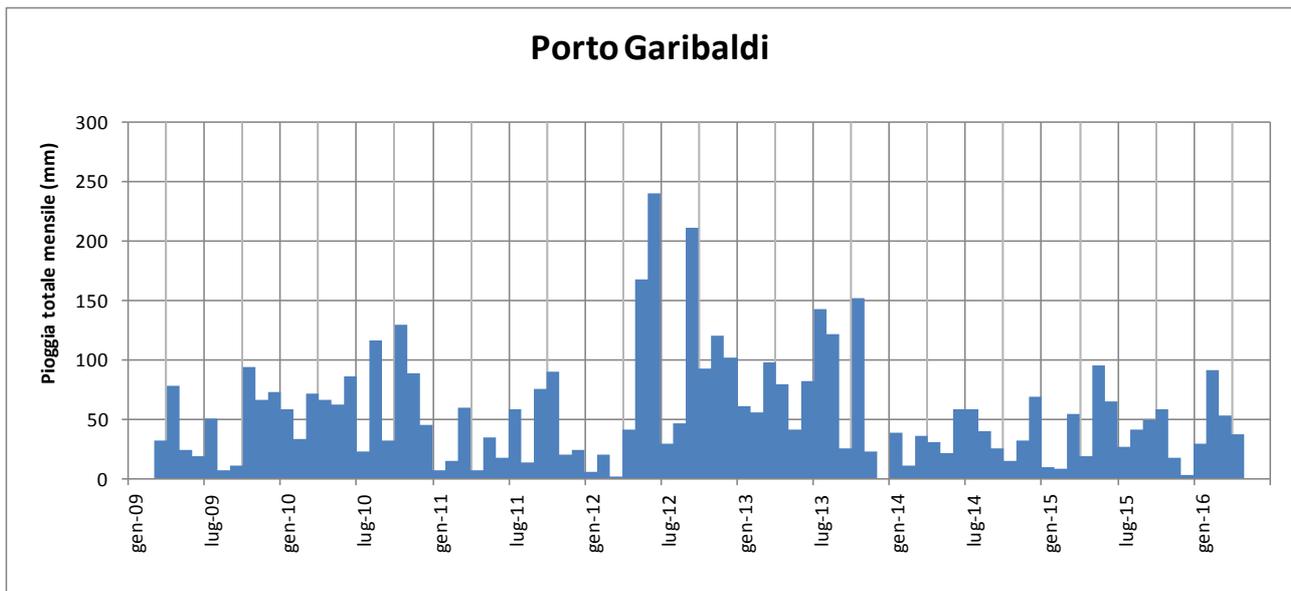


Figura 18. Istogramma delle precipitazioni cumulate mensili alla stazione di Porto Garibaldi.

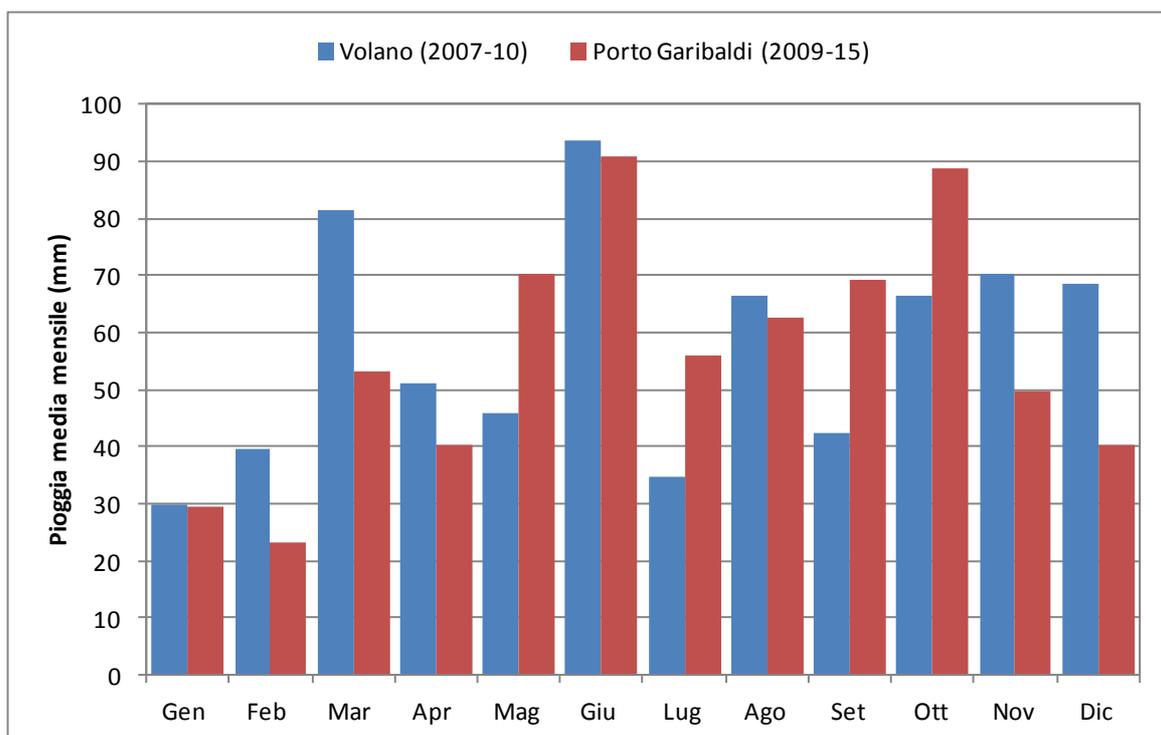


Figura 19. Confronto delle precipitazioni medie cumulate mensili registrate alle stazioni di Volano e Porto Garibaldi.

Tabella 2. Precipitazioni medie cumulate mensili alle stazioni di Volano (anni 2007-10) e Porto Garibaldi (2010-15).

	Volano (2007-10)	Porto Garibaldi (2010-15)
Gen	30.0	29.7
Feb	39.6	23.4
Mar	81.6	53.2
Apr	51.3	40.3
Mag	46.0	70.4
Giu	93.6	91.0
Lug	34.8	56.1
Ago	66.4	62.7
Set	42.4	69.2
Ott	66.6	88.9
Nov	70.2	49.8
Dic	68.5	40.3
Totale annuo	690.8	675.0

6 Corpi idrici superficiali

6.1 Rete idrica consortile

Una trattazione molto dettagliata dell'idrografia dell'area di studio è contenuta nel Capitolo 5.3 del Quadro Ambientale [6]. La rete idrica consortile riveste un ruolo importante, oltre che nel regime idraulico superficiale dell'area di studio, anche in quello idrogeologico dell'acquifero freatico costiero e nel suo stato di salinizzazione, poiché la presenza dei collettori principali di bonifica, veicolando acque (relativamente) dolci, contrastano l'intrusione marina.

Il bacino di bonifica interferente con l'area di studio è formato da due sottobacini, uno facente parte della bonifica del Mantello e servito dall'impianto idrovoro di Gramigne, l'altro derivato dal prosciugamento della parte sud-orientale delle Valli di Comacchio (Mezzano), ricompresi nell'ampio sistema della Bonifica Ferrarese, di cui si riporta in Figura 20 e Figura 21a la suddivisione territoriale nei ex-consorzi di bonifica, la altimetria e la suddivisione dei bacini scolanti per zone di recapito.

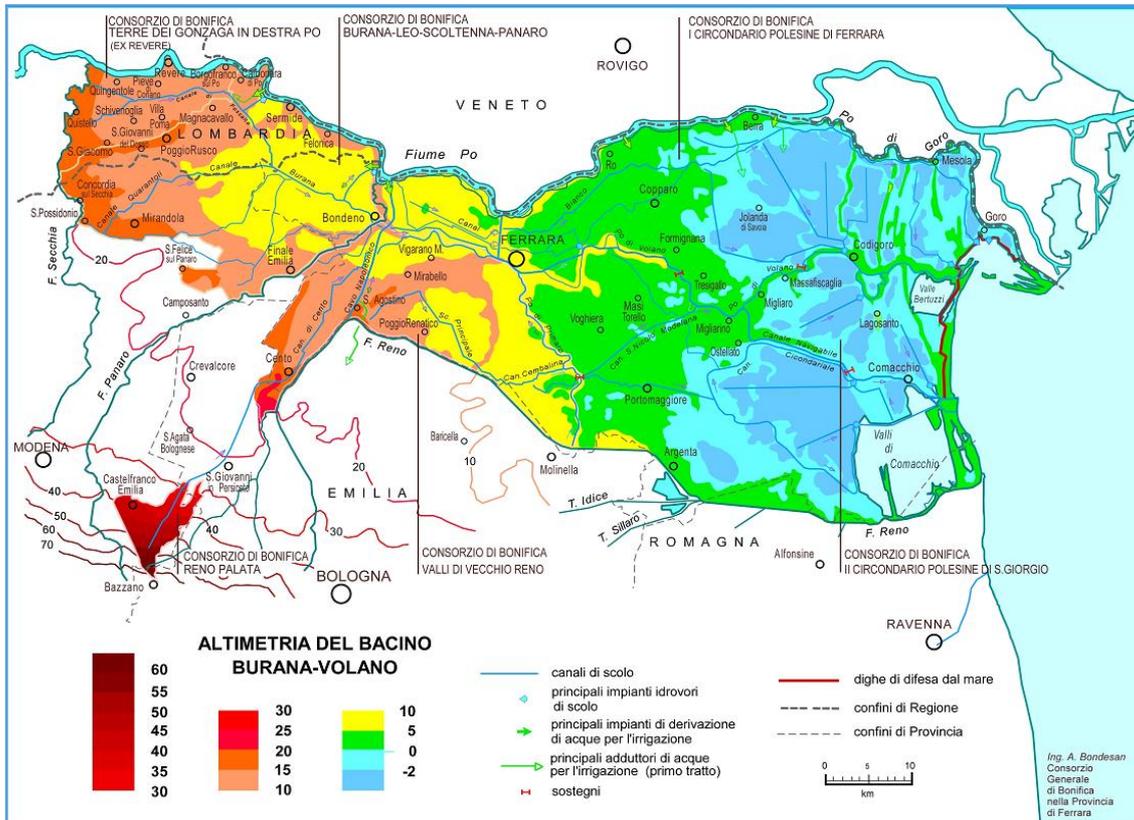


Figura 20 Il sistema di Bonifica Ferrarese (bacino Burana-Volano) e le porzioni gestite dagli ex-consorzi di bonifica (da [7])

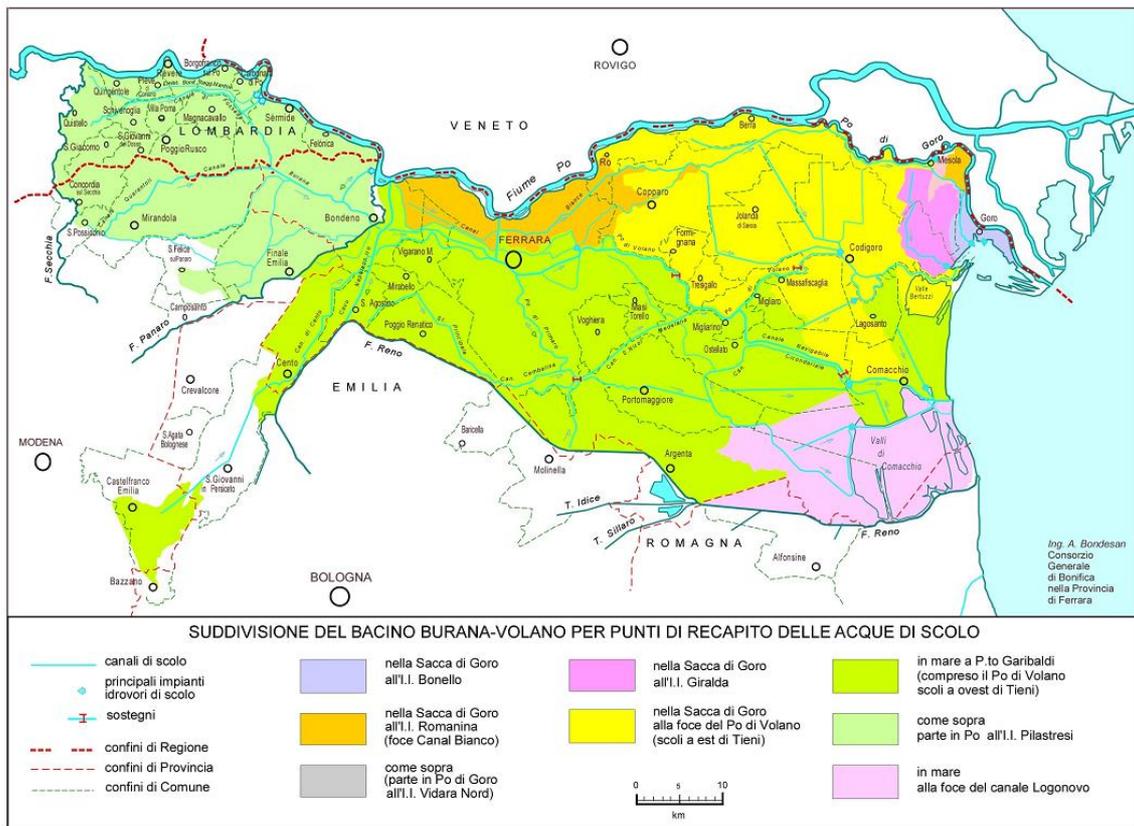


Figura 21 Suddivisione della Bonifica ferrarese per punti di recapito delle porzioni scolanti (da [7])

L'acqua irrigua che alimenta i territori del Bacino Burana Volano viene derivata quasi interamente dal fiume Po, ai seguenti punti di prelievo (da monte a valle):

- Stabilimento Idroforo di Sabbioncello (Quingentole, Mantova)
- Stabilimento Idroforo delle Pilastresi (Stellata di Bondeno, Ferrara)
- Impianto Sussidiario Pilastresi (Stellata di Bondeno, Ferrara)
- Stabilimento Idroforo Capodargine (S.Biagio di Bondeno, Ferrara)
- Stabilimento Idroforo Palantone (Paolecchio di Bondeno, Ferrara)
- Sifoni di Guarda (Ro, Ferrara)
- Sifoni di Contuga (Cologna di Berra, Ferrara)
- Sifoni di Berra (Serravalle di Berra, Ferrara)
- Sifoni di Goro sul Po di Goro (Goro, Ferrara).

Lo stabilimento Idroforo di Sabbioncello, presso Quingentole, preleva una portata complessiva di 20 m³/s da Po; l'acqua, distribuita attraverso l'omonimo canale, serve complessivamente 60.000 ettari di terre coltivate, tra le province di Mantova, Modena e Ferrara.

Lo stabilimento Idroforo delle Pilastresi, presso Stellata di Bondeno deriva 47 m³/sec d'acqua, ad uso agricolo, industriale, e per garantire la navigazione sull'Idrovia Ferrarese. L'acqua derivata viene veicolata attraverso il canale delle Pilastresi che raccorda l'impianto omonimo di derivazione con il canale Collettore di Burana. L'acqua proveniente dall'impianto delle Pilastresi è immessa nel sistema del Po di Volano, per alimentare i Consorzi di Bonifica ferraresi, attraverso una numerosa serie di opere di presa secondarie.

Altre derivazioni sono garantite dai sifoni di Guarda, Contuga e Berra, che hanno una portata complessiva di 42 m³/s.

Gli altri prelievi dal Po sono di entità assai minore, così come marginale (4 m³/s) è la quota destinata al bacino Burana-Volano della derivazione dal Canale Emiliano Romagnolo.

Nel complesso il prelievo idrico annuo da fonti esterne è di: 304 milioni di mc per l'ex I Circondario, 156 milioni di mc per l'ex II Circondario, 43 milioni di mc per l'ex Valli di Vecchio Reno, per un totale complessivo di 503 milioni di mc (dato anno 2004). In Figura 22 si riporta lo schema irriguo della bonifica Ferrarese.



Figura 22 Il sistema di derivazione distribuzione irrigua nella Bonifica Ferrarese (da [7])

I bacini di bonifica più direttamente interessati dal presente studio ricadono all'interno della porzione territoriale appartenente all'ex Consorzio di Bonifica II Circondario, all'interno della quale ricade tutta la parte del territorio provinciale situata tra il Po di Volano, il Po di Primaro, il Reno a valle di Traghetto e il mare.

Le sue acque di scolo affluiscono ai canali Po di Volano, Navigabile, Fosse-Foce, Logonovo e Gobbino, che assieme alle Valli di Comacchio rappresentano i recapiti finali. La porzione Nord-Occidentale del bacino scola attraverso il Canale Circondariale N-O verso l'impianto idrovoro di Valle Lepri e da questo sul canale Navigabile, mentre la porzione Sud-Orientale del bacino scola sul canale Circondariale S-E (che corre in parte sul confine orientale delle Valli di Comacchio) e attraverso l'impianto idrovoro Fosse è recapitato sul canale emissario Fossa-Foce che corre lungo il perimetro settentrionale delle Valli di Comacchio.

Il bacino di Gramigne, realizzato prosciugando una porzione di 2.750 ettari di terreni paludosi e malarici posti a ridosso delle più vaste Valli di Comacchio, fu bonificato grazie ad un decreto del 1912; i lavori di bonifica vennero eseguiti nel periodo 1922-34 e l'impianto idrovoro di Gramigne (Figura 23) fu inaugurato nel 1930.

Il bacino del Mezzano rappresenta la più recente bonifica iniziata nel dopoguerra, ha avuto termine con la costruzione dell'impianto idrovoro di Fosse acque basse nel 1975 (Figura 24 Figura 25).



Figura 23 Impianto idrovoro Gramigne

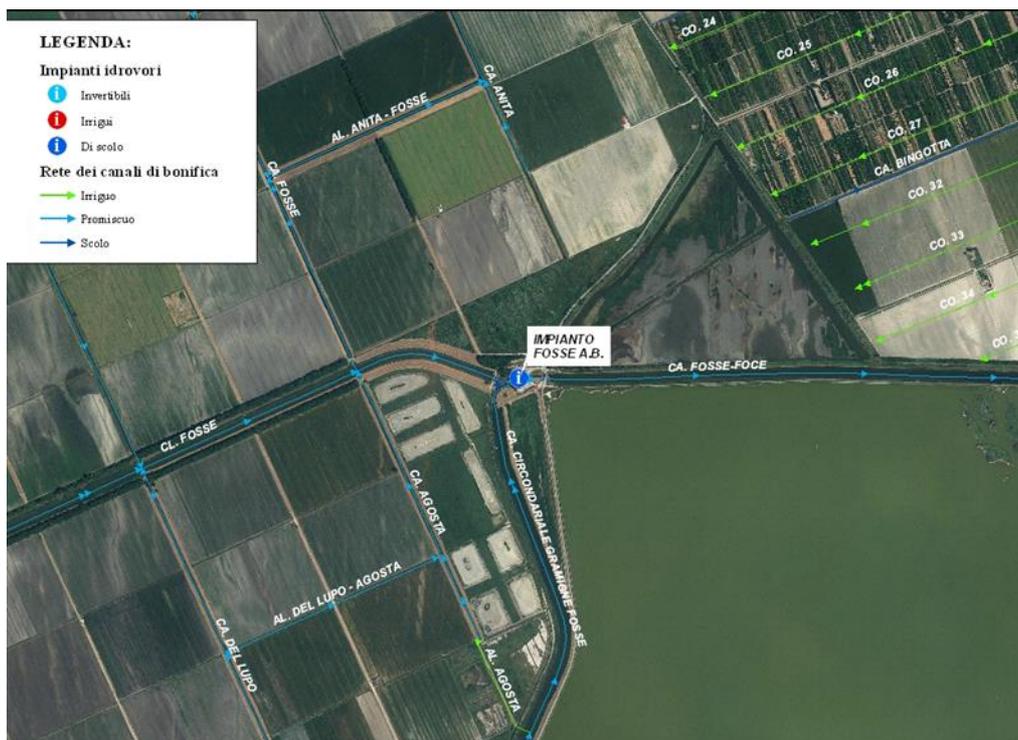


Figura 24 Rete di bonifica in prossimità dell'impianto idrovoro di Fosse



Figura 25 Impianto idrovoro Fosse Acque Basse.

Nel 1998, sono stati completati i lavori di aggregazione delle due bonifiche con la costruzione di una botte sottopassante il Canale Circondariale, che mette in comunicazione il Collettore Gramigne con il collettore Fosse e di un impianto esterno, di supporto a quello esistente presso l'idrovoro di Fosse. La portata complessivamente elaborata dall'impianto è pari a $20.0 \text{ m}^3/\text{sec}$, dotazione occorrente per servire un'area di 9.957 ettari. In casi di piena nel Canale Gramigne, entra in funzione l'Impianto Idrovoro Gramigne (portata $6,7 \text{ m}^3/\text{s}$), che sversa le eccedenze nel Canale Circondariale SE, il quale le convoglia poi all'Impianto Idrovoro Fosse Acque Alte.

Il bacino di Umana, sottozona della bonifica del Mantello, fu realizzato prosciugando una porzione di 3.250 ettari di terreni vallivi ed acquitrinosi, posti a sud delle Valli di Comacchio.

Tale bacino venne classificato di 1a categoria con provvedimento legislativo del 1912, ma, a causa del primo conflitto mondiale, i lavori ebbero inizio e completamento solo nel periodo 1922-34; l'impianto idrovoro di UMANA venne inaugurato nel 1930.

Gli eventi bellici 1940/45 posero fuori servizio gli impianti e determinarono l'allagamento del bacino con acque salmastre, con conseguenti gravi problemi per il successivo dissalamento dei terreni.

Negli anni 1956, 2001 e 2006 la bonifica è stata oggetto di importanti interventi di potenziamento ed ammodernamento delle strutture, nonché di adeguamento della rete scolante.

Gli ettari sottesi all'impianto idrovoro di Umana (Figura 26 Figura 27), a tutt'oggi, assommano a 4.194 e la portata è pari a $10,80 \text{ mc}/\text{sec}$.

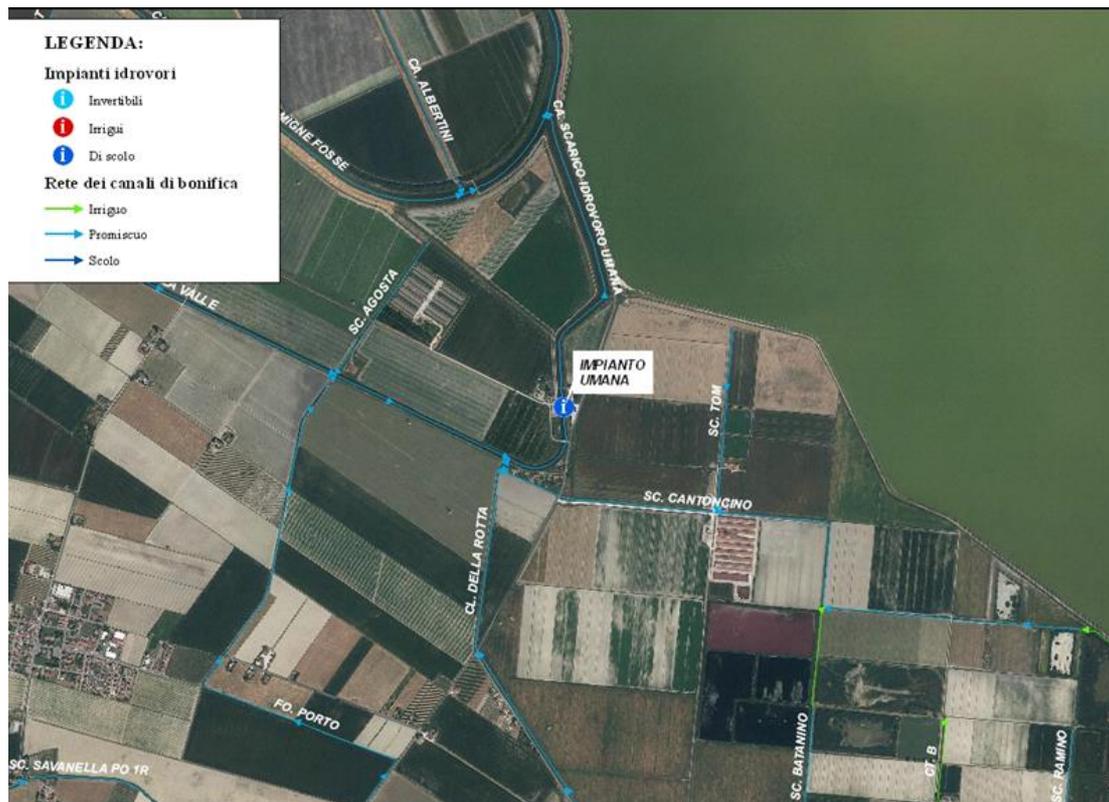


Figura 26 Rete di bonifica in prossimità dell'impianto idrovoro di Umana



Figura 27 Impianto idrovoro di Umana

Il bacino principale Bonifica Pega, che riguarda i territori delle bonificate valli Pega, Rillo e Zavelea, a Nord delle Valli di Comacchio (a sud dell'omonimo Paese), recapita le proprie acque attraverso il collettore Pega all'impianto idrovoro Lepri Acque Basse che scarica sul Volano. In Figura 28 si riporta lo schema dei canali afferenti l'impianto di Valle Lepri.



Figura 28 Impianto idrovoro Valle Lepri Acque Alte e Acque Basse e schema dei canali afferenti

Nella Tabella 3 si riportano i livelli di azionamento degli impianti idrovori principali nel loro complesso ed in particolare quelli asserviti ai compressori Mezzano SE e Valle Pega interessati dal presente studio.

Tabella 3 Quote di azionamento dei principali impianti idrovori a servizio della porzione territoriale del bacino di Bonifica Ferrarese di interesse. Evidenziati gli impianti Fosse A.B. (a servizio del compressorio Mezzano SE) e Lepri Pega A.B. (a servizio del compressorio Valle Pega)

IMPIANTO	ESTIVE		INVERNALI	
	MARCIA	ARRESTO	MARCIA	ARRESTO
	quote azionamento idrovora (m s.l.m.)			
A.A. LEPRI	-0.87	-0.97	-1.07	-1.22
A.B. LEPRI MEZZANO	-4.60	-4.80	-4.70	-4.90
A.B. LEPRI PEGA	-3.47	-3.67	-3.47	-3.67
FOSSE A.B.	-4.60	-4.80	-4.70	-4.90
FOSSE A.A.	-1.08	-1.23	-1.08	-1.23
UMANA	-3.79	-3.99	-3.89	-4.09

Si osserva che le quote di arresto/avvio nel caso di Fosse A.B. oscillano tra -4.90 / -4.60 m s.l.m. (rispettivamente in inverno ed estate). Tali quote sono coincidenti con quelle dell'impianto Lepri Mezzano A.B., che drenano la porzione del compressorio immediatamente a nord del Mezzano SE,

alimentato dal canale di scolo Mezzano. Analogamente l'impianto Lepri-Pega A.B. restituisce quote di arresto/avvio nell'intervallo -3.67 / -3.47 m s.l.m. (indipendentemente dalla stagione). Tra i due comprensori si evidenzia quindi una differenza di quota assoluta in termini di azionamento delle idrovore di poco inferiore 1 m.

Le quote imposte agli impianti di sollevamento si ripercuotono sulle quote idrometriche della rete di drenaggio, e di conseguenza sull'equilibrio imposto all'orizzonte saturo all'interno della porzione territoriale interessata dalla bonifica.

Nella Figura 29 è riportato il cono di subsidenza atteso sull'orizzonte temporale dei 2030 nello scenario "upper" considerato nel presente studio.

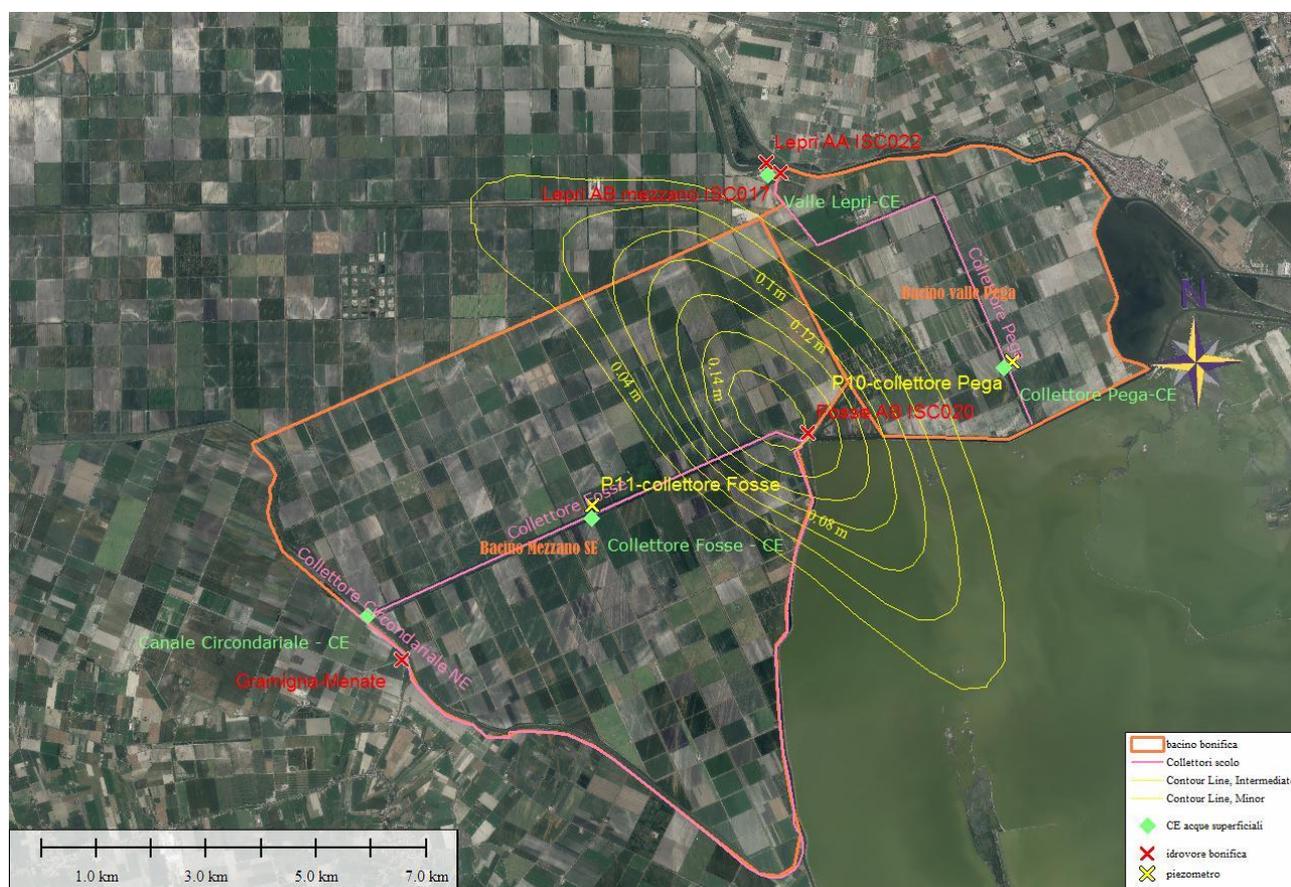


Figura 29 La porzione territoriale interessata dalla subsidenza (scenario upper2030). In evidenza: i canali principali di scolo e gli impianti idrovori a servizio dei comprensori di bonifica del Mezzano Sud-Est e di Valle Pega; i piezometri della rete SSGS-ER ed i punti di misura della Conducibilità Elettrica (CE) delle acque superficiali.

Il comprensorio di bonifica maggiormente interessato dal fenomeno di subsidenza è quello del Mezzano SE, mentre la bonifica Valle Pega e Mezzano SO sono interessati solo marginalmente.

Il massimo abbassamento previsto (17 cm) si registra in prossimità dell'impianto Fosse-Foce. Ipotizzando che tale abbassamento induca una traslazione verticale rigida dell'impianto e delle macchine, questo si traduce in una variazione di uguale intensità sulle quote di marcia/arresto

delle idrovore, prospettando un analogo abbassamento delle piezometriche almeno nei primi tratti dei canali di scolo del comprensorio, ed in particolare del canale collettore Fosse.

In sintesi gli elementi della rete di bonifica più coinvolti dagli effetti di subsidenza sono:

- Idrovora Fossa-Foce; che è in prossimità dell'epicentro del cono di subsidenza;
- Il Collettore Fosse e i suoi canali tributari più prossimi all'idrovora Fosse-Foce (procedendo da est verso ovest) Canale Secondario Fosse, Canale Secondario Filo e Canale Menate (sui canali più occidentali all'interno del bacino l'abbassamento indotto dalla subsidenza diventa inapprezzabile per poi effettivamente annullarsi): la distribuzione irrigua avviene tramite questi canali promiscui, i quali durante il periodo irriguo, solitamente compreso tra Aprile e Settembre, vengono invasati e costantemente alimentati (sino a quote di sicurezza) in modo da consentire alle aziende agricole confinanti di prelevare i volumi d'acqua necessari per l'irrigazione di soccorso delle colture. Il contenimento dell'acqua all'interno dei canali, altrimenti destinata a defluire nel collettore di raccolta Fosse, a zero di bonifica – 4,6 m s.l.m., e quindi all'impianto idrovoro Fosse Acque Basse, è assicurato da paratoie, installate sui loro tratti terminali.
- Il Canale Circondariale di Mezzano (canale Circondariale SE): costituisce nel suo complesso (tratto NO e SE) il canale di gronda (55 km) realizzato all'atto dell'esecuzione della bonifica delle Valli di Mezzano (Bonifica Mezzano Nord-Ovest e Bonifica Mezzano Sud-Est) che ha la funzione di accogliere e convogliare tutte le acque di scolo delle più antiche bonifiche esterne contermini che in precedenza recapitavano direttamente in Valle. Nel suo tratto NO più prossimo all'impianto Fosse-Foce è interessato dal cono di subsidenza. I dati di salinità più recenti disponibili per gli elementi della rete di bonifica dei comprensori più direttamente interessati dalla subsidenza sono quelli rilevati negli anni 2009-10 dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli nell'ambito del monitoraggio dell'acquifero freatico costiero e riportati in Tabella 4 (ubicazione in Figura 29): canale circondariale NW, collettore Fosse.

Sono disponibili dati relativi alla salinità delle acque del reticolo di bonifica sia sul Canale Circondariale NW (serie storica dal 1995 al 2003 rilevati presso l'impianto idrovoro di Valle Lepri Figura 31), sia sul canale circondariale SE, sia sul collettore Fosse, presentati nel grafico di Figura 30.

In occasione del presente studio, in data 13/6/2016, è stata misurata la conducibilità elettrica nelle acque del canale Collettore Pega (ubicazione v. Figura 29), che risultava pari a 35.9 mS/cm, e nel

canale Collettore Fosse, che risultava pari a 4.3 mS/cm, evidenziando valori nettamente in contrasto con quelli del collettore Pega.

Tabella 4. Rilievi di CE (mS/cm a 25°C) sul Collettore Fosse e sul Canale Circondariale Gramigne Fosse [dati SGSS RER].

	12-giu-09	28-lug-09	16-set-09	11-nov-09	20-gen-10	30-mar-10	27-mag-10	9-ago-10	11-nov-10	13-giu-2016
Collettore Fosse	3.09	2.25	1.60	5.89	18.93	15.19	3.24	4.90	7.91	4.30
Canale Circondariale SE Gramigne Fosse	0.73	0.56	0.64	0.69	2.90	1.88	1.67	0.65	1.14	
Collettore Pega										35.9

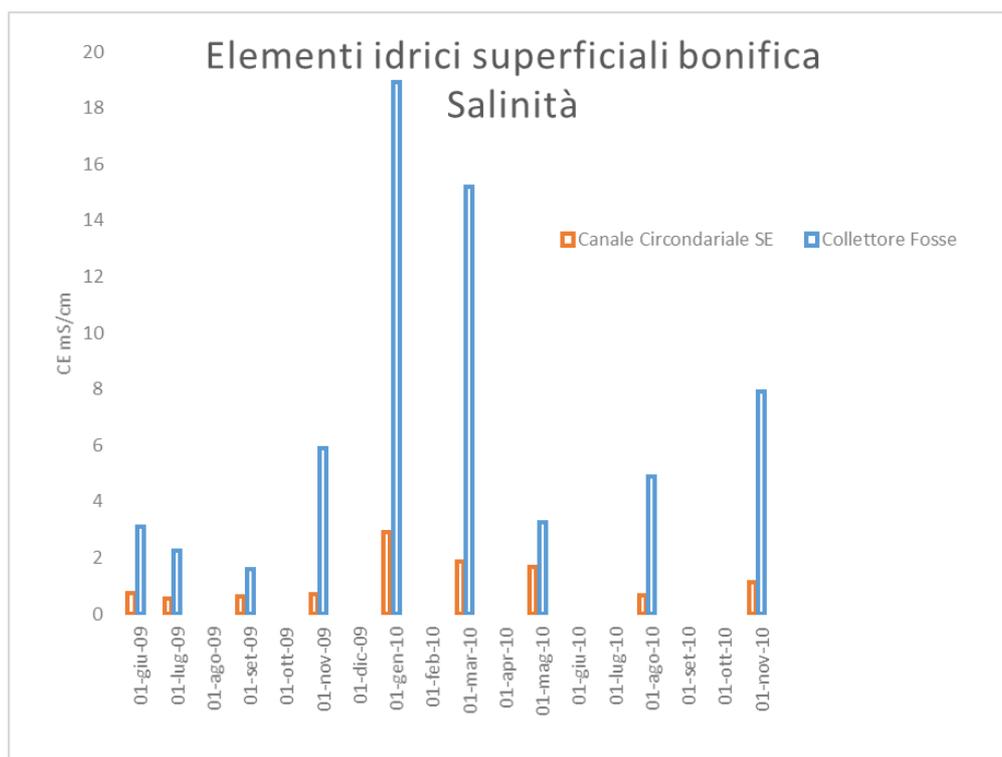


Figura 30. Misure di salinità negli elementi della rete di bonifica.

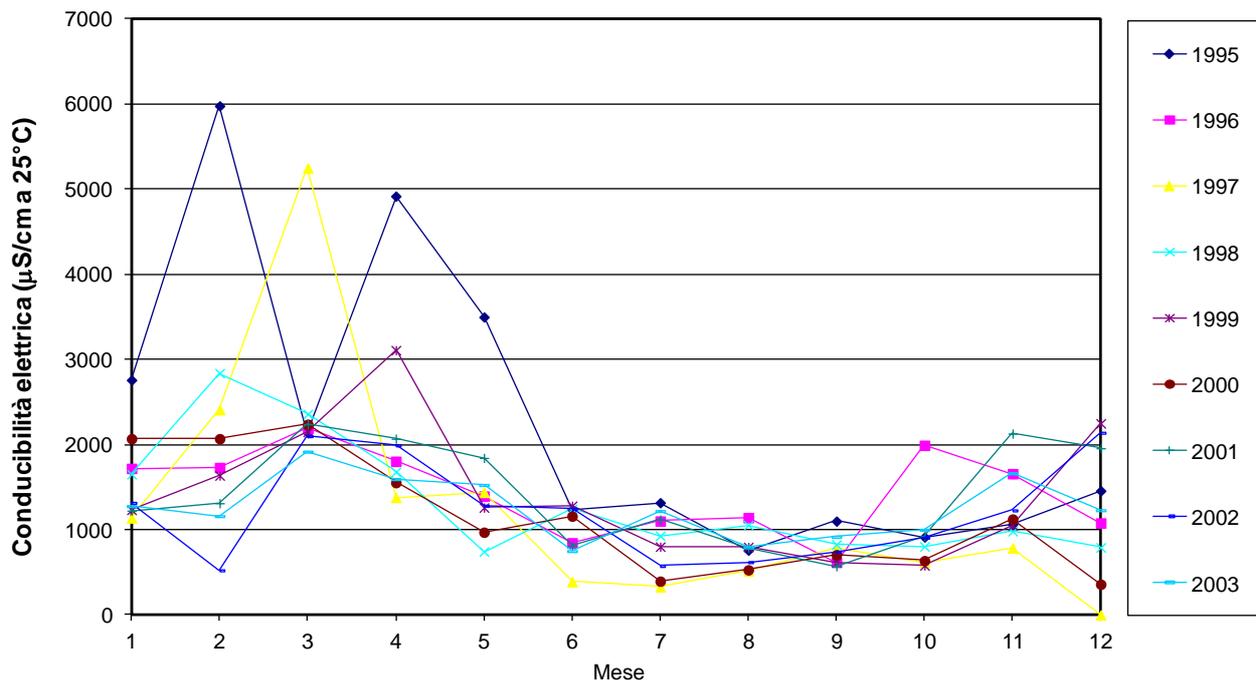


Figura 31. Storico delle misure mensili della conducibilità elettrica nel Canale Circondariale NW – presso impianto idrovoro Valle Lepri (dati ARPAE - 1=mese gennaio).

La CE del Collettore Fosse appare influenzata dall'uso promiscuo (scolo/irriguo); essa risulta variabile da un minimo di 1,60 mS/cm (mese settembre) ad un massimo di quasi 19 mS/cm (mese di gennaio); durante la stagione irrigua i valori sono relativamente più contenuti compresi entro i 5 mS/cm, mentre durante il resto dell'anno la salinità aumenta considerevolmente. Tale andamento sembrerebbe associato alla presenza di acqua dolce veicolata nei canali durante la stagione irrigua, mentre nella stagione non irrigua, il contributo di acqua dolce, a contrasto della concentrazione salina delle acque drenate dalla falda, è associato agli eventi meteorici.

La CE del Canale Circondariale SE, pur manifestando un trend stagionale analogo, è caratterizzata da un intervallo di valori molto più modesto, da 0,56 a 2,9 mS/cm, probabilmente conseguenza della maggiore diluizione dei contributi di falda con le acque drenanti superficiali, essendo il circondariale il collettore principale del comprensorio scolante.

Il collettore Pega, nella unica misura disponibile del 13/6/2016 restituisce valori di conducibilità elettrica superiori di quasi un ordine di grandezza a quelli misurati sul collettore Fosse. Questo scarto è in parte riconducibile alla funzione puramente di scolo del collettore Pega, che impedisce la diluizione delle acque drenate dalla falda con acque dolci veicolate a scopo irriguo. D'altra parte osservando la distanza relativa tra il punto di misura della CE sul collettore Pega ed il piezometro Pega P11 (meno di 200 m v. Figura 32) è lecito supporre che la piezometrica della falda misurata nel P11 (-3.55 m s.l.m.) fosse in equilibrio con il pelo libero nel canale.



Figura 32. Dettaglio planimetrico nell'intorno dei punti di misura sul collettore Pega

Si consideri il concetto di *carico equivalente per acqua dolce* h_f [16]:

$$h_f = z + \frac{P}{\rho_f g}$$

dove z indica la quota del punto all'interno dell'acquifero rispetto il generico riferimento, P rappresenta la pressione nel punto interno all'acquifero, ρ_f indica la densità dell'acqua dolce.

Da cui:

$$h_f = \frac{\rho}{\rho_f} h - \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} z$$

Ove ρ indica la effettiva densità del fluido (dalla precedente equazione risulta che il carico equivalente per acqua dolce è sempre maggiore uguale al carico effettivo). I risultati della correzione da applicare al carico sono riepilogati in forma grafica in Figura 33.

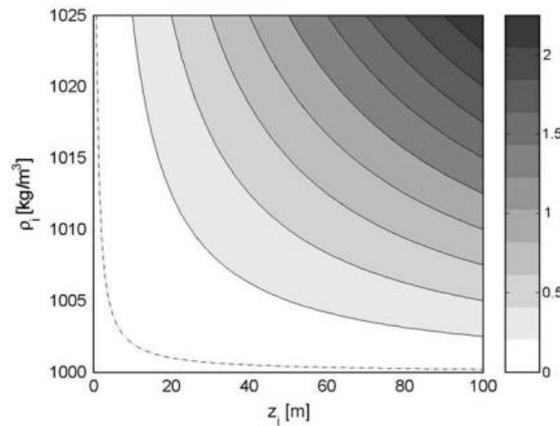


Figura 33. Normogramma a curve di livello (m) per il valore del carico equivalente di acqua dolce (h_f) in funzione della densità effettiva locale del fluido e della rispettiva quota locale all'interno dell'acquifero. (si assuma il valore del carico effettivo $h=0$. (da [16])

Applicando la precedente equazione al caso della misura effettuata nel P10 Collettore Pega il 13/6/2016, ipotizzando all'interno della falda una colonna di acqua "salata" a densità costante pari a 1028 kg/m³ si ottiene un valore per il carico equivalente di acqua dolce di circa -3.2 m s.l.m.

Considerando che le quote di arresto/marcia dell'idrovora sono rispettivamente -3.67/-3.47 m s.l.m., si configurava una condizione di possibile drenaggio dalla falda verso canale, con conseguente salinizzazione delle acque libere del canale. Peraltro il valore misurato di CE pari a circa 36 mS/cm appare del tutto paragonabile a quelli riscontrabili nella serie storica dei dati (Figura 14).

Per quanto riguarda il dato misurato sul Circondariale NW a Valle Lepri, si osservano andamenti del tutto paragonabili alle registrazioni effettuate sul Circondariale SE, con valori di conducibilità quasi sempre al di sotto di 2,0-2,5 mS/cm, con una tendenza a valori maggiori nella stagione invernale rispetto alla stagione irrigua.

6.2 Valli di Comacchio

Le Valli di Comacchio costituiscono un ampio specchio vallivo di oltre 10.000 ettari, la cui profondità media è di poco inferiore al metro ed i cui livelli idrometrici oscillano da circa +0,20 m s.l.m. nei mesi invernali a circa -0,20 m s.l.m. nei mesi estivi, come si può osservare dal grafico di Figura 34 che riporta l'andamento del livello in valle misurato alla stazione idrometrica di Bellocchio (v. Figura 5 stazione gestita da ARPAE). Il funzionamento idraulico delle Valli è completamente artificiale ed i collegamenti con il Mare Adriatico, assicurati da tre canali (da Nord a Sud: Canale Navigabile di Porto Garibaldi, Canale Fosse Foce – Logonovo e Canale Gobbino), sono prevalentemente funzionali alla gestione degli impianti ittici ivi presenti.

Tali oscillazioni attorno al livello medio mare sono peraltro confermate dai dati di livello acquisiti dalla stazione di misura "Fossa Foce" (facente parte della rete di monitoraggio di ArpaE - Ferrara) collocata all'estremità Nord-Occidentale del bacino (Figura 5) e operativa da Marzo 2009 a Ottobre 2010, di cui si riporta in uno stralcio rappresentativo in Figura 35.

Livello idrometrico - Bellocchio Valle Grande

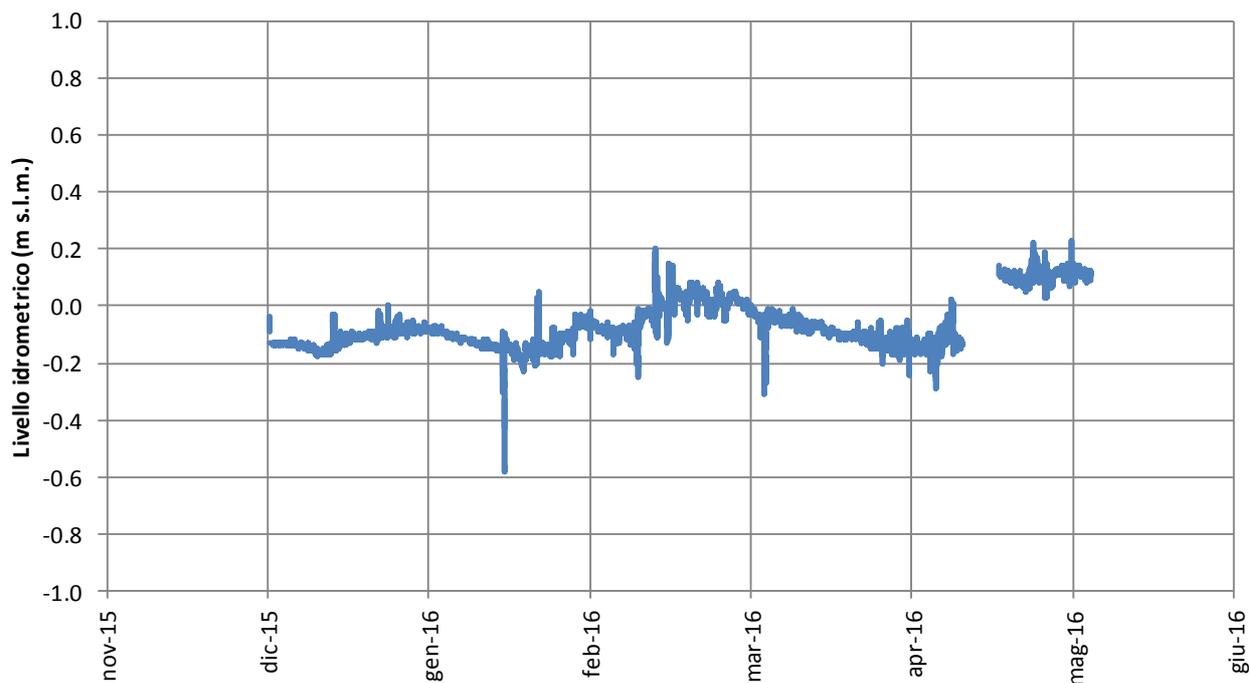


Figura 34. Livello idrometrico stazione di Bellocchio – Valle Grande (dati ARPAE).

Gennaio - Marzo 2010 Mareografo FOSSA FOCE

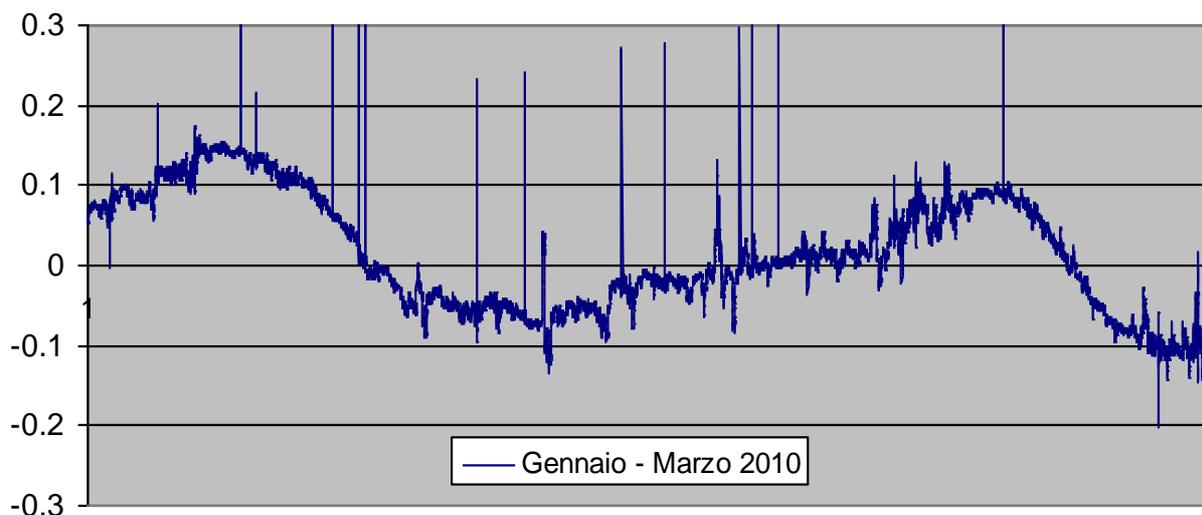


Figura 35. Estratto rappresentativo della serie temporale del livello (in m s.l.m.) registrato alla stazione di Fosse Foce.

La salinità delle Valli di Comacchio viene monitorata in continuo da ARPAE presso la stazione di

Bellocchio, con due sensori, uno posizionato su Valle Grande e l'altro su Valle Campo (ubicazione in Figura 5). Inoltre viene rilevata attraverso prelievi manuali ogni 3 mesi presso 4 stazioni di campionamento (Tabella 5; ubicazione in Figura 5; dati estratti da [14]).

Tutti i dati disponibili sono presentati nel grafico di Figura 36, ove si apprezzano cicli annuali di variazione della salinità, con una fase ascendente da febbraio a settembre/ottobre ed una fase discendente nel restante periodo dell'anno. I valori di salinità variano da minimi di circa 20-30 PSU a massimi di circa 50-60 PSU. Nelle stazioni di Valle Campo si osservano valori più elevati di quelli delle stazioni di Valle Grande, associati alla caratteristica morfologia di Valle Campo che risulta peraltro idraulicamente separata dalla Valle Grande.

I punti di misura VCOM2, VCOM3, VCOM4 e la stazione di Bellocchio (lato Valle Grande) mostrano andamenti e valori della salinità del tutto paragonabili.

Tabella 5 Stazioni Rete ARPAE acque di transizione nelle Valli di Comacchio [14].

Nome Corpo Idrico	Valli di Comacchio	Valli di Comacchio	Valli di Comacchio	Valli di Comacchio
Codice Stazione	99500200	99500300	99500400	99500500
Acronimo	VCOM2	VCOM3	VCOM4	VCOM5
Località	Casoni Serilla-Donna Bona	Sifone Est	Dosso Pugnolino	Valle Campo
Lat UTM*	948151	939640	943709	947393
Lon UTM*	750246	751860	754641	756036

Salinità - Valli di Comacchio

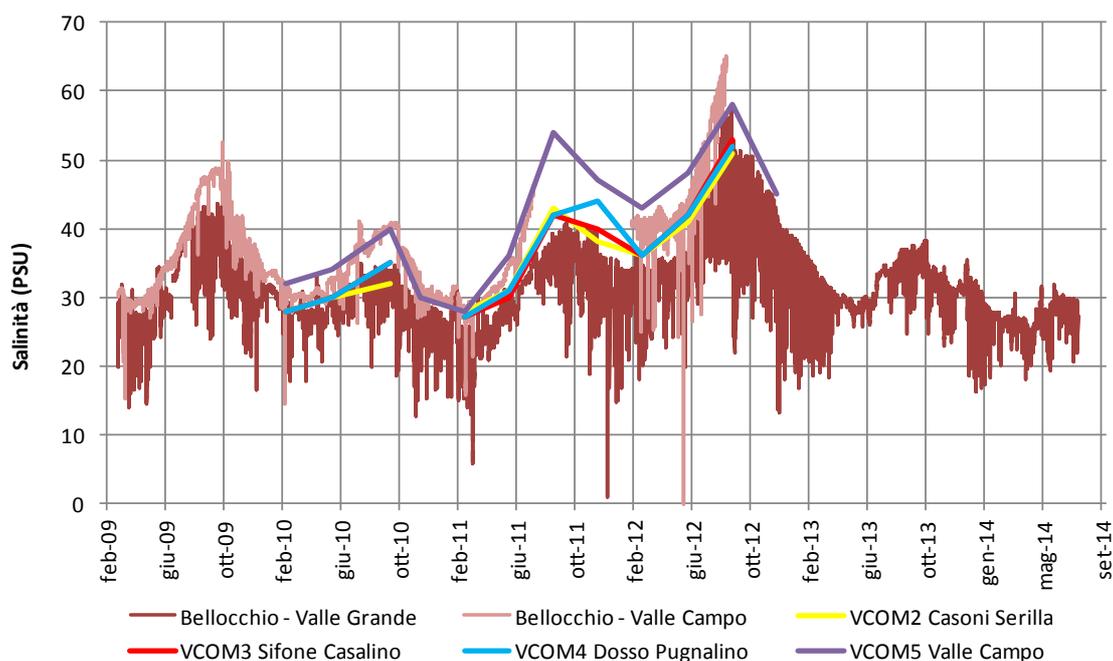


Figura 36. Salinità delle Valli di Comacchio; dati forniti da ARPAE [14].

Lo specchio d'acqua delle Valli rappresenta la più significativa sorgente di acqua salata di alimentazione dell'acquifero freatico, ed è confinante con il vertice del cono di subsidenza atteso. La intrusione di acqua salina dalle Valli è favorita dalla piezometrica prevalente della laguna rispetto ai piani campagna adiacenti (ed in particolare rispetto alle bonificate Valli del Mezzano), ed è limitata dalla bassa permeabilità degli strati limo argillosi che costituiscono il primo orizzonte del catino delle valli.

In occasione di un recente studio [17] è stata condotta una campagna di acquisizione di dati sismici a riflessione al fine di caratterizzare una fascia lagunare estesa circa 5.7 km ubicata lungo il confine amministrativo Ravenna – Ferrara, dove era in progetto (ed ora in costruzione) un rilevato arginale (Figura 37).



Figura 37. Campagna di misura della riflettività del fondale. A sx corografia dell'area indagata. A dx linee di navigazione ed acquisizione dati.

I dati acquisiti sono sezioni sismiche a riflessione ad altissima risoluzione che hanno penetrato la successione sedimentaria fino a 10-15 msec TWT (Two-Way travel Time), una decina di metri circa, fornendo indicazioni su geometria e facies sismica dei depositi sedimentari. Queste sezioni, e la loro interpretazione basata sul metodo dell'analisi sismostratigrafica, hanno permesso di definire la batimetria e le principali unità deposizionali che caratterizzano la parte più superficiale del substrato lagunare. L'interpretazione sismostratigrafica è stata verificata sulla base della comparazione con una serie di sondaggi penetrometrici (CPTu) eseguiti per definire i litotipi dominanti e le loro proprietà meccaniche.

Il rilievo sismico del fondale è stato eseguito utilizzando un sistema sub-bottom profiler a tecnologia Chirp che permette di ottenere una elevata risoluzione ed una buona penetrazione nel substrato attraverso l'emissione di un impulso modulato in frequenza tra i 2-7 kHz. Nella Figura 38

si riportano le interpretazioni dei rilievi per un tratto rappresentativo.

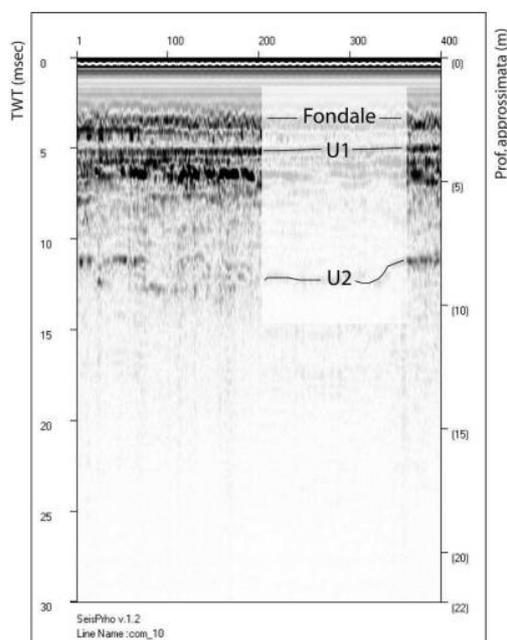


Figura 38. Profilo rappresentativo di riflettività del fondale.

Dal punto di vista della risposta sismica si possono distinguere in generale tre aree, caratterizzate da altrettanti tipi di facies acustica: a) aree tipico-lagunari, caratterizzate da una buona penetrazione del segnale in profondità e massima espressione delle unità deposizionali presenti; b) aree altoriflettive, caratterizzate da un fondale particolarmente "duro", per la presenza di materiale a granulometria grossolana; c) aree con gas superficiale. In quest'ultimo caso, la presenza di gas nei sedimenti fino a livelli superficiali costituisce un ostacolo alla penetrazione in profondità del segnale sismico. L'espressione più comune del gas è la presenza di "finestre" acusticamente sorde che si alternano a zone stratificate con transizioni laterali molto nette.

Sono stati riconosciuti due orizzonti sismici principali (Figura 40), l'*Orizzonte-U1* e l'*Orizzonte-U2*, costituiti da altrettante discontinuità di sedimentazione (*unconformities*), correlate da linea a linea sulla base della facies sismica delle unità sismostratigrafiche individuate.

Orizzonte-U1: si tratta di un riflettore di grande ampiezza e continuità laterale visibile in tutta l'area di studio (Figura 8). Presenta una morfologia molto regolare, subparallela all'andamento del fondale. Mostra una profondità variabile da circa 1 a 2 m al di sotto del fondale.

Orizzonte-U2: si tratta di un riflettore di grande ampiezza e continuità laterale, facilmente correlabile all'interno del bacino. L'*Orizzonte-U2* mostra al contrario di U-1 una morfologia piuttosto irregolare, con la presenza di gradini e dislocazioni anche molto pronunciate. L'andamento morfologico regionale è comunque concordante e subparallelo al fondale e a U2 anche se mette a

contatto unità sismiche molto diverse fra loro per *facies* e geometrie interne.

Unità-1: è delimitata alla base dall' *Orizzonte-U1* e al tetto dal fondale lagunare. Essa appare caratterizzata da depositi acusticamente trasparenti e finemente stratificati che mostrano geometrie piano parallele. Complessivamente l'*Unità-1* forma un drappoggio litologicamente omogeneo, con spessori variabili da circa 1 a 2 metri. La *facies* sismica e le correlazioni con le prove CPTu (Figura 9) mostrano trattarsi di una unità formata da depositi a granulometria fine (silt o argilla) che drappeggia i depositi sottostanti e mostra proprietà meccaniche molto scadenti.

Unità-2: è delimitata alla base dall' *Orizzonte-U2* e al tetto dall' *Orizzonte-U1*; è caratterizzata dalla presenza di riflettori interni di grande ampiezza e continuità laterale, che marcano altrettante discontinuità di impedenza acustica. Le geometrie interne sono molto differenti rispetto a quelle dell' *Unità-1*, con la presenza locale di stratificazione incrociata. L'*Unità-2* si mostra quindi più eterogenea della *Unità-1*, e i forti riflettori interni suggeriscono alternanze tra litotipi a granulometria fine e più grossolana (sabbie) come confermato dalle CPTu (Figura 39).

Unità-3: è delimitata al tetto dall' *Orizzonte-U1*; la base non è visibile. È caratterizzata dalla presenza di depositi omogenei e sismicamente trasparenti, probabilmente costituiti da sedimenti a granulometria fine (silt o argilla).

La successione litostratigrafica si ritiene rappresentativa per l'intero contesto vallivo, evidenziando un primo strato di profondità 1-2 m caratterizzato da materiale fino omogeneo a permeabilità molto modesta, al di sotto del quale si estende uno strato di spessore variabile comunque maggiore del precedente in cui sono presenti litotipi a granulometria fine e grossolana che nel complesso potrebbero restituire una permeabilità relativamente maggiore della precedente.

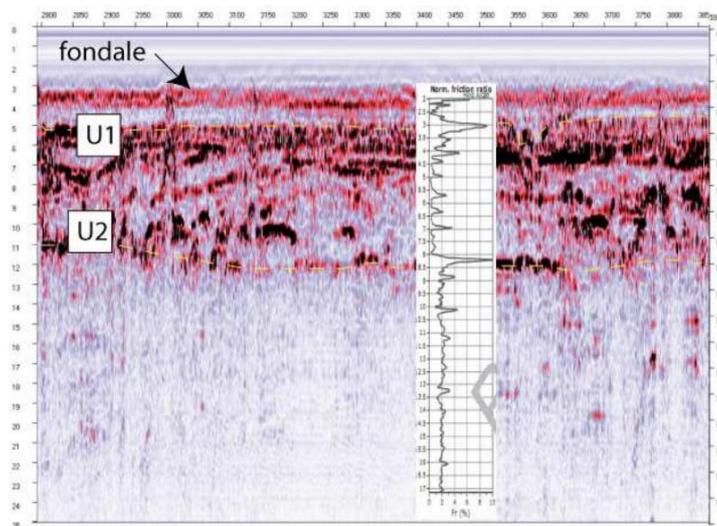


Figura 39. Esempio di correlazione tra i profili sismici e le CPTu.

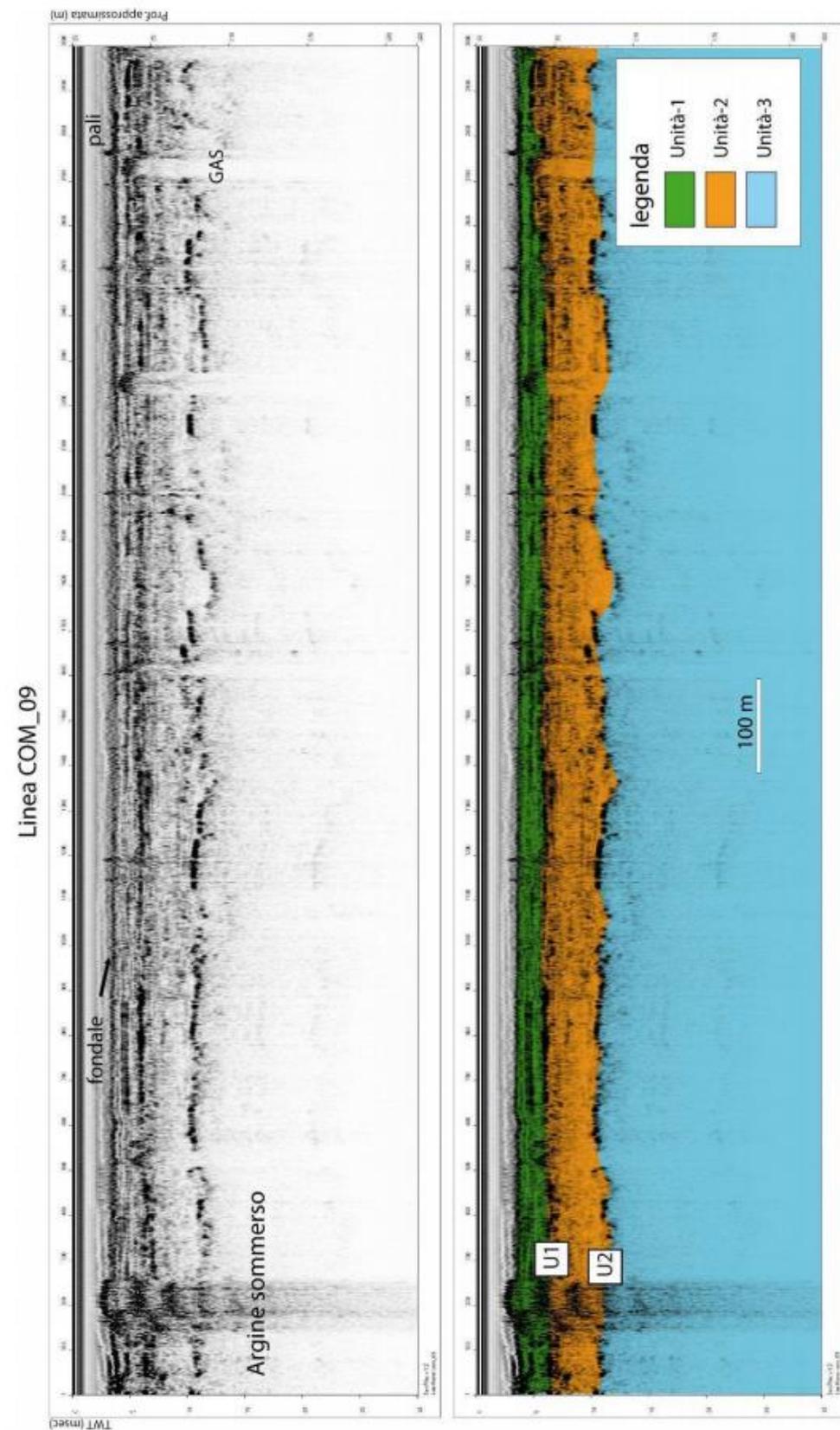


Figura 40. Successione degli orizzonti sismici e delle unità litostratigrafiche individuate.

Per quanto riguarda la configurazione morfobatimetrica delle Valli ed in particolare della loro porzione NO interessata dalla subsidenza, si è fatto riferimento a recenti campagne di rilievo condotte su quella porzione della Valle ed in particolare al rilievo datato anno 2011 (Febbraio 2011 – Marzo 2011) – Batimetria della porzione della Valle grande (Valle Lido di Magnavacca, Lido Fossa di Porto a ovest, Valle Cona a nord) [18] e rilievo di dettaglio della porzione NE (Valle Cona e canale Foce) nell’ambito dello studio [19]. In si riporta una immagine della batimetria ottenuta dai suddetti rilievi.

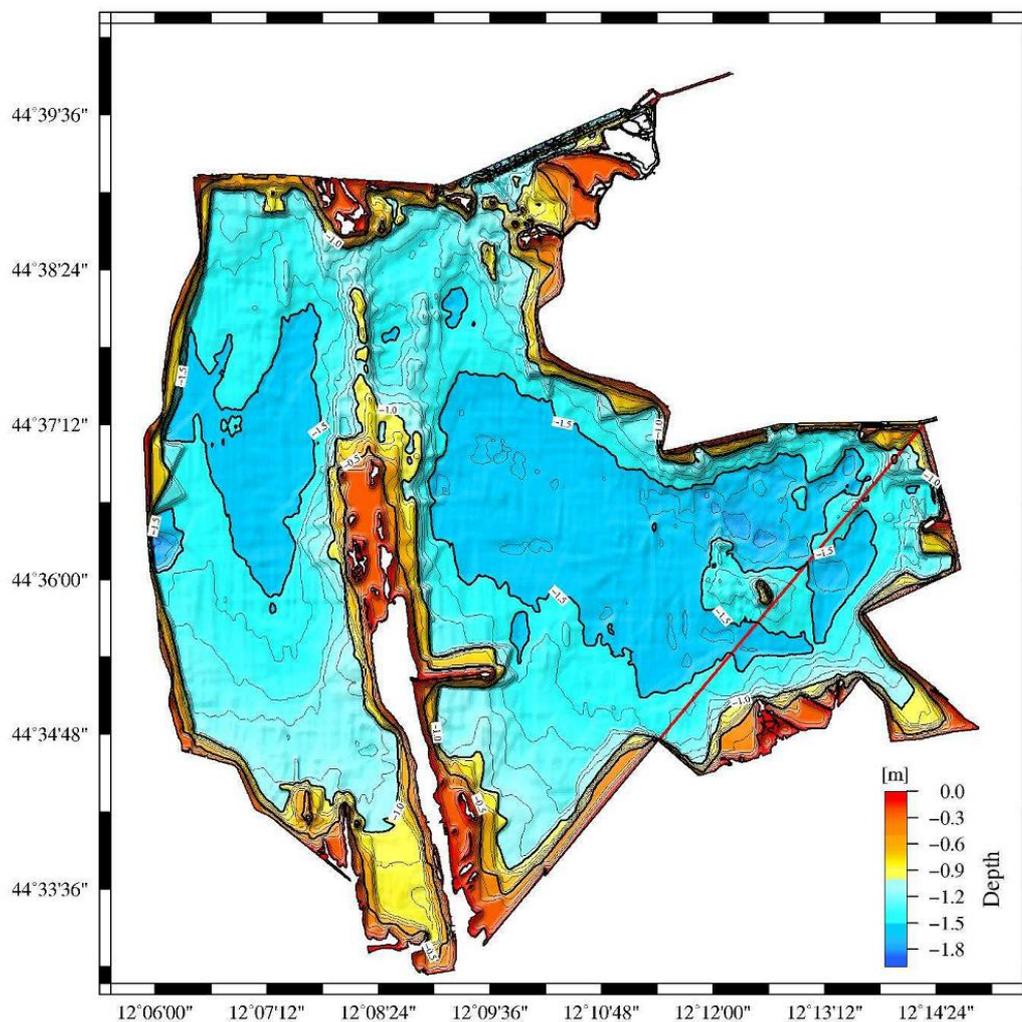


Figura 41 Batimetria delle Valli. Rilievi 2011 ([18] [19]).

7 Modellazione numerica

7.1 Premessa ed inquadramento dei fenomeni di flusso a densità variabile

L’obiettivo della modellazione è la valutazione qualitativa e quantitativa dei potenziali effetti della subsidenza attesa sulla finestra temporale 2017-2030 sullo stato di salinizzazione dell’acquifero freatico costiero.

Nel caso oggetto di studio, la presenza di acqua ad elevato contenuto di sale disciolto (acqua marina) evidenzia una condizione di densità variabile che non è possibile trascurare nella analisi del campo di flusso idrodinamico (Fetter, 1994; [20]).

Nei sistemi idrogeologici a densità variabile il flusso determina una ridistribuzione del soluto e quindi variazioni spazio-temporali delle sue concentrazioni; a sua volta questa ridistribuzione del soluto modifica il campo delle densità quindi i carichi piezometrici e la rete di flusso. Per questo motivo flusso e trasporto sono aspetti non disaccoppiabili nella soluzione delle equazioni di bilancio applicate al dominio.

In termini generali, negli acquiferi costieri si osserva la presenza del cosiddetto "cuneo salino" (Figura 42), ossia di un cuneo di acque salate che penetra l'acquifero caratterizzato da acqua dolce, con estensione crescente verso il basso, a causa della maggior densità dell'acqua salata. Si forma quindi un equilibrio tra le acque dolci "continentali" che dall'acquifero fluiscono al mare e le acque salate "marine" sottostanti. Esse sono separate dalla cosiddetta "zona di transizione": qui la densità dell'acqua può variare, in maniera più o meno repentina, dai valori tipici delle acque dolci (circa 1000 kg/m³) ai valori propri dell'acqua di mare (circa 1025 kg/m³), con un incremento percentuale di carico solido disciolto pari a circa il 2,5%. Questo incremento di densità relativamente basso ha un consistente effetto sull'andamento delle linee di flusso in tali acquiferi.

La teoria del flusso a densità variabile nei mezzi porosi è oggetto di studio da molti anni; qui si fa riferimento ai lavori di Ghyben (1888) [21] e di Herzberg (1901) [22] che ha prodotto la nota legge di Ghyben-Herzberg, riferita allo schema classico del cuneo salino, che viene formulata nel seguente modo:

$$h_s = \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} H$$

Dove:

h_s = pressione idrostatica della colonna d'acqua salata;

γ = densità acqua dolce;

γ_s = densità acqua salata;

H = carico idraulico dell'acquifero.

La posizione e la profondità della zona di transizione sarà strettamente connessa al rapporto tra l'altezza del livello piezometrico ed il livello del mare. La forma cuneiforme dell'interfaccia deriva dalla morfologia non piatta della tavola d'acqua nei pressi del suo scarico a mare: poiché il flusso

dell'acqua di falda è controllato dalla ricarica ed è condizionato dalla trasmissività dell'acquifero, la stratificazione dell'acqua secondo la densità assume un andamento curvilineo.

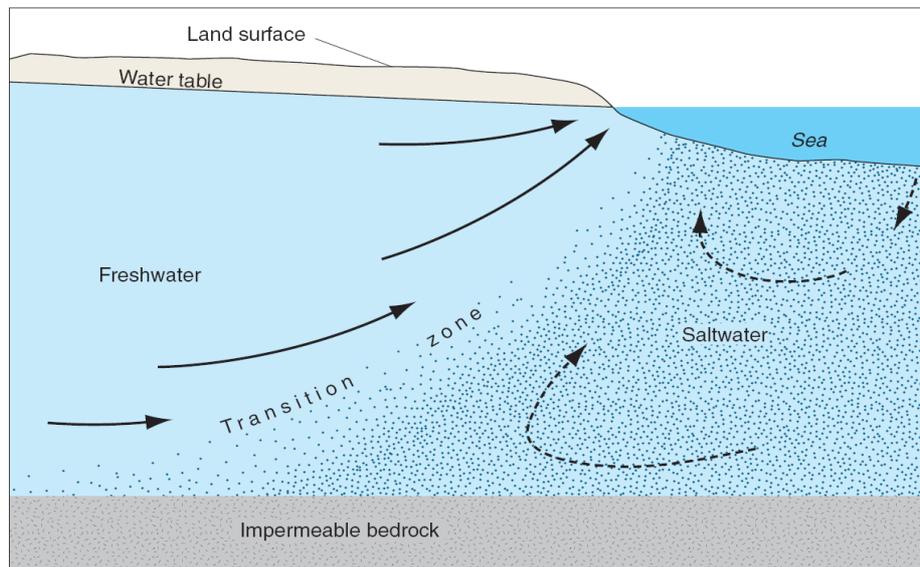


Figura 42. Schema del cuneo salino.

7.1.1 Carichi piezometrici nel flusso a densità variabile

Nei sistemi idrogeologici a densità variabile i carichi piezometrici sono fortemente influenzati dalla densità dell'acqua, come si può ricavare dalla definizione dei tre tipi di livelli piezometrici (o potenziali piezometrici; Custodio & Llamas, 1983 [23] Post et al., 2007 [16]), tutti espressi rispetto ad un livello di riferimento convenzionale (livello del mare):

- *carico puntuale* (h_p), che si definisce come il livello di acqua in un piezometro puntuale (cioè con filtro di spessore infinitesimo) riempito della stessa acqua presente nell'acquifero in corrispondenza del filtro;
- *carico di acqua dolce* (h_d), che si definisce come il livello di acqua in un piezometro puntuale riempito di acqua dolce, indipendente dalla salinità dell'acqua nell'acquifero in corrispondenza del filtro;
- *carico ambientale* (h_a), è il livello di acqua in un piezometro con filtro lungo ed in cui la distribuzione verticale delle densità è identica a quella nell'acquifero.

In un piezometro puntuale filtrato ad una profondità z sotto il livello del mare in acqua salata e pieno di acqua salata a densità ρ_f , il corrispondente *carico di acqua dolce* (Figura 43, B) sarà dato dall'equilibrio di pressioni alla quota del filtro (z_i), secondo la formula:

$$h_{f,i} = \frac{\rho_i}{\rho_f} h_i - \frac{\rho_i - \rho_f}{\rho_f} z_i$$

dove: $h_{f,i}$ è il livello di acqua dolce corrispondente al carico di acqua dolce e h_i il livello misurato dell'acqua con densità ρ_f .

Il carico di acqua dolce risulta sempre maggiore del carico puntuale, finché il piezometro è filtrato all'interno di acqua a densità maggiore di 1000 Kg/m^3 (il livello in A è maggiore del livello in B). Qualora il piezometro sia filtrato in acqua dolce il carico puntuale corrisponde al carico di acqua dolce.

Se un piezometro è filtrato per tutta la sua lunghezza e presenta una distribuzione di densità simile a quella nell'acquifero, il livello di acqua nel tubo permette di determinare il *carico ambientale locale*, h_e (Figura 43, C).

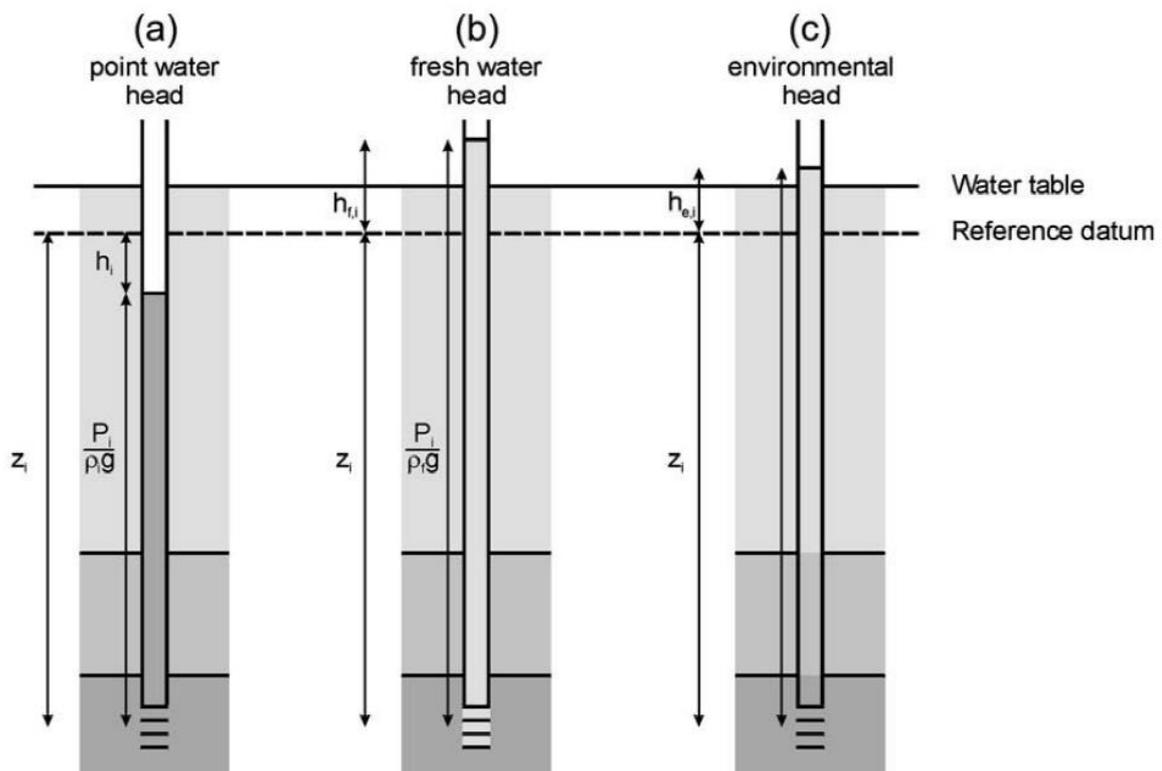


Figura 43. Esempi di: carico puntuale (a), carico di acqua dolce (b) e carico ambientale (c); da [16].

7.1.2 Salinità: parametri e unità di misura

La salinità di un'acqua può essere misurata principalmente in due modi:

- analisi diretta (in laboratorio) del contenuto totale di sali disciolti: la sigla che identifica tale parametro è TDS (acronimo dall'inglese "Total Dissolved Solids"), e l'unità di misura è una

concentrazione, generalmente espressa in mg/l;

- analisi indiretta (in campo o in laboratorio) della conducibilità elettrica specifica, ossia riferita ad una temperatura fissa (generalmente 20° o 25°C), attraverso l'utilizzo di un conduttivimetro da campo o da laboratorio: la sigla che identifica tale parametro generalmente è CE (ovvero con terminologia anglosassone EC "Electrical Conductivity"), e l'unità di misura generalmente utilizzata è $\mu\text{S}/\text{cm}$ o mS/cm .

La relazione tra TDS e CE dipende dal tipo di sali disciolti nell'acqua, quindi dalla sua facies idrochimica; per le acque sotterranee del basso ferrarese è disponibile una correlazione sperimentale ottenuta sulla zona di San Giovanni di Ostellato (FE) [10]:

$$\text{TDS (mg/l)} = 2 \times 10^{-6} \text{CE}^2 + 0,505 \text{CE} - 175,86$$

dove CE è la conducibilità elettrica specifica ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C).

Un'altra unità di misura comunemente utilizzata è il PSU (Practical Salinity Units): si definisce come il rapporto tra la conducibilità elettrica del campione, a 15 gradi ed ad 1 atmosfera, e la conducibilità elettrica di una soluzione di cloruro di potassio; essendo un rapporto tra due conducibilità è adimensionale e spesso è espressa in g/kg. Cosicché una salinità pari a 35 PSU è tipicamente marina, e corrisponde a 35000 mg/L di TDS, mentre una salinità compresa tra 0 e 0,5 PSU è considerata di acqua dolce. Il limite ultimo di separazione tra acqua dolce e acqua salata può essere assunto pari ad 1 PSU alla luce dei dati riportati in letteratura.

Nel modello numerico utilizzato i dati di salinità sono espressi in TDS (mg/L).

7.2 Modello idrogeologico concettuale

La caratterizzazione dell'acquifero freatico costiero, congiuntamente all'analisi dei corpi idrici superficiali che interessano la zona oggetto di studio, hanno permesso di definire il modello idrogeologico concettuale dell'acquifero freatico.

Il mezzo poroso è costituito da sedimenti prevalentemente sabbiosi e sabbioso-limosi, depositi in ambienti di cordone litorale, che in alcune zone sono localmente semi-confinati al tetto da sedimenti limoso-argillosi.

Per tale mezzo poroso la bibliografia disponibile individua valori di conducibilità idraulica (K) prevalentemente compresi nel range $10^{-4} - 10^{-6}$ m/s. Il valore medio di 10^{-5} m/s si può ritenere quindi rappresentativo di un valore medio.

La quota del piano campagna nel comprensorio di bonifica del Mezzano si attesta su quote comprese tra circa -2.0 - -3.0 m s.l.m.. Il livello piezometrico dell'acquifero è costantemente

regolato dal sistema di bonifica, quindi presenta le seguenti peculiari caratteristiche:

- escursioni annuali minime;
- gradienti orizzontali bassissimi (circa 0,03 ‰);
- gradienti verticali significativi, con direzione di flusso dal basso verso l'alto, indotti dal drenaggio operato dalla bonifica (anche misurati sperimentalmente in [8]).

L'acquifero è alimentato da acque a bassa salinità attraverso l'infiltrazione efficace delle acque meteoriche e di irrigazione artificiale delle colture. Di questo effetto si ha testimonianza considerando la sottile lente d'acqua a minore salinità presente in alcune stagioni dell'anno all'interno del piezometro Collettore Fosse (P11).

Lo stato di salinizzazione di questo acquifero è stato ricavato dallo studio e monitoraggio del SGSS RER, da alcune ricerche scientifiche di approfondimento su alcuni siti e confermato dalle analisi delle acque di falda realizzate sul sito di studio. Il piezometro certamente più rappresentativo per l'area di studio è P11 (Collettore Fosse): esso presenta livelli piezometrici ambientali variabili nel ristretto intervallo di -5,1 – -5,2 m s.l.m., corrispondenti a livelli equivalenti d'acqua dolce pari a circa -4,8 m s.l.m. Nella maggior parte dei rilievi disponibili, al suo interno viene rilevato un sottile strato superiore di acqua a minor salinità (5-6 mS/cm, corrispondenti a circa 2400-3000 mg/l di TDS), dello spessore di 1-2 metri, seguito da una ripida zona di transizione (spessore di circa 1 metro) che porta la salinità ai valori medi dell'acqua di mare (56-57 mS/cm, corrispondenti a circa 35000 mg/l di TDS).

La presenza di acque di falda ad elevata salinità (prossima a quella media dell'acqua di mare, a volte anche superiore) non è legata al classico schema di ingressione marina dalla linea di costa (distanze troppo elevate, gradienti bassissimi), ma alla presenza naturale di acque salate/salmastre (ambienti di sedimentazione lagunari/marini) ed alla presenza delle Valli di Comacchio.

La condizione al contorno più prossima all'intorno dell'area di studio è rappresentata dalle Valli di Comacchio, che presentano battenti idrometrici variabili nell'intorno del livello medio mare (con escursioni di circa $\pm 0,2$ m v. paragrafo 6.2) e salinità mediamente pari a quella dell'acqua di mare (con variabilità stagionale legata alle operazioni di chiusura/apertura sul lato mare connesse alle attività ittiche).

Per quanto sopra definito, il modello concettuale dell'acquifero sull'area di studio è rappresentato nello schema grafico di Figura 44, dove sono messe in evidenza le condizioni al contorno del sistema. In via sintetica possiamo evidenziare i contributi di ricarica e di drenaggio del sistema:

- RICARICA:
 - la ricarica per infiltrazione efficace , con una concentrazione posta mediamente pari a 2400 mg/l, ossia coerente con a quella rilevata sul primo strato di acqua misurato nel piezometro Collettore Fosse (nota bene: l'acqua di pioggia presenta salinità prossime a zero, ma questo valore corrisponde ad acque di pioggia e di irrigazione che hanno già attraversato la zona non satura, caricandosi di sali disciolti);
 - le Valli di Comacchio, con una concentrazione posta mediamente pari a 35000 mg/l, ossia acqua di mare;
- drenaggio:
 - il drenaggio operato dalla rete dei canali di bonifica, che a loro volta vedono la piezometrica regolata dagli impianti idrovori della bonifica.

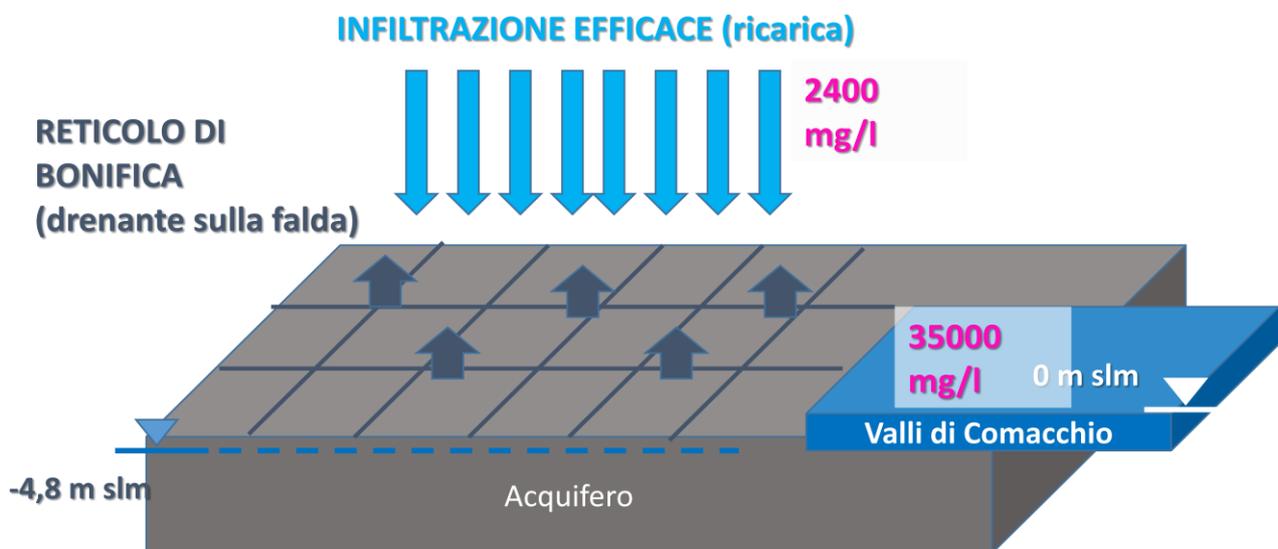


Figura 44. Schema del modello concettuale dell'acquifero freatico costiero nella zona di studio.

7.3 Implementazione del modello idrodinamico

Per lo studio matematico del flusso ipogeo è stato utilizzato il codice numerico FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system), un programma per il calcolo del flusso delle acque sotterranee in problemi 2-D e 3-D, su domini di calcolo orizzontali, verticali, o a simmetria radiale o in problemi a densità variabile del fluido, per condizioni parzialmente o completamente sature, allo stato transitorio o stazionario, ma anche in problemi di trasporto di flusso, massa o calore (Diersch, 2006; [24]).

FEFLOW calcola tridimensionalmente i flussi delle acque sotterranee attraverso il metodo degli elementi finiti.

Il codice risolve le equazioni di bilancio associate al principio di conservazione della massa; il principio di conservazione della quantità di moto il principio di conservazione dell'energia (i.e. I^a principio della termodinamica), nel caso di problematiche inerenti il trasporto di energia e la conservazione della massa dei soluti.

Per problemi di flusso tridimensionale (3D) e bidimensionale (2D), rispettivamente verticale e asimmetrico, le equazioni costitutive, nelle formulazione più estesa, sono espresse da (Diersch, 2005):

$$S_o \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_i^f}{\partial x_i} = Q_p + Q_{EB}(C, T)$$

$$q_i^f = -K_{ij} f_{\mu} \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} + \frac{\rho^f - \rho_o^f}{\rho_o^f} e_j \right)$$

che vengono risolte per le 2 variabili di stato primarie:

h carico idraulico;

q_i^f vettore della velocità *darcyana* del fluido;

e dove:

C è la concentrazione delle specie chimiche disciolte;

T è la temperatura del fluido;

ρ^f, ρ_o^f sono rispettivamente la densità del fluido e la densità del fluido di riferimento;

S_o è il coefficiente di immagazzinamento specifico;

K_{ij} è componente del tensore di conducibilità idraulica;

e_j è il vettore gravitazionale unitario;

f_{μ} è la relazione costitutiva della funzione di viscosità;

Q_{EB} è il termine della approssimazione di *Boussinesq* estesa;

Q_p è il termine relativo ai prelievi ad agli apporti di flusso.

Per risolvere il sistema di equazioni differenziali è necessario definire le condizioni al contorno, comprensive di alcuni vincoli (*constraints*) e, per le simulazioni in transitorio, le condizioni iniziali.

7.3.1 *Dominio e griglia di calcolo*

Lo spessore esiguo dell'acquifero freatico costiero (circa 13 metri sull'area di studio) ed ancor più i pochi centimetri di massima subsidenza (0,17 m) da rappresentare nella simulazione previsionale, hanno necessariamente richiesto la schematizzazione del problema e la definizione di una sezione di modellazione teorica semplificata, che permettesse di riprodurre il modello idrogeologico concettuale e di comparare i risultati delle condizioni attuali con quelli della simulazione previsionale. In altre parole, il dettaglio richiesto sull'asse verticale non era compatibile con la simulazione di una sezione a scala reale, che si estendesse per diversi chilometri.

Pertanto la sezione teorica semplificata è stata modellata su una lunghezza (asse x della sezione) pari a 100 m, trasversale alle Valli di Comacchio.

Le Valli di Comacchio sono rappresentate nella sezione con un avvallamento regolare a forma di rettangolo, di profondità 1,5 m. Lo schema, derivato dalle ricostruzioni batimetriche disponibili (come si può osservare dal profilo batimetrico riportato in Figura 45), rinuncia alla descrizione puntuale della batimetria che ai fini del presente studio e delle modellazioni idrodinamiche appare ininfluenza.

La sezione presenta un massimo spessore 16 m (da quota 0 m s.l.m. a quota -16 m s.l.m.).

La profondità della base dell'acquifero sull'area di studio è stata derivata dalla sezione 4 del SGSS-RER (presentata in Figura 11 e già descritta nel testo).

Inoltre è stata ulteriormente verificata attraverso l'analisi delle prove geognostiche RER sull'area disponibili sul geoportale cartografico regionale [11]: si tratta principalmente di prove penetrometriche con piezocono (CPTU), di profondità circa 30-35 m da p.c., realizzate a fine anni '90 nell'ambito del progetto CARG. Le due prove geotecniche CPTU più prossime al campo Agosta sono presentate in Figura 46. L'estensione verticale dell'acquifero sino alla profondità di circa 13 m da piano campagna è facilmente ricavabile, sia dall'andamento di Fr (Friction ratio), di Fs (attrito sul manicotto), e Qc (resistenza alla penetrazione della punta), che da quello delle pressioni interstiziali (U), che sono in equilibrio con l'andamento lineare del carico idrostatico all'interno di acquiferi sedi di falde idriche.

Considerando una quota del piano campagna mediamente pari a -3 m s.l.m., se ne ricava una profondità del letto dell'acquifero a -16 m s.l.m.

From Pos: 746306.033, 4949044.905

To Pos: 749232.277, 4945439.018

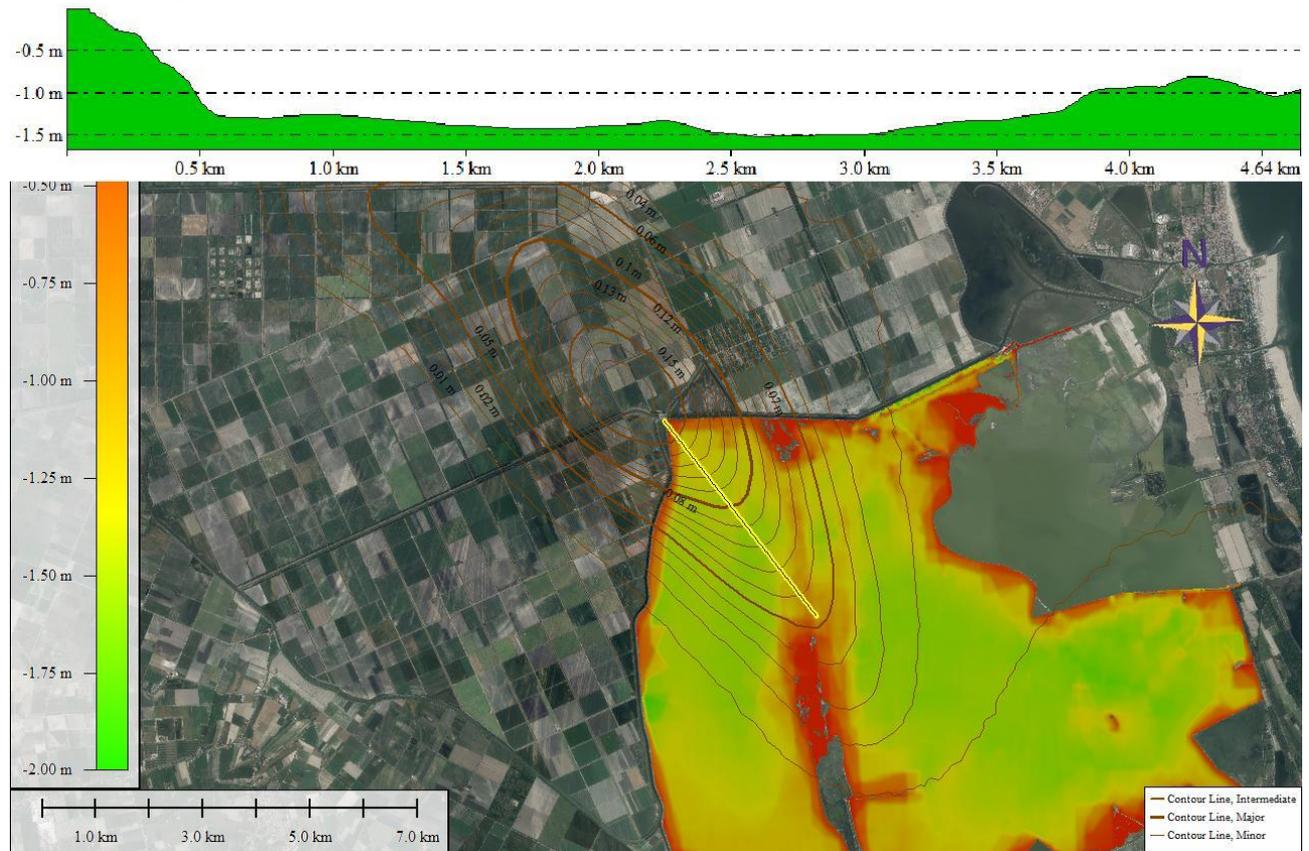
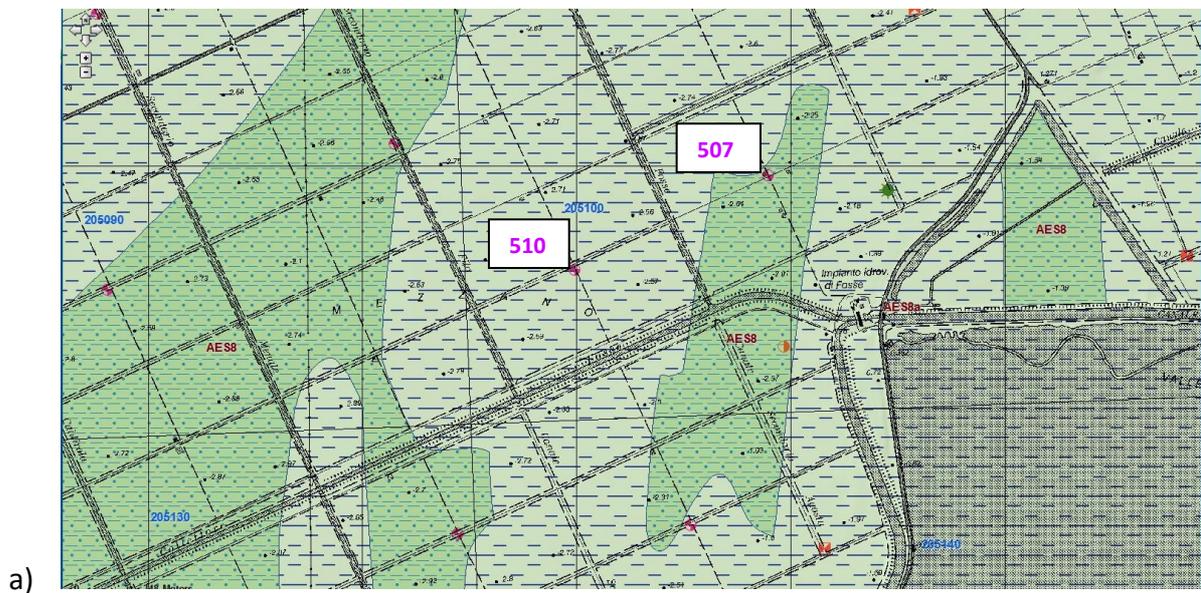


Figura 45. Batimetria del fondale delle Valli di Comacchio e profilo batimetrico lungo una sezione orientata parallelamente all'asse maggiore dell'ellissoide di subsidenza.



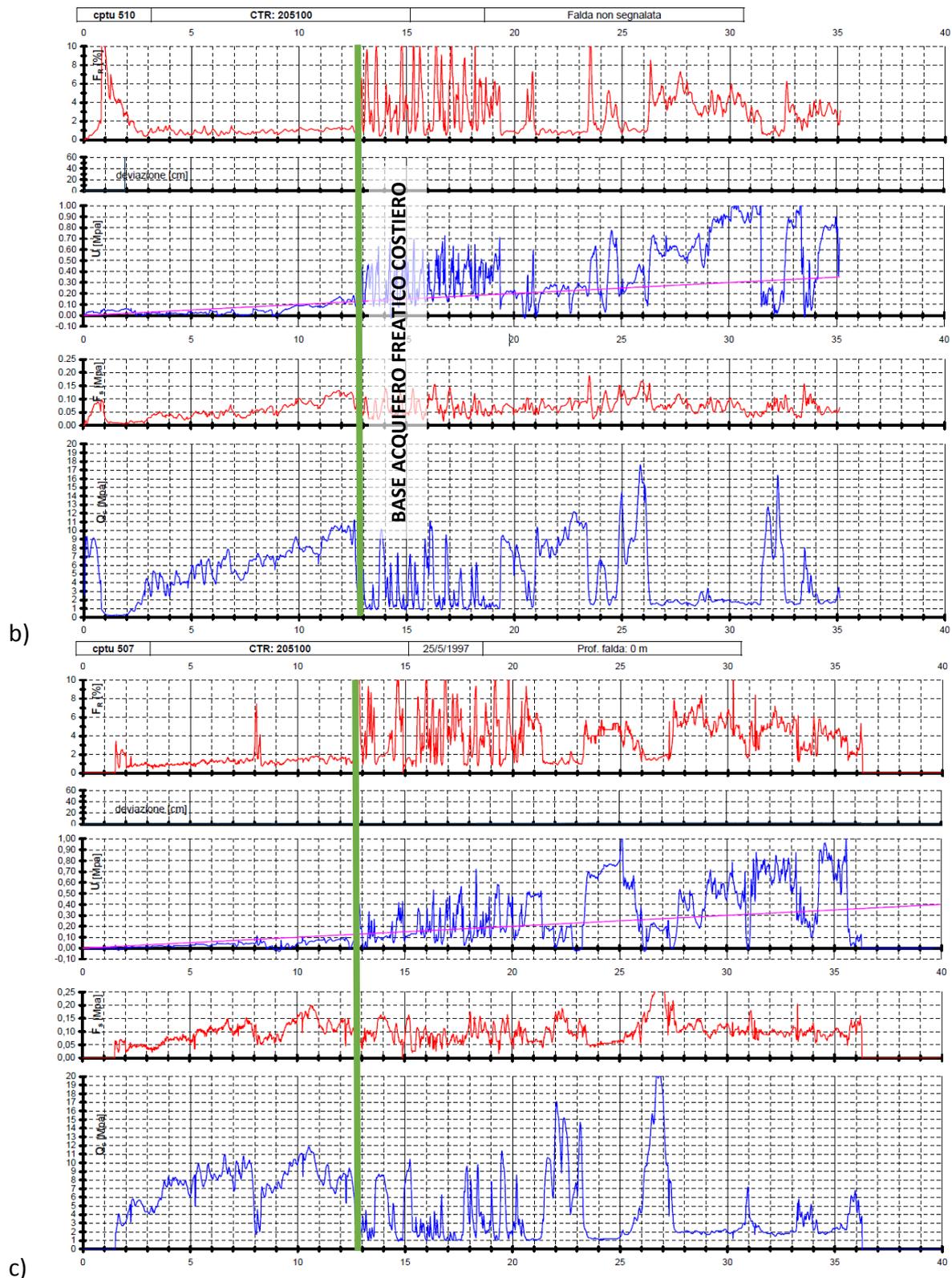


Figura 46. Prove geognostiche RER nei pressi dell'area di studio: a) ubicazione planimetrica; b) CPTU 510; c) CPTU 507; fonte dati [11]; Fr = fiction ratio; U = pressione interstiziale dei pori; Fs = attrito sul manicotto; Qc = resistenza alla punta.

Il dominio di modellazione simula la porzione satura dell'acquifero, per una maggiore stabilità del

modello numerico. Nella porzione rappresentante il Mezzano il dominio si estende quindi verticalmente da quota -4,8 m s.l.m. (quota media imposta dall'idrovora Foce e rappresentativa della rete di bonifica, derivata da Tabella 3) fino a quota -16,5 m s.l.m.. Il dominio è rappresentato in Figura 47, assieme alla griglia di calcolo.

La griglia è a maglia triangolare, costituita da 12622 nodi e 24509 elementi. Essa è stata generata utilizzando con il metodo "Advancing Front" di Feflow. Gli elementi hanno dimensioni variabili, poiché la griglia presenta elemento di ridotta estensione in prossimità dei bordi del dominio, dove sono anche applicate le condizioni al contorno.

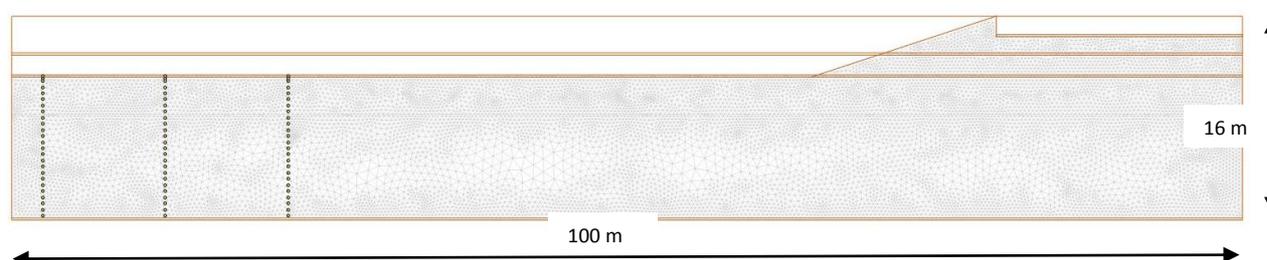


Figura 47. Dominio di modellazione e griglia di calcolo.

7.3.2 *Lo stato attuale: condizioni al contorno e iniziali*

Le condizioni al contorno applicate al dominio di modellazione per il flusso, rappresentate in Figura 48, sono:

- VALLI DI COMACCHIO: carico piezometrico costante pari a 0 m s.l.m., alimentante la falda, simulato con condizione di carico imposto (condizione del 1° tipo o Dirichlet), applicata a tutti i nodi del contorno rappresentante il fondo del bacino vallivo;
- RICARICA PER INFILTRAZIONE EFFICACE: simulata con Condizione di flusso imposto (condizione del 2° tipo o Cauchy), applicata a tutti i nodi del contorno rappresentante la superficie piezometrica (a quota -4,8 m s.l.m.) al di sotto del piano campagna della porzione del comprensorio del Mezzano interferente con il dominio di calcolo, ad eccezione di pochi nodi in cui è applicata la condizione seguente;
- DRENAGGIO DELLA RETE DI BONIFICA: la rete di bonifica del comprensorio del Mezzano interferente con il dominio di calcolo (costituita sia dai canali principali che dalla rete secondaria) costituisce elemento di dreno nei confronti della falda. I flussi di falda, sia quelli provenienti dall'entroterra sia quelli generati dalla intrusione delle acque marine attraverso le Valli di Comacchio, sono drenati dalla rete di bonifica, e poi sollevati dalle idrovore dell'impianto Fosse. Il livello imposto nei canali dall'azionamento delle idrovore, è

ovviamente variabile in funzione del carico idraulico presente nella rete, sostenuto sia dalle precipitazioni meteoriche che dai volumi veicolati per l'irrigazione. In via cautelativa si assume che la porzione della rete di bonifica in prossimità dell'impianto idrovoro, corrispondente alla porzione territoriale interessata dal dominio di calcolo, sia caratterizzata da un livello costante pari a quello imposto dall'azionamento delle macchine (nel caso specifico -4,8 m s.l.m.). Per simulare questa azione di drenaggio diffuso garantita dai canali, sono stati introdotti nodi caratterizzati da capacità di flusso (*seepage*). In corrispondenza dei nodi la portata in uscita dal dominio è calcolata dal modello in funzione del carico idraulico e della conducibilità idraulica. Questa condizione "fittizia" è stata applicata a 6 nodi posizionati sul contorno superiore in corrispondenza dell'orizzonte superiore della falda freatica (precedentemente identificato).

- Condizione di scambio nullo con l'esterno sui restanti confini del dominio.

Le condizioni al contorno applicate al dominio di modellazione per il trasporto, rappresentante in Figura 49, sono:

- VALLI DI COMACCHIO: concentrazione pari a 35.000 mg/l di TDS (concentrazione media ricavata dall'analisi dei dati di Figura 36), simulata con condizione del 1° tipo e applicata a tutti i nodi del bordo rappresentante il fondo del bacino vallivo;
- RICARICA PER INFILTRAZIONE EFFICACE: concentrazione pari a 2.400 mg/l di TDS simulata con condizione del 1° tipo e applicata a tutti i nodi con la corrispondente condizione di Flusso imposto; il valore è stato derivato dai logs di salinità SGSS-RER sul piezometro P11 (Figura 13), che rileva un sottile strato superiore di acqua a minor salinità (5-6 mS/cm, corrispondenti a circa 2400-3000 mg/l di TDS);
- DRENAGGIO OPERATO DAL SISTEMA DI BONIFICA: ai nodi "fittizi" caratterizzanti la condizione di drenaggio operata dai canali (i.e. *seepage*) non è stata associata alcuna condizione al contorno per il trasporto, in quanto l'acqua che abbandona il dominio sarà caratterizzata da valori di salinità come derivano dalle equazioni di bilancio.
- FONDO DELL'ACQUIFERO: Condizione del 1° tipo concentrazione pari a 35.000 mg/l di TDSm atta a simulare la presenza di sedimenti contenenti acqua salata all'interno dell'acquicludo sottostante l'acquifero.
- Condizione di scambio nullo con l'esterno sui restanti confini del dominio.

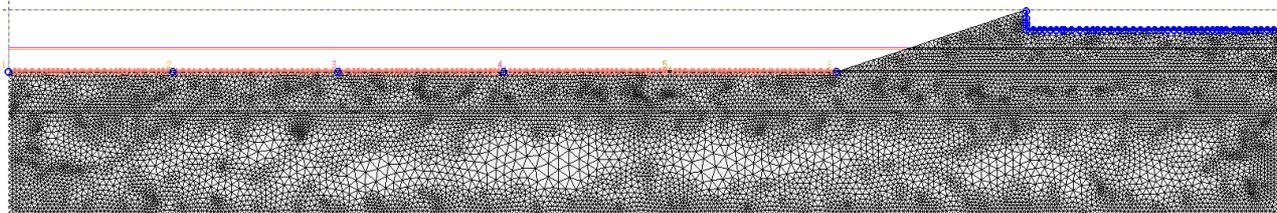


Figura 48. Condizioni al contorno del flusso applicate al modello.

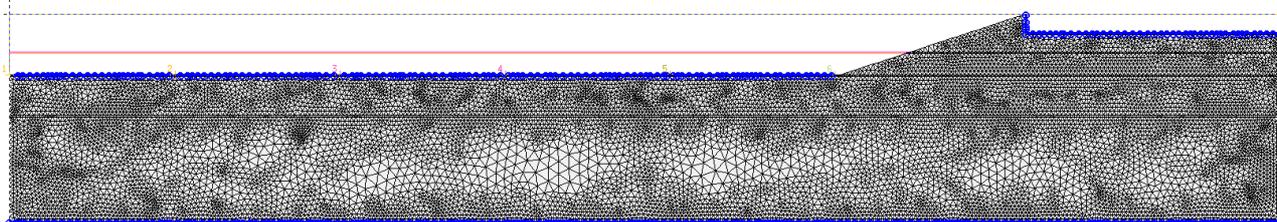


Figura 49. Condizioni al contorno del trasporto applicate al modello.

Le condizioni iniziali sono state applicate uniformemente su tutto il dominio: carico idraulico pari a quello massimo tra le condizioni al contorno (0 m s.l.m.) e concentrazione pari a quella massima (35.000 mg/l).

7.3.3 *Lo stato previsionale: condizioni al contorno e iniziali*

Lo stato previsionale si caratterizza per la traslazione verticale imposta sull'orizzonte temporale del 2030 dalla subsidenza (scenario *upper*) pari a 0.17 m sul vertice del cono in corrispondenza del pozzo Agosta. La traslazione verticale si applica alla porzione del comprensorio di bonifica del Mezzano Sud Est confinante con il vertice delle Valli di Comacchio in corrispondenza dell'impianto idrovoro Foce. Assumendo che la traslazione verticale suddetta interessi rigidamente terreni, edifici, impianti, macchine idrovore e relativi meccanismi di azionamento (avvio/spengimento), questa si traduce in un abbassamento corrispondente delle quote di regolazione della rete dei canali di bonifica. Di conseguenza e corrispondentemente si abbasserà il livello piezometrico della superficie libera della falda freatica.

Questo effetto si traduce nella modifica delle condizioni iniziali ed al contorno del sistema, che quindi si caratterizzeranno come segue:

- VALLI DI COMACCHIO: carico piezometrico costante a 0 m s.l.m., alimentante la falda, simulato con condizione di carico imposto (condizione del 1° tipo o Dirichlet), applicata a tutti i nodi del contorno rappresentante il fondo del bacino vallivo. Quest'ultimo traslato

verticalmente della quantità pari a -0.17 m;

- RICARICA PER INFILTRAZIONE EFFICACE: simulata con Condizione di flusso imposto (condizione del 2° tipo o Cauchy), applicata a tutti i nodi del contorno rappresentante la superficie piezometrica (a quota $-4,97$ m s.l.m.) al di sotto del piano campagna della porzione del comprensorio del Mezzano interferente con il dominio di calcolo, ad eccezione di pochi nodi in cui è applicata la condizione relativa al drenaggio operato dalla rete di bonifica;
- DRENAGGIO DELLA RETE DI BONIFICA: Anche in questo caso si assume in via cautelativa che la porzione della rete di bonifica in prossimità dell'impianto idroforo, corrispondente alla porzione territoriale interessata dal dominio di calcolo, sia caratterizzata da un livello costante pari a quello imposto dall'azionamento delle macchine (nel caso specifico $-4,97$ m s.l.m.). Per simulare questa azione di drenaggio diffuso garantita dai canali, sono mantenuti i nodi già introdotti nel caso dello scenario della condizione attuale, caratterizzati da capacità di flusso (*seepage*). In corrispondenza dei nodi la portata in uscita dal dominio è calcolata dal modello in funzione del carico idraulico e della conducibilità idraulica. Questa condizione "fittizia" è stata applicata a 6 nodi posizionati sul contorno superiore in corrispondenza dell'orizzonte superiore della falda freatica (precedentemente identificato).
- Condizione di scambio nullo con l'esterno sui restanti confini del dominio.

Le condizioni al contorno applicate al dominio di modellazione per il trasporto, rappresentate in Figura 49, sono:

- VALLI DI COMACCHIO: concentrazione pari a 35.000 mg/l di TDS (concentrazione media ricavata dall'analisi dei dati di Figura 36), simulata con condizione del 1° tipo e applicata a tutti i nodi del bordo rappresentante il fondo del bacino vallivo;
- RICARICA PER INFILTRAZIONE EFFICACE: concentrazione pari a 2.400 mg/l di TDS simulata con condizione del 1° tipo e applicata a tutti i nodi con la corrispondente condizione di Flusso imposto; il valore è stato derivato dai logs di salinità SGSS-RER sul piezometro P11 (Figura 13), che rileva un sottile strato superiore di acqua a minor salinità ($5-6$ mS/cm, corrispondenti a circa $2400-3000$ mg/l di TDS);
- DRENAGGIO OPERATO DAL SISTEMA DI BONIFICA: ai nodi "fittizi" caratterizzanti la condizione di drenaggio operata dai canali (i.e. *seepage*) non è stata associata alcuna condizione al contorno per il trasporto, in quanto l'acqua che abbandona il dominio sarà caratterizzata da valori di salinità come derivano dalle equazioni di bilancio.
- FONDO DELL'ACQUIFERO: Condizione del 1° tipo concentrazione pari a 35.000 mg/l di TDSm

atta a simulare la presenza di sedimenti contenenti acqua salata all'interno dell'acquicludo sottostante l'acquifero.

- Condizione di scambio nullo con l'esterno sui restanti confini del dominio.

7.3.4 *Proprietà dei materiali*

Sul dominio di modellazione sono state assegnate le proprietà dei materiali, sia relativamente al flusso, che al trasporto.

Seppur trattandosi di uno schema semplificato e teorico, nel modello sono stati rappresentati 3 diversi strati caratterizzati da parametri dedotti dalla analisi litostratigrafica condotta in precedenza. L'implementazione nel modello è rappresentata in Figura 51 ed i parametri caratteristici sono riassunti in Tabella 6:

- Fondale Valli di Comacchio: sulla base dei dati stratigrafici disponibili, è stato rappresentato uno strato a bassa permeabilità posizionato immediatamente al di sotto delle Valli di Comacchio ed esteso verticalmente fino alla profondità di -3 m s.l.m.
- Acquifero zona superiore: è stata differenziata una porzione superiore dell'acquifero, estesa fino a profondità di circa -8 m s.l.m., caratterizzata da una maggiore permeabilità e porosità;
- Acquifero zona inferiore: è stata differenziata una porzione inferiore dell'acquifero, estesa da -8 a -16 m s.l.m., caratterizzata da una minore permeabilità e porosità.

Tale distribuzione di permeabilità è stata interpretata sulla base dei dati di permeabilità disponibili e validata dalla calibrazione qualitativa del modello.

Per l'acquifero freatico costiero, sono stati rintracciati alcuni dati di permeabilità K misurati sperimentalmente nell'ambito di studi su ambiti territoriali specifici. Il primo studio [10] interessa la zona di San Giovanni di Ostellato prossima all'impianto di Valle Lepri e situata immediatamente a nord del Canale Navigabile: sono state realizzate 5 prove di permeabilità di tipo slug tests, che hanno restituito valori di conducibilità idraulica (K) compresa nell'intervallo $1-2 \times 10^{-4}$ m/s per la porzione superiore e $10^{-5}-10^{-6}$ m/s in quella inferiore. Il secondo studio [8] interessa la porzione di territorio ubicata a nord della Valli di Comacchio, lungo un transetto perpendicolare alla linea di costa che si sviluppa tra San Giovanni di Ostellato e Lido Nazioni, interessando 4 piezometri della rete SGSS-RER; all'interno di tali piezometri sono state realizzate numerose prove di permeabilità che hanno restituito i profili verticali di K rappresentati nel grafico semi-logaritmico riportato in Figura 50: K decresce da 10^{-3} a 10^{-6} m/s dall'alto verso il basso all'interno del corpo acquifero, e

tale variazione è imputata alla presenza di lenti di limi e sabbie fini.

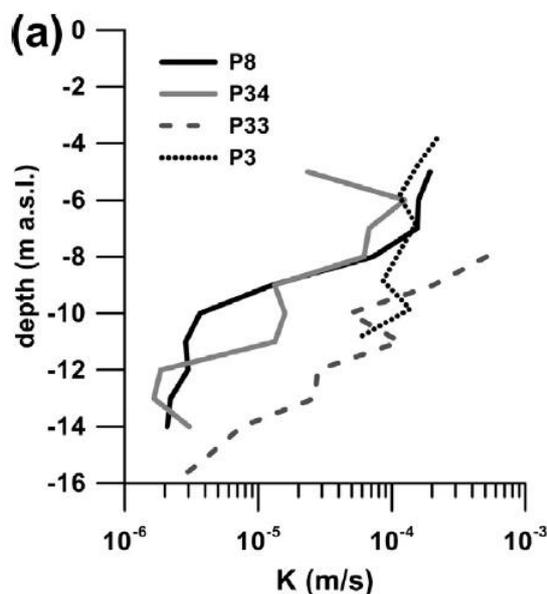


Figura 50. Profili verticali di conducibilità idraulica (K) rilevati da Giambastiani et al. (2013); estratto da [8].

La porosità dell'acquifero, parametro necessario per il calcolo del trasporto, è stata derivata da bibliografia [23], assegnando valori congruenti con le litologie e con la distribuzione delle permeabilità ipotizzata.

Gli altri parametri relativi al trasporto sono stati applicati uniformemente a tutto il dominio di modellazione e sono:

- Diffusione molecolare (D_m) pari a 10^{-9} m²/s, valore di default in Feflow;
- Dispersività longitudinale (α_L) pari a 1 m (valore coerente con le dimensioni del dominio e validato in fase di calibrazione; Gelhar et al., 1992 [25]);
- Dispersività trasversale (α_T) pari a 0.01 m (valore coerente con un acquifero orizzontale stratificato [25]);
- Density Ratio = $(\rho_{max}-\rho_0)/\rho_0 = 2.45 \cdot 10^{-2}$, calcolato per il range di salinità 0-35.000 mg/l.

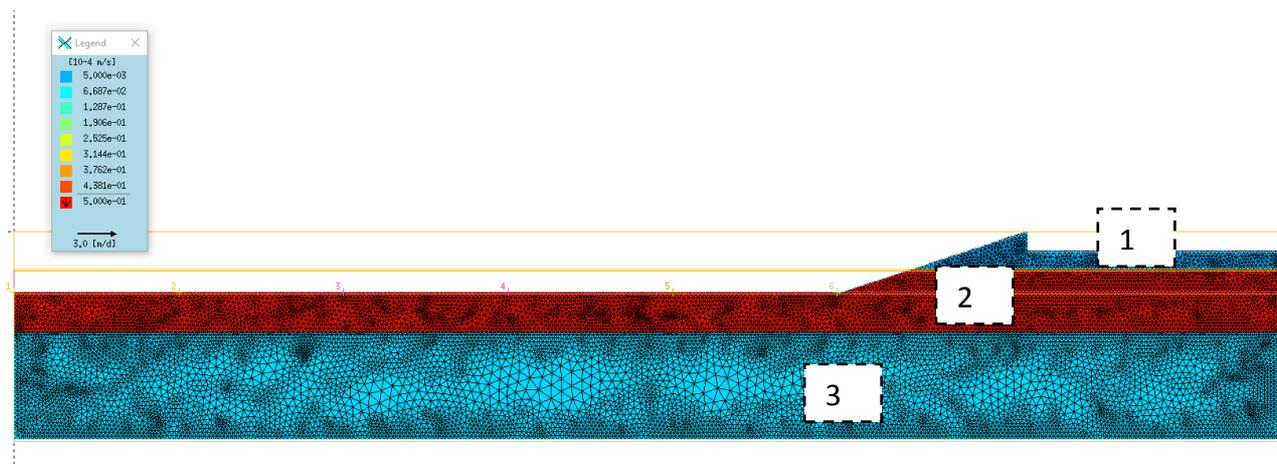


Figura 51. Proprietà dei materiali; i box indicano le zone di Tabella 6.

Tabella 6. Proprietà dei materiali: K conducibilità idraulica; n porosità, Dm diffusione molecolare; α_L dispersività longitudinale (L) e trasversale (T), Density ratio= rapporto tra densità.

Zona del dominio	K (m/s)	n ()	Dm (m ² /s)	α_L (m)	α_T (m)	Density Ratio ()
1 - Fondale Valli di Comacchio	$5 \cdot 10^{-7}$	0.05	10^{-9}	1	0.01	$2.45 \cdot 10^{-2}$
2 - Acquifero zona superiore	$5 \cdot 10^{-5}$	0.20	10^{-9}	1	0.01	$2.45 \cdot 10^{-2}$
3 - Acquifero zona inferiore	$5 \cdot 10^{-6}$	0.10	10^{-9}	1	0.01	$2.45 \cdot 10^{-2}$

7.3.5 Simulazioni degli scenari

Le simulazioni di calcolo sono state condotte in condizioni transitorie sia per il flusso che per il trasporto. I risultati sono stati analizzati al raggiungimento di uno stato pseudo-stazionario, ossia alla stabilizzazione di carichi e concentrazioni su numerosi punti di osservazione rappresentativi e prefissati all'interno del dominio ed alla stabilizzazione del bilancio di massa.

Sono stati inseriti 72 punti di osservazione dei carichi e delle concentrazioni, ubicati lungo i 3 profili verticali, rappresentati in Figura 52. Tali verticali sono state utilizzate anche in fase di confronto dei risultati dello stato di fatto e previsionale.

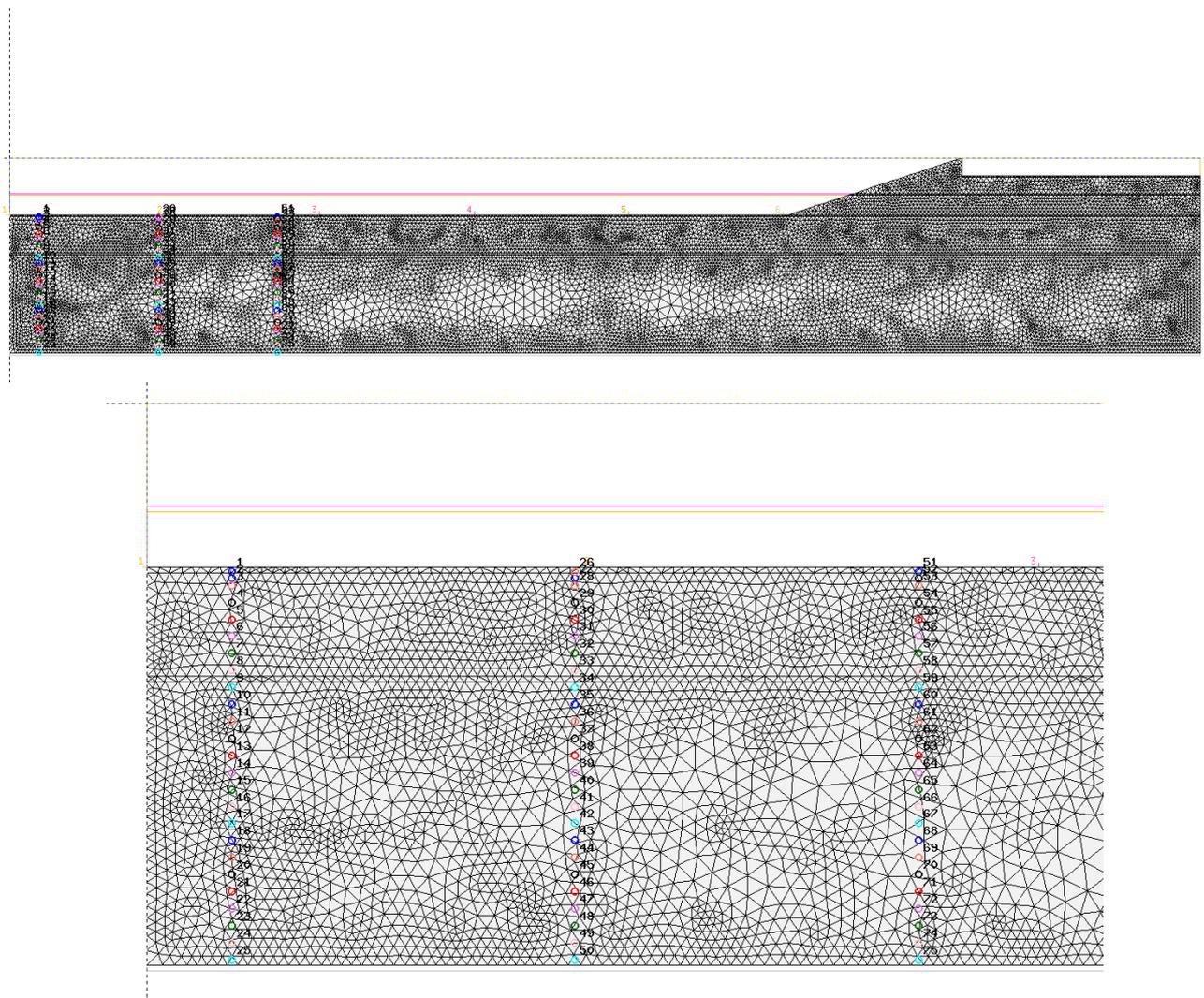


Figura 52. Punti di osservazione dei carichi e delle concentrazioni. In alto il dominio di calcolo nel suo complesso. In basso un particolare del dominio di calcolo in corrispondenza delle sezioni verticali rappresentative identificate

7.4 Calibrazione dello scenario dello stato attuale

La calibrazione può essere di tipo qualitativo o quantitativo (Andersson et al., 2015 [26]). Il livello di calibrazione di un modello è strettamente connesso al livello di approfondimento del modello concettuale dell'acquifero e soprattutto alla quantità, densità e qualità dei dati disponibili.

Nel nostro caso l'assenza di dati sito-specifici in quantità significativa, ha suggerito l'applicazione di una calibrazione di tipo qualitativo.

Ciò non ostante è stato comunque operato il confronto qualitativo con i pochi dati disponibili e con il modello concettuale. La calibrazione qualitativa è stato un processo fondamentale nella scelta della migliore configurazione delle condizioni al contorno e delle proprietà dei materiali.

7.5 Implementazione dello scenario previsionale

Per la simulazione dello scenario previsionale sono state apportate le seguenti modifiche rispetto lo

stato di fatto:

- Geometria del dominio di calcolo: in riferimento allo scenario previsionale *upper* per la subsidenza attesa al 2030, in via cautelativa è stato considerato il valore massimo del cono di subsidenza (-0,17 m) e tale valore è stato considerato costante su tutta l'area interferente. In conseguenza di ciò, rispetto allo stato di fatto, sono stati ribassati di 0,17 m:
 - il fondo del bacino delle Valli di Comacchio (traslato quindi a quota -1,67 m s.l.m.)
 - il piano campagna del comprensorio Mezzano SE e di conseguenza la superficie piezometrica della falda (traslata a -4,97 m s.l.m.)
 - la superficie di letto dell'acquifero (traslata a -16,17 m s.l.m.)
- Condizioni al contorno:
 - Le condizioni relative alla rappresentazione delle Valli di Comacchio, sia per il flusso che per il trasporto, sono rimaste invariate rispetto allo stato di fatto, ma sono state applicate alla porzione di contorno che nello stato previsionale è impostata a quota -1,67 m s.l.m.
 - Il flusso in entrata rappresentante la ricarica per infiltrazione efficace (al lordo dei contributi per irrigazione) è rimasto invariato rispetto allo stato di fatto, ma nello stato previsionale è applicato ai nodi appartenenti alla porzione di contorno attestata alla quota -4,97 m s.l.m. che rappresenta il nuovo tetto piezometrico.
 - la condizione che simula il sistema di drenaggio della bonifica è stata variata sia in termini di geometria (applicata alla porzione di contorno posizionata a quota -4,97 m s.l.m.), che di carico applicato (-4.97 m s.l.m.).

Queste due ultime condizioni traducono l'ipotesi che nel prototipo il tasso di subsidenza produca una traslazione verticale rigida ed omogenea della porzione territoriale interessata dalla subsidenza, comprensiva dei manufatti che alloggiavano le idrovore della stazione Fosse, e con essi anche i livelli di attacco/stacco delle macchine, abbassando di conseguenza tutte le quote della rete di bonifica della medesima quantità subsidente (-0.17 m).

- Proprietà dei materiali: poiché la subsidenza ha l'effetto di traslare verso il basso tutto il sistema dell'acquifero superficiale, sono stati traslati di 0,17 m anche i limiti tra le zone a diverse proprietà idrodinamiche, vale a dire:
 - Limite tra zona 1 e zona 2

- Limite tra zona 2 e zona 3
- Limite inferiore della zona 3 (bottom dell'acquifero).

7.6 Analisi dei risultati e conclusioni

7.6.1 Scenario attuale e calibrazione del modello

La simulazione dello scenario attuale ha permesso di ricavare le distribuzioni dei carichi piezometrici (Figura 53) e delle concentrazioni (Figura 54) sul dominio di modellazione, in equilibrio con le condizioni al contorno assegnate ed in condizioni pseudo-stazionarie (stabilizzazione dei carichi e delle concentrazioni in funzione del tempo).

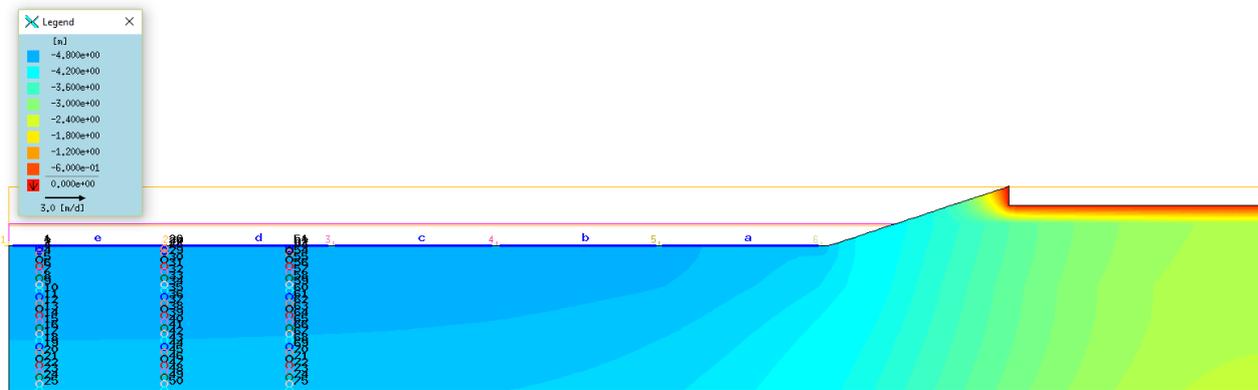


Figura 53. Carichi piezometrici (m s.l.m.) calcolati dal modello nello scenario attuale.

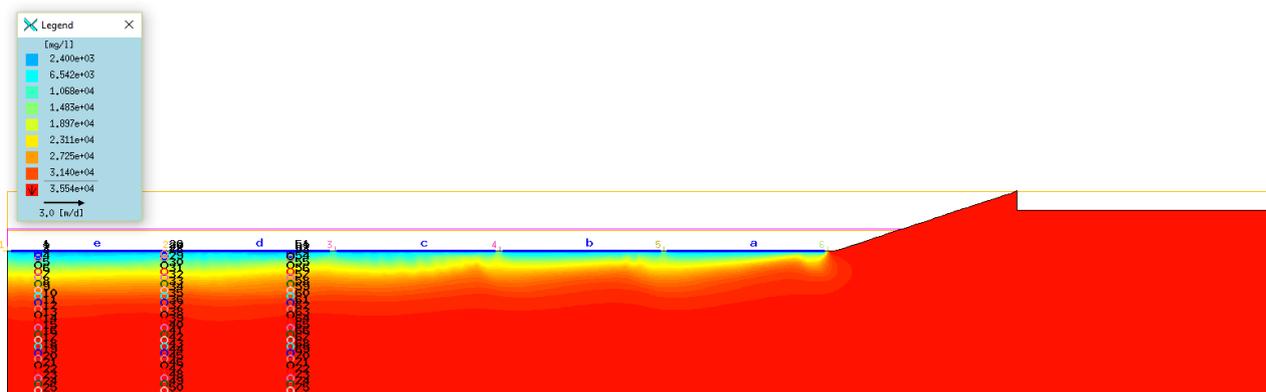


Figura 54. Concentrazioni di TDS (mg/l) calcolate dal modello nello scenario attuale.

Tali distribuzioni sono da considerarsi rappresentazioni schematiche e semplificate della realtà, oltre che rappresentative di condizioni medie annuali, in quanto risultato di condizioni al contorno applicate costanti nel tempo con valori rappresentativi di valori medi annuali. In tal senso, il confronto con le osservazioni di campo deve essere condotto per via qualitativa, piuttosto che quantitativa, anche in considerazione dei rilievi disponibili.

Nel processo di calibrazione qualitativa sono stati considerati i seguenti elementi:

- Confronto delle portate drenate dalla condizione al contorno *seepage* con il coefficiente udometrico medio della bonifica ferrarese: dal bilancio di massa del modello risulta una portata drenata pari a circa 3 l/s/ha, compatibile con i valori medi del coefficiente udometrico dei bacini di bonifica interessati (in particolare il comprensorio del Mezzano sud-est).
- Confronto della ricarica di acqua dolce entrante nel dominio di calcolo lungo il contorno rappresentativo dei terreni agricoli: l'input di ricarica assegnato al modello corrisponde ad un tasso di infiltrazione efficace pari a 80 mm/anno, ossia circa il 11% della precipitazione totale annua. Tale valore include il contributo dell'irrigazione e risulta coerente con valori reperiti in bibliografia per aree limitrofe [10].
- Confronto grafico con i logs di salinità disponibili ai piezometri Collettore Fosse (P11) e Collettore Pega (P10): il confronto è presentato nel grafico di Figura 55, dove Log 1, Log 2 e Log 3 rappresentano i log calcolati dal modello sugli allineamenti verticali di punti di osservazione (Figura 52 e Figura 54). Dal confronto emerge una sostanziale concordanza tra l'andamento osservato e simulato, che presenta un grado di salinità superiore a 30'000 TDS al di sotto della quota assoluta -8.0 m s.l.m.

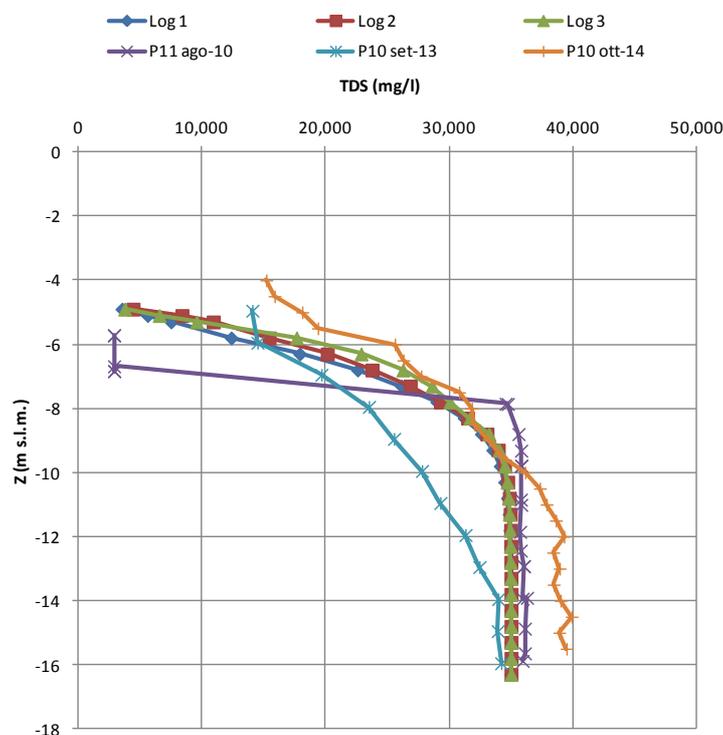


Figura 55. Calibrazione qualitativa del modello (scenario attuale): confronto dei logs di salinità calcolati in corrispondenza delle verticali rappresentativi all'interno del dominio di calcolo, con i logs osservati disponibili per i piezometri P10 e P11 (da [11]).

7.6.2 Scenario previsionale

La simulazione dello scenario previsionale ha permesso di ricavare le distribuzioni dei carichi piezometrici (Figura 56) e delle concentrazioni (Figura 57) sul dominio di modellazione, in equilibrio con le condizioni al contorno assegnate ed in condizioni pseudo-stazionarie (stabilizzazione dei carichi e delle concentrazioni in funzione del tempo).

Non si rilevano differenze sostanziali rispetto ai risultati dello scenario attuale.

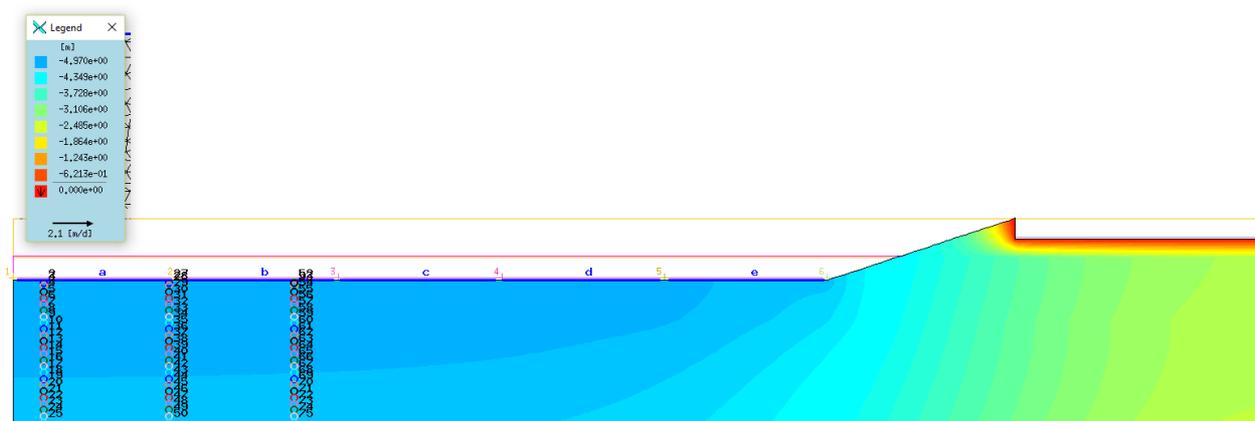


Figura 56. Carichi piezometrici (m s.l.m.) calcolati dal modello nello scenario previsionale.

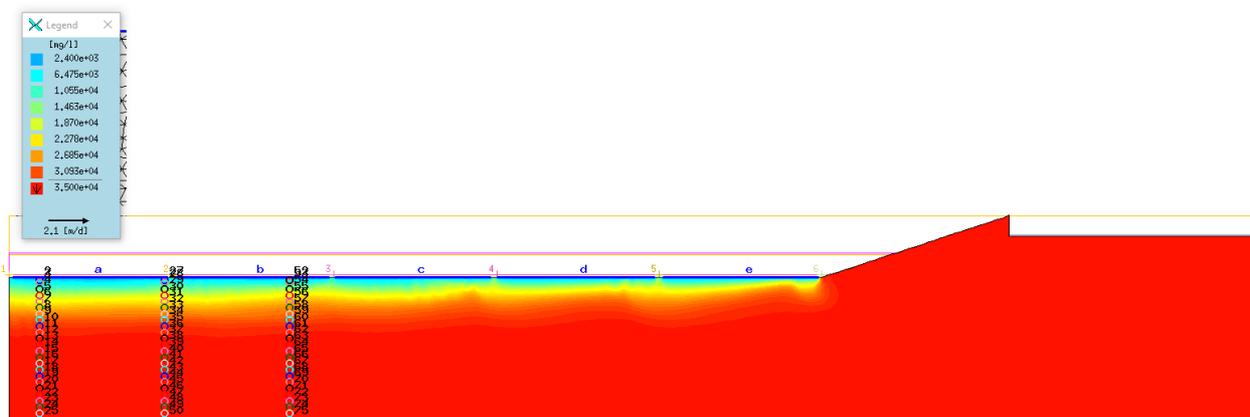


Figura 57. Concentrazioni di TDS (mg/l) calcolate dal modello nello scenario previsionale.

Un'analisi di maggiore dettaglio è rappresentata in Figura 58, dove le linee isopieze dei due scenari sono confrontate per sovrapposizione sulla stessa sezione. Si osserva una modesta traslazione delle isopieze verso il lato del dominio dominato dalla presenza delle Valli di Comacchio, che trova spiegazione nella modifica del carico impostato lungo il contorno superiore rappresentativo del piano campagna e della condizione di drenaggio dovuta alla presenza dei canali (*seepage*). Si osserva che le isopieze sono tracciate con equidistanza di 0,10 m e che la variazione massima risultante è contenuta all'interno della variazione impostata nella condizione al contorno (-0,17 m

corrispondente alla subsidenza massima attesa in corrispondenza del campo Agosta).

Legenda

- Carichi (scenario attuale)
- Carichi (scenario previsionale)
- Mesh
- Punti di osservazione
- Geometria sezione

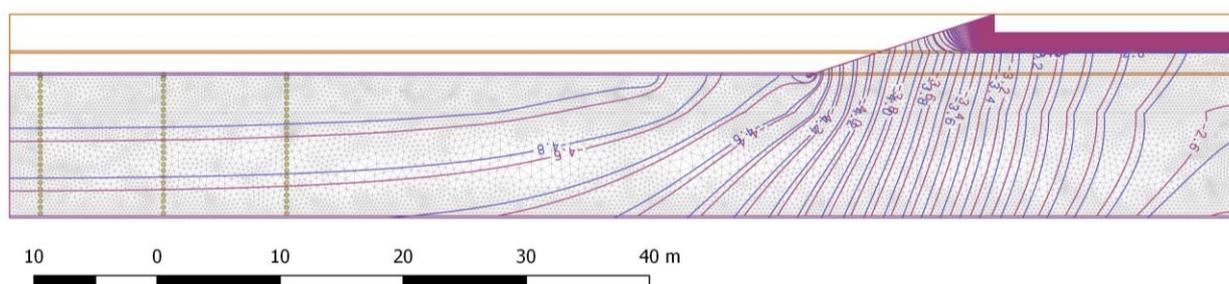


Figura 58. Confronto dei carichi piezometrici calcolati nello scenario attuale e nello scenario previsionale.

Analizzando le curve di isoconcentrazione dei due scenari, sovrapposte in Figura 59 (scenario attuale di colore più chiaro, con etichette blu e scenario previsionale di colore più scuro, con etichette rosse), si osserva una contenuta variazione nella distribuzione delle concentrazioni, ossia un modesto abbassamento di tutte le linee di isoconcentrazione verso il fondo dell'acquifero; questo fenomeno si può spiegare con l'abbassamento imposto al contorno rappresentativo del piano campagna (-0.17 m) sul quale è applicata la condizione al contorno di flusso in ingresso rappresentativo della ricarica associata alla filtrazione efficace (qui considerata al lordo dei contributi di irrigazione al comprensorio) e con il contestuale abbassamento del fondo dell'acquifero (-0.17 m) dovuto alla subsidenza.

Ulteriori utili elementi emergono considerando i logs di salinità calcolati dal modello sugli allineamenti verticali di punti di osservazione: essi sono riportati in Figura 60 in termine di confronto con quelli ottenuti dalla simulazione dello scenario attuale. Se ne ricava una modesta traslazione della zona di transizione tra acqua debolmente salata ed acqua decisamente salata, dello stesso ordine di grandezza della massima subsidenza prevista.

Legenda

-  Mesh
-  Punti di Osservazione
-  Geometria Sezione

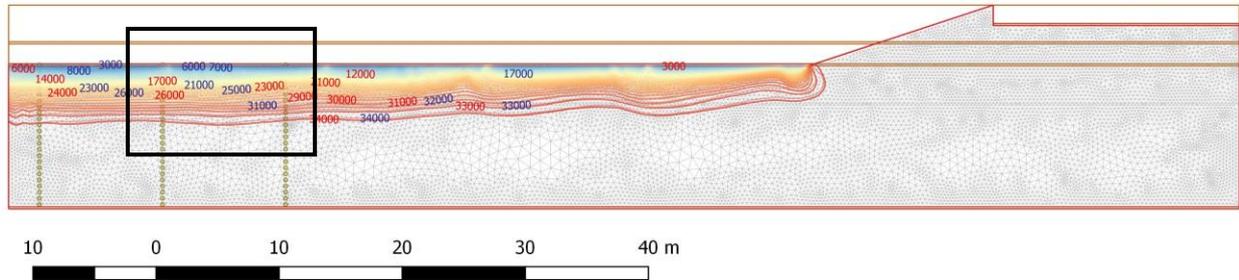


Figura 59. Confronto delle concentrazioni calcolate nello scenario attuale e nello scenario previsionale (linee isoconcentrazione ogni 1000 mg/l di TDS): scenario attuale (etichette blu) e scenario previsionale (etichette rosse).

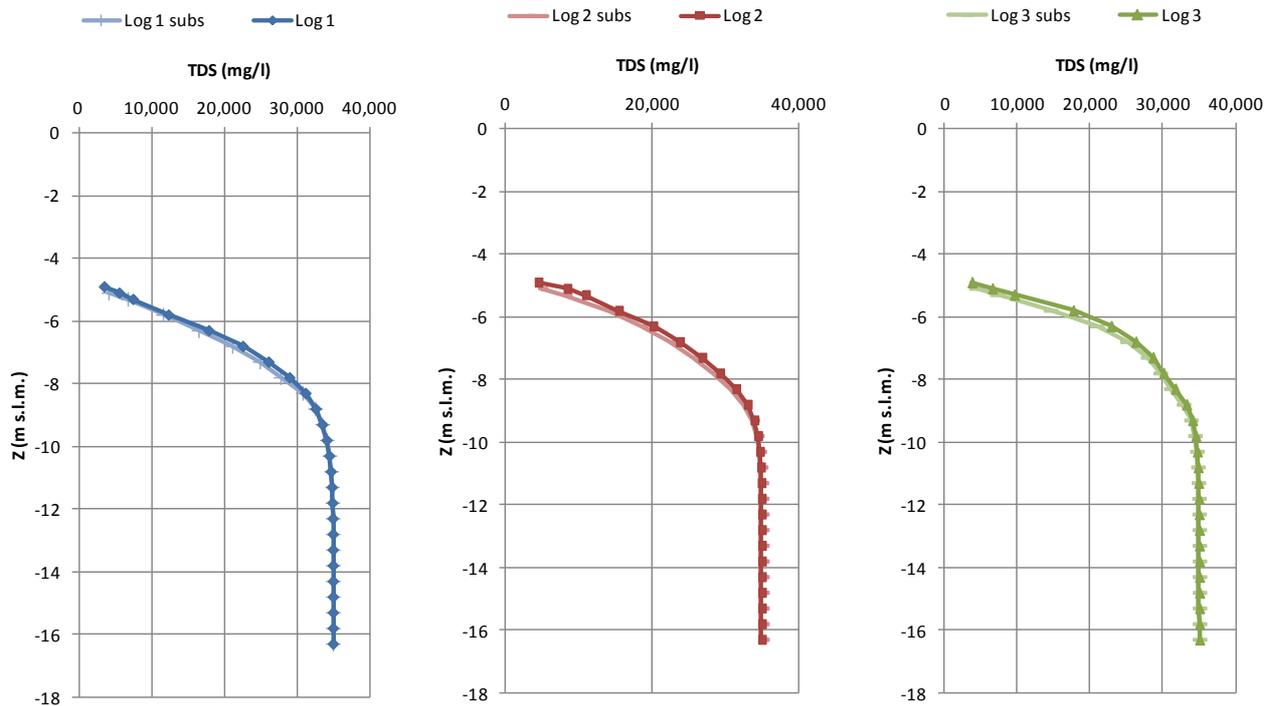


Figura 60. Confronto dei logs di salinità calcolati nello scenario attuale e nello scenario previsionale in corrispondenza delle tre verticali rappresentative localizzate all'interno dominio.

In conclusione le simulazioni condotte in termini comparativi sullo scenario nello stato attuale ed in quello previsionale evidenziano variazioni del campo idrodinamico ipogeo molto contenute, che restituiscono una modesta distorsione delle linee equipotenziali, al più paragonabile con l'abbassamento imposto al carico piezometrico sul tetto dell'acquifero, dominato dallo "zero di bonifica" che si assume in via cautelativa possa traslare verso il basso di una quantità corrispondente al massimo abbassamento subsidente previsto pari a -0.17 m (considerando la rigida traslazione degli impianti di sollevamento di Fosse e dei conseguenti livelli di azionamento e distacco delle idrovore).

In effetti l'andamento del cono di subsidenza suggerisce che lo scostamento massimo previsto, anche in termini di linee equipotenziali del campo di flusso, vada riducendosi allontanandosi dal vertice (i.e. pozzo di Agosta).

La deformazione del campo delle densità (concentrazioni saline) all'interno dell'acquifero mostra una modesta flessione dei fronti isocori sempre contenuta all'interno del massimo spostamento verticale subsidente previsto (i.e. 0.17 m).

Peraltro questa flessione interviene all'interno di un acquifero che nel contesto esaminato mostra già nello stato attuale salinità molto elevata, che lo esclude dalla classificazione di "Acqua Dolce" così come operata dalla Regione Emilia Romagna.

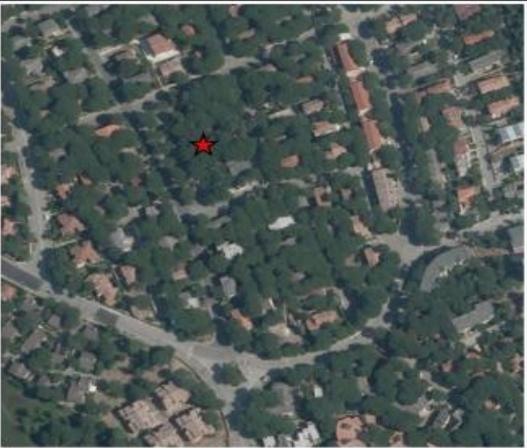
Pertanto si può concludere che l'effetto generato dalla subsidenza prodotta dalla coltivazione del campo Agosta valutata sull'orizzonte temporale del 2030 secondo lo scenario di subsidenza *upper* non produce effetti apprezzabili sotto il profilo del peggioramento dello stato di salinizzazione dell'acquifero superficiale.

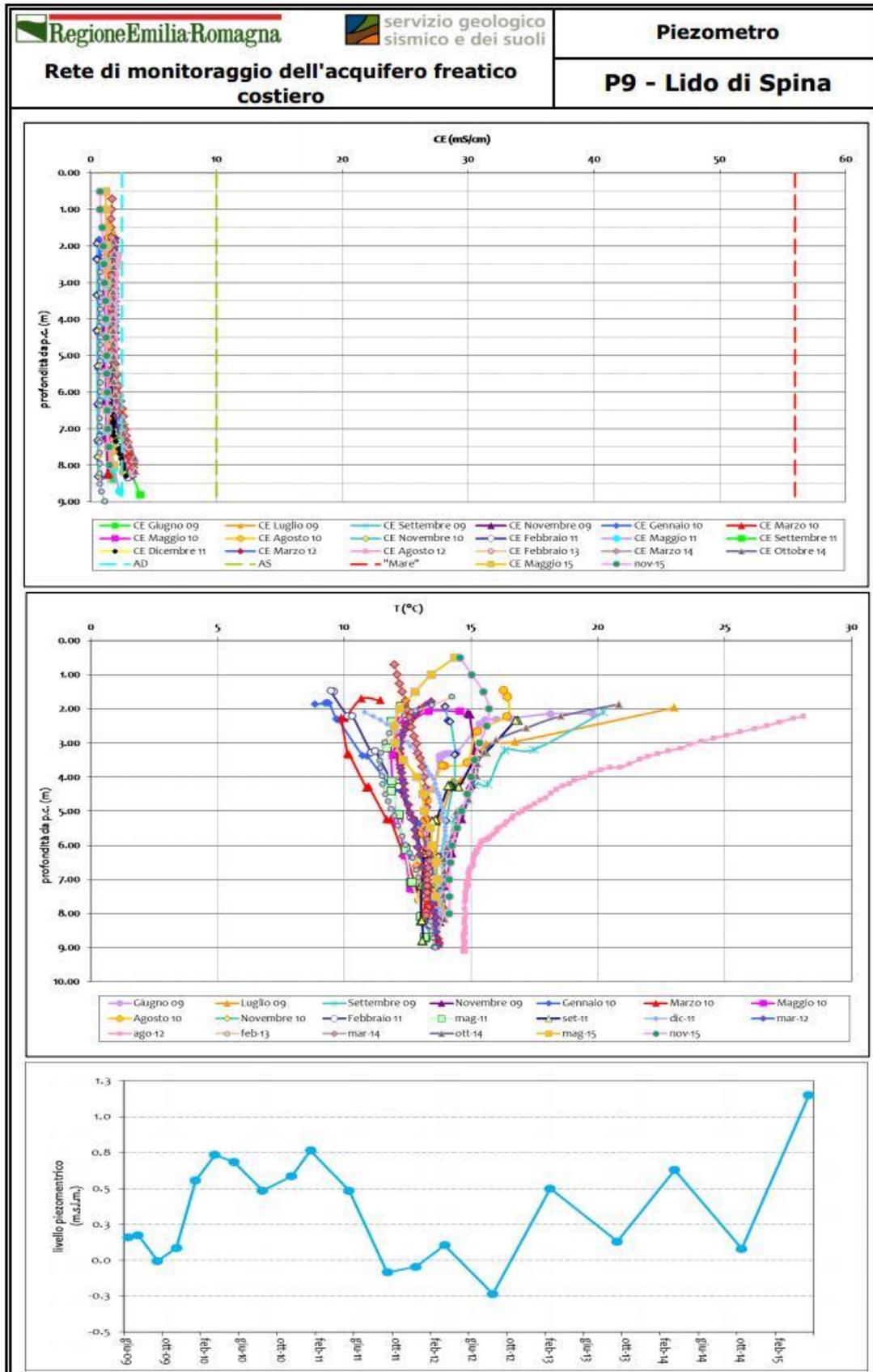
8 Allegato 1

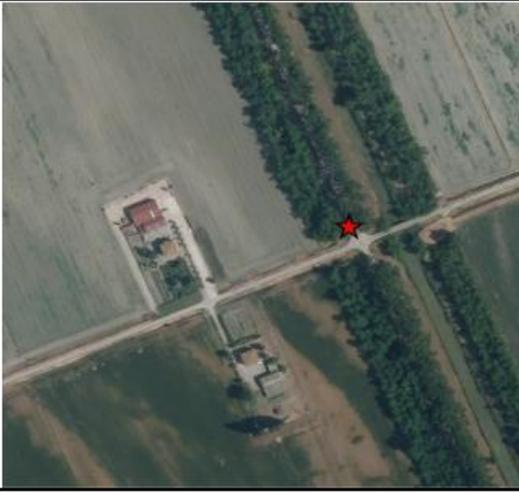
Nel presente allegato sono riportate le fonti dei dati consultate e la documentazione di più immediato utilizzo nell'ambito del presente studio.

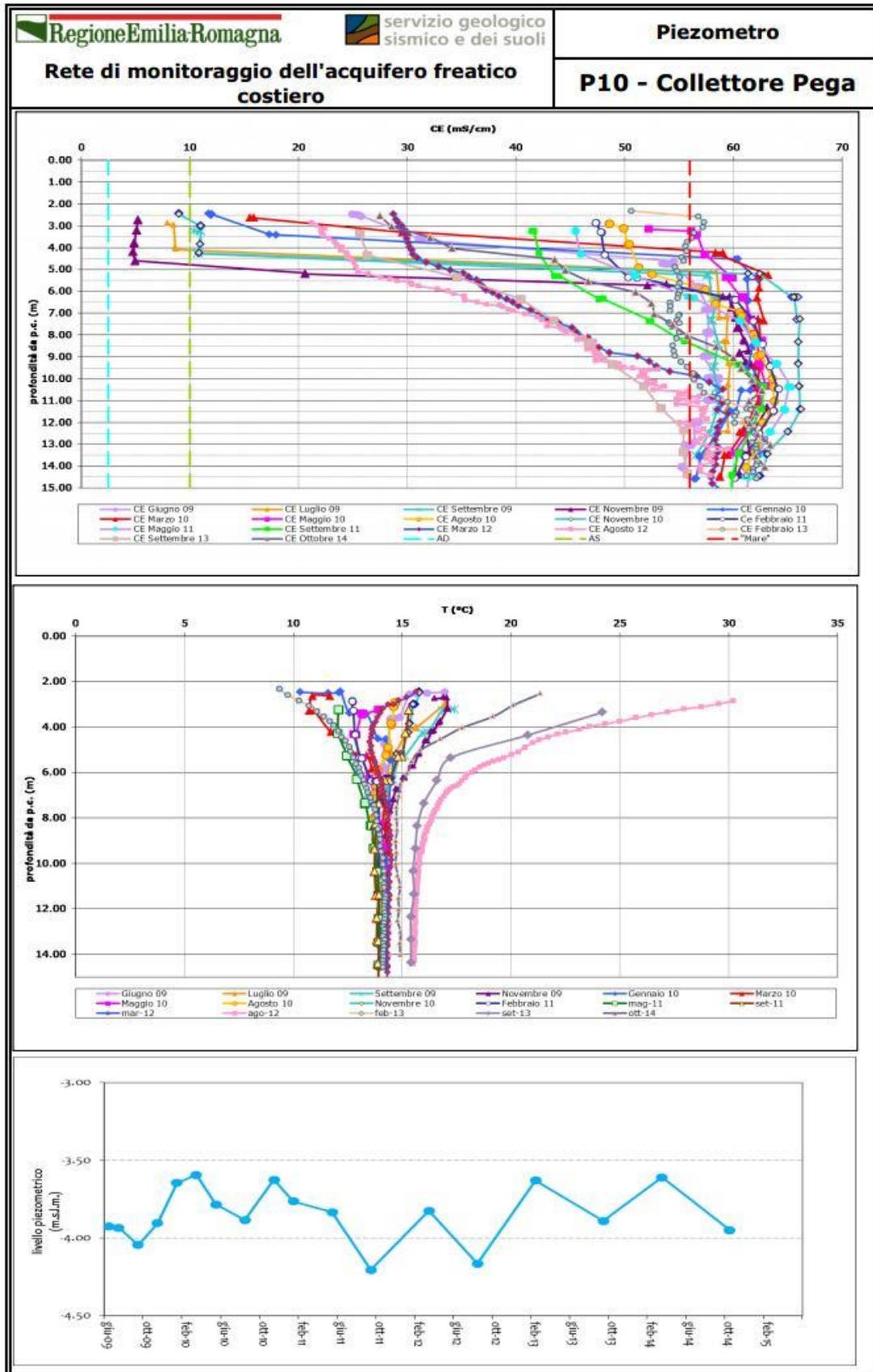
Categoria dato	Fonte	Codice / Ubicazione punti			Tipologia dato	Periodo serie	Frequenza serie
Acque sotterranee Rete di monitoraggio regionale (pozzi)	ARPAE	ID	UTM X	UTM Y	Livelli piezometrici Chimismo acque sotterranee	1980-2015	Da 4 a 2 misure/anno
		FE16-00	747705	4938463			
		FE38-00	730536	4959854			
		FE48-00	727660	4948452			
		FE49-00	725007	4944875			
		FE69-00	745041	4953044			
		FE70-00	757807	4948325			
		RA09-00	758180	4941791			
		RA09-01	758227	4940523			
		RA12-01	755883	4938447			
		RA45-01	751774	4936004			
		RA69-01	734670	4941788			
		RA81-01	746740	4935810			
Acque sotterranee Rete di monitoraggio acquifero freatico costiero (piezometri)	Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli RER	ID	UTM X	UTM Y	Livelli piezometrici Logs verticali di conducibilità elettrica in falda	Dal 2009 al 2015	Da 4 a 2 misure/anno
		P3	748129.8	4957452.0			
		P8	755335.1	4957879.4			
		P9	757648.6	4948907.9			
		P10	750019.1	4950505.6			
		P11	742385.1	4947881.5			
		P12	758350.3	4941262.1			
		P33	745193.5	4957064.2			
		P34	752908.4	4958461.4			
Acque sotterranee / stratigrafia	Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli RER	Sezione geologica n. 4			Sezione geologica e idrogeologica		

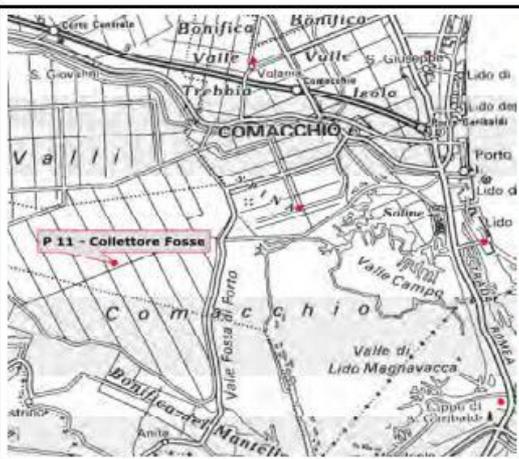
Acque di transizione	ARPAE	Bellocchio Valle Grande	Livello idrometrico Salinità	2015-16 2009-16	Acquisizioni automatiche ogni 10 min
		Bellocchio Valle Campo	Livello idrometrico Salinità	2009-14 2009-12	Acquisizioni automatiche ogni 10 min
		Canale Logonovo	Salinità	2009-16	Acquisizioni automatiche ogni 10 min
Acque marine	ARPAE	Porto Garibaldi	Marea Salinità Pioggia Direzione e velocità vento	2009-16 2010-15 2009-16 2009-16	Acquisizioni automatiche ogni 10 min
Rete consortile	Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara	Valle Lepri	Quote impianti Valle Lepri		Estive e invernali

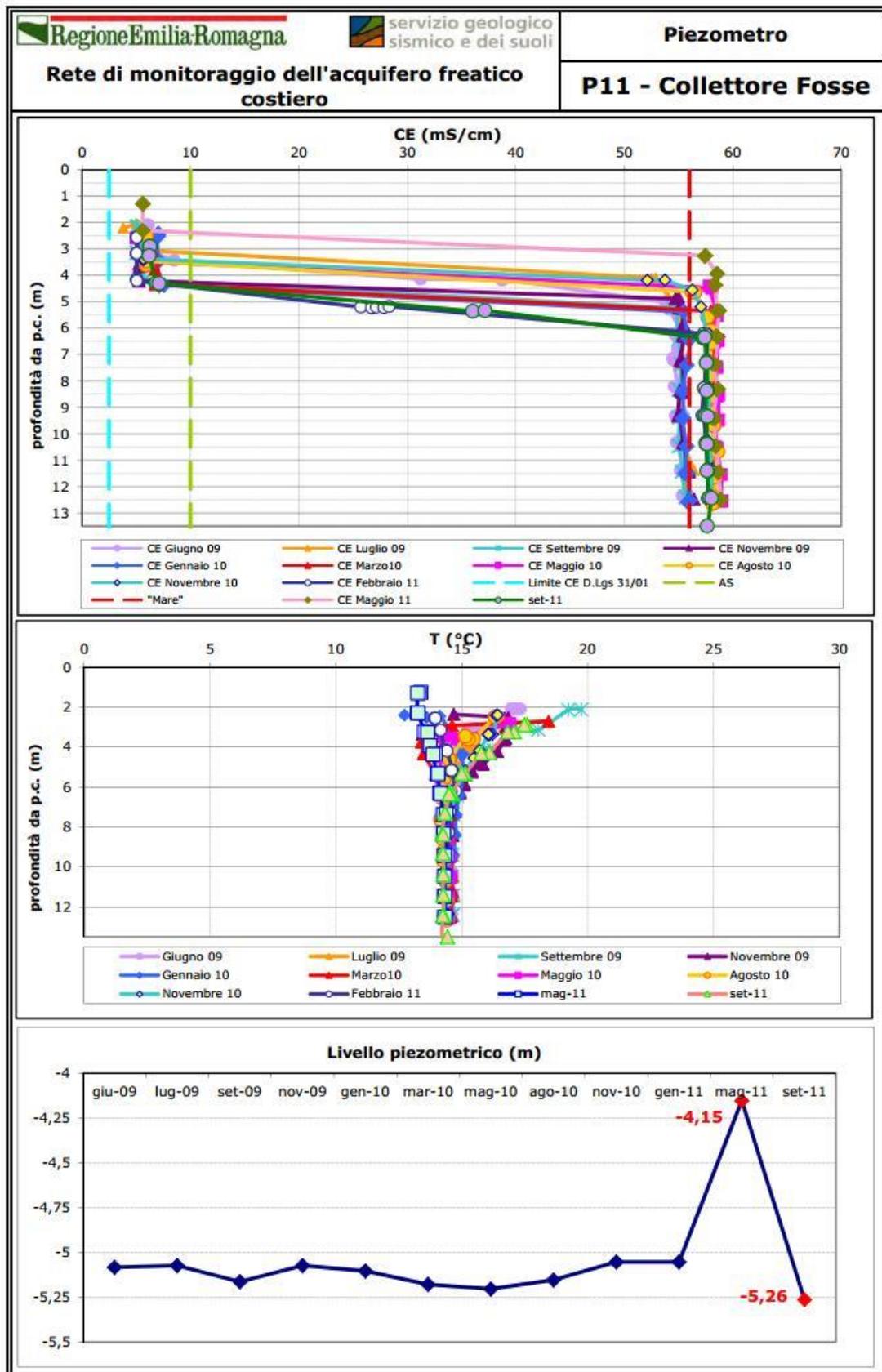
 		Piezometro	
Rete di monitoraggio dell'acquifero freatico costiero		P9 - Lido di Spina	
UBICAZIONE			
Località: Lido di Spina		X (UTM*) 757648.6488	
Comune: Comacchio		Y (UTM*) 948907.9699	
Provincia: FERRARA		Quota (m s.l.m): 1.81	
1:100.000		1:5.000	
			
SITO		DATI TECNICI	
		Da di perforazione: 26 maggio 2009	
		Profondità (m): 9	
		Allestimento: primo metro cieco; da un metro a fondo foro fessurato e rivestito da geotessuto	
		Diametro: 2"	
		Sezione geologica di riferimento Sez. 4	
		Foglio CARG 205 - Comacchio	



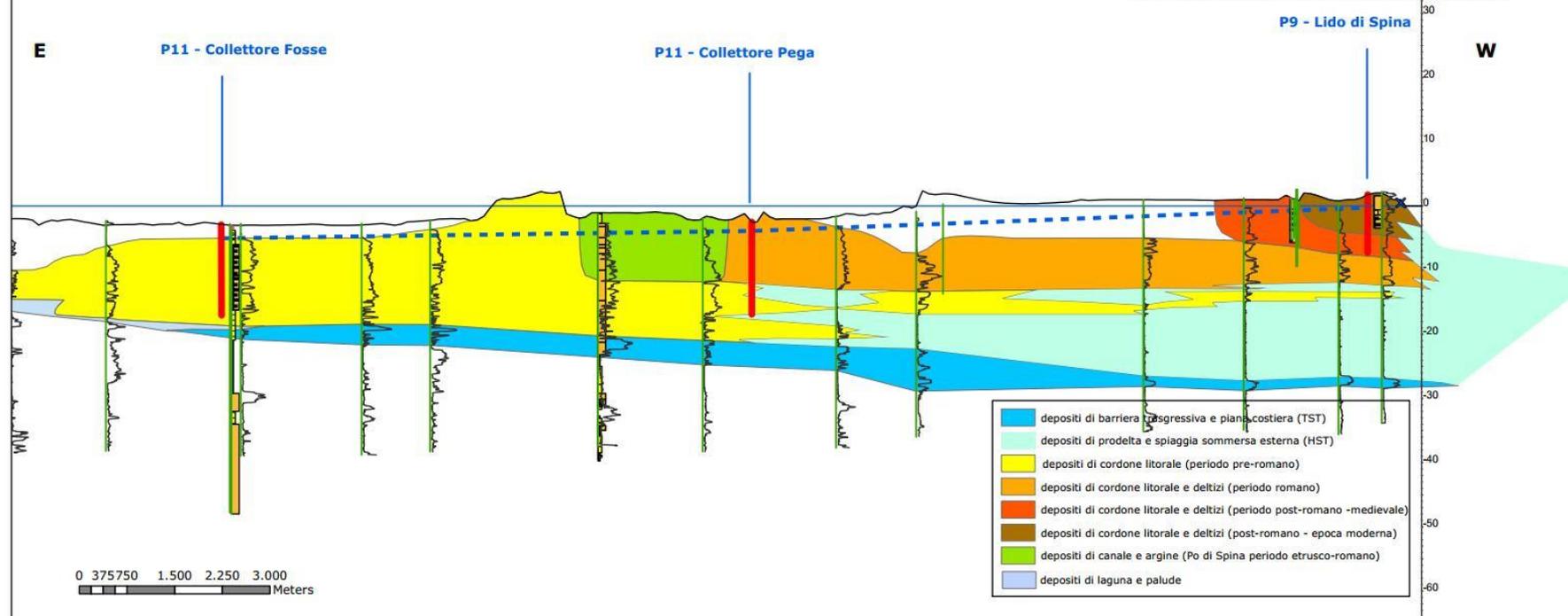
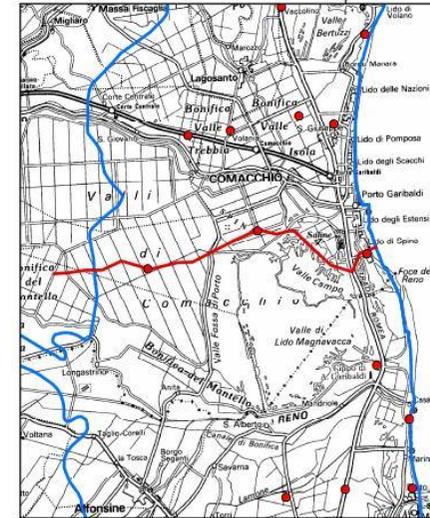
 		Piezometro	
Rete di monitoraggio dell'acquifero freatico costiero		P10 - Collettore Pega	
UBICAZIONE			
Località: incrocio tra le strade Pega e Buie d'istria		X (UTM*) 750019.108	
Comune: Comacchio		Y (UTM*) 950505.6431	
Provincia: FERRARA		Quota (m s.l.m): -1.54	
1:100.000		1:5.000	
			
SITO		DATI TECNICI	
		Data di perforazione: 27 maggio 2009	
		Profondità (m): 15	
		Allestimento: piezometro fessurato per tutto lo spessore	
		Diametro: 2"	
		Sezione geologica di riferimento Sez. 4	
		Foglio CARG 205 - Comacchio	



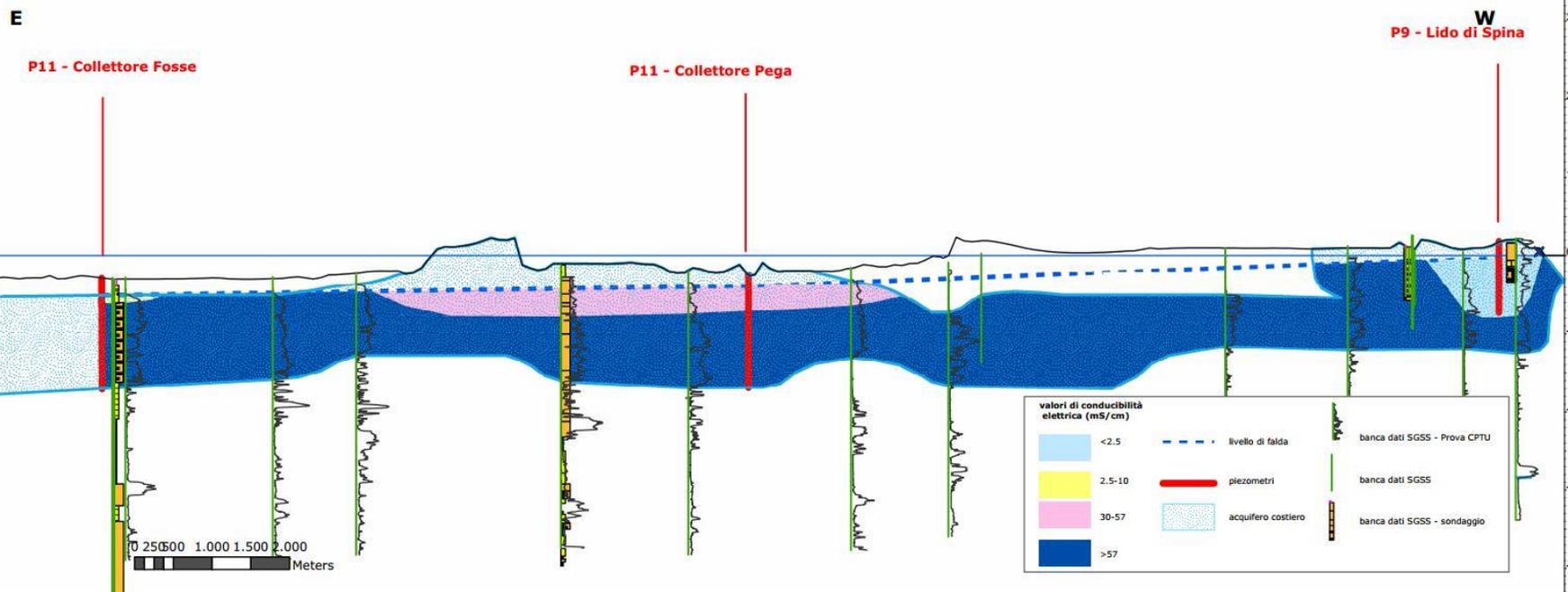
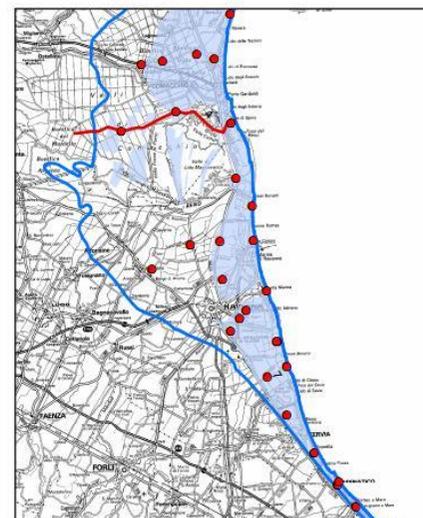
 Regione Emilia Romagna  servizio geologico sismico e dei suoli		Piezometro
Rete di monitoraggio dell'acquifero freatico costiero		P11 - Collettore Fosse
UBICAZIONE		
Località: Collettore Fosse		X (UTM*) 742385,1515
Comune: Comacchio		Y (UTM*) 947881,5744
Provincia: FERRARA		Quota (m s.l.m.): -3.14
1:100.000		1:5.000
		
SITO		DATI TECNICI
		Data di perforazione: 27 maggio 2009
		Profondità (m): 13.5
		Allestimento: primo metro cieco; da un metro a fondo foro fessurato e rivestito da geotessuto
		Diametro: 2"
		Sezione geologica di riferimento Sez. 4
		Foglio CARG 205 - Comacchio



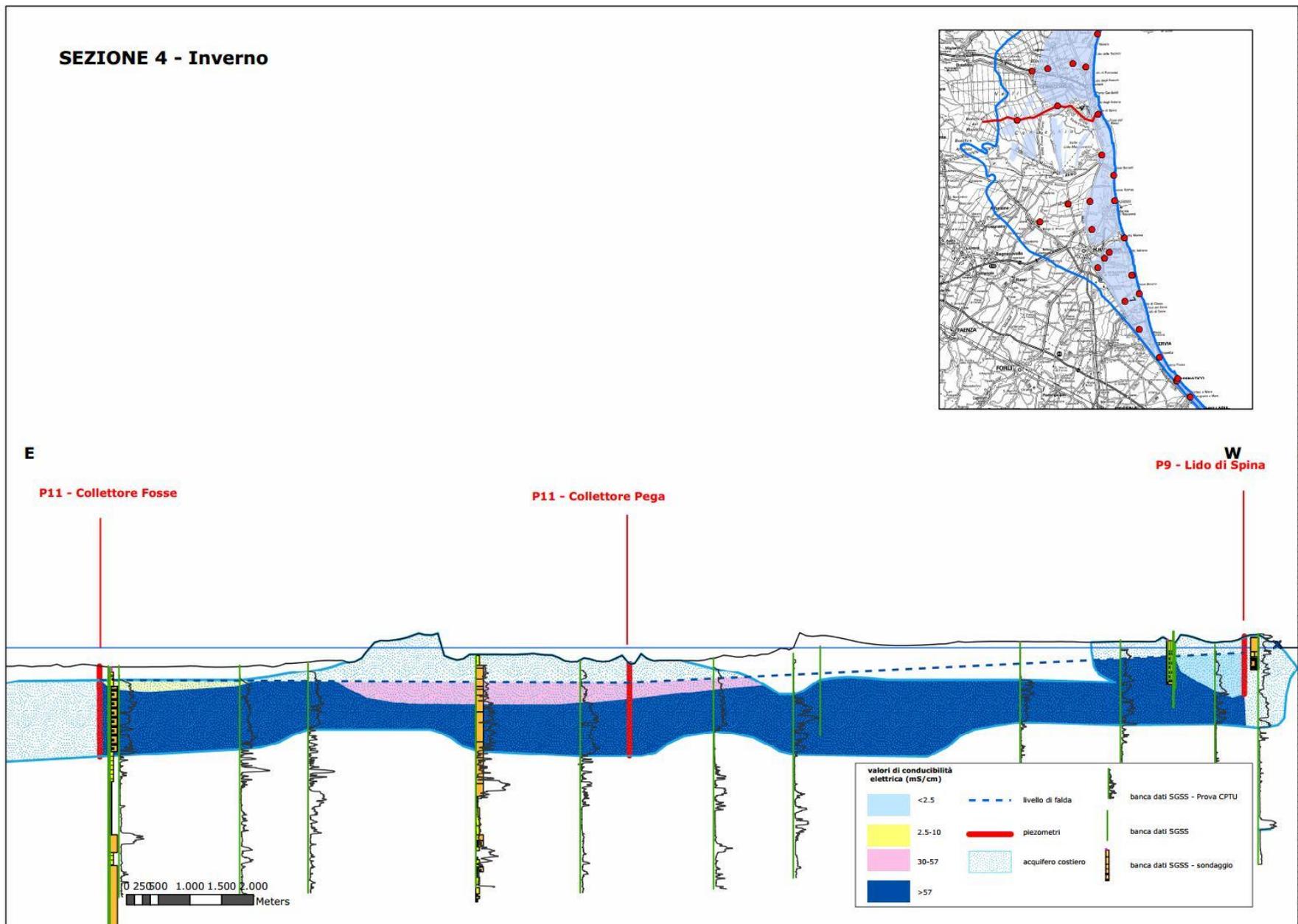
SEZIONE 4



SEZIONE 4 - Estate



SEZIONE 4 - Inverno



9 Bibliografia

- [1]. ENI, "Campi di Agosta e DossodegliAngeli: studio di subsidenza" - Management Summary, 2015
- [2]. T. Hueckel, G. Cassiani, J.H. Prévost and D.A. Walters: *Field Derived Compressibility of Deep Sediments of the Northern Adriatic. Land Subsidence*, Special Volume, Proc. 7th Int. Symp. on Land Subsidence, Shanghai, 2005.
- [3]. Bariani C., Biolcati S., Borea S., Ferronato M., Gargini A., Graldi I., Martelli G., Teatini P., Stricchi S., Vincenzi V., 2007, "Progettazione di un nuovo campo pozzi CADF per l'approvvigionamento idrico del basso ferrarese. Analisi modellistiche dell'impatto ambientale." In: "Approvvigionamento e distribuzione idrica: esperienze, ricerca ed innovazione", Morlacchi Editore, Perugia, 2007.
- [4]. Bonzi L., Calabrese L., Severi P., Vincenzi V., 2010, "L'acquifero freatico costiero della regione Emilia-Romagna: modello geologico e stato di salinizzazione." *Il geologo dell'Emilia-Romagna*, Anno X/2010 n.39, pp. 21-36.
- [5]. Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara, 2012, "Rete dei canali di bonifica e impianti idrovori- Tav. n. 21". Disponibile per il download alla pagina: <http://www.bonificaferrara.it/index.php/sit1/cartografie-scaricabili>
- [6]. Eni S.p.A., giugno 2015, "Istanza di Concessione di Coltivazione Agosta - Messa in produzione del pozzo Agosta 1 Dir - STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE - CAPITOLO 5 - QUADRO AMBIENTALE.
- [7]. Piano di Tutela della Acque della Provincia di Ferrara – Quadro conoscitivo.
- [8]. Giambastiani B. M. S., Colombani N., Mastrocicco M., Fidelibus M.D., 2013 "Characterization of the lowland coastal aquifer of Comacchio (Ferrara, Italy): Hydrology, hydrochemistry and evolution of the system". *Journal of Hydrology* 501 (2013) 35–44.
- [9]. Molinari F. C., Boldrini G., Severi P., Dugoni G., Rapti Caputo D., Martinelli G., 2007, "Risorse idriche sotterranee della Provincia di Ferrara", DB Map, Firenze, 2007.
- [10]. Piccinini L., Vincenzi V., Gargini A., 2008, "Monitoraggio idrogeologico e modellazione del flusso a densità variabile per la previsione della salinizzazione indotta da una cava di sabbia in un acquifero costiero superficiale (Ferrara)". *Ingegneria e Geologia degli Acquiferi*, 23: pp. 77-86.
- [11]. Portale webgis/banche dati Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-

Romagna: <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/cartografia/webgis-banchedati>

- [12]. Provincia di Ferrara, 2009, "Monitoraggio del cuneo salino nel Delta del Po – Anno 2009".
- [13]. Regione Emilia-Romagna, 2015, "Delibera di Giunta regionale n. 1781, Allegato 5, "Valutazione dello stato delle acque sotterranee - 2010-2013", a cura di Donatella Ferri e Marco Marcaccio. Disponibile per il download alla pagina: <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/acque/informazioni/documenti/aggiornamento-del-quadro-conoscitivo-di-riferimento-carichi-inquinanti-bilanci-idrici-e-stato-delle-acque-ai-fini-del-riesame-dei-piani-di-gestione-distrettuali-2015-2021>
- [14]. Regione Emilia-Romagna, 2015, "Delibera di Giunta regionale n. 1781, Allegato 8, "Valutazione dello stato delle acque di transizione - 2010-2013", a cura di Patricia Santini e Claudio Silvestro. Disponibile per il download alla pagina: <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/acque/informazioni/documenti/aggiornamento-del-quadro-conoscitivo-di-riferimento-carichi-inquinanti-bilanci-idrici-e-stato-delle-acque-ai-fini-del-riesame-dei-piani-di-gestione-distrettuali-2015-2021>
- [15]. RER & ENI-Agip, 1998, "Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna", a cura di G. Di Dio. Regione Emilia-Romagna – ENI, divisione Agip. S.EL.CA., Firenze, pp 120.
- [16]. V. Post, H. Kooi, C Simmons, 2007, "Using hydraulic head measurements in variable-density ground water flow analyses", *Ground Water*, 45, n.6, pp. 664-671
- [17]. Consorzio Ferrara Ricerche (Responsabile Scientifico L. Schippa), 2011, "Progetto di ricerca per lo studio dell'assetto idrodinamico delle valli di comacchio e degli effetti indotti dalla proposta di intervento p.d.i.p valle furlana e fiume Reno da s. Alberto al passo di Primaro",
- [18]. Parco regionale Delta del Po, Progetto di ricerca per lo studio dell'assetto idrodinamico delle Valli di Comacchio e degli effetti indotti dalla proposta di intervento "P.d.I.P. Valle Furlana e Fiume Reno da S. Alberto al Passo di Primaro", *Rapporto Scientifico* – Responsabile scientifico Schippa L., 2011
- [19]. Convenzione di Ricerca Parco Delta Po ER - CFR, "Analisi degli effetti sul campo di moto in ambito lagunare prodotti dalla realizzazione di dossi e barene: il caso studio delle Valli di Comacchio", *Rapporto Scientifico* – Responsabile scientifico Schippa L., 2013
- [20]. Fetter C.W., 1994, *Applied Hydrogeology*, 3rd ed.: Macmillan College Publishing, Inc., New York, 616
- [21]. Ghyben W. B., 1888, Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam.

Tijdschrift van Let Koninklijk Inst. Van. Ing.

[22]. HERZBERG A., 1901, Die Wasserversorgung einiger nordseebader. J. Gasbeleuchth, Wasserversorg, 44, 815 - 819 pp.

[23]. Custodio & Llamas, 2001, Hidrologia Subteranea. 2a edicion corregida. Ediciones Omega, Barcelona, 2001.

[24]. Diersch H.J.G., 2006, FEFLOW, Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, White Papers Vol. I. Wasy, Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd., Berlin, Germany

[25]. Gelhar, L. W., C. Welty, and K. R. Rehfeldt, 1992, "A Critical Review of Data on FieldScale Dispersion in Aquifers". Water Resour. Res.; 28(7): 1955-1974.

[26]. Anderson M.P., Woessner W.W., Hunt R.J., 2015, Applied groundwater modeling—Simulation of flow and advective transport. Second Edition. Elsevier, Academic Press, 564 p.

10 Elenco delle Figure

Figura 1 Ubicazione dei campi Dosso degli Angeli e Agosta	4
Figura 2 Andamento delle isolinee di subsidenza attesa all'anno 2020	5
Figura 3 Andamento delle isolinee di subsidenza attesa all'anno 2030	5
Figura 4 Corografia della porzione territoriale coinvolta dal cono di subsidenza (scenario 'upper' anno 2030)	6
Figura 5. Ubicazione delle stazioni di misura ARPAE e SGSS-RER.	7
Figura 6 Ubicazione impianti idrovori di bonifica	8
Figura 7. Inquadramento geologico-stratigrafico regionale dei depositi quaternari di sottosuolo tratto da[15].	9
Figura 8. Estratto della sezione geologica SGSS RER n.81[11].	11
Figura 9. Pozzi della rete ARPAE di monitoraggio delle acque sotterranee [13]: classificazione in base al valore medio di conducibilità elettrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) su tutta la serie dati disponibile.	12
Figura 10. Geometria dell'acquifero freatico costiero; estratti da[4].	14

Figura 11. Sezione geologica n.4 sull'acquifero freatico costiero; da [11].	15
Figura 12. Mappa dello stato di salinizzazione dell'acquifero freatico costiero; estratto da [4].	16
Figura 13. Profili verticali di conducibilità elettrica delle acque sotterranee in P11 (quota p.c. -3,14 m s.l.m.); fonte dati: [11].	17
Figura 14. Profili verticali di conducibilità elettrica delle acque sotterranee in P10 (quota p.c. -1,54 m s.l.m.); fonte dati: [11].	18
Figura 15. Sezione n.4: stato di salinizzazione dell'acquifero freatico costiero in Estate (sopra) ed Inverno (sotto); fonte dati: [11].	19
Figura 16. Profilo verticale di conducibilità al piezometro P10 (13/06/2016).	20
Figura 17. Ubicazione dei piezometri (ID in blu) e conducibilità elettrica @20°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$) (in rosso) rilevata nell'acquifero freatico costiero sull'area di studio; da[6]. L'area campita identifica il Pozzo Agosta.	21
Figura 18. Istogramma delle precipitazioni cumulate mensili alla stazione di Porto Garibaldi.	23
Figura 19. Confronto delle precipitazioni medie cumulate mensili registrate alle stazioni di Volano e Porto Garibaldi.	23
Figura 20 Il sistema di Bonifica Ferrarese (bacino Burana-Volano) e le porzioni gestite dagli ex-consorzi di bonifica (da [7])	25
Figura 21 Suddivisione della Bonifica ferrarese per punti di recapito delle porzioni scolanti (da [7])	25
Figura 22 Il sistema di derivazione distribuzione irrigua nella Bonifica Ferrarese (da [7])	27
Figura 23 Impianto idrovoro Gramigne	28
Figura 24 Rete di bonifica in prossimità dell'impianto idrovoro di Fosse	28
Figura 25 Impianto idrovoro Fosse Acque Basse.	29
Figura 26 Rete di bonifica in prossimità dell'impianto idrovoro di Umana	30

Figura 27 Impianto idrovoro di Umana	30
Figura 28 Impianto idrovoro Valle Lepri Acque Alte e Acque Basse e schema dei canali afferenti	31
Figura 29 La porzione territoriale interessata dalla subsidenza (scenario <i>upper2030</i>). In evidenza: i canali principali di scolo e gli impianti idrovori a servizio dei comprensori di bonifica del Mezzano Sud-Est e di Valle Pega; i piezometri della rete SSGS-ER ed i punti di misura della Conducibilità Elettrica (CE) delle acque superficiali.	32
Figura 30. Misure di salinità negli elementi della rete di bonifica.	34
Figura 31. Storico delle misure mensili della conducibilità elettrica nel Canale Circondariale NW – presso impianto idrovoro Valle Lepri (dati ARPAE – 1=mese gennaio).	35
Figura 32. Dettaglio planimetrico nell'intorno dei punti di misura sul collettore Pega	36
Figura 33. Normogramma a curve di livello (m) per il valore del carico equivalente di acqua dolce (h_f) in funzione della densità effettiva locale del fluido e della rispettiva quota locale all'interno dell'acquifero. (si assuma il valore del carico effettivo $h=0$. (da [16]))	37
Figura 34. Livello idrometrico stazione di Bellocchio – Valle Grande (dati ARPAE).	38
Figura 35. Estratto rappresentativo della serie temporale del livello (in m s.l.m.) registrato alla stazione di Fosse Foce.	38
Figura 36. Salinità delle Valli di Comacchio; dati forniti da ARPAE [14].	39
Figura 37. Campagna di misura della riflettività del fondale. A sx corografia dell'area indagata. A dx linee di navigazione ed acquisizione dati.	40
Figura 38. Profilo rappresentativo di riflettività del fondale.	41
Figura 39. Esempio di correlazione tra i profili sismici e le CPTu.	42
Figura 40. Successione degli orizzonti sismici e delle unità litostratigrafiche individuate.	43
Figura 41 Batimetria delle Valli. Rilievi 2011 ([18] [19]).	44
Figura 42. Schema del cuneo salino.	46

- Figura 43. Esempi di: carico puntuale (a), carico di acqua dolce (b) e carico ambientale (c); da [16]. 47
- Figura 44. Schema del modello concettuale dell'acquifero freatico costiero nella zona di studio. 50
- Figura 45. Batimetria del fondale delle Valli di Comacchio e profilo batimetrico lungo una sezione orientata parallelamente all'asse maggiore dell'ellissoide di subsidenza. 53
- Figura 46. Prove geognostiche RER nei pressi dell'area di studio: a) ubicazione planimetrica; b) CPTU 510; c) CPTU 507; fonte dati [11]; Fr = fiction ratio; U = pressione interstiziale dei pori; Fs = attrito sul manicotto; Qc = resistenza alla punta. 54
- Figura 47. Dominio di modellazione e griglia di calcolo. 55
- Figura 48. Condizioni al contorno del flusso applicate al modello. 57
- Figura 49. Condizioni al contorno del trasporto applicate al modello. 57
- Figura 50. Profili verticali di conducibilità idraulica (K) rilevati da Giambastiani et al. (2013); estratto da [8]. 60
- Figura 51. Proprietà dei materiali; i box indicano le zone di Tabella 6. 61
- Figura 52. Punti di osservazione dei carichi e delle concentrazioni. In alto il dominio di calcolo nel suo complesso. In basso un particolare del dominio di calcolo in corrispondenza delle sezioni verticali rappresentative identificate 62
- Figura 53. Carichi piezometrici (m s.l.m.) calcolati dal modello nello scenario attuale. 64
- Figura 54. Concentrazioni di TDS (mg/l) calcolate dal modello nello scenario attuale. 64
- Figura 55. Calibrazione qualitativa del modello (scenario attuale): confronto dei logs di salinità calcolati in corrispondenza delle verticali rappresentativi all'interno del dominio di calcolo, con i logs osservati disponibili per i piezometri P10 e P11 (da [11]). 65
- Figura 56. Carichi piezometrici (m s.l.m.) calcolati dal modello nello scenario previsionale. 66
- Figura 57. Concentrazioni di TDS (mg/l) calcolate dal modello nello scenario previsionale. 66

Figura 58. Confronto dei carichi piezometrici calcolati nello scenario attuale e nello scenario previsionale. 67

Figura 59. Confronto delle concentrazioni calcolate nello scenario attuale e nello scenario previsionale (linee isoconcentrazione ogni 1000 mg/l di TDS): scenario attuale (etichette blu) e scenario previsionale (etichette rosse). 68

Figura 60. Confronto dei logs di salinità calcolati nello scenario attuale e nello scenario previsionale in corrispondenza delle tre verticali rappresentative localizzate all'interno dominio. 69

11 Elenco delle Tabelle

Tabella 1. Conducibilità elettrica delle acque dell'acquifero freatico costiero sul sito di studio (analisi anno 2006); da Quadro Ambientale[6]. 21

Tabella 2. Precipitazioni medie cumulate mensili alle stazioni di Volano (anni 2007-10) e Porto Garibaldi (2010-15). 24

Tabella 3 Quote di azionamento dei principali impianti idrovori a servizio della porzione territoriale del bacino di Bonifica Ferrarese di interesse. Evidenziati gli impianti Fosse A.B. (a servizio del comprensorio Mezzano SE) e Lepri PegaA.B.(a servizio del comprensorio Valle Pega) 31

Tabella 4. Rilievi di CE (mS/cm a 25°C) sul Collettore Fosse e sul Canale Circondariale Gramigne Fosse [dati SGSS RER]. 34

Tabella 5 Stazioni Rete ARPAE acque di transizione nelle Valli di Comacchio [14]. 39

Tabella 6. Proprietà dei materiali: K conducibilità idraulica; n porosità, Dm diffusione molecolare; α dispersività longitudinale (L) e trasversale (T), Density ratio= rapporto tra densità. 61