

---

# ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di laurea magistrale in Analisi e Gestione dell'Ambiente

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali

sede di Ravenna

## **Caratterizzazione idrogeologica dell'acquifero presente all'interno di cordoni litoranei antropizzati: casi studio di Marina Romea e Porto Corsini**

Tesi di Laurea in Idrologia Ambientale

Relatore:

**Chiar.mo Prof. Antonellini Marco**

Presentata da:

**Davide Cozzolino**

Correlatori:

**Dott. Greggio Nicolas**

**Dott.ssa Giambastiani Beatrice Maria Sole**

Controrelatore:

**Chiar.mo Prof. Dinelli Enrico**

**III Sessione**

---

**Anno Accademico 2014-2015**

---



---

# INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>1</b>
1.1	Scopo della Ricerca.....	1
1.2	Acque Sotterranee.....	3
1.3	Dune Costiere.....	5
1.4	Problematiche.....	7
1.4.1	Erosione Costiera.....	7
1.4.1.1	Teoria.....	7
1.4.1.2	Erosione costiera in Emilia-Romagna.....	9
1.4.2	Intrusione Salina.....	13
1.4.2.1	Teoria.....	13
1.4.2.2	Intrusione salina in Emilia-Romagna.....	14
1.5	Normativa di Riferimento.....	16
<b>2</b>	<b>AREA DI STUDIO</b> .....	<b>18</b>
2.1	Limiti ed Assetto Geografico.....	19
2.1.1	Le Dune.....	19
2.1.2	La Pineta.....	20
2.2	Evoluzione Geologica e Stratigrafica.....	21
2.3	Assetto Idrogeologico.....	22
2.3.1	Acquifero costiero superficiale.....	24
2.4	Evoluzione Recente della Costa.....	25
2.5	Assetto Idrologico.....	26
2.5.1	Fiume Lamone.....	27
2.5.2	Canale Candiano.....	28
2.5.3	Pialassa Baiona.....	28
2.5.4	Canale di drenaggio e idrovora.....	30
2.6	Bilancio Idroclimatico.....	31

---

<b>3</b>	<b>MATERIALI E METODI</b> .....	33
3.1	Rete Piezometrica.....	34
3.1.1	Costruzione minifiltri e piezometri.....	34
3.1.2	Messa a dimora .....	37
3.2	Monitoraggio e Analisi.....	40
3.2.1	Rilievi GPS .....	40
3.2.2	Rilievi Freatimetrici .....	42
3.2.3	Determinazione della conduttività e di altri parametri chimico-fisici .....	43
3.2.4	Misure geochimiche e spettrofotometriche in campo.....	44
3.2.5	Campionamento .....	47
3.2.6	Analisi F-AAS .....	49
3.2.7	Analisi IC.....	52
<b>4</b>	<b>RISULTATI</b> .....	54
4.1	Freatimetria ed andamento Stagionale .....	55
4.2	Parametri Chimico-Fisici .....	58
4.2.1	pH.....	61
4.2.2	Salinità .....	65
4.3	Analisi Geochimica .....	70
4.3.1	Elaborazione statistica .....	70
4.3.2	Decomposizione della materia organica .....	76
4.3.3	Tipologia di acqua (secondo Stuijzand, 1993) .....	78
<b>5</b>	<b>DISCUSSIONI</b> .....	82
5.1	Freatimetria ed Andamento Stagionale .....	82
5.2	Parametri Chimico-Fisici .....	83
5.2.1	Temperatura .....	83
5.2.2	pH.....	84
5.2.3	Salinità .....	87

5.3	Analisi Geochimica .....	91
5.3.1	Elaborazione Statistica.....	91
5.3.2	Decomposizione della Materia Organica.....	95
5.3.3	Tipologia di acqua (secondo Stuijzand, 1993) .....	95
6	<b>CONCLUSIONI</b> .....	97
7	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	100
7.1	Sitografia .....	106
	Appendice .....	107
	Ringraziamenti.....	138

# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 SCOPO DELLA RICERCA

L'obiettivo di questo progetto è la caratterizzazione idrogeologica di una porzione dell'acquifero freatico costiero situato in due differenti corpi dunosi ubicati a Marina Romea e Porto Corsini. L'indagine si è svolta in maniera continua per un periodo di cinque mesi e vuole essere rappresentativa delle caratteristiche idrogeologiche delle dune, ricercando primariamente le differenze che si instaurano tra un sistema sottoposto a forte pressione antropica (Marina Romea) e un sistema che negli ultimi decenni ha visto un relativo sviluppo naturale del sistema spiaggia-duna (Porto Corsini).

Al fine di rendere completa la ricerca e con l'obiettivo di comprendere appieno gli agenti che interagiscono nei sistemi costieri, nasce la necessità di svolgere prima di tutto un'analisi delle conoscenze pregresse, riportando anche le maggiori problematiche connesse a tali ambienti.

Successivamente vengono definiti i molteplici fattori che caratterizzano le acque sotterranee e ne stabiliscono il deflusso, sviluppando lo studio su tre fronti: rilievi freaticometrici, acquisizione di parametri chimico-fisici, analisi geochemiche.

Una campagna di monitoraggio così organizzata permette di descrivere la distribuzione delle acque dolci e di quelle salate nonché la loro dinamica stagionale.

Infine, una classificazione idro-geochemica consente di valutare la tipologia delle acque presenti nell'area in esame e la loro eventuale variazione durante i mesi indagati.

Per la fase di raccolta campioni si è optato per il sistema a minifiltri, metodologia sperimentale che mostra una lunga serie di vantaggi, tra cui una campionatura multi-livello.

Lo studio è stato svolto all'interno di un ambito di ricerca più ampio che vede coinvolto il laboratorio IGRG – Integrated Geosciences Research Group – CIRSA dell'Università Alma Mater Studiorum di Bologna in collaborazione con la Fondazione Flaminia, ENI e il Comune di Ravenna in un progetto di ripristino e gestione delle dune costiere ravennate.

Gli obiettivi di tale progetto sono i seguenti:

- la realizzazione di una dettagliata mappatura dei cordoni dunosi esistenti e la definizione dei fenomeni d'interazione dinamica che caratterizzano i sistemi dunosi presenti;

- l'analisi dello stato dell'arte che descriva le differenti tipologie e le caratteristiche delle dune esistenti allo scopo di una miglior definizione delle possibili strategie d'intervento;
- la valutazione degli impatti, dei costi e della durata delle differenti alternative d'intervento al fine di valutare quale sia la soluzione più performante;
- l'attivazione sperimentale di un esempio di ripristino ed uno di ricostruzione ex-novo di una duna in due aree di particolare valenza;
- la predisposizione di un approccio logico in grado di assicurare un'appropriata pianificazione del monitoraggio, della gestione e dell'attuazione delle attività;
- la verifica della possibilità di nuove tecnologie di costruzione e fruizione degli impianti turistico – balneari.

## 1.2 ACQUE SOTTERRANEE

Solo il 3% di tutta l'acqua presente sulla superficie della Terra è dolce, e più dei due terzi di questa percentuale si trova in forma solida nei ghiacciai (Shiklomanov et. al., 1999). A causa della loro estensione ridotta rispetto ai bacini lacustri, i sistemi fluviali e le falde acquifere sotterranee costituiscono una percentuale relativamente limitata delle acque dolci totali, solo lo 0,006% (Graham et. al. 2010). Da cui nasce allora l'esigenza di salvaguardare e preservare questa risorsa primaria, studiando processi che interagiscono con il bilancio idrico e cercando di ottenere informazioni di tipo quantitativo e qualitativo sullo stato delle falde.

Quando le acque meteoriche raggiungono la superficie terrestre in parte ritornano all'atmosfera per effetto dell'evaporazione, in parte per ruscellamento alimentano i reticoli idrografici e in parte attraverso le fratture/porosità delle formazioni rocciose permeabili superficiali riescono a penetrare nel suolo. Questa percola in profondità fino a quando non incontra una formazione impermeabile (es. formazione argillosa o rocciosa compatta) che ne arresta il movimento formando la falda.

La falda è contenuta quindi nell'acquifero: una formazione o gruppo di formazioni costituite da roccia e/o terreno sciolto i cui vuoti all'interno della matrice solida sono saturati da acqua in grado di muoversi in funzione della permeabilità dell'acquifero stesso (Calace et al., 2007). Lo stato e la quantità dell'acqua contenuta nel terreno permettono di distinguere, lungo un profilo verticale, tre zone che sono, dall'alto verso il basso:

- zona insatura
- frangia capillare
- zona satura o acquifero.

La zona insatura è la porzione di sottosuolo subito al di sotto della superficie in cui le fessure della roccia o gli spazi vuoti compresi tra i granuli di sedimento non sono completamente pieni d'acqua e questa è in grado di spostarsi verso il basso per effetto della gravità.

La frangia capillare costituisce una zona di passaggio tra la zona insatura e la zona satura; in essa i pori sono quasi interamente occupati dalla fase liquida, che qui è trattenuta per capillarità ad una pressione crescente con la profondità ma sempre inferiore a quella atmosferica. Il suo spessore varia notevolmente con la granulometria del terreno passando da qualche centimetro nella ghiaia fino a un paio di metri nell'argilla.



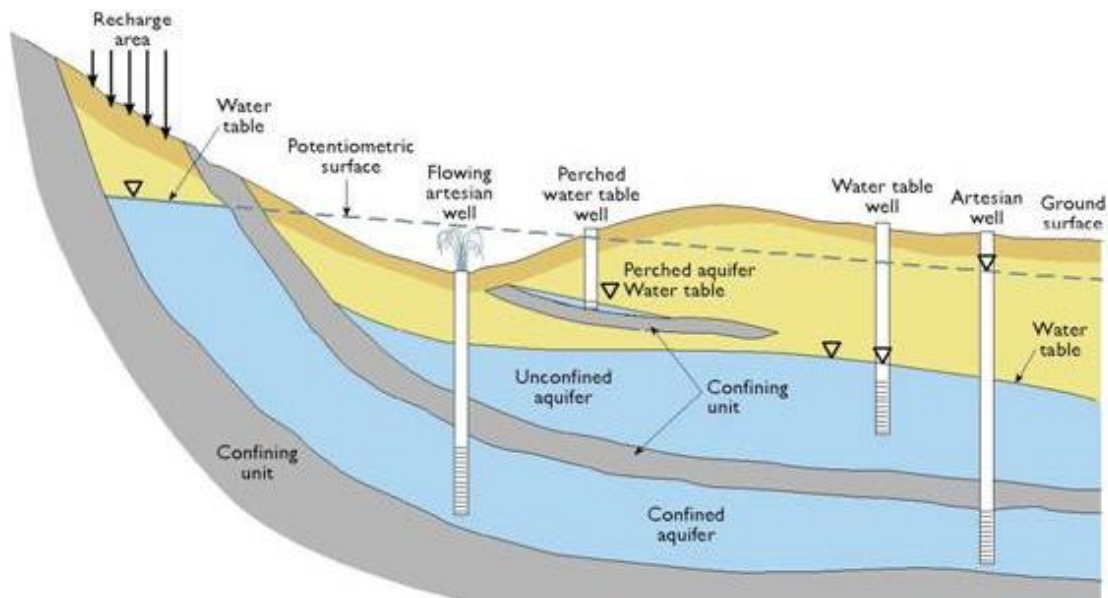
La zona satura o acquifero contiene la falda acquifera, il cui limite con la frangia capillare è la superficie piezometrica, definita come la superficie lungo la quale la pressione dell'acqua è pari a quella atmosferica.

Al di sotto del livello freaticometrico tutti i pori o le fessure sono saturi d'acqua e questa si muove in direzione prevalentemente orizzontale per effetto di un gradiente di pressione. La porzione di terreno interessata dalle fluttuazioni della falda e che quindi si trova ad essere ora satura ora insatura è detta zona di oscillazione della falda (in termine anglosassone *smear zone*).

Si definisce acquifero non confinato o libero quello in cui la superficie piezometrica coincide con la superficie libera dell'acqua, detta superficie freatica, la quale può liberamente oscillare in funzione delle condizioni di alimentazione.

Si dice invece acquifero confinato quello che è limitato anche superiormente da una formazione con bassa permeabilità e in cui la superficie piezometrica si trova ad una quota superiore a quella della formazione confinante.

Se si intercetta un acquifero confinato la cui superficie piezometrica è più alta della superficie topografica, l'acqua comincerà a fluire spontaneamente: in questo caso si dice che l'acquifero (e il pozzo) è artesiano, nome che deriva dalla regione francese dell'Artois in cui tale fenomeno è stato studiato la prima.



**Fig. 1.1 – Schema dei vari tipi di acquiferi: sospeso, confinato e libero, con i relativi pozzi** ([http://cnx.org/contents/F0Hv\\_Zza@43.2:yeVQResF@5/Water-Cycle-and-Fresh-Water-Su](http://cnx.org/contents/F0Hv_Zza@43.2:yeVQResF@5/Water-Cycle-and-Fresh-Water-Su)).

La permeabilità di una roccia e la viscosità dinamica del fluido descrivono la conducibilità idraulica ( $K$ ). Questa grandezza rappresenta il volume di acqua gravifica che attraversa nell'unità di tempo l'unità di superficie dell'acquifero, e ha dimensioni m/s.

L'acqua contenuta nel sottosuolo, si può trovare in diverse forme:

- acqua di adsorbimento (o igroscopica) - costituisce un primo film continuo a contatto con il granulo, con uno spessore dell'ordine di un decimo di micron. Tale acqua è legata ai grani di terreno con legami dipolari ed elettrochimici e non può essere spostata allo stato liquido;
- acqua pellicolare - rappresenta una pellicola dello spessore dell'ordine del micron e può spostarsi alla superficie dei grani sotto l'azione dell'attrazione delle vicine molecole d'acqua;
- acqua capillare - è l'acqua che occupa parzialmente o totalmente i vuoti tra i granuli e ha menischi concavi; anch'essa è soggetta a tensione superficiale; è detta isolata se occupa solo in parte i vuoti e continua se li riempie completamente, formando la cosiddetta frangia capillare, il cui spessore è tanto maggiore quanto più piccoli sono i canali;
- acqua gravifica - è l'acqua che può fluire nel sottosuolo sotto l'azione della forza di gravità e costituisce la falda idrica. Solamente questa circola negli acquiferi, sotto l'azione di gradienti ed alimenta le opere di captazione e le sorgenti (Castany G., 1985).

### **1.3 DUNE COSTIERE**

Nella fascia più interna della costa, le spiagge hanno la tendenza a modellarsi sotto l'azione del vento e costituire ondulazioni alte in genere circa 3-6 m sul livello del mare. Queste forme vengono chiamate dune e sono originate dall'azione combinata di tre fattori, il trinomio dinamico: vento, sabbia e vegetazione.

Le dune sono quindi forme eoliche che presentano un profilo che riflette diversi fattori:

- Le caratteristiche dei sedimenti (principalmente la granulometria);
- Il regime del vento.

Il materiale che costituisce le dune è da un punto di vista tessiturale maturo data l'alta selettività del vento che permette l'arrotondamento e la cernita granulometrica, e quindi l'assenza di frazione grossolane e fini. Da un punto di vista compositivo, i sedimenti sono principalmente costituiti da granuli di quarzo e feldspati delle dimensioni della sabbia ma esistono anche dune composte da carbonati, gesso, e sabbia vulcanoclastica.

La formazione di aree dunali è determinata dalla produzione di sedimento granulometricamente idoneo, dalla sua disponibilità per il trasporto eolico e dalla capacità di trasporto del vento. La disponibilità del sedimento varia in funzione del suo contenuto di

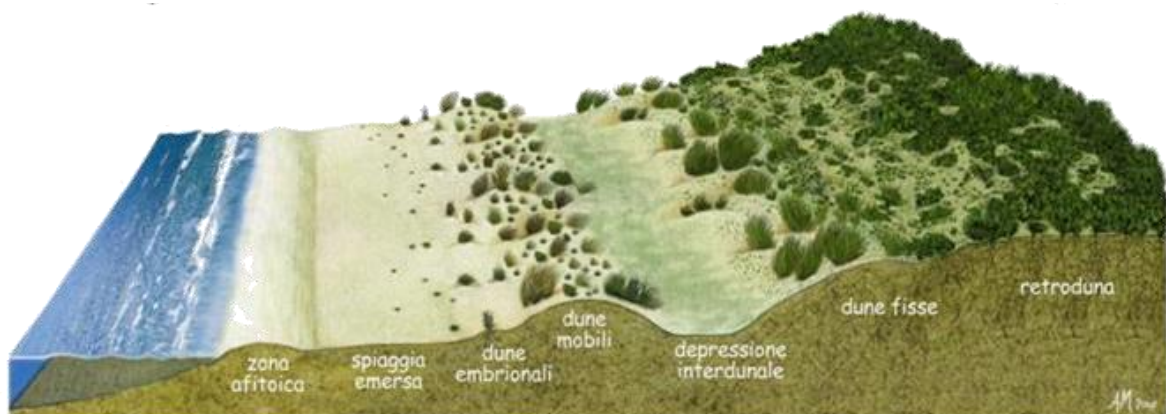
umidità, della copertura vegetale e della coesione tra i granuli; la capacità di trasporto da parte del vento dipende principalmente dalla sua velocità (Pranzini, 2004).

Le dune litoranee si possono generalmente suddividere in due categorie:

- avandune o dune primarie: tipici depositi eolici ancorati alla vegetazione, paralleli alla linea di costa, che occupano nel momento della loro formazione la posizione più avanzata rispetto al mare. Sono una forma relativamente stabile che evolve in sito grazie all'interazione tra il trasporto eolico e la vegetazione.
- dune secondarie rappresentano vecchi cordoni di avandune, relegati in una posizione retrostante a seguito della formazione di nuovi cordoni frontali.

Inoltre, le dune si possono classificare in funzione del loro grado di maturità cosicché si distinguono:

- duna fissa: con vegetazione di tipo arboreo/arbustivo che impedisce o diminuisce la dinamica sedimentaria in quanto le radici della vegetazione trattengono la sabbia.
- duna mobile: con vegetazione rada ed erbaceo-arbustiva con aree in evoluzione sedimentaria.
- duna embrionale: priva di vegetazione e in continua evoluzione morfosedimentaria.



**Fig. 1.2 – Evoluzione naturale delle dune costiere**  
(<http://digilander.libero.it/gasbarrostefano/ambiente.html>)

## 1.4 PROBLEMATICHE

### 1.4.1 Erosione Costiera

#### 1.4.1.1 Teoria

L'erosione costiera si può considerare come un'asportazione superficiale di materiale da parte del mare. Per disperdersi verso il largo i sedimenti devono venire ridotti nelle loro dimensioni dall'abrasione marina, processo relativamente lento che si attua prevalentemente nella fascia compresa fra la linea dei frangenti e la cresta della berma di tempesta, ma più efficacemente in prossimità della battigia (Pranzini, 2004).

Si deduce che l'ambiente costiero è quindi un sistema dinamico dove i fenomeni di arretramento o di avanzamento della linea di costa sono controllati da numerosi fattori: meteorologici, geologici, biologici ed antropici.



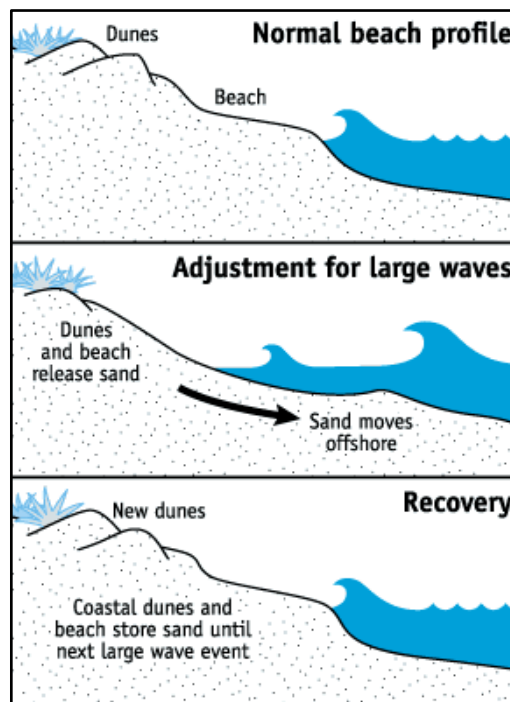
**Fig. 1.3 – Esempi di avandune. In alto e a destra dune di Marina Romea, in basso la duna di Porto Corsini. Notare la piccola falesia formatasi nella duna di destra a seguito di erosione**

Sebbene in generale il cambiamento climatico sia da considerarsi come il principale responsabile dei mutamenti a cui è sottoposta la linea di costa, localmente molti altri parametri possono assumere una prevalenza significativa.

Si può in particolare pensare a:

- subsidenza naturale o indotta da estrazioni di fluidi dal sottosuolo;
- mancato apporto di sedimenti verso costa causato dall'alterazione dei cicli sedimentari per intervento antropico nei bacini idrografici (sbarramenti fluviali, regimazioni idrauliche, estrazioni di materiali alluvionali);
- influenza sulla dinamica litoranea dei sedimenti intercettati dalle opere marittime (opere portuali e di difesa) e delle infrastrutture viarie e urbanistiche costiere.

I cordoni litorali rappresentano un sistema di riserva di sedimento in grado di equilibrare le dinamiche naturali di una costa e presentano un profilo topografico tale da dissipare l'energia del moto ondoso. Questo fenomeno si verifica soprattutto nella stagione invernale quando aumentano le mareggiate, sia in intensità che in frequenza, cosicché viene eroso un elevato quantitativo di sedimento e sequestrato nelle barre sottomarine facendo assumere alla spiaggia il cosiddetto “*storm profile*”. Al contrario, nel periodo estivo, il moto ondoso ha minor energia per cui esercita un'azione costruttiva formando le morfologie deposizionali tipiche dello “*swell profile*” quali berme e avandune (Pranzini, 2004). Inoltre, la presenza di uno o successivi cordoni dunosi, laddove questi si presentano con elevato grado di naturalità, si presta come unica difesa naturale al rischio di ingressione marina nell'entroterra indotto da forti mareggiate poiché costituiscono l'unico rilievo topografico naturale della costa, in grado di essere una barriera morfologica.



**Fig. 1.4 – Profilo stagionale della spiaggia dettato dall'energia del moto ondoso**  
<http://palmergeoghist.weebly.com/coastal-erosion.html>

#### **1.4.1.2 Erosione costiera in Emilia-Romagna**

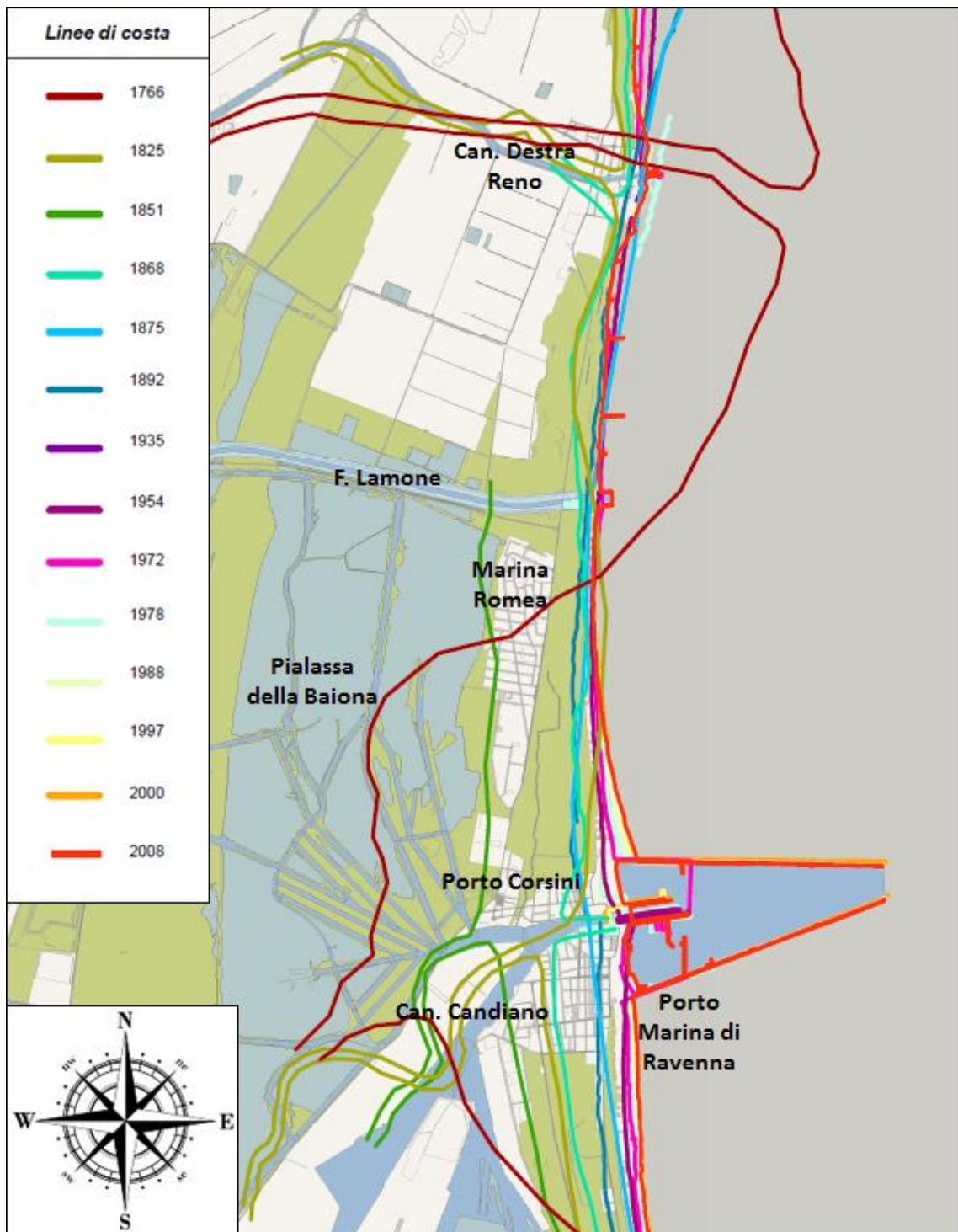
Nel corso del Novecento, il sistema ambientale litoraneo della regione Emilia-Romagna è stato oggetto di una profonda trasformazione che lo ha reso estremamente fragile.

L'intera fascia costiera, con un sistema dunoso continuo lungo l'Adriatico, è stata urbanizzata a partire principalmente dal dopoguerra, determinando una progressiva perdita di terreni agricoli, di spiaggia e l'irreversibile distruzione di ampi tratti di duna. In particolare, gli insediamenti urbani sono incrementati del 400% (ARPA, 2011).

Nello specifico un progressivo aumento della superficie di spiaggia occupata da infrastrutture turistiche con un conseguente spianamento delle dune, che ha contribuito a incrementare l'area della spiaggia emersa e della superficie urbanizzata (Perini e Calabrese, 2010).

Per quanto riguarda le zone umide costiere si è assistito a una perdita progressiva di superficie occupata. Le più importanti modificazioni sono avvenute nell'immediato dopoguerra e sono legate alle opere di bonifica.

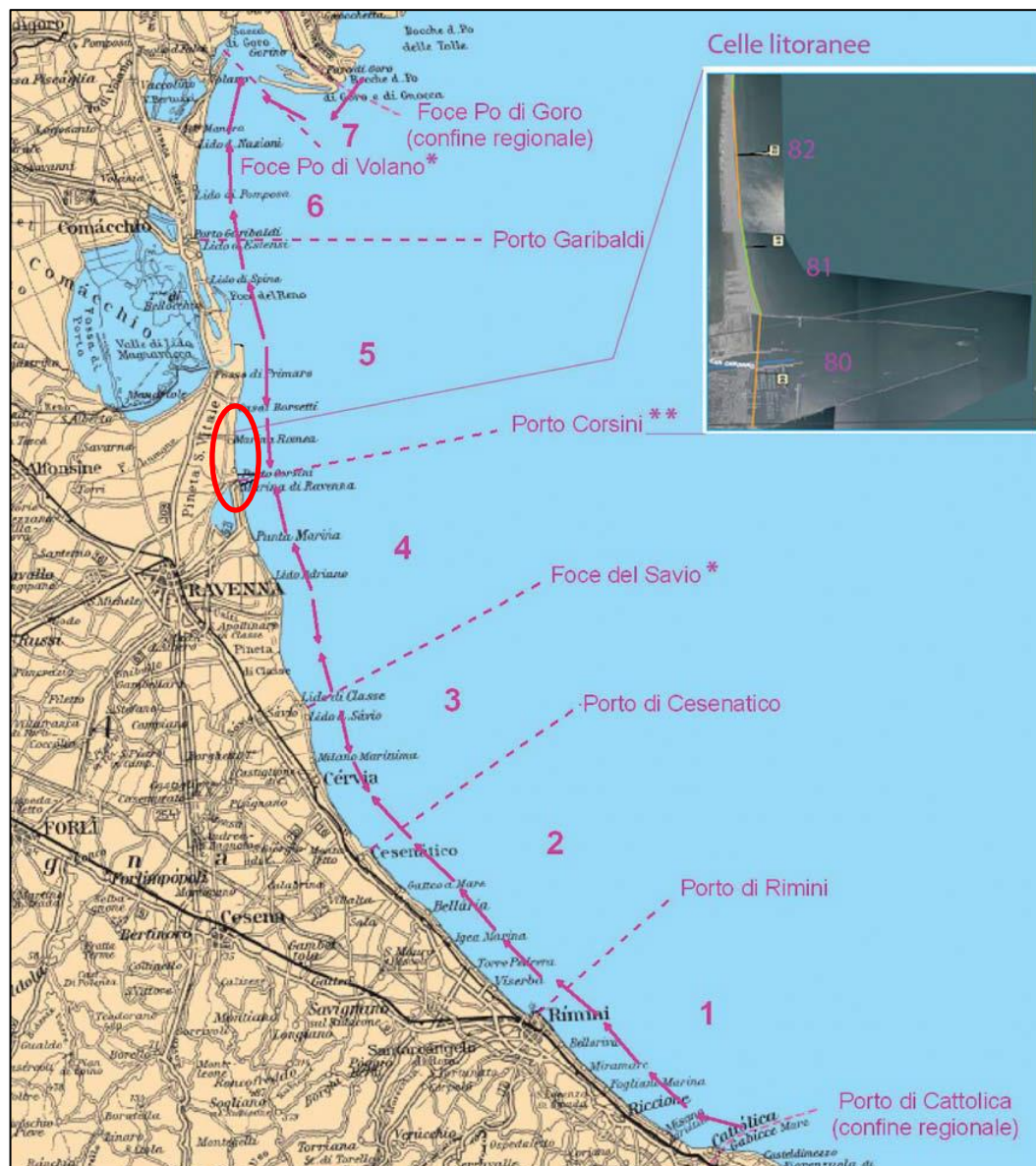
La regimazione dei fiumi e l'escavo di inerti in alveo hanno portato a un crollo del trasporto di sabbia verso il mare e, quindi, a una forte riduzione dell'alimentazione naturale delle spiagge (meno del 95% dei sedimenti raggiungono la costa) (Antonellini et al., 2008).



**Fig. 1.5 – Evoluzione storica della linea costa. Scala 1:10000 nord di Marina di Ravenna, zona d’interesse dello studio (P.O.C. Piano dell’arenile 2009 – Tavola A.1.1)**

Nella seconda metà del secolo, l’intensificazione dello sfruttamento delle risorse idriche sotterranee e dei giacimenti di metano ubicati in prossimità della costa hanno determinato l’incremento della subsidenza della fascia litoranea e, conseguentemente, dell’erosione delle spiagge. Attualmente il fenomeno dell’abbassamento del suolo causa, lungo il litorale regionale, la creazione di nuovo spazio deposizionale che per essere compensato necessita

di un volume di sabbia di 1 milione di metri cubi l'anno (nei primi anni 90 il volume necessario ammontava a 2 milioni di metri cubi l'anno) (ARPA, 2011).

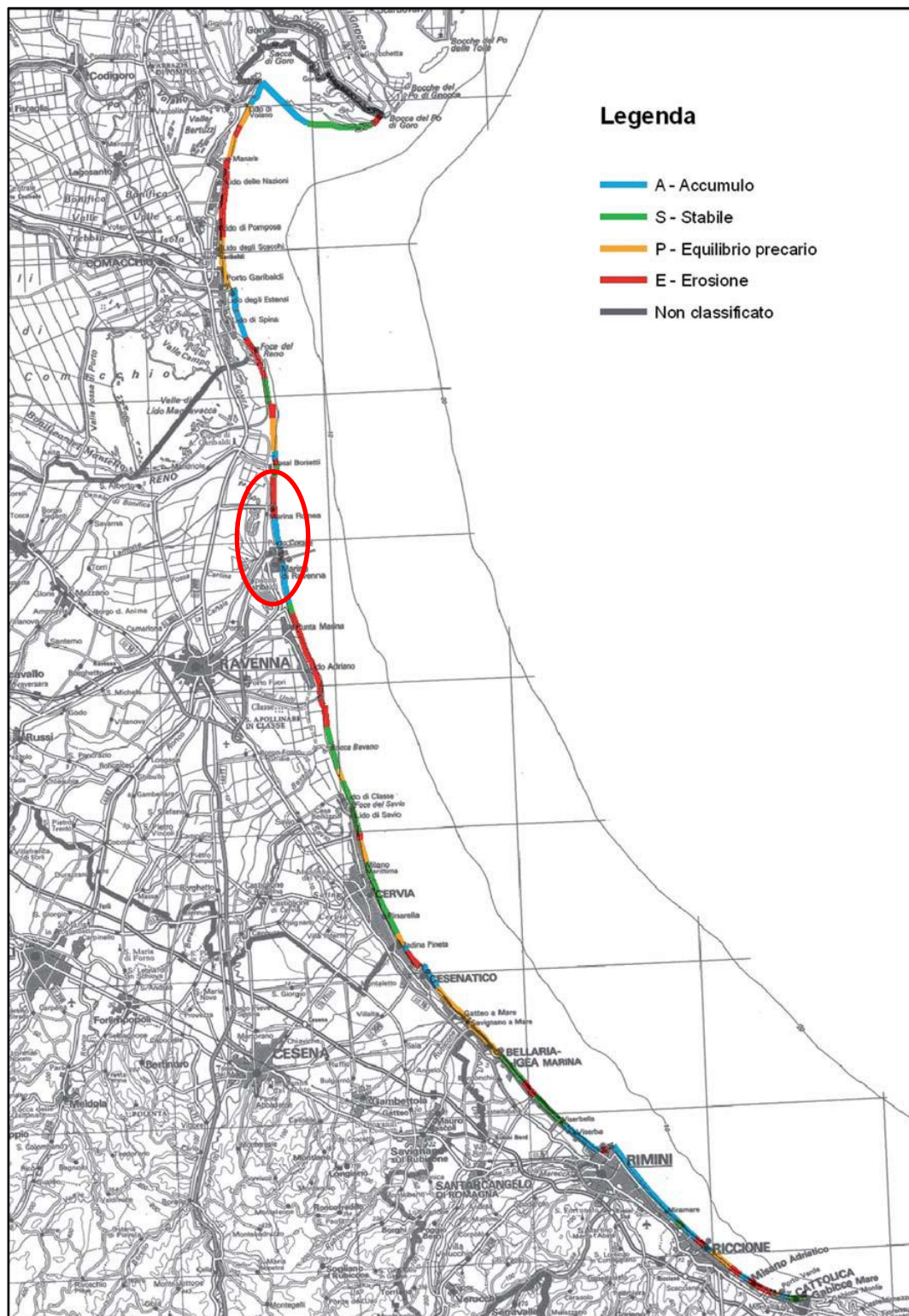


**Fig. 1.6 – Suddivisione del litorale in macrocelle limitate da lunghi moli portuali (o punti nulli) con direzioni del trasporto di materiale solido lungo costa indicato dalle frecce nella mappa (ARPA, 2011). Nel riquadro a destra è riportato il dettaglio di tre celle litoranee poste all'interno della zona d'interesse (tra Porto Corsini e Marina Romea).**

L'altro elemento di pressione che ha contribuito a minare l'equilibrio della costa regionale è stato la costruzione di opere trasversali (moli in cemento armato), a protezione dei numerosi approdi che sono stati costruiti sotto la spinta dello sviluppo della marineria militare e civile. Queste opere, oltre a causare una frammentazione fisica del sistema costiero, che in origine si sviluppava per 100 km senza soluzioni di continuità, hanno interferito notevolmente sul trasporto solido lungo costa, ostacolando e producendo fenomeni localizzati di erosione sottoflutto alle opere stesse.



Il risultato di tutte queste pressioni è un 47% di tratti litorali che presentano perdita di materiale sabbioso o in equilibrio per mezzo delle opere di ripascimento e più di 20 km di spiaggia che hanno subito significativi arretramenti della linea di riva (ARPA,2011).



**Fig. 1.7 – Stato del litorale Romagnolo, dati dal 2000 al 2006 (ARPA, 2011). L’area d’interesse ai fini dello studio è cerchiata in rosso. Per equilibrio precario si intende tratto di litorale che non evidenzia perdite o accumuli di sabbia significativi e che è stato oggetto di interventi di difesa (come ripascimenti od opere) nel periodo in esame.**

## 1.4.2 Intrusione Salina

### 1.4.2.1 Teoria

Un'ulteriore azione delle dune costiere è rappresentata dal contrasto all'intrusione di acqua marina nel sottosuolo. In particolare, tale opposizione viene effettuata dalla presenza di un acquifero dolce o da lenti di acqua dolce presenti nelle zone sature lungo costa. La formazione di tale lente di acqua dolce al di sopra del livello del mare è permessa dal rilievo topografico unito alla presenza di un acquifero non confinato (Antonellini et al., 2010).

L'intrusione dell'acqua salata è un fenomeno che avviene spontaneamente in zona costiera, vista la presenza di una fonte inesauribile quale il mare. All'interno dell'acquifero viene così a crearsi una zona d'interfaccia tra acqua dolce, più leggera, che scorre verso mare e acqua salata, più pesante, che si incunea nel bacino idrogeologico dal mare. La zona di transizione che si crea è generata principalmente dal processo di diffusione ed eventualmente di dispersione e mescolamento essendo causata da flussi fra fluidi a diversa densità e forte gradiente chimico. Nell'acquifero costiero si instaura naturalmente una condizione di equilibrio stazionario, in cui l'acqua dolce scorre verso il mare al di sopra di quella salata con scarso rimescolamento.

Il principio Ghyben-Herzberg postula che in una falda omogenea, non confinata e isotropa, la profondità dell'interfaccia tra acqua salata e acqua dolce è direttamente proporzionale alla elevazione della falda sopra il livello medio del mare (Badon-Ghijben 1888, Herzberg 1901). Il rapporto è così espresso:

$$z_{(x,y)} = \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} h_{(x,y)}$$

dove  $\rho_w$  è la densità di acqua dolce (mediamente 1000g/L),  $\rho_s$  la densità di acqua salata (mediamente 1035g/L),  $z$  la profondità dell'interfaccia, acqua salata-acqua dolce (che risulta quindi essere  $\approx 30 h$ ), e  $h$  il battente d'acqua dolce sul livello del mare.

È facile dedurre, quindi, che un abbassamento di 1 cm della falda provoca una risalita di acqua salata di circa 30 cm.

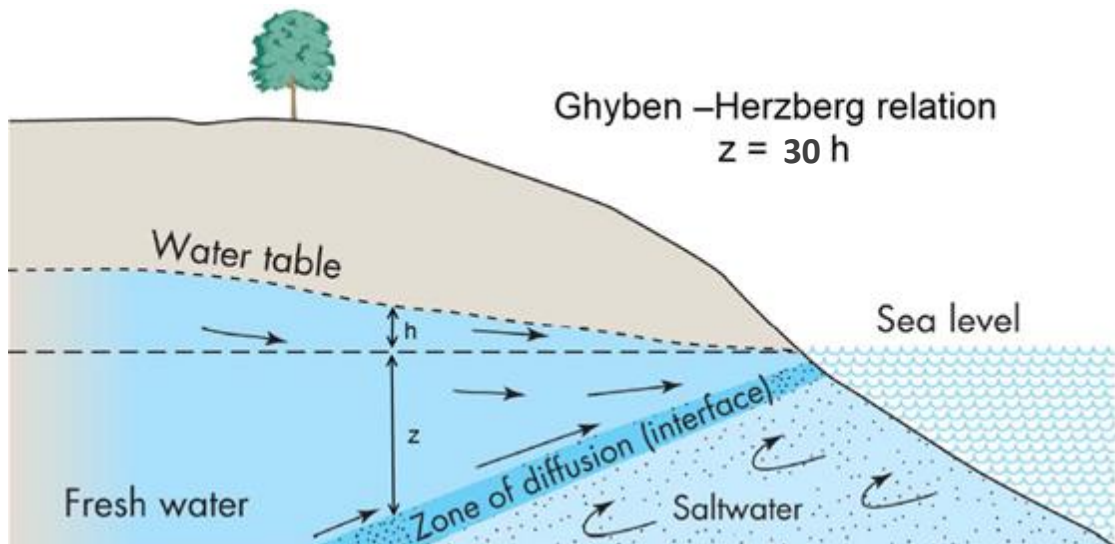


Fig. 1.8 – Relazione di Ghyben-Herzberg per il calcolo della profondità dell'interfaccia, modello concettuale (<http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.pdf>)

Il modello Dupuit-Ghyben-Herzberg (Todd 1953) di flusso unidimensionale all'interno degli acquiferi costieri da una forma parabolica dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata; la profondità  $z$  dell'interfaccia in qualsiasi punto con una distanza  $x$  dal mare è data dalla seguente relazione:

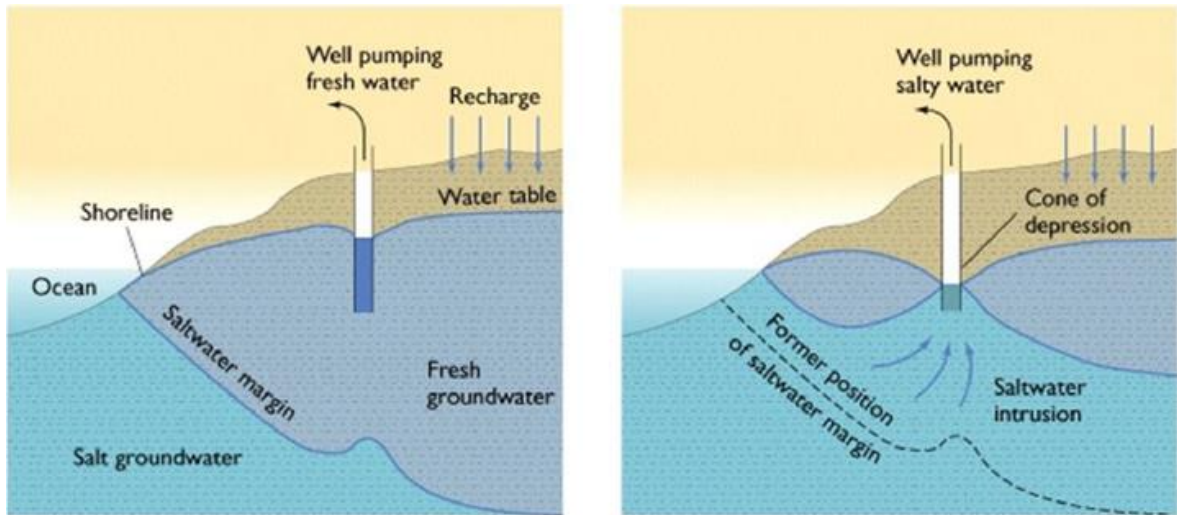
$$z = \sqrt{\frac{2qxG}{K}}$$

dove  $G = \rho_w / (\rho_s - \rho_w)$ ,  $q$  è la ricarica e  $K$  la conducibilità idraulica. Questa equazione mostra l'effetto della conducibilità idraulica nella profondità dell'interfaccia di acqua salata-acqua dolce: un'alta conducibilità idraulica promuove interfacce poco profonde, mentre conducibilità idrauliche inferiori promuovono interfacce profonde. La conducibilità idraulica dipende della composizione litologica della falda acquifera. Pertanto, le variazioni di litologia e la stratigrafia influenzano notevolmente la distribuzione di acqua salata e di acqua dolce negli acquiferi costieri (Antonellini et al., 2008).

#### 1.4.2.2 Intrusione salina in Emilia-Romagna

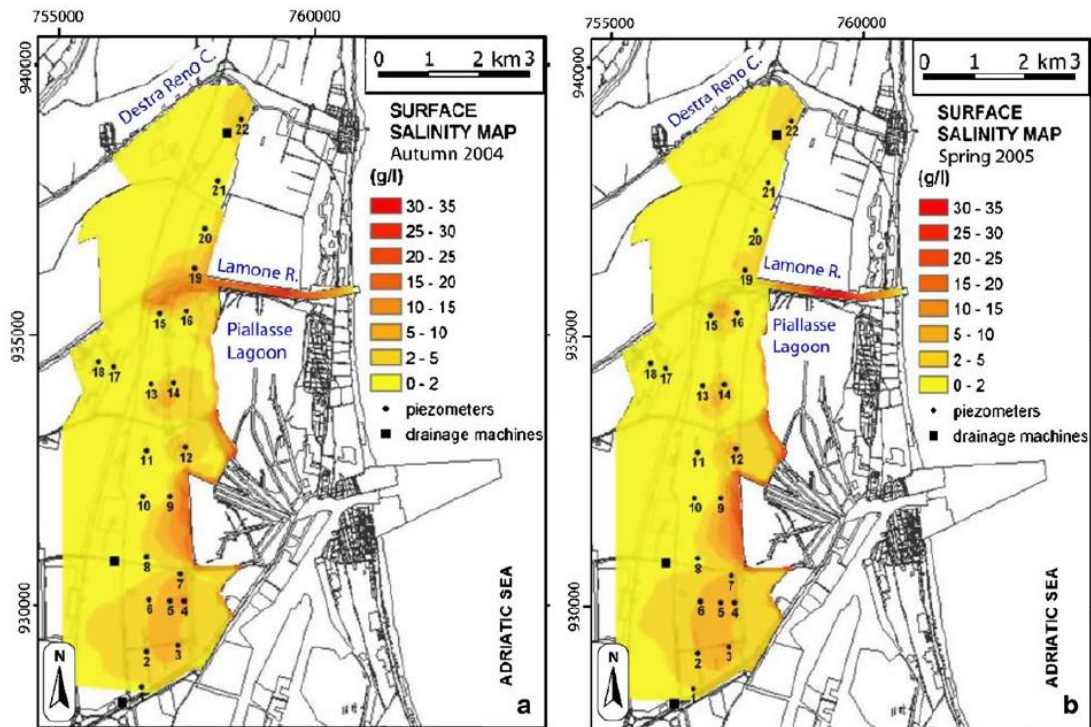
L'Agenzia Europea dell'Ambiente ha riconosciuto l'intrusione salina dovuta all'eccessivo sfruttamento di acque sotterranee come una delle principali minacce per le risorse di acqua dolce della zona costiera in Europa (Scheidleger et al. 2004). L'Italia è stata indicata come uno dei paesi in cui il problema è più grave (Barrocu 2003). Tuttavia, accanto a studi recenti in Italia -Sardegna (Cau et al 2002), la pianura di Catania (Capaccioni et al. 2005),

il delta del Tevere (De Luca et al. 2005), Versilia (Pranzini 2002) e la costa romagnola (Antonellini et al., 2008; 2010; Gabbianelli et al. 2009; Giambastiani et al., 2007; etc.)- non si è rivolta sufficiente attenzione all'intrusione di acqua salata lungo gli 8.500km di costa.



**Fig. 1.9 – Effetto di un eccessivo emungimento su una falda costiera**  
(<http://www.geociencias.unam.mx/~rmolina/geologia%20fisica/aguas1.html>)

L'acquifero freatico costiero di Ravenna risulta fortemente contaminato dall'intrusione salina poiché gli apporti idrici possono avvenire esclusivamente dalla ricarica superficiale e da mare in quanto l'acquifero stesso risulta essere delimitato verso l'entroterra da depositi fini che ne riducono gli scambi di fluidi. Le aree in cui può avvenire la ricarica sono le fasce di duna e le porzioni di territorio in cui i depositi sabbiosi superficiali sono affioranti ma ciò nonostante i tassi d'infiltrazione sono moderati, a causa delle scarse precipitazioni, delle alte temperature che originano evapotraspirazione e della subsidenza che costringe il Consorzio di Bonifica della Romagna ad incrementare il drenaggio per garantire il franco di coltivazione (Antonellini et al. 2008, Mollema et al. 2012, 2013). Un altro fattore responsabile del depauperamento d'acqua dolce è la presenza di vegetazione arborea sulla duna, specie dominante *Pinus Pinea*, la cui traspirazione va dai 10 ai 30 L/giorno (Mollema et al. 2012). Per tutte queste ragioni capita che zone caratterizzate da una litologia ad alta conducibilità idraulica si ritrovino circondate da corsi d'acqua salinizzati (vedi Fig. 1.10) e a seguito di evaporazioni estive intense i valori di salinità della falda possano superare i valori dell'acqua di mare.



**Fig. 1.10 – Salinità in g/L di acque superficiali e di falda misurate sulla superficie piezometrica nella zona di San Vitale - Punta Alberete, Autunno 2014 (a) e Primavera 2015 (b), mediate su tre mesi (Antonellini et al., 2008).**

Principalmente, per questa sua elevata salinità, l'acquifero costiero ravennate è considerato di scarso valore qualitativo e le sue acque non sono impiegabili per uso potabile.

Urge quindi una politica di gestione territoriale attiva ed efficace nel contrastare tale fenomeno o per lo meno è necessario che ne vengano tenuti in considerazione gli effetti e le cause fisiche che lo generano, tenendo presente che l'acquifero freatico costiero rappresenta la riserva d'acqua a cui fa riferimento l'intero ecosistema ambientale (flora e fauna) della costa adriatico-romagnola.

## 1.5 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Ad oggi la tutela dell'ambiente risulta ancora uno dei problemi prioritari per il miglioramento della qualità della vita, sono stati quindi elaborati criteri per la tutela delle acque fissandone standard di qualità al fine di prevenire e ridurre la presenza di alcune sostanze nei corpi idrici (Direttiva 91/271/CEE; Direttiva 2000/60/CE; D.M. n.367/03).

La direttiva 2000/60/CE (DQA) che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque, ha introdotto un approccio innovativo, dal punto di vista ambientale e amministrativo-gestionale. La direttiva persegue obiettivi ambiziosi: prevenire il deterioramento qualitativo e quantitativo, migliorare lo stato delle acque e assicurare un

utilizzo sostenibile, basato sulla protezione a lungo termine delle risorse idriche. La direttiva 2000/60/CE si propone di raggiungere i seguenti obiettivi generali:

- ampliare la protezione delle acque, sia superficiali che sotterranee
- raggiungere lo stato di “buono” per tutte le acque
- gestire le risorse idriche sulla base di bacini idrografici indipendentemente dalle strutture amministrative
- procedere attraverso un’azione che unisca limiti delle emissioni e standard di qualità
- riconoscere a tutti i servizi idrici il giusto prezzo che tenga conto del loro costo economico reale
- rendere partecipi i cittadini delle scelte adottate in materia.

La direttiva 2000/60/CE è stata recepita in Italia attraverso il decreto legislativo 3 aprile 2006, n.152.

Nella Parte III – Sezione II si trovano le disposizioni che definiscono la disciplina generale per la tutela delle acque superficiali, marine e sotterranee perseguendo i seguenti obiettivi:

- a. prevenire e ridurre l'inquinamento e attuare il risanamento dei corpi idrici inquinati;
- b. conseguire il miglioramento dello stato delle acque ed adeguate protezioni di quelle destinate a particolari usi;
- c. perseguire usi sostenibili e durevoli delle risorse idriche, con priorità per quelle potabili;
- d. mantenere la capacità naturale di autodepurazione dei corpi idrici, nonché la capacità di sostenere comunità animali e vegetali ampie e ben diversificate;
- e. mitigare gli effetti delle inondazioni e della siccità.

Il Decreto Legislativo 16 marzo 2009, n. 30, attuazione della direttiva 2006/118/CE, relativa alla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento definisce le misure specifiche per prevenire e controllare l'inquinamento ed il depauperamento delle acque sotterranee.

Il Decreto 08 novembre 2010 n. 260 introduce i criteri aggiornati per il monitoraggio e la classificazione dei corpi idrici superficiali e sotterranei. Questo decreto sostituisce l'allegato I alla parte III del D.Lgs. 152/06 e sulla base dei criteri definiti sono stati rivisti i corpi idrici sotterranei individuati nel Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna (2005), considerando oltre le conoidi alluvionali appenniniche e le piane alluvionali appenniniche e padane anche l’acquifero freatico di pianura e i corpi idrici montani.

## 2 AREA DI STUDIO

L'area di studio di questa tesi ricade all'interno dell'area costiera compresa tra Porto Corsini e Marina Romea. L'indagine ha previsto uno studio idrogeologico dettagliato di due porzioni di dune:

- La prima, più a nord, riguarda la duna in prossimità della foce del Fiume Lamone (nel P.O.C. corpo dunoso 04.802), il cui transetto monitorato verrà nominato A-A' (Fig. 2.1).
- la seconda, più a sud, è la duna di Porto Corsini (nel P.O.C. corpo dunoso 04.818) posizionata 500 m a nord della diga foranea del porto di Ravenna, il cui transetto sarà il B-B' (Fig. 2.1).

L'inquadramento territoriale svolge un ruolo fondamentale al fine di delineare e comprendere le caratteristiche territoriali e dell'acquifero oggetto della tesi.

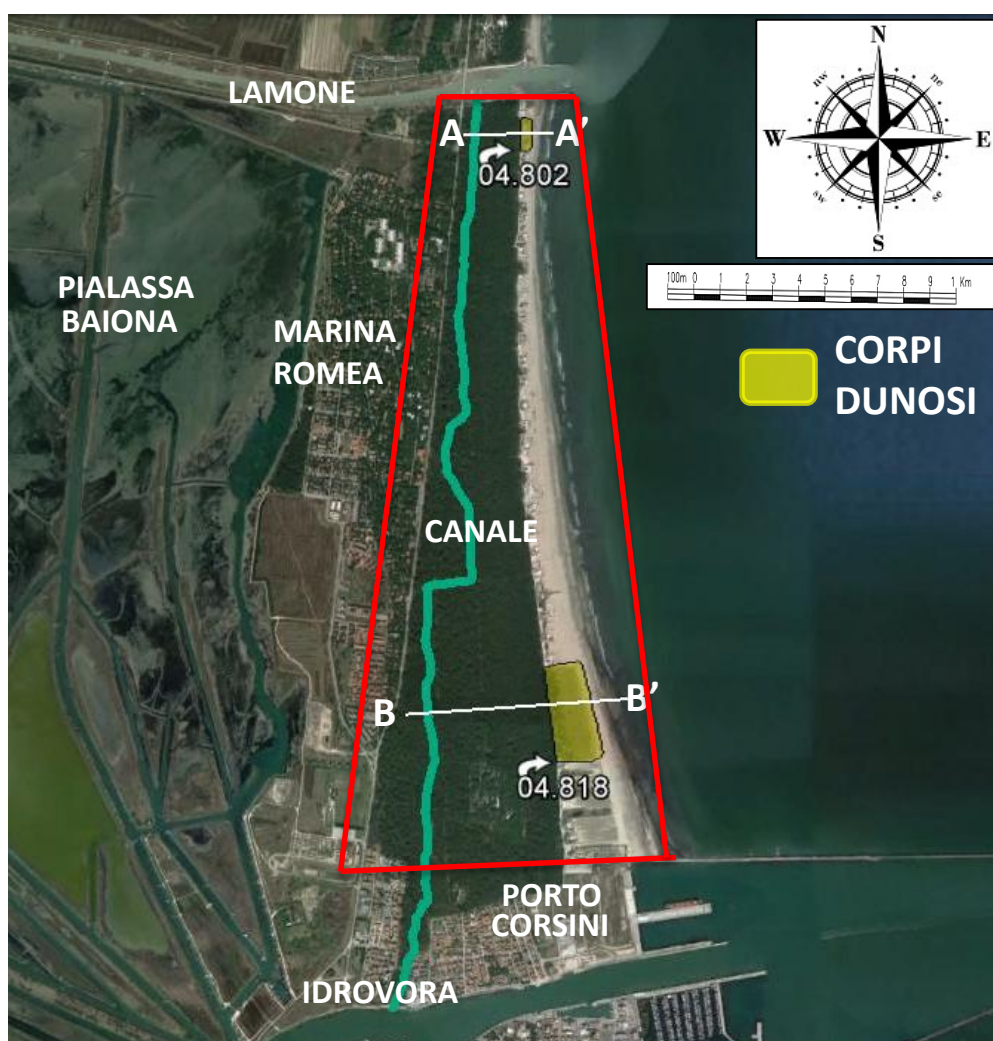


Fig. 2.1 – Contesto territoriale. Marcata in rosso l'area di studio

---

## 2.1 LIMITI ED ASSETTO GEOGRAFICO

La zona è una sottile penisola di circa 300 ettari circondata da corpi idrici superficiali salati. Essa è infatti delimitata a nord dal fiume Lamone, a sud dal canale Candiano, a est dal Mare Adriatico e a ovest dalla Pialassa Baiona. Al centro di questo lembo di territorio scorre, da nord a sud, un canale di drenaggio che va dal fiume Lamone a nord, sino al canale Candiano a sud. Le sue acque vengono sollevate da un idrovora avente lo scopo di prosciugare e mantenere asciutto il territorio, per garantire le attività antropiche dell'area, tra cui il turismo (Mollema et. al. 2012).

La topografia è pressoché pianeggiante con quote di poco superiori al livello medio mare, l'unica area topograficamente elevata è la fascia frammentata di cordone dunoso litoraneo che va dai 3 metri d'altezza nelle zone più a sud fino ad un massimo di 5 metri più a nord.

I sistemi che si susseguono dal mare all'entroterra e che rappresentano l'evolvere sotto il carico antropico è di tipo MARE / SPIAGGIA / DUNA / PINETA / CENTRO ABITATO. I centri abitati sono Marina Romea e Porto Corsini località turistiche prettamente residenziali, mete per famiglie, con la presenza di numerose seconde case (2500 abitanti in totale secondo l'ISTAT). L'arenile è caratterizzato dalla presenza di 42 strutture per lo più stabilimenti balneari, turismo-ricreative o inerenti (P.O.C., 2009) che si interpongono tra i vari sistemi di sabbie affioranti interrompendo la continuità del cordone litorale.

### 2.1.1 Le Dune

Le dune costiere, anche se parzialmente compromesse per cause antropiche o per erosione, si presentano come elemento che caratterizza il paesaggio e che per la sua ricchezza biologica permette la formazione di ambienti di grande pregio. Purtroppo di tutto l'arenile solo 11 ettari sono attribuibili ai corpi dunosi (il 22%) (P.O.C., 2009), e secondo studi effettuati (Antonellini et. al., 2008) il 75% delle dune originali sarebbero andate distrutte. Questi campanelli di allarme ci spingono ad attivarci verso uno studio più accurato e una salvaguardia di questi ambienti.

Le due dune prese in esame mostrano caratteristiche totalmente differenti e la loro ubicazione ai confini del territorio analizzato permetterà una più facile determinazione dei fattori che agiscono sull'area d'interesse.

- Il corpo dunoso più a nord ha una superficie di circa 1 ettaro, dista mediamente 24 m dal mare e ha una larghezza di 65 m dopo la quale si trova la zona pinetale. La sua altezza massima è di 5 m.l.m.m, mostra la presenza di una piccola falesia, vede



nelle vicinanze 2 stabilimenti balneari ed è raggiungibile tramite un accesso carrabile (Scheda censimento duna 04.802, P.O.C., 2008).

- La duna più a sud ha una superficie di 5,37 ettari, dista 65 m dal mare e ha una larghezza di 142 m prima della zona pinetale. La sua altezza massima è di 3 m.l.m.m, mostra una topografia morbida e uniforme, è accessibile tramite un percorso pedonale e dal 1983 è tutelata come area naturale protetta dell'Emilia-Romagna essendo parte della “Riserva naturale Duna costiera di Porto Corsini” (Scheda censimento duna 04.818, P.O.C., 2008).

### **2.1.2 La Pineta**

Procedendo verso l'interno, a ridosso delle dune troviamo la pineta. Se pur relativamente di giovane impianto (1905) svolge una funzione importante, proteggendo le aree retrostanti da aerosol marini, e crea ambienti significativi e suggestivi con una particolare ricchezza ecosistemica.

La sua superficie totale è di 175 ettari e la densità arborea è piuttosto elevata, con una distanza media tra i pini (*Pinus Pinea*) di 4,9m (Mollema et. al., 2012). La gestione forestale è praticamente inesistente e consiste soprattutto nella rimozione di alberi malati e occasionalmente al diradamento delle specie arbustive.

Disporre di informazioni quantitative e qualitative sulla pineta è importante (come tutte le componenti che interagiscono sul bilancio idrico) al fine di poter dimensionare le lenti d'acqua dolce in falda ed integrare così la gestione idrica e forestale. Da studi effettuati sembrerebbe che il fabbisogno idrico di questa estensione forestale sia insostenibile per un bacino dalle ridotte dimensioni come questo (evapotraspirazione dai 9 ai 34 L/albero/giorno) e che i tassi complessivi di evapotraspirazione siano superiori (fino al 200%) dei flussi in entrata di acqua dolce provenienti esclusivamente dalle precipitazioni (Mollema et. al.,2012).



**Fig. 2.2 – La pineta di Marina Romea (prima postazione A-A') a sinistra; limite retrodunale della seconda postazione (B-B') a destra**

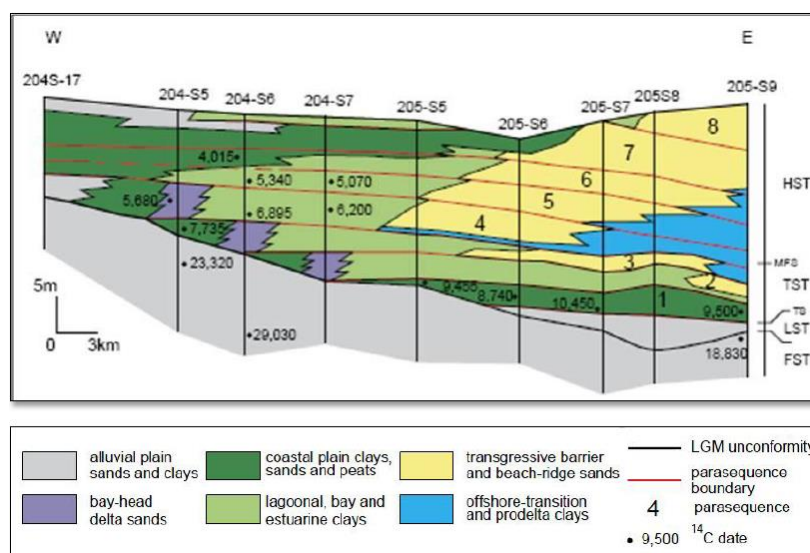
## 2.2 EVOLUZIONE GEOLOGICA E STRATIGRAFICA

L'area di studio è una porzione ristretta della pianura costiera romagnola, e per comprendere a pieno la sua evoluzione geologica, è necessaria un'analisi a scala ancora più ampia: l'intera pianura del fiume Po. Questa si origina dall'emersione della catena appenninica (nel periodo fra l'Oligocene e il Miocene) e a seguito delle successive fasi erosive e deposizionali si sono generati gli strati più antichi (Amorosi et al., 1999).

Analizzando l'ultimo periodo glaciale (Glaciazione Wurmiana 70.000 – 10.000 anni fa), quando il livello marino si abbassò progressivamente trasformando i fondali dell'attuale alto Adriatico in una pianura alluvionale, sappiamo che si depositarono circa 50 metri di limi argillosi intercalati da sabbie e argille (Amorosi et al., 2002).

Il successivo riscaldamento globale portò ad una riduzione dei ghiacci ed un aumento del livello marino. In questa fase di trasgressione, dove la linea di costa raggiunse zone che attualmente distano 20 km dalla attuale (questo circa 5500 anni fa in pieno Optimum climatico) si formarono livelli sabbiosi, alternati dai successivi sedimenti continentali (con tessitura più fine) legati alle successive fasi regressive. A testimonianza di questa ciclicità ritroviamo, a circa 25 m di profondità dal piano di campagna, argille e limi nerastrati torbosi

sovrapposti da sedimenti marino costieri di pro-delta e cordoni litorali depositati durante la trasgressione. Svvariati autori identificano in questi stadi l'inizio della formazione del moderno delta del Po (Amorosi et al., 1999; Bondesan et al., 1995; Rizzini, 1974) e dell'acquifero costiero oggetto di studio. Infine negli ultimi 2000 anni si sono originati gli strati più superficiali della costa, i quali mostrano tessiture eterogenee, tipiche dell'alternanza di ambienti dunosi e zone palustri, derivanti sia dagli abbassamenti e innalzamenti del livello marino, sia dai processi naturali (e negli ultimi cento anni anche antropici) di subsidenza. Per carpire pienamente i caratteri della sequenza trasgressivo-regressiva più recente inerenti alla pianura Padana sud orientale, è possibile osservare dalla (Fig. 2.3) come questa sia suddivisibile in 8 cicli minori con spessore pari a 3-5 m (Amorosi et al., 2005).



**Fig. 2.3 – Sezione della Pianura Padana sud orientale che mostra l'ultima sequenza trasgressivo-regressiva suddivisibile in 8 cicli minori (Amorosi et al., 2005).**

## 2.3 ASSETTO IDROGEOLOGICO

Gli acquiferi padani possono essere classificati in tre categorie A, B e C, queste si differenziano per profondità (la categoria A rappresenta gli acquiferi più superficiali e la C i più profondi), spessore e produttività idrica (<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/acque/idrogeologia-della-pianura-emiliano-romagnola#section-1>). Ognuno di questi è separato dagli altri dall'interposizione di importanti acquitardi e allo stesso tempo un acquifero può essere suddiviso in diversi acquiferi minori. La geometria interna e le caratteristiche petrofisiche di ciascuna categoria d'acquifero derivano dall'evolversi dei processi tettonici e deposizionali avvenuti nel bacino sedimentario padano.

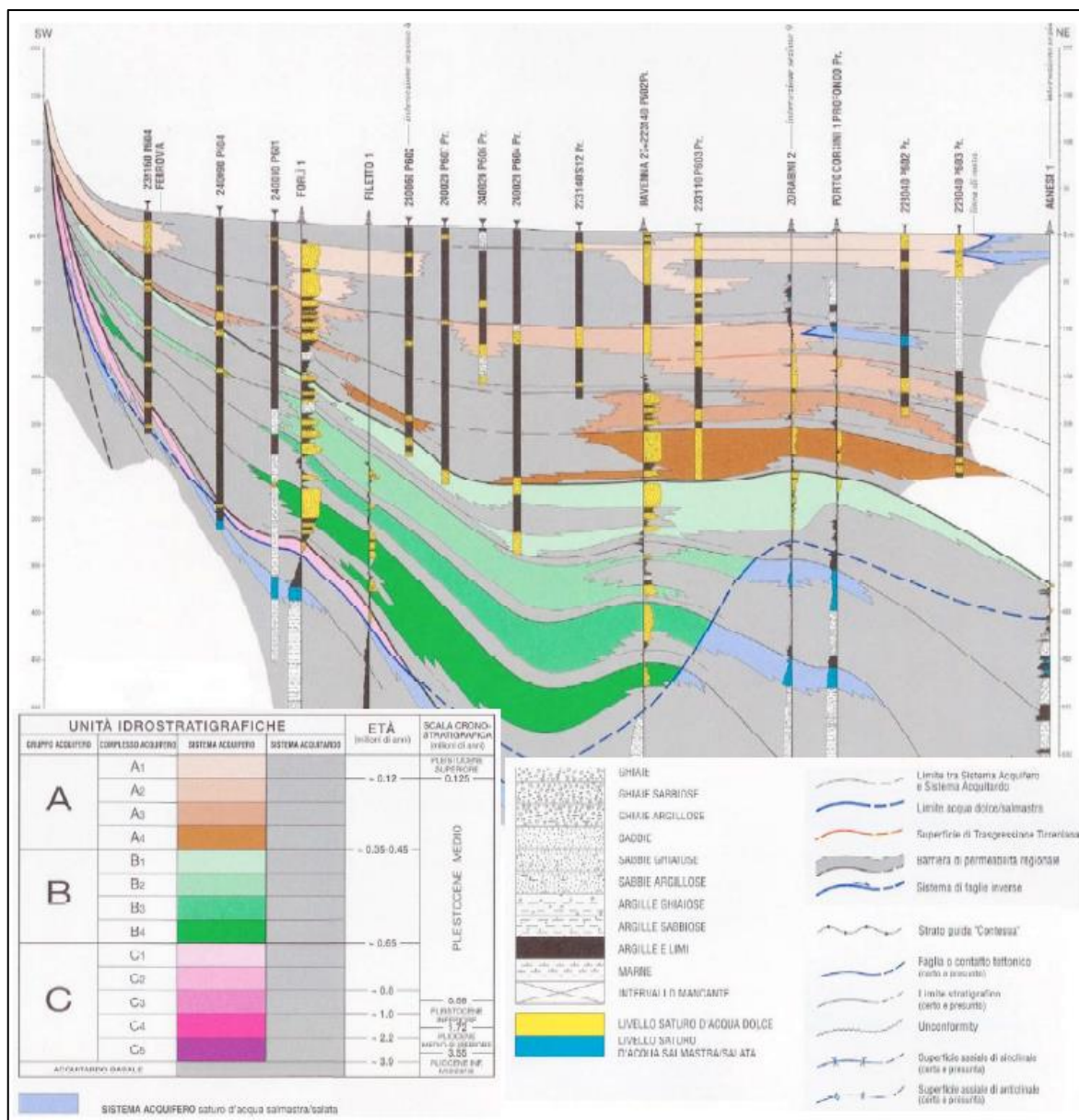


Fig. 2.4 – Sezione idrostratigrafica n° 29. Esagerazione verticale 50x. Servizio Geologico Sismico e dei Suoli webgis (da R.E.R & ENI-AGIP 1998).

Ogni gruppo acquifero identifica una unità idrostratigrafica e rappresenta un corpo geologico di una certa estensione sede di un sistema idrologico ben definito. Questo è costituito da una o più sequenze deposizionali e da un livello geologico basale scarsamente permeabile (acquiclude) o impermeabile (acquitardo) di tipo continuo (R.E.R. & ENI-AGIP 1998).

### 2.3.1 Acquifero costiero superficiale

L'acquifero oggetto di questa tesi viene classificato come Acquifero A (A1 e A0) ed è caratterizzato da un volume di  $30000 \text{ m}^3/\text{m}$  (circa  $10^9 \text{ m}^3$  in totale) e un gradiente idraulico entroterra-mare  $0,00008-0,0038$  (Antonellini et. al. 2008).

La stratigrafia (Fig. 2.5) può essere sintetizzata dall'alternanza di quattro unità fondamentali:

- lo strato superiore, formato da un deposito sabbioso a grana media, spesso 10 m, con alta conducibilità idraulica ( $0,0069 \text{ m/s}$ ).
- un'ulteriore unità sabbiosa, tra i  $-21$  e  $-26 \text{ m.l.m.m.}$ , a grana fine che si collega alla precedente spostandosi verso l'entroterra.
- uno strato argilloso-limoso e sabbioso-limoso chiamato deposito prodelta che separa nella nostra zona i due corpi precedenti (da  $-10$  a  $-21 \text{ m.l.m.m.}$ ).
- Infine la base argillosa continentale dell'epoca flandriana profonda più di  $-26 \text{ m.l.m.m.}$ , che regge l'intero sistema. (Giambastiani et. al. 2007).

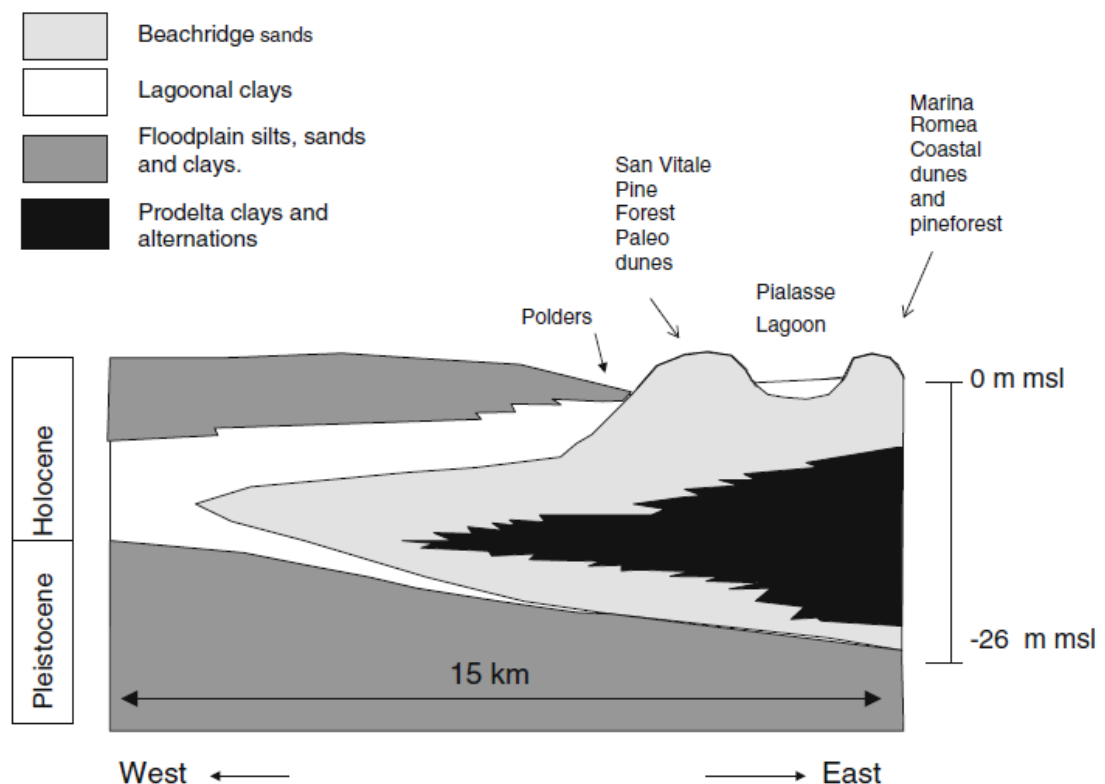


Fig. 2.5 – Litostratigrafia schematica, sezione perpendicolare alla costa di Marina Romea (Mollema et. al., 2012)

## **2.4 EVOLUZIONE RECENTE DELLA COSTA**

Come per l'intero litorale romagnolo anche nell'area studiata l'elemento di maggiore pressione che ha contribuito a minare l'equilibrio della costa è stata la costruzione di opere trasversali a protezione dei numerosi approdi marittimi. Studiando infatti il trend evolutivo è possibile dividere la costa in due tratti.

Il primo, che si protrae per 700m a sud della foce del Lamone, nel corso degli anni '80 e '90 si trovava in sostanziale equilibrio, dal 2000 invece è sottoposto ad erosione mostrando una forte recessione. Qui la spiaggia emersa presenta una larghezza dai 25 ai 30 metri.

Il secondo, a nord del molo foraneo di Porto Corsini, con una lunghezza di 2,5 Km. Qui la linea di riva è in netto avanzamento e il bilancio sedimentario di spiaggia emersa e sommersa è positivo nonostante la subsidenza superi 1 cm/anno (ARPA, 2009). Essendo (nella zona) il trasporto di materiale litoraneo diretto da nord a sud, tutto il sedimento delle foci del Reno e del Lamone viene bloccato dal lunghissimo molo che si protende in mare per 2,3 Km. Questa sedimentazione ha dato così luogo a spiagge molto larghe (dai 70 ai 130 metri).

Una probabile causa della modifica del trend a cui è soggetto il primo tratto potrebbe essere la costruzione dei due pennelli lunghi 200m nel tratto più a nord: Foce Lamone-Casal Borsetti. Oltre a catturare parte del materiale, questi pennelli potrebbero aver deviato la corrente lungo costa determinando l'innescò dei processi erosivi a sud della foce Lamone.

Per quanto riguarda provvedimenti presi a contrasto dell'erosione, in quest'ultimo tratto sono stati portati a ripascimento tra il 2003 e il 2006 più di 50000 m<sup>3</sup> di materiale (ARPA, 2009).



Fig. 2.6 – Evoluzione del litorale a nord del Porto di Ravenna dal 1943 al 2006 (ARPA, 2009).

## 2.5 ASSETTO IDROLOGICO

Come già accennato il territorio studiato è circondata da corpi idrici superficiali salati, diventa quindi indispensabile conoscerne le caratteristiche per comprendere le condizioni al contorno e le interazioni che questi corpi hanno con l'acquifero freatico.

I bacini idrografici lungo la costa adriatico romagnola sono solitamente piccoli, per lo più prosciugati meccanicamente da idrovore, e caratterizzati da topografie basse come dune e argini (Giambastiani et al. 2007; Antonellini et al. 2008). Molti cambiamenti naturali e artificiali nella storia recente influenzano ancora la topografia e l'idrologia del territorio (Giambastiani et al. 2008). Il bacino idrografico che considereremo in questo studio è il "Bacino Pinetale di Marina Romea". Questo rappresenta un tratto di costa abbastanza giovane, formatosi circa 300 anni fa come una striscia di terra racchiusa da una laguna

salmastra. È parte della cinta di dune costiere più giovane, mentre un cordone di dune più vecchie si colloca a 5 km verso l'entroterra (Amorosi et al. 1999). Attualmente, il reticolo idrografico di Marina Romea trova corpi idrici salati lungo tutti i suoi confini: a nord col fiume Lamone (Antonellini et. al. 2008) a sud con il canale Candiano, il mare Adriatico a est e la Piallassa Baiona a ovest.

### 2.5.1 Fiume Lamone

Il Fiume Lamone, il primo per lunghezza dei fiumi romagnoli (97 km) ha origine dall'Appennino Toscano presso Colla di Casaglia ed entra in Provincia di Ravenna a S. Martino in Gattara (frazione del Comune di Brisighella) ed ha una superficie di 53000 ettari (Bruschini et. al., 2013).

Il Fiume Lamone, nella zona di pianura, si presenta arginato e pensile; caratteristica è la ristrettezza dell'alveo che determina rischi di esondazione e di rotture arginali nei periodi di maggiore portata.

Verso la foce, come tanti altri fiumi della parte meridionale della Pianura Padana, è soggetto alla risalita di acqua di mare, a causa dei gradienti topografici invertiti ma anche a causa della piccola diga costruita a 8 Km dall'estuario. Questo sbarramento fluviale in alcuni periodi dell'anno lascia passare meno di  $2\text{m}^3/\text{s}$  (Antonellini et. al., 2008; Laghi et al. 2010), flusso insufficiente a contrastare le ondate di acque salate spinte dalle maree. A causa di questi eventi l'acqua del Lamone raggiunge intervalli di salinità tra i 20 e i 27 g/L.

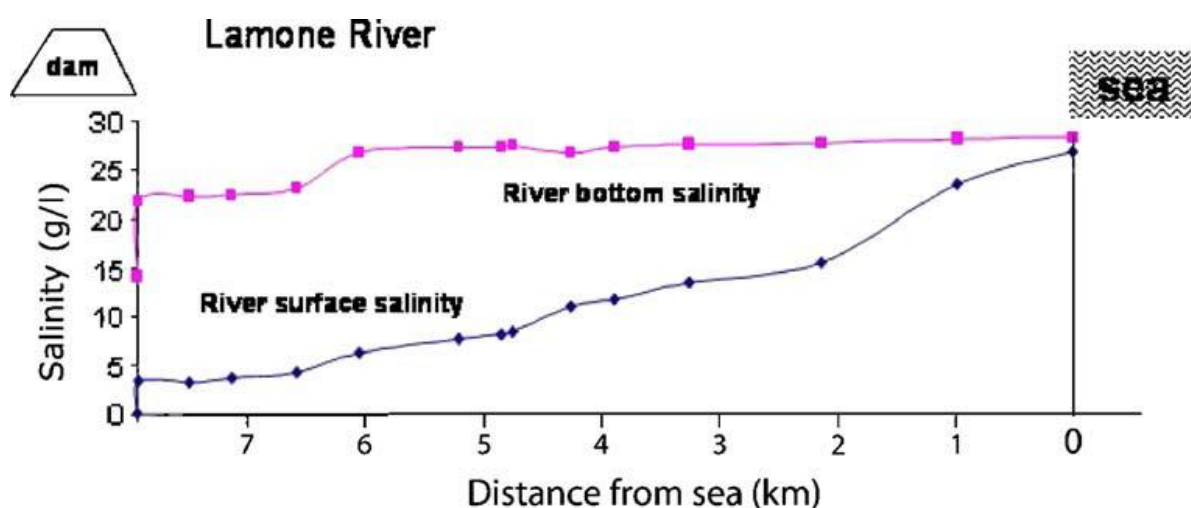


Fig. 2.7 – Profilo della salinità lungo il fiume Lamone. In blu l'acqua della superficie e in viola del fondo del fiume (Antonellini et al., 2008).



## 2.5.2 Canale Candiano

Il Canale Candiano è un canale navigabile (detto anche canale Corsini) che collega Ravenna con il mare e che costituisce parte del porto commerciale e industriale nonché la darsena di città. Si sviluppa per una lunghezza di circa 11 km e comprende i territori della Piallassa Baiona a nord e della Piallassa Piomboni a sud: due zone fittamente canalizzate, riceventi acque da numerosi bacini scolanti agricoli, industriali ed urbanizzati e comprendenti tra l'altro i reflui del depuratore di Ravenna e di Russi, nonché dello stabilimento ANIC-ENICHEM, a cui si aggiungono le acque depurate di Marina di Ravenna, di Punta Marina, di Lido Adriano e altri scoli di campagna al limite del territorio provinciale forlivese. I principali canali di scolo sono: il Cerba, la Canala, il Cupa, il Drittolo, il Fagiolo ed il Lama. Il bacino abbraccia pertanto una superficie di circa 6500 ettari (Bruschini et. al., 2013).



**Fig. 2.8 – Foto Aerea del Canale Candiano. Vista a volo d’uccello dal Mare Adriatico**  
([https://it.wikipedia.org/wiki/Canale\\_Candiano](https://it.wikipedia.org/wiki/Canale_Candiano))

## 2.5.3 Pialassa Baiona

Le Pialasse sono le ultime valli di acqua salmastra presenti nel Ravennate; si tratta di vasti bacini, per lo più gravemente snaturati da pesanti interventi di industrializzazione ubicati ai loro margini, e fortemente inquinanti (Dinelli et al. 2015). Nonostante ciò conservano ancora un rilevante interesse paesaggistico ed un importante valore naturalistico.

Le attuali Pialasse sono i residui della grande laguna all'interno della quale sorgeva nell'antichità la città di Ravenna; non sono in senso stretto né valli né lagune, poiché subiscono il flusso della marea come le lagune e sono collegate da un canale al mare e

divise da esso da una striscia di terra (tombolo) continua. Le Pialasse sono connesse al mare tramite una rete di canali posti a ventaglio, che convergono nel Canale della Baiona, collegato al Canale Candiano.

Tali condotti sono stati così costruiti per facilitare l'ingresso dell'onda di marea; la funzione delle Pialasse consisteva infatti nel creare, con il flusso e il riflusso delle acque di mare al loro interno, delle correnti nella zona portuale che, impedendo ai detriti in sospensione di depositarsi, li portano al di fuori della zona delimitata dai due moli foranei, evitando così l'interramento del porto ("pija" e "lassa", ossia "prendi" e "lascia").

La maggiore è la Pialassa Baiona che comprende all'incirca 1500 ettari di zone umide (<http://www.parcodeltapo.it/>). Questa è caratterizzata da ampi specchi d'acqua aperti con presenza di prati salmastri e comunità vegetali alofile, alternati a canali artificiali e chiari dai bassi battenti, con abbondante deposito di sedimenti e vaste distese limose intertidali. I fondali sono melmosi o sabbiosi, parzialmente affioranti durante le basse maree.

Prima del 1960 il Lamone, dopo aver disperso le sue acque nella Cassa di Colmata, le versava attraverso il canale del Taglio della Baiona nell'omonima Pialassa, e di lì giungevano al mare. A partire da tale data, venendo a mancare l'apporto di acqua dolce e aumentando quello d'acqua salata (dovuto ai lavori di ampliamento del porto), la vegetazione delle Pialasse mutò radicalmente: scomparvero i fitti popolamenti di canniccio e apparvero invece quelli delle specie tipicamente vallive e lagunari (Bruschini et. al., 2013). Attualmente la salinità varia dai 15 ai 35 mg/L (ARPA, 2006) in funzione di dagli apporti di acqua dolce dai canali (regolati dall'uomo mediante dispositivi idraulici), di acqua salata dal mare, dalle precipitazioni atmosferiche e dal processo di evaporazione.



**Fig. 2.9 – Foto di fenicotteri (*Phoenicopterus roseus*). Le pialasse romagnole sono uno dei pochi habitat rimasti per queste ed altre specie di avifauna in Italia (<http://www.parcodeltapo.it/>).**

## 2.5.4 Canale di drenaggio e idrovora

L'intera area di studio è drenata dal "canale pinetale di Marina Romea" che attraversa da nord a sud il territorio. Con una lunghezza di 4 Km, il canale nasce in prossimità del Lamone, viene alimentato dalle acque piovane e di deflusso sotterraneo dall'acquifero e le sue acque si tuffano nel Canale Candiano spinte dalla forza operatrice di un'idrovora. Come suggerisce il regolamento del Consorzio di bonifica della Romagna la funzione dell'intero impianto è la difesa delle aree urbane interne da possibili inondazioni e il prosciugamento della zona retrodunale per la sopravvivenza della pineta. La peculiarità del sistema è data dall'uso intenso che ne viene fatto, infatti nei periodi invernali, ed in generale quando l'andamento climatico lo richiede, il canale raccoglie le acque piovane e drena l'area. Nella stagione estiva però (quando si ha un deficit idroclimatico) l'impianto è responsabile di un eccessivo emungimento della falda. Secondo studi precedenti (Mollema et. al., 2012) e sulla base dei dati forniti da Hera s.r.l. il drenaggio annuale 2007-2008 dell'idrovora sotteso al bacino è stato di 1003 mm, contro i 654 mm di precipitazione.

**Tab. 2.1 – Campagna di monitoraggio sul bilancio idrico 2007-2008 nella zona di Marina Romea (Mollema et. al., 2012)**

Date of monitoring	Number of days between monitoring campaigns	Precipitation (mm)	Drainage (mm)	Pine tree transpiration (mm)
15/03/2007	28	16.4	80.6	33.6
16/04/2007	33	117.2	48.6	39.6
16/05/2007	30	26.8	75.5	36.0
28/06/2007	43	69.4	85.9	17.2
17/07/2007	19	6	33.5	7.6
21/08/2007	35	17.6	58.5	14.0
24/09/2007	34	152	134.5	16.3
29/10/2007	35	94	235.3	16.8
27/11/2007	29	59	75.7	30.2
12/12/2007	15	40.8	33.8	15.6
23/01/2008	42	22.4	95.6	43.7
14/02/2008	22	25.4	45.7	22.9
Yearly totals		647	1,003.1	293.4

È quindi facile prevedere un impoverimento delle riserve d'acqua dolce più superficiali, un conseguente innalzamento degli strati più profondi dell'acquifero (ricchi di sali) e un inevitabile stress per l'habitat pinetale.

---

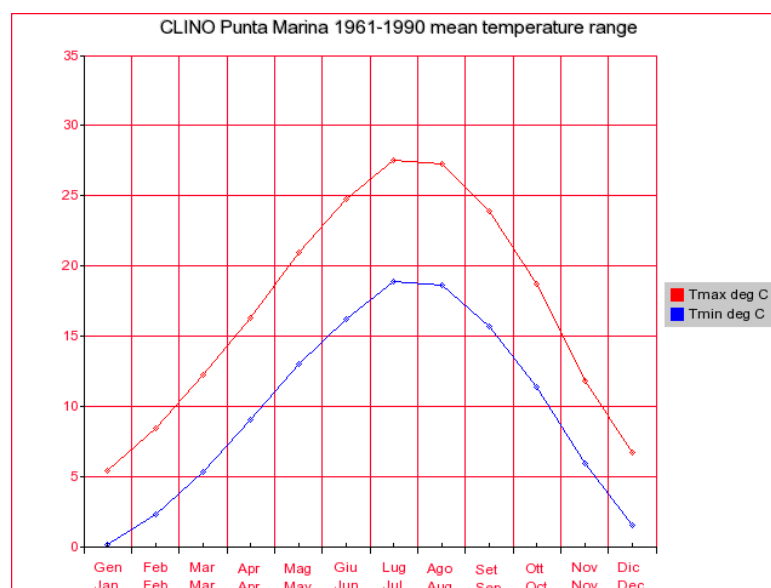
## 2.6 BILANCIO IDROCLIMATICO

Marina Romea ha un clima di transizione fra quello mediterraneo e quello più continentale della Pianura Padana, con aspetti peculiari talora dell'uno e talora dell'altro che permettono di classificarlo come clima a cavallo tra quello temperato sublitoraneo e quello temperato subcontinentale.

In estate con la prevalenza delle giornate di sole la ventilazione si presenta generalmente sotto forma di brezza di mare con direzione variabile in rotazione oraria da N/O (Maestrale) fino a S/E (Scirocco). In condizioni di tempo perturbato, più frequentemente in inverno, gli stessi venti provenienti dal mare possono divenire freddi e impetuosi. Caratteristica in questi casi è la Bora da NN/E, che precede solitamente le ondate di freddo. In base alla media trentennale di riferimento 1961-1990, ancora in uso per l'Organizzazione meteorologica mondiale e definita Climate Normal (stazione meteorologica di Ravenna Punta Marina dell'Aeronautica Militare), la temperatura media del mese più freddo, gennaio, si attesta a +2,8 °C; quella del mese più caldo, luglio, è di +23,2 °C; si contano, mediamente, 38 giorni di gelo all'anno. Nel medesimo trentennio, la temperatura minima assoluta ha toccato i -13,8 °C nel gennaio 1985 (media delle minime assolute annue di -6,2 °C), mentre la massima assoluta ha fatto registrare i +38,4 °C nel luglio 1983 (media delle massime assolute annue di +33,8 °C).

Le precipitazioni medie annue, attorno ai 600 mm, distribuite mediamente in 71 giorni, presentano minimi relativi in inverno e in estate e picchi molto moderati in primavera e in autunno.

L'umidità relativa media annua fa registrare il valore di 80,8%, con minimo di 75% a giugno e massimi di 88% a dicembre e a gennaio. (<http://clima.meteoam.it/> ).

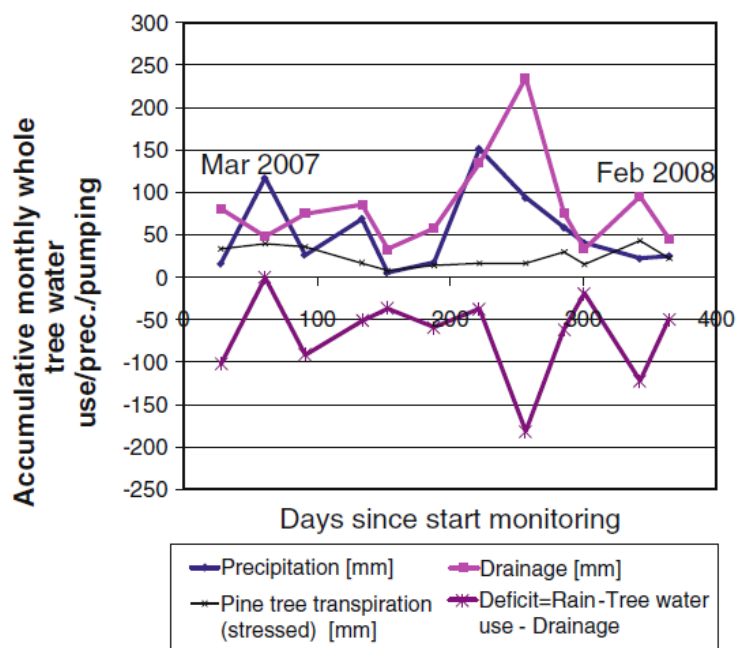


**Fig. 2.10 – Istogramma delle temperature medie mensili massime e minime registrate dalla stazione meteorologica dell'Aeronautica Militare di Punta Marina (CLINO) nel trentennio 1961-1990.**

I dati climatologici sono essenziali al fine di comprendere le componenti in gioco nel bilancio idrico.

Nell'area di studio solo i primi 3 mesi dell'anno mostrano un surplus nel bilancio idrico, cosicché parte d'acqua possa penetrare nel terreno ed arrivare in falda. Si calcola che questa ricarica equivalga a 14 mm/anno (Mollema et. al., 2008).

Inoltre se si pensa che a causa del riscaldamento climatico le estati diventeranno più calde, meno piovose e saranno sempre più frequenti periodi di siccità, è facile prevedere un incremento del deficit idrologico (Mollema et. al., 2012).



**Fig. 2.11 – Grafico rappresentante il deficit idrologico a cui è soggetta l'area di studio (Mollema et. al., 2012)**

### 3 MATERIALI E METODI

Ai fini di una buona caratterizzazione dell'acquifero da Settembre 2015 è stata effettuata mensilmente una campagna di monitoraggio piezometrico, un'indagine ambientale di carattere conoscitivo che serve a definire il modello idrogeologico dell'area in esame. Vi gioca quindi un ruolo preminente lo studio idrogeologico, il cui scopo è quello di fornire gli elementi indispensabili per la comprensione delle modalità di alimentazione e deflusso delle falde presenti nell'area di studio e delle modalità di migrazione degli inquinanti.

Tutto ciò si evolve dall'acquisizione ed interpretazione dei dati e prevede l'identificazione, tramite prove dirette, dei parametri idrogeologici e chimico-fisici che regolano il flusso in acquifero e ne caratterizzano le acque. La tipologia e l'ubicazione delle prove da eseguire sono stabilite sulla base della ricostruzione della struttura e della geometria di livelli acquiferi e orizzonti impermeabili.

**Tab. 3.1 – Scaletta delle attività svolte e suddivisione temporale**

Mese	Attività
<b>Maggio 2015</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Costruzione dei minifiltri</li> <li>✓ Assemblaggio componenti e Realizzazione dei piezometri a minifiltro</li> </ul>
<b>Giugno 2015</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Messa a dimora del sistema</li> <li>✓ Spurgo dei minifiltri</li> </ul>
<b>Settembre 2015</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Rilievi GPS</li> <li>✓ Rilievi freaticometrici</li> <li>✓ Determinazione della conduttività e di altri parametri chimico-fisici</li> </ul>
<b>Ottobre 2015</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Rilievi freaticometrici</li> <li>✓ Determinazione della conduttività e di altri parametri chimico-fisici</li> <li>✓ Misure geochimiche e spettrofotometriche in campo</li> <li>✓ Campionamento</li> <li>✓ Analisi F-AAS</li> <li>✓ Analisi IC</li> </ul>
<b>Novembre 2015</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Rilievi freaticometrici</li> <li>✓ Determinazione della conduttività e di altri parametri chimico-fisici</li> </ul>
<b>Dicembre 2015</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Rilievi freaticometrici</li> <li>✓ Determinazione della conduttività e di altri parametri chimico-fisici</li> </ul>
<b>Gennaio 2016</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Rilievi freaticometrici</li> <li>✓ Determinazione della conduttività e di altri parametri chimico-fisici</li> </ul>

---

## 3.1 RETE PIEZOMETRICA

### 3.1.1 Costruzione minifiltri e piezometri

Per la caratterizzazione dei due siti ci si è avvalsi di un sistema a minifiltri (*multi level sampler*). Nella comunità scientifica internazionale una metodologia certificata univoca riguardo la misura di salinità all'interno di acquiferi costieri ancora non è presente (Cheng et al., 2001) e tuttora sono aperti dibattiti e vengono effettuati studi su quali possano essere gli approcci più idonei (Balugani e Antonellini, 2010). La difficoltà sta nel mantenere separati i campioni procedendo in profondità col campionamento, evitando miscelamenti, mantenendo campioni rappresentativi e prelevando aliquote non troppo grandi che potrebbero causare la perdita delle lenti più superficiali di acqua dolce tramite lo spurgo. Diventa quindi basilare nello studio delle acque sotterranee la scelta del piezometro utile al monitoraggio (Hantush, 1964; Shalev et al., 2009), il criterio di spurgo e la metodologia di campionamento.

E' stato considerato quindi non adatto l'utilizzo esclusivo di piezometri fessurati al fondo in quanto si sarebbero generati fenomeni di mescolamento all'interno del pozzo (Balugani e Antonellini, 2010), lo spurgo avrebbe dato luogo a segnali confusi nell'analisi di inquinanti (quale il sale) soggetti a stratificazione (Kralj, 2011) ed è stata accantonata la metodologia mediante *straddle packers* Solinst (una camera d'aria che permette di isolare porzioni dell'acquifero) a causa delle tempistiche di monitoraggio elevate.

La tecnica dei *multi level sampler*, garantisce invece tempistiche di monitoraggio molto rapide, piccoli volumi investigati e un'ottima campionatura multi-livello, tutte ragioni che l'hanno resa una delle procedure più utilizzate in Olanda e paesi nord-europei (Stuyfzand, P.J., 1983; Stuyfzand P. J., 1993; Lerner D.N. e Teutsch G., 1995; Davis G.B. e Barber C., 1994).

Data la loro importanza ai fini di una corretta acquisizione dei dati idrogeologici e ambientali, la costruzione dei piezometri a minifiltro richiede una particolare cura in tutte le fasi del lavoro.



**Fig. 3.1 – Costruzione di un minifiltro dai materiali di partenza**

I minifiltri sono costituiti da un tubo (circa 120mm di lunghezza e 10mm di diametro) di materiale termoplastico riempito di materiale silicato fibroso, o più comunemente lana di vetro che ha lo scopo di filtrare le particelle più fini presenti nell'acqua. A un'estremità viene fissata una rete, sempre di materia plastica, che ha la funzione di rimuovere invece il materiale più grossolano (vedi Fig. 3.1). L'altro capo del tubicino, mediante un adattatore, viene unito a un capillare che, passando all'interno di fori distribuiti lungo il tubo guida (riser), ha la finalità di connettere il minifiltro con la superficie. Ogni minifiltro viene poi attaccato con colla a caldo e assicurato tramite fascette in prossimità di questi fori. Infine l'intero sistema si avvolge con una calza di nylon così da rivestire e proteggere tutto durante la messa a dimora.

I criteri che dettano la scelta del numero di minifiltri, la disposizione dei fori, la dimensione e il materiale del tubo guida sono svariati: scopo dell'indagine, idrogeologia del sito, topografia, costo, disponibilità attrezzature, accessibilità al sito.



**Fig. 3.2 - Particolare di minifiltro assemblato al riser**



La scelta è ricaduta su un riser di diametro 50mm e lunghezza 6 m sul quale si sono effettuati 8 fori: cinque (i più superficiali) distanziati 0,5m , i successivi tre (i più profondi) distaccati 1m.

Il materiale di cui è composto il tubo è PVC, uno dei polimeri più versatili e più comune nelle indagini idrologiche. I vantaggi che presenta sono:

- elevata resistenza alle abrasioni e alla corrosione elettrochimica
- buona resistenza meccanica
- costi contenuti
- facilmente reperibile
- modesto peso
- necessita poca manutenzione
- inerte chimicamente a numerose specie ad esclusione di alcuni solventi organici (aldeidi, chetoni, ammine ed alcuni clorurati).

### **3.1.2 Messa a dimora**

L'ubicazione dei piezometri di monitoraggio e le loro caratteristiche costruttive devono tener conto tanto del modello idrogeologico (contesto geologico e morfologico dell'area, stratigrafia locale, parametri idrodinamici dell'acquifero e rapporti tra acquifero e reticolo idrografico), quanto delle caratteristiche della contaminazione (tipologia di contaminante, potenziali sorgenti attive o inattive, possibili percorsi di migrazione, presenza di potenziali bersagli). Ove possibile, le tecniche di perforazione utilizzate non dovrebbero richiedere l'introduzione di acqua o di altri fluidi nel foro. Tuttavia, quando l'utilizzo di fluidi di perforazione risulta inevitabile, questi dovrebbero provocare il minor impatto possibile sui futuri campioni d'acqua ed essere comunque di qualità tale da non pregiudicarne la rappresentatività. La scelta del metodo di perforazione da adottare nella realizzazione di pozzi di monitoraggio dipende sostanzialmente dai seguenti fattori:

- geologia ed idrogeologia del sito
- versatilità del metodo di perforazione
- costo relativo della perforazione
- disponibilità di attrezzatura necessaria per la perforazione
- accessibilità del sito su cui effettuare le perforazioni
- tempo necessario all'installazione ed allo sviluppo del pozzo
- capacità della tecnologia di perforazione nel preservare le condizioni naturali dell'acquifero
- capacità di installare pozzi del diametro e profondità prescelti.

La struttura di un piezometro classico per il monitoraggio della falda è quella di un tubo, in parte cieco e in parte fessurato, con le estremità chiuse da tappi (quello superiore amovibile) che viene inserito in un foro di sondaggio precedentemente predisposto fino ad intercettare la falda o la porzione di falda che si vuole esaminare.

Nel nostro caso il piezometro fessurato al fondo è stato installato in ogni postazione insieme al sistema a minifiltro in unico foro denominato PUNTO DI CAMPIONAMENTO (di seguito PdM). Questa scelta è stata dettata dalla necessità di poter eseguire poi dei rilievi freaticometrici, indispensabili per comprendere a pieno le dinamiche idrologiche dell'acquifero.

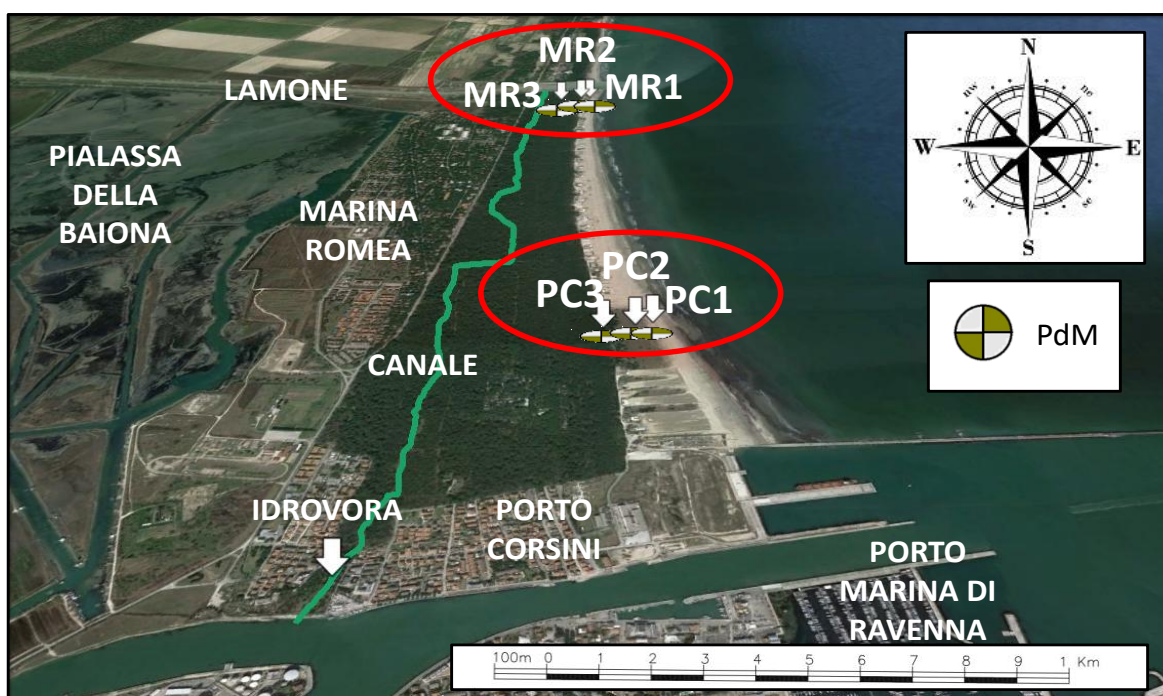
I principali elementi costituenti un classico piezometro sono:

- rivestimento (tubazione cieca)
- filtro (tubazione fessurata)
- fondello

- tappo di fondo
- dreno
- pozzetto
- boccapozzo.

Nel caso in questione si è evitata la messa in posto, esternamente al rivestimento, di materiale drenante (ghiaia) per impedire la creazione di flussi preferenziali durante le fasi di campionamento. Questa scelta potrebbe comportare la formazione di “ponti di sabbia”, strutture instabili formatesi dall’aggregazione delle particelle più fini (es. fango insinuatosi durante la perforazione) che si dispongono fra i granuli di maggiori dimensioni fino ad ostacolare il passaggio dell’acqua (F. G. Driscoll, Groundwater and Wells, 1986). Nonostante ciò la scelta è obbligata in quanto bisogna impedire la risalita di acque più profonde che altererebbero le indagini.

I PdM sono stati installati da un’azienda esterna con una trivella a rotazione continua e con l’utilizzo di acqua ad alta pressione tra una fase di trivellazione e l’altra. La trivellazione necessitava di una risalita della trivella ogni 3 m per aggiungere un’asta di trivellazione. In questa fase il foro è stato mantenuto aperto iniettando acqua ad alta pressione. Le trivellazioni hanno uguali profondità finali (6m) per ogni postazione, terminata la trivellazione sono stati inseriti i PdM. I pozzi in questione sono stati messi a dimora delineando due transetti, uno a Porto Corsini e uno a Marina Romea, ognuno di questi costituito da tre postazioni distanti circa 50 m, 100 m e 200 m dalla linea di costa.



**Fig. 3.3 – Area dove si localizza la rete di piezometri. Si ritaglia un ruolo importante ai fini dello studio il canale che parte dalla foce del Lamone e finisce il suo corso a Porto Corsini. Sono evidenziati in rosso i punti di campionamento**

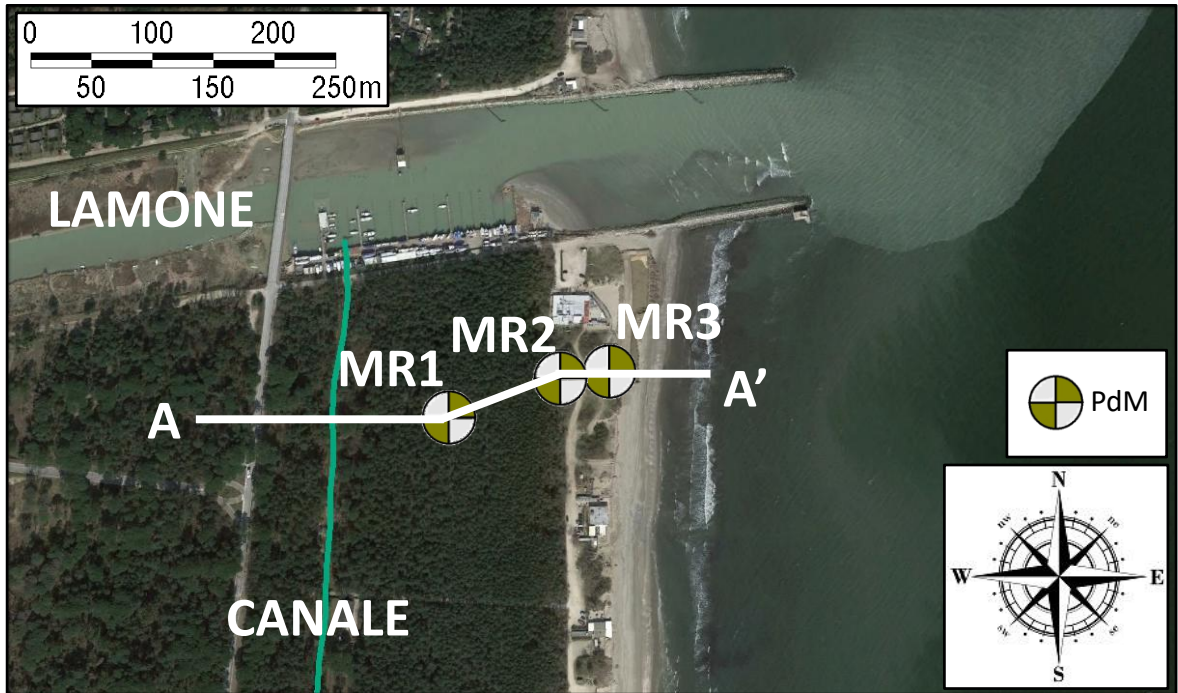


Fig. 3.4 – Dettaglio sul transetto a nord di Marina Romea. Interessante notare la macchia di materiale sedimentario dirigersi verso nord

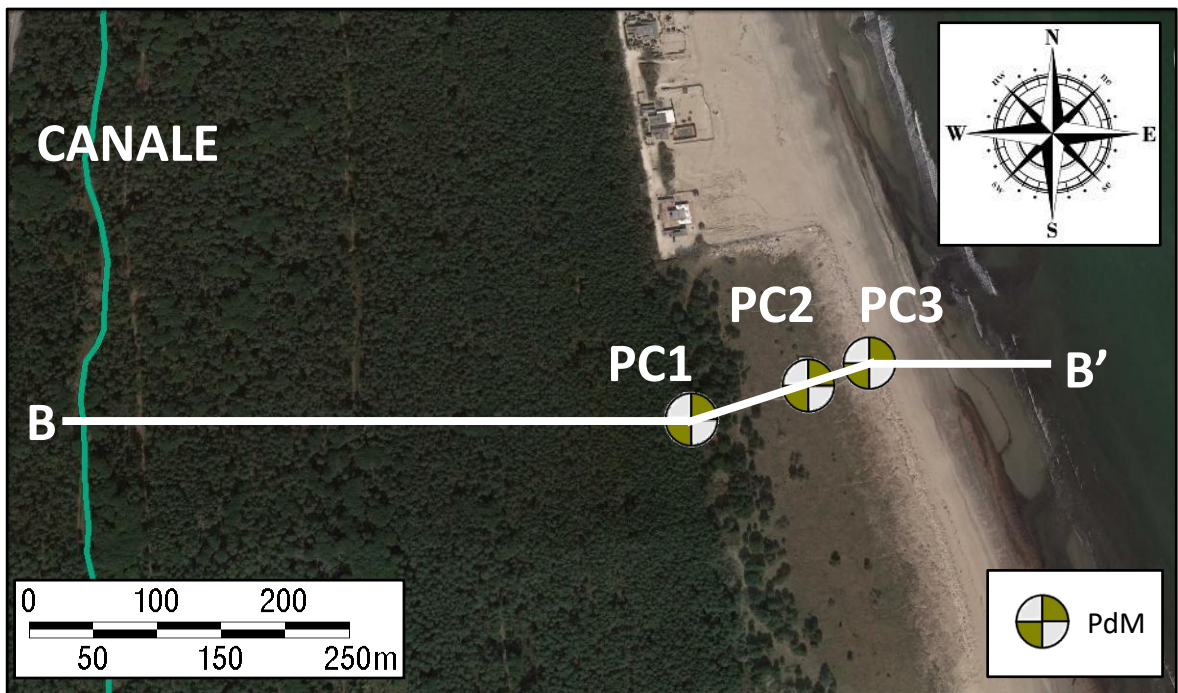


Fig. 3.5 – Porzione di litorale a nord di Porto Corsini. Qui la distanza tra mare e canale è maggiore

## 3.2 MONITORAGGIO E ANALISI

### 3.2.1 Rilievi GPS

Allo scopo di posizionare nello spazio i PdM si è provveduto alla rilevazione della quota della bocca pozzo (indirettamente anche della superficie topografica) attraverso un rilievo GPS di dettaglio e una seguente integrazione dello stesso con una campagna di livellazione eseguita con Stazione Totale. Sono di seguito riportate le coordinate in ED 50 e le profondità dei vari minifiltri. Tutti i punti sono stati quotati tramite un rilievo accurato con tecnologia G.P.S. ed hanno una precisione di  $\pm 1$  cm.

**Tab. 3.2 – Coordinate per ogni postazione e quote del piano calpestio, della boccapozzo e dei minifiltri nel transetto Porto Corsini B – B'**

PdM	Coord. E	Coord. N	Quota P.C. (m.l.m.m)	Quota B.P. (m.l.m.m)	Minifiltro	Quota minifiltro (m.l.m.m)
PC1	286614,74	4916807,99	2,48	2,62	1	1,62
					2	1,12
					3	0,62
					4	0,12
					5	-0,38
					6	-1,38
					7	-2,38
					8	-3,38
PC2	286577,09	4916802,33	2,28	2,32	1	1,32
					2	0,82
					3	0,32
					4	-0,18
					5	-0,68
					6	-1,68
					7	-2,68
					8	-3,68
PC3	286440,59	4916796,49	1,74	2,09	1	1,09
					2	0,59
					3	0,09
					4	-0,41
					5	-0,91
					6	-1,91
					7	-2,91
					8	-3,91

**Tab. 3.3 – Coordinate per ogni postazione e quote del piano calpestio, della boccapozzo e dei minifiltri nel transetto Marina Romea A – A’**

<b>PdM</b>	<b>Coord. E</b>	<b>Coord. N</b>	<b>Quota P.C. (m.l.m.m)</b>	<b>Quota B.P. (m.l.m.m)</b>	<b>Minifiltro</b>	<b>Quota minifiltro (m.l.m.m)</b>
MR1	283792,71	4933823,07	2,92	3,08	1	2,08
					2	1,58
					3	1,08
					4	0,58
					5	0,08
					6	-0,92
					7	-1,92
					8	-2,92
MR2	283765,00	4933809,80	2,71	2,92	1	1,92
					2	1,42
					3	0,92
					4	0,42
					5	-0,08
					6	-1,08
					7	-2,08
					8	-3,08
MR3	283635,00	4933809,80	1,31	1,50	1	0,50
					2	0,00
					3	-0,50
					4	-1,00
					5	-1,50
					6	-2,50
					7	-3,50
					8	-4,50

### 3.2.2 Rilievi Freatimetrici

La prima operazione svolta durante ogni monitoraggio è stata la determinazione della soggiacenza tramite freatimetro, cioè della profondità della tavola d'acqua rispetto alla superficie topografica.

Il freatimetro è uno strumento costituito da una sonda di lettura alimentata a batteria che viene calata all'interno del piezometro per mezzo di una cordella metrica cavo millimetrato. Il circuito elettrico si chiude nel momento in cui la sonda viene a contatto con la superficie dell'acqua. Un suono, abbinato all'accensione di un led, avverte dell'avvenuto contatto con l'acqua e che si può procedere con la lettura della profondità.



**Fig. 3.6 – Freatimetro modello BFK-30 con cavo di lunghezza 30m**

È stata quindi calata per ogni postazione la sonda all'interno del pozzo (esclusivo per i rilievi freatimetrici) e prese le misure della distanza della tavola d'acqua riferite alla "boccapozzo" (B.P.).

Per differenza con le misurazioni GPS si è poi calcolata la quota assoluta della tavola d'acqua rispetto al livello medio mare.

### 3.2.3 Determinazione della conduttività e di altri parametri chimico-fisici

Per la misura delle proprietà chimico-fisiche dell'acqua ci si è avvalsi di una sonda multi-parametrica portatile. Questo strumento, collegato ad appositi elettrodi e preventivamente tarato con standard certificati, consente di misurare simultaneamente varie caratteristiche dell'acqua direttamente in campo.

Sono state quindi prelevate per aspirazione peristaltica dei campioni da ogni singolo minifiltro e pompate in appositi recipienti di raccolta dove sono stati poi immersi gli elettrodi. Una volta raggiunta la stabilità parametrica si è passati alla lettura dei valori secondo l'ordine: pH, temperatura e conduttività elettrica. Poiché taluni parametri possono mostrare alterazioni al contatto con l'atmosfera, l'annotazione dei dati deve richiedere il minor tempo possibile e cominciare dai parametri più suscettibili.



**Fig. 3.7 - Modello di sonda utilizzata PCD 650 marca Eutech Instruments, il kit è dotato anche di sonde e soluzioni standard utili alla calibrazione**

Da tutte le misure di conduttività e temperatura è stato possibile poi risalire alla salinità attraverso la formula di conversione elaborata da Lewis & Parkins (1981) e riportata nel rapporto n. 44 degli Unesco Technical Papers (UNESCO, 1983), ricostruendo così l'andamento di questa grandezza lungo le sezioni dell'acquifero per ognuno dei due transetti.

Sono state analizzate anche l'acqua di mare e del canale come valori di riferimento.



È risultato indispensabile inoltre eseguire in ogni postazione una trivellata manuale, per essere certi di intercettare la porzione superficiale dell'acquifero. Capita, infatti, che se la *water table* è di poco sotto al filtro non si riesca ad avere i parametri della parte superficiale, rinunciando in molti casi all'unico volume di acqua dolce presente in questi contesti costieri. Una volta raggiunta la tavola d'acqua è stato inserito un piezometro temporaneo (pozzi installati per il tempo necessario all'acquisizione dei parametri), è stato prelevato con la pompa un campione di acqua superficiale, si è poi tolto il piezometro e richiuso il foro. Questo per ottenere i parametri chimico-fisici della porzione superficiale dell'acquifero.

### 3.2.4 Misure geochimiche e spettrofotometriche in campo

A Ottobre è stata eseguita anche una campagna di caratterizzazione geochimica della falda. Parte di questa campagna si è svolta nei laboratori CIRSA e parte direttamente in campo, a causa della facilità di alterazione a cui sono soggetti alcuni elementi. Sono infatti frequenti fenomeni di flocculazione e precipitazione di specie a contatto con l'atmosfera, prima presenti in fase acquosa nel sottosuolo (esempio  $\text{Fe}^{2+}$ , piuttosto che  $\text{NH}_4^+$  o  $\text{NO}_2^-$ ).

Dalle concentrazioni ottenute si è potuto poi risalire all'indice BEX (Stuijzand, 1993), che evidenzia trend di addolcimento o di salinizzazione della porzione di acquifero relativa al campione in esame.

La prima analisi riguarda l'alcalinità, svoltasi mediante un kit di titolazione da campo Acquamerck. L'alcalinità è definita come la capacità di un'acqua di neutralizzare gli acidi per effetto delle basi disciolte. Questo potere tamponante è dato in gran parte dalla quantità disciolta di ioni carbonato e bicarbonato, se il pH è maggiore di 8,2, o solo dagli ioni  $\text{HCO}_3^-$ , se  $4,3 < \text{pH} < 8,2$  (manuale acquamerck).



Fig. 3.8 – Kit Acquamerck, Alkalinity MColorstest

Il test si basa dunque su una titolazione volumetrica, dove la soluzione titolante è un acido forte a concentrazione nota, lasciato gocciolare da una siringa graduata e il titolato è un volume specifico d'acqua con l'aggiunta di 2 gocce d'indicatore. Visto che i campioni presentano pH tra 4,3 e 8,2 la metodologia riguarda solo gli ioni bicarbonato. Arrivati al punto equivalente si sono letti sulla siringa il volume di acido, corrispondente alle mmol di  $\text{HCO}_3^-$  su litro che moltiplicate per il peso molecolare hanno restituito la concentrazione in mg/L dello ione.

La seconda è un'analisi quantitativa di altre specie indispensabili ai fini della caratterizzazione: ferro ferroso, ferro totale, fosfati (facilmente alterabili), ione ammonio e nitriti (rilevati in laboratorio post-campionamento).

Per queste determinazioni si è impiegato uno spettrofotometro da campo HACH DR/2010. Questo strumento permette di misurare la trasmittanza  $T$  di una soluzione in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente, da cui poi l'assorbanza  $A$  (Moggi et al., 2006) attraverso la seguente equazione.

$$A = -\log_{10} T$$

Dall'assorbanza si ottiene poi, attraverso la formula di Lambert-Beer, la concentrazione  $C$  dell'analita d'interesse.

$$A = \varepsilon \cdot b \cdot C$$

Con  $\varepsilon$ = coefficiente di assorbimento molare [ $\text{L}/(\text{mol}\cdot\text{cm})$ ] e  $b$ =cammino ottico [cm]

Lo spettrofotometro portatile mostra una particolare versatilità grazie alle sue dimensioni e una certa facilità d'uso, in quanto per l'utente è sufficiente seguire i metodi specifici, elencati nel manuale.



**Fig. 3.9 – Spettrofotometro e relative cuvette**

Durante la lettura, essendo uno strumento a singolo raggio, si introduce prima il bianco di riferimento utile all'azzeramento, poi la cuvetta con il campione. Per differenza si ottiene in uscita la concentrazione in mg/L dell'analita.

**Tab. 3.4 – Metodi e reagenti utilizzati per le indagini geochimiche**

<b>Analiti</b>	<b>Metodologia</b>
Alcalinità	Kit di titolazione da campo Acquamerck
Ferro ferroso	Spettrofotometro da campo HACH DR/2010 Reagente: FerroVerIronPillow Metodo: 8146
Ferro totale	Spettrofotometro da campo HACH DR/2010 Reagente: FerroVerIronPillow Metodo: 8008
Fosfati	Spettrofotometro da campo HACH DR/2010 Reagente: PhosVer 3 PhosphatePillow Metodo: 8048
Ammonio	Spettrofotometro da campo HACH DR/2010 Reagente: AmmoniaSalicylateReagentPowderPillow - AmmoniaCyanurateReagentPowderPillow Metodo: 8155
Nitriti	Spettrofotometro da campo HACH DR/2010 Reagente: NitraVer 3 Nitrate ReagentPillow Metodo: 8507

### **3.2.5 Campionamento**

Obiettivo del campionamento è quello di rendere disponibile per le analisi chimiche un'aliquota dell'acqua appartenente all'acquifero di cui si vuole conoscere lo stato chimico-fisico in un dato momento. Ciò è possibile a patto che il campione sia rappresentativo del sistema acquifero di provenienza o, almeno, di una sua porzione prossima al punto di prelievo. E' quindi essenziale che le procedure di prelievo, conservazione, trasporto, preparazione e analisi del campione siano idonee a mantenere intatta la sua rappresentatività (Appelo C.A.J. e Postma D.L., 2005).

Altro accorgimento indispensabile è la scelta dei recipienti. La tipologia, il materiale di composizione e il numero di contenitori dev'essere deciso in funzione dell'analisi. Inoltre devono essere "avvinati", ossia sciacquati con l'acqua proveniente dal piezometro per assicurare che il campione non venga a contatto con sostanze estranee eventualmente presenti nel recipiente o non venga diluito dai liquidi di risciacquo utilizzati per la sua pulizia.

I contenitori utilizzati in questa indagine sono state bottiglie cilindriche graduate realizzate in Polietilene dotate di sottotappo per assicurare una perfetta tenuta. La scala graduata consente una lettura precisa e chiara del contenuto.

Come già commentato in precedenza un protocollo standard univoco ancora non c'è a livello internazionale; però si possono trovare metodologie basate sulle linee guida EPA 2007, recepite in Italia dal D.Lgs. N°30 del 2009, e facenti riferimento ai metodi standardizzati (ISO 5667-11), tra tutte la raccolta attraverso i sistemi con minifiltri o multi-piezometri all'interno di un singolo rivestimento (Stuyfzand 1983 e Lerner 1995).



**Fig. 3.10 – Sistema di filtrazione a pressione ridotta, l’aspirazione avviene tramite pompa peristaltica**

Il primo procedimento operativo è stata l’estrazione d’acqua tramite pompa peristaltica. I primi volumi oltre che utili allo spurgo hanno permesso l’avvinamento delle bottiglie di raccolta. In seguito sono stati filtrati i campioni a  $0,45\ \mu\text{m}$  per rimuovere alghe e particelle in sospensione. I volumi prelevati dovevano essere almeno 100 mL per l’analisi dei cationi e 100 mL per l’analisi degli anioni. Ai campioni destinati all’assorbimento atomico a fiamma è stato poi aggiunto un volume di almeno 1 mL di  $\text{HNO}_3$  concentrato, così da ottenere un  $\text{pH} < 2$  ed evitare processi precipitativi che interferirebbero con l’indagine strumentale. Infine, dopo il trasporto, tutti i campioni sono stati riposti in frigorifero fino al momento delle analisi, così da evitare possibili alterazioni.

Il campionamento ha incluso anche l’acqua del canale e l’acqua di mare raccolti nei pressi di Marina Romea. Questi campioni delimitano l’area di studio e i dati saranno utili per definire le condizioni al contorno.

### 3.2.6 Analisi F-AAS

La spettroscopia di assorbimento atomico è una tecnica analitica impiegata per la determinazione quantitativa di ioni metallici in soluzione. Il principio su cui si basa questa tecnica è il fatto che i livelli energetici atomici sono discreti, pertanto le transizioni elettroniche permesse sono caratteristiche per ogni atomo e l'assorbimento di una radiazione elettromagnetica per eccitazione ad un livello energetico superiore avviene a una sola lunghezza d'onda.

Tutto ciò implica che ogni atomo avrà il suo spettro di assorbimento caratteristico e, per ogni lunghezza d'onda cui corrisponde una transizione sufficientemente probabile è possibile effettuare misure quantitative, applicando la legge di Lambert-Beer (Skoog et al., 2005).

Le componenti essenziali di uno spettrometro di assorbimento atomico dunque sono:

- La sorgente di radiazione elettromagnetica, una lampada a catodo cavo la quale emette con uno spettro caratteristico dell'elemento (solitamente l'analita) di cui è composto il catodo.
- Il sistema di atomizzazione, nel caso specifico a fiamma, è il sistema che sfrutta la temperatura di una combustione aria-acetilene (2000°C circa) per ridurre allo stato di gas monoatomico il metallo da ricercare.
- Il sistema ottico e il monocromatore, utili all'indirizzamento della radiazione e alla riduzione del campo spettrale
- Il rivelatore, un fotoelettrodo o un fotomoltiplicatore, che trasforma il segnale luminoso in segnale elettrico.

Sono stati quindi analizzati i maggiori cationi ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , e  $\text{K}^+$ ) seguendo le metodiche presenti nel “Manuale, Linee Guida 29/2003 APAT: Metodi analitici per le acque”.

I cationi vengono determinati per aspirazione diretta del campione nella fiamma. Dalla misura del segnale di assorbanza a lunghezze d'onda specifiche si è ricavata la concentrazione mediante confronto con una curva di taratura ottenuta con soluzioni a concentrazioni note di analita.

Il metodo consente la determinazione dell'analita entro un certo intervallo di concentrazione. Per concentrazioni superiori si è rientrati nell'intervallo ricorrendo alla diluizione del campione (vedi Tab. 3.5).

L'utilizzo del correttore di fondo (nel nostro caso CsCl) ha consentito di minimizzare gli assorbimenti aspecifici eventualmente presenti. L'aggiunta di  $\text{La}(\text{NO}_3)_3$  ha consentito di eliminare le interferenze da ionizzazione.



**Fig. 3.11 – Spettrofotometro ad assorbimento atomico**

Dopo aver impostato i parametri strumentali (Lunghezza d'onda, fenditura e intensità di corrente in funzione dell'analita) si è costruita la curva di taratura utilizzando almeno tre soluzioni di riferimento, in modo tale da coprire l'intero campo di indagine analitico, e il bianco dei reattivi. Si è ripetuta la misura di ogni soluzione di riferimento compreso il bianco almeno tre volte. Quindi si esegue l'analisi dei campioni effettuando almeno tre letture per ogni soluzione da analizzare; si considerano accettabili i valori che forniscono un coefficiente di variazione inferiore al 5%. Le analisi dei campioni, delle soluzioni di riferimento e del bianco dei reattivi devono essere effettuate nelle stesse condizioni strumentali. Se la risposta del campione incognito analizzato cade al di fuori dell'intervallo di linearità si diluisce ulteriormente il campione per riportarlo nel campo di linearità. Si è costruita poi la retta di tarature tramite il calcolo della regressione lineare, con le concentrazioni (mg/L) delle soluzioni di riferimento in ascissa e le assorbanze corrispondenti, corrette del bianco, in ordinata. La regressione può essere considerata accettabile ai fini analitici se lo scarto tipo della retta stimata è inferiore al 5%. Si è calcolata infine la concentrazione del calcio nel campione utilizzando l'equazione ottenuta dalla regressione lineare, tenendo conto dell'eventuale diluizione effettuata.

**Tab. 3.5 – Diluizioni effettuate per l’analisi F-AAS, sono riportate le postazioni e i minifiltri di origine dei campioni. In base ai valori di conducibilità sono state determinate le diluizioni**

Postazione	Minifiltro	Campione	EC (mS/cm)	Diluizione
PC1	Tavola d’acqua	MFPC1_TOP	0,75	50
PC1	4	MFPC1_4	1	50
PC1	5	MFPC1_5	1,38	100
PC1	6	MFPC1_6	4,5	500
PC1	7	MFPC1_7	17,1	1250
PC1	8	MFPC1_8	32	2500
PC2	Tavola d’acqua	MFPC2_TOP	0,5	10
PC2	7	MFPC2_7	11,93	1000
PC2	8	MFPC2_8	21,25	1250
PC3	Tavola d’acqua	MFPC3_TOP	0,45	1000
PC3	4	MFPC3_4	0,5	10
PC3	5	MFPC3_5	0,525	10
PC3	6	MFPC3_6	2,49	100
PC3	7	MFPC3_7	7,141	500
MR1	Tavola d’acqua	MFMR1_TOP	0,12	100
MR1	5	MFMR1_5	3,11	200
MR1	6	MFMR1_6	13,07	1000
MR2	Tavola d’acqua	MFMR2_TOP	0,63	50
MR2	5	MFMR2_5	0,634	50
MR2	6	MFMR2_6	14,43	1000
MR2	7	MFMR2_7	29,4	2500
MR3	Tavola d’acqua	MFMR3_TOP	11,1	1000
MR3	2	MFMR3_2	13,63	1250
MR3	4	MFMR3_4	25,02	2500
MR3	5	MFMR3_5	32,3	2500
MR3	6	MFMR3_6	36,49	2500
MR3	7	MFMR3_7	38	2500
MR3	8	MFMR3_8	39,1	2500
CANALE		CANALE	21,53	1250
MARE		MARE	27,5	2500



### 3.2.7 Analisi IC

L'analisi degli anioni più rilevanti:  $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $Br^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $SO_4^{2-}$ , è stata svolta seguendo la metodica 4020 presente nel “Manuale, Linee Guida 29/2003 APAT: Metodi analitici per le acque”.

Il metodo è basato sulla determinazione simultanea di specie anioniche mediante cromatografia ionica. Questa tecnica si basa sulla separazione degli analiti mediante colonna di scambio anionico in base alla loro affinità per la fase stazionaria. L'eluente, contenente gli analiti separati, passa poi attraverso un dispositivo di derivatizzazione chimica post-colonna detto soppressore che, scambiando protoni con la fase mobile, ha lo scopo di abbassare la conducibilità di fondo dell'eluente, per formazione dell'acido debole coniugato, e di esaltare il segnale dell'analita, che viene rivelato mediante un conduttimetro in linea.



**Fig. 3.12 – Cromatografo ionico “Metrohm 883 Basic IC Plus” e le sue componenti**

Il campo di applicazione è compreso tra 0,1 e 100 mg/L per cloruro, nitrato e solfato; tra 0,1 e 10 mg/L per bromuro e nitrito; tra 0,2-20 mg/L per fluoruro e fosfato.

Campioni che presentano concentrazioni più elevate possono essere analizzati dopo un'opportuna diluizione (vedi Tab. 3.6).

Come primo processo operativo si sono preparati l'eluente e le 3 soluzioni di riferimento per la taratura, tutti partendo da standard a concentrazione nota. Successivamente si è verificato che le condizioni strumentali (volume d'iniezione, flusso dell'eluente, la conducibilità di fondo, la pressione del sistema) fossero ottimali. Una volta iniettata una soluzione di riferimento se la risoluzione tra i picchi e la riproducibilità dei tempi di

ritenzione (scostamento dall'ultimo controllo:  $\pm 5\%$ ) sono accettabili, allora è possibile cominciare con l'acquisizione dei campioni. Si è quindi iniettato un'aliquota di campione nel loop, ante filtraggio a  $0,45 \mu\text{m}$  per evitare l'ingresso di particolato sospeso nella colonna. Dopo che si è ottenuto in uscita dal software il cromatogramma del campione, il riconoscimento degli analiti viene effettuato confrontando il tempo di ritenzione dei picchi con il tempo di ritenzione delle soluzioni di riferimento.

La concentrazione si determina invece confrontando l'area del picco con la curva di taratura costruita mediante le soluzioni di riferimento.

**Tab. 3.6 – Diluizioni effettuate per l'analisi IC, sono riportate le postazioni e i minifiltri di origine dei campioni. In base ai valori di conducibilità sono state determinate le diluizioni**

Postazione	Minifiltro	Campione	EC (mS/cm)	Diluizione
PC1	Tavola d'acqua	MFPC1_TOP	0,75	2,5
PC1	4	MFPC1_4	1	5
PC1	5	MFPC1_5	1,38	5
PC1	6	MFPC1_6	4,5	25
PC1	7	MFPC1_7	17,1	150
PC1	8	MFPC1_8	32	200
PC2	Tavola d'acqua	MFPC2_TOP	0,5	2,5
PC2	7	MFPC2_7	11,93	100
PC2	8	MFPC2_8	21,25	150
PC3	Tavola d'acqua	MFPC3_TOP	0,45	2,5
PC3	4	MFPC3_4	0,5	1
PC3	5	MFPC3_5	0,525	2,5
PC3	6	MFPC3_6	2,49	10
PC3	7	MFPC3_7	7,141	50
MR1	Tavola d'acqua	MFMR1_TOP	0,12	5
MR1	5	MFMR1_5	3,11	20
MR1	6	MFMR1_6	13,07	100
MR2	Tavola d'acqua	MFMR2_TOP	0,63	2,5
MR2	5	MFMR2_5	0,634	2,5
MR2	6	MFMR2_6	14,43	100
MR2	7	MFMR2_7	29,4	200
MR3	Tavola d'acqua	MFMR3_TOP	11,1	100
MR3	2	MFMR3_2	13,63	100
MR3	4	MFMR3_4	25,02	200
MR3	5	MFMR3_5	32,3	200
MR3	6	MFMR3_6	36,49	200
MR3	7	MFMR3_7	38	250
MR3	8	MFMR3_8	39,1	250
CANALE		CANALE	21,53	150
MARE		MARE	27,5	200

---

## 4 RISULTATI

Per conoscere i meccanismi e le dinamiche dell'acquifero sono stati qui riportati i risultati ottenuti dalla campagna di monitoraggio e dalle analisi in laboratorio. Al termine di ogni elaborazione del dato sarà presente una descrizione al fine di rendere chiara la natura del risultato e offrire così spunti di riflessione utili alla comprensione dei fenomeni in atto che verranno esposti nella sezione delle discussioni.

Gli strumenti utilizzati per la creazione dei profili, delle sezioni e dell'elaborazione statistica sono: Microsoft Excel 2010, GCDkit 3.00 ed EnviroInsite2014.

Quest'ultimo è un programma di *contouring* e creazioni di sezioni e mappe relative a dati idrogeologici. La costruzione avviene tramite interpolazione di *dataset* e la scelta di diversi algoritmi da parte dell'utente viene fatta al fine di ottenere un modello più verosimilmente compatibile col *database*. La rappresentazione in uscita permette un'ottima visione d'insieme e una facile interpretazione del dato lungo i transetti, i parametri sono stati riprodotti sulla stessa scala cromatica così da evidenziare meglio i cambiamenti avvenuti nel corso del monitoraggio.

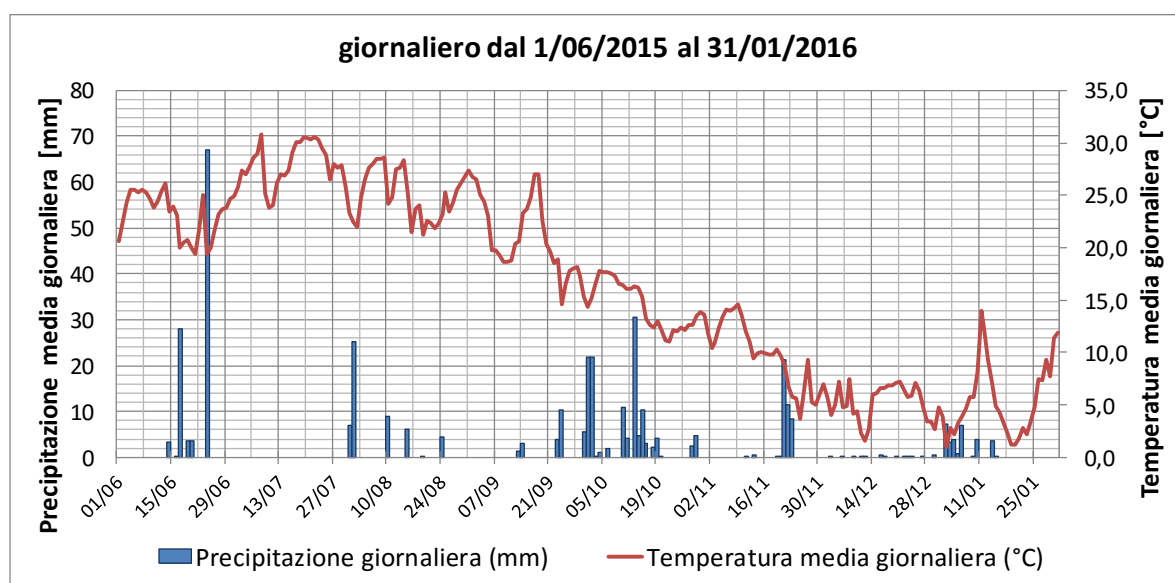
GCDkit invece è uno strumento di *modeling* per l'interpolazione e l'elaborazione statistica di dati geochimici. Con questo software è stato possibile ottenere curve cumulative e *box plot* per ciascun elemento analizzato. I *box plot* sono grafici costituiti da una "scatola" al cui interno vi è una linea che rappresenta la mediana mentre le linee esterne identificano rispettivamente il primo e il terzo quartile; la distanza tra queste ultime è detta distanza interquartile ed è una misura della dispersione della distribuzioni di dati. Le linee che si allungano dai bordi della scatola individuano gli intervalli in cui sono posizionati i valori minori rispettivamente del 25° e 75° percentile e sono delimitate rispettivamente del VAI (valore adiacente inferiore) e dal VAS (valore adiacente superiore) calcolati con una specifica relazione. I valori esterni al VAI e al VAS costituiscono un'anomalia rispetto alla maggior parte dei campioni osservati e sono detti *outliers*.

## 4.1 FREATIMETRIA ED ANDAMENTO STAGIONALE

Come già accennato i dati climatici sono un fattore essenziale all'interno del bilancio idrologico. Diventa quindi necessario, per lo studio di queste dinamiche in acquifero, un'analisi di quelle che sono state le temperature e le precipitazioni antecedenti e contemporanee ai monitoraggi in campo. Sono stati perciò elaborati i dati orari di precipitazioni e temperature scaricati dal servizio idrometeorologico ARPA-SIM (<http://dexter-smr.arpa.emr.it/Dexter/Login>) (vedi Appendice A) della stazione meteorologica Ravenna Urbana.

**Tab. 4.1 – Parametri Climatici del periodo d'interesse, le temperature massime e minime sono assolute.**

mese	Precipitazione mensile [mm]	N° Giorni di pioggia	Temperatura media (°C)	Temperatura min. (°C)	Temperatura max. (°C)
giu-15	105,6	6	23,1	14,0	30,8
lug-15	7	1	27,8	18,3	35,8
ago-15	44,8	5	25,0	16,6	35,2
set-15	24,2	4	20,8	12,5	33,4
ott-15	124,6	15	14,4	6,4	22,5
nov-15	42	7	10,8	0,5	20,7
dic-15	3	13	5,3	-0,8	12,4
gen-16	30,2	9	5,5	-2,5	17,4



**Fig. 4.1 – Grafico giornaliero del periodo d'interesse**

Il mese più piovoso risulta essere Ottobre con una piovosità di 124,6 mm diluita su 15 giorni. Anche Giugno presenta una elevata piovosità, ma concentrata in 6 giorni e con le elevate temperature si prevede un alto tasso di evaporazione. Il mese più secco è Dicembre seguito da Luglio. Questo mese risulta essere anche il più caldo con una massima di 35,8 °C e una media di 27,8 °C. La temperatura minima registrata è -2,5°C a Gennaio.

Le indagini freatimetriche sono state condotte da Settembre a Gennaio, cercando di mantenere una certa periodicità: a metà di ogni mese.

La soggiacenza è stata ottenuta attraverso le misure in campo di distanza della *water table* rispetto alla bocca pozzo (B.P.). Per differenza con le misurazioni GPS (vedi Appendice B) si è poi calcolata la quota assoluta della tavola d'acqua rispetto al livello medio mare.

$$h_{WT} = Z_{BP} - b_{BP}$$

dove:

$h_{WT}$  è la quota della tavola d'acqua [m.l.m.m]

$Z_{BP}$  è la quota della bocca pozzo [m.l.m.m]

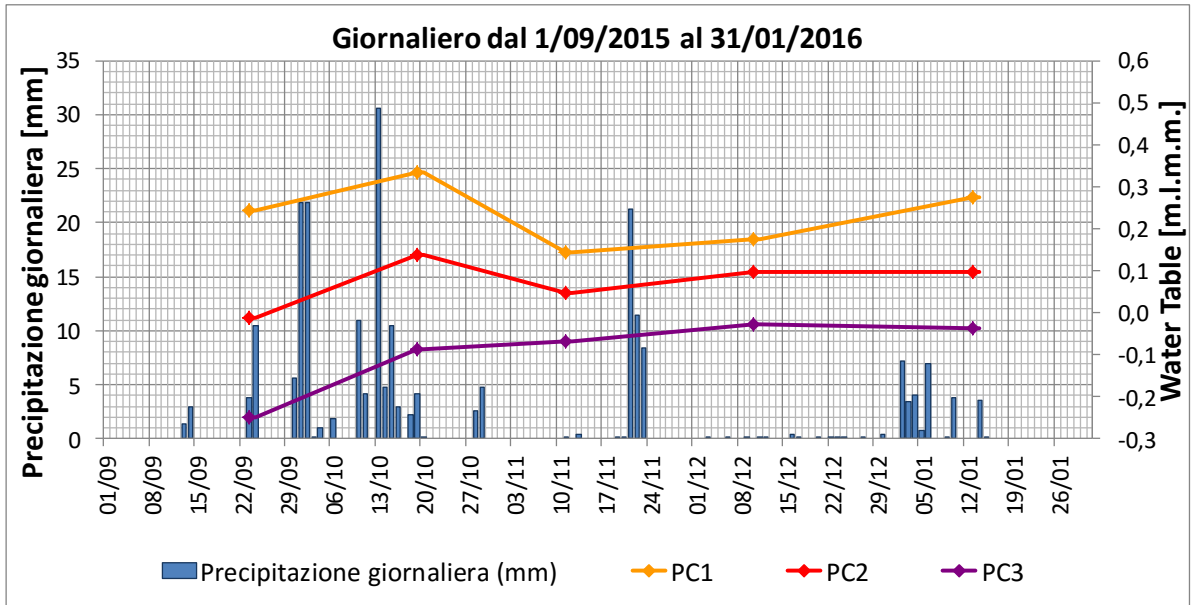
$b_{BP}$  è distanza misurata col freatimetro [m]

**Tab. 4.2 – Quote della tavola d'acqua misurate per ogni punto di monitoraggio (PdM)**

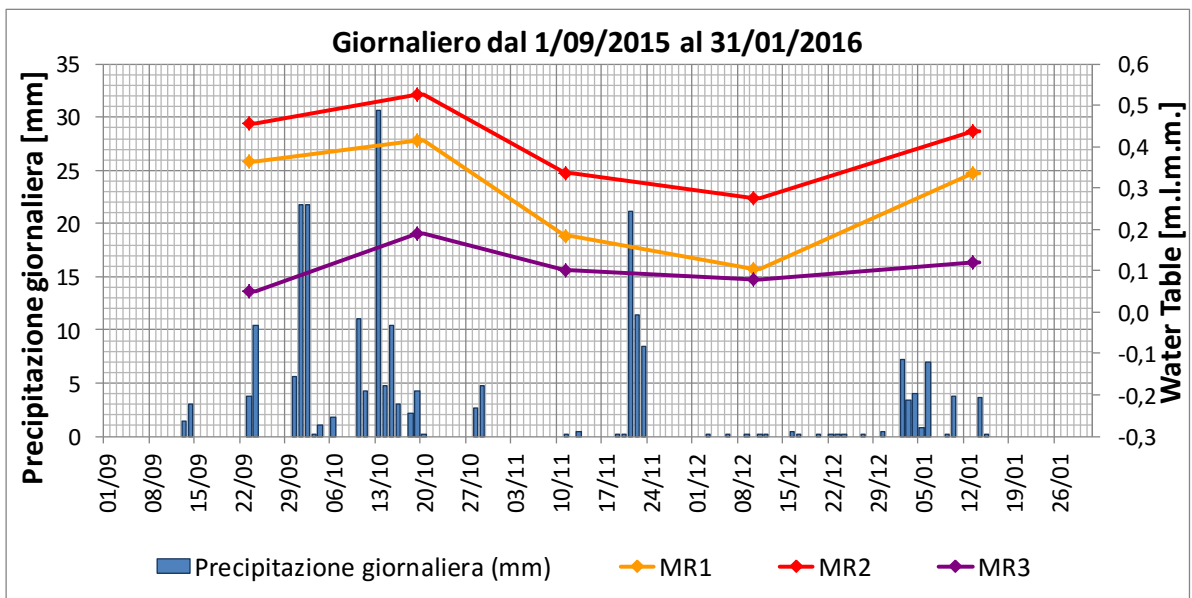
Water Table [m.l.m.m]						
Data	PC1	PC2	PC3	MR1	MR2	MR3
23/09/2015	0,24	-0,01	-0,25	0,37	0,46	0,05
19/10/2015	0,33	0,14	-0,09	0,42	0,53	0,19
12/11/2015	0,14	0,05	-0,07	0,19	0,34	0,10
11/12/2015	0,17	0,10	-0,03	0,11	0,28	0,08
14/01/2016	0,27	0,10	-0,04	0,34	0,44	0,12

I valori positivi identificano quote superiori al livello medio mare mentre i valori negativi quote inferiori rispetto al riferimento del livello marino.

Il livello freaticometrico minimo è possibile identificarlo nel PdM PC3 a Settembre, mentre il maggiore in MR2 a Ottobre.



**Fig. 4.2 – Quote della superficie piezometrica in relazione con i dati climatici. Dati riguardanti il transetto di Porto Corsini**



**Fig. 4.3 – Quote della superficie piezometrica in relazione con i dati climatici. Dati riguardanti il transetto di Marina Romea**

---

## 4.2 PARAMETRI CHIMICO-FISICI

L'acquisizione a cadenza mensile dei parametri chimico-fisici (EC, T, pH, Salinità) ha permesso la ricostruzione di grafici e profili, che rivelano caratteri fondamentali delle acque sotterranee.

L'intera campagna d'indagine ha però presentato un inconveniente che ha portato all'impossibilità di campionare l'acqua in alcuni minifiltri: l'otturazione di questi da parte, probabilmente, di aggregazioni di materiale fine insinuatosi tra granuli di materiale sabbioso (vedi "ponti di sabbia" paragrafo 3.1.2 messa a dimora). A causa di quest'imprevisto, parte delle rappresentazioni e dei grafici presenteranno lacune o profili incompleti.

Nella tabella seguente (Tab. 4.3) vengono presentate alcune statistiche (medie mensili e deviazioni standard) riguardanti tutti i parametri studiati, suddivise in base al punto di campionamento; in più sono anche messi a disposizione i *box plot* rappresentanti la distribuzione dei parametri effettivi del mese di Ottobre.

Le tabelle mensili complete di tutti i dati raccolti durante il monitoraggio sono allegate e consultabili in Appendice C.

Tab. 4.3 – Parametri chimico-fisici mediati per i mesi di monitoraggio

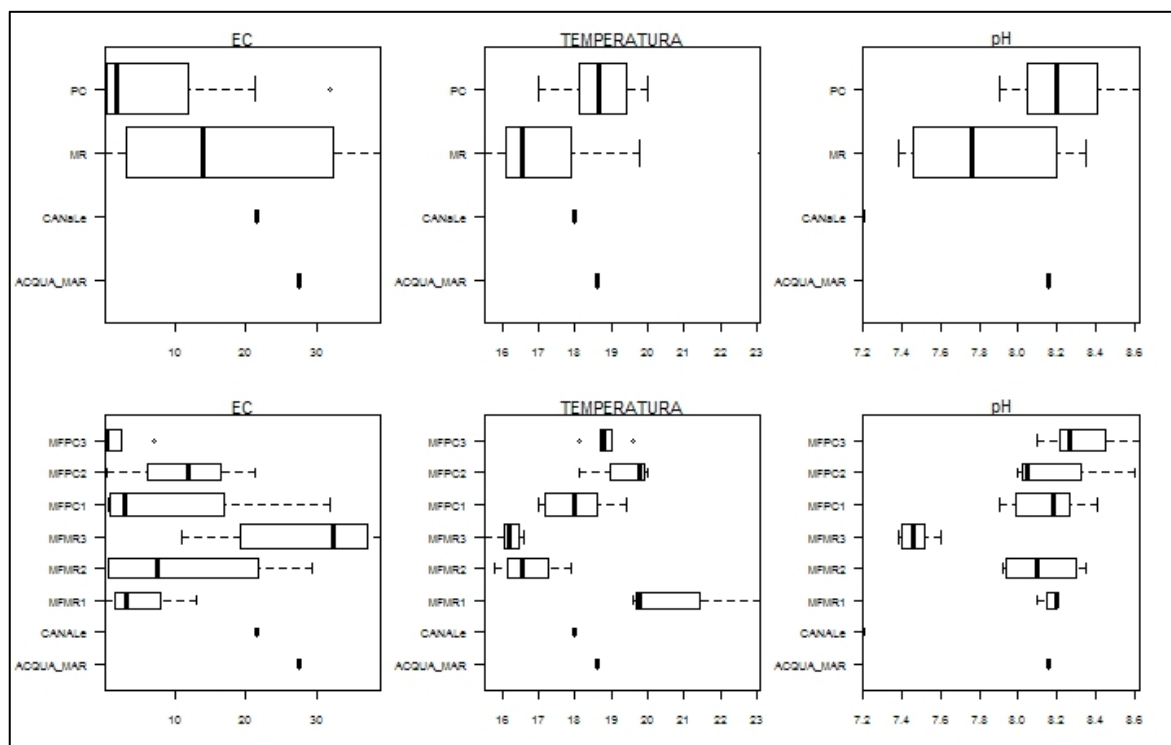
PdM	Minifiltro	$\bar{T}$ (°C)	$\sigma T$	$\overline{pH}$	$\sigma pH$	$\bar{S}$ (g/l)	$\sigma S$
PC1	TOP	16,0	3,7	8,1	0,2	0,5	0,2
PC1	4	16,3	4,2	7,8	0,6	0,7	0,4
PC1	5	16,6	3,1	8,0	0,5	0,6	0,1
PC1	6	16,5	2,5	8,0	0,2	1,5	0,6
PC1	7	16,6	2,3	7,8	0,2	7,5	0,6
PC1	8	15,4	1,7	7,7	0,1	15,9	0,3
PC2	TOP	16,0	3,7	8,3	0,2	0,2	0,0
PC2	7	16,4	4,3	7,8	0,1	5,7	0,4
PC2	8	16,3	3,5	7,7	0,2	13,1	1,5
PC3	TOP	16,3	5,3	8,2	0,1	0,2	0,0
PC3	4	16,1	5,0	8,2	0,2	0,2	0,0
PC3	5	16,1	3,4	8,1	0,2	0,2	0,0
PC3	6	16,0	2,4	8,1	0,1	0,6	0,3
PC3	7	15,6	2,1	7,8	0,2	6,1	1,7
MR1	TOP	15,2	4,2	7,9	0,2	0,5	0,3
MR1	5	15,5	5,4	7,9	0,2	1,0	0,2
MR1	6	16,2	2,8	7,7	0,4	6,5	0,7
MR2	TOP	15,4	1,8	8,0	0,3	0,3	0,1
MR2	4	17,9	0,0	7,6	0,0	0,2	0,0
MR2	5	16,0	2,2	7,9	0,2	0,3	0,1
MR2	6	16,0	1,2	7,7	0,2	4,4	1,5
MR2	7	15,8	1,0	7,6	0,2	14,6	0,5
MR2	8	17,2	0,0	7,3	0,0	15,7	0,0
MR3	TOP	14,2	2,7	7,5	0,1	5,1	0,1
MR3	2	13,2	2,8	7,4	0,4	6,5	0,0
MR3	3	11,2	2,8	7,4	0,3	5,3	0,1
MR3	4	14,4	2,3	7,4	0,4	10,5	1,2
MR3	5	14,4	1,9	7,3	0,3	16,6	0,1
MR3	6	14,3	1,4	7,3	0,2	19,6	0,5
MR3	7	14,4	1,6	7,4	0,1	20,2	0,3
MR3	8	14,4	1,6	7,4	0,2	20,4	0,2
CANALE		13,2	5,2	7,4	0,3	11,6	3,5
ACQUA MARE		18,6	0,0	8,2	0,0	13,8	0,0
ACQUA DI MARE ARPA E-R						27,3	

Per avere a disposizione delle condizioni al contorno complete oltre alle acque del canale e all'acqua di mare raccolte durante il campionamento ed analizzate in laboratorio, si è integrato il set di dati con il parametro di salinità tabulato da ARPA Emilia-Romagna.



Questo dato riguarda l'acqua di mare presente a una profondità -5 m, a 10 Km a largo di Porto Garibaldi il 14 Febbraio 2000

([http://www.arpa.emr.it/cms3/documenti/\\_cerca\\_doc/mare/progetto\\_mare/salinit%C3%A0.htm](http://www.arpa.emr.it/cms3/documenti/_cerca_doc/mare/progetto_mare/salinit%C3%A0.htm)).



**Fig. 4.4 – Boxplots dei parametri chimico-fisici di Ottobre, prima suddivisi per località poi per PdM**

I box plot riguardanti il pH mostrano chiaramente che nella località Porto Corsini si manifesta una particolare basicità con un valore medio 8,2 prossimo al mare. Marina Romea invece mostra una distribuzione più ampia di dati, e una maggiore acidità che lo avvicina al pH osservato nel campione del canale. Analizzando però l'andamento in funzione dei PdM si capisce che questa maggiore distribuzione è data da un solo punto in particolare, MR3, che abbassa la media dell'intero transetto e ne amplifica la scatola. I pozzi MR2 e MR1 hanno andamenti simili ai punti di Porto Corsini.

Per quanto concerne la conduttività il trend è praticamente analogo. I valori superiori si trovano in MR3 (la media è 28 mS/cm) e la maggior parte di questi sorpassano i valori del canale e dell'acqua di mare (rispettivamente 21,5 mS/cm e 27,5 mS/cm). I dati di conducibilità degli altri pozzi mostrano invece valori simili anche se non molto discostati dai due campioni di riferimento.

Studiando i risultati riguardanti la temperatura è evidente come i valori inferiori si possano riscontrare nel punto MR3 a causa dell'ombreggiamento svolto dai pini, mentre i punti più esposti al sole descrivono temperature più elevate.

Confrontando con il canale, si evince che le acque sotterranee esibiscono una inerzia durante i cambiamenti meteorologici: avvicinandosi alla stagione fredda esibiscono temperature più elevate rispetto ai corpi idrici superficiali.

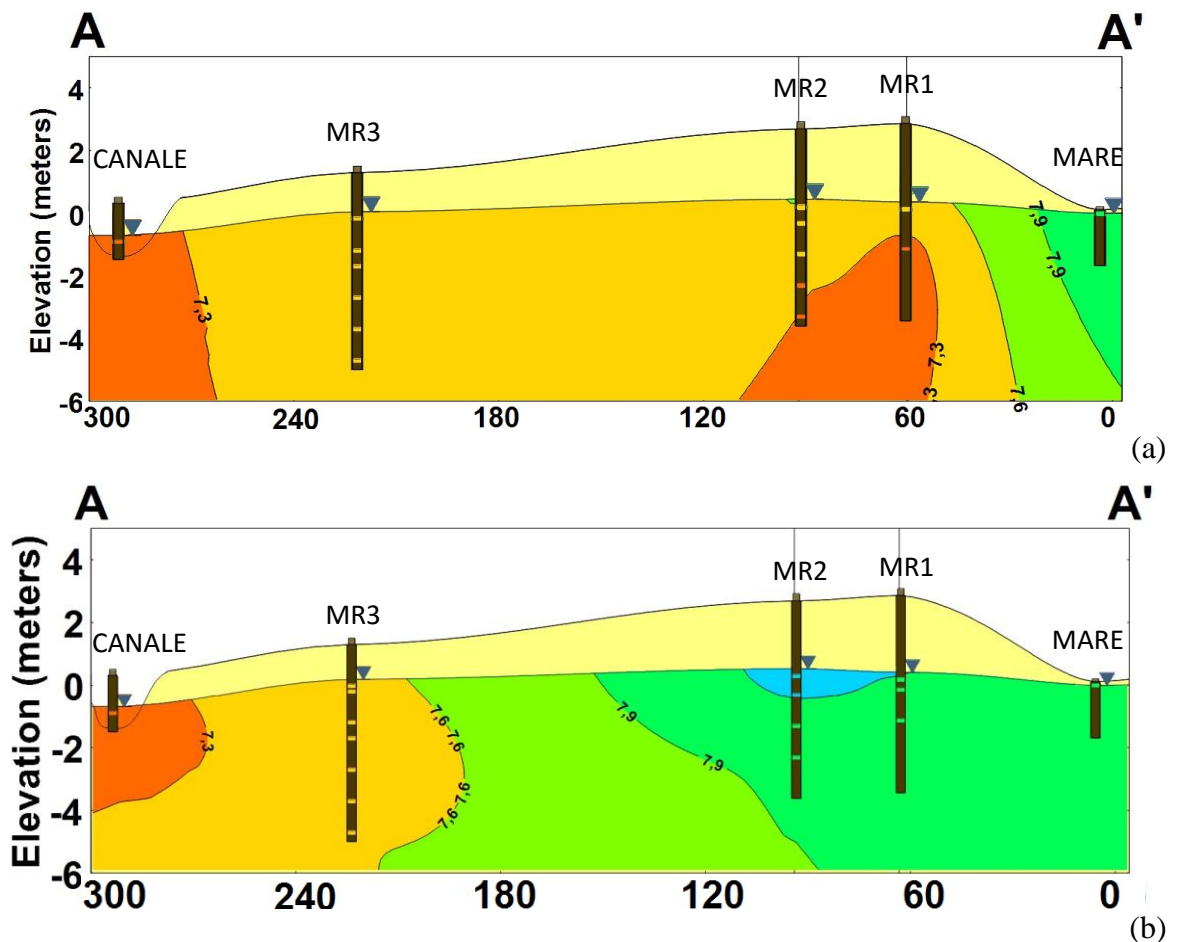
La minima assoluta è associata al minifiltro 3 del PdM MR3 a Dicembre con 8,9 °C (quota 0,10 m.l.m.m) e la massima dal minifiltro 7 del PdM PC2 a Settembre (quota -2,68 m.l.m.m) con 20,0°C.

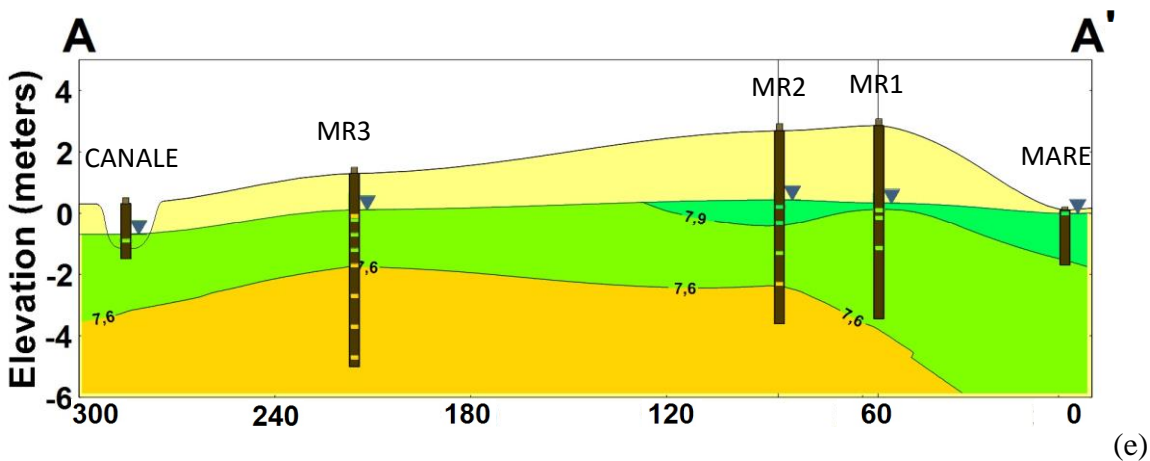
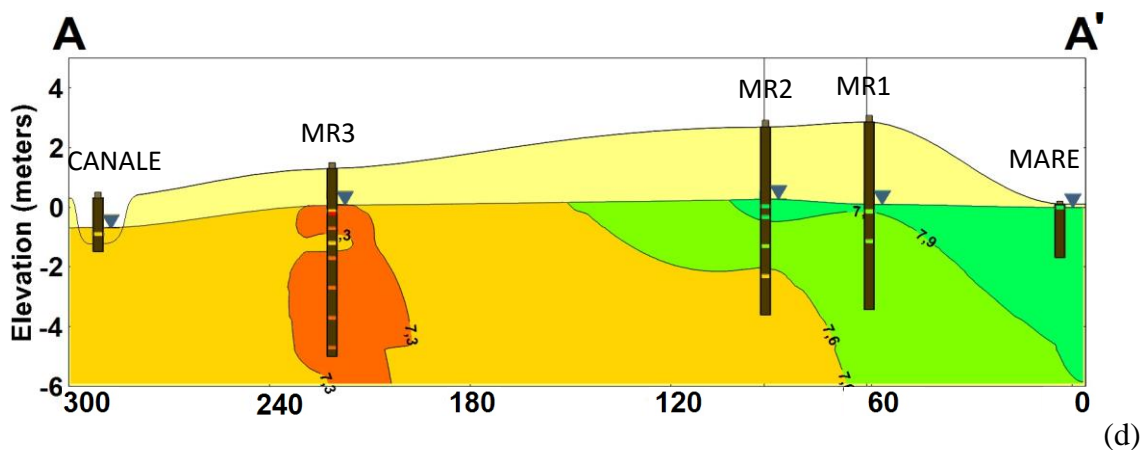
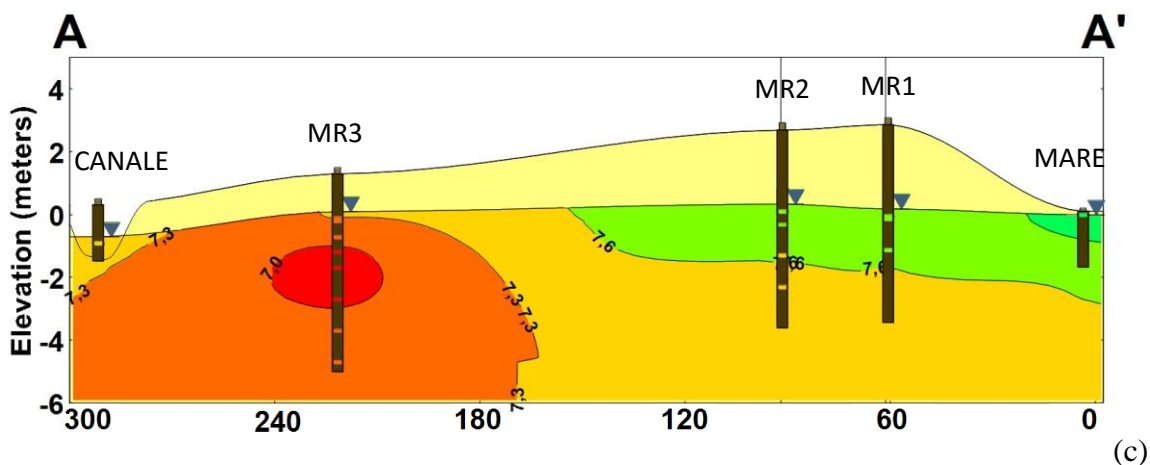
È possibile osservare come la minima si trovi a quote superiori, mentre la massima a quote più basse.

#### 4.2.1 pH

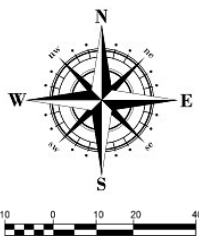
Per avere un quadro completo ed immediato del pH sono state raffigurate sezioni dell'acquifero interpolando i dati ottenuti dal monitoraggio in campo.

Il programma EnviroInsite ha permesso quindi le seguenti rappresentazioni della grandezza lungo la profondità e lungo i due transetti per ogni mese indagato.





pH ( )	
■	6,7 - 7,0
■	7,0 - 7,3
■	7,3 - 7,6
■	7,6 - 7,9
■	7,9 - 8,2
■	8,2 - 8,5
■	8,5 - 8,8

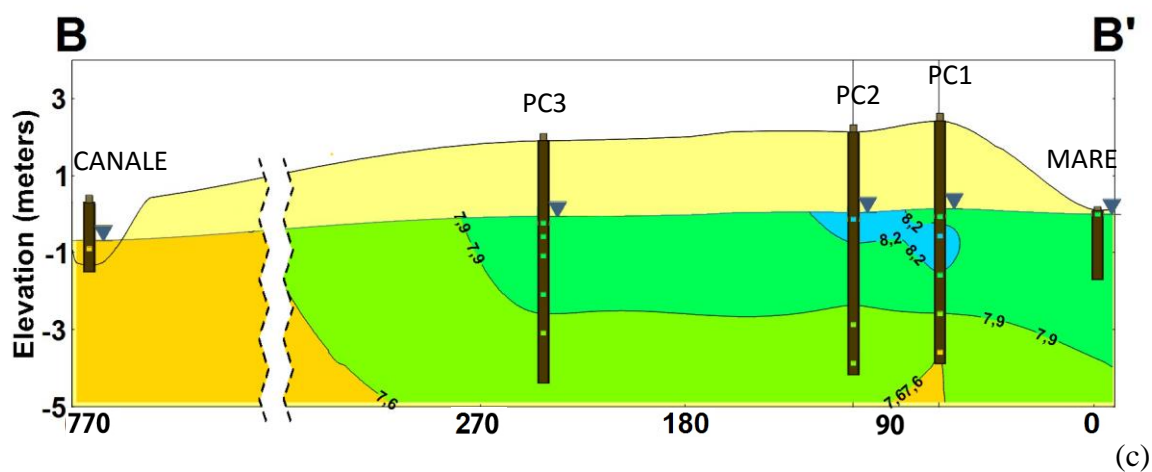
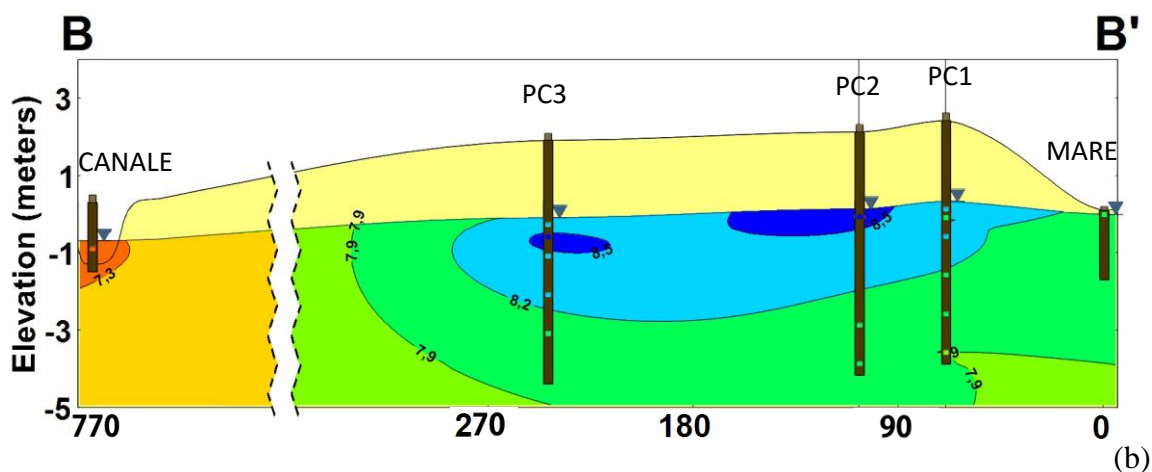
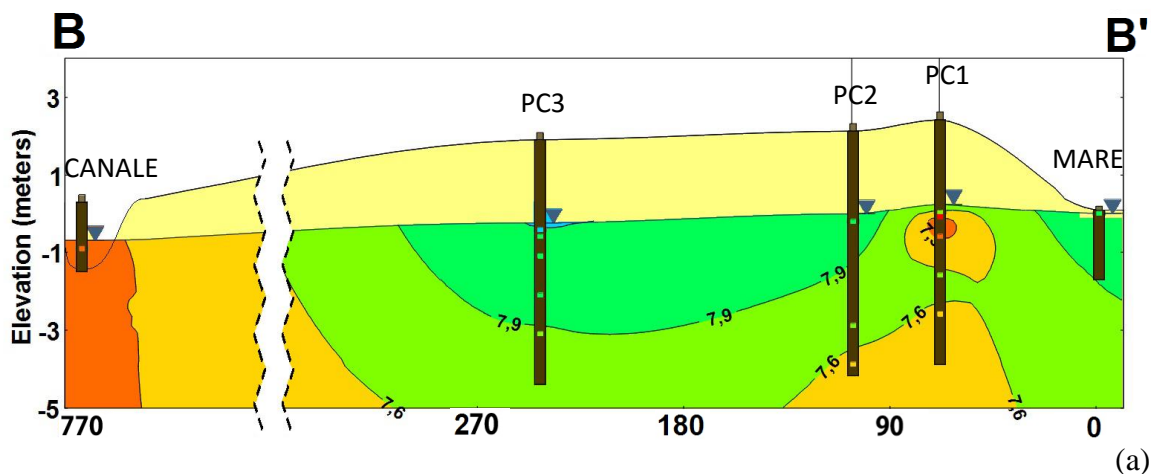


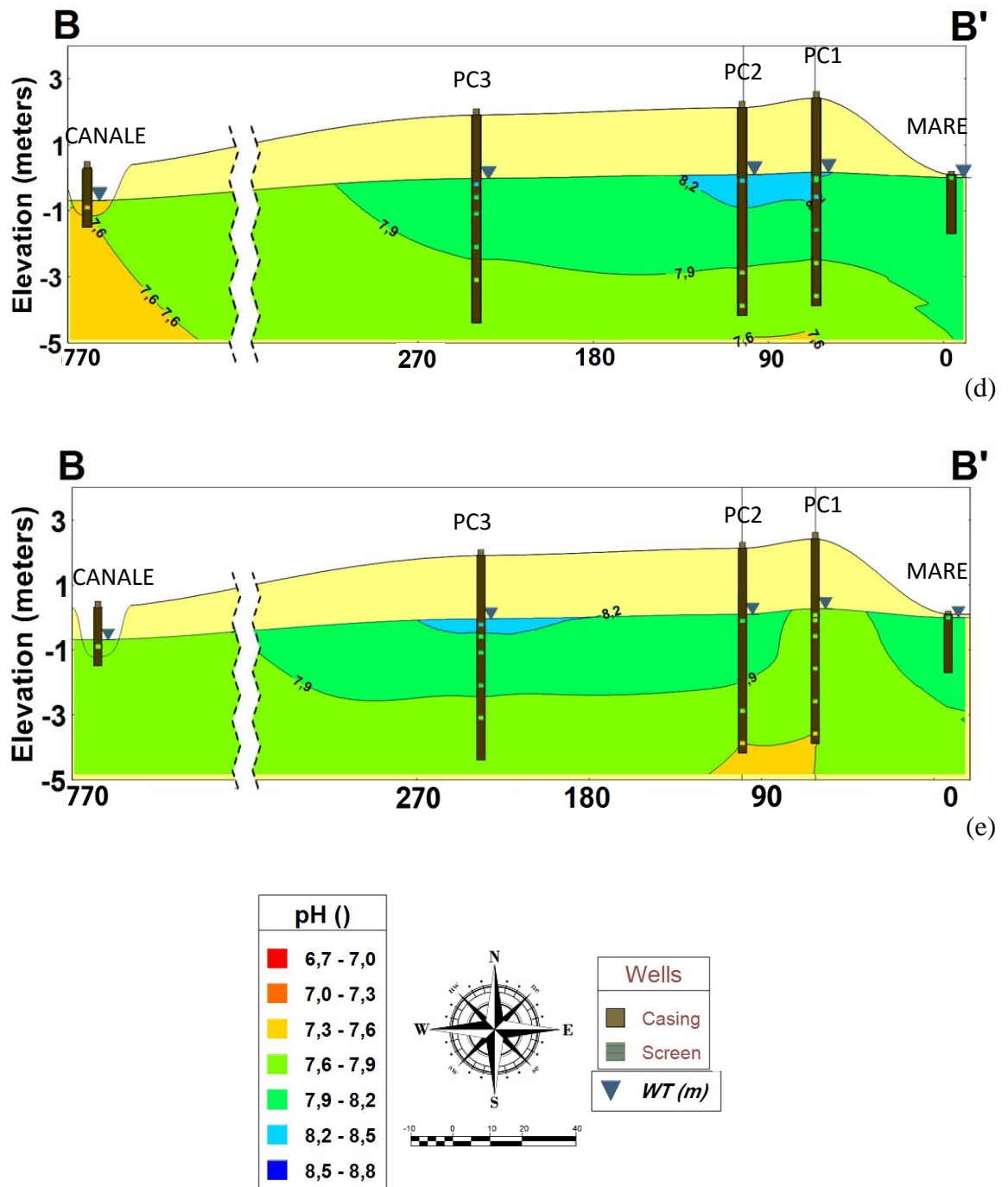
Wells	
■	Casing
■	Screen
▼	WT (m)

Fig. 4.5 – Evoluzione mensile del pH lungo il transetto A-A'.  
 (a) Settembre; (b) Ottobre; (c) Novembre; (d) Dicembre; (e) Gennaio

Per adattare al software le condizioni al contorno sono state assegnate al mare la quota di 0 m.l.m.m. e al canale -0,7 m.l.m.m.

Nelle rappresentazioni del transetto B-B' a causa della notevole distanza tra il canale di drenaggio e il PdM più interno si sono interposte delle linee d'interruzione grafiche per facilitare la lettura.



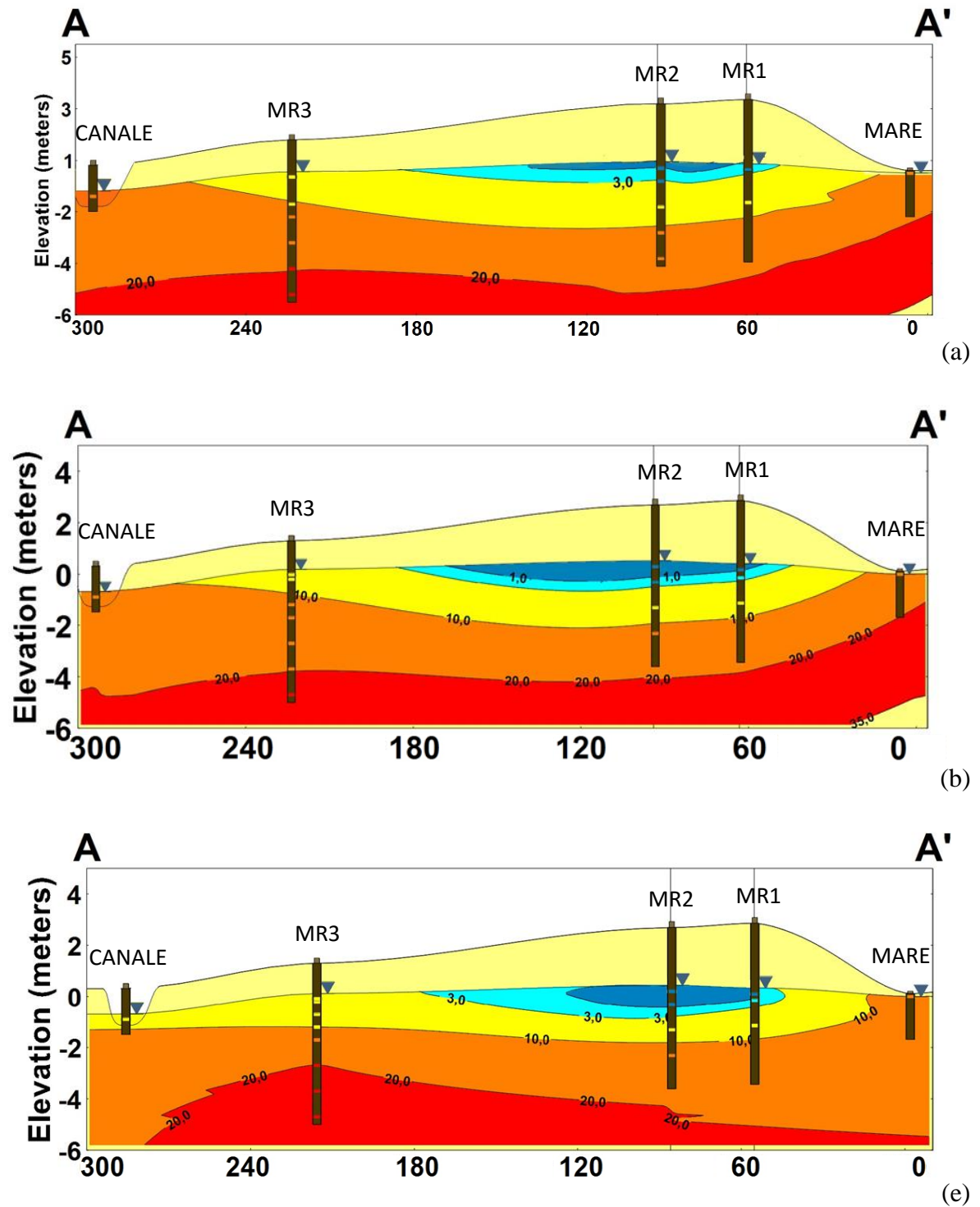


**Fig. 4.6 – Evoluzione mensile del pH lungo il transetto B-B'.**  
 (a) Settembre; (b) Ottobre; (c) Novembre; (d) Dicembre; (e) Gennaio

Il pH medio assoluto equivale a 7,8. Il valore più basso 6,8 si riscontra a Novembre nel PdM MR3 minifiltro 4 a una quota di -1 m.l.m.m; mentre il più alto è 8,6 è stato trovato a Ottobre nel punto PC3 minifiltro 4 a -0,4 m.l.m.m.

## 4.2.2 Salinità

Data l'importanza del parametro all'interno del contesto qualitativo e ai fini di delineare con precisione le profondità degli strati salati, in parallelo alle riproduzioni grafiche, sono stati anche sviluppati grafici di salinità in funzione della profondità. I primi permettono infatti una comprensione generale e immediata lungo il transetto, i secondi invece una descrizione specifica ed esatta del profilo lungo la profondità.



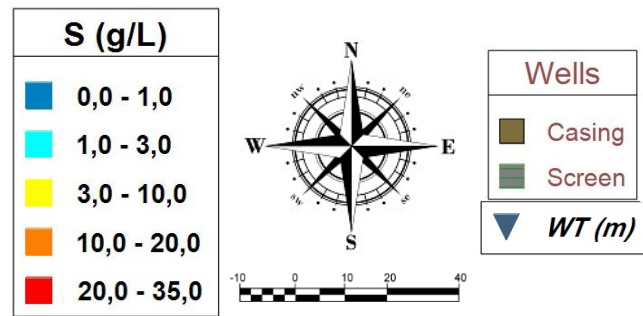
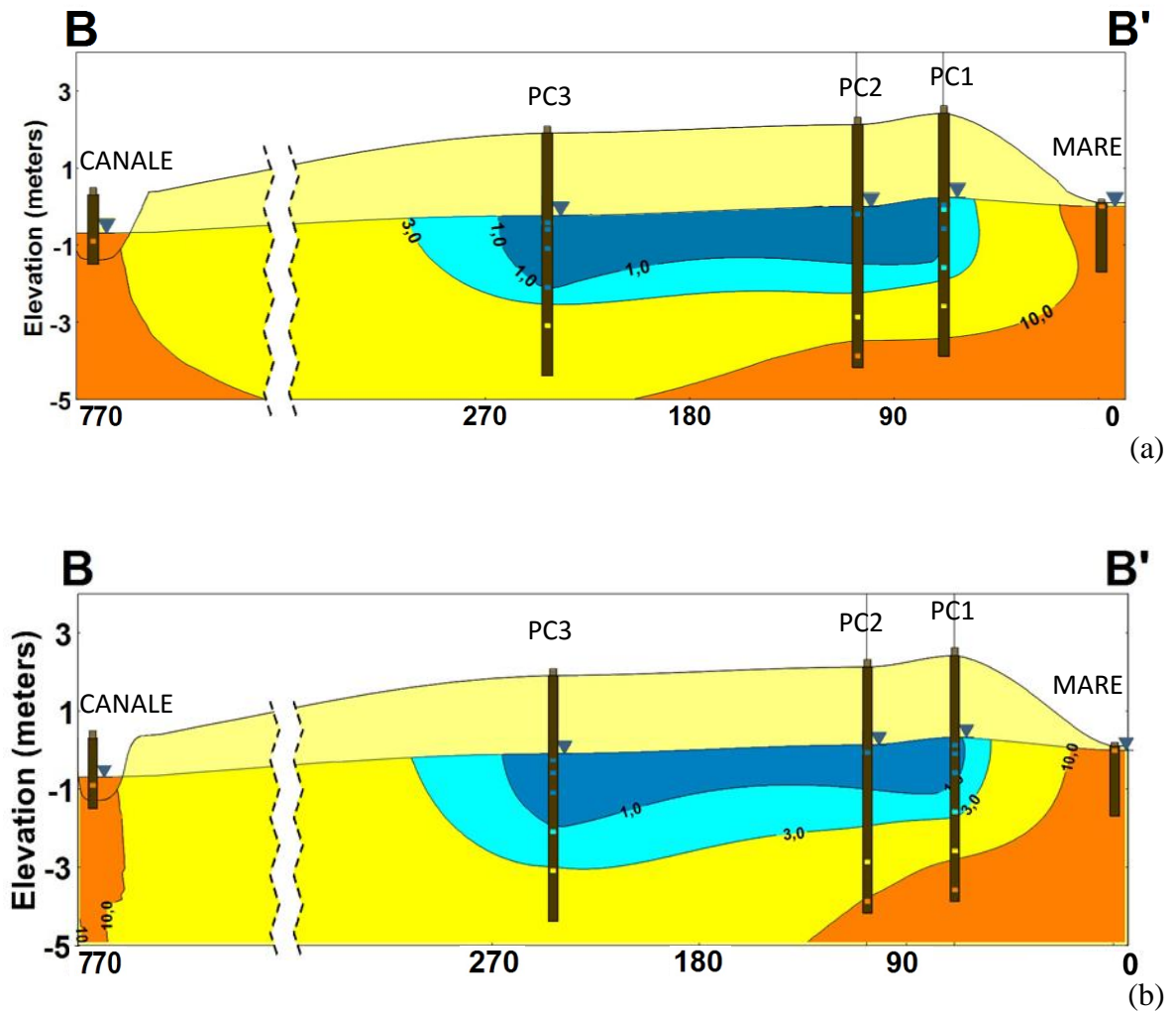
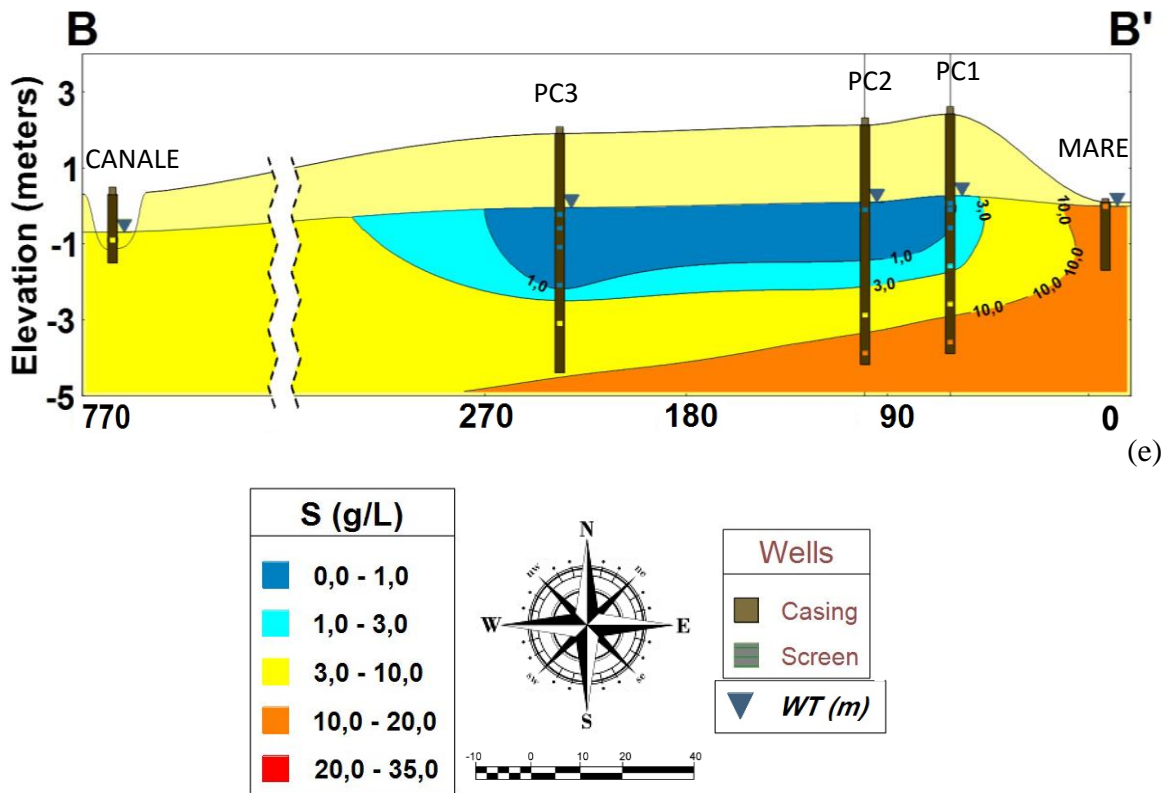


Fig. 4.7 – Evoluzione mensile della salinità lungo il transetto A-A'. (a) Settembre; (b) Ottobre; (c) Gennaio

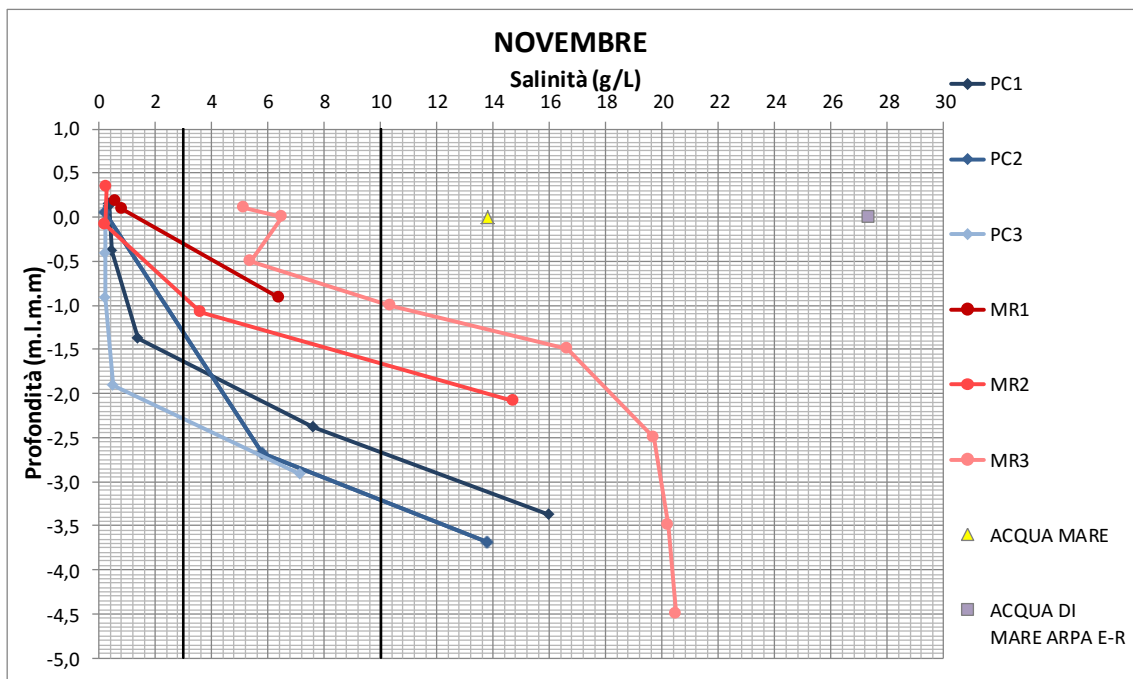
Sono stati omessi i mesi Novembre e Dicembre perché simili ai corrispettivi precedenti (consultabili in Appendice E).





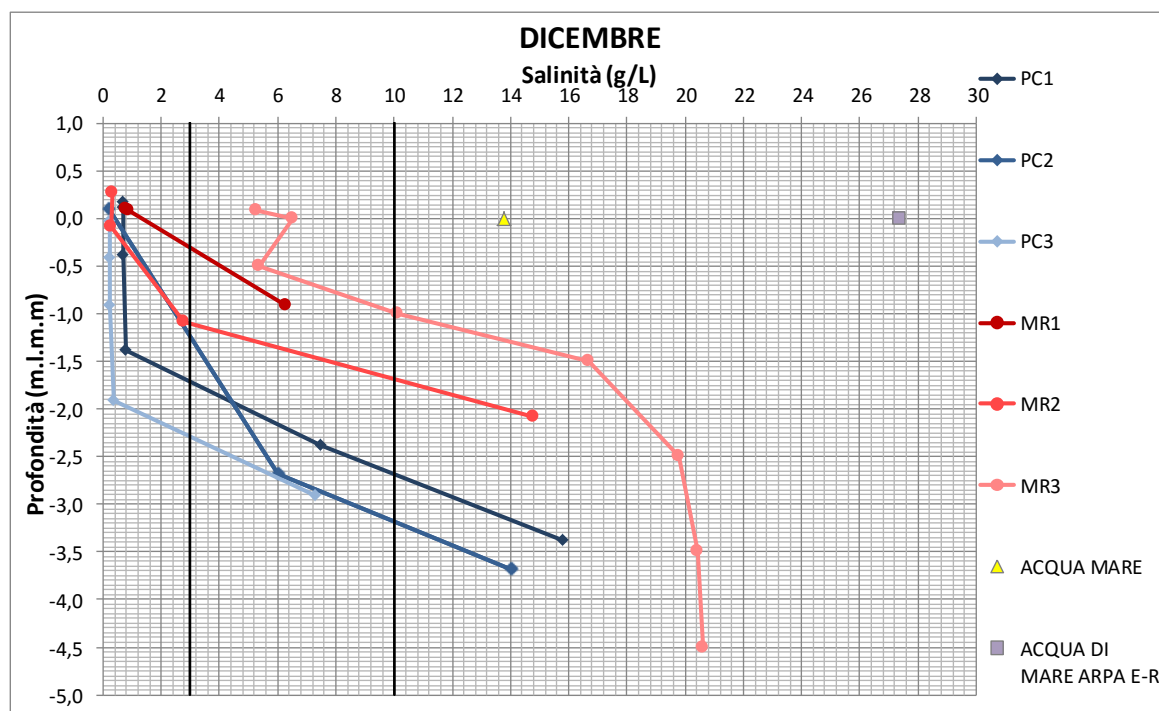
**Fig. 4.8 – Evoluzione mensile della salinità lungo il transetto B-B'. (a) Settembre; (b) Ottobre; (e) Gennaio**

Il valore di salinità media per il transetto A-A' è di 8,7 g/L con un massimo rilevato a Dicembre dal minifiltro 8 nel punto MR3 di 20,6 g/L. Per il transetto B-B' la salinità media è di 3,8 g/L con un massimo toccato a Ottobre dal minifiltro 8 nel punto PC1 di 16,3 g/L. Il campione di acqua marina è 13,8 g/L



**Fig. 4.9 – Profilo della salinità lungo la profondità, mese di Novembre.**





**Fig. 4.10 – Profilo della salinità lungo la profondità, mese di Dicembre.**

Tramite la costruzione dei grafici è stato possibile classificare le acque in base alla salinità. Si definiscono acque dolci, le acque con salinità inferiore a 3 g/L, salmastre quelle che presentano valori tra 3g/L e 10g/L e salate le restanti. Attraverso un'interpolazione si sono allora determinate le profondità corrispondenti a questi intervalli (delineati nel grafico dai due tratti neri verticali) (vedi appendice F per i restanti mesi).

**Tab. 4.4 – Profondità alle quali possiamo trovare acqua salmastra e salata, divise per PdM e mese**

		Profondità (m.l.m.m)					
		PC1	PC2	PC3	MR1	MR2	MR3
<b>settembre</b>	salmastra	-1,7	-1,6	-2,4	-0,3	-0,7	0,1 (top)
	salata	n.d.	-3,3	n.d.	n.d.	-1,7	-1,1
<b>ottobre</b>	salmastra	-1,5	-1,2	-2,8	-0,3	-0,5	0,2 (top)
	salata	-2,6	-3,6	n.d.	-1,6	-1,5	-0,6
<b>novembre</b>	salmastra	-1,7	-1,3	-2,3	-0,3	-0,9	0,1 (top)
	salata	-2,5	-3,0	n.d.	n.d.	-1,7	-0,75
<b>dicembre</b>	salmastra	-1,7	-1,2	-2,3	-0,3	-1,1	0,1 (top)
	salata	-2,7	-3,2	n.d.	n.d.	-1,7	-1,0
<b>gennaio</b>	salmastra	-1,5	-1,3	-2,3	-0,2	-0,8	0,1 (top)
	salata	-2,7	-3,2	n.d.	n.d.	-1,6	-1,0

Quando non viene raggiunto il valore o quando per problemi tecnici (come l'otturazione del minifiltro) non si è potuto disporre del dato, è stato inserito l'acronimo n.d.

È importante evidenziare come nella postazione MR3, si incontra acqua salmastra a partire dalla superficie freatica (top di falda).

Sottraendo i dati di profondità dell'interfaccia salmastra alle quote della superficie freatica si ottengono gli spessori di acqua dolce.

**Tab. 4.5 – Altezza degli strati d'acqua dolce superficiali per ogni PdM e mese**

Spessore Acqua Dolce (m)						
	PC1	PC2	PC3	MR1	MR2	MR3
<b>settembre</b>	1,9	1,6	2,2	0,7	1,2	0,0
<b>ottobre</b>	1,8	1,3	2,7	0,7	1,0	0,0
<b>novembre</b>	1,8	1,3	2,2	0,5	1,2	0,0
<b>dicembre</b>	1,9	1,3	2,3	0,4	1,4	0,0
<b>gennaio</b>	1,8	1,4	2,3	0,5	1,2	0,0

### 4.3 ANALISI GEOCHIMICA

L'analisi dei parametri geochimici vede un trattamento diversificato su tre tipologie. La prima dove vengono mostrati i dati di concentrazione delle varie specie chimiche, elaborati statisticamente tramite GCDkit e rappresentati in grafici per comprenderne la provenienza. La seconda dove si studiano le specie interessate nei processi di decomposizione della materia organica. La terza dove vengono classificate le acque tramite il Watertype (Stuyfzand, 1993, 2006).

#### 4.3.1 Elaborazione statistica

Verranno qui elencate (Tab. 4.6) i parametri statistici calcolati delle specie ioniche analizzate. Per la visualizzazione dell'intero dataset delle concentrazioni è possibile consultare l'Appendice H.

**Tab. 4.6 – Parametri statistici relativi al dataset di concentrazioni**

parametro (mg/L)	n° oss.	max	min	media	dev. st.	10° perc	25° perc	50° perc	75° perc	90° perc
NH <sup>4+</sup>	25	7,50	0,00	1,41	1,88	0,06	0,13	0,70	2,00	3,30
Fe <sup>2+</sup>	30	5,80	0,00	0,80	1,53	0,00	0,07	0,16	0,38	2,70
Fe tot.	30	10,30	0,01	1,12	2,25	0,03	0,05	0,23	0,65	3,42
Ca <sup>2+</sup>	30	385,60	24,95	177,09	131,97	38,31	46,15	137,51	302,34	367,70
Mg <sup>2+</sup>	30	1035,58	13,31	333,47	337,99	21,63	27,90	268,84	634,58	811,78
K <sup>+</sup>	30	291,17	10,41	114,30	98,80	11,76	20,78	94,19	186,22	260,22
Na <sup>+</sup>	30	7601,91	22,77	2544,20	2601,97	35,31	123,38	1817,63	4897,50	6165,60
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	30	500,40	189,10	309,38	75,90	236,78	263,93	289,85	332,55	406,98
F <sup>-</sup>	24	3,57	0,04	0,74	0,85	0,21	0,26	0,38	0,94	1,57
Cl <sup>-</sup>	30	15491,39	29,57	5261,45	5375,43	50,50	236,33	4434,96	9866,11	12943,93
Br <sup>-</sup>	27	49,12	0,09	17,70	16,57	0,25	1,47	14,73	31,04	41,82
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	27	52,01	0,18	8,12	11,83	0,29	1,16	2,94	9,40	22,87
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	30	1939,20	19,24	708,09	702,50	32,11	55,63	536,31	1371,41	1872,17

Per valutare l'affidabilità dell'analisi e la bontà del dato è stato calcolato il bilancio ionico (vedi Appendice I).

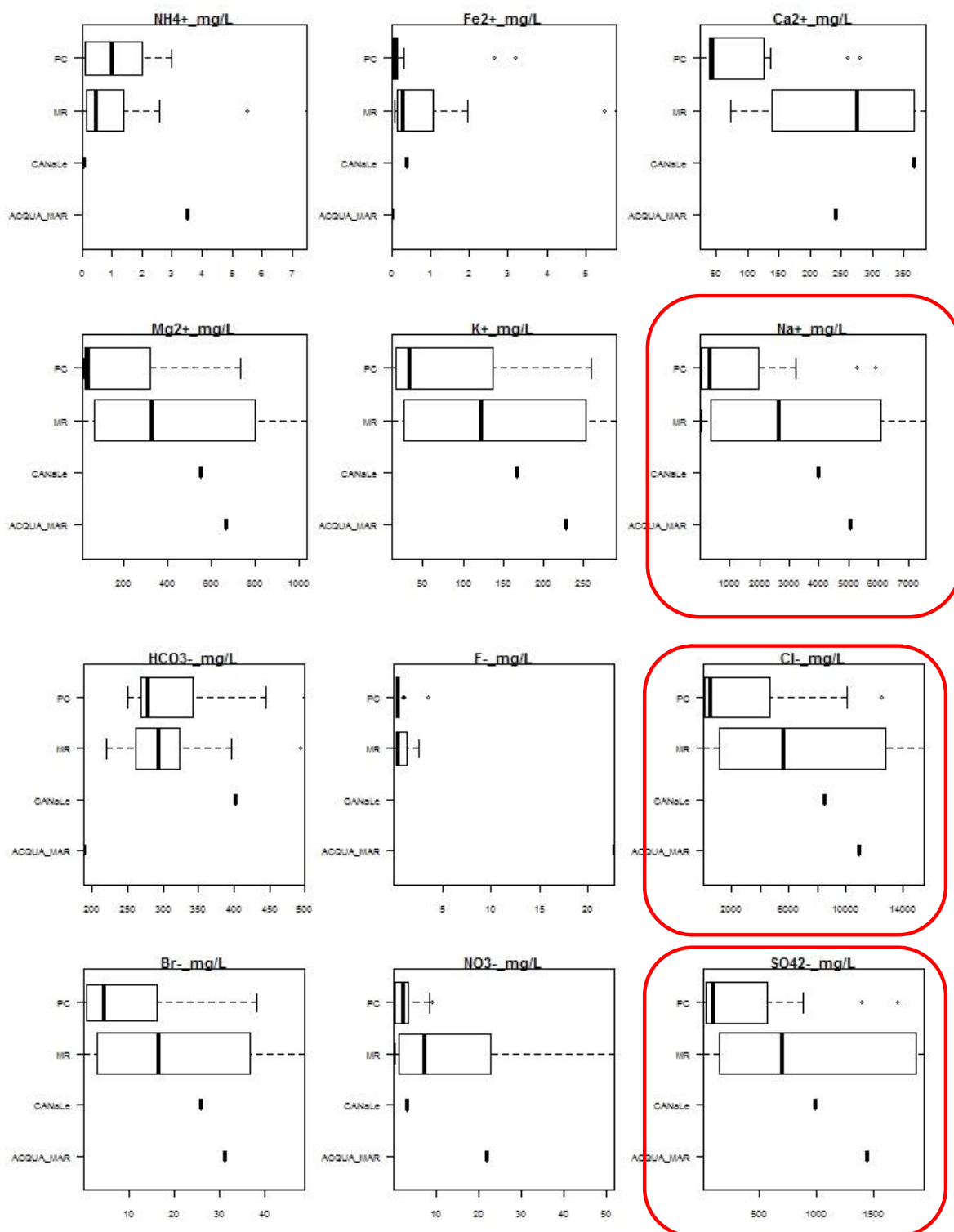
Il bilancio ionico si definisce come:

$$B. I. = 100 \frac{\sum[\text{cationi}] - \sum[\text{anioni}]}{\sum[\text{cationi}] + \sum[\text{anioni}]}$$

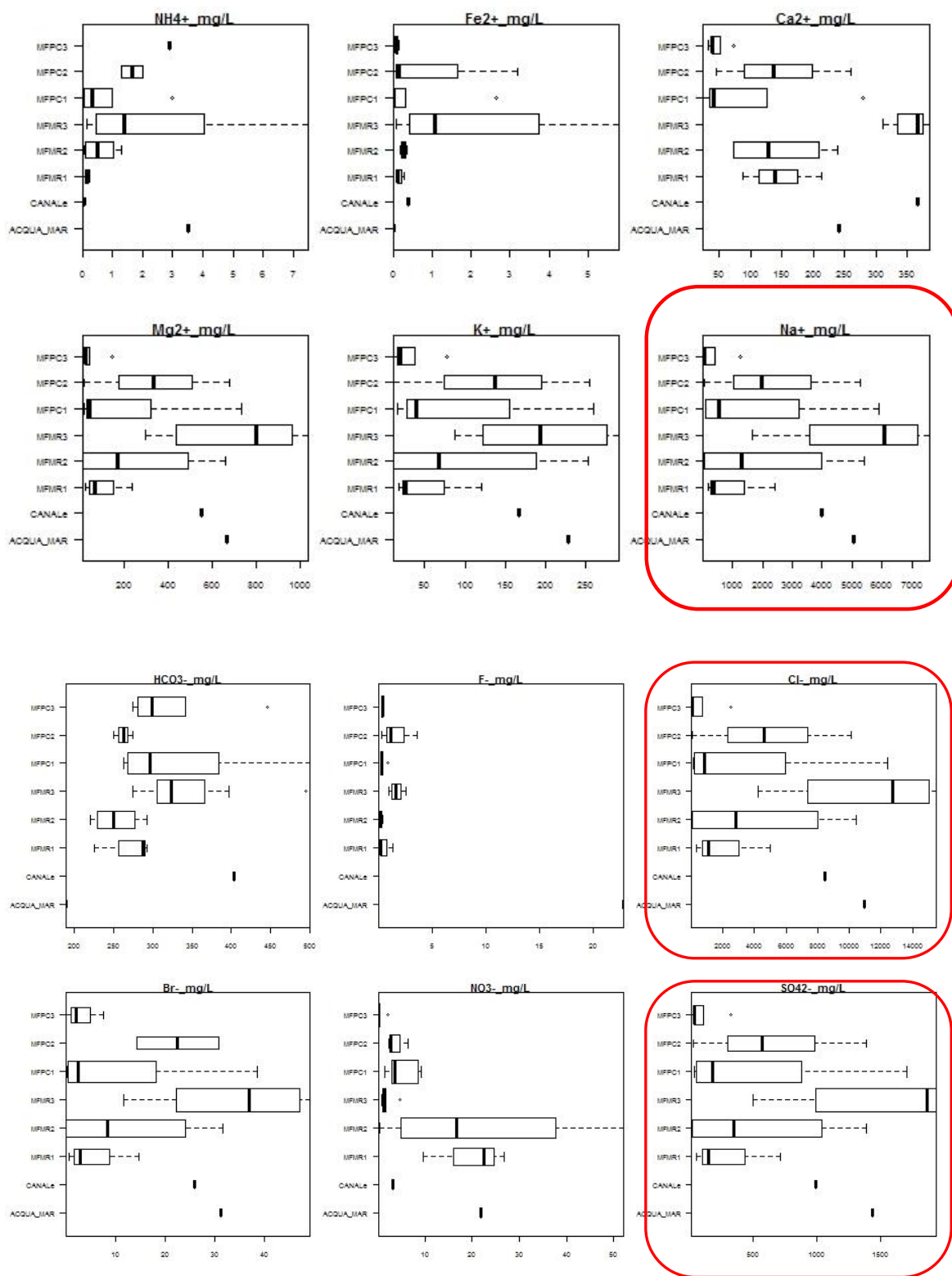
dove la concentrazione degli ioni è espressa in meq/L

Il valore viene ritenuto accettabile se non oltrepassa la soglia limite del  $\pm 10\%$ .

Nel caso in questione una osservazione è stata rilevata oltre tale soglia (minifiltro 6 di PC3) con una percentuale di  $-10,4\%$ . La media si attesta a  $-5,8\%$ , la mediana  $-6,5\%$  e la deviazione standard a  $2,9\%$ . Per l'elaborazione statistica verranno presentate le distribuzioni delle varie specie suddivise per località e per punto di campionamento.



**Fig. 4.11 – Multiboxplot suddivisi per località, evidenziate in rosso le specie che presentano similarità nella distribuzione**



**Fig. 4.12 – Multiboxplot suddivisi per PdM, evidenziate in rosso le specie che presentano similarità nella distribuzione**

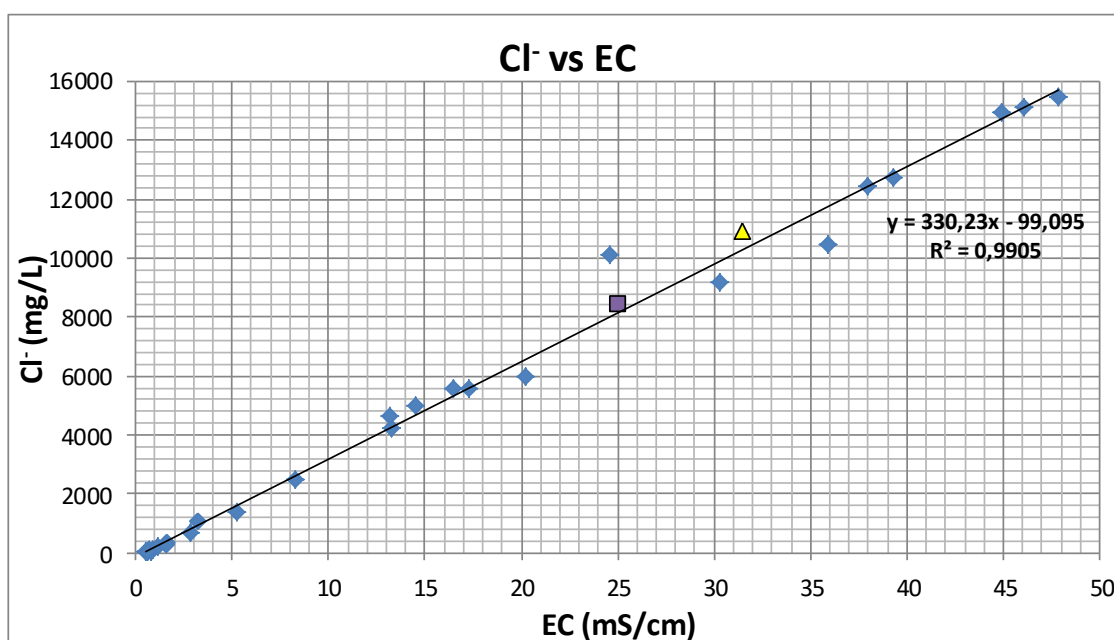
Tra i cationi analizzati il più presente risulta essere il sodio con una media di 2544,2 ppm. Sette campioni su 30 mostrano concentrazioni superiori all'acqua di mare campionata e 4 di questi 7 appartengono al punto MR3. Il meno presente invece è il ferro ferroso con una

concentrazione media di 0,8 ppm, si trova infatti in quantità significative solo negli strati più profondi di MR3, PC1 e PC2.

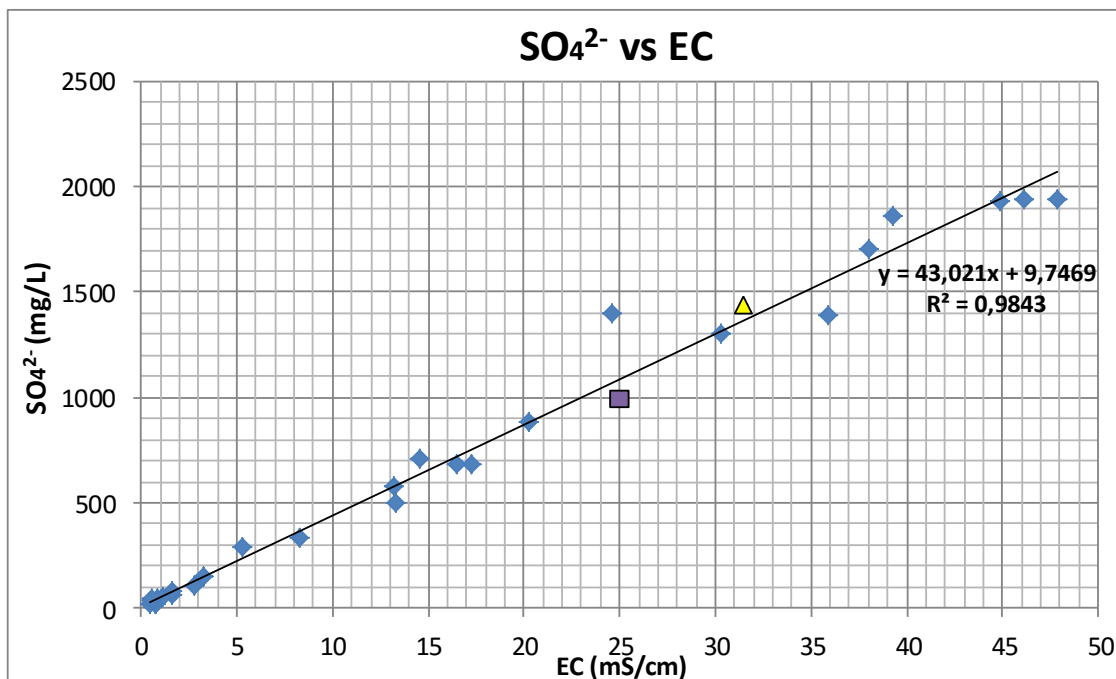
Tra gli anioni prevale nettamente il cloro con 5261,45 ppm di media e 5 valori superiori all'acqua di mare. Di questi 4 sono nel PdM MR3 e uno in PC1. Al contrario il meno comune è lo ione fluoro, con una media di 0,74 ppm. Il massimo lo si riscontra in PC2 con 3,57 ppm, (l'acqua di mare si aggira sui 22,77 ppm).

Data la grande somiglianza venutasi a creare tra alcuni boxplot, distribuzioni simili in postazioni differenti (vedi  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{Na}^+$  in rosso in Fig. 4.12), ci si è spinti verso un'indagine più accurata dell'origine degli ioni.

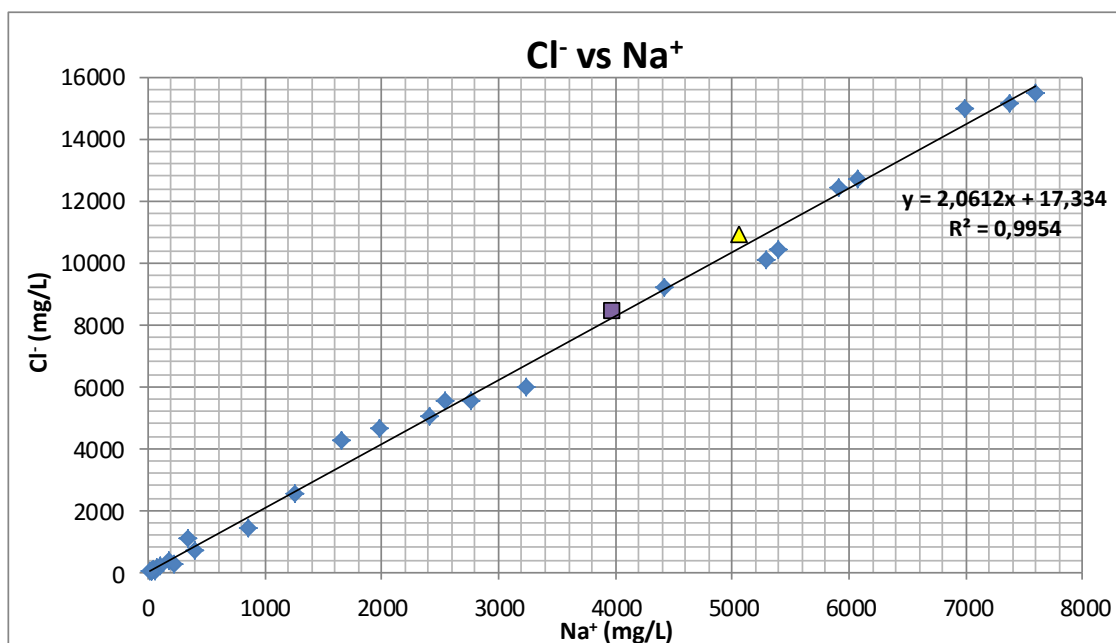
Per comprendere appieno tale provenienza sono stati tracciati dei grafici rappresentanti i parametri riscontrati in funzione della conducibilità elettrica. Ne sono qui di seguito restituiti alcuni, i più significativi, i restanti sono disponibili in Appendice L.



**Fig. 4.13 –Grafico a dispersione corredato di linea di tendenza ed equazione dello ione cloruro in funzione della conducibilità**



**Fig. 4.14 – Grafico a dispersione corredato di linea di tendenza ed equazione del solfato in funzione della conducibilità**

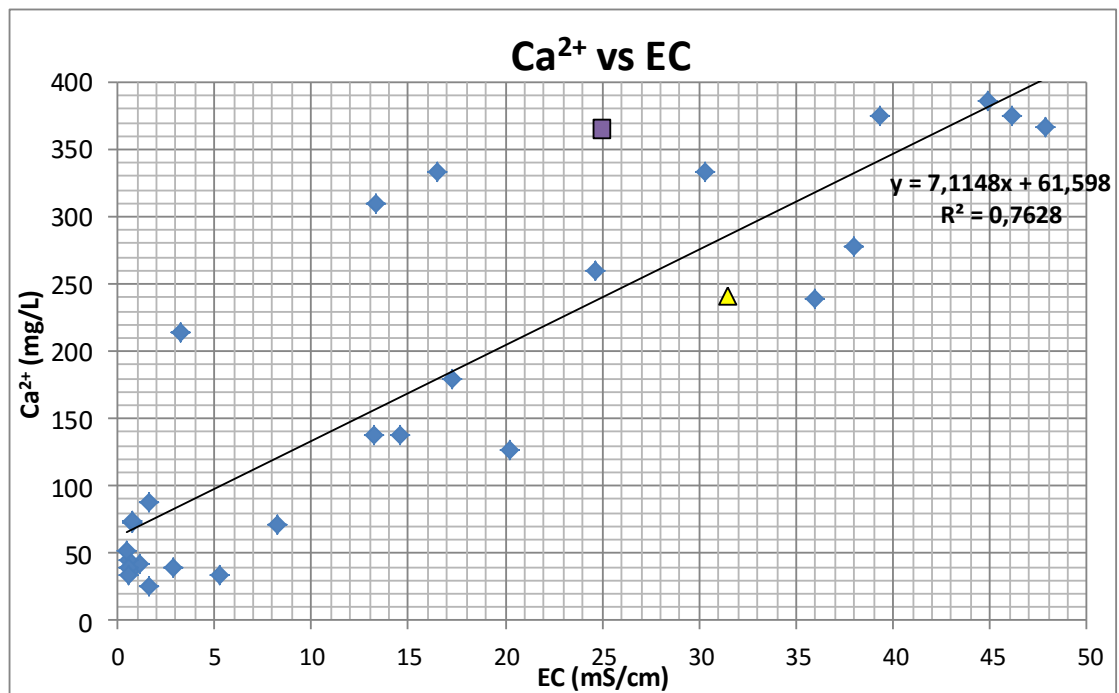


**Fig. 4.15 – Grafico a dispersione corredato di linea di tendenza ed equazione del cloro in funzione del sodio.**

I rombi azzurri rappresentano le osservazioni dei campioni, il triangolino giallo l'acqua di mare e il quadratino viola l'aliquota del canale.

Risulta evidente dal valore di  $R^2$  prossimo a 1, come queste specie (comprese  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ ) siano correlate tra loro e con la salinità. Le restanti,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{HCO}_3^-$ , non mostrano invece alcuna connessione con i precedenti.

Caso a se stante è dato invece dal calcio il quale dimostra un comportamento intermedio tra i due gruppi, con un  $R^2$  di 0,76.



**Fig. 4.16 – Grafico a dispersione corredato di linea di tendenza ed equazione dello ione calcio in funzione della conducibilità**



### 4.3.2 Decomposizione della materia organica

L'accumulo di materia organica negli strati profondi del sottosuolo può implicare una serie di reazioni di degradazione anaerobica (in assenza cioè di  $O_2$ ) con utilizzo di diversi agenti ossidanti: in ordine di priorità  $NO_3^-$ ,  $MnO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $SO_4$  e  $CH_4$  (Champ et al., 1979; Chapelle, 2000).

In particolare, nei minifiltri più profondi del pozzo MR3 sono state rilevate le più alte concentrazioni dello ione ammonio il quale si forma dal processo di ammonificazione che consiste nella decomposizione anaerobica microbica dei substrati organici con il rilascio di  $NH_3$ .

Inoltre, è probabile che avvengano anche fenomeni di decomposizione delle proteine del materiale organico ad opera di ossidi ed idrossidi di ferro. Queste reazioni sono poi responsabili della liberazione di ioni  $Fe^{2+}$  in soluzione (determinati nelle concentrazioni più elevate proprio nei minifiltri sopraccitati). Anche i valori di pH che mostrano un'acidità maggiore potrebbero indicare un succedersi di reazioni di decomposizione nella zona.

Sono stati quindi tracciati dei grafici per ogni PdM per comprendere l'avanzamento di tali reazioni (vedi Appendice N per il set completo).

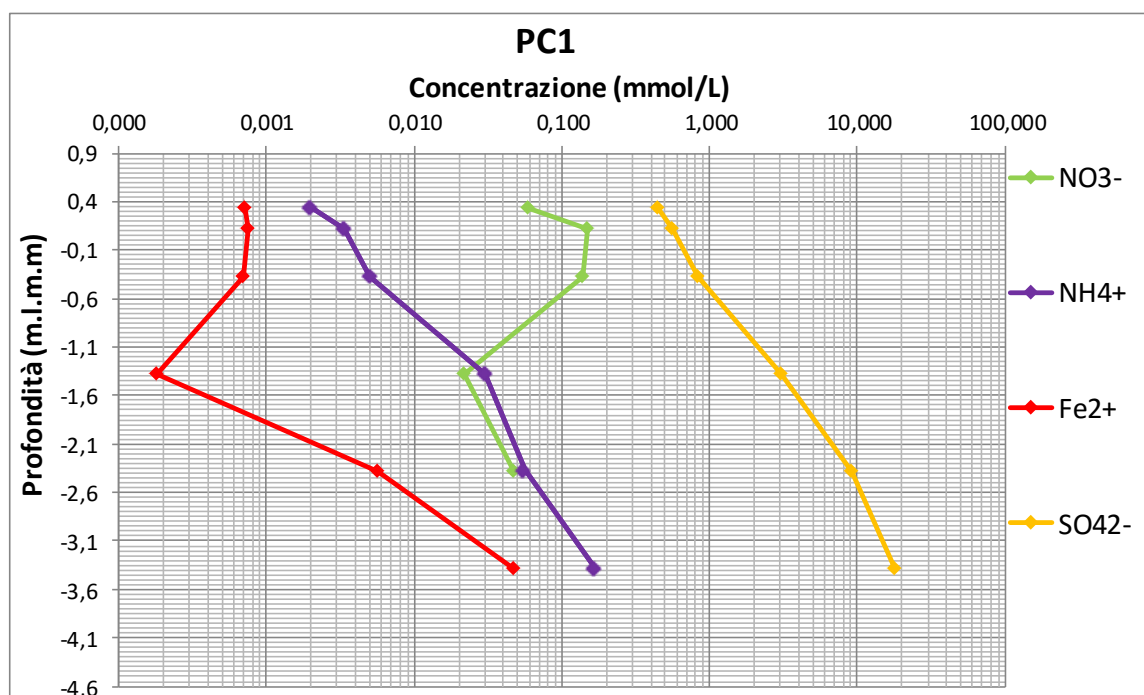


Fig. 4.17 – Grafico delle specie che prendono parte alla decomposizione organica, PdM PC1

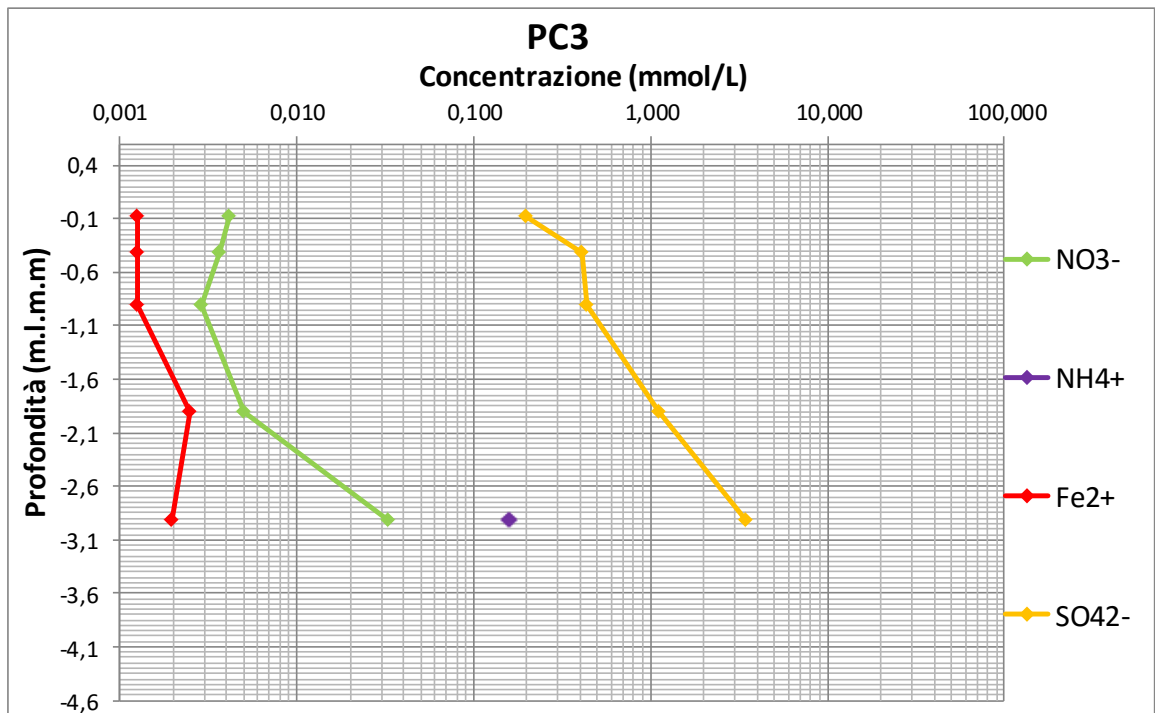


Fig. 4.18 – Grafico delle specie che prendono parte alla decomposizione organica, PdM PC3

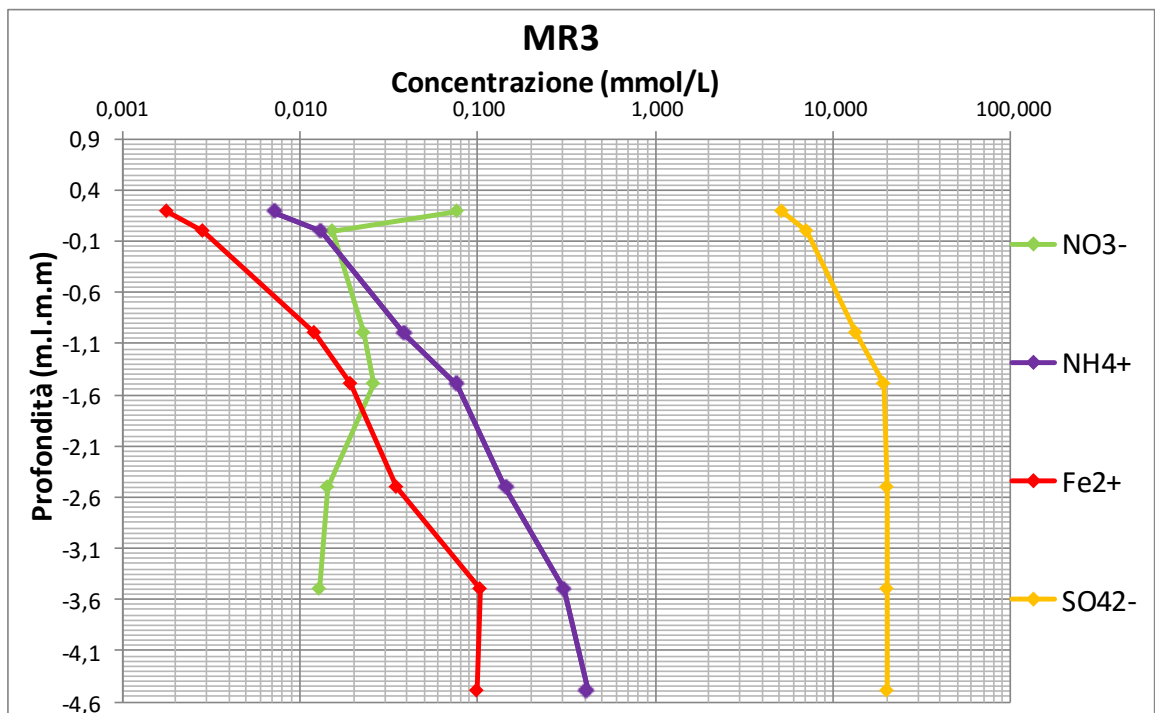


Fig. 4.19 – Grafico delle specie che prendono parte alla decomposizione organica, PdM MR3

### 4.3.3 Tipologia di acqua (secondo Stuyfzand, 1993)

I differenti campioni di acque sono stati classificati da un punto di vista idrochimico sulla base del loro contenuto in cloro, della loro alcalinità, dei principali anioni e cationi e dell'indice BEX (Stuyfzand, 1993, 2006; Vandebøhede e Lebbe, 2011).

La classificazione permette di associare ad ogni campione raccolto un codice alfanumerico (esempio "b3NaCl+") che rappresenta in ordine:

- la prima lettera gli intervalli di concentrazione del cloro (Tab. 4.7);
- il numero seguente indica il grado di alcalinità (Tab. 4.8);
- l'abbreviazione che segue indica la sigla del catione dominante;
- segue l'anione dominante
- infine, il simbolo "+", "-" o "0" rappresentano il valore dell'indice BEX (Tab. 4.9)

Nel caso in cui non vi sia una netta prevalenza di un elemento sugli altri, apparirà la sigla "Mix" che significa, appunto, che nel campione nessun catione o anione prevale sugli altri (Pifferi et. al., 2014).

L'indice BEX (rappresentato nel codice dai simboli "+", "-" o "0") indica se è in atto un trend rispettivamente di addolcimento (freshening) o di salinizzazione (salinization) del campione in esame (Stuyfzand 1993, Vandebøhede, 2011), in più ci restituisce anche il valore assoluto delle reazioni di scambio delle basi ed eventuali reazioni della  $\text{CaCO}_3$ .

**Tab. 4.7 – Soglie di classificazione dei diversi tipi di acque sulla base delle concentrazioni  $\text{Cl}^-$  (Stuyfzand, 1993)**

<b>Tipologie di acque basate sulla concentrazione di cloro (prima lettera del codice)</b>		
<b>Lettera</b>	<b>Significato</b>	<b>Concentrazione <math>\text{Cl}^-</math> (mg/L)</b>
G	Oligoaline	0-5
g	Oligoaline – dolci	5-30
F	Dolce	30-150
f	Dolci –salmastre	150-300
B	Salmastre	300-1000
b	Salmastre – salate	1000-10000
S	Salate	10000-20000
H	Iperaline	>20000

**Tab. 4.8 – Soglie di classificazione dei diversi tipi di acque sulla base delle concentrazioni di  $\text{HCO}_3^-$  (Stuyfzand, 1993)**

<b>Tipologie di acque basate sull'alcalinità (primo numero del codice)</b>		
<b>Numero</b>	<b>Significato</b>	<b>Alcalinità espressa come concentrazione di <math>\text{HCO}_3^-</math> in mg/L</b>
*	Molto bassa	>31
0	Bassa	31-61
1	Moderatamente bassa	61-122
2	Moderata	122-244
3	Moderatamente alta	244-488
4	Alta	488-976
5	Molto alta	976-1953
6	Piuttosto estrema	1953-3905
7	Estrema	>3905

**Tab. 4.9 – Soglie di classificazione dei diversi tipi di acque sulla base dell'indice BEX (Stuyfzand, 1993)**

<b>Tipologie di acque basate sull'indice BEX (simbolo nel codice)</b>			
<b>Simbolo</b>	<b>Significato</b>	<b>Solo processi di scambio tra le basi</b>	<b>Altri processi rilevati in acquifero</b>
-	Negativo	Salinizzazione	Deficit di cationi marini
0	Zero	No scambio di basi	Equilibrio tra i cationi marini
+	Positivo	Addolcimento	Eccesso di cationi marini

Questa classificazione di Stuyfzand (1988) è molto conosciuta in ambito costiero per la distinzione delle diverse tipologie di acque e per una valutazione rapida dei processi geochimici che avvengono in acquifero. Utilizzando le diverse tipologie di acque sono stati identificati i principali idrosomi e le facies idrochimiche.

Come definito da Stuyfzand (1999), l'idrosoma è una unità tridimensionale di acqua sotterranea avente una specifica origine. All'interno dello stesso idrosoma la composizione chimica delle acque varia in funzione del tempo e dello spazio a causa della ricarica, dei flussi sotterranei e a causa delle reazioni chimiche che avvengono tra acqua e mezzo poroso.

Sono riportate nella tabella che segue i *water type code* rilevati.

Tab. 4.10 – Tipi di acque rilevate (hydrofecies)

PdM	filtro	Water Type BEX	Water Type Code
PC1	top	+	F3MgMix+
	4	+	f3NaCl+
	5	+	f3NaMix+
	6		b4NaCl
	7		b3NaCl
	8		S3NaCl
PC2	top	+	F3CaHCO3+
	7		b3NaCl
	8	o	S3NaClo
PC3	top	+	g3CaHCO3+
	4	+	F3MgHCO3+
	5	+	F3MgHCO3+
	6		B3NaCl
	7		b3NaCl
MR1	top		B3NaCl
	5	-	b2CaCl-
	6		b3NaCl
MR2	top	+	F2CaHCO3+
	5	+	F3CaHCO3+
	6		b3NaCl
	7		S2NaCl
MR3	top		b4NaCl
	2	-	b3NaCl-
	4		b3NaCl
	5		S3NaCl
	6		S3NaCl
	7		S3NaCl
	8		S3NaCl
CANALE		o	b3NaClo
MARE			S2NaCl

Si identificano 13 *hydrofecies* differenti, di cui 9 nel transetto in località di Porto Corsini e 7 a Marina Romea.

Su 28 osservazioni 20 hanno una presenza dominante di NaCl di cui 8 nei PdM PC e 12 nei PdM MR. Tutti i campioni estratti dal pozzo MR3 presentano tale dominanza.

Solo 8 campioni si rivelano dolci, mentre 19 vengono rappresentate come salmastre o salate.

Una sola campione si classifica oligo alina: PC3-Top.

Per quanto riguarda l'indice BEX si riscontrano 9 campioni in fase di addolcimento, 2 in fase di salinizzazione (MR1-5 e MR3-2) e uno in fase di equilibrio.

Per comparare in maniera immediata i due siti sono state rappresentate le sezioni dei due transetti. Per rendere leggibili le raffigurazioni si sono unite le 13 classi di tipi d'acqua in 4 gruppi secondo un criterio di similitudine di ioni dominanti e salinità, per poi colorarle in 4 varianti.

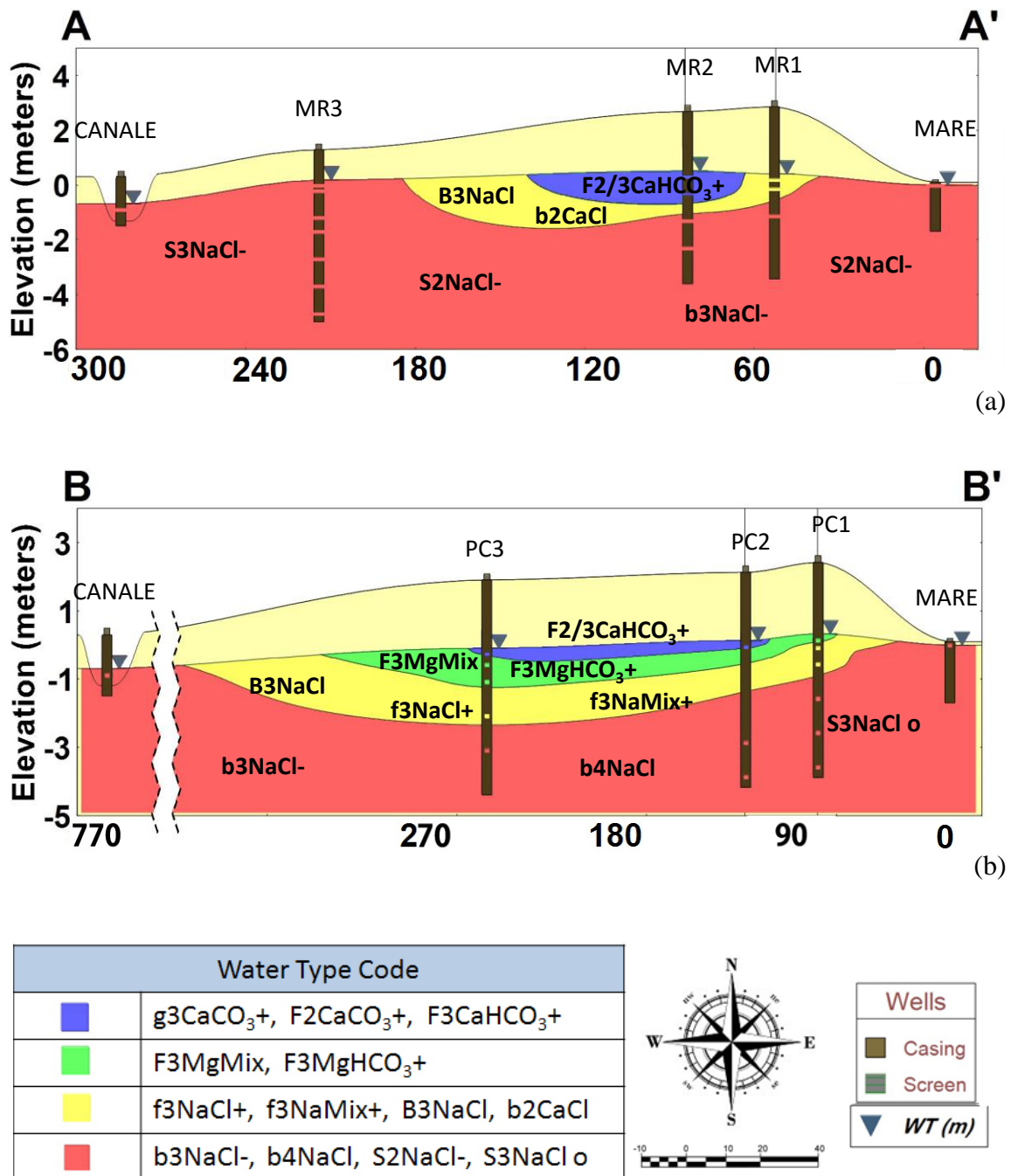


Fig. 4.20 – Disposizione delle hydrofacies lungo il transetto A-A' località Marina Romea (a) e lungo il transetto B-B' località Porto Corsini (b)

---

## 5 DISCUSSIONI

In questo capitolo verranno presentate le discussioni con lo scopo di interpretare i risultati da vari punti di vista, rispetto alla profondità, all'ubicazione e alla dinamicità mensile, offrendo così spunti di riflessione utili alla comprensione dei fenomeni in atto nell'acquifero.

### 5.1 FREATIMETRIA ED ANDAMENTO STAGIONALE

Vagliando i risultati climatologici sopra elaborati e confrontandoli con la media trentennale di riferimento 1961-1990 CLINO (vedi Bilancio Idroclimatico 2.6), nel periodo preso in considerazione dal seguente studio i valori di temperatura tendono a essere superiori. Secondo il "Climate Normal" la stazione meteorologica di Ravenna Punta Marina dell'Aeronautica Militare registrò una temperatura media per Gennaio di +2,8°C, per Luglio di +23,2 °C e una media delle massime assolute +33,8°C; valori al di sotto rispettivamente di 2,2°C, 4,6°C e 2°C rispetto a quelli qui riscontrati ([http://clima.meteoam.it/AtlanteClimatico/pdf/\(146\)Punta%20Marina.pdf](http://clima.meteoam.it/AtlanteClimatico/pdf/(146)Punta%20Marina.pdf)).

Per quanto concerne i rilievi freaticometrici si possono sviluppare varie osservazioni:

- I valori superiori sono riscontrabili nella sezione di Marina Romea, probabilmente per effetto della topografia e per la distanza dell'idrovora del sistema drenante.
- I punti di campionamento più continentali (PC3 e MR3) e quindi prossimi o all'interno della pineta mostrano livelli freatici inferiori rispetto agli altri dello stesso transetto o addirittura del livello marino, sia per effetto della subsidenza, sia per l'emungimento d'acqua da parte delle piante.
- A seguito di precipitazioni avviene una ricarica dell'acquifero, anche se con un ritardo (che va da qualche giorno a due settimane circa): i minifiltri più prossimi alla linea di riva mostrano una maggiore variabilità e risalite più ripide rispetto ai minifiltri più interni e con tavole d'acqua più profonde. Queste ultime manifestano innalzamenti più lenti e osservabili solo dopo precipitazioni ripetute. Questo evento è spiegabile attraverso l'intercettazione delle precipitazioni da parte delle specie vegetali. Le chiome dei pini infatti trattengono parte delle acque meteoriche, per poi ridurle quantitativamente a seguito di evaporazione e ridistribuendole attuando la caduta diminuendo l'energia cinetica delle gocce. Altra motivazione potrebbe ricercarsi nei flussi interni dell'acquifero. È difatti ipotizzabile un campo vettoriale

con flussi d'acqua che vanno dalle quote maggiori verso il canale, questo porterebbe ad un innalzamento più repentino nei punti alti e uno più lento nelle zone interne.

- I fenomeni piovosi sporadici anche se copiosi mostrano ricadute minori rispetto ai fenomeni meno intensi ma frequenti, per due cause principali. La prima è la per velocità di percolazione, è per l'appunto ipotizzabile in periodi particolarmente caldi che nel tragitto che percorre l'acqua all'interno della zona vadosa parte evapori prima del raggiungimento della falda. La seconda è che se la zona insatura risulta molto asciutta le acque di precipitazione vengano intercettate da questa, senza alimentare l'acquifero e umidificando solamente le frange superiori.
- Nei periodi più caldi la falda risente di più dell'assenza di piogge a causa della forte evaporazione.

## 5.2 PARAMETRI CHIMICO-FISICI

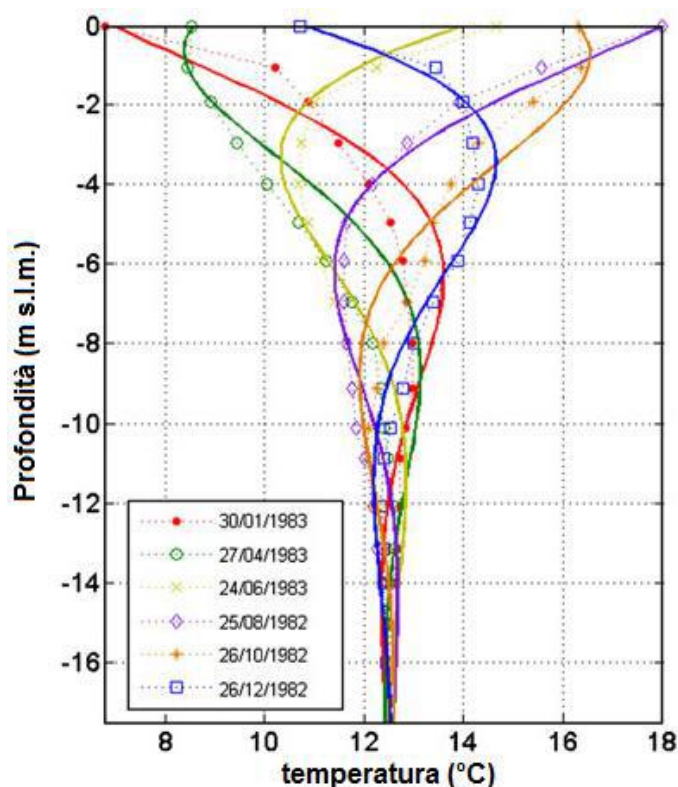
### 5.2.1 Temperatura

Dalla tabella riguardante i parametri chimico-fisici (Fig. 4.3) e dal *box-plot* (Fig. 4.4) è possibile notare come la minima si trovi a quote superiori, mentre la massima a quote più basse. Probabilmente dovuto al fatto che gli strati più superficiali risentono maggiormente delle variazioni stagionali e delle temperature atmosferiche.

Questa teoria è stata postulata già nel 1970 dal ricercatore Parsons nell'articolo "*Groundwater thermal regime in a glacial complex*", dove evince che il suolo a contatto con l'atmosfera subisce per primo l'influenza delle variazioni stagionali e, mano a mano che si scende in profondità, il fenomeno sembra ritardato. Questo perché il passaggio di calore, da uno strato all'altro, presenta delle tempistiche che variano in funzione delle proprietà fisico-chimiche dello stesso materiale roccioso. Pertanto prendendo un profilo invernale e uno estivo, questi generalmente si intercettano una prima e una seconda volta delimitando in questo modo un intervallo con temperature più calde in inverno e più fredde in estate.

Nel grafico, l'intersezione tra i due profili origina un'area che in letteratura viene chiamata "tasca" (Fig. 5.1). Il grafico mostra, inoltre, come i profili cambino vistosamente negli orizzonti superficiali, ma negli strati inferiori ai -10 metri i valori tendono a stabilizzarsi verso una temperatura ben definita, quella corrispondente alla temperatura media annua atmosferica.





**Fig. 5.1 – Profilo di temperatura pubblicato nel 1985 nello studio della temperatura di Taniguchi M (1985) realizzato a Nagaoka, Giappone. Sei profili corrispondenti a sei differenti date dell'anno, ognuno con un colore differente**

## 5.2.2 pH

Le tendenze leggermente basiche sono comuni nelle acque derivanti da mescolamento tra acqua di mare e acqua meteorica (Acosta et. al., 2011), per due motivi principali:

- Le acque meteoriche possono presentare una leggera alcalinità, a seguito di aerosol di origine Sahariana che le arricchirebbero di specie come calcio, sodio e magnesio e a causa di un calo nell'aria di solfati, per la diffusa metanizzazione dei riscaldamenti domestici (Pieri et al., 2012; Ozsoy e Sedam, 2000).
- A seguito di piogge, l'acqua che filtra nel terreno potrebbe dilavare e arricchirsi di specie carbonatiche (es.  $\text{CaCO}_3$ ) o più in generale alcalino, alcalino-terrose ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , etc.) di cui è ricco il materiale di origine marino. Conseguentemente a questa solubilizzazione a idrolisi basica, le acque permeano fino ai primi strati di falda, alzando così il pH (Pulido-Loboeuf et al., 2003) (vedi paragrafo Analisi Geochimica 4.3).

Queste due ipotesi conciliano anche con i dati ottenuti. Si noti infatti come il transetto B-B' posto sulla duna di Porto Corsini (Fig. 4.6) mostri valori inferiori al transetto A-A' (Fig. 4.5). La spiaggia di Porto Corsini presenta un forte avanzamento della linea di costa, il che

---

farebbe pensare a materiale di nuova formazione e quindi una maggiore presenza di specie alcalino o alcalino-terrose.

Non solo, è possibile osservare anche come a seguito delle piogge di Ottobre si siano formate “bolle” superficiali di acqua a pH superiori in entrambe le località, bolle che nei mesi successivi vengono “diluite” o si muovono, trasportate dai flussi sotterranei in direzione del canale.

Studiando invece il trend in profondità si può notare una tendenza all'acidificazione.

Questo fenomeno è piuttosto diffuso nelle acque sotterranee a causa della degradazione di materia organica. Quest'ultima infatti tende a concentrarsi negli strati più profondi, sia per gravitazione sia per i flussi d'acqua più lenti. Qui la reazione di decomposizione avviene in condizione anaerobiche, da parte di numerosi agenti chimici e microbici, portando a prodotti di tipo acido (vedi paragrafo Analisi Geochimica 4.3) (Champ et al., 1979; Chapelle, 2000). Tale fenomeno è evidenziato soprattutto nel punto di campionamento MR3, situato all'interno della pineta, dove si riscontrano i valori più bassi dell'intera indagine.

Aldilà di questi due aspetti, si palesa anche l'influenza dei corpi idrici superficiali sulle acque sotterranee. Si osservi infatti, assumendo un punto di vista più ampio, un andamento che dal mare (pH = 8,2) si acidifica avvicinandosi al canale (pH medio di 7,4), segno della miscelazione di acque sotterranee con i corpi idrici superficiali.

Si sono anche riscontrate delle anomalie, fenomeni isolati di trend peculiari o comunque diversi dall'andamento circostante: il minifiltro 2 nel punto MR3 a Dicembre (0 m.l.m.m) e il minifiltro 4 nel punto PC1 a Settembre (0,12 m.l.m.m).

Al fine di comprendere queste tendenze particolari sono stati costruiti dei grafici pH vs Profondità (in appendice D si possono trovare i profili degli altri mesi).

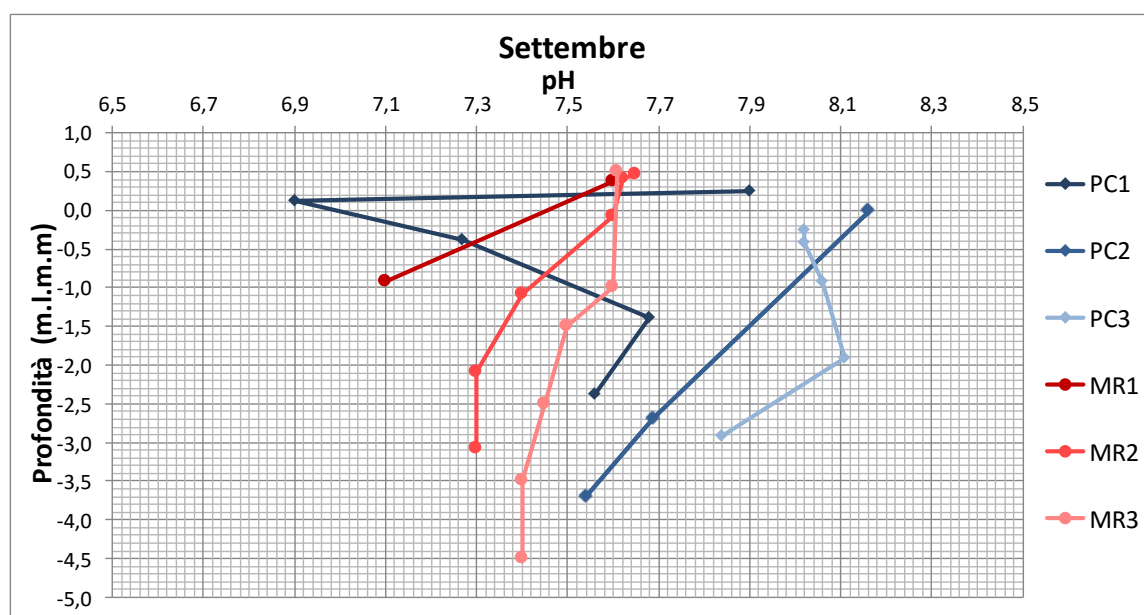


Fig. 5.2 – Profilo del pH lungo la profondità, mese di Settembre

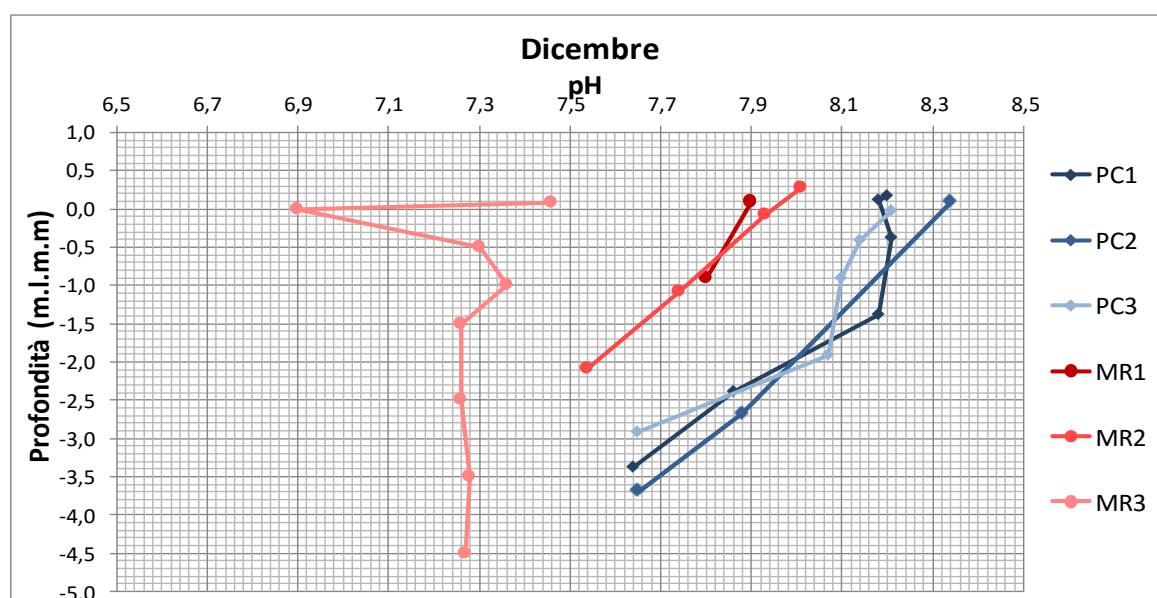


Fig. 5.3 – Profilo del pH lungo la profondità, mese di Dicembre

I grafici evidenziano questi due punti, PC1 minifiltro 4 e MR3 minifiltro 2, particolarmente discostati dagli altri. Questi hanno valori inferiori rispettivamente di 1 e di 0,5 dagli altri minifiltri dello stesso PdM e quote prossime alla tavola d'acqua. Potrebbe così essere confermata la presenza di sostanza organica anche a livelli superiori. Infatti quando la decomposizione avviene in presenza di ossigeno uno dei prodotti di reazione risulta essere  $\text{CO}_2$  che solubilizzandosi in acqua forma  $\text{H}_2\text{CO}_3$ . Questo poi per protolisi acidifica l'ambiente con un conseguente aumento dei carbonati o bicarbonati (Wei-Jun et al, 2003).

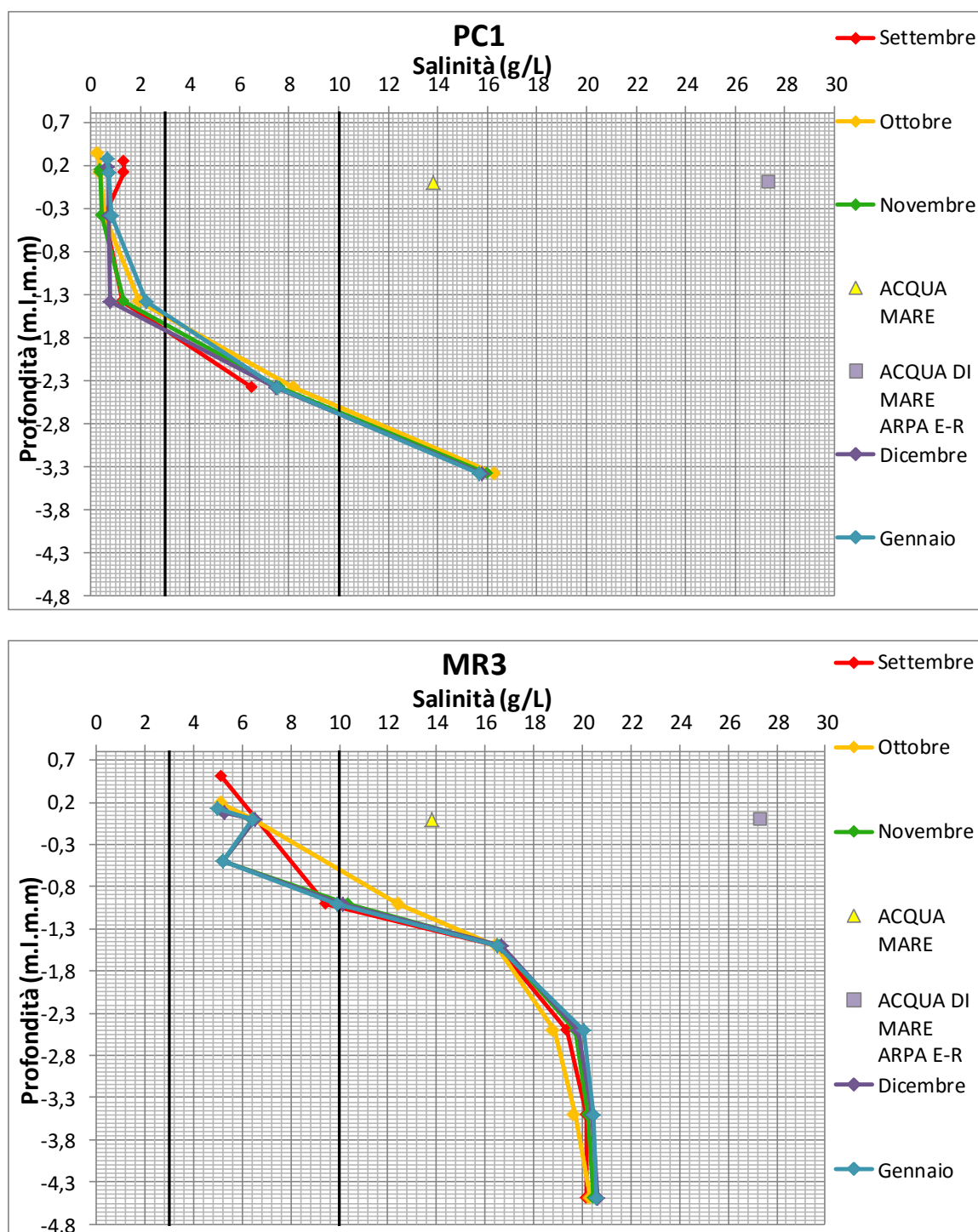
### 5.2.3 Salinità

L'acquifero presente all'interno dei transetti analizzati è chiaramente soggetto a intrusione salina in maniera costante durante tutto il periodo indagato. Quattro delle sei postazioni studiate mostrano negli strati più profondi salinità superiori all'acqua di mare campionata. Osservando la forma di quest'interfaccia (Fig. 4.7, Fig. 4.8) si vede che questa viene spinta in profondità dagli strati d'acqua dolce stoccati nelle zone a quote altimetriche maggiori, poi risale mano a mano che ci si inoltra nelle zone più interne. Ciò è dimostrato dai risultati ottenuti dal PdM MR3 (Fig. 4.10) che presenta salinità sempre superiori rispetto ai corrispondenti punti dello stesso transetto.

Possibili spiegazioni di questa risalita si possono trovare in molteplici fattori:

- gli spessori delle lenti d'acqua dolce, che si formano a seguito delle precipitazioni, sono nettamente insufficienti per respingere le acque salate che le circondano (vedi Ghyben-Herzberg paragrafo 1.4.2.1), soprattutto in MR3 dove il livello freaticometrico è prossimo al livello del mare e di conseguenza dove le condizioni favoriscono un possibile upwelling di acque salate.
- le specie vegetali presenti nell'area (MR3 è l'unico sistema di campionamento installato in pineta) attingono dalle risorse idriche sotterranee, impoverendo l'acquifero di quei pochi decimetri di acque dolci presenti.
- l'altimetria del piano campagna, che tocca il massimo in prossimità di MR1, ha un gradiente negativo muovendosi verso l'entroterra, influenzando allo stesso modo la tavola d'acqua.
- il canale di drenaggio che ha la funzione di bonificare e prosciugare la zona, drena nel breve periodo le acque dolci più superficiali e terminate queste risorse richiama dagli strati più profondi e salini dell'acquifero.

Si osservi come nelle rappresentazioni sviluppate mediante EnviroInsite (Fig. 4.7, Fig. 4.8) tutti i mesi presentino andamenti simili, a differenza di Dicembre dove un valore inferiore di salinità per il canale ha modificato le due rappresentazioni. Nemmeno durante Ottobre, nonostante le copiose piogge, si possono notare differenze significative. A dimostrazione di questa staticità di sistema si sono sviluppati dei profili di salinità durante i vari mesi monitorati (vedi Appendice G per tutte le postazioni).



**Fig. 5.4 – Variazione mensile della salinità in funzione della profondità per i PdM PC1 e MR3**

Questa situazione si crea a causa dell'azione del canale, che depauperando le risorse idriche annulla l'intervento delle acque meteoriche.

La gestione del regime del corso idrico tramite l'idrovora gioca quindi un ruolo fondamentale nel bilancio della zona.

Infine confrontando i due transetti è possibile suggerire che nonostante a Marina Romea si trovino quote topografiche della duna superiori, questa località è più vulnerabile al fenomeno rispetto a Porto Corsini. Infatti nei transetti B-B' le lenti d'acqua dolce sono

evidentemente più profonde e ricoprono distanze doppie rispetto alle altre. Le motivazioni di questo andamento sono probabilmente da ricercare in due cause. La prima dalla presenza di stabilimenti balneari. La costruzione delle infrastrutture infatti ha distrutto parte di duna dandole una conformazione a scacchiera e in più non si può negare la possibilità che questi stabilimenti utilizzino in maniera impropria quantità d'acqua per le loro attività ricreative. La seconda è data dalla distanza dai corpi idrici superficiali. MR3 dista solo 90m dal canale e l'intero transetto A-A' 150 m dal fiume Lamone contro i 520 m che si interpongono tra PC3 ed il canale. Altro fattore rilevante viene rappresentato quindi dall'evoluzione della linea di costa, verosimilmente l'erosione che si sta verificando a Marina Romea è in parte causa della salinizzazione della falda, e mostra con buona probabilità un ruolo (nel caso in questione) più importante della topografia.

Questa ipotesi trova riscontro nell'articolo "Water budget management of a coastal pine forest in a Mediterranean catchment (Marina Romea, Ravenna, Italy)" (Mollema et al. 2012). In questa pubblicazione si evince che, per il calcolo delle dimensioni teoriche delle lenti d'acqua dolce, Marina Romea è idrologicamente paragonabile ad una isola oceanica, in quanto è delimitata da corpi idrici salati.

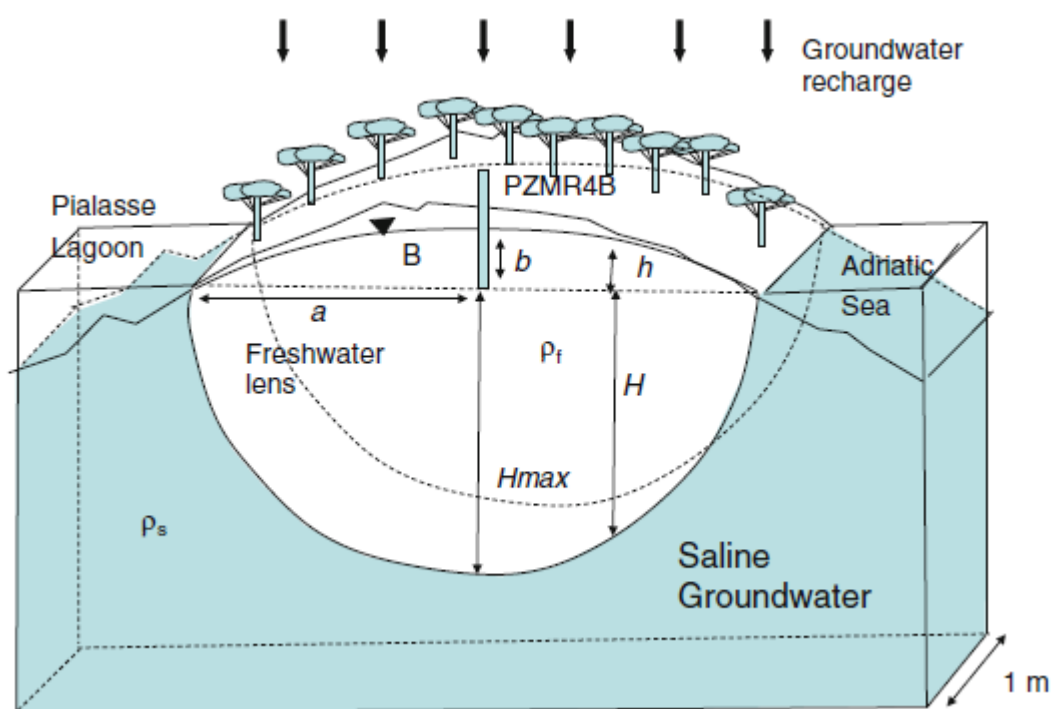


Fig. 5.5 – Sezione trasversale con larghezza unitaria di 1 m di Marina Romea

Assumendo allora che: le dimensioni di acqua dolce rimangano invariate nel tempo, ci sia un equilibrio idrodinamico mare-acquifero, l'acquifero sia omogeneo, i flussi verticali

siano trascurabili, l'interfaccia acqua dolce-salata sia netta, senza miscelazione ed esistano condizioni al contorno tali che non ci siano flussi nel mezzo dell'isola ( $x = 0, q = 0$ ) e ai confini la quota del mare è 0 ( $x = 0.5B, h = 0$ ), dove B è la larghezza dell'isola (Fig. 5.5), la profondità dell'interfaccia dolce-salata è:

$$H = \sqrt{\frac{f(0,25B^2 - x^2)}{k(1 + \alpha)\alpha}}$$

dove x è la distanza dal centro dell'isola, f è la ricarica naturale, B è la larghezza dell'isola,  $\alpha$  è il rapporto di densità  $(\rho_w - \rho_s)/\rho_w = 0,033$  e k è la conduttività idraulica ( $6.9 \times 10^{-4}$  m/s; Antonellini et al. 2008).

È quindi presumibile che l'erosione giochi un ruolo fondamentale nella salinizzazione dell'acquifero, occorre quindi prendere in considerazione (dopo attenti studi) l'ipotesi di ridimensionamento dei pennelli a nord della foce del Lamone (vedi paragrafo Evoluzione Recente della Costa 2.4) che sembrerebbero uno dei fattori responsabili dell'arretramento della linea di costa.

## 5.3 ANALISI GEOCHIMICA

### 5.3.1 Elaborazione Statistica

- Nonostante il bilancio ionico palesi valori accettabili ai fini dell'accuratezza, mostra comunque una distribuzione peculiare. La media, -5,8% e la mediana -6,5% potrebbero indicare un errore sistematico nello svolgimento delle analisi. È stato quindi costruito un grafico a dispersione in funzione della conducibilità per comprendere la natura di questi valori.

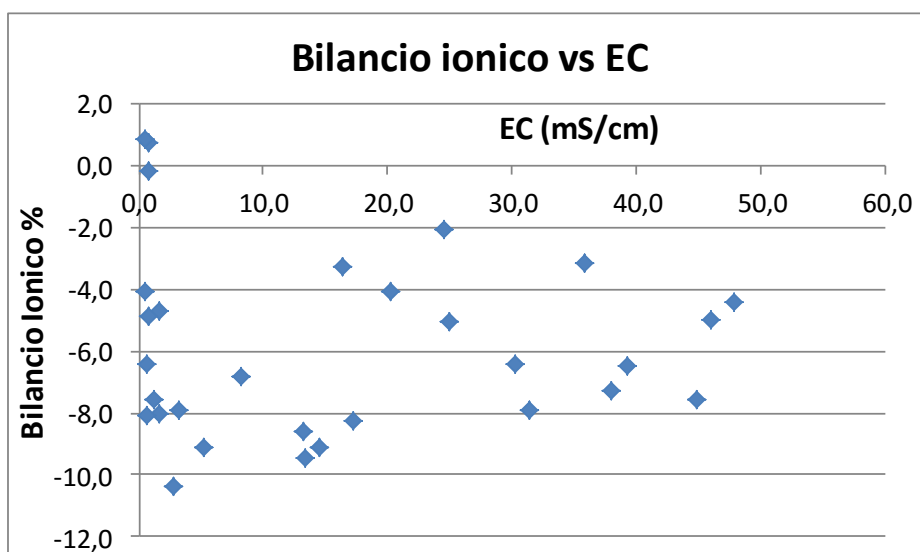


Fig. 5.6 – Grafico a dispersione del bilancio ionico in funzione della conducibilità

Dal grafico non risulta alcuna dipendenza tra le due grandezze, si possono quindi escludere quasi certamente errori derivante dalla diluizione dei campioni o dalla scelta del range di taratura dello strumento. La quasi totalità delle osservazioni si afferma di segno negativo, solo 2 su 30 hanno segno positivo e comunque sono di valore inferiore a 1%. Lo scostamento quindi evidenzia una sovrastima delle specie anioniche e/o una sottostima delle specie cationiche. L'errore prevalentemente di natura sistematica (anche se è presente una componente aleatoria) probabilmente va ricercato nelle procedure ripetute dell'utente o nell'errore strumentale.

- Dai *boxplot* delle specie ioniche (Fig. 4.11, Fig. 4.12) e dai grafici a dispersione (Fig. 4.13 - Fig. 4.14) si rileva una divisione delle specie in due famiglie. La prima composta da cloruri, solfati, bromuri, sodio, magnesio, potassio, ioni conservativi di origine prettamente marina, la seconda formata da ammonio, ferro, nitrati la cui origine si ritiene possa essere legata alla degradazione di materia organica in condizioni anaerobiche.



In generale comunque si manifesta una maggiore concentrazione di tutte le specie nella località MR, sia perché la zona è più soggetta al fenomeno di intrusione salina, sia per la ubicazione del PdM MR3 situato all'interno della pineta dove è ipotizzabile un'attività di decomposizione superiore.

È in accordo con tale ipotesi l'andamento delle concentrazioni lungo i transetti, il gradiente non a caso tende ad aumentare addentrandosi nelle zone più interne e scendendo verso la profondità.

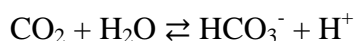
- Casi distinti sono invece per il calcio e il bicarbonato le quali origini sono da andare a ricercare in più ipotesi, a volte avvalendoci dei parametri chimico-fisici discussi in precedenza.

Il bicarbonato infatti mostra un andamento poco identificabile ed eterogeneo per località o profondità e non presenta gradienti particolari.

Le concentrazioni maggiori si riscontrano in MR3 all'altezza della superficie piezometrica in PC1 alla quota di -1,38 m.l.m.m e in PC3 alla quota di -1,91 m.l.m.m.

Il primo dato è spiegabile con la degradazione di materia organica in condizioni aerobiche. Questa infatti a seguito una serie di reazioni che vede coinvolti diversi gruppi microbici (vedi Discussioni pH paragrafo 5.2.2) sarebbe responsabile della produzione di CO<sub>2</sub> quindi poi di HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Altro motivo che potrebbe accrescere la concentrazione sugli strati superficiali è la dissoluzione di anidride carbonica che darebbe luogo ad una reazione di equilibrio avente come prodotti HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e H<sup>+</sup>.



Per quanto riguarda il Ca<sup>2+</sup> sono state percorse due strade, la prima visionando la correlazione tra il catione e i solfati nel caso la provenienza fosse dovuta a materiale gessoso, la seconda studiando invece la correlazione con lo ione bicarbonato.

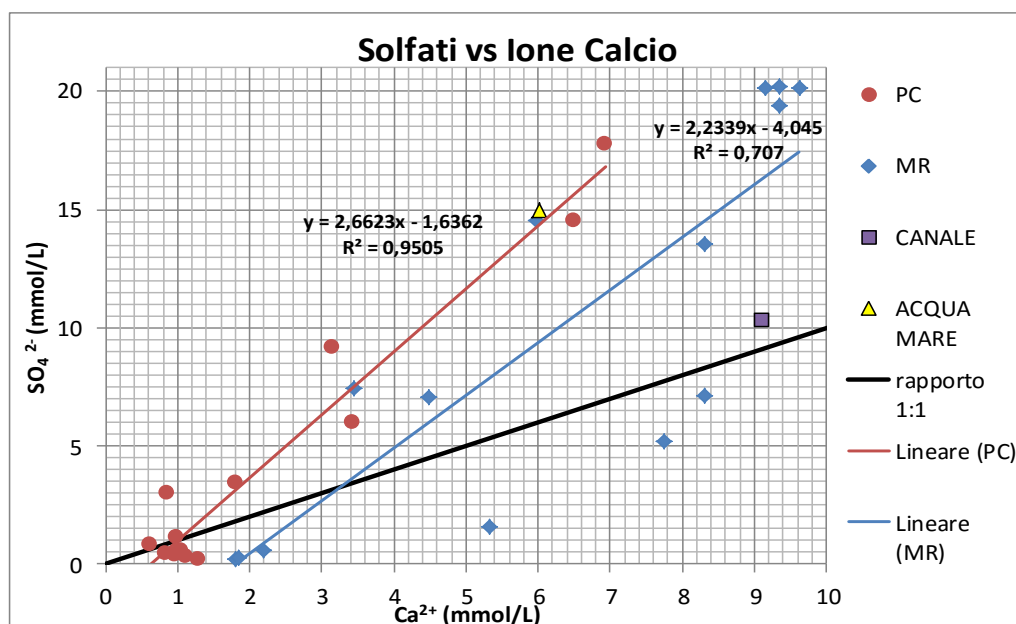


Fig. 5.7 – Grafico a dispersione solfato-calcio

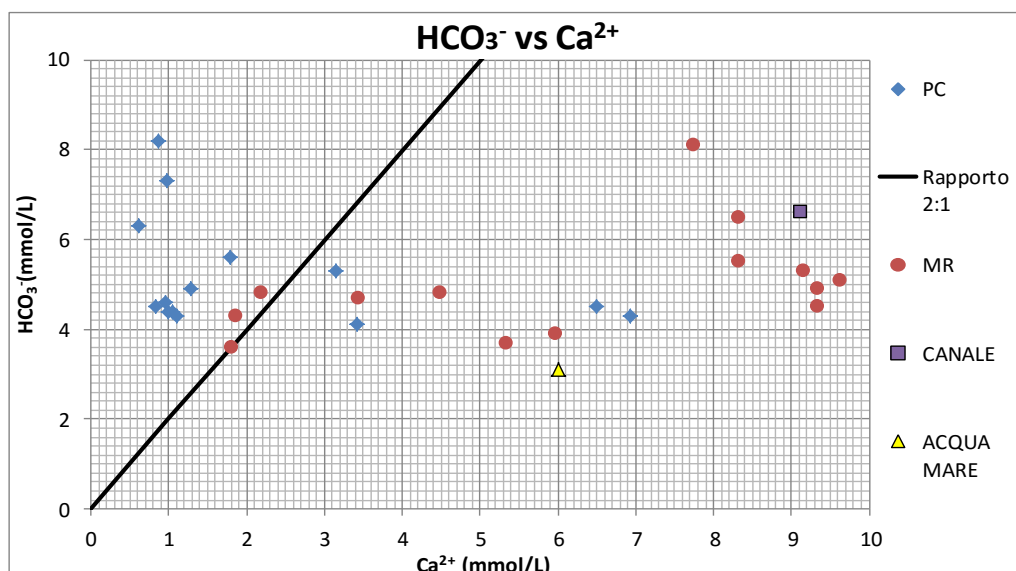
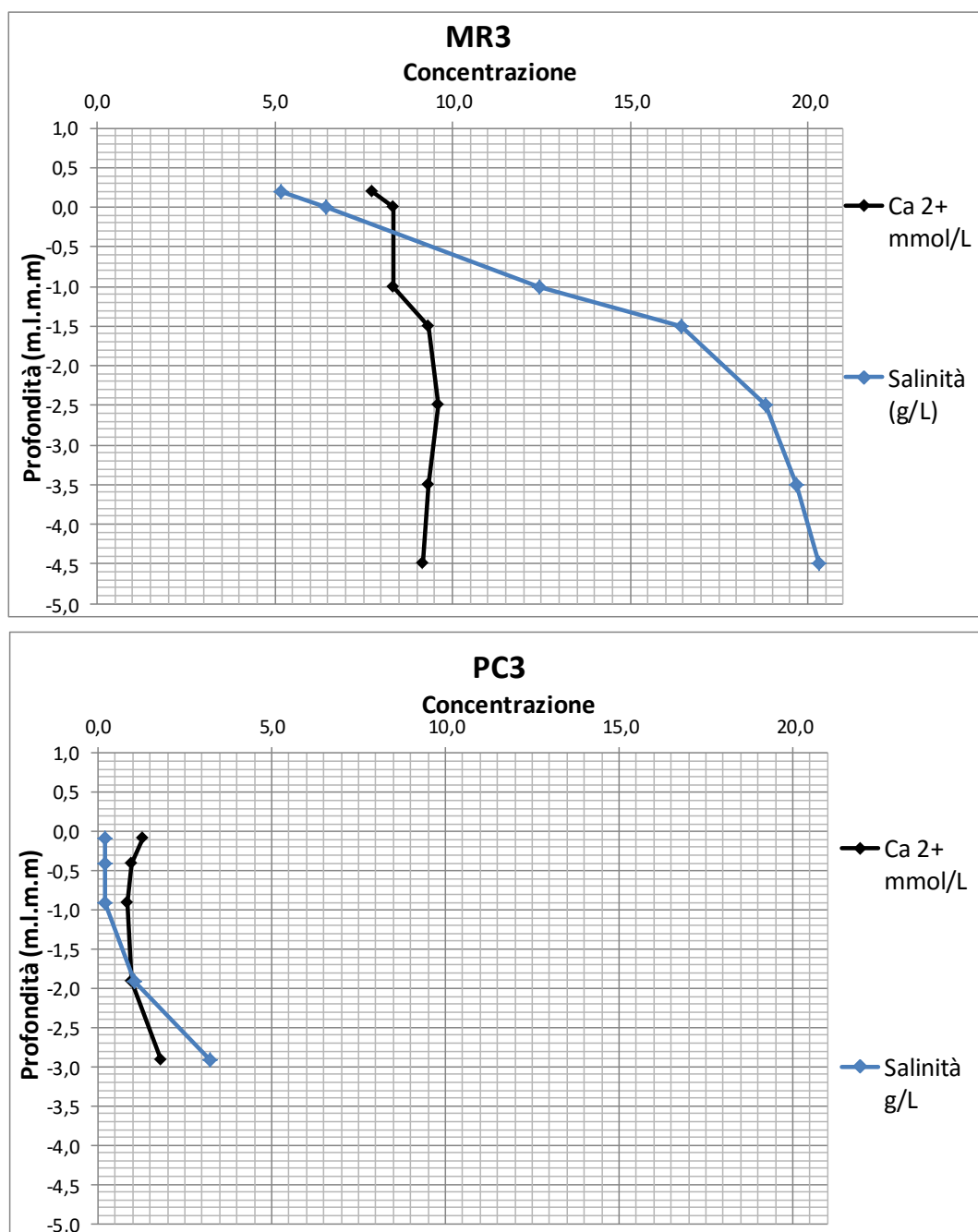


Fig. 5.8 – Grafici a dispersione solfato-calcio

Nessuno dei due grafici mostra correlazioni rilevanti. L'ultimo grafico però ha una scarsa valenza, in quanto  $\text{HCO}_3^-$  è una specie dinamica ed è partecipe ad una serie di reazioni ed equilibri che ne modificano la concentrazione nel tempo. Se ne deduce quindi, che il calcio non provenga da materiale gessoso, in quanto è stato già dimostrato che  $\text{SO}_4^{2-}$  sia di origine marina e che ci sia la possibilità (non dimostrabile per correlazione) che sia di origine carbonatica. A sostegno di quanto enunciato viene il pH, la presenza di strati alcalini indica dissoluzione da parte delle precipitazioni di sali a idrolisi basica come  $\text{CaCO}_3$  (Wei-Jun et al, 2003). Ulteriore segnale ci viene dalla variazione i concentrazione del calcio con la profondità (consultare l'Appendice M per l'intera serie di grafici).



**Fig. 5.9 – Concentrazione di calcio lungo la profondità**

Risulta evidente come il comportamento di  $\text{Ca}^{2+}$  sia diverso rispetto alle altre specie, più concentrato negli strati superiori per poi diminuire o venire sorpassato dalla salinità scendendo di quota.

- Il grafico a dispersione  $\text{Cl}^-$  in funzione di  $\text{Na}^+$  (Fig. 4.15) mostra una sovrabbondanza di Cloro, con un rapporto 2:1 tra le specie. Questo fenomeno potrebbe essere un indicatore dei processi di scambio ionico che avvengono nell'acquifero considerando che un deficit dei cationi marini è spesso indice di una fase di salinizzazione (vedi indice BEX nel paragrafo 4.3.3).

### 5.3.2 Decomposizione della Materia Organica

Alla luce dei grafici ottenuti riguardo le specie che prendono parte all'ossidazione della materia organica (Fig. 4.19 e Appendice N) si può evincere che in cinque punti di monitoraggio su sei si rileva un'attività di decomposizione. L'unico punto che non dimostra tale fenomeno è PC3 dove non si misurano variazioni significative di concentrazione né da parte dei reagenti né dei prodotti a nessuna profondità. Il punto dove si segnalano concentrazioni maggiori di  $\text{Fe}^{2+}$  e di  $\text{NH}_4^+$  è il PdM MR3.

In nessuna postazione studiata è possibile rilevare significativi consumi di solfati, ragione per cui lo step di reazione finale è il consumo di  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  con produzione di  $\text{Fe}^{2+}$ .

### 5.3.3 Tipologia di acqua (secondo Stuijzand, 1993)

Secondo la classificazione di Stuyfzand l'acqua dell'acquifero freatico costiero è chiaramente dominata da ioni di provenienza marina, in più di 2/3 dei campioni gli ioni sodio e cloro hanno concentrazioni molto superiori alle altre specie. Questo trend segue ovviamente i gradienti di salinità visti precedentemente, aumentando in profondità ed avvicinandosi ai corpi idrici superficiali (vedi discussioni salinità 5.2.3).

Alla luce del confronto tra i transetti (Fig. 4.20) si manifesta chiaramente una criticità superiore per l'acquifero di Marina Romea e una minore diversificazione delle tipologie di acque presenti.

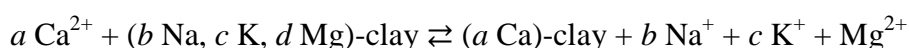
In quest'ultimo sito infatti non si presentano acque con  $\text{Mg}^{2+}$  come catione dominante.

A Porto Corsini invece è ben evidente questo strato di acque magnesiache che si interpongono tra le acque più dolci e quelle salmastre.

La motivazione di tale fenomeno potrebbe probabilmente essere ricercata nelle reazioni di scambio cationico tra matrice e acqua durante la fase di addolcimento.

È possibile che le acque dolci durante queste fasi subiscano un'impoverimento di ioni  $\text{Ca}^{2+}$  di cui tendenzialmente sono ricche e acquisiscano invece ioni  $\text{Mg}^{2+}$  desorbiti dal suolo.

Questa reazione di scambio viene così rappresentata nell'articolo "*Hydrochemical evidence of fresh- and salt-water intrusions in the Coastal Dunes Aquifer System of the western Netherlands*" di Stuijzand del 1988



con  $2a = b + c + 2d$

---

Questa reazione di equilibrio vale anche per le fasi di salinizzazione: un apporto di ioni marini a seguito di una forte intrusione salina sposterebbe la reazione verso sinistra, così da avere un rilascio di  $\text{Ca}^{2+}$  in fase acquosa ed un adsorbimento di  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  ed  $\text{Mg}^{2+}$ .

Altra motivazione potrebbe venire invece dall'origine del materiale sedimentatosi. Si suppone che il materiale che compone la spiaggia di Marina Romea provenga da sedimenti trasportati dal Po, più calcici. A Porto Corsini invece il molo di nuova costruzione (lungo circa 2,5 Km) potrebbe intercettare materiali che fluttuano più a largo trasportati dalle correnti marine, questi potrebbero avere una provenienza friulana quindi di origine dolomitica, di conseguenza più ricca in magnesio. Sorge tuttavia la necessità di svolgere ulteriori analisi sulla natura della provenienza del materiale, magari a scala inferiore, e sui fenomeni che regolano le correnti marine.

Per ciò che riguarda l'indice BEX non in tutti i campioni è stato possibile calcolarlo: ciò nonostante si osserva che nel transetto A-A' si presentano 2 campioni in salinizzazione e 2 campioni in addolcimento, mentre la maggioranza di quelli nel transetto B-B' mostrano addolcimento. Questa differenza è spiegabile con buona probabilità dall'avanzamento della linea di costa a cui è sottoposta la spiaggia a sud (vedi paragrafo Evoluzione recente della costa 2.4) per effetto del molo foraneo. Si evidenzia tuttavia, anche attraverso quest'indice, forti differenze tra i due siti.

Paragonando i risultati del BEX con quelli riscontrati dal grafico a dispersione Na-Cl (Fig. 4.15) e con quanto detto sullo scambio cationico si nota che quest'indice mostra con più facilità un addolcimento dell'acquifero. Questo presumibilmente per effetto delle copiose piogge cadute ad Ottobre prima del campionamento che potrebbero aver influenzato i risultati. Sembrerebbe quindi che il BEX sia verosimilmente vulnerabile alla stagionalità quando utilizzato per ambienti dunosi come quello studiato (Marconi et. al., 2011).

Nasce comunque la necessità di svolgere ulteriori indagini, studi integrativi da effettuare in periodi diverso dell'anno, così da avere un quadro più completo dei processi di scambio ionico.

## 6 CONCLUSIONI

L'obiettivo di questo progetto è stato la caratterizzazione idrogeologica di una porzione dell'acquifero freatico costiero situato in due differenti corpi dunosi ubicati a Marina Romea e Porto Corsini. L'indagine ha avuto una durata continua di cinque mesi e ha voluto essere rappresentativa delle caratteristiche idrogeologiche del territorio, ricercando primariamente le differenze che si instaurano tra un sistema antropizzato e un sistema naturale.

La tecnica di campionamento utilizzata è la *multi level sampler*, sistema innovativo basato su minifiltri che garantisce tempistiche di monitoraggio rapide e una campionatura multi-livello offrendo dati puntuali e precisi.

La campagna di monitoraggio si è sviluppata su tre fronti: freatimetria, salinità e classificazione idro-chimica delle acque.

Dalla prima indagine risulta che la soggiacenza è strettamente relazionata alla topografia e presumibilmente alla distanza dell'idrovora del sistema drenante, dato che i livelli freatimetrici superiori si sono riscontrati a Marina Romea. Lo spessore d'acqua comunque è molto variabile in funzione delle precipitazioni e della temperatura.

Anche l'ubicazione gioca un ruolo fondamentale. Nelle zone più interne il livello freatimetrico è molto inferiore rispetto ai punti più prossimi alla costa, raggiungendo a volte quote sotto il livello del mare. Questa differenza è data da vari fattori: le specie vegetative presenti in pineta che sia per emungimento sia per intercettazione delle precipitazioni da parte delle chiome abbassano il livello piezometrico, la subsidenza ed il cambiamento climatico. Studiando i tempi che intercorrono tra precipitazioni e ricarica dell'acquifero è ipotizzabile un campo vettoriale con flussi d'acqua che vanno dalle quote superiori in direzione del canale.

Dal monitoraggio della salinità si presenta uno scenario critico. L'acquisizione dei parametri chimico-fisici ci mostra infatti un'intrusione salina incalzante originata da una serie di fattori naturali ed antropici. Primo tra questi la vicinanza dei corpi idrici salati, si osserva infatti una risalita degli strati profondi più ricchi di ioni marini in prossimità dei corsi d'acqua e nelle postazioni a quote inferiori (*upwelling*). Secondo, la tipologia di vegetazione presente; infatti le specie arboree essendo maggiormente idroesigenti attingono molta più acqua dalle lenti dolci causando la risalita salata. Viceversa specie erbacee caratteristiche di questi ambienti estremi necessitano di quantitativi d'acqua minori.

Tra i due siti il più vulnerabile sembra essere Marina Romea, che nonostante quote altimetriche superiori mostra acque saline già a livelli della superficie piezometrica.

Le cause di questo fenomeno sembrano essere molteplici:

- l'erosione costiera che assottiglia la lingua di terra adibita a ricarica di acqua dolce da parte delle precipitazioni.
- un'estensione della duna minore rispetto a Porto Corsini
- buona parte di duna che risulta a ridosso della pineta costiera.
- la presenza di infrastrutture turistiche, che hanno frazionato la duna.
- La maggiore vicinanza al canale di drenaggio che esercita un'azione di bonifica dell'area portando alla rapida scomparsa della risorsa idrica dolce superficiale messa in loco dall'infiltrazione delle precipitazioni.

Le analisi geochimiche ci mostrano una sovrabbondanza di ioni provenienti dal mare ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ) con profili simili alla salinità. Le altre specie riscontrate sono: gli ioni che partecipano alla decomposizione anaerobica di materia organica ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ), con concentrazioni crescenti scendendo negli strati profondi e valori elevati nelle postazioni in pineta, ed infine  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$ . La presenza in acqua di queste due specie si suppone sia da collegare in gran parte al dilavamento delle piogge nei confronti di materiale carbonatico. Un riscontro ci viene dal pH, tendenzialmente basico e dalla classificazione di Stuyfzand che identifica i *water type* dominati da questi ioni negli strati superiori e più dolci dell'acquifero.

Il calcio prende anche parte alle reazioni di scambio cationico, che sono alla base dei processi di salinizzazione o addolcimento dell'acquifero. Per comprendere tali processi è stato calcolato quindi l'indice BEX. Porto Corsini mostra un addolcimento generale, presumibilmente grazie alla sedimentazione a cui è soggetta la zona dalla costruzione del molo. Mentre Marina Romea evidenzia strati in via di salinizzazione, in accordo con i dati di salinità.

Molte misure tecniche potrebbero essere adottate per contrastare questo fenomeno di salinizzazione: una miglior gestione del regime del corso idrico attraverso il canale di drenaggio e l'idrovora, la sostituzione di alcuni esemplari di pinacee con specie meno idroesigenti come vegetazione arbustiva tipica degli ambienti dunosi, prendere in considerazione (dopo attenti studi) l'ipotesi di ridimensionamento dei pennelli a nord della foce del Lamone ed infine un'imposizione di misure per il risparmio idrico durante la stagione turistica, organizzando ricariche artificiali delle acque di deflusso e creando bacini di ritenzione per immagazzinare l'eccedenza d'acqua dolce durante i periodi piovosi.

Lo studio effettuato rappresenta comunque le condizioni createsi durante soli 5 mesi dell'anno, da Settembre 2015 a Gennaio 2016, sorge quindi la necessità di svolgere ulteriori indagini, così da avere un quadro più completo dei processi che interagiscono sul bilancio idrico dell'area indagata per almeno un intero anno.



---

## 7 BIBLIOGRAFIA

- Acosta J.A., Jansen B., Kalbitz K., Faz A., Martínez-Martínez S., 2011.** Salinity increases mobility of heavy metals in soils.
- Amorosi A, Centineo MC, Colalongo ML, Fiorini F., 2005.** Millennial-scale depositional cycles from the Holocene of the Po plain, Italy. *Marine geology* 222-223 : 7-18
- Amorosi A, Colalongo ML, Pasini G, Preti D., 1999.** Sedimentary response to late Quaternary sea-level changes in the Roamagna coastal plain (Northern Italy): *Sedimentology* 46 : 99–121.
- Amorosi A., Asioli A., Bondesan M., Cibin U., Colalongo M. L., Correggiari A., Pasini G., Preti D., Roveri M., Sarti G., Severi P., Stefani M., Trincardi F., Vaiani S. C., Vincenzi S., 2002.** Dalle conoidi pedemontane al mare aperto: architettura stratigrafica tardo-quadernaria dell'Adriatico settentrionale e della pianura costiera emiliano-romagnola. Le pianure: conoscenza e salvaguardia. Il contributo delle Scienze della Terra, Ferrara.
- Amorosi A., Colalongo M.L., Pasini G., Preti D., 1999.** Sedimentary response to late quaternary sea-level changes in the Romagna Coastal Plain (Northern Italy). *Sedimentology* 46:99–121
- Amorosi A., Severi S., Roveri M., Correggiari A., Preti M., Tomassetti C., Tarocco P., Dinelli E., et al., 2002.** Carta Geologica d'Italia. Regione Emilia-Romagna Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli
- Antonellini M., Balugani E., Gabbianelli G., Laghi M., Marconi V., Mollema P., 2010.** Lenti d'acqua dolce nelle dune della costa Adriatico-Romagnola. In *Studi Costieri* 2010.
- Antonellini M., Mollema P., Giambastiani B., Bishop K., Caruso L., Minchio A., Pellegrini L., Sabia M., Ulazzi E., Gabbianelli G., 2008.** Salt water intrusion in the coastal aquifer of the southern Po Plain, Italy. *Hydrogeology Journal* 16: 1541–1556.
- APAT, IRSA-CNR 2003.** Metodi analitici per le acque. Manuali e linee guida 29/2003.
- Appelo C.A.J. e Postma D.L. 2005.** *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. 2nd ed. Rotterdam. Balkema. 649 p.
- Aquifer System of the western Netherlands
- Arpa Emilia Romagna, 2006.** Annuario regionale dei dati ambientali 2006. Cap 3C Acque di transizione
- Arpa Emilia Romagna, 2009.** “Stato del litorale emiliano romagnolo all'anno 2007 e piano decennale di gestione”.

- Arpa Emilia Romagna, 2010.** Annuario regionale dei dati ambientali 2010.
- Arpa Emilia Romagna, 2011.** Annuario regionale dei dati ambientali 2011, Erosione Costiera, Cap. 9C
- Badon Ghijben W., 1888.** NOTA IN VERBAND MET DE VOORGENOMEN PUTBORING NABIJ AMSTERDAM [NOTES ON THE PROBABLE RESULTS OF A WELL DRILLING NEAR AMSTERDAM]. Tijdschrift Koninklijk Instit Ing 1988/1989:8–22.
- Balugani E. e Antonellini M., 2010.** Measuring salinity within shallow piezometers: comparison of two field methods. Journal of water resource and protection 2 : 251-258.
- Barrocu G., 2003.** Seawater intrusion in the coastal aquifers of Italy. In: Calaferra J (ed) State of seawater intrusion in coastal aquifers of the Mediterranean Coast. SWIM-SWICA, Alicante, Spain
- Bondesan M, Favero V, Vignals MJ., 1995.** New evidence on the evolution of the Po-delta coastal plain during the Holocene: Quat Int 29/30 : 105–110
- Bruschini M., Bargossi M. L., Mengozzi A., Ferrucci E. M., et. al., 2013.** Piano Stralcio di Bacino per il Rischio Idrogeologico. Autorità dei bacini Regionali Romagnoli
- Calace N., Fratini M., Guerra M., Pascarella F., Zampetti F., 2007.** Manuale per le indagini ambientali nei siti contaminati. APAT – Manuali e linee guida 43/2006.
- Capaccioni B, Didero M, Paletta C, Didero L., 2005.** Saline intrusion and refreshing in a multilayer coastal aquifer in the Catania Plain (Sicily, southern Italy): dynamics of degradation processes according to the hydrochemical characteristics of groundwater. J Hydrol 307:1–16
- Castany Gilbert, 1985.** Idrogeologia Principi e Metodi, ed. Dario Flaccovio.
- Cau P, Lecca G, Muscas, Barrocu G, Uras G., 2002.** Saltwater intrusion in the plain of Oristano (Sardinia), 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, The Netherlands, 6–10 May 2002, pp 435–444
- Chapelle F. H., 2000.** Ground-Water Microbiology and Geochemistry.
- Cheng Alexander H.-D., Leonard F. Konikow, Driss Ouazar, 2001.** Special Issue of Transport in Porous Media on ‘Seawater Intrusion in Coastal Aquifers. Transport in Porous Media 43: 1–2, 2001.
- Davis G.B. e Barber C., 1994.** “Monitoring and Sampling Methods”, Chapter 19 in CSIRO Groundwater School Notes, 12th Groundwater School, July 1993, Adelaide.
- De Luca A, Preziosi E, Giuliano G, Mastroianni D, Falconi F., 2005.** First evaluation of the saltwater intrusion in the Tiber delta area (Rome, central Italy). 18th Salt Water Intrusion Meeting, Cartagena, Spain, 31 May–3 June 2004, 34 pp

- Dinelli E., Colombani N., Mastrocicco M., 2015.** Climate change impact on heavy metal release in a reclaimed coastal aquifer.
- Dinelli, E. Colombani, N., Mastrocicco, M., 2015.** Trace elements mobility in a saline coastal aquifer of the Po river lowland (Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 159, 317-328.
- Driscoll F.G., 1986.** *Groundwater and Wells*. 2nd Edition, Johnson Division, St Paul, 1089.
- EPA 2007.** Guidelines Regulatory monitoring and testing Groundwater sampling
- Fetter C.W. 2001.** *Applied Hydrogeology*. Fourth Edition, Pearson Prentice Hall.
- Gabbianelli G. e Antonellini M., 2009.** Foce Bevano: l'area naturale e protetta e l'intervento di salvaguardia. Assessorato alla sicurezza territoriale difesa del suolo e della costa protezione civile. Centro stampa della Regione Emilia-Romagna.
- Giambastiani B.M.S., Antonellini M., Oude Essink G.H.P., Stuurman R.J., 2007.** Salt water intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): a numerical model. *J Hydrol* 340:94–104
- Giambastiani B.M.S., Mollema P.N., Antonellini M., 2008.** Groundwatermanagement in the Northern Adriatic Coast (Ravenna, Italy):new strategies to protect the coastal aquifer from saltwaterintrusion. In: Ko'nig LF, Weiss JL (eds) *Groundwater: modelling,management and contamination*. Nova Science Publishers, Inc.,New York, pp 167–193
- Graham S., Parkinson C., Chahine M., 2010.** *The Water Cicle*, Earth Observatory NASA
- Greggio N., Pifferi M., Antonellini M. 2014.** Groundwater characterization in low coastal adriatic dunes. Proceeding of Fifth International Symposium. MONITORING OF MEDITERRANEAN COASTAL AREAS: PROBLEMS AND MEASUREMENT TECHNIQUES. LIVORNO (ITALY) ISBN: 978-88-95597-19-5.
- Hantush M. S., 1964.** Hydraulics of wells, in *Advances in Hydroscience*, Vol. 1, Ed.: V. T. Chow, Academic Press, New York, pp. 281–432.
- International Organization For Standardization 1993** – ISO 5667-11 Water quality. Sampling Guidance on sampling of groundwater, International Organization For Standardization, Geneve Switzerland, pp. 1-10.
- IRSA-CNR, 1994.** *Metodi analitici per le acque*. Poligrafico dello stato

- Kralj M., 2011.** Effects of resources exploitation on water quality: case studies in salt water intrusion and acid mine drainage Dottorato di Ricerca in Scienze Ambientali: Tutela e Gestione delle Risorse Naturali.
- Lerner D.N. e Teutsch G., 1995.** “Recommendations for level-determined sampling in wells”. *Journal of Hydrology*, v. 171, pp 355-377.
- Lewis E.L. e Perkin R.G., 1981.** The Practical Salinity Scale 1978: conversion of existing data. *Deep-Sea Res.*, 28A, 307-328.
- Marconi V., Antonellini M., Balugani E. e Dinelli E., 2011.** Hydrogeochemical characterization of small coastal wetlands and forests in the Southern Po plain (Northern Italy). *ECOHYDROLOGY*
- Moggi L., Juris A., Gandolfi M. T., 2006.** Manuale del fotochimico. Tecniche e metodologie. Bononia University Press.
- Mollema N., Antonellini M., Gabbianelli G., Galloni E. 2012.** Water budget management of a coastal pine forest in a Mediterranean catchment (Marina Romea, Ravenna, Italy). *Environ Earth Sci*.
- Mollema N., Antonellini M., Gabbianelli G., Laghi M., Marconi V., Minchio A., 2012.** Climate and water budget change of a Mediterranean coastal watershed, Ravenna, Italy. *Environ Earth Sci* 65:257–276.
- Mollema N., Antonellini M., Minchio A., Gabbianelli G., 2008.** The Influence of Three-dimensional Dune Topography on Salt Water Intrusion in Marina Romea, Italy: A Numerical Modeling Study Using LIDAR Data.
- Ozsoya Turkan e Saydam Cemal A., 2000.** Acidic and alkaline precipitation in the Cilician Basin, north-eastern Mediterranean Sea. Elsevier Science B.V.
- Parsons, M.L., 1970.** Fgroundwater thermal regime un a glacial complex. *Water Resources Research* 6, no. 6: 1701–1720.
- Perini L. e Calabrese L., 2010.** Le dune costiere dell’Emilia-Romagna: strumenti di analisi, cartografia ed evoluzione. *Studi Costieri*, 17, 71-84.
- Pieri Linda, Dinelli Giovanni, Rossi Pisa Paola, 2012.** Studio della qualità delle precipitazioni in due siti della provincia di Bologna: tendenza dell’ultimo decennio. *Italian Journal of Agrometeorology*.
- POC – Piano dell’Arenile 2009.** Comune di Ravenna
- Pranzini E., 2004.** La forma delle coste. Geomorfologia costiera, impatto antropico e difesa dei litorali, ed Zanichelli.
- Pranzini G., 2002.** Groundwater salinization in Versilia (Italy). 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, The Netherlands, 6–10 May 2002, pp 412–421

**Provincia di Ravenna, 2000.** 1° Rapporto sullo stato dell'ambiente nella provincia di Ravenna 2000. Assessorato Ambiente, Ravenna.

**Pulido-Leboeuf P., Pulido-Bosch A., Calvache M.L., Vallejos A., Andreu J. M., 2003.** Strontium, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/Cl<sup>-</sup> and Mg<sup>2+</sup>/Ca<sup>2+</sup> ratios as tracers for the evaluation of seawater into coastal aquifers: the example of Castell de Ferro aquifer (SE Spain). *C.R. Geoscience* 335 (2003) 1039-1048.

**Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998.** Riserve idriche sotterranee della regione Emilia-Romagna. Relazione tecnica a cura di Di Dio G.

**Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, 1998.** Riserve idriche sotterranee della regione Emilia-Romagna. Relazione tecnica a cura di Di Dio G.

**Rizzini A., 1974.** Holocene sedimentary cycle and heavy-mineral distribution, Romagna-Marchecoastal plain, Italy: *Sedimentary geology* 11 (1) : 17-37.

**Sarzanini C. e Cavalli S., 1998.** Cromatografia ionica, teoria e applicazioni. UTET Libreria

**Scheidleger A, Grath J, Lindinger H., 2004.** Saltwater intrusion due to groundwater over-exploitation EEA inventory throughout Europe. In: 18th Saltwater Intrusion Meeting, Cartagena, Spain, 31 May–3 June 2004, 125 pp

**Shalev E, Lazar A, Wollman S, Kington S, Yechieli S, Gvirtzman H. 2009.** Biased monitoring of fresh water-salt water mixing zone in coastal aquifers. *Ground Water* 47 (1): 49-56.

**Shiklomanov I. A., Babkin Vladimir I., Yu Vladimir, Ye Tamara, et. al. 1999.** World Water Resources and their use Beginning of the 21st Century, Prepared in the Framework of IHP UNESCO, State Hydrological Institute, St. Petersburg.

**Skoog D.A., West D.M., Holler F.J., Crouch S.R., 2005.** Fondamenti di chimica analitica, Edises, 1145 p., 2 ed.

**Stuyfzand P. J., 1993.** Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the western Netherlands. Ph.D. Thesis Free Univ. Amsterdam, publ. by KIWA ltd. Research and Consultancy Nieuwegein The Netherlands. ISBN 90-74741-01-0 366 pp.

**Stuyfzand P. J., 1993.** Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the western Netherlands. Ph.D. Thesis Free Univ. Amsterdam, publ. by KIWA ltd. Research and Consultancy Nieuwegein The Netherlands. ISBN 90-74741-01-0 366 pp.

**Stuyfzand P. J., and Stuurman R. J., 2006.** Origin, distribution and chemical mass balances of non anthropogenic, brackish and ( hyper)saline groundwaters in the

Netherlands. In Proceedings 1ST SWIM-SWICA Joint Saltwater Intrusion Conference, Cagliari Italy 2006.

**Stuyfzand, P.J., 1983.** Belangrijke foutenbronnen bij bemonstering van grondwater via peil- en minifilters. H2O 16, 87-94.

**Stuyfzand, P.J., 1988.** Hydrochemical evidence of fresh- and salt-water intrusions in the Coastal Dunes

**Taniguchi M., 1985.** Effects of snow cover and infiltrated metwater on soil and groundwater temperature in and around Nagaoka. Geogr Rev Jpn Ser A 58:370–384

**Todd D.K., 1953.** Sea water intrusion in coastal aquifers. Am Geophys Union Trans 34:749-754

**UNESCO, 1983.** Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. Unesco technical papers in marine science 44, Unesco/SCOR/ICES/IAPSO Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards and SCOR Working Group 51.

**Vandenbohede A. and Lebbe L., 2011.** Groundwater chemistry patterns in the phreatic aquifer of the central Belgian coastal plain. Applied Geochemistry. Doi: 10.1016/j.apgeochem.2011.08.012

**Wei-Jun Cai, Yongchen Wang, James Krest, W.S. Moore, 2003.** The geochemistry of dissolved inorganic carbon in a superficial groundwater aquifer in North Inlet, South Carolina, and the carbon fluxes to the coastal ocean. Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 67, Issue 4, 15 February 2003, Pages 631-639.

## 7.1 SITOGRAFIA

<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/acque/idrogeologia-della-pianura-emiliano-romagnola#section-1>

<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/suolo-bacino/sezioni/pianificazione/autorita-bacini-romagnoli/piano-stralcio-rischio-idrogeologico>

[http://clima.meteoam.it/AtlanteClimatico/pdf/\(146\)Punta%20Marina.pdf](http://clima.meteoam.it/AtlanteClimatico/pdf/(146)Punta%20Marina.pdf)

[http://clima.meteoam.it/AtlanteClimatico/pdf/\(146\)Punta%20Marina.pdf](http://clima.meteoam.it/AtlanteClimatico/pdf/(146)Punta%20Marina.pdf)

[http://cnx.org/contents/FOHv\\_Zza@43.2:yeVQResF@5/Water-Cycle-and-Fresh-Water-Su](http://cnx.org/contents/FOHv_Zza@43.2:yeVQResF@5/Water-Cycle-and-Fresh-Water-Su)

<http://dexter-smr.arpa.emr.it/Dexter/Login>

<http://digilander.libero.it/gasbarrostefano/ambiente.html>

[http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE07\\_ENV\\_IT\\_000497\\_LAYMAN\\_IT.pdf](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE07_ENV_IT_000497_LAYMAN_IT.pdf)

<http://palmergeoghist.weebly.com/coastal-erosion.html>

<http://webmineral.com/>

<http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/>

<http://www.arpa.emr.it/cms3/documenti/ cerca doc/mare/progetto mare/salinit%C3%A0.htm>

<http://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/06152d11.htm#53>

<http://www.direttivaacque.minambiente.it/>

[http://www.epa.sa.gov.au/xstd\\_files/Water/Guideline/guide\\_gws.pdf](http://www.epa.sa.gov.au/xstd_files/Water/Guideline/guide_gws.pdf)

<http://www.geociencias.unam.mx/~rmolina/geologia%20fisica/aguas1.html>

<http://www.minambiente.it/sites/default/files/D.Lgs . 16-3-2009 n. 30.pdf>

<http://www.parcodeltapo.it/pages/it/ambiente-e-territorio/natura/ambienti-naturali/territorio-ricco-di-ambienti-naturali/acque-dolci/piallassa-della-baiona.php>

[https://it.wikipedia.org/wiki/Canale\\_Candiano](https://it.wikipedia.org/wiki/Canale_Candiano)

## APPENDICE

**Appendice A** - Dati climatologici ottenuti servizio idrometeorologico ARPA-SIM  
(<http://dexter-smr.arpa.emr.it/Dexter/Login> )

Giugno 2015		
giorno	precipitazioni giornaliere (mm)	T media giornaliera (°C)
1	0	20,6
2	0	22,5
3	0	24,3
4	0	25,6
5	0	25,5
6	0	25,3
7	0	25,5
8	0	25,2
9	0	24,7
10	0	23,8
11	0	24,5
12	0	25,4
13	0	26,1
14	3,2	23,5
15	0	24,0
16	0,2	23,0
17	28	20,0
18	0	20,5
19	3,6	20,8
20	3,6	20,0
21	0	19,3
22	0	21,7
23	0	25,0
24	67	19,4
25	0	20,0
26	0	21,7
27	0	23,2
28	0	23,7
29	0	23,8
30	0	24,7

Luglio 2015		
giorno	precipitazioni giornaliere (mm)	T media giornaliera (°C)
1	0,0	24,9
2	0,0	25,8
3	0,0	27,3
4	0,0	27,0
5	0,0	27,7
6	0,0	28,7
7	0,0	28,9
8	0,0	30,8
9	0,0	25,1
10	0,0	23,8
11	0,0	24,0
12	0,0	26,2
13	0,0	27,0
14	0,0	26,8
15	0,0	27,3
16	0,0	29,1
17	0,0	30,1
18	0,0	30,1
19	0,0	30,6
20	0,0	30,4
21	0,0	30,4
22	0,0	30,6
23	0,0	30,3
24	0,0	29,5
25	0,0	28,9
26	0,0	26,5
27	0,0	28,0
28	0,0	27,6
29	0,0	27,9
30	0,0	25,9
31	7,0	23,3



Agosto 2015		
giorno	precipitazioni giornaliere (mm)	T media giornaliera (°C)
1	25,2	22,5
2	0,0	22,0
3	0,0	24,8
4	0,0	26,5
5	0,0	27,6
6	0,0	28,0
7	0,0	28,4
8	0,0	28,5
9	0,0	28,6
10	8,8	24,1
11	0,0	24,8
12	0,0	27,5
13	0,0	27,6
14	0,0	28,4
15	6,2	25,3
16	0,0	21,5
17	0,0	23,7
18	0,0	24,0
19	0,2	21,3
20	0,0	22,5
21	0,0	22,3
22	0,0	21,9
23	0,0	22,3
24	4,4	23,1
25	0,0	25,3
26	0,0	23,4
27	0,0	24,3
28	0,0	25,5
29	0,0	26,2
30	0,0	26,8
31	0,0	27,4

Settembre 2015		
giorno	precipitazioni giornaliere (mm)	T media giornaliera (°C)
1	0,0	26,8
2	0,0	26,5
3	0,0	25,1
4	0,0	24,4
5	0,0	23,1
6	0,0	19,8
7	0,0	19,7
8	0,0	19,3
9	0,0	18,6
10	0,0	18,6
11	0,0	18,8
12	0,0	20,4
13	1,4	20,6
14	3,0	23,3
15	0,0	23,6
16	0,0	24,8
17	0,0	27,0
18	0,0	27,1
19	0,0	22,6
20	0,0	20,3
21	0,0	19,6
22	0,0	18,6
23	3,8	19,0
24	10,4	14,6
25	0,0	16,5
26	0,0	17,7
27	0,0	18,1
28	0,0	18,1
29	0,0	17,3
30	5,6	15,3

Ottobre 2015		
giorno	precipitazioni giornaliere (mm)	T media giornaliera (°C)
1	21,8	14,4
2	21,8	15,3
3	0,2	16,6
4	1,0	17,7
5	0,0	17,7
6	1,8	17,7
7	0,0	17,6
8	0,0	17,3
9	0,0	16,5
10	11,0	16,4
11	4,2	16,1
12	0,0	16,1
13	30,6	16,3
14	4,8	16,2
15	10,4	15,4
16	3,0	13,2
17	0,0	12,6
18	2,2	12,4
19	4,2	13,0
20	0,2	12,1
21	0,0	11,2
22	0,0	11,0
23	0,0	12,2
24	0,0	12,0
25	0,0	12,3
26	0,0	12,2
27	0,0	12,6
28	2,6	12,7
29	4,8	13,5
30	0,0	13,8

Novembre 2015		
giorno	precipitazioni giornaliere (mm)	T media giornaliera (°C)
1	0,0	11,7
2	0,0	10,5
3	0,0	10,9
4	0,0	12,3
5	0,0	13,4
6	0,0	14,2
7	0,0	14,0
8	0,0	14,2
9	0,0	14,6
10	0,0	13,5
11	0,2	12,0
12	0,0	11,1
13	0,4	9,4
14	0,0	9,9
15	0,0	10,0
16	0,0	10,0
17	0,0	9,8
18	0,0	9,8
19	0,2	10,3
20	0,2	9,7
21	21,2	8,9
22	11,4	6,8
23	8,4	5,7
24	0,0	5,6
25	0,0	3,7
26	0,0	6,4
27	0,0	9,3
28	0,0	5,3
29	0,0	5,0
30	0,0	6,0
31	0,0	11,7

Dicembre 2015		
giorno	precipitazioni giornaliere (mm)	T media giornaliera (°C)
1	0,0	6,9
2	0,0	5,8
3	0,2	4,0
4	0,0	5,0
5	0,0	7,2
6	0,2	4,8
7	0,0	4,9
8	0,0	7,5
9	0,2	4,2
10	0,0	4,4
11	0,2	2,3
12	0,2	1,5
13	0,0	2,7
14	0,0	6,0
15	0,0	6,1
16	0,4	6,6
17	0,2	6,6
18	0,0	6,9
19	0,0	6,9
20	0,2	7,1
21	0,0	7,3
22	0,2	6,4
23	0,2	5,8
24	0,2	5,9
25	0,0	7,0
26	0,0	6,4
27	0,2	4,8
28	0,0	3,5
29	0,0	3,4
30	0,4	2,7
31	0,0	4,8

Gennaio 2016		
giorno	precipitazioni giornaliere (mm)	T media giornaliera (°C)
1	0,0	3,9
2	7,2	0,9
3	3,4	2,7
4	4,0	2,2
5	0,8	3,3
6	7,0	3,9
7	0,0	4,6
8	0,0	5,8
9	0,2	5,7
10	3,8	8,2
11	0,0	14,0
12	0,0	12,2
13	0,0	9,3
14	3,6	7,2
15	0,2	4,9
16	0,0	4,3
17	0,0	3,3
18	0,0	2,3
19	0,0	1,2
20	0,0	1,3
21	0,0	1,9
22	0,0	2,8
23	0,0	2,2
24	0,0	3,4
25	0,0	4,8
26	0,0	7,4
27	0,0	7,4
28	0,0	9,3
29	0,0	7,7
30	0,0	11,4
31	0,0	12,0

**Appendice B** – Coordinate, quota della boccapozzo del piezometro  $b_{BP}$ , misure mensili effettuate mediante freatimetro  $b_{BP}$ , quote della tavola d’acqua  $h_{WT}$  relative ad ogni punto di monitoraggio PdM.

PdM	coord. E	coord. N	$Z_{BP}$ (m.l.m.m)	$b_{BP}$ Set. (m)	$b_{BP}$ Ott. (m)	$b_{BP}$ Nov. (m)	$b_{BP}$ Dic. (m)	$b_{BP}$ Gen. (m)	$h_{WT}$ Settembre (m.l.m.m)	$h_{WT}$ Ottobre (m.l.m.m)	$h_{WT}$ Novembre (m.l.m.m)	$h_{WT}$ Dicembre (m.l.m.m)	$h_{WT}$ Gennaio (m.l.m.m)
PC1	286614,74	4916807,99	2,52	2,28	2,19	2,38	2,35	2,25	0,24	0,33	0,14	0,17	0,27
PC2	286577,09	4916802,33	2,23	2,24	2,09	2,18	2,13	2,13	-0,01	0,14	0,05	0,10	0,10
PC3	286440,59	4916796,49	2,03	2,28	2,12	2,10	2,06	2,07	-0,25	-0,09	-0,07	-0,03	-0,04
MR1	283792,71	4933823,07	2,97	2,60	2,55	2,78	2,86	2,63	0,37	0,42	0,19	0,11	0,34
MR2	283765,00	4933809,80	3,06	2,60	2,53	2,72	2,78	2,62	0,46	0,53	0,34	0,28	0,44
MR3	283635,00	4933809,80	1,50	1,45	1,31	1,40	1,42	1,38	0,05	0,19	0,10	0,08	0,12

**Appendice C – Parametri chimico-fisici**

SETTEMBRE						
PdM	minifiltro	Data (m l.m.m)	EC (mS/cm)	T (°C)	pH	S (g/L)
PC1	TOP	24/09/2015	1,15	20,1	7,9	0,47
PC1	4	24/09/2015	3,13	22,1	6,9	1,34
PC1	5	24/09/2015	1,41	20,4	7,3	0,58
PC1	6	24/09/2015	2,99	19,7	7,7	1,28
PC1	7	24/09/2015	13,76	19,8	7,6	6,50
PC2	TOP	24/09/2015	0,43	20,1	8,2	0,17
PC2	7	24/09/2015	10,84	21,5	7,7	5,03
PC2	8	24/09/2015	26,31	21,3	7,5	13,14
PC3	TOP	24/09/2015	0,48	23,6	8,3	0,19
PC3	4	24/09/2015	0,49	23,6	8,0	0,20
PC3	5	24/09/2015	0,53	20,3	8,1	0,21
PC3	6	24/09/2015	1,77	17,9	8,1	0,74
PC3	7	24/09/2015	12,26	17,7	7,8	5,74
MR1	TOP	24/09/2015	0,95	18,6	7,6	0,39
MR1	6	24/09/2015	12,50	17,9	7,1	5,86
MR2	TOP	24/09/2015	0,61	17,9	7,6	0,24
MR2	4	24/09/2015	0,61	17,9	7,6	0,24
MR2	5	24/09/2015	0,67	18,8	7,6	0,27
MR2	6	24/09/2015	9,98	17,6	7,4	4,60
MR2	7	24/09/2015	27,31	17,1	7,3	13,69
MR2	8	24/09/2015	31,00	17,2	7,3	15,73
MR3	TOP	24/09/2015	20,00	17,0	7,6	5,16
MR3	4	24/09/2015	19,40	16,7	7,6	9,43
MR3	5	24/09/2015	32,40	16,4	7,5	16,51
MR3	6	24/09/2015	37,49	15,8	7,5	19,38
MR3	7	24/09/2015	38,85	16,0	7,4	20,16
MR3	8	24/09/2015	38,86	15,4	7,4	20,16
CANALE		24/09/2015	21,53	18,0	7,2	10,56
MARE		24/09/2015	27,50	18,6	8,2	13,79

OTTOBRE						
PdM	minifiltro	Data	EC (mS/cm)	T (°C)	pH	S (g/L)
PC1	TOP	20/10/2015	0,75	19,4	8,4	0,30
PC1	4	20/10/2015	1,00	18,6	8,2	0,41
PC1	5	20/10/2015	1,38	18,5	8,3	0,57
PC1	6	20/10/2015	4,50	17,5	8,2	1,97
PC1	7	20/10/2015	17,10	17,2	8,0	8,23
PC1	8	20/10/2015	32,00	17,0	7,9	16,28
PC2	TOP	20/10/2015	0,50	19,8	8,6	0,20
PC2	7	20/10/2015	11,93	20,0	8,1	5,58
PC2	8	20/10/2015	21,25	18,1	8,0	10,41
PC3	TOP	20/10/2015	0,45	19,6	8,2	0,18
PC3	4	20/10/2015	0,50	18,7	8,6	0,20
PC3	5	20/10/2015	0,53	18,8	8,5	0,21
PC3	6	20/10/2015	2,49	19,0	8,3	1,05
PC3	7	20/10/2015	7,14	18,1	8,1	3,22
MR1	TOP	20/10/2015	0,12	19,6	8,2	0,05
MR1	5	20/10/2015	3,11	23,1	8,1	1,33
MR1	6	20/10/2015	13,07	19,8	8,2	6,15
MR2	TOP	20/10/2015	0,63	16,5	8,4	0,25
MR2	5	20/10/2015	0,63	17,9	8,3	0,25
MR2	6	20/10/2015	14,43	16,6	7,9	6,85
MR2	7	20/10/2015	29,40	15,8	8,0	14,84
MR3	TOP	20/10/2015	11,10	16,6	7,5	5,16
MR3	2	20/10/2015	13,63	16,3	7,5	6,44
MR3	4	20/10/2015	25,02	16,2	7,5	12,44
MR3	5	20/10/2015	32,30	16,0	7,4	16,45
MR3	6	20/10/2015	36,49	15,5	7,4	18,81
MR3	7	20/10/2015	38,00	16,1	7,4	19,67
MR3	8	20/10/2015	39,10	16,6	7,6	20,30
CANALE		20/10/2015	21,53	21,53	18,0	7,2
MARE		20/10/2015	27,50	27,50	18,6	8,2

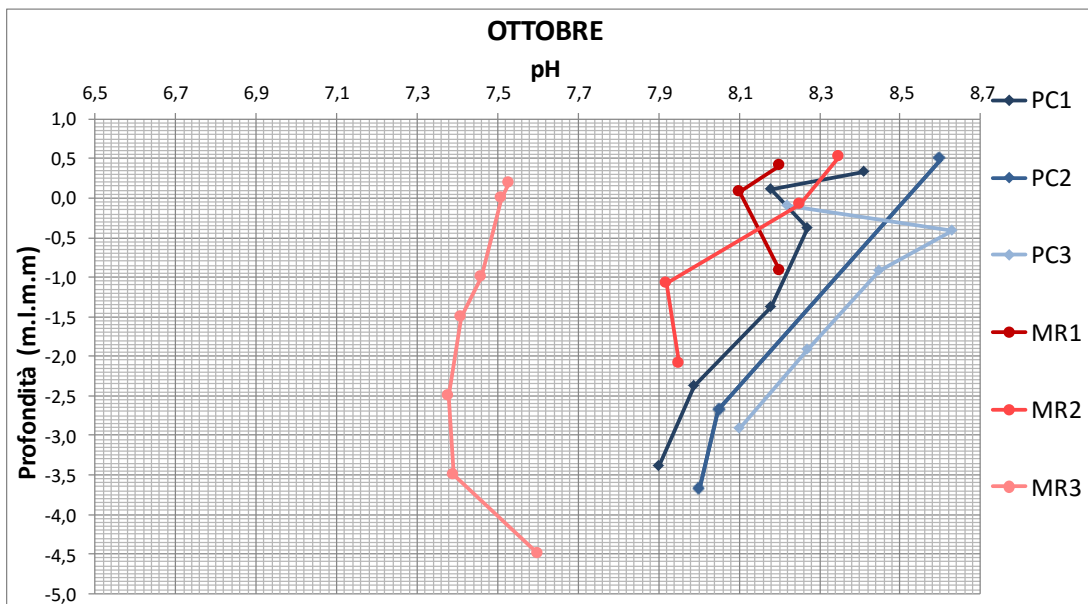
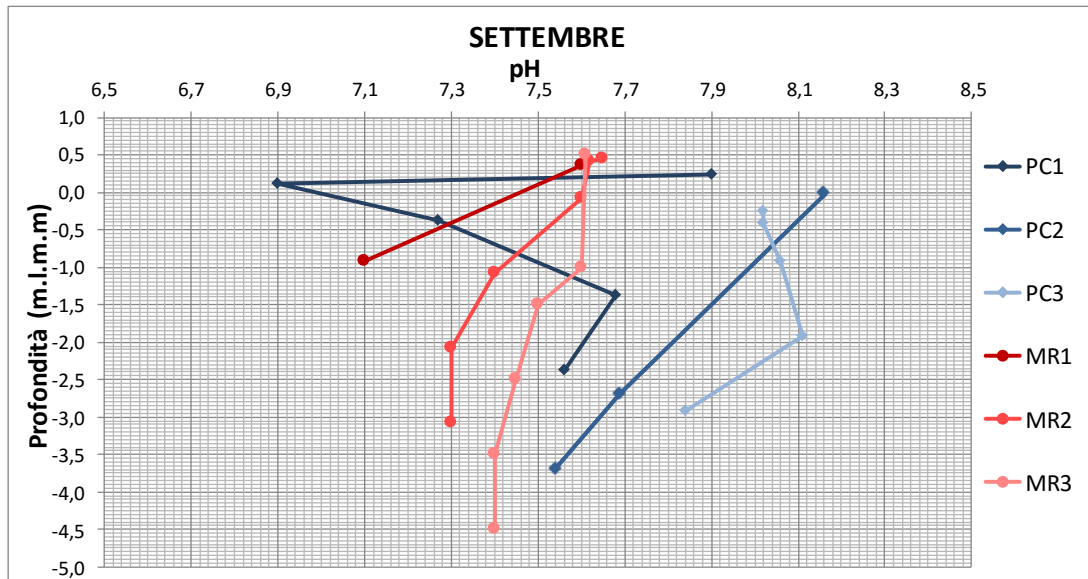
NOVEMBRE						
PdM	minifiltro	Data	EC (mS/cm)	T (°C)	pH	S (g/L)
PC1	TOP	12/11/2015	0,91	15,2	8,0	0,37
PC1	4	12/11/2015	0,93	15,4	8,2	0,38
PC1	5	12/11/2015	1,09	17,0	8,3	0,45
PC1	6	12/11/2015	3,19	17,3	8,2	1,37
PC1	7	12/11/2015	15,97	17,1	7,9	7,64
PC1	8	12/11/2015	31,49	16,7	7,6	16,00
PC2	TOP	12/11/2015	0,51	14,9	8,3	0,21
PC2	7	12/11/2015	12,41	16,0	7,8	5,82
PC2	8	12/11/2015	27,50	16,1	7,7	13,79
PC3	TOP	12/11/2015	0,51	15,1	8,0	0,20
PC3	4	12/11/2015	0,52	14,4	8,1	0,21
PC3	5	12/11/2015	0,52	15,5	8,0	0,21
PC3	6	12/11/2015	1,27	15,6	8,1	0,52
PC3	7	12/11/2015	15,04	15,0	7,7	7,16
MR1	TOP	12/11/2015	1,49	15,4	7,7	0,61
MR1	5	12/11/2015	1,98	15,4	7,7	0,83
MR1	6	12/11/2015	13,61	16,2	7,7	6,43
MR2	TOP	12/11/2015	0,71	15,2	7,8	0,28
MR2	5	12/11/2015	0,60	15,5	7,9	0,24
MR2	6	12/11/2015	8,00	16,4	7,6	3,63
MR2	7	12/11/2015	29,17	16,5	7,5	14,71
MR3	TOP	12/11/2015	11,08	14,2	7,3	5,15
MR3	2	12/11/2015	13,80	14,8	7,3	6,52
MR3	4	12/11/2015	11,54	14,3	7,2	5,38
MR3	5	12/11/2015	21,14	15,0	6,8	10,35
MR3	6	12/11/2015	32,64	14,8	6,9	16,64
MR3	7	12/11/2015	38,03	14,6	6,9	19,69
MR3	8	12/11/2015	38,95	14,2	7,2	20,21
CANALE		12/11/2015	31,33	14,7	7,4	15,91
MARE		12/11/2015	27,50	18,6	8,2	13,79

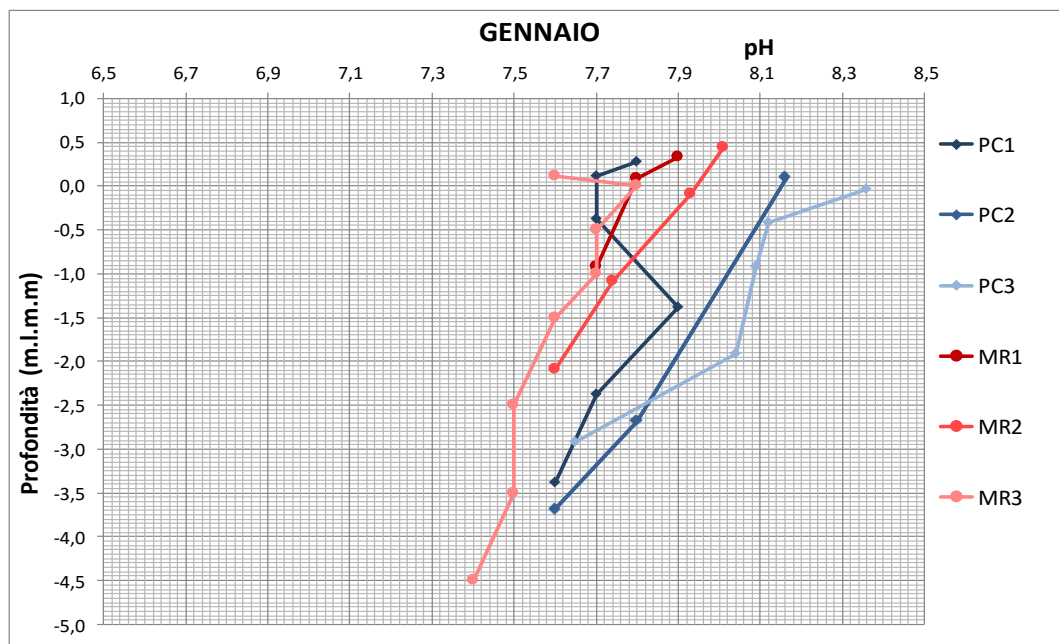
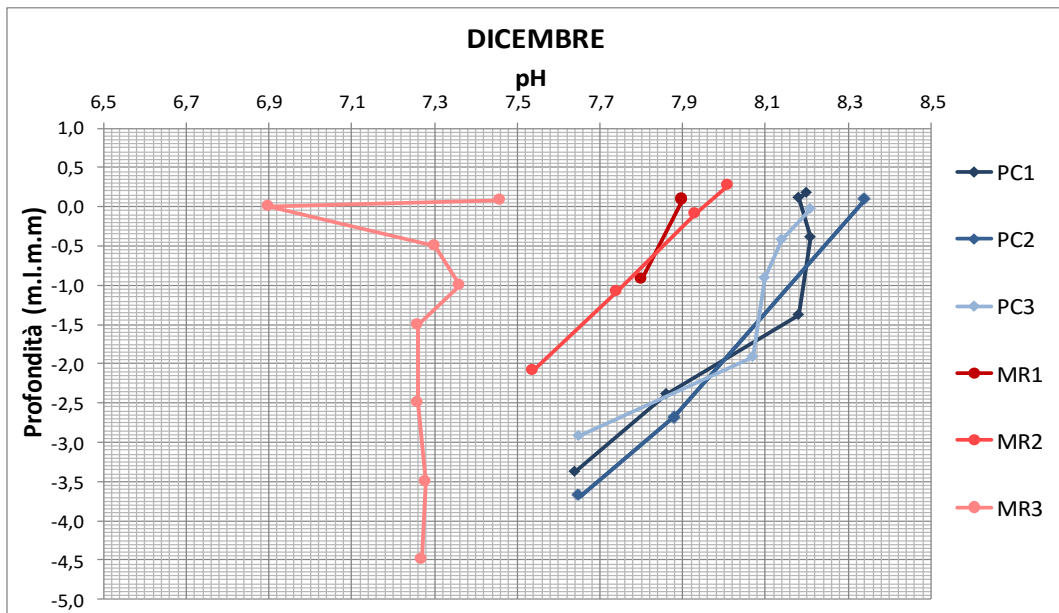
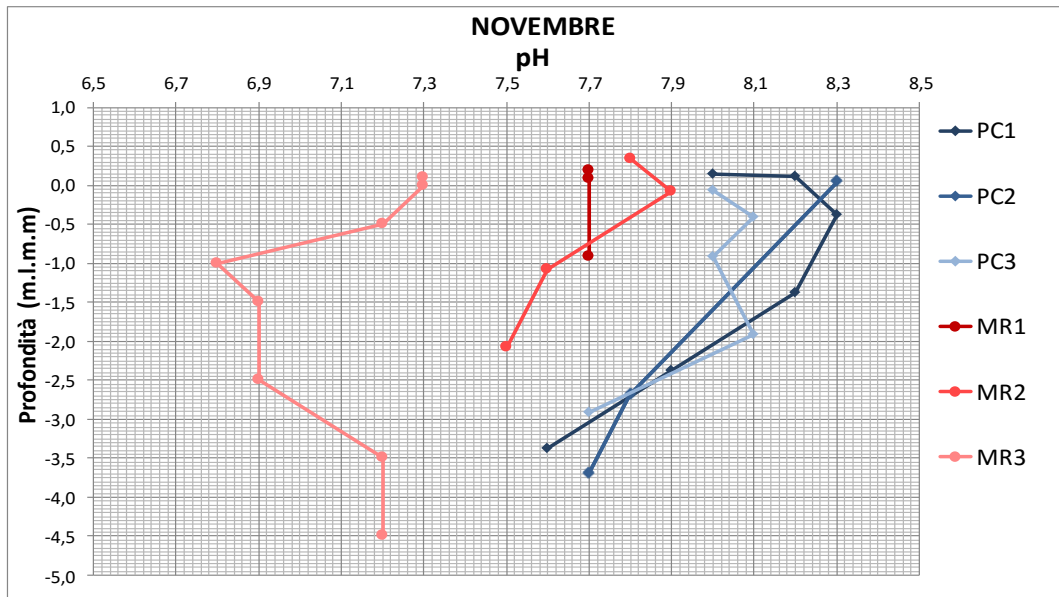
DICEMBRE						
PdM	Minifiltro	Data	EC (ms/cm)	T (°C)	pH	S (g/l)
PC1	TOP	11/12/2015	1,63	11,5	8,2	0,68
PC1	4	11/12/2015	1,70	11,5	8,2	0,71
PC1	5	11/12/2015	1,71	12,9	8,2	0,71
PC1	6	11/12/2015	1,93	13,6	8,2	0,81
PC1	7	11/12/2015	15,67	14,2	7,9	7,48
PC1	8	11/12/2015	31,12	13,6	7,6	15,79
PC2	TOP	11/12/2015	0,57	11,9	8,3	0,23
PC2	7	11/12/2015	12,87	11,4	7,9	6,05
PC2	8	11/12/2015	28,02	12,7	7,7	14,08
PC3	TOP	11/12/2015	0,54	11,9	8,2	0,22
PC3	4	11/12/2015	0,54	12,3	8,1	0,22
PC3	5	11/12/2015	0,54	13,1	8,1	0,22
PC3	6	11/12/2015	0,94	14,3	8,1	0,38
PC3	7	11/12/2015	15,33	13,6	7,7	7,31
MR1	TOP	11/12/2015	1,94	9,3	7,9	0,81
MR1	5	11/12/2015	2,12	10,6	7,9	0,89
MR1	6	11/12/2015	13,37	12,9	7,8	6,30
MR2	TOP	11/12/2015	0,81	13,7	8,0	0,33
MR2	5	11/12/2015	0,70	14,1	7,9	0,28
MR2	6	11/12/2015	6,18	14,8	7,7	2,76
MR2	7	11/12/2015	29,32	14,8	7,5	14,79
MR3	TOP	11/12/2015	11,37	11,7	7,5	5,30
MR3	2	11/12/2015	13,77	10,5	6,9	6,51
MR3	3	11/12/2015	11,55	8,9	7,3	5,39
MR3	4	11/12/2015	20,75	12,5	7,4	10,15
MR3	5	11/12/2015	32,75	12,7	7,3	16,70
MR3	6	11/12/2015	38,24	12,9	7,3	19,81
MR3	7	11/12/2015	39,30	12,6	7,3	20,41
MR3	8	11/12/2015	39,67	12,8	7,3	20,63
CANALE		11/12/2015	28,03	8,1	7,6	14,08
MARE		11/12/2015	27,50	18,6	8,2	13,79



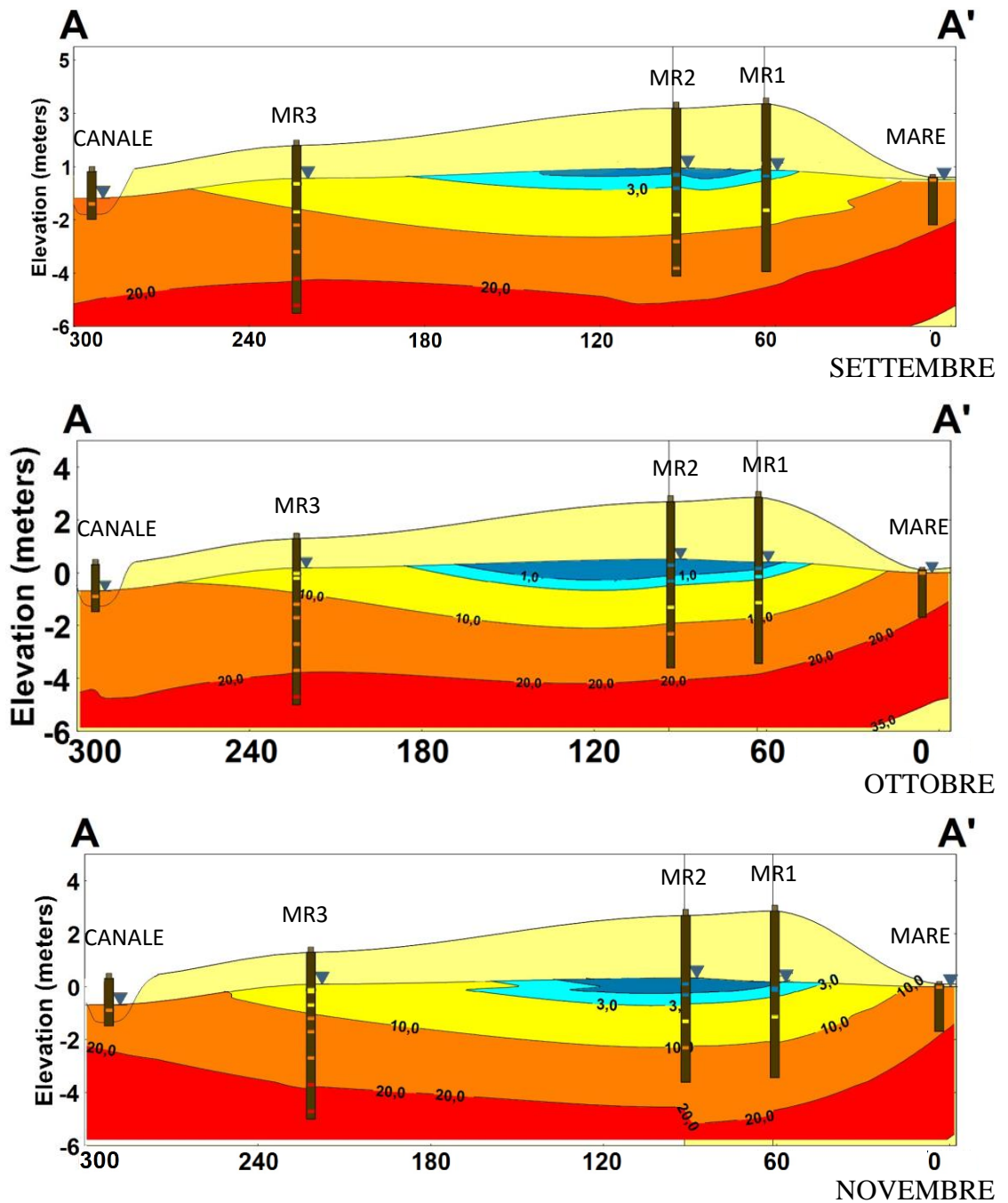
GENNAIO						
PdM	Minifiltro	data	EC (ms/cm)	T (°C)	pH	S (g/l)
PC1	TOP	14/01/2016	1,60	13,6	7,8	0,66
PC1	4	14/01/2016	1,68	13,8	7,7	0,70
PC1	5	14/01/2016	1,97	14,0	7,7	0,82
PC1	6	14/01/2016	5,09	14,3	7,9	2,24
PC1	7	14/01/2016	15,75	14,6	7,7	7,52
PC1	8	14/01/2016	30,91	14,1	7,6	15,68
PC2	TOP	14/01/2016	0,54	13,5	8,2	0,22
PC2	7	14/01/2016	12,53	13,2	7,8	5,88
PC2	8	14/01/2016	27,73	13,4	7,6	13,92
PC3	TOP	14/01/2016	0,56	11,2	8,4	0,23
PC3	4	14/01/2016	0,61	11,5	8,1	0,25
PC3	5	14/01/2016	0,65	12,7	8,1	0,26
PC3	6	14/01/2016	0,86	13,2	8,0	0,35
PC3	7	14/01/2016	14,56	13,8	7,7	6,91
MR1	TOP	14/01/2016	2,03	13,2	7,9	0,85
MR1	5	14/01/2016	2,56	13,0	7,8	1,08
MR1	6	14/01/2016	16,09	14,0	7,7	7,70
MR2	TOP	14/01/2016	1,11	13,8	8,0	0,45
MR2	5	14/01/2016	1,03	13,9	7,9	0,42
MR2	6	14/01/2016	8,85	14,8	7,7	4,04
MR2	7	14/01/2016	29,37	14,8	7,6	14,82
MR3	TOP	14/01/2016	10,73	11,3	7,6	4,98
MR3	2	14/01/2016	13,62	11,0	7,8	6,43
MR3	3	14/01/2016	11,19	10,4	7,7	5,20
MR3	4	14/01/2016	20,36	11,5	7,7	9,94
MR3	5	14/01/2016	32,42	12,3	7,6	16,52
MR3	6	14/01/2016	38,69	12,7	7,5	20,06
MR3	7	14/01/2016	39,34	13,1	7,5	20,44
MR3	8	14/01/2016	39,59	13,1	7,4	20,58
CANALE		14/01/2016	14,70	7,4	7,8	6,98

Appendice D – Profili verticali del pH

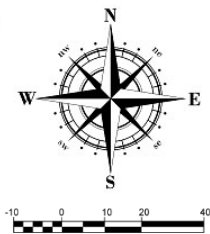




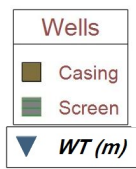
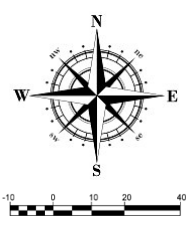
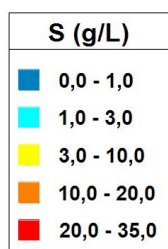
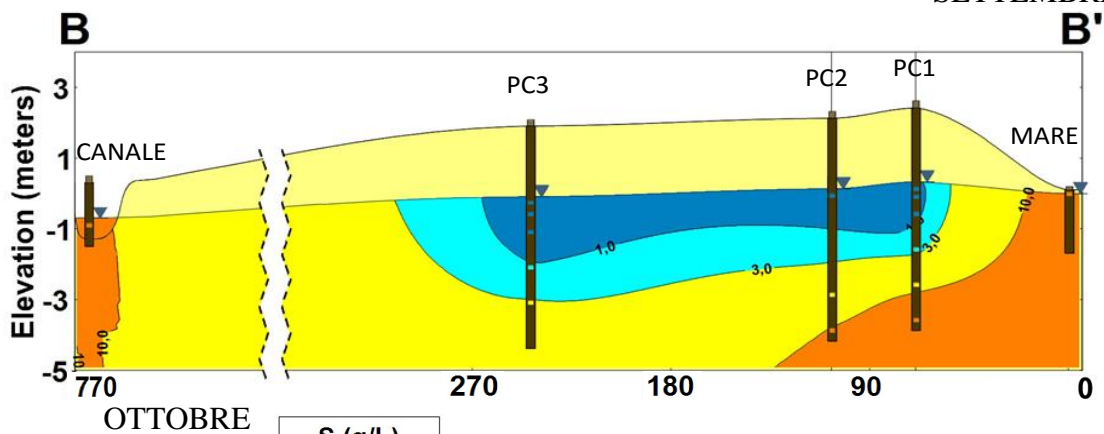
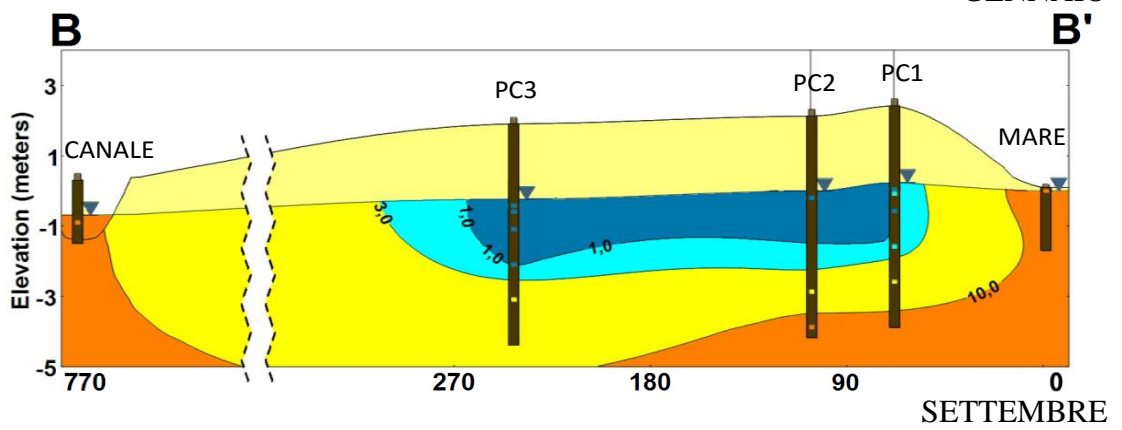
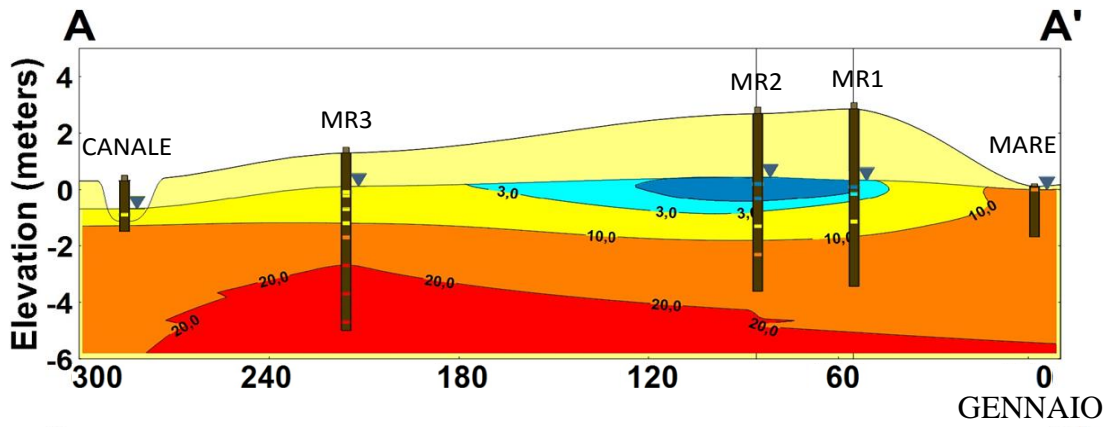
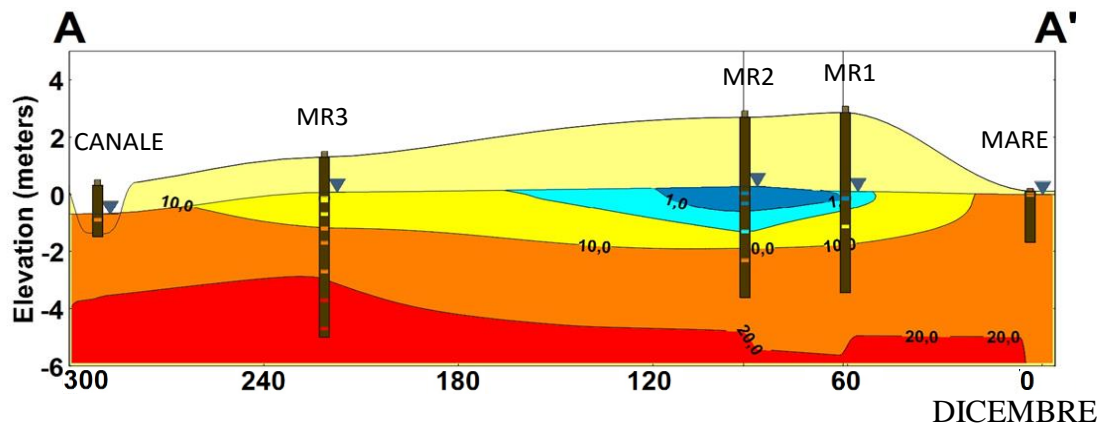
Appendice E – Rappresentazioni EnviroInsite della salinità

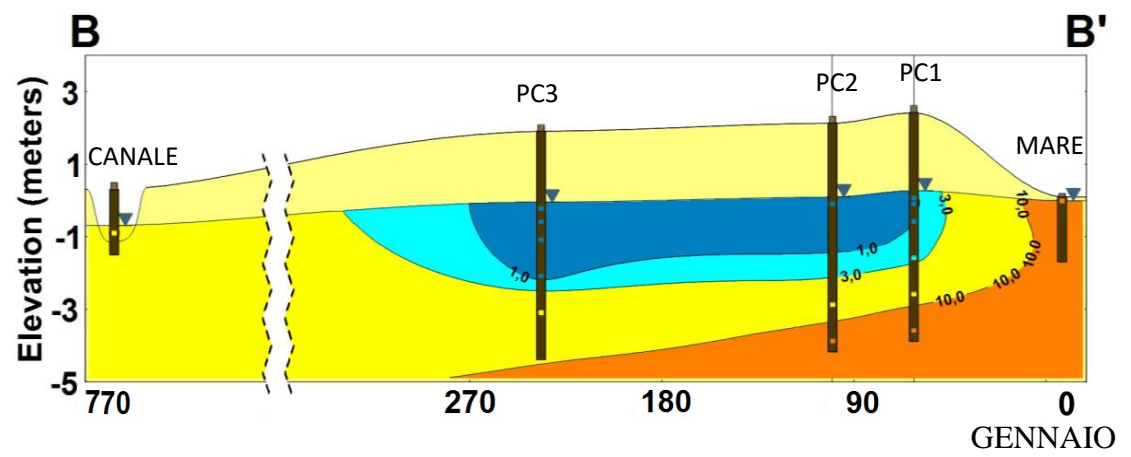
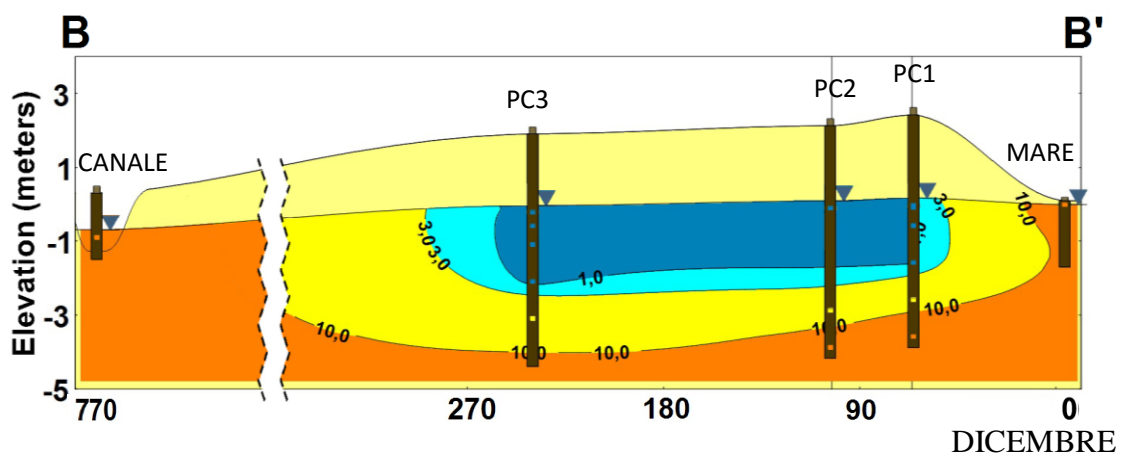
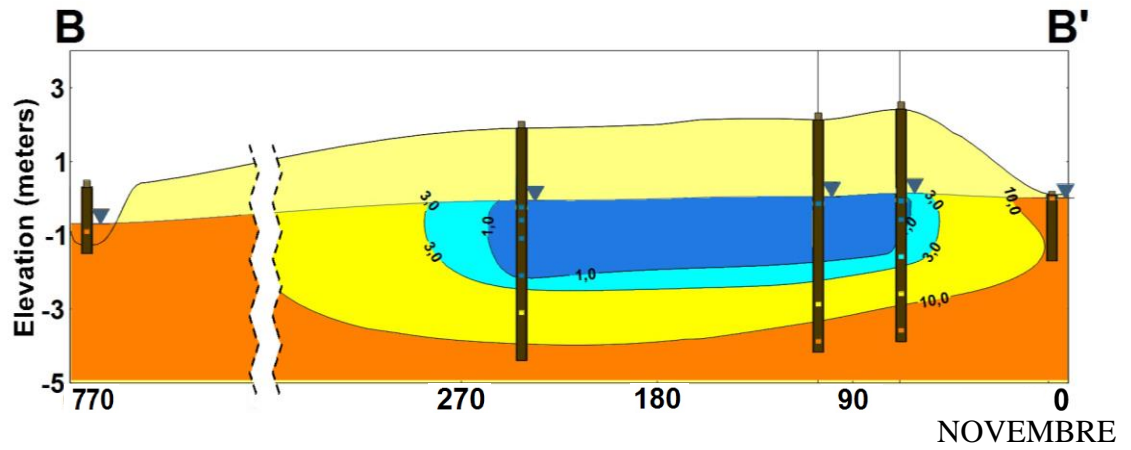


S (g/L)	
	0,0 - 1,0
	1,0 - 3,0
	3,0 - 10,0
	10,0 - 20,0
	20,0 - 35,0

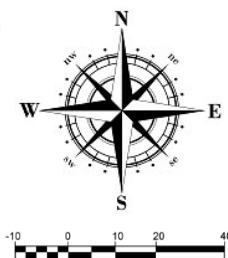


Wells	
	Casing
	Screen
▼	WT (m)



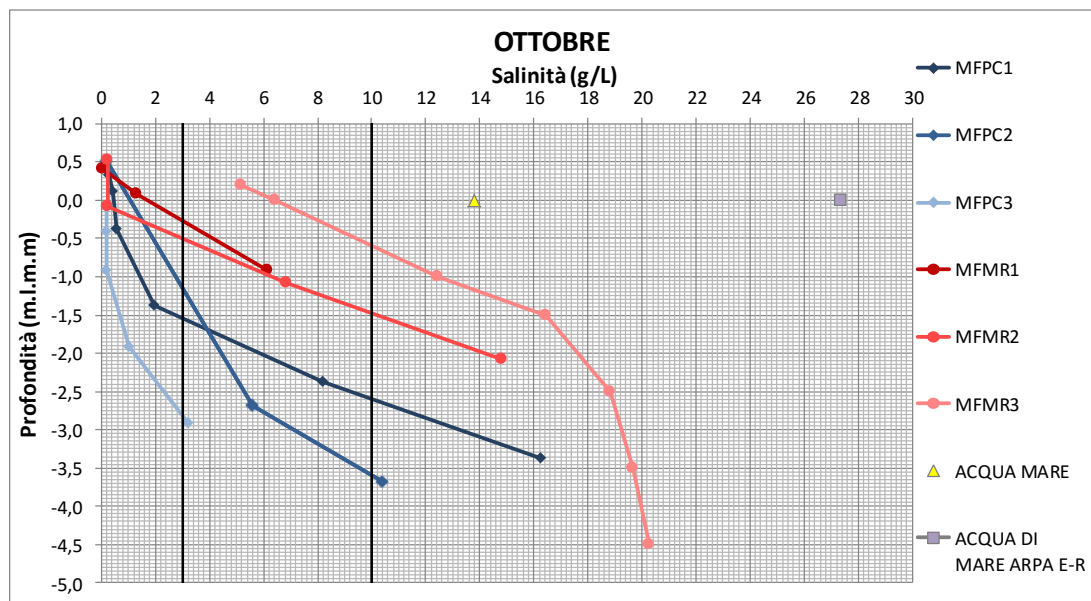
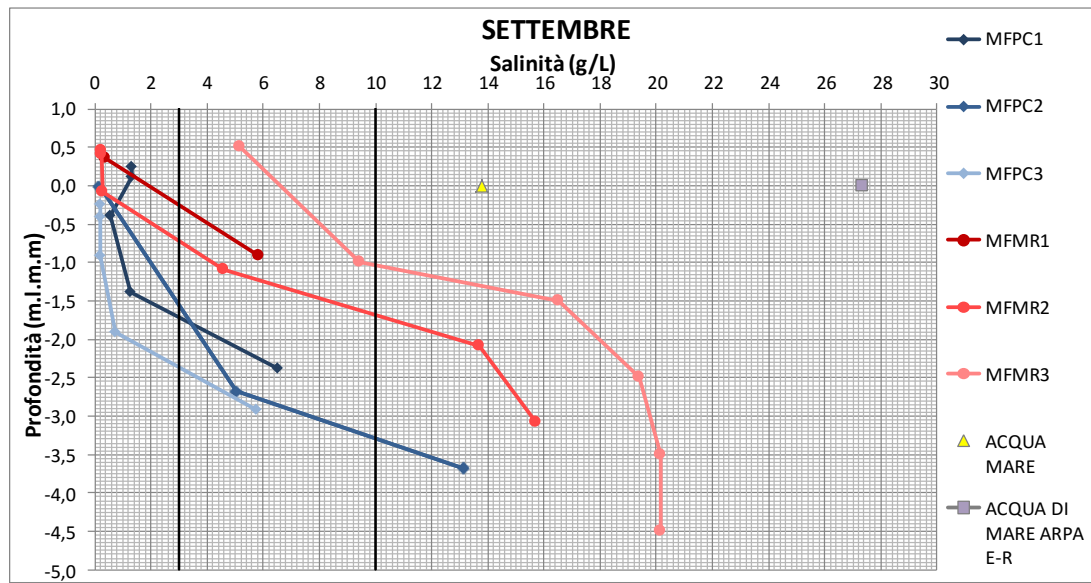


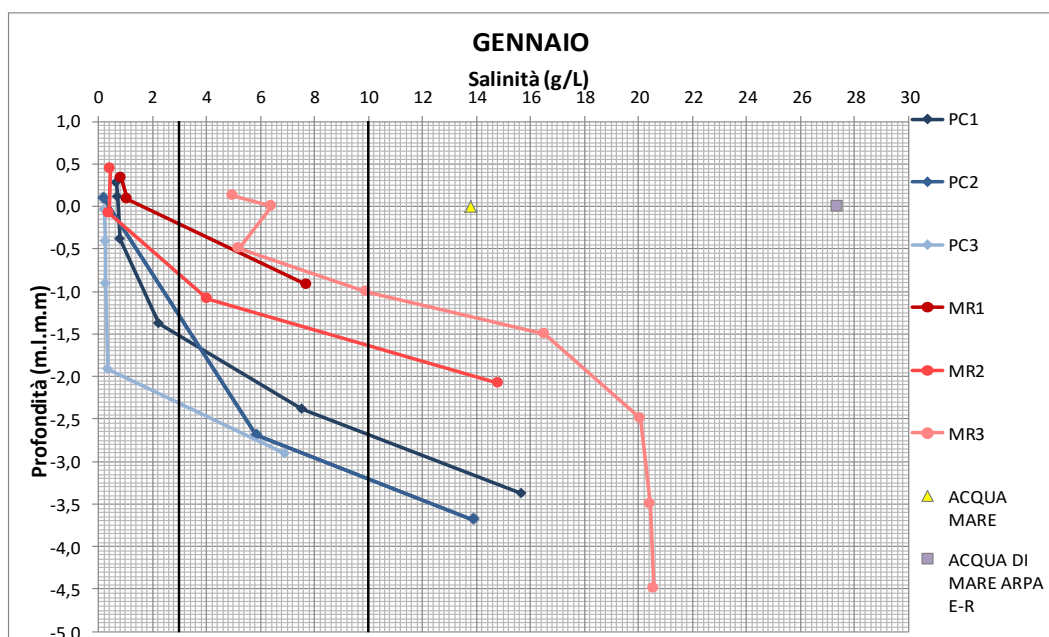
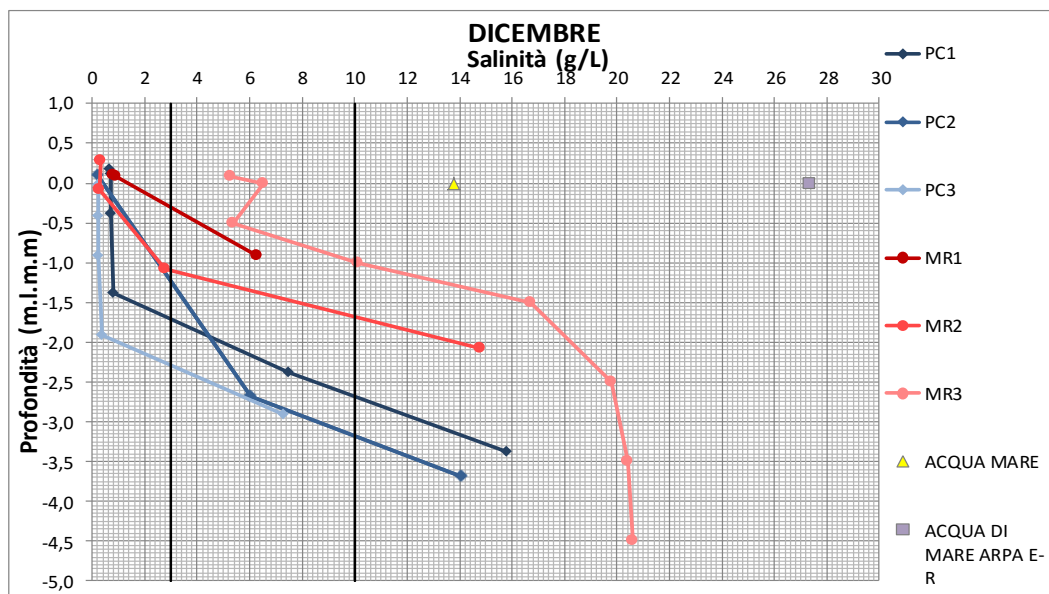
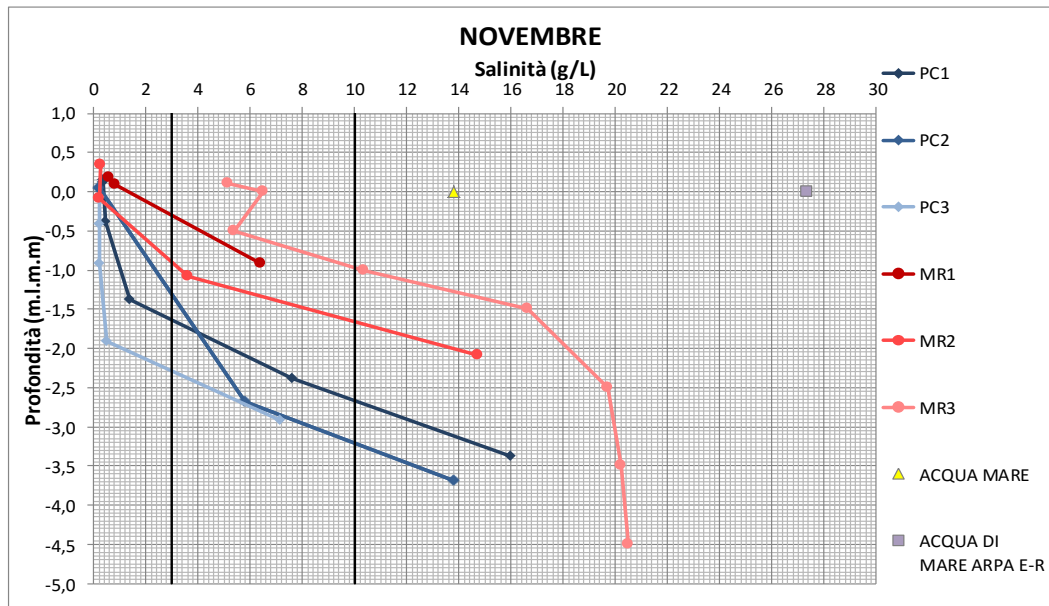
S (g/L)	
	0,0 - 1,0
	1,0 - 3,0
	3,0 - 10,0
	10,0 - 20,0
	20,0 - 35,0



Wells	
	Casing
	Screen
▼	WT (m)

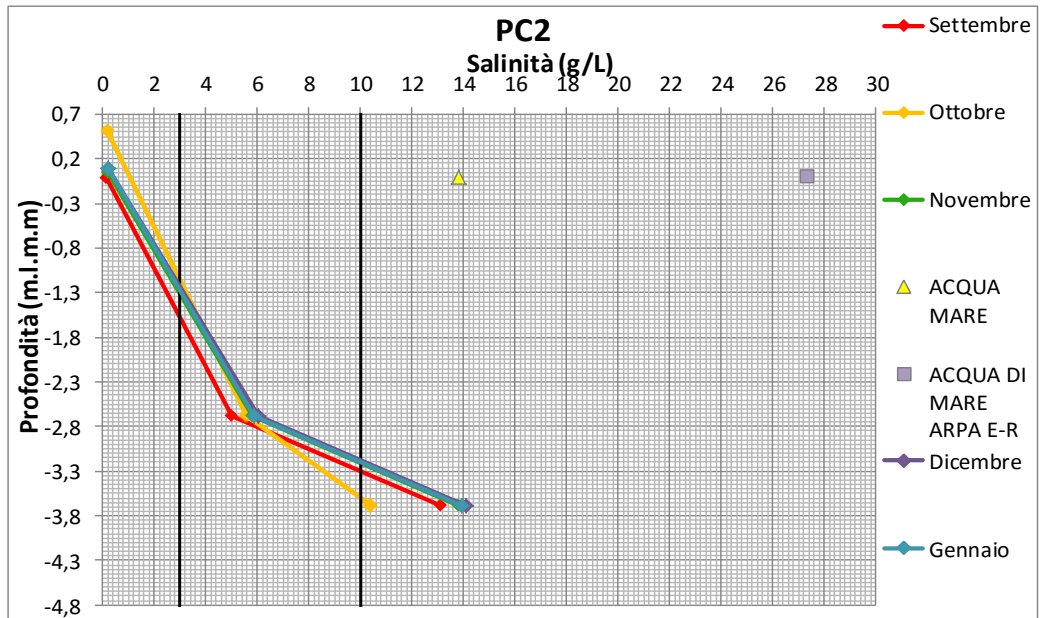
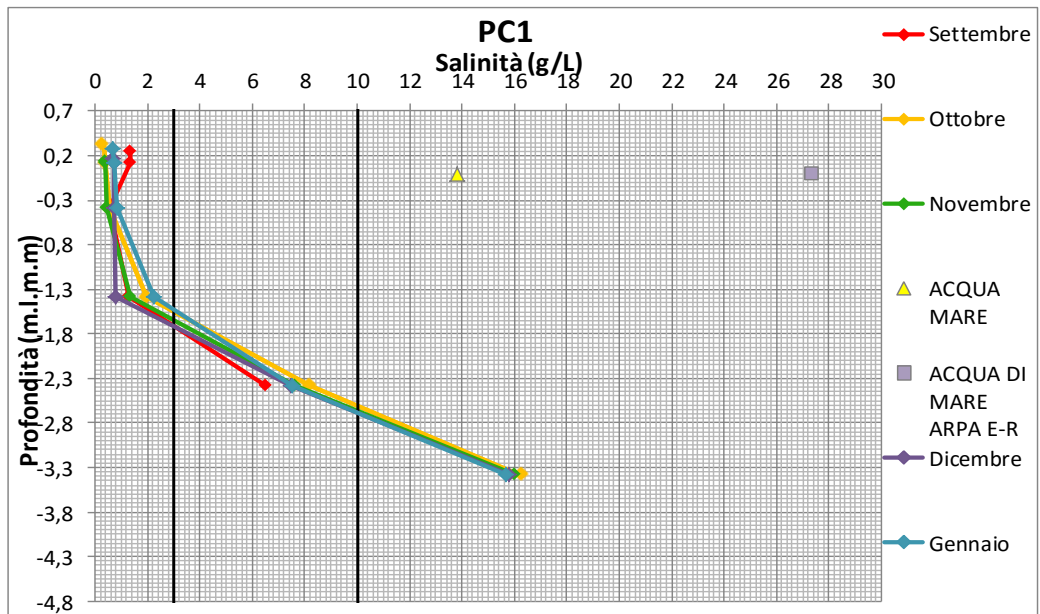
Appendice F – Profili verticali della salinità per mese

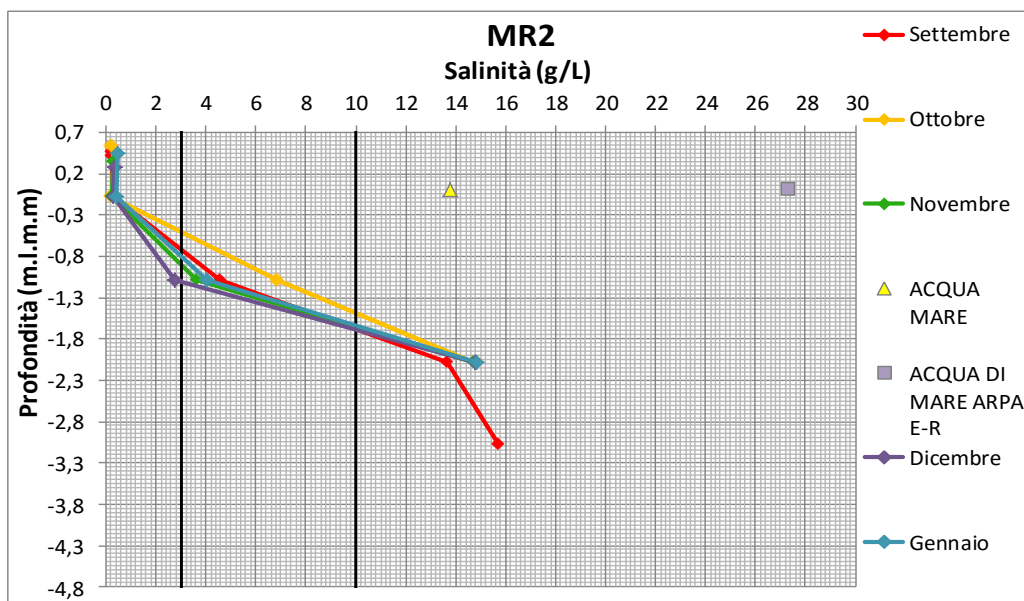
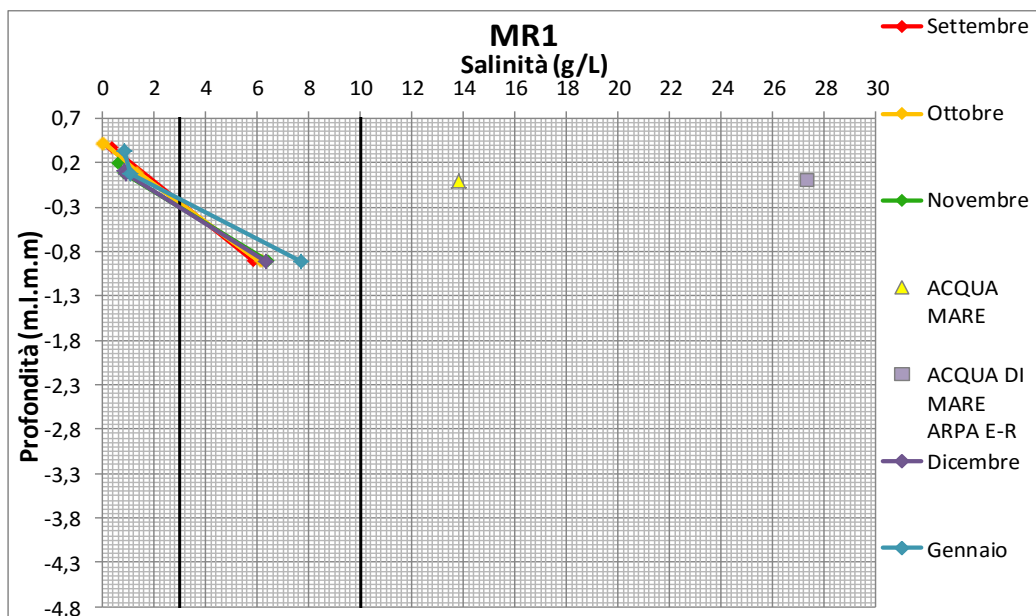
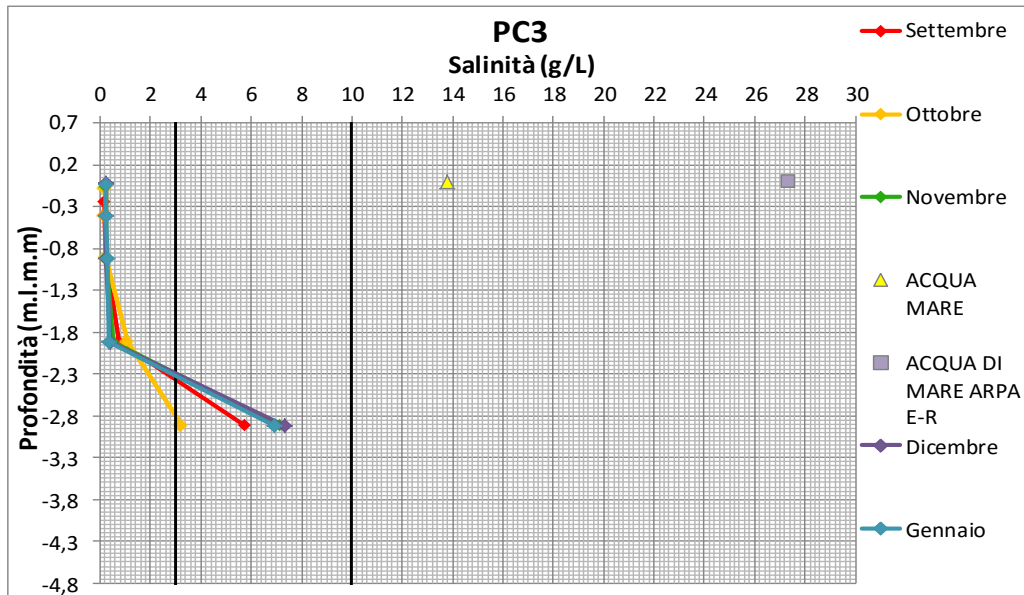


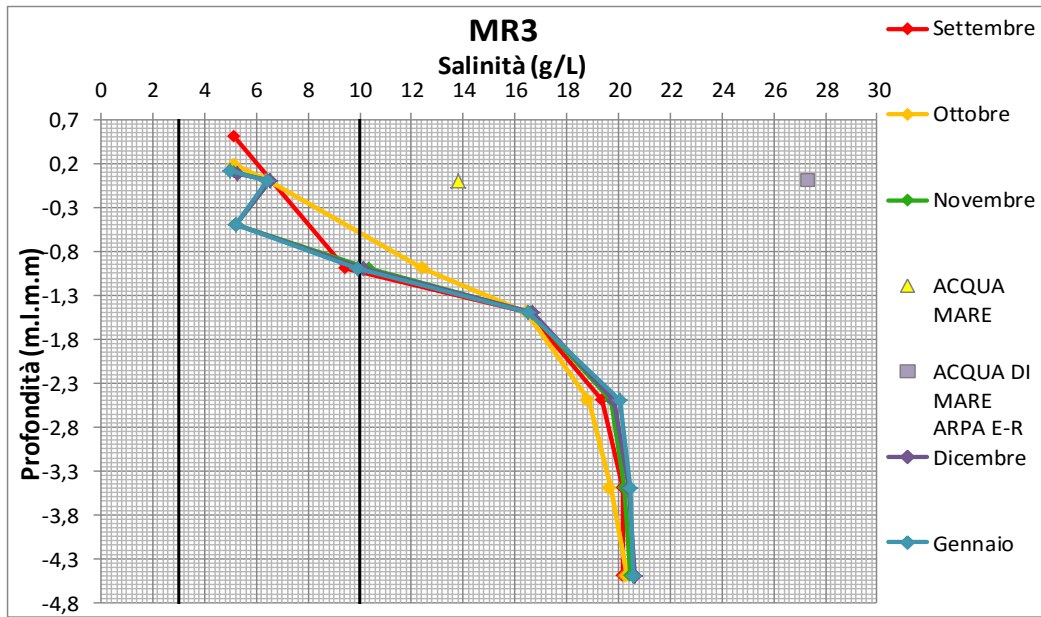




Appendice G – Profili verticali della salinità per PdM







**Appendice H – Dati delle concentrazioni**

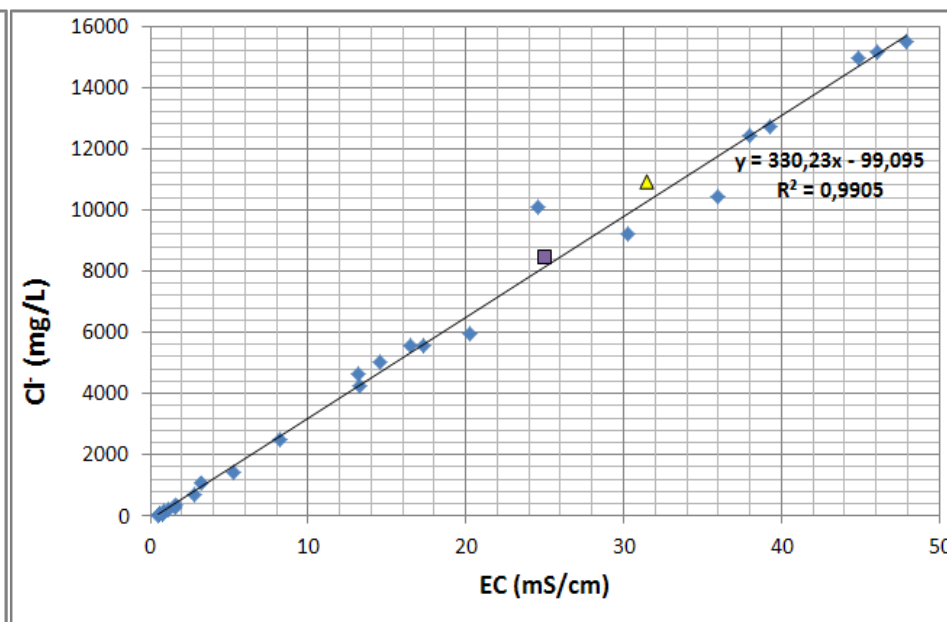
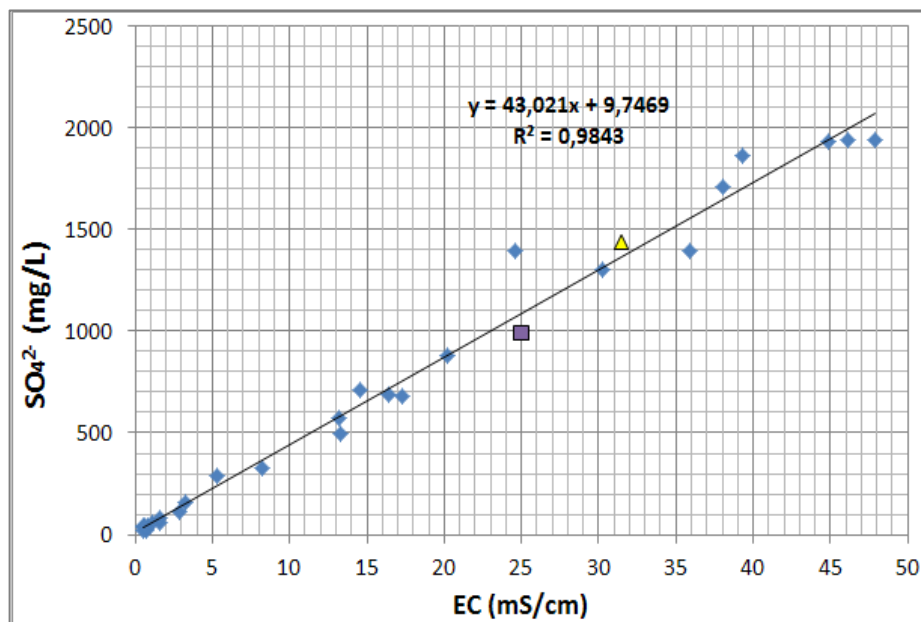
Cationi								
PdM	minifiltro	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	Fe <sup>2+</sup> (mg/L)	Fe <sup>3+</sup> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)
PC1	TOP	0,00	0,04	0,00	39,9	34,4	16,6	69,4
PC1	4	0,06	0,00	0,19	41,9	35,0	28,3	104,6
PC1	5	0,09	0,00	0,01	25,0	21,7	28,5	228,9
PC1	6	0,54	0,01	0,36	34,5	58,9	49,9	856,6
PC1	7	1,00	0,32	0,00	126,2	322,8	154,7	3232,0
PC1	8	3,00	2,65	0,75	278,1	734,8	259,3	5909,3
PC2	TOP	n.d.	0,00	0,05	44,4	21,4	11,8	56,7
PC2	7	1,30	0,15	0,03	137,2	332,5	136,6	1974,7
PC2	8	2,00	3,18	0,42	260,6	681,8	254,7	5288,8
PC3	TOP	n.d.	0,07	0,00	51,5	22,4	10,6	22,8
PC3	4	n.d.	0,07	0,00	38,7	25,7	16,6	34,5
PC3	5	n.d.	0,00	0,05	33,4	25,7	19,0	35,4
PC3	6	n.d.	0,14	0,00	39,4	44,3	38,1	399,8
PC3	7	2,90	0,11	0,30	39,9	34,4	16,6	69,4
MR1	TOP	0,03	0,12	0,00	87,5	25,4	18,2	179,7
MR1	5	0,20	0,29	0,00	213,6	70,5	26,1	347,7
MR1	6	0,20	0,10	0,07	137,8	239,8	120,4	2412,2
MR2	TOP	0,06	0,36	0,07	72,2	13,3	10,4	29,3
MR2	5	0,17	0,32	0,09	74,5	18,6	11,7	39,1
MR2	6	1,30	0,19	0,00	179,7	323,8	123,4	2539,1
MR2	7	0,80	0,26	0,03	239,5	663,0	252,7	5400,8
MR3	TOP	0,13	0,10	0,00	310,4	297,9	88,1	1660,6
MR3	2	0,24	0,16	0,26	333,5	331,5	100,3	2761,4
MR3	4	0,70	0,67	0,05	333,5	542,4	144,3	4415,0
MR3	5	1,40	1,07	0,00	374,4	797,7	192,5	6074,3
MR3	6	2,60	1,97	0,00	385,6	938,2	268,6	6987,0
MR3	7	5,50	5,80	0,60	374,4	980,7	282,5	7377,4
MR3	8	7,50	5,50	4,80	367,0	1035,6	291,2	7601,9
CANALE		0,06	0,38	2,15	365,3	549,3	167,4	3968,9
MARE		3,50	0,03	0,06	241,1	665,6	228,5	5058,3

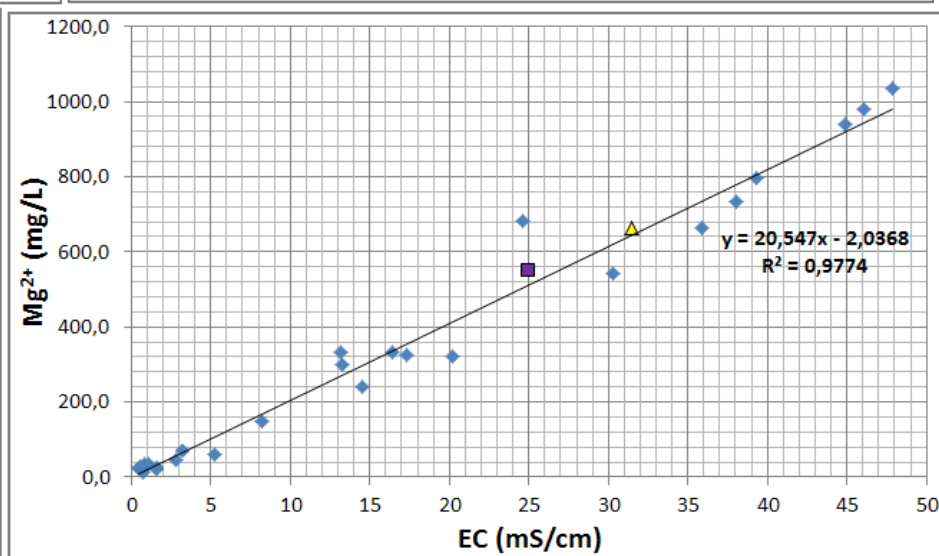
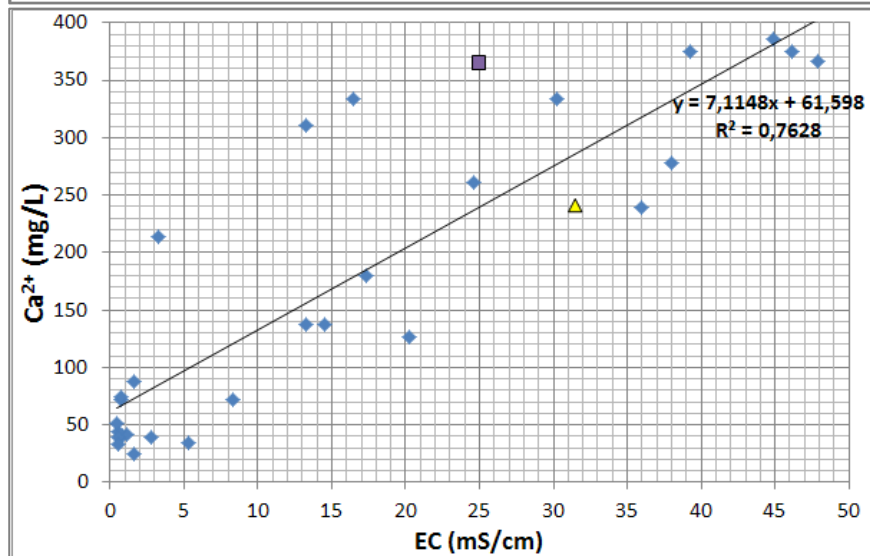
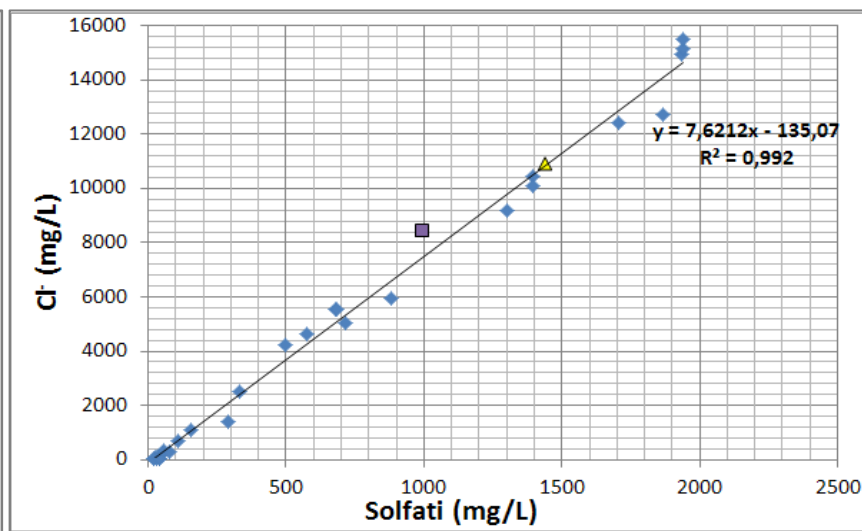
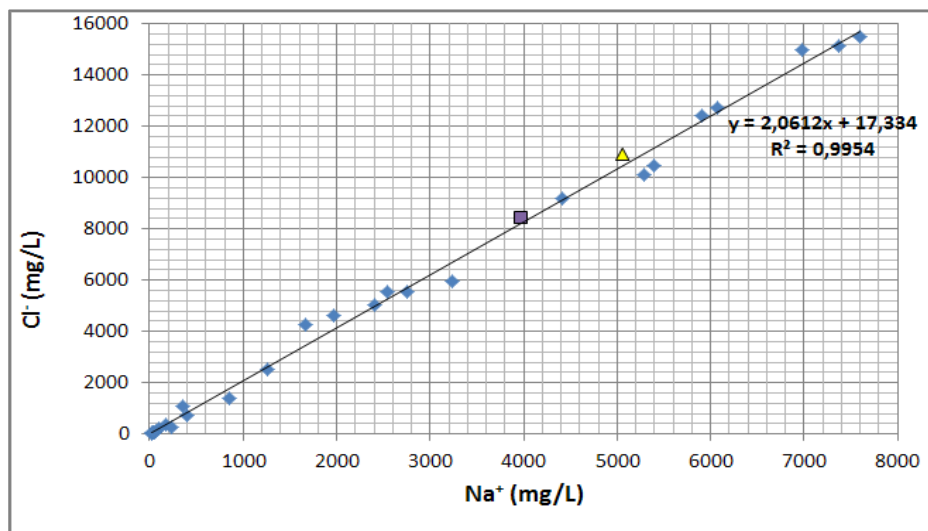
Anioni							
PdM	minifiltro	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	F <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	Br <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)
PC1	TOP	268,5	0,21	133	0,30	3,63	43,4
PC1	4	268,5	0,25	221	0,56	9,23	54,4
PC1	5	384,4	0,39	283	0,76	8,49	79,8
PC1	6	500,4	0,92	1411	4,30	1,35	291,1
PC1	7	323,4	0,32	5972	18,14	2,94	881,9
PC1	8	262,4	0,38	12440	38,50	n.d.	1708,7
PC2	TOP	262,4	1,15	52	n.d.	6,31	33,1
PC2	7	250,2	3,57	4628	14,25	2,40	574,3
PC2	8	274,6	0,33	10091	30,87	2,83	1395,1
PC3	TOP	299,0	0,41	30	n.d.	0,26	19,2
PC3	4	280,7	0,35	48	0,09	0,23	39,1
PC3	5	274,6	0,44	51	n.d.	0,18	41,9
PC3	6	445,5	0,50	706	2,18	0,31	108,1
PC3	7	341,7	0,28	2515	7,67	2,04	330,0
MR1	TOP	292,9	0,14	355	0,73	9,58	59,2
MR1	5	225,8	1,35	1077	2,92	26,68	154,7
MR1	6	286,8	0,24	5018	14,73	22,40	713,4
MR2	TOP	219,7	0,36	46	0,10	52,01	19,9
MR2	5	262,4	0,24	75	0,19	23,58	23,6
MR2	6	292,9	0,04	5558	16,67	9,66	681,8
MR2	7	238,0	n.d.	10449	31,60	0,34	1394,6
MR3	TOP	494,3	1,64	4242	11,61	4,74	498,3
MR3	2	396,6	2,61	5553	16,40	0,96	686,0
MR3	4	335,6	n.d.	9192	28,29	1,43	1301,8
MR3	5	274,6	n.d.	12718	36,95	1,61	1865,1
MR3	6	311,2	n.d.	14974	46,80	0,89	1935,8
MR3	7	299,0	n.d.	15141	47,26	n.d.	1939,2
MR3	8	323,4	0,96	15491	49,12	n.d.	1938,4
CANALE		402,7	n.d.	8453	25,86	3,14	991,8
MARE		189,1	22,77	10921	31,20	21,94	1439,0

**Appendice I – Bilancio Ionico**

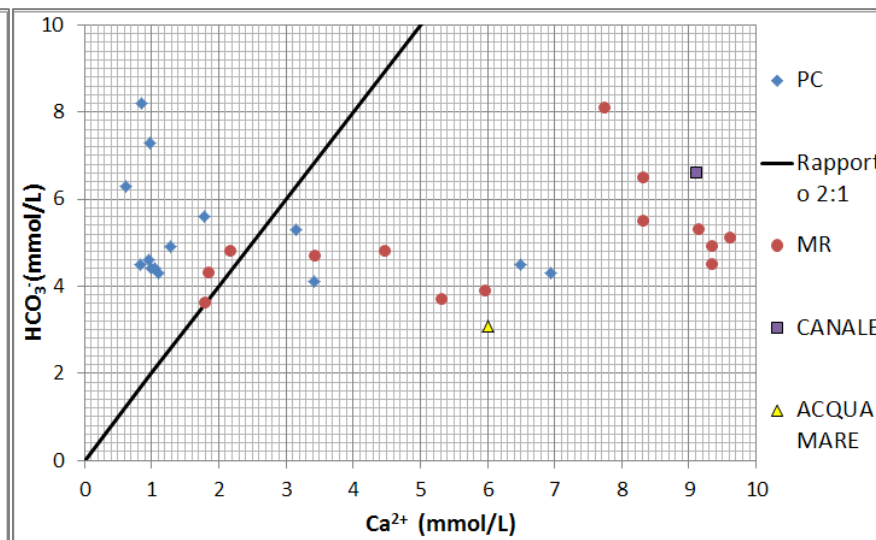
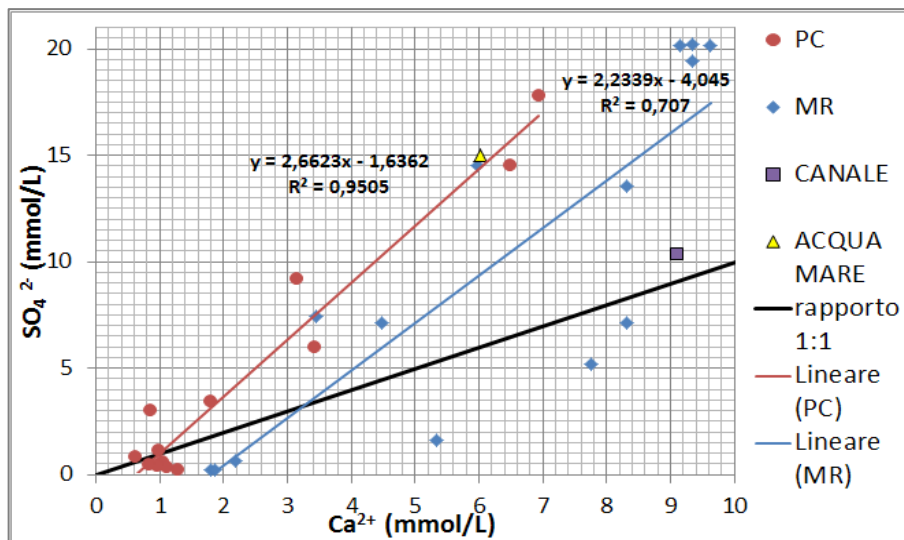
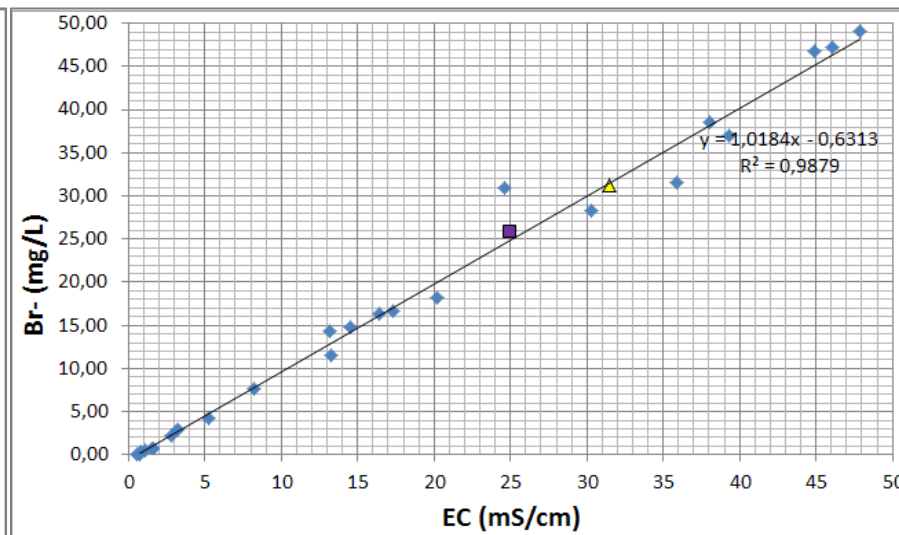
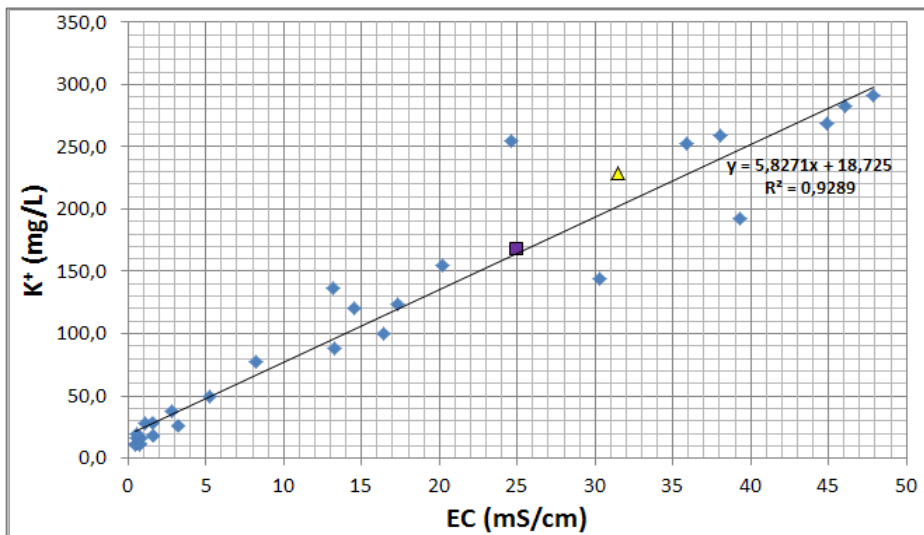
<b>PdM</b>	<b>minifiltro</b>	<b>B.I. %</b>
PC1	TOP	-4,9
PC1	4	-7,5
PC1	5	-8,0
PC1	6	-9,1
PC1	7	-4,0
PC1	8	-7,3
PC2	TOP	0,9
PC2	7	-8,6
PC2	8	-2,0
PC3	TOP	-4,1
PC3	4	-6,4
PC3	5	-8,1
PC3	6	-10,4
PC3	7	-6,8
MR1	TOP	-4,7
MR1	5	-7,9
MR1	6	-9,1
MR2	TOP	0,8
MR2	5	-0,2
MR2	6	-8,3
MR2	7	-3,2
MR3	TOP	-9,5
MR3	2	-3,2
MR3	4	-6,4
MR3	5	-6,5
MR3	6	-7,6
MR3	7	-5,0
MR3	8	-4,4
CANALE		-5,1
MARE		-7,9

**Appendice L** – Grafici a dispersione delle concentrazioni in funzione delle conduttività e altri connessi alla provenienza degli ioni

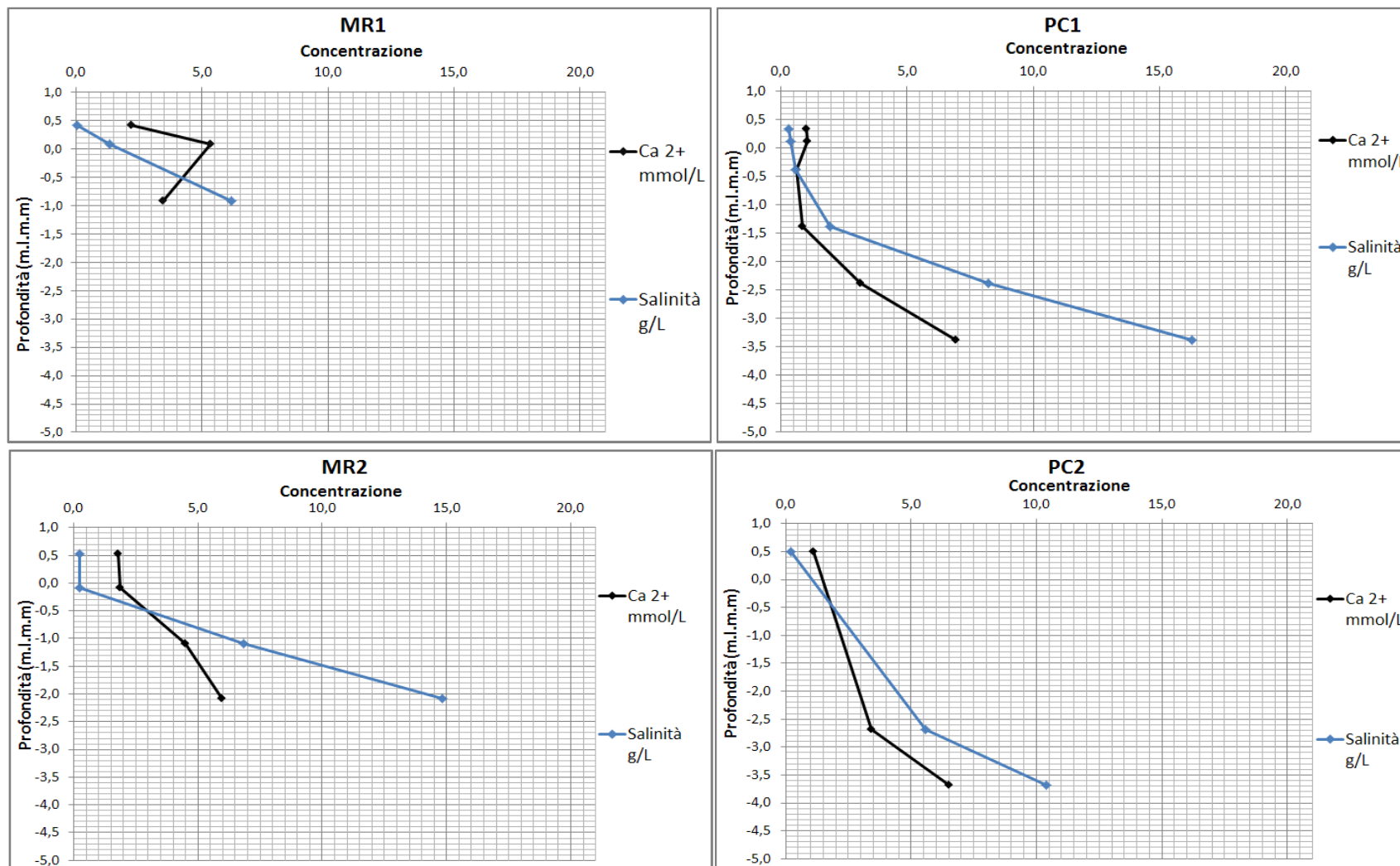


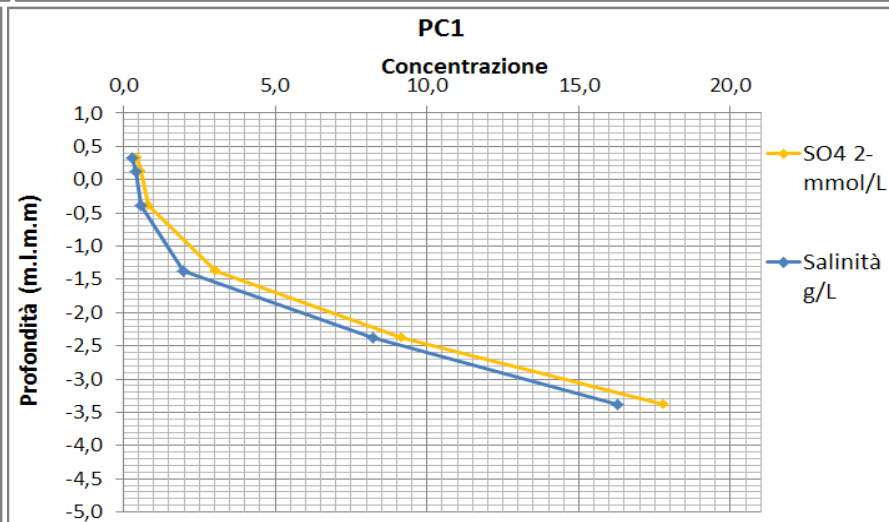
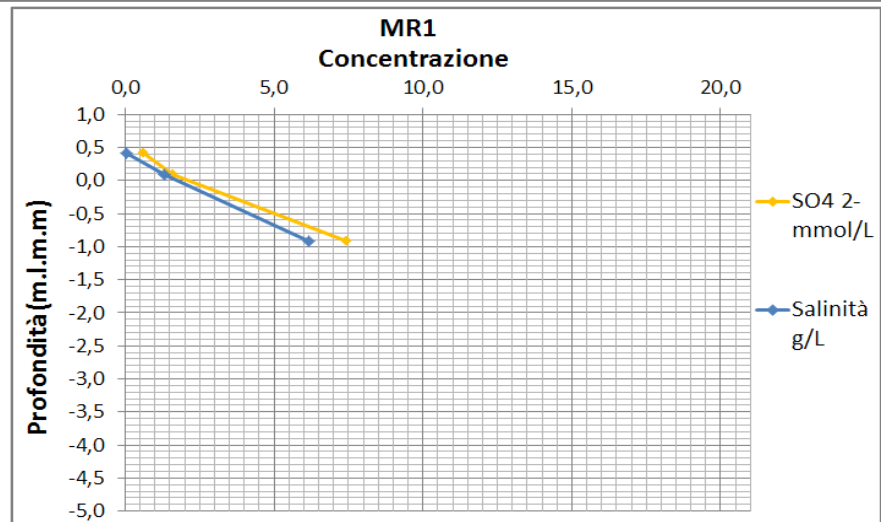
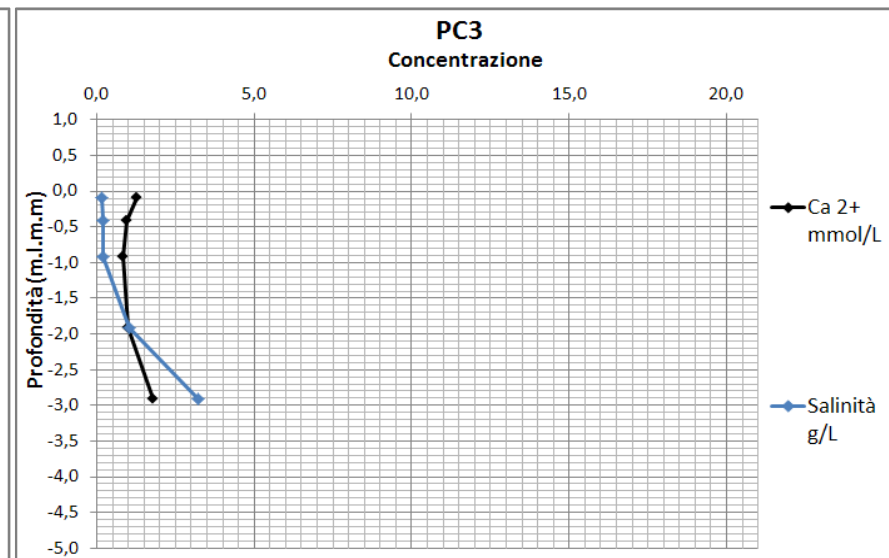
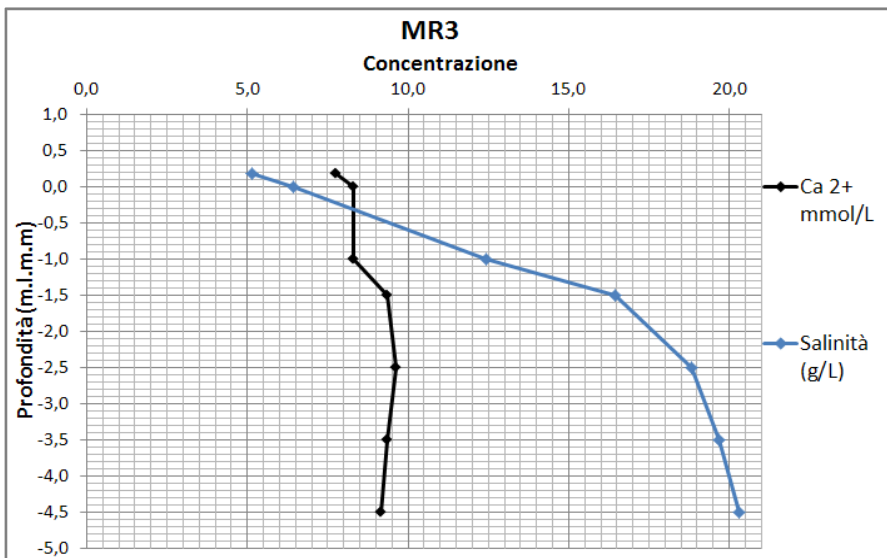


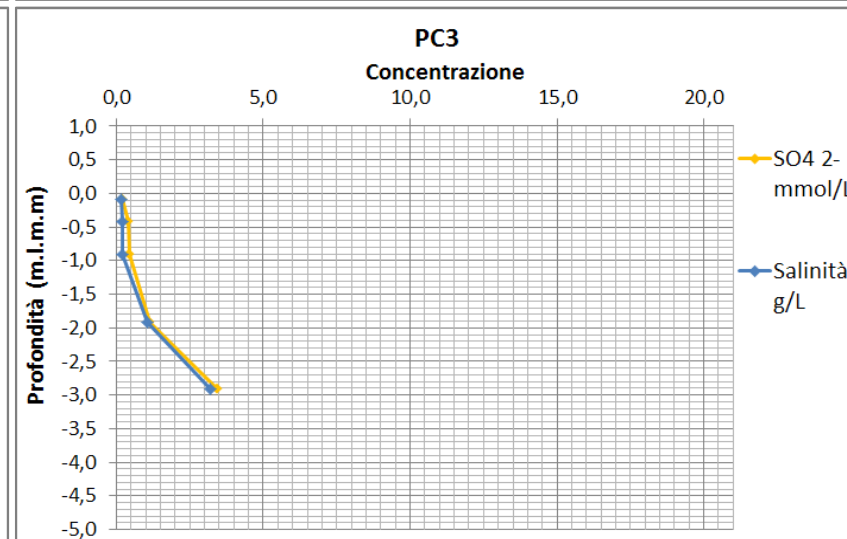
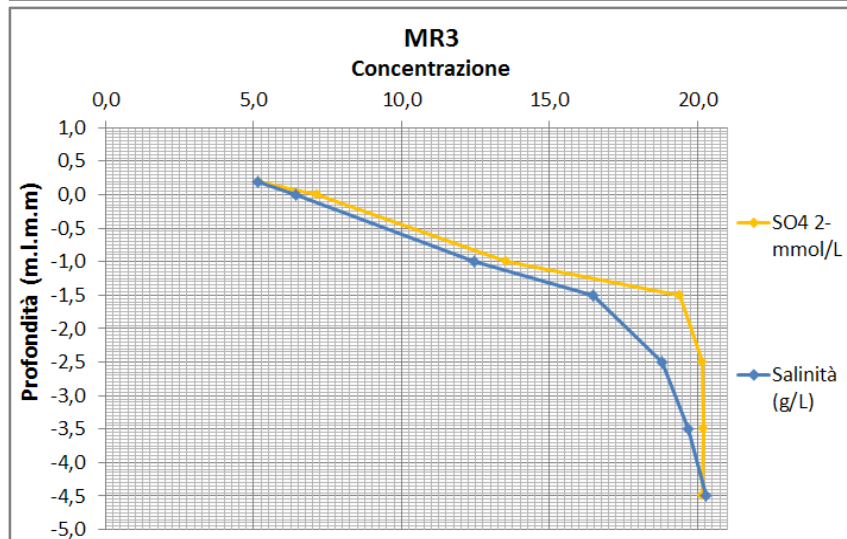
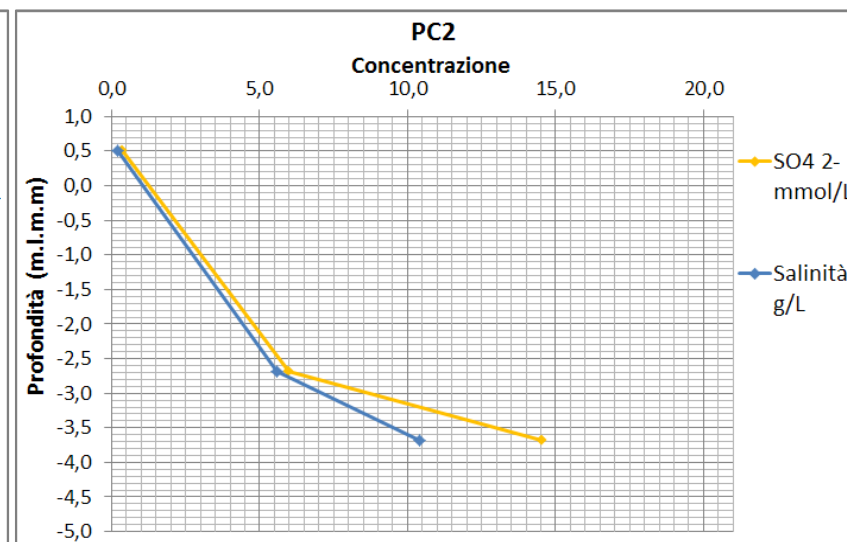
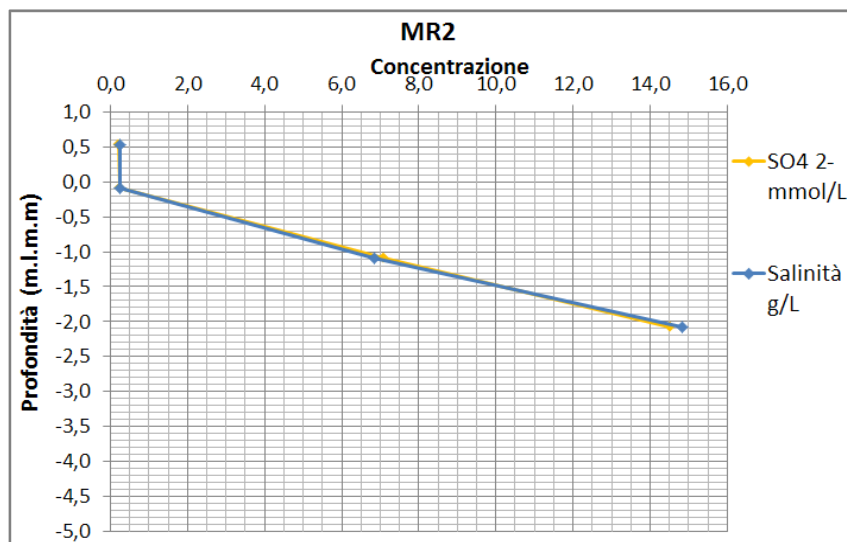




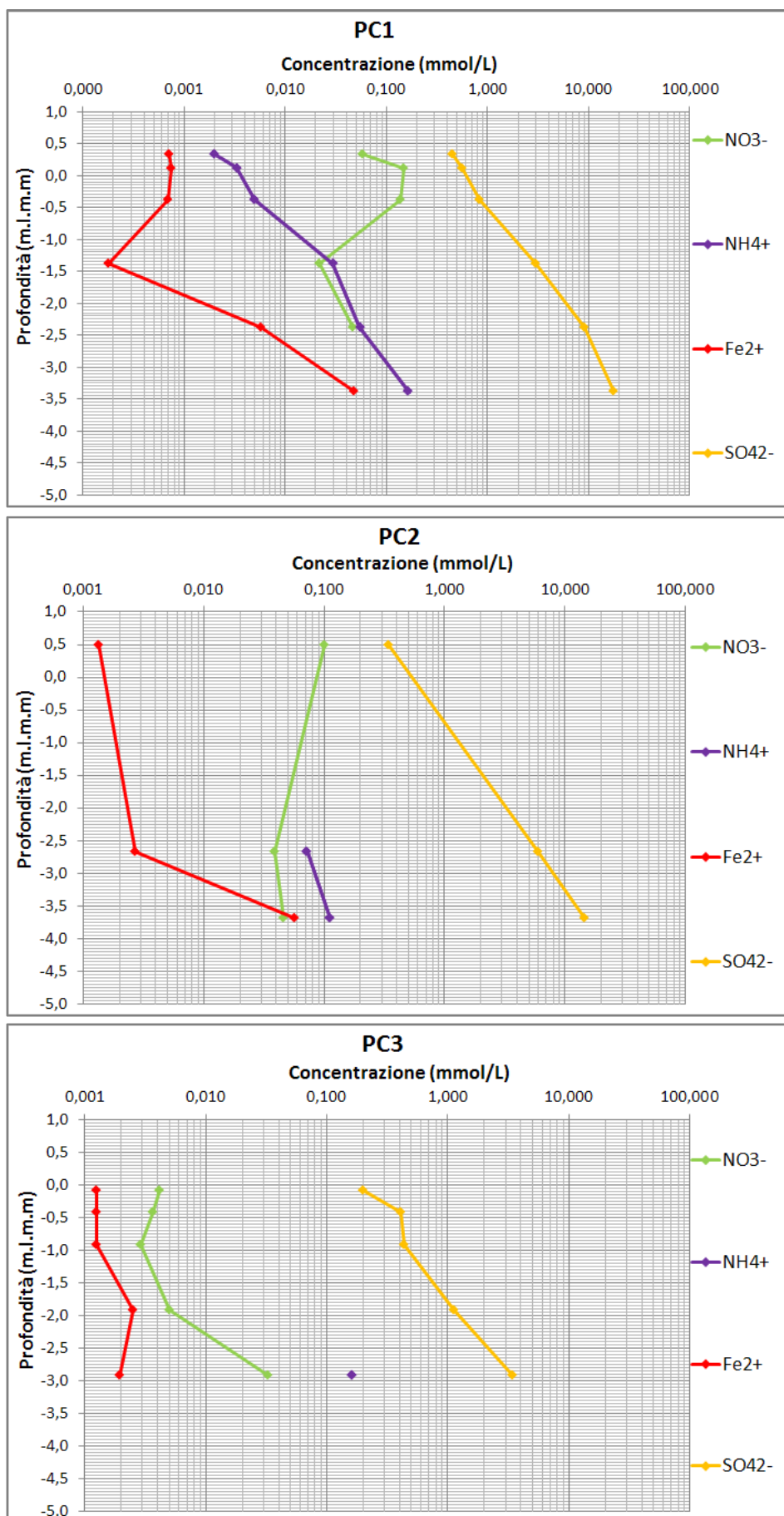
Appendice M – Profili delle concentrazioni di  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  lungo la profondità

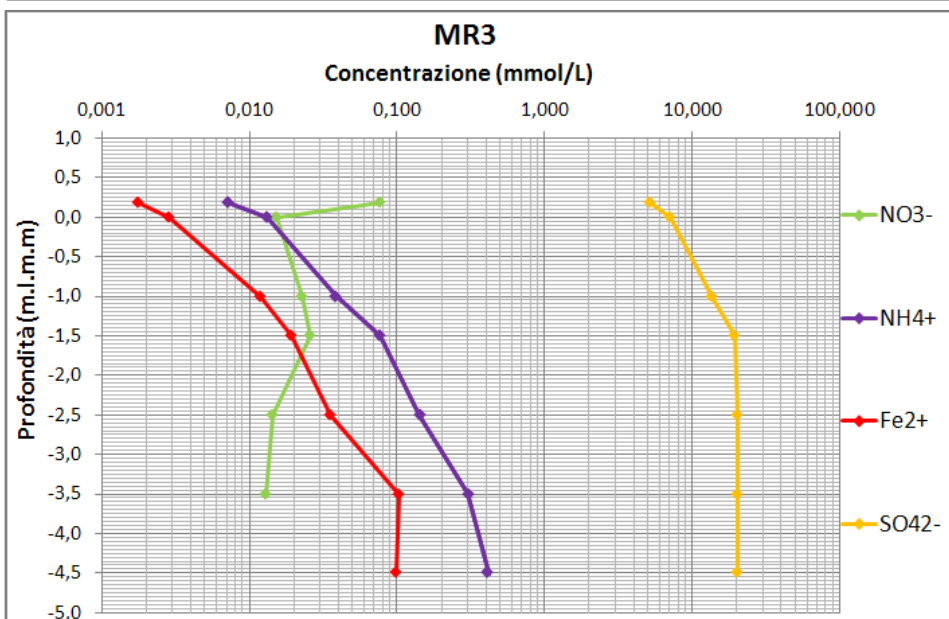
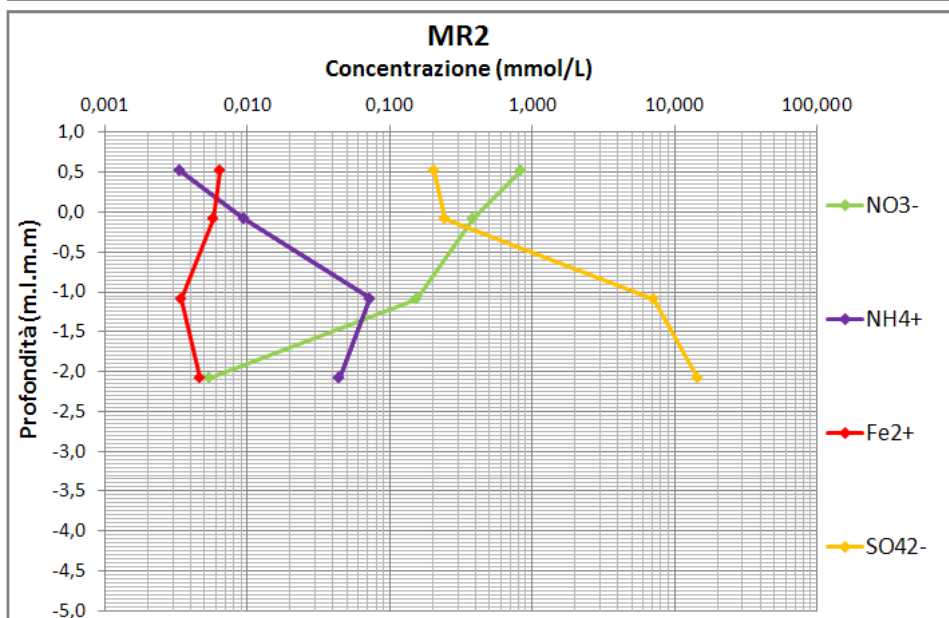
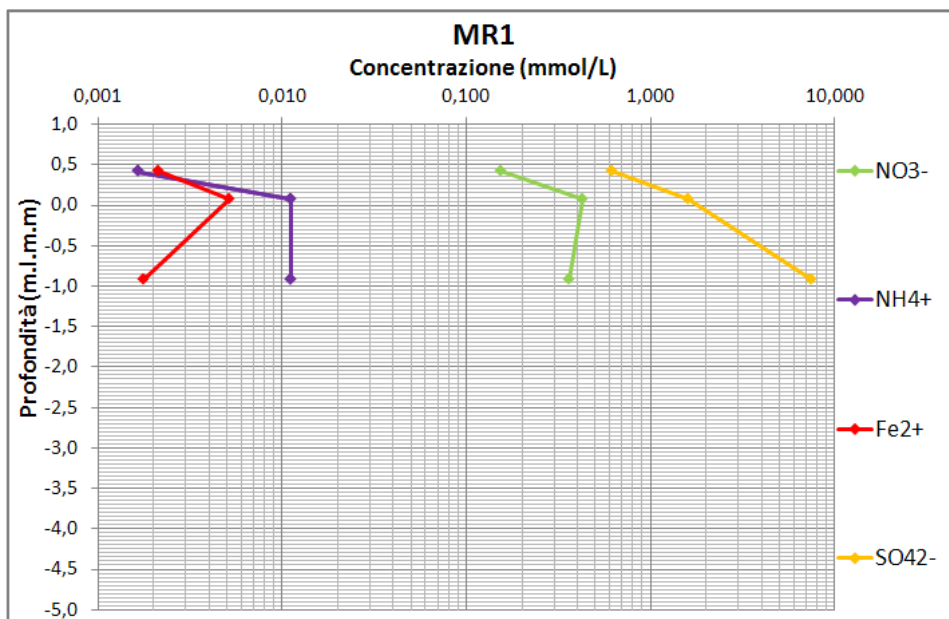






**Appendice N** – Profili verticali delle specie che prendono parte alla decomposizione organica





## **RINGRAZIAMENTI**

In primis un ringraziamento al Prof. Antonellini, per l'opportunità concessami e per i preziosi consigli che sono serviti a indirizzarmi nello sviluppo di questo lavoro.

In secundis, ringraziamenti anche a Nicolas Greggio e Beatrice Maria Sole Giambastiani, per avermi supportato durante lo svolgimento del tirocinio e nel completamento della tesi.

Ringrazio tutti i colleghi e compagni di corso con i quali ho condiviso momenti indimenticabili.

Un ringraziamento anche a tutti gli amici che hanno allietato i momenti difficili di questo percorso.

Ringrazio anche la mia famiglia che amo tanto e mi ha appoggiato sempre in maniera incondizionata.

In fine ringrazio con il cuore Bea.