



*UNIVERSITÀ DI PISA*

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE  
IN SCIENZE E TECNOLOGIE GEOLOGICHE

*INDAGINI IDROGEOLOGICHE E IDROGEOCHIMICHE PER  
LA MODELLIZZAZIONE DEL SISTEMA ACQUIFERO  
DELL'ISOLA DI PIANOSA*

Candidato TIZIANA MAZZONI

Relatori Prof. ROBERTO GIANNECCHINI

Dott.ssa MATIA MENICHINI

Correlatore Dott. MARCO DOVERI

ANNO ACCADEMICO

2014/2015

## INDICE

ABSTRACT.....	4
RIASSUNTO.....	6
1. INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI.....	8
2. CENNI STORICI.....	10
3. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO.....	25
3.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO.....	25
3.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E STRATIGRAFICO.....	27
3.3 LINEAMENTI GEOMORFOLOGICI.....	35
3.4 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO.....	39
4. DATI METEO CLIMATICI.....	48
5. RETE DI MONITORAGGIO.....	60
6. METODOLOGIE D'INDAGINE.....	72
6.1 MISURA DEI LIVELLI PIEZOMETRICI.....	72
6.2 MISURA PARAMETRI CHIMICO-FISICI (PFC).....	74
6.3 CAMPIONAMENTO DELLE ACQUE.....	77
6.4 RETE DI MONITORAGGIO IN CONTINUO.....	83
6.5 RAPPORTI DI CAMPAGNA.....	87
6.6 MODALITÀ D'ESECUZIONE DELLA PROVA D'EMUNGIMENTO.....	87
6.7 ANALISI DI LABORATORIO.....	93
6.7.1 ANALISI CHIMICHE.....	93
6.7.2 ANALISI ISOTOPICHE.....	94
7. ELABORAZIONE DEI DATI.....	96
7.1 BILANCIO IDROLOGICO.....	96
7.2 STUDIO PIEZOMETRICO.....	105
7.2.1 CARTE ISOPIEZOMETRICHE.....	117
7.3 MAPPE DI CONDUCIBILITÀ ELETTRICA.....	122
7.4 LOG DI CONDUCIBILITÀ ELETTRICA E TEMPERATURA.....	127
7.5 CRONOGRAMMI.....	131
7.6 PROVA D'EMUNGIMENTO.....	145
7.6.1 MONITORAGGIO IN CONTINUO PRE E POST PROVA D'EMUNGIMENTO.....	145
7.6.2 ELABORAZIONE DELLA PROVA D'EMUNGIMENTO.....	149
7.7 STUDIO IDROGEOCHIMICO.....	164
7.7.1 CLASSIFICAZIONE CHIMICA DELLE ACQUE.....	166
7.7.2 DIAGRAMMI BINARI.....	174

7.7.3 ELEMENTI IN TRACCE.....	179
7.8 STUDIO ISOTOPICO.....	186
8. MODELLO IDROGEOLOGICO CONCETTUALE (STUDIO PRELIMINARE).....	193
9. CONCLUSIONI.....	200
BIBLIOGRAFIA.....	204
RINGRAZIAMENTI.....	211
APPENDICE	

## **ABSTRACT**

The Pianosa Island (Tyrrhenian Sea, Tuscan Archipelago), though flat and characterized by low rainfall amount, shows an interesting aquifer system, which has always supported the drinking water needs, however revealing some critical issues in greater exploitation periods. The aim of the thesis is to provide additional elements to support the definition of the conceptual hydrogeological model of the island aquifer system through a hydrogeological and hydrogeochemical-isotopic approach. This hydrological system consists of a phreatic aquifer (Pliocene calcarenites of the Pianosa Formation) and a series of semi-confined and confined deeper aquifer horizons (conglomeratic-calcarenitic levels interbedded in Miocene marly-clayey rocks substantially impermeable).

Two measure periods were carried out (January and May 2015) for the measurement of groundwater levels and physical and chemical parameters, with sampling of groundwater and precipitation for laboratory analysis. Moreover, a long-period aquifer pumping test was also carried out in the main water well in order to obtain a preliminary hydraulic parameterization (transmissivity, permeability, storage coefficient) of the deepest aquifer levels. Data of electrical conductivity (EC), piezometric level and temperature are recorded continuously by multiparameter probes placed in some wells.

All the collected data confirm that the groundwater flow is basically controlled by the hydro-structural conditions. The flow direction is generally west-east, according to the dipping direction of the contact between the Pliocene calcarenites and the Miocene marly-clayey bedrock. In the eastern portion of the island, the water table is close to the sea level; here, groundwater suffers the pumping activity of the main water well, due to the hydraulic connection between deeper aquifer levels and phreatic aquifer, with repercussions on the piezometric surface of the latter.

In accordance with the hydrogeological structure, the hydrogeochemical-isotopic evidence of rainfall and groundwater indicate a recharge of the deep aquifers by the phreatic aquifer by means of direct rainfall infiltration.

The chemical data classified the groundwaters as intermediate facies Na-Cl/Ca-HCO<sub>3</sub> derived from a combination of a circulation in a carbonatic aquifer with

"sea spray" and seawater intrusion phenomena. Higher EC values are observable in the eastern portion where the most depressed groundwater levels were individuated, associated to seawater intrusion in aquifer.

In some deep wells located in the center of the island, the presence of salinity stratification was also detected. However, despite the hydraulic continuity between the two hydrogeological complexes, this phenomenon does not seem linked to seawater intrusion. Finally, in some wells it was detected the presence of pollution in K and NO<sub>3</sub> linked to past agricultural and cattle-breeding activity.

In summary, the geological model outlined on the basis of the collected data indicates that the Pianosa aquifer system is quite productive and sustainable given the current water demand, although presents critical issues related to its vulnerability (in relation to seawater intrusion phenomena and pollution).

## RIASSUNTO

Seppur piatta e interessata da modeste precipitazioni, l'Isola di Pianosa (Mar Tirreno, Arcipelago Toscano) è caratterizzata da un sistema acquifero che ne sostiene da sempre le esigenze idriche e idropotabili, pur avendo palesato alcune criticità nei periodi di maggiore sfruttamento. L'obiettivo della Tesi è fornire elementi aggiuntivi a supporto della definizione del modello idrogeologico concettuale del sistema acquifero dell'isola mediante un approccio combinato di metodologie idrogeologiche ed idrogeochimiche-isotopiche. Il sistema idrogeologico è costituito da un acquifero freatico (calcareniti plioceniche della Formazione di Pianosa) e da una serie di orizzonti acquiferi più profondi semi confinati-confinati (nelle intercalazioni conglomeratiche-calcarenitiche dei litotipi marnoso-argillosi miocenici impermeabili).

Sono state effettuate due campagne (Gennaio e Maggio 2015) per la misura di livello piezometrico e parametri fisico-chimici, con campionamento delle acque sotterranee e di precipitazione per successive analisi di laboratorio. È stata inoltre effettuata una prova di emungimento di lunga durata nel pozzo principale dell'isola per una preliminare parametrizzazione idraulica (trasmissività, permeabilità, coefficiente di immagazzinamento) dei livelli più profondi del sistema. Sono stati inoltre elaborati i dati di conducibilità elettrica (CE), livello piezometrico e temperatura registrati in continuo da sonde multiparametriche collocate in alcuni pozzi.

I dati raccolti confermano che la circolazione delle acque sotterranee è sostanzialmente controllata dall'assetto idrostrutturale e dalla idrodinamica legata allo sfruttamento della risorsa idrica. La direzione di flusso è generalmente ovest-est, in accordo con la direzione di immersione del contatto tra calcareniti plioceniche e *bedrock* marnoso-argilloso miocenico. Nella porzione orientale dell'isola, la piezometria è prossima al livello del mare; in questa zona infatti, secondo il modello concettuale ricostruito, si risente dell'emungimento del pozzo principale che, sebbene terebrato nei livelli più profondi, proprio in questa zona questi ultimi sono in connessione idraulica con l'acquifero freatico, con ripercussione sulla superficie piezometrica di quest'ultimo.

Le evidenze idrogeochimiche-isotopiche delle piogge e delle acque sotterranee indicano un'alimentazione degli orizzonti acquiferi profondi a partire dall'acquifero freatico per infiltrazione meteorica diretta.

I dati chimici hanno permesso di classificare le acque in *facies* intermedia Na-Cl/Ca-HCO<sub>3</sub> derivante dalla combinazione di una circolazione in un acquifero carbonatico con lo “*spray* marino” e con fenomeni di intrusione marina. Valori elevati di CE sono osservabili nella porzione orientale in corrispondenza dei livelli piezometrici più depressi, associabili a fenomeni di intrusione marina in acquifero.

Nei pozzi profondi è stata anche individuata la presenza di una stratificazione della falda con aumento della salinità. Nonostante la continuità idraulica tra i due complessi idrogeologici questi pozzi, ubicati nel centro dell'isola, non sembrano essere tuttavia interessati da intrusione marina, ma più verosimilmente dalla presenza in profondità di acque più vecchie caratterizzate da una significativa salinità. Infine, per alcuni pozzi è stata evidenziata la presenza di inquinamento in K e NO<sub>3</sub> legato all'attività agricola e di allevamento piuttosto invasiva in passato.

In sintesi, il modello idrogeologico delineato sulla base dei dati acquisiti indica che il sistema acquifero dell'isola risulta nel complesso autosufficiente dal punto di vista idrico, viste le attuali idroesigenze, anche se presenta delle criticità legate alla sua vulnerabilità (fenomeni di intrusione marina e inquinamento antropico).

## **1. INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI**

Questa Tesi si inserisce nell'ambito del progetto finanziato dalla Provincia di Livorno e denominato "I sentieri dell'acqua", finalizzato alla riqualificazione dell'Isola di Pianosa. In particolare, tale progetto prevede la valorizzazione delle bellezze naturali, il rilancio dell'isola in chiave scientifica e turistica e il recupero delle strutture, nonché la creazione di un percorso naturalistico, storico e culturale basato sulla presenza e sull'importanza dell'acqua dolce su un territorio così particolare come quello pianosino, un'isola di piccole dimensioni e con scarse precipitazioni.

L'Isola di Pianosa fa parte dell'Arcipelago Toscano e per estensione è la quinta tra le sette isole che lo compongono, con i suoi 10,3 km<sup>2</sup>. L'isola risulta nel complesso pianeggiante. Il suo assetto geologico, in particolare il fatto che in affioramento sia quasi interamente costituita da rocce sedimentarie permeabili ha consentito a Pianosa, nonostante l'assetto morfologico sfavorevole alle precipitazioni, di disporre di falde acquifere di una certa rilevanza, che hanno consentito in passato l'approvvigionamento idrico di oltre 1500 persone (Raggi, 1983). In particolare, sull'isola sono presenti un acquifero freatico superficiale, che si imposta nelle calcareniti della Formazione di Pianosa, e una serie di livelli acquiferi profondi semi confinati-confinati, che si impostano nelle intercalazioni conglomeratiche e calcarenitiche presenti all'interno delle Formazioni mioceniche (Formazione di Marina del Marchese e Formazione del Golfo della Botte) (Collantoni e Borsetti, 1973).

Sull'isola sono presenti 25 pozzi, scavati nell'acquifero freatico superficiale, mentre 6 sono perforati nei livelli acquiferi profondi.

La risorsa idrica dell'isola è stata già studiata negli anni passati da Raggi (1983), dalla Provincia di Livorno (1999-2002), da Nicotra (2008) e da Doveri et al. (2012). La maggior parte degli studi pregressi è però da datata, per cui in questa tesi è stato cercato di aggiornare i dati e di caratterizzare ulteriormente i complessi idrogeologici dell'isola.

Lo scopo di questa Tesi è quello di fornire elementi utili a supporto della definizione del modello idrogeologico concettuale del sistema acquifero

dell'Isola di Pianosa mediante un approccio multidisciplinare, che vede coinvolte discipline idrogeologiche e geochimico-isotopiche.

Per raggiungere le finalità della Tesi, le attività hanno previsto 2 campagne di acquisizione dati (Gennaio e Maggio 2015) con misura dei livelli piezometrici e dei parametri fisico-chimici e campionamento delle acque (solo per la campagna di Gennaio 2015). In Maggio 2015 è stata inoltre effettuata una prova di emungimento di lunga durata sul pozzo principale dell'isola. Inoltre, sull'isola da Ottobre 2014 è presente una rete di monitoraggio in continuo del livello piezometrico, della temperatura e della conducibilità elettrica, con sonde multiparametriche collocate in alcuni pozzi, nonché un pluviometro totalizzatore per la misura e campionamento mensile delle acque di pioggia.

Successivamente alla fase di acquisizione dati, il lavoro ha previsto una fase di analisi dei campioni presso i laboratori dell'IGG-CNR di Pisa.

L'elaborazione dei dati raccolti ha permesso di:

- definire la circolazione idrica sotterranea e le principali direzione di deflusso idrico per i periodi indagati;
- disporre dei primi dati per la parametrizzazione da un punto di vista idraulico dei livelli acquiferi profondi (trasmittività, permeabilità e coefficiente di immagazzinamento);
- individuare possibili interconnessioni tra i due complessi idrogeologici presenti;
- stimare il bilancio idrogeologico dell'isola;
- classificare le acque naturali secondo *facies* idrogeochimiche;
- definire la qualità delle acque sotterranee;
- individuare i processi chimico-fisici attivi nel sistema acquifero;
- caratterizzare le acque di pioggia e sotterranee dal punto vista isotopico;
- definire il modello idrogeologico concettuale dell'isola.

## **2. CENNI STORICI**

La storia dell'Isola di Pianosa, per quanto la convinzione popolare sia quella di un'isola disabitata, con l'unica funzione di ospitare un penitenziario, è molto ricca e per certi versi affascinante. In questo lavoro di tesi si è cercato di delineare, seppur sommariamente, i principali avvenimenti storici. La storia dell'isola risulta molto utile per comprendere quanto fosse naturalmente disponibile la risorsa idrica e quanto sia stata sfruttata.

### *I PRIMI PIANOSINI*

Le più antiche tracce di presenza umana sull'Isola di Pianosa sono databili al Paleolitico superiore (35.000 a.C); il ritrovamento di queste tracce è da attribuire all'abate Gaetano Chierici, che nello scorso secolo ha eseguito un minuzioso lavoro di catalogazione e ricerca (Chierici, 1875). Sull'isola sono stati anche ritrovati utensili litici e ceramiche, attribuibili secondo la lavorazione a popolazioni del Mesolitico e del Neolitico. Si tratta principalmente di lavorati e semilavorati di selce e quarzo, materiali provenienti con molta probabilità dalla vicina Elba, ma anche ossidiane, che rimandano a commerci e scambi con la Sardegna (Ducci, 2000). Sullo scoglio della Scola è presente inoltre un insediamento del Neolitico; questo spostamento in luoghi più elevati potrebbe essere riferibile ad un progressivo innalzamento del livello del mare, avvenuto intorno al 5.000 a.C. (Paglialunga, 1993).

Siti preistorici riferiti all'Età del Bronzo (2.300-7.000 a.C) sono stati ritrovati all'interno di cavità naturali, ma anche antropiche, e consistono sostanzialmente in sepolture. In particolare nella grotta artificiale "dei Due scheletri", è stato rinvenuto molto materiale classificabile come corredo funebre.

Sostanzialmente le popolazioni preistoriche, che risiedevano stabilmente sull'isola, hanno lasciato consistenti resti di sepolture di vario tipo su tutto il territorio pianosino. Dalla dislocazione dei siti è stata ipotizzata un'economia preistorica basata sullo sfruttamento delle risorse ittiche, mentre all'interno dell'isola, pur essendo state rinvenute tombe e piccoli pozzi per la conservazione di prodotti agricoli, non sono stati rinvenuti insediamenti (Piga e Foresi, 2012).

In seguito, con l'aumento, alla fine dell'Età del Bronzo, della padronanza nella navigazione da parte dell'uomo, Pianosa perse il ruolo di scalo intermedio delle rotte commerciali nel Tirreno (Piga e Foresi, 2014). Prova ne sono le poche sepolture riferite a questo periodo che sono state rinvenute (Chierici, 1975).

Per quanto riguarda la successiva epoca etrusca, gli studiosi hanno sempre ipotizzato l'assenza di reperti sull'isola, nonostante la grande importanza assunta dagli etruschi in tutta la Toscana e in particolare nella vicina Elba, ma studi recenti hanno portato alla luce probabili reperti di origine tardo etrusca (Piga e Foresi, 2014).

### *EPOCA ROMANA*

L'Isola di Pianosa è menzionata in tante opere di storici latini; ad esempio, Tacito la nomina spesso a proposito di Augusto (Annales).

Le prime notizie documentate risalgono tuttavia all'epoca del secondo triumvirato (Antonio, Lepido e Ottaviano, 43 – 34 a.C.), quando Sesto Pompeo invase gran parte delle isole italiane, che in quel periodo erano fondamentali per i rifornimenti di grano alla terraferma (Piga e Foresi, 2014).

Per eliminare il blocco navale imposto da Sesto Pompeo, nel 37 a.C. Augusto cedette la flotta ad Ottaviano, che, grazie all'ammiraglio Vipsanio Agrippa, riuscì a tornare in possesso della Sardegna, della Corsica, della Sicilia e dell'Arcipelago Toscano (Piga e Foresi, 2014).

Ottaviano poi, nel 27 a.C., ottenne dal senato il titolo di "Augustus" e nel 19 a.C. il potere consolare a vita. Negli anni seguenti (6-7 d.C.), spinto dalla seconda moglie Livia Drusilla, che voleva come successore al trono il proprio figlio Tiberio Nerone, esiliò a Pianosa il nipote Agrippa Postumo, legittimo erede al trono, con l'accusa di omosessualità e di dissolutezza. Durante la sua residenza sull'isola venne costruito un centro abitato di notevole importanza.

Lo storico greco Dione Cassio (II-III secolo) sostiene che il nobile romano era abituato a trascorrere il suo tempo pescando e giocando ad impersonare Nettuno, probabilmente alludendo a spettacoli che si tenevano nell'Anfiteatro di Pianosa o nel complesso detto "Bagni di Agrippa" (Fig. 2.1).



**Figura 2.1:** La foto mostra una parte dell'anfiteatro romano che si trova sull'Isola di Pianosa nella zona di Cala Giovanna.

Dopo la morte di Augusto, Tiberio Nerone divenne per adozione il suo unico successore e la sua prima impresa fu nel 14 d.C. uccidere Agrippa, per mezzo di un sicario inviato sull'Isola di Pianosa.

Testimonianze di età romana sono disseminate su tutto il territorio pianosino, conservate grazie alla scarsa frequentazione dell'isola nelle epoche successive. Alcuni dei pozzi che si trovano ancora attualmente sull'isola sono probabilmente di età romana, se non addirittura precedenti (Masini, 1953). Anche la sorgente del Golfo della Botte, attualmente poco più che stillicidio, situata in località Lavanderia Vecchia (Fig. 2.2.), era già probabilmente nota in epoca romana, e si pensa che attraverso l'utilizzo di un acquedotto fornisse acqua fino all'attuale diramazione Agrippa, ex sede del carcere di massima sicurezza, costruita sui resti di un edificio romano di età imperiale, probabile residenza principale dell'esiliato (Piga e Foresi, 2014).



**Figura 2.2: Lavanderia vecchia dove si trova la sorgente del Golfo della Botte.**

Sempre di epoca romana è un importante sistema di catacombe, scavato su due livelli, che si estende sotto gran parte dell'abitato (Chierici, 1875). Una parte di questa catacomba contiene sepolcri, mentre un'altra, allargata in seguito demolendo le pareti di alcune gallerie, fungeva probabilmente da luogo di riunione per la celebrazione di riti (Chierici, 1875). Non si hanno certezze sulla datazione di questa catacomba; il Chierici, avendola visitata e studiata, ipotizzò una datazione anteriore al quarto secolo, prima che il cristianesimo divenisse religione di stato.

Dopo la morte di Agrippa, Pianosa fu abbandonata. Alcuni sostengono però che successivamente, intorno al III secolo, l'isola sia stata utilizzata come luogo di deportazione per i cristiani all'epoca perseguitati (Benvenuti et. al., 1996).

#### *DALLA CADUTA DELL'IMPERO ROMANO AGLI APPIANI*

La caduta dell'Impero Romano e il conseguente dominio dei barbari pare non aver interessato Pianosa, tanto da supporre che all'epoca fosse del tutto disabitata o quasi (Piga e Foresi, 2012).

Nel IX secolo d.C. la supremazia della Repubblica Marinara di Pisa permise, offrendo protezione dalle scorrerie saracene, il ripopolamento dell'isola. In quegli anni le repubbliche marinare di Pisa e Genova se ne contesero il dominio a causa della sua posizione strategica, come scalo nel Tirreno (Piga e Foresi, 2014). La popolazione dell'isola non visse certamente in clima tranquillo; sono infatti numerose le battaglie riportate nella cronaca del tempo. In una delle ultime contese, datata 1300, è riportato che a seguito della vittoria genovese sulla potenza pisana, questi ordinarono di riempire di sassi e di chiudere con lastre i pozzi presenti sull'isola, con l'intento di farla rimanere deserta (La Bolina, 1914; Mellini, 1914).

Nel 1399 gli Appiani, signori di Pisa, non potendo più governare questo territorio lo venderanno ai Visconti, signori di Milano, e con il ricavato della vendita si ritirarono a Piombino, dando inizio alla storia di un piccolo principato di cui farà parte l'Isola di Pianosa insieme all'Isola di Montecristo e all'Isola dell'Elba (Piga e Foresi, 2014).

Relativamente al XV secolo non ci sono molte informazioni sull'isola, a parte alcune lamentele dei sudditi del principato per la presenza nell'arcipelago di scorrerie di pirati africani, spagnoli e francesi. Nel 1501 Cesare Borgia conquistò gran parte dei territori del principato compresa l'Isola di Pianosa e solo dopo la morte del pontefice Alessandro VI (padre di Cesare Borgia), questi territori tornarono sotto il controllo dei vecchi proprietari, grazie anche all'aiuto delle armate spagnole (Piga e Foresi, 2014).

Negli anni seguenti, a causa della sua posizione, Pianosa fu spesso teatro di scontri navali e saccheggi ad opera dei pirati. Non a caso è stato dato il nome Cala dei Turchi (Fig. 2.3) ad un'insenatura naturale che si trova a sud del paese, in memoria della battaglia del 1519 quando Andrea Doria sconfisse l'armata turca (Colombo et al., 2002).



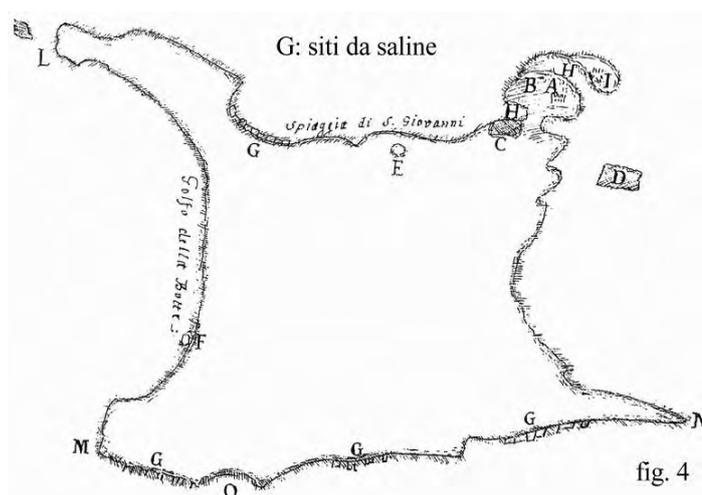
**Figura 2.3:** Cala dei Turchi, a sud del paese, deve il suo nome alla battaglia del 1519 dei pianosini contro le armate turche.

Il 15 agosto 1552 Carlo V di Spagna consegnò lo Stato di Piombino, con l'intento di difenderlo meglio, a Cosimo I, Granduca di Toscana. Nonostante questo, un'ennesima incursione piratesca, la più famosa e cruenta, si verificò a Pianosa nel 1553, ad opera di una flotta turca guidata da Karà Mustafà, comandante in seconda del feroce Dragat, alleato dei francesi nella guerra contro la Spagna. Nicci (1988), riprendendo alcuni cronisti dell'epoca, così la descrive: *“Giunto in questa isoletta Karà Mustafà attaccò il fuoco alle coltivazioni ed ai spineti, che in breve tempo furono cenere; quindi si postò sotto la torre o castello che essendo ben difeso da una forte muraglia, poté resistere sul bel principio all'urto del nemico. Maggiore resistenza trovò, Mustafà, nella torre posta in bocca al porto, sopra uno scoglio inaccessibile: ma finalmente bisognò che l'una e l'altra cedessero al vivo fuoco barbaro. Duecento schiavi fra uomini e donne furono fatti in quell'isoletta e imbarcati sulle galere della divisione di Karà Mustafà”*. Le fonti storiche forniscono, inoltre, anche dati su come viveva la popolazione all'epoca. In mezzo agli olivi vivevano circa 200 persone che si dedicavano alla pesca, alle coltivazioni e all'allevamento del bestiame. Da questa

data (1553), Pianosa non ebbe più una popolazione stabile (Bartolozzi et al., 1994).

Nel 1557, con il trattato di Londra, lo Stato di Piombino tornò sotto il dominio degli Appiani. Nonostante questo l'isola rimase disabitata e un covo per le navi corsare, dato anche il rifiuto degli Appiani, ma anche dei successivi padroni, di fortificare l'isola.

Soltanto nel XVIII secolo l'isola cominciò ad essere frequentata di nuovo; infatti, nel 1712 fu concesso agli elbani di ricoltivare l'isola. Anche negli anni successivi non si ha sull'isola una vera e propria popolazione residente. Nel 1790 Antonio Sardi venne incaricato dallo Stato di Piombino di visitare l'isola. Il Sardi trovò circa un centinaio di agricoltori stagionali, una decina di pescatori napoletani e venticinque pastori (Piga e Foresi, 2014).



**Figura 2.4:** Antica mappa di epoca settecentesca (da Nicotra, 2008) *"Pianta dell'Isola di Pianosa di circuito 14 miglia distante dall'Isola dell'Elba miglia 9"*.

- A:** torre
- B:** terra
- C:** bastione frenato
- D:** Fortezza frenata in isolotta chiamata la Scuola
- E:** poca acqua
- F:** acqua anche per l'estate chiamata la Botte
- G:** siti da saline
- H:** due porti capaci di dieci feluche l'uno
- I:** forte della Teglia
- L:** Punta del Marchese
- M:** Punta la Ruta
- N:** Punta Forana
- O:** Cala Galera

Oltre a queste attività gli elbani prelevavano il sale, proveniente da saline produttive presenti sull'isola (Mackenzie-Grieve, 1964). L'ubicazione di queste è

riportata su un'antica mappa dell'epoca (Fig. 2.4), dove sono anche riportati alcuni punti di approvvigionamento idrico, tra cui la sorgente del Golfo della Botte.

La situazione di semi-abbandono terminò con l'avvento di Napoleone Buonaparte.

#### *DA NAPOLEONE AL 1850*

Nel marzo 1801 il re di Napoli cedeva i territori del principato di Piombino alla Francia. Il 27 agosto 1802, Napoleone Buonaparte, Primo Console della Repubblica, stabiliva che Elba, Capraia, Pianosa e Montecristo fossero annesse al territorio della Repubblica Francese. L'Isola di Pianosa fu assegnata alla giurisdizione di San Piero in Campo e nel 1806 l'isola venne fortificata contro le incursioni nemiche e munita di soldati e cannoni (Piga e Foresi 2014). Purtroppo nel 1809 due brick ed una fregata britannica sbarcarono 150 fanti di marina, che attaccarono il presidio, uccisero il comandante e costrinsero i soldati francesi alla resa (Piga e Foresi, 2014). Dopo l'incursione inglese e la distruzione dell'isola, questa rimase quasi deserta.

Fu soltanto durante il successivo esilio di Napoleone all'Elba che egli si curò maggiormente di Pianosa; in considerazione della sua posizione, infatti, l'isola poteva servire come avamposto dell'Elba contro i possibili attacchi della Corsica. L'isola venne nuovamente fortificata; furono costruiti piccoli edifici per facilitare la permanenza degli agricoltori ed affidata ad un comandante. Furono inviati un medico, un cappellano e alcuni funzionari, oltre ad un gruppo di reclusi provenienti dal carcere di Portoferraio, troppo affollato (Piga e Foresi, 2012). I lavori sull'isola furono interrotti quando Napoleone venne richiamato in patria. Dopo l'esilio e la morte di Napoleone, con il congresso di Vienna del 1815, Pianosa fu annessa al Granducato di Toscana, che terminò i lavori iniziati dall'imperatore. Furono edificate quattro postazioni militari, tuttora esistenti anche se in disuso: il Forte Teglia (Fig. 2.5), la Torre di San Marco, le costruzioni di Punta Brigantina e di Punta del Marchese.



**Figura 2.5: Il Forte Tegliata ripreso dal Montagnone (anni '30). (Foto Associazione di Pianosa, <http://www.associazionepianosa.it/>).**

Le condizioni di vita sull'isola erano migliorate e il pericolo dei corsari quasi totalmente svanito; non vi erano comunque ancora vere e proprie case e lo stesso Leopoldo II Granduca di Toscana in visita sull'isola, alloggiò in una delle grotte presenti (Foresi, 2003).

Nel 1836, il geografo Zuccagni Orlandini scrisse il primo libro sull'isola "Topografia fisico storica dell'Isola di Pianosa nel Mar Toscano". Nello scritto dello Zuccagni è riportato un intero capitolo dedicato alla risorsa idrica dell'isola, che già a quel tempo poteva contare, oltre alla sorgente del Golfo della Botte, anche di altre piccole sorgenti e di 7 pozzi scavati a mano "alla romana".

Dopo un'ultima incursione di pirati, seguì finalmente un periodo di pace per la popolazione di Pianosa. Iniziarono i primi collegamenti con Livorno e nel 1840 fu organizzata la prima gita turistica sull'isola. Solo nel 1861 iniziarono i primi veri collegamenti con la terraferma (Betti Carboncini, 1999).

Dopo un primo tentativo fallito dello Zuccagni Orlandini, che insieme al console prussiano Carlo Stichling cercò di prendere in affitto l'isola nel 1835, riuscì nell'impresa il conte Schaffgotsch nel 1841 (Sanacore, 1991). In quello stesso anno iniziarono i lavori di restauro delle abitazioni e delle fortificazioni, vennero importate varie specie di animali d'allevamento e migliorate le pratiche agricole. Nel 1845 Pianosa contava 170 abitanti, di cui 34 vi risiedevano stabilmente, vivendo la maggior parte sempre nelle grotte. Si coltivava il grano, ma in

maniera disorganizzata, la vite e gli olivi, con scarsi frutti. Per quanto riguarda l'allevamento, all'epoca si contavano 30 mucche, 1000 pecore e 300 capre; le fonti riportano che però mal sopravvivevano a causa della scarsità d'acqua soprattutto d'estate (Monti, 1998).

Nel 1848 gli abitati stabili erano diventati 121 (Mellini, 1914).

### *DAL 1850 ALLA II GUERRA MONDIALE, L'ISOLA CARCERE*

Il 1850 è una data importante per l'Isola di Pianosa, poiché in quell'anno fu acquisita dal demanio. Nel 1856, a titolo sperimentale fu istituita sull'isola una colonia di correzione per minorenni (Piga e Foresi, 2014). L'esperimento portò poi, sempre nel 1856, all'istituzione della "Colonia Penale Agricola della Pianosa" e furono inviati sull'isola i condannati "al carcere, alla casa di forza e all'ergastolo a tempo", tutti destinati a occuparsi dei lavori nei campi (D'Albertis, 1878).

Nel 1860 venne vietato l'approdo sull'isola senza il consenso del direttore della colonia.

Inizialmente la colonia penale e l'azienda agricola erano due realtà distinte e quotidianamente venivano richiesti i detenuti necessari a eseguire i lavori nei campi. La situazione cambiò nel 1863, quando tutte le istituzioni vennero unificate all'esclusiva dipendenza del Ministro dell'Interni (Piga e Foresi, 2014). L'anno seguente fu terminata la costruzione di un edificio capace di ospitare 350 carcerati, ma successivamente, nel 1872, si preferì dividere l'isola in diversi centri di produzione agricola, detti poderi, dislocando così i reclusi in piccole comunità.

È in questi anni che furono costruiti quasi tutti gli edifici ancora oggi presenti, tra cui il pozzo della Fornace (Piga e Foresi, 2014), attuale PN11 (vedi mappa, capitolo 5) edificato in una zona strategica vicino alla fabbrica di mattoni.

Nel 1874 venne aperta a Pianosa la prima scuola elementare, per facilitare i parenti delle guardie residenti sull'isola. Nel 1880 il numero dei detenuti era arrivato a 960 persone.

A partire dal 1884, nella colonia penale di Pianosa vennero trasferiti dalle carceri di tutta Italia i detenuti ammalati di t.b.c, date le caratteristiche naturali dell'isola,

che favorivano la guarigione dei malati (Piga e Foresi, 2014). Il trattamento dei malati avveniva in tre strutture: il Preventorio, dove venivano accolti i supposti malati per le prime visite; il Sanatorio (ex Podere del Cardon, attuale Agrippa che fu sede del super carcere), un ospedale ben attrezzato per la cura dei malati; e il Convalescenziario (Podere del Marchese), dove i detenuti ormai guariti trascorrevano un periodo di convalescenza (Fig. 2.6). Inizialmente, dopo la sua costruzione, il Podere del Marchese era sede di un laboratorio batteriologico, per testare cure per i malati di colera su cavie animali.



**Figura 2.6: Podere del Marchese, situato in prossimità del Porto Romano in località Marina del Marchese.**

Nel 1907 il botanico Sommier (1909), nella sua opera dedicata all'isola, fornì un censimento della popolazione residente, di cui circa 800 detenuti, 80 guardie carcerarie, 41 militari di presidio e 21 persone titolari di specifici ruoli, per un totale di 942 abitanti. Egli inoltre informa sulla situazione idrica dell'isola, descrivendo lo stillicidio del Golfo della Botte “...*perenne ed abbastanza abbondante...*” e che i 9 pozzi attivi sull'isola “... *danno acqua, se non ottima almeno potabile, in quantità sufficiente per gli usi della colonia*”. Indicò tra quelli di nuova costruzione il pozzo del Podere del Cardon (attuale PN12, vedi mappa capitolo 5) come il migliore e maggiormente produttivo (Fig. 2.7).



**Figura 2.7:** Nella foto si può osservare: a) l'edificio dove si trova il pozzo "romano" Pn12; b) il pozzo.

Nello scritto sono riportati poi altri 8 pozzi (presumibilmente gli attuali PN9, PN11, PN17, PN20, PN21, PN25, PN29, PN31, vedi mappa capitolo 5).

Pianosa venne marginalmente interessata dalla prima guerra mondiale, se non per ospitare prigionieri. Nel 1917, per supportare la continua crescita della popolazione venne costruito il "Pollaio Razionale", che ultimamente ha destinazione agricola ancora presente e coltivato dai detenuti presenti sull'isola.

Fu "ospite" della diramazione del Sembolello, nel 1932, anche il futuro Presidente della Repubblica Sandro Pertini, incarcerato per motivi politici (Fig. 2.8). In quegli anni a Pianosa abitavano circa 60 famiglie, forse il momento di maggior presenza sull'isola di civili e 1000 detenuti (Piga e Foresi, 2014).

STABILIMENTI PENALI DI PIANOSA  
23- febbraio - 1938

A Sua Eccellenza il Presidente  
del Tribunale Speciale -

La comunicazione, che  
mia madre ha presentato domanda di  
grazia in mio favore, mi umilia pro-  
fondamente -

Non mi associo, quindi, a simile  
domanda, perché sento che macchie-  
rei la mia fede politica, che più d'ogni  
cosa, della mia stessa vita, mi preme

Il recluso politico  
Sandro Pertini -

Figura 2.8: Lettera di Sandro Pertini inviata dall'Isola di Pianosa.

Nel 1938 venne installato sull'isola il primo motore diesel per la produzione di energia elettrica, rimasto attivo fino ai primi anni '90, quando l'isola fu collegata con un cavo sottomarino all'Isola d'Elba.

Durante la seconda guerra mondiale, in particolare nel 1943, l'isola subì l'occupazione tedesca ed un bombardamento nel '44 (Piga e Foresi, 2014).

## *IL DOPOGUERRA*

Finita la guerra, Pianosa tornò alla sua funzione originaria, quella di carcere. Sull'isola furono portati anche ex fascisti e i reduci della Repubblica Sociale Italia (R.S.I o Repubblica di Salò).

Oltre agli agenti di custodia venne istituita sull'isola una stazione di Carabinieri, in presidio fino agli anni '60, e un distaccamento della Guardia di Finanza, rimasto fino agli anni '70. I collegamenti con la terraferma, interrotti per la distruzione completa delle navi di linea dell'Arcipelago, furono ripristinati nel '45-'46, con la Società di Navigazione Toscana, attuale TO.RE.MAR.

Negli anni '50 iniziarono le perforazioni di nuovi pozzi profondi, per soddisfare il fabbisogno idrico dell'isola. Masini (1953) riporta la perforazione di almeno 3 pozzi per acqua scesi a profondità di 108 m da piano campagna. L'autore riferisce anche che, prima della realizzazione dei pozzi profondi, le esigenze idriche erano colmate grazie all'emungimento da pozzi romani, anche per uso potabile dopo clorazione.

Negli anni '70 furono eseguite ulteriori perforazioni di pozzi profondi (Raggi, 1983). È in questo periodo che viene perforato anche l'attuale pozzo PN3, attualmente l'unico pozzo attivo sull'isola.

Alla fine degli anni '70, a seguito del periodo di terrorismo, vennero reclusi sull'isola i maggiori esponenti delle Brigate Rosse. Fu proprio in questo periodo che la diramazione Agrippa, ex Sanatorio, fu trasformata in carcere di massima sicurezza con una capienza di 250 detenuti.

Nel 1979 fu ultimata la costruzione del muro, visibile ancora oggi, che divide la parte civile da quella dei reclusi.

Gli anni '80, con la presenza del supercarcere, furono quelli di maggior presenza umana sull'isola. Per questo motivo si registrò un aumento del fabbisogno idrico, che nonostante la presenza di due complessi acquiferi produttivi e una notevole quantità di pozzi romani e trivellati, mise in difficoltà tutto il sistema (Raggi, 1983). In questi anni si iniziò a prospettare la chiusura del carcere; in previsione di questa possibilità, venne anche ridotto il numero dei detenuti. In seguito però all'emergenza dettata dagli attentati ai magistrati Falcone e Borsellino, venne disposta l'immediata riapertura del supercarcere, dove furono rilegati i detenuti

per reati di tipo mafioso. Questa nuova emergenza trasformò l'isola in una fortezza inaccessibile a tutti e vennero anche istituiti rigidissimi divieti di sorvolo e di navigazione nelle acque circostanti.

In seguito, fu installato un depuratore, mentre le fognature, sebbene già finanziate, non furono mai costruite (Piga e Foresi, 2014).

L'emergenza si protrasse fino al 1997, quando l'ultimo detenuto per mafia venne trasferito dall'isola ad altre sedi di reclusione e per il carcere di Pianosa si iniziò di nuovo a parlare di una chiusura definitiva.

Nel 2000 si insediarono sull'isola una comunità di Frati Benedettini e le Suore della Fraternità di Gesù con un progetto di agricoltura biologica (Piga e Foresi., 2000).

### *PIANOSA OGGI*

Attualmente l'isola è ancora sede di un penitenziario, una diramazione della Casa di Reclusione di Porto Azzurro, sotto l'autorità del Ministero di Giustizia. I detenuti sono in regime di semi-libertà e svolgono quotidianamente lavori manuali, si occupano del "Pollaio Razionale", della manutenzione delle infrastrutture idriche, della ricostruzione dei muretti a secco sparsi per tutta l'isola e alcuni lavorano nella Cooperativa San Giacomo, che gestisce l'unico bar-ristorante e l'unico albergo attualmente presenti sull'isola.

Dal 1996, con l'istituzione dell'Ente Parco Nazionale dell'Arcipelago Toscano, l'isola e le sue acque sono considerate ambiente protetto.

Pianosa è sotto l'amministrazione del comune Campo nell'Elba. La popolazione residente sull'isola è attualmente formata soltanto da detenuti, circa una trentina, e due/tre guardie penitenziarie con le rispettive famiglie.

### 3. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

#### 3.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'Isola di Pianosa (Long. 10° 04' 44'' est e Lat. 42° 35' 07'' nord) situata nel Mar Tirreno, appartiene all'Arcipelago Toscano, e per estensione è la quinta tra le sette isole che lo compongono. L'isola è situata a 13 km a sud-ovest dell'Isola d'Elba, 50 km dalla costa continentale e 40 km dalla Corsica (Fig 3.1).



Figura 3.1: Ubicazione dell'isola di Pianosa (da sito web: <http://www.associazionepianosa.it/>).

L'isola ha un'estensione areale di circa 10,3 Km<sup>2</sup> e un perimetro costiero di 18 km, con un'altezza topografica massima di 29 m e media di circa 18 m.

Essa risulta nel complesso pianeggiante, presentandosi come un tabulato di forma sub-triangolare, leggermente basculato verso est. Pianosa deve il suo nome proprio a questa conformazione: *“prende il nome dalla sua superficie tutta piatta, anzi nel centro un poco concava: non vi si trova infatti che un monticello detto di Gian-Filippo dalla di cui cima godesi una prospettiva marittima di sorprendente bellezza, e poche altre prominente, una delle quali nel luogo*

*chiamato la Grottoscia, ed un'altra alle Quercie. Anche gli antichi la chiamarono per questo Planesia” (Zuccagni-Orlandini, 1836).*

L'isola conta due isolotti minori: La Scarpa sul lato orientale e La Scarpa a ridosso di Punta del Marchese, estremità settentrionale dell'isola (Fig. 3.2).

Pianosa è interamente compresa nel Parco Nazionale dell'Arcipelago Toscano, e nel suo intorno nel raggio di 1 miglio sono vietati navigazione e pesca. L'isola è sotto la tutela amministrativa del comune di Campo nell'Elba (Provincia di Livorno).



**Figura 3.2: Visione dall'alto dell'Isola di Pianosa (da Google earth).**

### 3.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E STRATIGRAFICO

L'Isola di Pianosa è una piccola porzione emersa di una dorsale sottomarina, che prende il nome di dorsale Elba-Pianosa o di altofondo di Pianosa. Tale dorsale si estende a partire dallo "scoglio d'Africa" (alcuni chilometri ad ovest dell'Isola di Montecristo) in direzione nord-sud, chiudendosi pochi chilometri ad est dell'Isola di Capraia (Bossio et al., 2000) (Fig. 3.3).



Figura 3.3: Schema paleogeografico dell'Arcipelago Toscano durante l'ultimo periodo glaciale, dove la dorsale Elba-Pianosa risultava completamente emersa (Bossio et al., 2000)

Tale dorsale divide il bacino tirrenico in due parti: una compresa tra la dorsale e la Corsica, che raggiunge gli 800 metri di profondità, l'altra tra la dorsale e il continente, con profondità non superiore ai 400 metri.

Questa configurazione strutturale è legata alla tettonica neogenica e pleistocenica, che ha interessato la catena appenninica. Essa ha determinato la suddivisione in una serie di alti e bassi strutturali e morfologici. Il bacino della Corsica è un *semi-graben* separato dall'Arcipelago, che giace su una dorsale prevalentemente sommersa (Dorsale Elba-Pianosa) (Aringoli et al., 2009).

L'Isola di Pianosa è, unica nell'Arcipelago Toscano, interamente costituita da rocce sedimentarie ed è nel complesso pianeggiante. I litotipi che caratterizzano l'isola, costituiti da terreni marini pliocenici, formano una lieve anticlinale con fianchi molto dolci. Questi poi poggiano, con netta discordanza angolare, su una successione di sedimenti miocenici piegati ed erosi. La serie termina con depositi quaternari marini e continentali (Collantoni et al., 1973; Raggi, 1983; Foresi et al., 2000).

In particolare, possono essere distinte le seguenti unità litostratigrafiche principali (Fig. 3.4), di seguito descritte:

- Formazione di Marina del Marchese (Burdigaliano);
- Formazione del Golfo della Botte (Tortoniano superiore-Messiniano);
- Formazione di Pianosa (Pliocene medio-Pleistocene inferiore);
- Panchina Tirreniana.

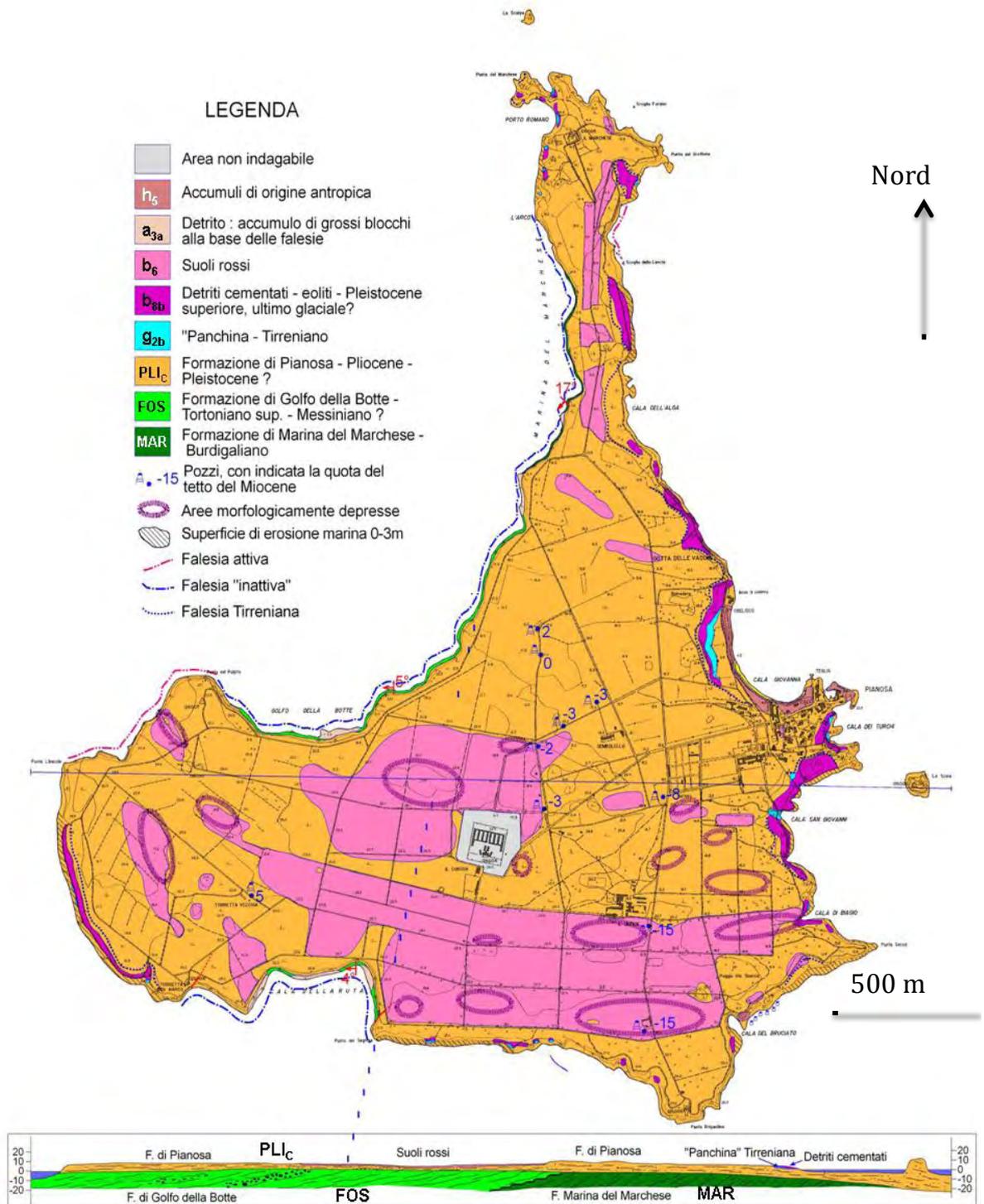


Figura 3.4: Carta geologica dell'Isola di Pianosa (Regione Toscana, fogli 328-341; [www.regione.toscana.it](http://www.regione.toscana.it))

### Formazione di Marina del Marchese

La Formazione di Marina del Marchese è costituita da marne con intercalazioni calcarenitiche, con uno spessore di circa 180 m. Gli strati formano una monoclinale, con immersione di 15°-17° verso W-SW. A piccola scala è possibile osservare faglie inverse e pieghe localizzate nella parte alta della formazione (Carnamusini et al., 2014). La formazione è stata suddivisa in tre *litofacies* da Carnamusini et al. (2014) in funzione della litologia e delle strutture sedimentarie. La prima, che domina la parte medio-bassa della successione, è caratterizzata da livelli tabulari di marne e marne limose con intercalazioni calcarenitiche. La parte medio-alta della successione è caratterizzata da marne e marne limose con intercalazioni calcarenitiche e calciruditiche; sono inoltre presenti livelli conglomeratici con granuli carbonatici e ciottoli. I livelli calcarenitici aumentano verso l'alto della successione. Le calcareniti e le calciruditi presentano sia livelli massivi che livelli a gradazione normale o laminati. Infine, la parte superiore della formazione è caratterizzata da livelli calcarenitici e da livelli di marne deformati da pieghe e faglie inverse. Dal punto di vista sedimentario questi depositi possono essere considerati di piattaforma esterna in *facies* torbidity (Foresi et al., 2000 e Carnamusini et al., 2014). Questa formazione affiora lungo il settore nord-occidentale dell'isola (Burdigaliano).

### Formazione del Golfo della Botte

Alla Formazione di Marina del Marchese si sovrappone la Formazione del Golfo della Botte, con spessore di circa 270 m. Gli strati di questa formazione formano una leggera monoclinale con immersione di 5°-10° e direzione W-SW. Questa è caratterizzata dalla presenza di argille marnose con intercalazioni arenacee e conglomeratiche (Fig. 3.5). Sono inoltre presenti livelli con spessori non superiori a 20 cm di argille siltose ricche in materia organica. La deposizione è legata alla presenza di un sistema fluviale deltizio che passa verso l'alto ad un ambiente lagunare (Foresi et al., 2000; Carnamusini et al., 2014). Questa formazione affiora alla base della falesia del Golfo della Botte e a Cala della Ruta.



**Figura 3.5: Livelli conglomeratici a Cala della Ruta.**

Fra le due precedenti formazioni mioceniche è presente un'ampia lacuna stratigrafica, che si estende dal Burdigaliano superiore al Tortoniano inferiore. Secondo alcuni autori (Bossio et al., 2000; Foresi et al., 2000), durante questo intervallo si sarebbe verificato il sollevamento dei depositi burdigaliani, con interruzione della sedimentazione e poi, un successivo sprofondamento che giustifica l'inizio della deposizione della Formazione del Golfo della Botte. Quest'ultima probabilmente poggia in discordanza angolare (il contatto non è osservabile in affioramento) sui depositi del Burdigaliano. Infatti, le due formazioni presentano immersioni di strato simili ma inclinazioni differenti: fino a 15-20° la Formazione del Golfo della Botte e 5-10° la Formazione di Marina del Marchese (Foresi et al., 2000). La suddivisione dei depositi miocenici in queste due formazioni è avvenuta recentemente (Bossio et al., 2000); in precedenza questi litotipi risultavano sotto l'unico nome di Formazione di Marina del Marchese, come si può vedere anche negli scritti di Collantoni e Borsetti (1973) (Tortoniano superiore-Messiniano).

#### Formazione di Pianosa

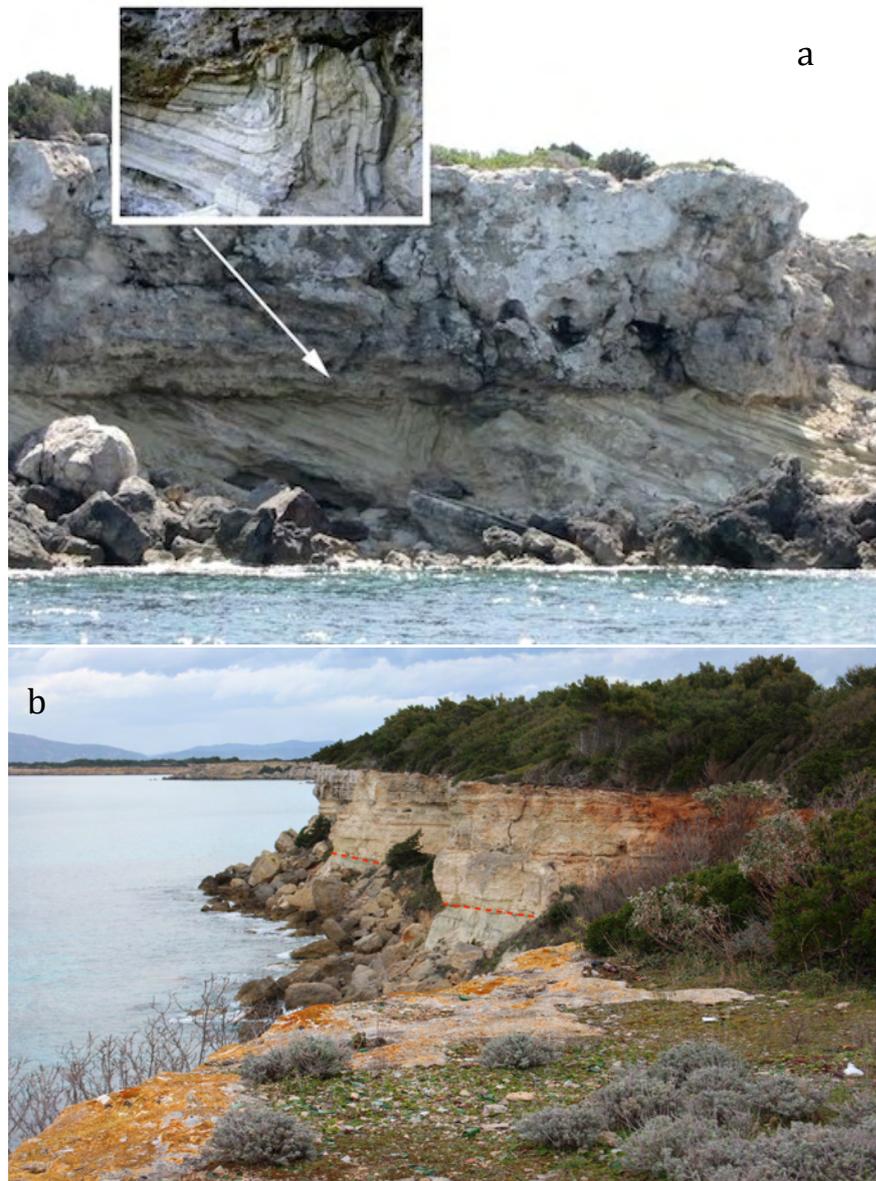
Su entrambe le formazioni mioceniche poggia, in discordanza angolare e con assetto sub-orizzontale, la Formazione di Pianosa (Fig. 3.6). Quest'ultima è costituita da calcareniti organogene e sabbie cementate ricche in macrofossili,

con uno spessore di circa 25-30 m. In particolare, dal punto di vista fossilifero si possono riconoscere: molluschi (Simonelli, 1889) ed alghe, ma anche briozoi (Gioli, 1889; Neviani, 1902), echinidi ed in minor misura resti di crostacei e pesci. Questo contenuto fossilifero testimonia una deposizione in ambiente marino di bassa profondità. Collantoni e Borsetti (1973), suddivesero questa formazione in due membri distinti e sovrapposti: un membro sabbioso inferiore e un membro sabbioso e organogeno superiore. Secondo Foresi et al. (2000) la seguente suddivisione non è però facilmente applicabile a tutta la formazione.



**Figura 3.6: Particolare della Formazione dell'isola di Pianosa.**

La discordanza angolare presente tra i depositi miocenici sottostanti e quelli pliocenici sovrastanti (Fig. 3.7) indica, secondo alcuni autori, che tra le due fasi sedimentarie si è manifestato un sollevamento, con emersione e basculamento dei depositi del Miocene superiore e deformazione di quelli del Miocene inferiore (Bossio et al., 2000; Foresi et al., 2000) (Pliocene medio-Pleistocene inferiore).



**Figura 3.7:** a) Discordanza angolare tra le calcareniti organogene plioceniche della Formazione di Pianosa e le sottostanti formazioni mioceniche, a) verso Punta del Marchese (da Graciotti et al., 2003); b) Zona marina del Marchese.

### *Panchina tirreniana*

Si riconosce, infine, un'ultima fase di deposizione marina grazie alla presenza, anche se poco diffusa, della Panchina tirreniana (sabbie gialle cementate) a giacitura orizzontale, con spessori stimati che variano da 0,5 m ad un massimo di circa 6-7 m e molto ricca in fossili. La Panchina, dove presente, poggia sulle sottostanti calcareniti plioceniche. La deposizione di questi litotipi è dovuta all'innalzamento eustatico del livello medio marino che si è verificato nel

Pleistocene superiore (Collantoni e Borsetti, 1973; Foresi et al., 2000) (Tirreniano).

Lungo ampi tratti del perimetro dell'isola, soprattutto nel fondo di piccole calette, si riconoscono depositi continentali più recenti di quelli tirreniani. Si tratta di sabbie a matrice marnoso-argillosa di colore rosso, più raramente giallo, spesso sottilmente stratificate, con alla base una breccia o, alcune volte, un paleosuolo. Tali depositi poggiano su quelli tirreniani e nel tempo ne hanno impedito la progressiva erosione (Foresi et al., 2000). In questi depositi sono stati rinvenuti rari resti di molluschi marini mal conservati e di piccole dimensioni, che presentano segni di rimaneggiamento. Questi depositi sono ancora oggi poco studiati; Foresi et al. (2000) li ritengono di origine colluviale, con probabili apporti eolici, deposti in un periodo con clima freddo e arido del Pleistocene superiore, durante il quale il livello marino era significativamente inferiore a quello attuale.

Lungo le coste, nei pressi di piccoli promontori isolati, si possono trovare delle breccie monogeniche con clasti a spigoli vivi, la cui roccia madre è la Formazione di Pianosa, immersi in una matrice marnoso-sabbiosa rossa. Nella matrice si rinvencono anche rari resti di vertebrati e numerosi gusci di gasteropodi polmonati. L'origine di tali breccie è verosimilmente legata ad accumuli istantanei dovuti a crolli in ambiente carsico ipogeo (Foresi et al., 2000).

Altri depositi, di origine continentale, sono quelli legati al riempimento di grotte e cavità. Si tratta di sedimenti prevalentemente argilloso-sabbiosi di colore rosso ricchi in fossili (gasteropodi polmonati e vertebrati) (Caterini, 1921).

Attualmente i processi di deposizione sull'isola sono pressoché assenti, non tenendo in considerazione i prodotti della pedogenesi e alcuni modesti accumuli colluviali o di frana.

### 3.3. LINEAMENTI GEOMORFOLOGICI

L'Isola di Pianosa si presenta come un "tavolato" di forma sub-triangolare. La forma piatta è da attribuire alla giacitura sub-orizzontale degli orizzonti calcarenitici, che ne formano la parte superiore (Formazione di Pianosa), ma anche alla mancanza di una rete idrografica superficiale dovuta alla elevata permeabilità dei litotipi superficiali e alla scarsità delle piogge. La sua apparente omogeneità è interrotta da alcune modeste sporgenze rocciose e da alcune depressioni di forma sub-ellittica.

Osservando la linea di costa si può notare la differenza tra la parte occidentale e quella orientale dell'isola: la prima mostra coste ripide a falesia, la seconda mostra coste meno ripide e degradanti verso est, in relazione ad una certa immersione del "tavolato" verso est. Queste differenze sono da attribuire all'assetto strutturale; come si può infatti osservare dalla carta e dalla sezione geologica est-ovest dell'isola (Fig. 3.4), nel settore occidentale affiorano, a metà delle falesie, i litotipi miocenici argilloso-marnosi facilmente erodibili, mentre in quello orientale si ritrovano i litotipi biocalcarenitici pliocenici, meno erodibili dei precedenti (Fig. 3.8).



**Figura 3.8: Esempio degli andamenti della linea di costa nella porzione occidentale (località il Marchese), e nella porzione orientale (a sud di Punta secca).**

I processi morfogenetici che maggiormente condizionano attualmente l'assetto morfologico dell'isola sono sostanzialmente due: quello costiero e quello carsico. Il processo costiero si manifesta con caratteristiche forme legate alla dinamica meteo-marina quali: falesie, piattaforme d'abrasione, vaschette d'erosione (marmitte), solchi di battente e scogli isolati. Il processo carsico, invece, ha originato caratteristiche forme epigee di dissoluzione chimica e forme ipogee

come condotte e grotte. Il carsismo ipogeo è relativamente sviluppato; questo fenomeno è legato all'elevata permeabilità per fratturazione delle calcareniti e delle sabbie cementate della Formazione di Pianosa, le quali affiorano in assetto sub-orizzontale per tutta l'isola determinando l'infiltrazione della maggior parte delle acque di precipitazione, seppur scarse. Il complesso carsico di Pianosa è costituito da grotte e condotte, a prevalente sviluppo orizzontale (Graciotti et al., 2003). Alcune di queste hanno l'ingresso sul livello attuale del mare e la loro genesi è connessa a fenomeni di dissoluzione legati al mescolamento di acque dolci meteoriche e acque marine salate (Fig. 3.9). Anche l'attività meccanica marina ha verosimilmente contribuito allo sviluppo delle cavità e in alcune zone ha determinato anche lo sviluppo di vaschette circolari.



**Figura 3.9:** Grotta che presenta l'apertura sul livello del mare.

Altre cavità risultano prossime alla linea di costa attuale; all'interno di queste sono stati rinvenuti depositi marini riferibili al Tirreniano (Graciotti et al., 2003) (Fig. 3.10). Dal ritrovamento di questi depositi, Graciotti et al. (2003), hanno ipotizzato l'esistenza di un carsismo ipogeo precedente all'ultimo interglaciale. Durante le varie campagne di misura svolte nell'ambito di questa Tesi sull'Isola di Pianosa, è stato possibile osservare alcune grotte, a testimonianza del grande

sviluppo del carsismo ipogeo. Inoltre, grazie al Professor Foresi dell'Università di Siena, è stato possibile visitare una delle grotte che si trova nella zona di Cala San Giovanni.



**Figura 3.10: Grotta carsica con apertura prossima alla linea di costa visitata durante una delle campagne, in località Cala San Giovanni.**

Durante questa visita è stato possibile osservare alcuni depositi calcarei concrezionali e la presenza di fori di litodomi, a testimonianza di un carsismo ipogeo precedente l'ultimo interglaciale. Inoltre, nella grotta erano presenti numerosi resti di animali, probabilmente cervi, attualmente non presenti come fauna locale sull'isola. La loro presenza all'interno di questa grotta è probabilmente legata all'ultimo periodo glaciale, dove verosimilmente l'isola risultava connessa al continente (Fig 3.11).



**Figura 3.11: Resti di animali all'interno della grotta catalogati dal team del Dott. Foresi.**

Anche l'attività antropica, legata alla colonia penale agricola, ha contribuito a modificare in parte il paesaggio dell'isola, che oggi risulta caratterizzato da innumerevoli muretti a secco per isolare campi e poderi. Inoltre, la costruzione alla fine degli anni '70 del grande muro in cemento armato, che separa la zona del paese da quella destinata alla colonia penale agricola, arreca un certo danno all'ambiente circostante, sia per l'impatto ambientale, sia perché la sua presenza può alterare in qualche modo alcuni processi morfogenetici di tipo erosivo e deposizionale, in particolare legati all'attività eolica.

### **3.4. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO**

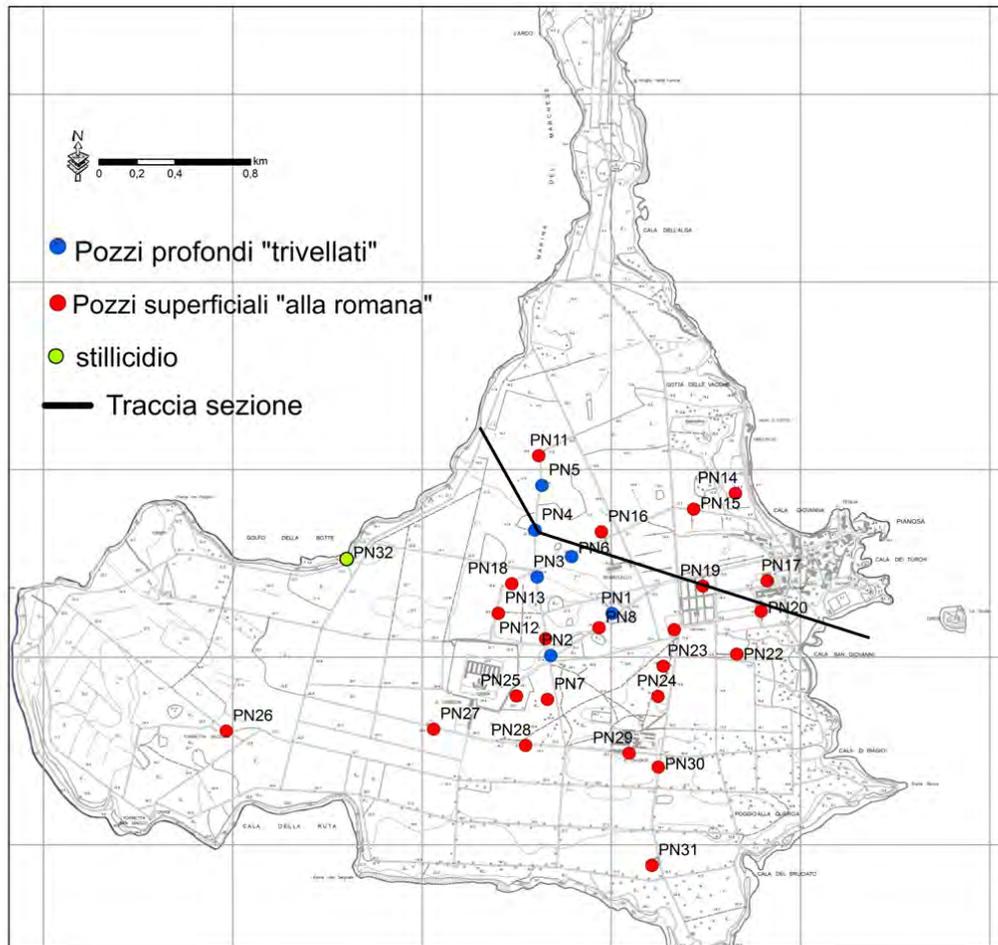
L'assetto geologico dell'Isola di Pianosa, in particolare il fatto che sia quasi interamente costituita da rocce sedimentarie permeabili (litotipi calcarenitici pliocenici e livelli conglomeratici dei litotipi miocenici), consente all'isola di avere acquiferi di una certa rilevanza, rispetto alle altre isole dell'Arcipelago Toscano. Questa caratteristica le ha permesso di contare su una riserva idrica importante, paragonata alla sua piccola estensione (circa 10 km<sup>2</sup>) e alla scarsità di afflussi meteorici, dell'ordine dei 450 mm/annui (Doveri et al., 2012). Come osservato in precedenza, tale riserva ha consentito in passato l'approvvigionamento idrico di oltre 1500 persone, anche se il sovrasfruttamento dell'acquifero, l'attività agricola e l'allevamento ne hanno provocato nel tempo un deterioramento per fenomeni d'inquinamento e di intrusione marina.

Di seguito si descrive la permeabilità delle rocce, la struttura idrogeologica e le falde idriche sotterranee. L'isola è caratterizzata da due differenti complessi idrogeologici (Raggi, 1983; Doveri et al., 2012): uno freatico, superficiale, all'interno della Formazione di Pianosa, l'altro invece confinato-semi confinato, profondo, all'interno dei litotipi miocenici.

Come descritto in precedenza, i litotipi miocenici (Formazione di Marina del Marchese e Formazione del Golfo della Botte) sono costituiti da livelli marnoso-argillosi dotati di permeabilità bassa o pressoché impermeabili, intercalati a livelli conglomeratici e calcarenitici, dotati di una certa permeabilità. Le formazioni mioceniche risultano quindi complessivamente impermeabile in senso ortogonale alla stratificazione, mentre presentano una moderata permeabilità lungo i livelli conglomeratici e calcarenitici (Fig 3.12). In realtà, da studi recenti sui litotipi miocenici si evince come la Formazione di Marina del Marchese sia caratterizzata da livelli conglomeratici e calcarenitici soltanto nella parte alta della successione e sia per questo motivo probabilmente dotata di una permeabilità minore rispetto alla Formazione del Golfo della Botte (Carnamusini et al., 2014).

Di contro, i litotipi pliocenici (Formazione di Pianosa) superficiali, costituiti da calcareniti organogene e sabbie cementate, sono caratterizzati di una buona permeabilità di tipo misto, ovvero da una permeabilità primaria, o per porosità, e

da una permeabilità secondaria, dovuta alla fratturazione e ai processi di carsificazione. La permeabilità secondaria di queste bancate può essere considerata crescente nel tempo, tenendo conto proprio dei processi di dissoluzione chimica che interessano questi depositi. La formazione pliocenica è quindi un litotipo acquifero e la circolazione delle acque può avvenire in modo diffuso.



OVEST

EST

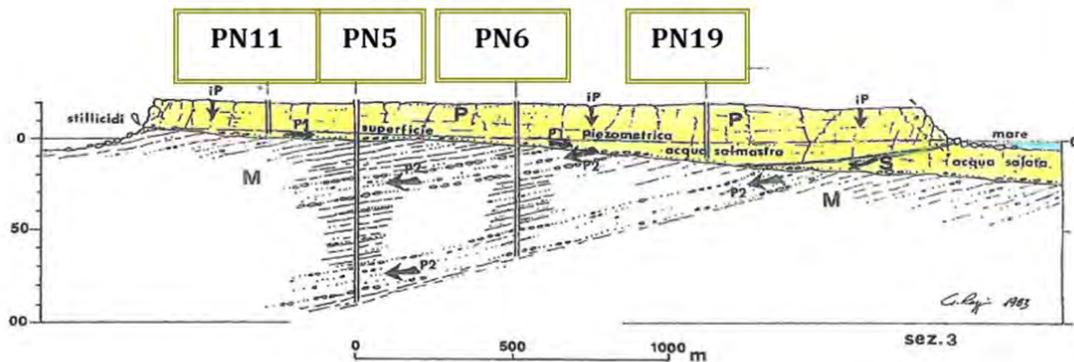


Figura 3.12: Carta topografica e schema di circolazione idrica sotterranea dell'Isola di Pianosa (M: Miocene; P: Pliocene; iP: infiltrazione meteorica diretta; S: cuneo salino; P1: falda freatica; P2: orizzonti acquiferi confinati (da Raggi, 1983, mod.)

Sulla base dell'assetto geologico-strutturale, nonché dalle caratteristiche di permeabilità appena descritte, sull'Isola di Pianosa sono quindi presenti, come

già accennato, due differenti complessi idrogeologici: uno freatico e uno confinato-semi confinato profondo, verosimilmente connessi nella porzione orientale dell'isola (Raggi, 1983; Doveri et al., 2012).

Il complesso idrogeologico superficiale è costituito dalle calcareniti plioceniche della Formazione di Pianosa, che rappresenta l'acquifero freatico. Esso è stato il primo ad essere sfruttato, se si pensa che già negli scritti di Attiglio Zuccagni-Orladini del (1836) erano stati censiti 7 pozzi scavati a mano ("alla romana"): *"si contano sette pozzi distribuiti in varie parti dell'isola, e tutti escavati a scalpello nel masso calcareo alla profondità di oltre 25 braccia"* (1 braccio = 0,583 m).

Attualmente, i pozzi censiti che si attestano su quest'acquifero sono 25, ed hanno permesso per anni il sostentamento della popolazione residente. Di questi pozzi superficiali, ad oggi, ne viene utilizzato soltanto uno (PN19, nell'area del ex Pollaio Razionale), non per usi idropotabili, ma soltanto in ambito agricolo. La dismissione dei pozzi "romani" è legata al deterioramento della qualità delle acque, per fenomeni d'inquinamento e intrusione marina, ma anche per i limitati quantitativi sfruttabili (Raggi, 1983; Doveri et al., 2012).

Il complesso idrogeologico superficiale poggia in discordanza sulle formazioni mioceniche sottostanti (Formazione di Marina del Marchese, Formazione del Golfo della Botte), immergenti verso ovest (Raggi, 1983). Il contatto tra le calcareniti plioceniche e le sottostanti formazioni è rappresentato da una superficie dotata nel complesso di bassa permeabilità, che rappresenta il substrato dell'acquifero freatico.

La presenza di questa superficie impermeabile, o comunque scarsamente permeabile, è giustificata anche dalla presenza di alcune scaturigini (pur di modesta portata, circa 2 litri/min), presenti nel settore occidentale dell'isola (es. Golfo della Botte), proprio al contatto tra i litotipi pliocenici e miocenici (Fig 2.10, dove è mostrato lo stillicidio). Si suppone anche, la presenza di sorgenti sottomarine nel settore orientale dell'isola, dove questa superficie impermeabile affiora al di sotto del livello del mare.

Come già esposto, i litotipi miocenici sono caratterizzati in generale da una scarsa permeabilità, però i livelli conglomeratici e calcarenitici intercalati in particolare nella Formazione del Golfo della Botte rappresentano dei termini

dotati di una certa permeabilità e sono sede di una circolazione idrica significativa, come testimoniano i pozzi profondi produttivi che intercettano questi livelli. Tali livelli acquiferi sono stati rinvenuti negli anni '50, quando sono stati trivellati, per esigenze idropotabili, i primi pozzi profondi (oltre 100 m). Oggi i pozzi che attestano da questi livelli acquiferi sono 6, di cui, uno soltanto, il PN 3, attualmente utilizzato per usi idropotabili, mentre il PN2 viene utilizzato soltanto in caso d'emergenza (pozzo antincendio); il PN5 e il PN6 risultano di fatto inutilizzabili a seguito di probabili fenomeni di collasso.

A seguito del ritrovamento di questi livelli acquiferi produttivi, sono state molte le ipotesi sull'origine di queste acque, alcune delle quali ipotizzarono una provenienza dell'acqua dall'Elba o addirittura dalla Corsica. Tuttavia, l'ipotesi proposta da Raggi (1983) risulta ancora oggi la più semplice e realistica basata su osservazioni in situ e dati analitici. Questa ipotesi tiene conto del particolare assetto idrostrutturale, delle caratteristiche idrogeologiche dei vari litotipi e della discordanza tra le giaciture delle calcareniti plioceniche e dei litotipi miocenici, le prime a giacitura sub-orizzontale, i secondi immergenti di circa 20° verso SW (Collantoni e Borsetti, 1973). I livelli permeabili miocenici possono quindi ricevere le acque dalla sovrastante falda freatica, nelle zone dove questi vengono a contatto con le calcareniti plioceniche. Allontanandosi da queste zone di contatto i livelli acquiferi risultano in condizioni confinate - semi confinate, perché intercalati a livelli marnoso-argillosi. Quello che si evidenzia da questa ipotesi è che l'unica fonte di ricarica dei livelli acquiferi è la sola infiltrazione meteorica diretta, che avviene all'interno dei litotipi pliocenici. Questa ipotesi è stata più recentemente confermata anche nello studio di Doveri et al. (2012) volto alla definizione degli aspetti idrogeologici dell'Isola di Pianosa utilizzando anche metodologie idrogeochimiche-isotopiche.

Le scaturigini precedentemente citate sono state classificate come stillicidi già da Raggi (1983), però lo Zuccagni-Orlandini (1893), così le descrive: *"Le acque potabili non mancano in Pianosa, poiché oltre vari pozzi vi si trovano anche alcune fontane. Buona e copiosa è la sorgente che scaturisce in luogo detto la Botte: filtrano le sue acque da uno scoglio, mantenendosi perenni anco nelle*

*maggiori siccità e cadono in un serbatoio scavato per riceverle (Lavanderia vecchia) (Fig 3.13).*



**Figura 3.13: Golfo della Botte: vasche di raccolta costruite dagli abitanti per raccogliere le acque sorgentizie (Lavanderia vecchia).**

*Un'altra sorgente detta della Fogna trovasi tra il Forte e Cala Giovanna (oggi chiamata con il nome Cala San Giovanni); fluisce nella oscura profondità di uno scoglio...scarsa è la quantità di quest'acqua, sebben perenne...”.*

La scaturigine del Golfo della Botte è ancora presente, seppur di modesta portata, e si trova attualmente sotto alcuni massi che si sono recentemente staccati dalla parete sovrastante; essa risulta ancora raggiungibile, così come sono tuttora visibili le vasche descritte dallo Zuccagni (Fig 3.14). Le altre, riportate in questo scritto, non sono attualmente censite e non sono state rinvenute durante le campagne effettuate nell'ambito di questo lavoro.



**Figura 3.14: a) Vaschetta di raccolta dell'acqua della sorgente; b) Frana di crollo di recente distacco nel sito della sorgente.**

La diminuzione significativa delle portate di queste sorgenti, oggi riconducibili sostanzialmente a stillicidi, può essere in parte legata al sovrasfruttamento della riserva idrica, che è stato operato nel periodo di massimo popolamento dell'isola, ma forse anche ad una possibile diminuzione degli afflussi meteorici nel tempo. Lo sfruttamento eccessivo, durante gli anni di massima attività carceraria, ha determinato un forte abbassamento della superficie piezometrica, testimoniato da Raggi (1983). Tale sovrasfruttamento, che ha determinato una riduzione del carico di acqua dolce, connesso con l'assetto geologico-strutturale ha anche favorito fenomeni di ingressione marina sul lato orientale. Infatti, il contatto tra i litotipi pliocenici e miocenici, che rappresenta il substrato dell'acquifero freatico, immerge verso est-sud est, e nella stessa direzione aumenta progressivamente lo spessore delle calcareniti organogene e sabbie cementate, che sulla costa orientale vengono a contatto con il mare (Raggi, 1983). Considerando il collegamento idraulico tra l'acquifero freatico e i livelli acquiferi profondi, questo fenomeno potrebbe interessare entrambi. Questa situazione non si può invece verificare sul lato occidentale dell'isola, dove il contatto tra gli orizzonti calcarenitici e i sottostanti orizzonti argillosi o argilloso-marnosi impermeabili, si trova ad un'altezza superiore al livello del mare (Fig. 3.12).

Si riporta di seguito una tabella riassuntiva (Tab. 3.1), dove si può osservare lo sfruttamento idrico della risorsa dell'isola, elaborata da Nicotra (2008) sulla base di indicazioni bibliografiche e informazioni fornite dall'Amministrazione penitenziaria di Porto Azzurro.

EPOCA	PRESENZA DI PERSONE	POZZI UTILIZZATI	NOTE
Paleolitico superiore (20.000-15.000 anni B.P)	si	Nessun pozzo esistente	
Mesolitoco			Non si hanno informazioni su questo periodo
Neolitoco	si		
Età del Bronzo	si		
Età etrusca			Non si hanno informazioni su questo periodo
Età romana	si	si	Approvvigionamento Sorgente della Botte. L'isola risulta abitata fino al III secolo D.c, dopo di che si ha un periodo di abbandono
Età medievale	si	si	
Da XVIII sec. D.c a Napoleone	Non stanziali	si	Approvvigionamento Sorgente della Botte
1806-1845	Si, pochi residenti	si	
1845	Circa 170 persone (34 stabili), 30 mucche, 1000 pecore e 300 capre	si	
1849	121 persone	si	
1858	12 detenuti minorenni	si	
1859	110 detenuti	si	
1860	160 detenuti	si	
1861	149 detenuti	si	
1863-1872	350 detenuti	si	Costruzione PN11
1880	960 detenuti	si	
1907	942 persone	PN9, PN11, PN12, PN17, PN20, PN21, PN25, PN29, PN31 (Ricostruzione di Sommier (1909))	
1920	Circa 1500 persone	si	
1932-1934	Circa 1000 detenuti e 60 famiglie	si	
1951		si	Perforazione dei primi 3 pozzi profondi
1972		si	Perforazione di altri 3 pozzi profondi
1976		PN5, PN6, PN9, PN12, PN16, PN26, PN29, PN31	

1977-1998		PN1, PN4	
Anni '80	Maggiore presenza di abitanti	si	Difficoltà idriche testimoniate da Raggi (1983)
1988		PN2, PN3, PN4, PN5, PN6 (da rapporto analisi USL 25)	
1989	1000 detenuti e 500 famiglie	si	
1992	100 detenuti e 92 agenti	si	
1992-1997	Aumento detenuti per mafia	PN1, PN2, PN3, PN4, PN7, PN8, PN11, PN12, PN13, PN 16, PN17, PN18, PN19, PN20, PN22, PN23, PN27, PN29, PN31 (dati Regione Toscana)	
1998	Pochi abitanti (chiusura)	si	
1999		PN1, PN2, PN3, PN4, PN8 (da ARPAT di Piombino)	
Maggio 2000		PN3	
Agosto 2000		PN1, PN3	
Dicembre 2000		PN3	
Agosto 2001		P2, PN12 (poche ore al giorno), PN3	
Luglio 2002		PN1	
2006		PN2, PN3	
2007		PN3 (uso idropotabile), PN19 (uso agricolo) PN2 (uso antincendio)	
oggi	Circa 30 detenuti, 2 guardie e turisti nella stagione estiva	PN3 (uso idropotabile), PN19 (uso agricolo) PN2 (uso antincendio)	

**Tabella 3.1: Ricostruzione storica dello sfruttamento della risorsa idrica sull'Isola di Pianosa (Nicotra, 2008).**

#### 4. DATI METEOCLIMATICI

La conformazione topografica dell'Isola di Pianosa le consente di godere di una peculiarità climatica che la contraddistingue dalle altre isole dell'Arcipelago Toscano. Di seguito si riportano i dati meteo climatici raccolti da Vittorini (1976), dalla Provincia di Livorno e dall'IBIMET-CNR (Fig. 4.1), ripresi anche da Nicotra (2008). Questi dati saranno confrontati con quelli più recenti (2013-2015), forniti in parte dall'IBIMET-CNR e in parte registrati dal pluviometro totalizzatore installato da IGG-CNR e Dipartimento di Scienze della Terra (Università di Pisa) nell'ambito di questo progetto.



Figura 4.1: Stazione meteorologica dell'IBIMET-CNR sull'Isola di Pianosa (cerchio rosso).

#### *RADIAZIONE SOLARE*

L'Isola di Pianosa, per la sua forma tabulare, ha spesso il soleggiamento più elevato della Toscana, con 2067 ore di sole/anno. Il soleggiamento estivo raggiunge il suo valore massimo nel mese di luglio, con 343 ore di sole (36,6%

di quello annuo); quello invernale raggiunge il suo valore minimo nel mese di dicembre con 110 ore di sole (15,3% di quello annuo). In tabella 4.1 sono riportati i valori di soleggiamento assoluto in ore (F) dal 1958 al 1972.

<b>F</b>	<b>GEN</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>APR</b>	<b>MAG</b>	<b>GIU</b>	<b>LUG</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OTT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>Anno</b>
Ore	129	140	189	226	283	302	343	309	240	206	130	110	2607

**TABELLA 4.1: Media mensile del soleggiamento assoluto in ore riferito agli anni 1958-1972 (Vittorini, 1976).**

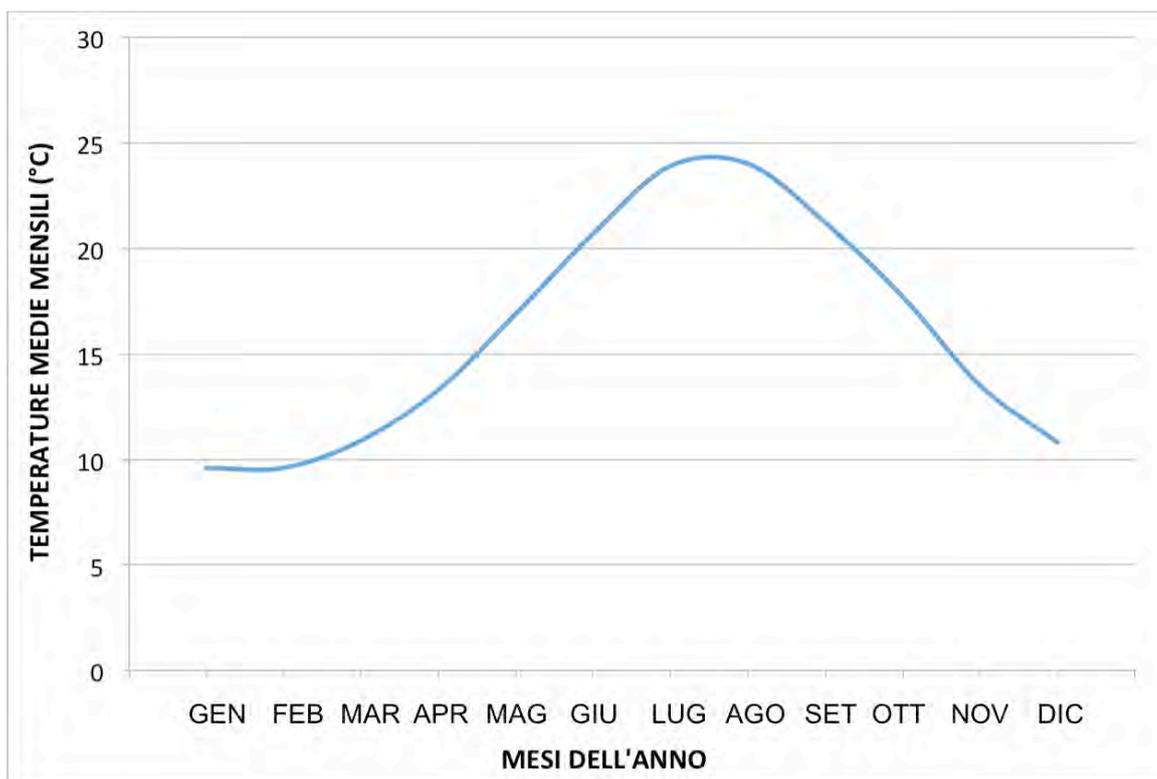
### *TEMPERATURA*

In tabella 4.2 sono riportati i valori di temperatura media mensile e annua per il periodo 1960-2002, registrati presso la stazione gestita dall'IBIMET-CNR e posta nei pressi del paese.

La temperatura media dell'Isola di Pianosa risulta, per tale periodo, di 16°C (Tab. 4.2).

<b>T°C</b>	<b>GEN</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>APR</b>	<b>MAG</b>	<b>GIU</b>	<b>LUG</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OTT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>Media</b>
Gradi	9,6	9,6	10,9	13,3	16,9	20,7	23,9	24	21,2	17,7	13,5	10,8	16,0

**TABELLA 4.2: Temperatura medie mensili e annue in C° registrate presso la stazione di Pianosa (1960-2002) (Nicotra, 2008).**



**Figura 4.2: Temperature medie mensili per il periodo 1960-2002 (dati IBIMET-CNR).**

Se si osserva il regime termico (Tab. 4.2; Fig. 4.2) si può facilmente notare come le temperature medie dei mesi autunnali risultino maggiori di quelle primaverili. Questo dipende dall'elevato grado di marittimità (influenza del mare sul clima), legato ai forti rilasci di calore dovuti all'inerzia del mare. Infatti, a queste latitudini il mare cede durante i mesi autunnali il calore accumulato negli strati superficiali (termoclino) durante il periodo estivo (maggio-settembre), rendendo il clima autunnale più mite.

L'escursione termica annua, riferita sempre agli anni 1960-2002, risulta di 14,4°C, con valori medi di T max in agosto (24°C) e valori di T min in febbraio (9,6°C).

Se si confrontano questi dati con quelli più recenti riportati in Tab. 4.3 e riferiti al periodo 2013-2015, si può osservare come le temperature medie mensili di tutti i mesi dell'anno risultino maggiori; in particolare si nota un significativo aumento di quelle dei mesi invernali di circa 3°.

T°C	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	Media
Gradi	12,1	11,5	12,4	14,6	17,8	22,0	24,6	24,9	22,5	20,2	16,0	13,0	17,6

Tab. 4.3: Temperatura medie mensili e annue in °C registrate presso la stazione di Pianosa (dati IBIMET-CNR 2013-2015).

Tale aumento può essere collegato a piccole variazioni climatiche connesse con il fenomeno del surriscaldamento globale. Nonostante questo, va sottolineato che, i dati fanno riferimento a soli due anni e quindi non possono essere considerati rappresentativi del regime termico medio (almeno 10 anni di dati).

Nonostante questa variabilità, se si riporta nuovamente il grafico con il regime termico (Fig. 4.3) del periodo 2013-2015 a confronto con quello del periodo 1960-2002, si nota come l'andamento delle temperature nell'arco dell'anno sia sostanzialmente il medesimo, ma traslato verso temperature lievemente maggiori. I dati di temperatura risultano confrontabili in quanto registrati dalla medesima stazione meteorologica.

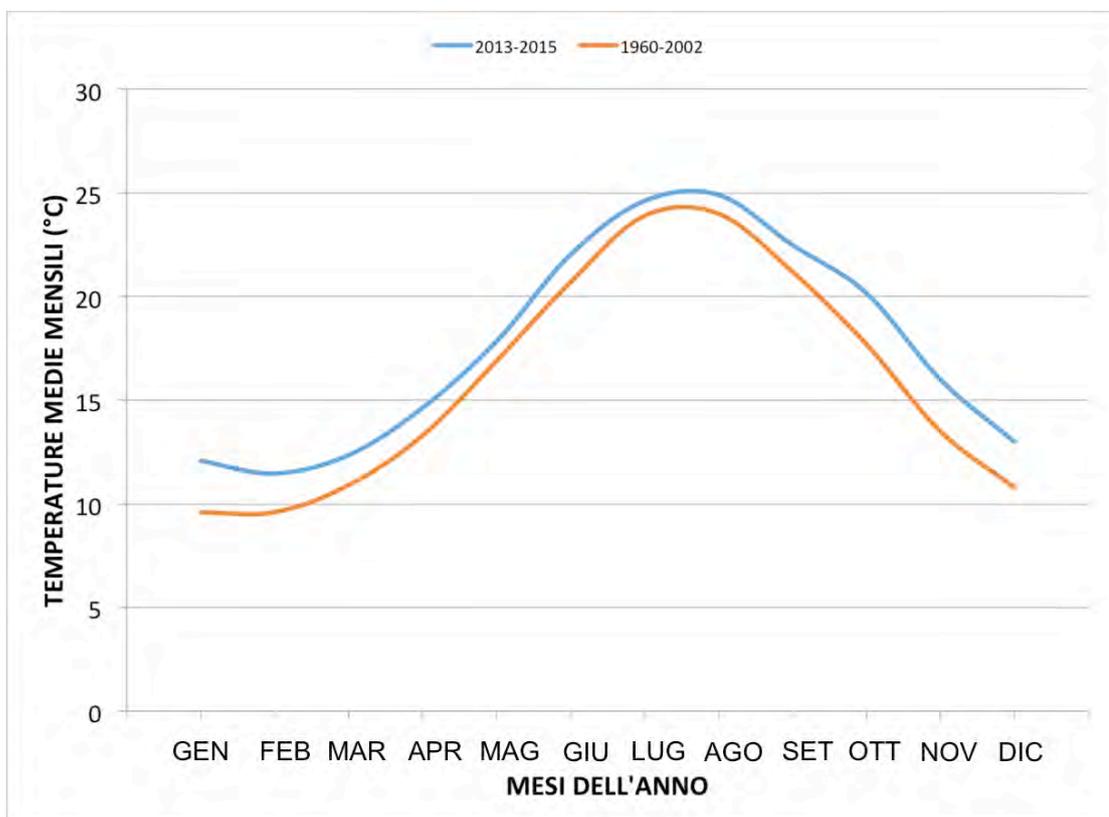


Figura 4.3: Confronto tra le temperature medie mensili nei periodi 2013-2015 e 1960-2002 (dati IBIMET-CNR).

Infine, nel periodo 2013-2015, l'escursione media annua risulta di 13,4 °C; il valore leggermente minore rispetto al periodo 1960-2002 è legato sostanzialmente, come abbiamo già detto, al fatto che le temperature dei mesi invernali risultano più elevate.

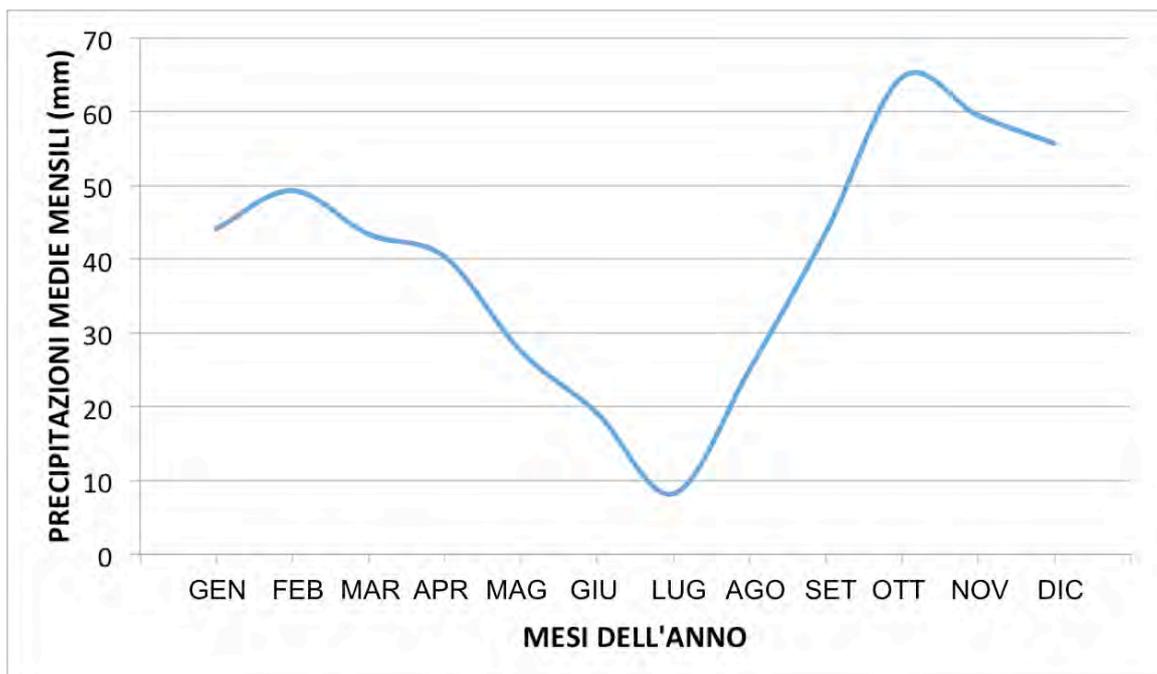
### *PRECIPITAZIONI*

Dai dati di precipitazione registrate dalla stazione meteorologica dell'Isola di Pianosa, essa risulta la stazione toscana di minore piovosità rispetto alle altre isole dell'Arcipelago e del continente (Vittorini, 1976). I dati riferiti agli anni 1960-2002 (Nicotra et al., 2000) mostrano che la media delle precipitazioni annue registrate a Pianosa è pari a 480,7 mm (Tab. 4.4).

P(mm)	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	ANNO
	44,2	49,3	43,4	40,3	27,5	19,1	8,2	25,1	43,7	64,7	59,5	55,7	480,7

**TABELLA 4.4: Precipitazioni medie mensili e annua registrate alla stazione di Pianosa nel periodo 1960-2002 (Nicotra, 2008).**

L'andamento del grafico (Fig. 4.4) mostra un massimo assoluto delle precipitazioni nel mese di ottobre e un minimo assoluto a luglio. Si osserva che esiste un massimo di pioggia annua secondario nella stagione invernale (febbraio) e un minimo relativo a gennaio.



**Figura 4.4: Precipitazioni medie mensili nel periodo 1960-2002 (Nicotra, 2008).**

Si può quindi affermare che sull'isola il regime pluviometrico, che indica l'andamento delle precipitazioni nell'arco di un anno, è di tipo submediterraneo (AIPE: massimo principale in Autunno, massimo secondario in Inverno, minimo secondario in Primavera e minimo principale in Estate) (Pinna et al., 1985). A Pianosa, si osserva infatti la presenza di due massimi relativi (in autunno il massimo principale e in inverno il massimo secondario) e due minimi (in estate il minimo principale e in inverno quello secondario).

Esaminando il diagramma termo-pluviometrico delle medie mensili elaborato da Nicotra (2008) (Fig. 4.5) si può osservare una concordanza tra il minimo estivo delle precipitazioni e il massimo assoluto delle temperature (luglio); lo stesso avviene per il massimo secondario delle precipitazioni corrispondente al minimo relativo delle temperature invernali (febbraio).

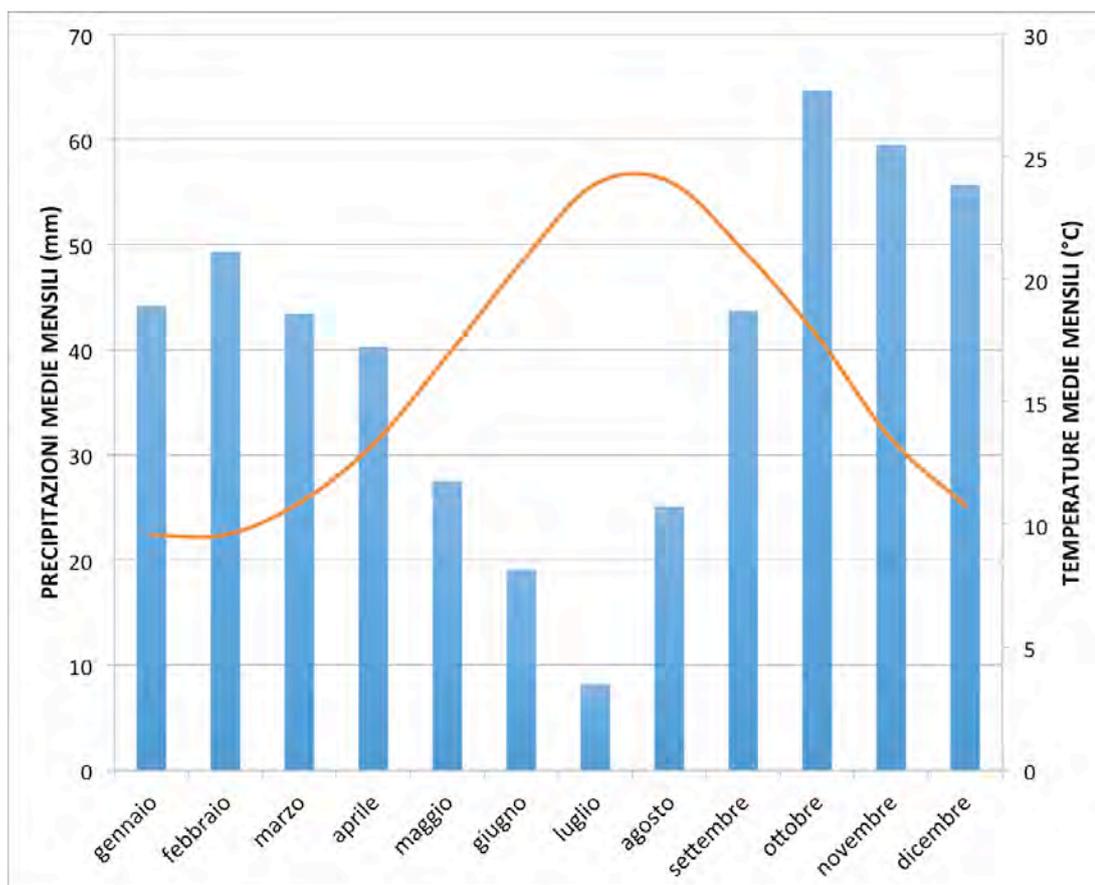


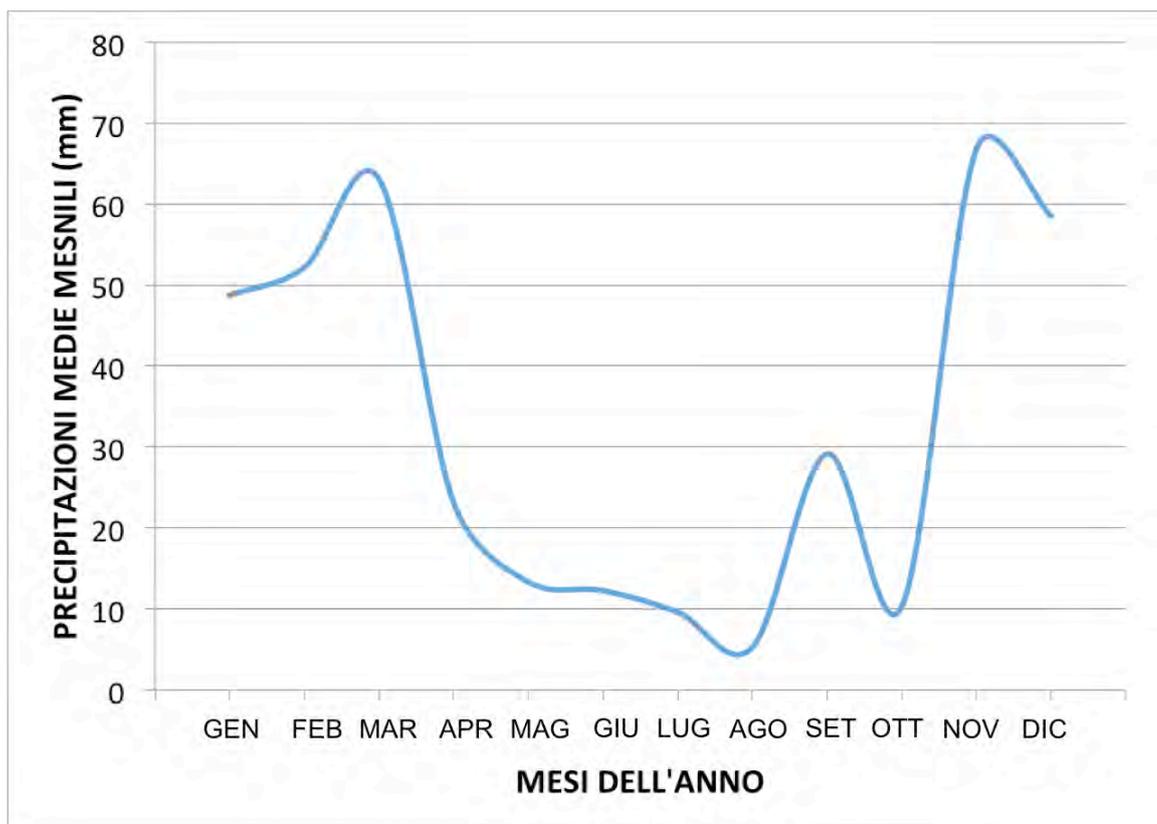
Figura 4.5: Andamento termo-pluviometrico delle medie mensili in blu precipitazioni medie mensili, in rosso temperature medie mensili del periodo 1960-2002 (Nicotra, 2008).

Se si confrontano questi dati con quelli più recenti (2013-2015), riportati in Tab. 4.5, si può osservare una diminuzione della pioggia media annua registrata sull'isola, di circa 80 mm.

P(mm)	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	ANNO
	48,7	52,2	63,1	23,1	13,3	12,3	9,6	5,3	29,1	10,3	66,8	58,5	392,3

TABELLA 4.5: Precipitazioni medie mensili e annua (2013-2015).

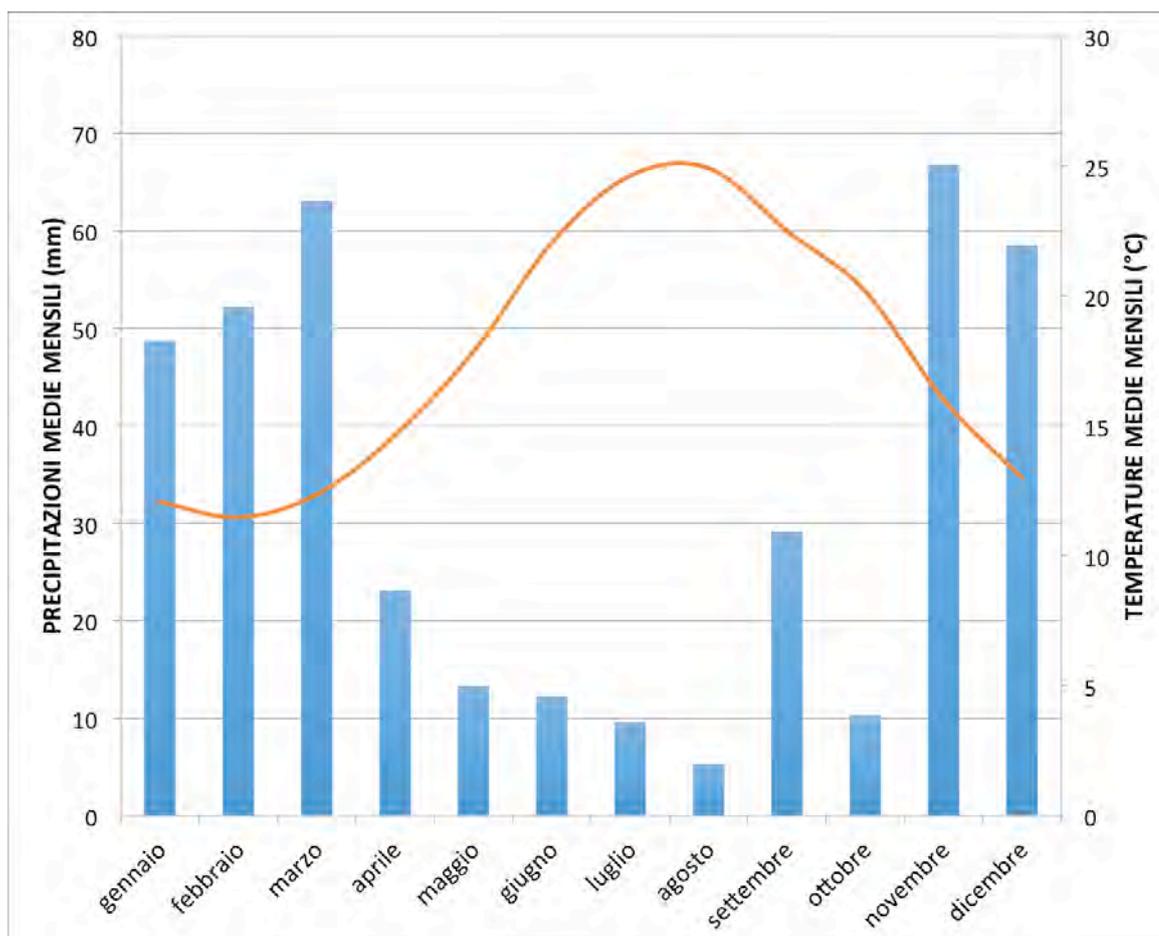
In particolare se si osserva il grafico (Fig. 4.6) si può osservare un andamento del regime pluviometrico differente.



**Figura 4.6: Precipitazioni medie mensili nel periodo 2013-2015.**

Nonostante queste differenze, dal grafico si osserva che anche per gli anni 2013-2015 il regime pluviometrico è di tipo submediterraneo, con due massimi (principale novembre e secondario in marzo) e due minimi (principale agosto e secondario in gennaio). In realtà, nel breve periodo esaminato, i dati mostrano un ulteriore minimo nella stagione autunnale (mese di ottobre) legato ad un mese di ottobre particolarmente siccitoso; essendo troppo breve il periodo di analisi tale minimo non condiziona la definizione del tipo di regime pluviometrico.

Se si esamina infine l'andamento del regime termo-pluviometrico delle medie mensili (Fig. 4.7), sempre nel periodo 2013-2015, si osserva anche in questo caso una corrispondenza tra il minimo delle precipitazioni e il massimo assoluto delle temperature (agosto); invece il massimo secondario delle precipitazione (marzo) non corrisponde del tutto al minimo delle temperature (febbraio).



**Figura 4.7: Andamento termo-pluviometrico delle medie mensili in blu precipitazioni medie mensili, in arancione le temperature medie mensili del periodo 2013-2015.**

Come già detto per le temperature, i dati sono comunque pochi per poter evidenziare particolari cambiamenti nel regime pluviometrico.

#### *CONDIZIONI ANEMOMETRICHE*

Nelle isole dell'Arcipelago Toscano la velocità del vento è strettamente legata alla loro posizione rispetto alle coste toscane e alla Corsica (Vittorini 1976).

Sulle condizioni anemometriche dell'Isola di Pianosa non ci sono molti dati, se non quelli raccolti negli anni 2003-2004 da Nicotra (2008) e uno studio precedente di Vittorini (1976) che si riferisce agli anni 1960-1969. I venti regnanti sono quelli che spirano da sud e da nord, che mostrano rispettivamente valori di frequenza media annua di 16,0% e di 18,6%. Anche lo scirocco mostra una frequenza alta di 16,1%, mentre il libeccio, vento dominante sulle coste toscane, presenta sull'Isola di Pianosa una frequenza bassa (5,4%), risultando

comunque il vento che spira con la velocità più elevata (41 km/h). In base alla velocità del vento, il libeccio è seguito dal Maestrone (27 km/h) e dalla Tramontana (26,1 km/h).

Vittorini (1976) riferisce inoltre che, in generale, non esiste un avvicendamento stagionale dei venti, poiché i venti da sud spirano tutto l'anno, con un massimo nel mese di giugno. Sempre secondo Vittorini (1976) e Nicotra (2008), complessivamente i mesi estivi risultano quelli a maggiore ventosità.

### *TIPO DI CLIMA*

Esistono numerose classificazioni climatiche; le più utilizzate risultano la classificazione di Köppen (1936) e la classificazione di Thornthwaite (1948). Tali classificazioni, di tipo empirico-quantitativo, si basano su valori misurati degli elementi del clima, tra cui la temperatura dell'aria e le precipitazioni, che vengono opportunamente combinati e/o elaborati.

In particolare, la classificazione di Köppen si basa sulla temperatura e sulla piovosità, nonché sul regime annuo di questi due elementi nelle varie aree. L'autore ha contrassegnato ciascun tipo di clima con una serie di lettere (da due a quattro), individuando una formula climatica che indica una sintetica descrizione del clima. La prima lettera, maiuscola, indica delle fasce climatiche latitudinali crescenti dall'equatore ai poli, per un totale di 5 classi (lettere A-E). All'interno di ciascuna di queste cinque classi principali sono individuabili ulteriori caratteri climatici, soprattutto pluviometrici, che vengono indicati con lettere minuscole. L'Isola di Pianosa, ma anche le altre isole dell'Arcipelago Toscano, è compresa nel tipo Csa (Vittorini, 1976; Nicotra, 2008), dove C indica un clima mesotermico umido (temperatura media del mese più freddo compresa tra +18°e -3°), s indica accentuata siccità estiva e infine a indica che la temperatura media del mese più caldo è superiore a 22°.

Questa classificazione ha però scarsa attitudine a discriminare tipi climatici poco diversi; questo problema è stato risolto dal sistema Thornthwaite (1948), che definisce le varietà climatiche con una formula costituita da 4 indici:

- Indice di umidità:  $Iu = (e/Ep) * 100$
- Indice di aridità:  $Ia = (d/Ep) * 100$

- Indice di umidità globale:  $I_m = I_u - I_a$
- Indice di concentrazione media estiva dell'evapotraspirazione potenziale:  
 $CEET = (E_p \text{ estiva} / E_p \text{ annua}) * 100$

dove:

e: eccedenza idrica annua (quantitativo di acqua (mm) che supera l'evapotraspirazione reale (quella che realmente avviene) nell'arco di un anno e che defluisce a mare o può essere utilizzata ( $e = P - E_r$ , con  $E_r$  evapotraspirazione reale));

$E_p$ : evapotraspirazione potenziale annua (definita come la quantità di acqua (mm) che in un determinato intervallo di tempo passerebbe all'atmosfera per evaporazione dal suolo e per traspirazione dalla vegetazione in condizioni di suolo permanentemente saturo);

d: deficit idrico annuo:  $d = E_p - E_r$ .

Attraverso il calcolo dell'indice di umidità globale si possono definire sei classi climatiche per classificare l'area di studio nel periodo preso in considerazione (Tornthwaite et al., 1957):

- Tipo perumido  $I_m = \geq 100$
- Tipo umido  $I_m = 20 \div 100$
- Tipo sub-umido  $I_m = 0 \div 20$
- Tipo sub-arido  $I_m = -33,3 \div 0$
- Tipo semiarido  $I_m = -66,7 \div -33,3$
- Tipo arido  $I_m < -66,7$

Per l'Isola di Pianosa, la classificazione climatica secondo il metodo di Tornthwaite (1948) è stata effettuata da Nicotra (2008) per il periodo 1960-2002.

I relativi parametri ottenuti sono riportati in tabella 4.6.

(mm)	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	anno
<b>Ep media</b>	20,7	21,0	32,1	48,4	80,9	113,8	145,4	136,1	97,0	65,8	36,3	24,2	821,7
<b>Er media</b>	20,7	21,0	32,1	48,4	80,9	57,6	8,2	25,1	43,7	64,1	36,3	24,2	462,9
<b>P medie</b>	44,2	49,3	43,4	40,3	27,5	19,1	8,2	25,1	43,7	64,7	59,5	55,7	480,7
<b>T medie (°C)</b>	9,6	9,6	10,9	13,3	16,9	20,7	23,9	24	21,2	17,7	13,5	10,8	16,0
<b>P-Ep</b>	23,5	28,3	11,3	-8,1	-53,4	-94,7	-137,2	-111,0	-53,3	-1,1	23,2	31,5	
<b>d</b>						56,2	137,2	111,0	53,3	1,1			358,8
<b>e</b>		6,5	11,3										17,8

**TABELLA 4.6: Parametri relativi alla classificazione climatica di Thornthwaite per l'Isola di Pianosa nel periodo 1960-2002 (Nicotra, 2008).**

Si possono quindi calcolare gli indici, tenendo presente i dati riportati in tabella (Tab. 4.6):

- $I_u = (e/E_p) * 100 = 2,2$
- $I_a = (d/E_p) * 100 = 43,7$
- $I_m = I_u - I_a = -41,5$

Risulta quindi che il clima di Pianosa, nel periodo tenuto in considerazione, rientra nella classe semiarida ( $I_m = -66,7 \div -33,3$ ).

Questo risultato è sostanzialmente coincidente con quello riportato nello studio di Vittorini (1976), che ha ottenuto un valore  $I_m = -46,2$  per il periodo 1960-1969.

Utilizzando i dati più recenti per quanto in numero assai limitato, del periodo 2013-2015, nell'ambito di questo lavoro è stata di nuovo effettuata la classificazione climatica con il metodo Thornthwaite (1948). I parametri calcolati sono riportati in tabella 4.7 (per i dettagli delle metodologie di calcolo di questi parametri si rimanda al capitolo successivo).

(mm)	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	anno
<b>P</b>	48,70	52,20	63,07	23,10	13,33	12,27	9,60	5,27	29,15	10,30	66,80	58,50	392,29
<b>Ep media</b>	25,65	23,66	33,73	51,03	82,62	123,58	152,82	144,17	103,54	77,38	42,56	27,59	888,32
<b>P-Ep</b>	23,05	28,58	29,34	-27,93	-69,29	-111,31	-143,22	-138,90	-74,39	-67,07	24,24	30,91	
<b>Er media</b>	25,65	23,66	33,73	51,03	82,62	12,27	9,60	5,27	29,15	10,30	66,80	27,59	353,42
<b>T media (°C)</b>	12,07	11,47	12,35	14,63	17,85	22,03	24,62	24,91	22,49	20,17	16,00	13,00	17,63
<b>d</b>					43,66	94,16	134,24	137,84	51,79	63,48			481,51
<b>e</b>		28,54	29,34										57,88

**TABELLA 4.7: Parametri relativi alla classificazione climatica di Thornthwaite (1948) per il periodo 2013-2015.**

Se si effettuano nuovamente i calcoli dei parametri Iu, Ia e Im il clima di Pianosa rientra ancora nella classe semiarida:

- $Iu = (e/Ep) \cdot 100 = 6,52$
- $Ia = (d/Ep) \cdot 100 = 60,21$
- $Im = Iu - Ia = -53,70$

## 5. RETE DI MONITORAGGIO

Per raggiungere gli obiettivi dello studio (raccolta dei dati necessari per la definizione del modello idrogeologico concettuale e per la valutazione della quantità e qualità delle acque) è stata utilizzata la stessa rete di monitoraggio utilizzata dalla Provincia di Livorno, settore della “Difesa del Suolo”, per la valutazione della situazione idrogeologica dell’Isola negli anni 1999-2002, e da Doveri et al. (2012).

In particolare, nella rete di monitoraggio sono stati inclusi:

- tutti i pozzi superficiali, che drenano le acque dall’acquifero freatico impostato nelle calcareniti, ad eccezione di alcuni pozzi attualmente secchi (PN15) e di altri invece che non sono stati trovati (PN10 e PN14 trovato soltanto durante la campagna di maggio);
- 4 pozzi profondi trivellati che drenano le acque circolanti nei livelli acquiferi conglomeratici miocenici (PN1, PN2, PN3, PN4); sono stati esclusi i pozzi PN5 e PN6 in quanto franati e non più rappresentativi dell’acquifero;
- lo stillicidio del Golfo della Botte, località Lavanderia Vecchia;
- un pluviometro totalizzatore per il campionamento mensile delle acque di pioggia e successive analisi chimiche ed isotopiche.

Nella mappa di figura 5.1 si può osservare l’ubicazione dei vari punti della rete di monitoraggio, mentre in tabella 5.1 sono riportate le relative caratteristiche (tipologia punto, codice, profondità, quota piano di riferimento); in allegato I sono invece riportate le foto di tutti i punti d’acqua appartenenti alla suddetta rete.

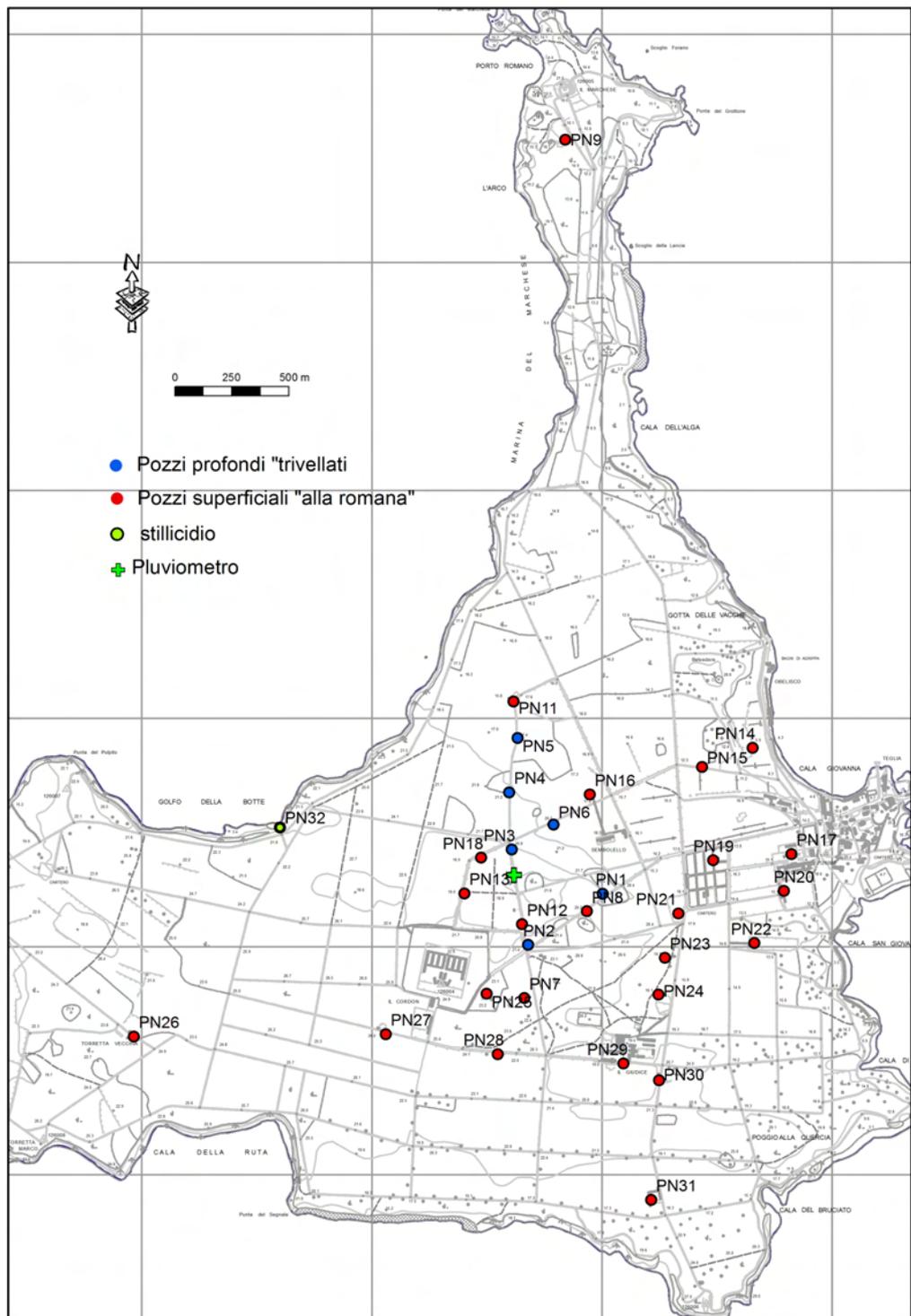


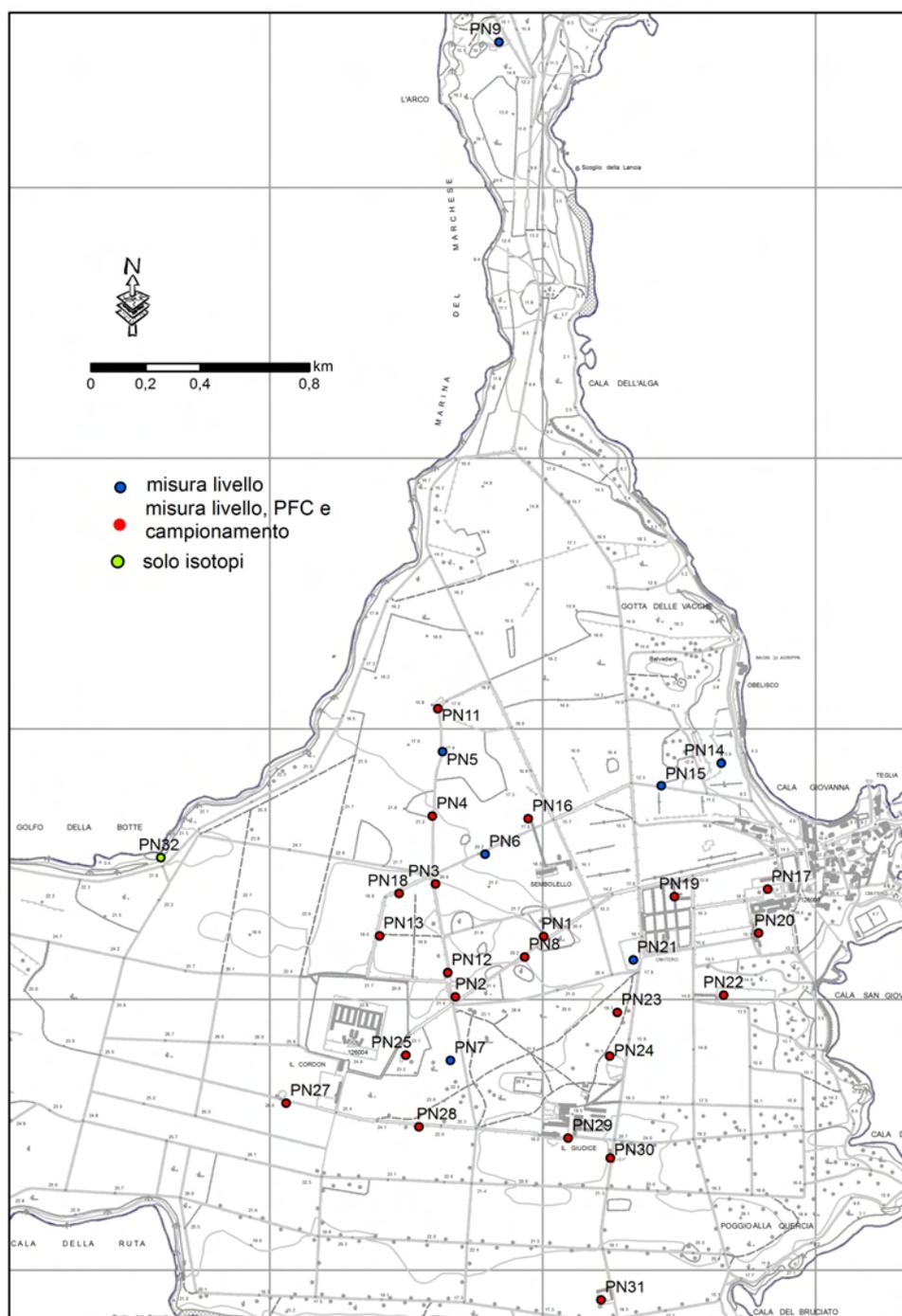
Figura 5.1: Ubicazione delle reti di monitoraggio dell'Isola di Pianosa.

TIPO	CODICE PUNTO D'ACQUA	PROFONDITÀ (m)	PROFONDITÀ ESPORATA (m)	QUOTA DI RIFERIMENTO	NOTE
Pozzo trivellato	PN1	126,00	77,00	21,50	
Pozzo trivellato	PN2	106,00	75,00	21,08	
Pozzo trivellato	PN3	75,00	55,00	18,97	
Pozzo trivellato	PN4	116,00	77,00	20,83	
Pozzo trivellato	PN5	26,00	26,00	17,30	
Pozzo trivellato	PN6	80,00	22,00	18,73	
Pozzo romano	PN7	21,20	21,70	24,55	
Pozzo romano	PN8	24,30	22,30	19,74	
Pozzo romano	PN9	12,80	12,10	11,63	
Pozzo romano	PN10	-		-	Pozzo non trovato
Pozzo romano	PN11	16,20	16,40	17,61	
Pozzo romano	PN12	20,00	18,00	19,73	
Pozzo romano	PN13	17,00	16,40	18,34	
Pozzo romano	PN14	10,00	6,62	6,34	
Pozzo romano	PN15	11,90	12,00	12,55	Pozzo secco
Pozzo romano	PN16	17,50	17,25	16,24	
Pozzo romano	PN17	21,50	20,40	19,23	
Pozzo romano	PN18	16,70	15,30	16,52	
Pozzo romano	PN19	17,10	16,50	15,80	
Pozzo romano	PN20	17,10	16,25	15,84	
Pozzo romano	PN21	20,10	19,70	19,98	
Pozzo romano	PN22	15,00	15,70	13,48	
Pozzo romano	PN23	17,75	17,65	18,52	
Pozzo romano	PN24	17,05	16,60	16,15	
Pozzo romano	PN25	19,26	17,70	20,96	
Pozzo romano	PN26	13,41	13,17	23,85	
Pozzo romano	PN27	20,60	22,96	26,55	
Pozzo romano	PN28	24,15	23,35	22,74	
Pozzo romano	PN29	20,02	20,70	17,77	
Pozzo romano	PN30	19,70	23,02	22,34	
Pozzo romano	PN31	16,12	15,66	15,99	
Sorgente	PN32	-		11,00	

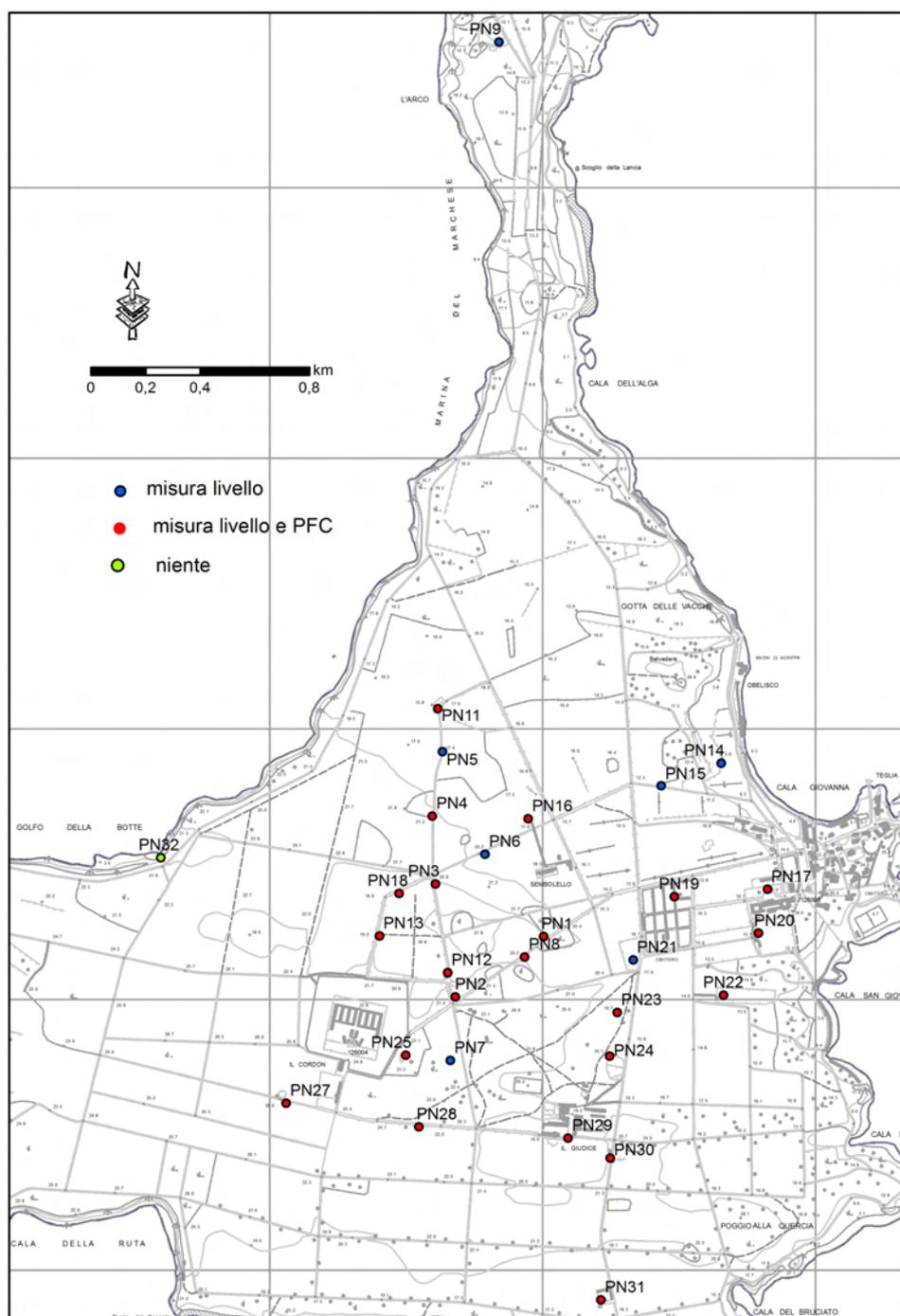
**TABELLA 5.1: Dati relativi ai punti d'acqua della rete di monitoraggio.**

Nell'ambito di questa tesi, le attività di monitoraggio sono state svolte in maniera discreta per quanto riguarda la misura dei parametri fisico-chimici (PFC), dei livelli piezometrici, campionamento delle acque e successive analisi chimiche ed isotopiche dell'intera rete di monitoraggio. In particolare in Gennaio 2015 è stata effettuata una campagna estesa per la misura di PFC, livelli piezometrici e campionamento delle acque; mentre in Maggio 2015 è stata effettuata un'ulteriore campagna per la misura di PFC e livelli piezometrici.

Nelle mappe di figura 5.2 e 5.3 sono schematizzate le attività svolte nelle due campagne d'indagine.



**Figura 5.2: Localizzazione dei punti d'acqua dove sono state svolte, durante la campagna di Gennaio 2015, le attività riportate in legenda.**



**Figura 5.3: Localizzazione dei punti d'acqua dove sono state svolte, durante la campagna di Maggio 2015, le attività riportate in legenda.**

Oltre alle suddette attività di monitoraggio discreto, in alcuni pozzi della rete di monitoraggio erano state precedentemente installate delle sonde multiparametriche-Diver (Schlumberger, Water Services), per la misura in continuo del livello piezometrico, della temperatura e della conducibilità elettrica. Le sonde sono state installate in Ottobre 2014 e risultano tuttora in registrazione con frequenza di misura di 1 ora per i pozzi superficiali e di ½ ora per quelli profondi.

La scelta di utilizzare le sonde multiparametriche nasce in particolar modo dalla necessità di comprendere i rapporti esistenti tra i livelli acquiferi profondi e il sovrastante acquifero freatico, nonché per monitorare i fenomeni di intrusione marina.

Per questi motivi, l'ubicazione delle sonde non è stata casuale. Sono stati infatti attrezzati alcuni dei pozzi profondi e alcuni pozzi superficiali che si trovano nell'intorno dell'unico pozzo attualmente attivo, il PN3. Inoltre, per verificare la presenza di connessioni idrauliche tra i due sistemi acquiferi, è stato necessario conoscere i giorni di accensione del pozzo, gentilmente forniti dalle guardie penitenziarie. In questo modo è stato possibile, durante l'elaborazione dei dati del monitoraggio in continuo, valutare i rapporti tra l'emungimento e le caratteristiche idrodinamiche e fisiche in acquifero.

Per il monitoraggio dell'intrusione marina sono stati invece attrezzati i pozzi che si trovano nella parte orientale dell'isola, dove si verifica questo fenomeno.

Il sistema di monitoraggio in continuo consta anche di un *baro diver*, che misura in continuo la pressione atmosferica, dato necessario per compensare i dati relativi alla misura del livello piezometrico.

In tabella 5.2 sono indicati i punti d'acqua della rete di monitoraggio che sono stati attrezzati durante le campagne, il periodo di registrazione automatico e il tipo di strumento utilizzato. Nelle mappe di figura 5.4 e 5.5 si può osservare, rispettivamente, l'ubicazione della rete di monitoraggio in continuo durante il periodo Gennaio 2015 – Maggio 2015 e quella successiva alla campagna di Maggio 2015 durante la quale la suddetta rete è stata ottimizzata in funzione dei dati raccolti nel periodo precedente.

<b>CODICE PUNTO D'ACQUA</b>	<b>DA OTTOBRE 2014 - A GENNAIO 2015</b>	<b>DA GENNAIO 2015 - A MAGGIO 2015</b>	<b>DA MAGGIO 2015 - A SETTEMBRE 2015</b>
<b>PN1</b>	CTD	CD	CD
<b>PN2</b>	CTD	CTD	CTD
<b>PN3</b>	-	-	CTD
<b>PN4</b>	CTD	CTD	CTD
<b>PN6</b>	CD	-	-
<b>PN8</b>	CTD	-	-
<b>PN12</b>	CTD - BD	CTD - BD	CTD - BD
<b>PN13</b>	CD	-	-
<b>PN17</b>	CTD	CTD	CTD
<b>PN18</b>	CTD	CD	CD
<b>PN19</b>	CTD	CTD	CTD
<b>PN22</b>	CTD	CTD	CTD

**TABELLA 5.2:** Tabella riassuntiva dove sono stati riportati i punti d'acqua della rete di monitoraggio attrezzati con sonde multiparametriche (CTD: sonda che consente la misurazione del livello piezometrico, della conducibilità e della temperatura, CD: sonda che consente la misurazione del livello piezometrico e della temperatura e BD: baro diver, sonda che misura la pressione atmosferica).

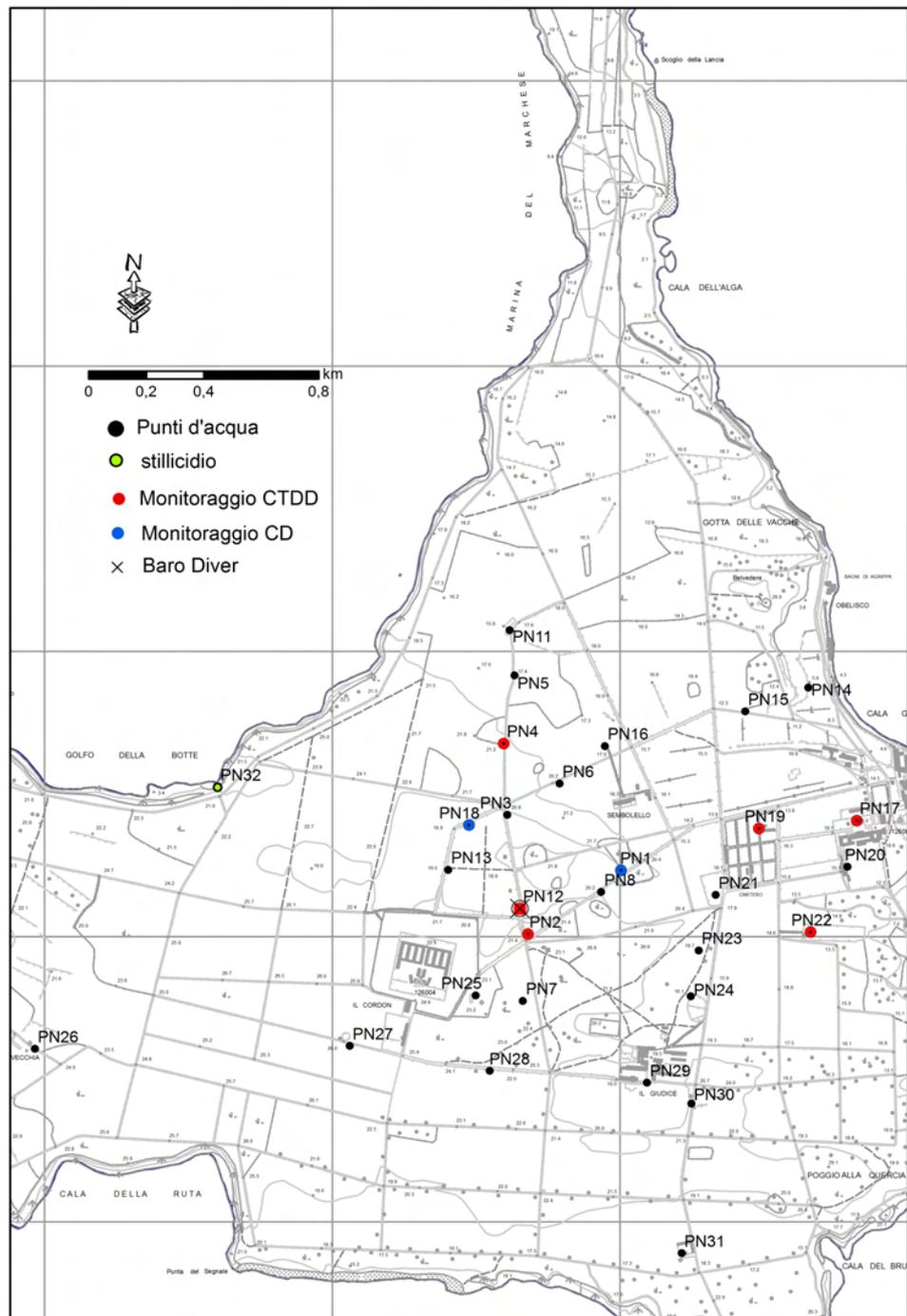
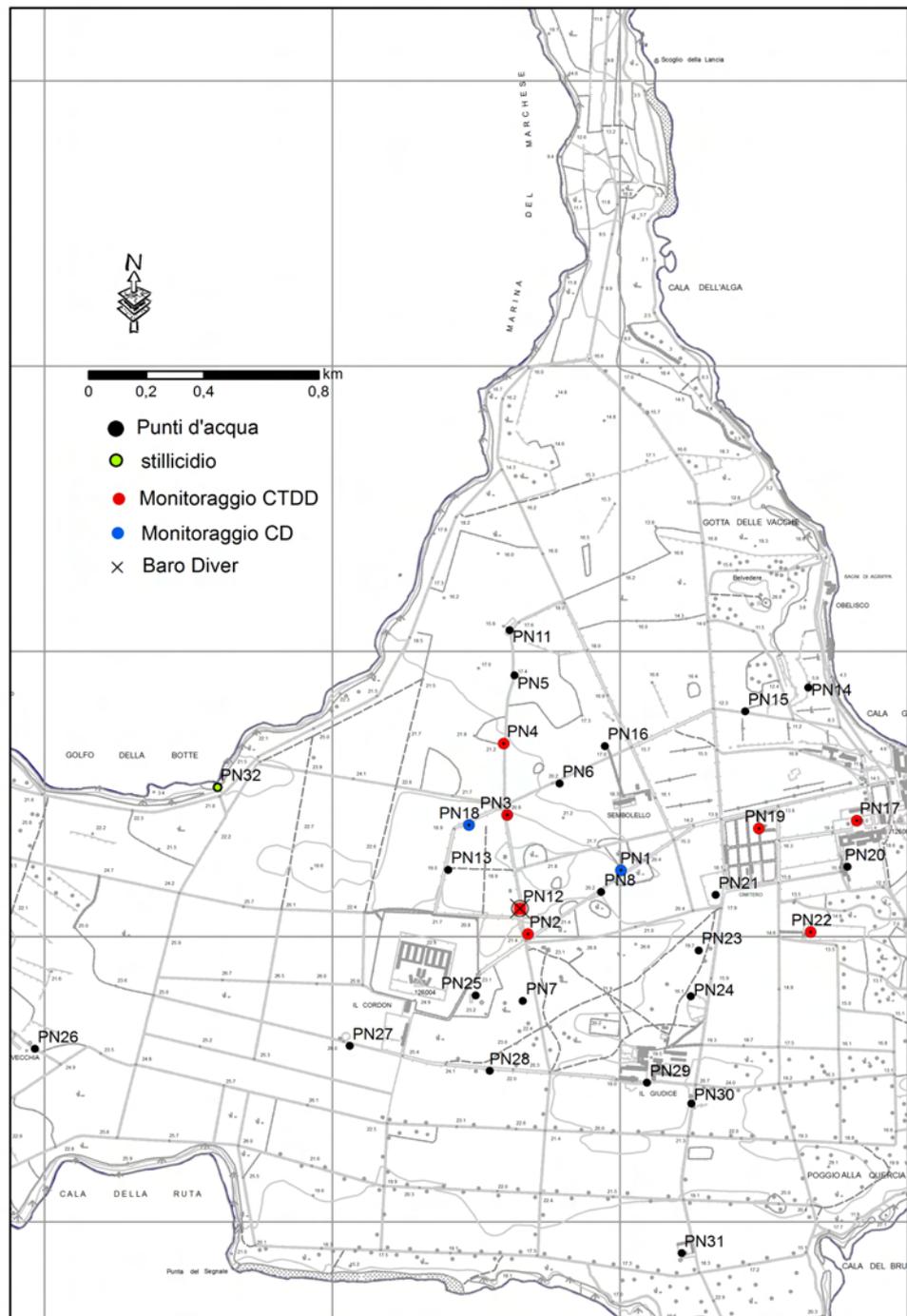


Figura 5.4: Ubicazione dei pozzi monitorati durante il periodo Gennaio 2015 – Maggio 2015.



**Figura 5.5: Ubicazione dei pozzi lasciati attrezzati con sonde multiparametriche per il monitoraggio in continuo dopo la campagna di Maggio 2015.**

Infine, su alcuni pozzi profondi (PN1, PN2, PN4), durante le varie campagne di misura sono stati eseguiti dei LOG (profili verticali), con l'utilizzo di una sonda multiparametrica, per osservare la variabilità dei parametri temperatura e conducibilità elettrica con la profondità, e individuare quindi eventuali stratificazioni di tali parametri nella falda.

Durante le campagne svolte sono state compilate apposite schede di acquisizione dati (riportate in appendice II), al fine di rilevare in modo sistematico e omogeneo i dati per ogni punto d'acqua della rete di monitoraggio.

## **6. METODOLOGIE D'INDAGINE**

Per lo studio della risorsa idrica sotterranea dell'Isola di Pianosa nell'ambito del progetto "I sentieri dell'acqua dell'Isola di Pianosa" è stato scelto un approccio metodologico di idrogeologia classica abbinata anche a tecniche di tipo geochimico-isotopico.

Come precedentemente riportato, nell'ambito di questo lavoro di tesi sono state svolte due campagne d'indagine (Gennaio e Maggio 2015) con lo scopo di raccogliere i dati necessari per la definizione del modello idrogeologico e per la valutazione della quantità e della qualità delle acque presenti sull'isola. In particolare, le attività di campagna hanno previsto la misura dei livelli della superficie piezometrica e di alcuni parametri chimico-fisici (temperatura, conducibilità, pH), il campionamento delle acque (prelievo di aliquote per le successive analisi di laboratorio e determinazione in situ dell'alcalinità e ammoniacale). Inoltre, ai fini di una preliminare caratterizzazione idraulica dell'acquifero profondo, è stata effettuata una prova d'emungimento di lunga durata sul pozzo PN3. Successivamente, in laboratorio sono state svolte analisi chimiche ed isotopiche dei campioni raccolti durante le campagne.

Nei capitoli che seguono si riporta una descrizione di tutte le suddette attività svolte.

### **6.1 MISURA DEI LIVELLI PIEZOMETRICI**

La misura dei livelli della superficie piezometrica sui pozzi esistenti è stata eseguita nelle due campagne svolte mediante l'utilizzo di un freatometro, oltre naturalmente ai dati registrati dalle sonde in continuo.

Il freatometro è uno strumento da campo di facile utilizzo. Esso è costituito da un cavo elettrico centimetrato protetto da guaina; ad una estremità del cavo è posta una sonda piezometrica munita di zavorra, necessaria a tenere steso il cavo. Il principio di misura è semplice: quando la sonda raggiunge la falda e viene a contatto con l'acqua, si chiude il circuito elettrico alimentato da una batteria e la scheda elettronica presente provvede all'emissione di un suono continuo (cicalio) e all'accensione di un led luminoso.

Quando si eseguono queste misure è importante essere certi di aver raggiunto l'acqua e non una superficie umida che trasmette comunque un segnale; per questo, si tende a calare e sollevare la sonda, per individuare con certezza il punto in cui viene emesso dallo strumento il suono continuo e una volta accertato questo, si legge sul cavo centimetrato il valore della soggiacenza rispetto ad un punto di riferimento (es. bocca pozzo) (Fig. 6.1).



**Figura 6.1: Misurazione del livello piezometrico di un pozzo con l'utilizzo di un freaticometro.**

In realtà, con il termine soggiacenza di una falda si intende la profondità della superficie piezometrica rispetto alla superficie topografica (piano campagna). Pertanto, una volta acquisiti i dati di soggiacenza, tutte le misure devono essere riferite al livello del mare (s.l.m). Per fare ciò, è necessario conoscere con buona precisione l'ubicazione e la quota esatta del piano di riferimento dal quale viene presa la misura con il freaticometro. Per ottenere quindi valori piezometrici accurati sono state rilevate per ogni punto d'acqua le coordinate X, Y, Z del piano di riferimento, con un sistema GPS differenziale ad alta precisione (Fig 6.2).



Figura 6.2: a) Sistema GPS utilizzato per la registrazione del piano di riferimento; b) Registrazione del piano di riferimento per un pozzo.

## 6.2 MISURE PARAMETRI CHIMICO-FISICI (PFC)

Per entrambe le campagne sono stati misurati i PFC della totalità dei punti d'acqua appartenenti alla rete di monitoraggio. Tali misure sono state effettuate con l'utilizzo di appositi apparecchi (conducimetro e pHmetro) (Fig 6.3) opportunamente calibrati in laboratorio mediante soluzioni a conducibilità elettrica e pH noti.



**Figura 6.3:** Valigetta con tutto il necessario per la misura in situ di alcuni parametri chimico-fisici e campionamento delle acque.

I parametri misurati durante le varie campagne sull'Isola di Pianosa sono principalmente tre (Fig. 6.4):

- Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
- pH
- Conducibilità elettrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

La temperatura delle acque sotterranee è solitamente poco variabile e corrisponde più o meno alla media annuale della temperatura atmosferica della zona, incrementata dal prodotto della profondità per il gradiente geotermico. L'unità di misura è il grado centigrado ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Nell'area di studio, la misura della temperatura è stata effettuata durante il campionamento delle acque, con l'utilizzo del conducimetro, che fornisce oltre alla conducibilità elettrica il valore di temperatura. Il pH dell'acqua fornisce invece informazioni sulla relativa acidità/basicità. Esso rappresenta la misura del grado di dissociazione in ioni  $\text{H}^+$  e  $\text{OH}^-$ , ed è definito dal logaritmo decimale negativo della concentrazione degli ioni  $\text{H}^+$  ( $\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+]$ ).

La scala di misura è compresa tra 0 e 14; per valori bassi l'acqua risulterà acida, mentre se il pH è maggiore di 7 l'acqua risulterà basica.

Il pH naturale dell'acqua pura è 7 (a 25°C); quello delle acque naturali varia in genere tra 6,5 e 8,0, tenendo conto che questo valore è funzione dei litotipi attraversati e del tempo d'interazione con essi. Questo parametro è inoltre funzione della temperatura, dato che la concentrazione di ioni  $H^+$  è inversamente proporzionale alla temperatura stessa.

Sull'Isola di Pianosa il pH è stato misurato soltanto durante i campionamenti dei vari punti d'acqua, con l'utilizzo di un pHmetro, che fornisce anche una misura di temperatura.

La conducibilità elettrica è la capacità dell'acqua di condurre corrente elettrica e la sua unità di misura è il microsimens/cm. La conducibilità dell'acqua pura è bassa; poiché la corrente si trasmette attraverso gli ioni presenti in acqua, si parla di conducibilità ionica. Per questo motivo, la conducibilità elettrica è proporzionale al contenuto di ioni presenti in acqua. Anche questo parametro dipende dalla temperatura, essendone direttamente proporzionale, per cui le misure devono essere riferite a una temperatura *standard* solitamente 25°C.

I valori di conducibilità elettrica delle acque sotterranee possono essere estremamente variabili, in funzione del litotipo attraversato e del tempo di permanenza nell'acquifero. Valori di conducibilità elettrica molto elevati possono dare indicazioni su possibili intrusioni saline o eventuali inquinamenti antropici.



**Figura 6.4: Misurazione di temperatura, pH e conducibilità elettrica con l'utilizzo di un pHmetro e di un conducimetro di un campione di acqua.**

### **6.3 CAMPIONAMENTO DELLE ACQUE**

Durante la campagna di Gennaio 2015, oltre alla misura del livello piezometrico e dei PFC, è stato effettuato anche il campionamento di una selezione di punti d'acqua.

Il campionamento delle acque può essere definito come l'operazione di prelievo di diverse aliquote di campione, il più possibile rappresentative del volume di acqua che si vuole analizzare, opportunamente trattate per le successive analisi di laboratorio, nonché la misura di quei parametri fisico-chimici e determinazione dei composti da eseguire direttamente in situ per evitare una modifica degli stessi dovuti alla separazione del campione dal corpo acquifero.

L'operazione di campionamento è molto delicata, condizionando la qualità delle analisi che vengono svolte in situ e in laboratorio. Per questo motivo, il campione dovrebbe essere prelevato e conservato in maniera tale da mantenere il più possibile inalterate le proprie caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche, fino al momento delle analisi.

Prima di procedere alla fase di campionamento in un pozzo o in un piezometro, sarebbe opportuna un'operazione di spurgo del pozzo o piezometro, al fine di

eliminare l'acqua all'interno del tubo che non è generalmente rappresentativa della qualità delle acque sotterranee. Infatti, secondo le direttive di ARPA, il volume di acqua che deve essere emunto durante la fase di spurgo è pari a 3-5 volte il volume di acqua contenuto nel pozzo.

Sull'Isola di Pianosa, questa operazione non è stato possibile effettuarla, data la mancanza di pompe con cui emungere acqua, ad eccezione del PN3.

Per campionare le acque di Pianosa sono stati utilizzati due tipi di campionatori manuali a seconda della tipologia del pozzo:

- *Bailer*
- *Hydrasleeve* (dell'azienda Acquasearch)

I *bailer* sono campionatori semplici e abbastanza affidabili per il campionamento delle acque (Fig. 6.5).



**Figura 6.5: Campionamento con Bailer in uno dei pozzi dell'Isola di Pianosa.**

Sono formati da un tubo in PVC o Teflon, aperto all'estremità superiore ed inferiore. Una valvola a sfera, di peso specifico prossimo a quello dell'acqua, è collocata nell'estremità inferiore. Nella parte inferiore viene collocata anche una zavorra. In fase di discesa, la pressione dell'acqua che entra nel campionatore mantiene aperta la valvola a sfera e l'acqua scorre all'interno del tubo. In fase di

risalita, la valvola sferica occlude l'apertura inferiore per effetto del peso del campione di acqua prelevato.

L'*Hydrasleeve* è costituito da una vescica con valvola, che resta chiusa in fase di immersione per aprirsi non appena viene rapidamente issata, chiudendosi una volta piena (Fig. 6.6). Questo tipo di campionatore, al contrario dell'altro, è più adatto ad essere utilizzato per campionare a varie profondità in quanto è strutturato in modo da inibire il mescolamento di acqua in discesa e in risalita nel pozzo. Una volta utilizzato l'*hydrasleeve* deve essere buttato, in quanto monouso. Per facilitare la discesa in foro, viene dotato di zavorra.



**Figura 6.6: Campionamento con utilizzo dell'Hydrasleeve in un pozzo.**

Una volta completata l'operazione di prelievo, oltre alla misura dei PFC precedentemente discussa, le operazioni prevedono:

- la determinazione di quei composti che tendono a modificare la propria concentrazione nel tempo e quindi da eseguire preferibilmente in situ;
- la raccolta di aliquote opportunamente trattate per le successive analisi di laboratorio.

In particolare, nell'ambito di questo studio, direttamente in situ sono state determinate le concentrazioni dell'alcalinità e dell'ammoniaca.

L'alcalinità è definita come la capacità di un'acqua di neutralizzare le specie acide ed è dovuta alla presenza di anioni o molecole di acidi deboli parzialmente dissociati. Nelle acque naturali, essa è dovuta fondamentalmente agli ioni carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), e bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), dato che l'acido debole più comune in acqua è l'acido carbonico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Un contributo secondario è dato da altri acidi deboli, quali: acido borico, acido fosforico e acido umico, ma contribuiscono all'alcalinità anche gli ioni idrossido e l'ammoniaca.

Come detto in precedenza la determinazione di questo parametro è stata effettuata in campagna, per evitare possibili variazioni della concentrazione degli ioni carbonato e bicarbonato, dovuti a fenomeni di evaporazione di  $\text{CO}_2$ . La misura è stata effettuata con l'utilizzo di un microdosimetro, mediante una titolazione acido-base, utilizzando come titolante un acido forte (acido cloridrico ( $\text{HCl}$ ) 0,1 N) a concentrazione nota, aggiunto goccia a goccia ad una aliquota d'acqua da titolare fino al viraggio del metilarancio, indicatore di colore che indica la completa neutralizzazione della base (Fig. 6.7). Dal volume di acido aggiunto si risale alla concentrazione della base.

Si effettua l'operazione almeno tre volte, scartando eventuali prove in cui la quantità dell'acido si discosta più di 4-5 mg/l dalle altre. Si annotano tutti i valori ottenuti e successivamente con appositi calcoli si risale al valore di alcalinità in meq/l di  $\text{HCO}_3^-$  mediando i tre dati.

Quando si effettuano queste misure sarebbe consigliabile che l'operazione fosse effettuata sempre dallo stesso operatore, poiché la percezione del punto di viraggio potrebbe essere diversa da persona a persona.



**Figura 6.7:** Titolazione acido-base con l'utilizzo di un microdosimetro per la determinazione dell'alcalinità.

Per quanto riguarda l'ammoniaca ( $\text{NH}_3$ ), la sua presenza nelle acque di falda può essere legata a fenomeni di contaminazione, dovuti a immissione di liquami domestici e zootecnici oppure all'utilizzo di fertilizzanti, ma può essere anche dovuta a processi naturali di riduzione dei nitrati e nitriti (processo di denitrificazione) in ione ammonio ( $\text{NH}_4^+$ ). I livelli naturali nelle acque sotterranee sono solitamente inferiori a 0,2 mg/l; quantità comprese tra 0,1 e 2 mg/l possono avere anche origine meteorica (Celico, 1986).

Sull'Isola di Pianosa, questo parametro è stato determinato in campagna mediante apposito *kit* (Fig. 6.8).



**Figura 6.8: Determinazione della concentrazione di ammoniaca in un campione d'acqua.**

La concentrazione di ammoniaca è stata determinata in funzione del colore assunto dall'acqua una volta che sono stati aggiunti tre differenti reagenti e confrontando con un'apposita tabella (Fig. 6.9).



**Figura 6.9: Determinazione della concentrazione di ammoniaca in base al colore di un campione.**

Le aliquote prelevate durante il campionamento per le successive analisi di laboratorio sono le seguenti:

- 1 tal quale (TQ) in bottiglia di polietilene (PE) da 125 ml per la determinazione degli anioni;
- 1 TQ in bottiglia PE da 50 ml per la determinazione della composizione isotopica dell'acqua ( $^2\text{H}/^1\text{H}$  e  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ );

- 1 FA (filtrato con filtri 0,45  $\mu\text{m}$  e acidificato con  $\text{HNO}_3$ ) in bottiglia di PE da 50 ml per la determinazione dei cationi (Fig 6.10);
- 1 TQ in bottiglia di plastica da 500 ml per la determinazione del trizio.

Su ogni contenitore sono stati poi riportati: la data del campionamento, la sigla del punto d'acqua campionato e le diciture TQ, per indicare un campione tale quale (senza nessun tipo di trattamento), o FA, per indicare un campione filtrato (0,45  $\mu\text{m}$ ) e acidificato.

Prima dell'inserimento del campione negli appositi contenitori, è opportuno anche se i contenitori sono nuovi, avvinarli (sciacquarli) con l'acqua prelevata dal pozzo, in modo da evitare possibili contaminazioni.



Figura 6.10: Preparazione di un campione filtrato e acidificato in un contenitore di polietilene.

#### 6.4 RETE DI MONITORAGGIO IN CONTINUO

Come precedentemente descritto, su una selezione di pozzi sono state installate delle sonde multiparametriche (in particolare sono state utilizzate le sonde *Diver* dell'azienda Ecosearch) per il monitoraggio in continuo dei livelli piezometrici, temperatura e conducibilità elettrica. I *Diver* (Fig. 6.11) sono strumenti di piccole dimensioni, autonomi, provvisti di batteria e memoria interna, programmabili tramite *software* specifico con il quale è possibile non solo programmare lo

strumento (fondo scala, frequenza misura, data e ora inizio misura), ma anche visionare e acquisire i dati memorizzati.



**Figura 6.11:** Esempio di una sonda multiparametrica, in particolare un CTDD diver, appena tolta da un pozzo per effettuare il trasferimento dei dati.

In particolare, si tratta di strumenti complessi dotati di una serie di sensori, che consentono di convertire una grandezza fisica in un segnale elettrico. Questi parametri (pressione, temperatura e conducibilità elettrica nel caso specifico) vengono registrati in una memoria interna, da cui vengono poi acquisiti attraverso un apposito strumento, il *Diver USB reading unit* (questo strumento è utilizzato solo per lo scarico di sonde multiparametriche della Ecosearch srl), collegato ad un computer (Fig. 6.12). Il *software* utilizzato consente di visualizzare immediatamente i dati, così da poter osservare in maniera speditiva le informazioni registrate, dopodiché, consente di salvare il file in formato excel e quindi di poter poi eseguire le elaborazioni opportune.



**Figura 6.12: Trasferimento dei dati di un diver con l'apposito strumento presso l'Isola di Pianosa.**

In particolare, sull'Isola di Pianosa sono state usate due tipologie di sonde: le CTDD *diver* e le CD (*ceradiver*): le prime consentono di misurare la pressione di livello (*range* 10/100m e accuratezza compresa tra 0,5 cm e 5 cm a seconda del modello), la temperatura (*range* -20/+80 °C e accuratezza 0.1 °C) e la conducibilità elettrica dell'acqua (*range* 0.01/120 ms/cm e accuratezza 1%), mentre le seconde consentono la misura solo della pressione di livello e della temperatura.

Il *Diver* non fornisce direttamente la misura del livello piezometrico, ma fornisce la misura della pressione della colonna d'acqua sovrastante lo strumento sommata alla pressione atmosferica. Per ottenere la misura della colonna d'acqua al di sopra dello strumento, è necessario conoscere la pressione atmosferica. Per questo motivo sull'isola è stato collocato anche un *baro-diver*, nell'edificio in cui si trova il pozzo PN12 (Fig. 6.13). Ai dati di pressione registrati in acqua dai CTDD *diver* o CD *diver* devono essere, quindi, sottratti i valori di pressione atmosferica; in questo modo si ottiene la pressione della colonna d'acqua sovrastante lo strumento rispetto ad un punto fisso, profondità della sonda nel pozzo.

La quota a cui si trova la sonda nel pozzo è ottenuta sottraendo al valore del livello piezometrico (m s.l.m), misurato al momento dell'installazione del *diver*, la pressione della colonna d'acqua. Conoscendo la quota di installazione della sonda nel pozzo e lo spessore della colonna d'acqua si possono calcolare i livelli piezometrici rispetto al livello del mare.



**Figura 6.13: Baro-diver collocato nell'edificio del PN12.**

Per poter effettuare questi calcoli, i dati registrati dai *diver* e dal *baro-diver*, devono essere confrontabili, ovvero fare riferimento allo stesso giorno e alla stessa ora.

È bene sottolineare che i dati che si ottengono dall'utilizzo di sonde multiparametriche vanno sempre osservati con giudizio critico, al fine di valutare la correttezza o meno di questi e evitare di incorrere in grossolani errori. Inoltre, è buona consuetudine accertarsi, ogni qual volta si collocano sonde in un pozzo, che siano in acqua; si cerca quindi, definito il livello piezometrico attraverso la misura con freatimetro, di calare la sonda in modo tale da risultare sempre in acqua, in funzione anche delle oscillazioni piezometriche della falda.

## **6.5 RAPPORTI DI CAMPAGNA**

L'attività di raccolta dati in campagna e le metodologie utilizzate sono di fondamentale importanza per la riuscita di uno studio scientifico. Per questo motivo, durante le campagne svolte sull'isola è stata effettuata una tempestiva compilazione di apposite schede (appendice II). La compilazione metodica di queste schede ha garantito, durante le successive fasi di elaborazione dei dati, di non incorrere in errori e di tenere sempre presente le osservazioni fatte in situ. In queste schede sono stati annotati ora, data, luogo, livello piezometrico dalla quota di riferimento, eventuali parametri fisici misurati in situ, data e ora in cui sono stati trasferiti i dati e inserite di nuovo le sonde multiparametriche. In caso di campionamento sono stati anche indicati il numero di campioni presi e le modalità di campionamento.

## **6.6 MODALITÀ D'ESECUZIONE DELLA PROVA DI EMUNGIMENTO**

Le prove di emungimento consistono nell'estrazione di acqua dalla falda e nel monitoraggio della risposta dell'acquifero in termini di livelli piezometrici, al fine di determinare le caratteristiche idrodinamiche della falda (trasmissività, permeabilità e coefficiente d'immagazzinamento).

Queste prove possono essere di due tipi:

- prova a gradini di portata;
- prova di lunga durata.

In particolare, dalla prima si può risalire alla portata critica (portata preferibilmente da non superare durante gli emungimenti), alla portata specifica (rapporto tra la portata e gli abbassamenti), alla portata ottimale d'esercizio (corrisponde al 90% della portata critica), abbassamento specifico e efficienza del pozzo; dalla seconda di possono ottenere i valori di trasmissività (rappresenta la produttività dell'acquifero, che è funzione della permeabilità e dello spessore saturo), coefficiente di immagazzinamento (rapporto fra il volume di acqua estratta da un acquifero e il volume del cono di depressione creato dall'emungimento), diffusività (tiene conto della propagazione delle perturbazioni indotte nell'acquifero, questa è data dal rapporto tra la trasmissività e il coefficiente di immagazzinamento), portata specifica e raggio di

influenza del pozzo (raggio del cono di depressione della superficie piezometrica).

Durante lo svolgimento di queste prove, devono essere misurati i seguenti parametri:

- portata emunta;
- abbassamento del livello piezometrico nel pozzo e in eventuali altri pozzi/piezometri presi in considerazione (pozzo di controllo);
- risalita del livello piezometrico dopo l'arresto dell'emungimento;
- tempi di emungimento e di risalita.

Durante la campagna di Maggio 2015 è stata effettuata, nell'aria di studio, una prova di emungimento di lunga durata ( >72 ore ) a portata costante.

Tale prova, è stata eseguita per verificare eventuali collegamenti tra la falda freatica superficiale e i livelli acquiferi, semiconfinati-confinati, profondi, al fine di valutare la validità del modello idrogeologico proposto da Raggi (1983) e, inoltre, per determinare i parametri idraulici del suddetto acquifero, indispensabili in uno studio a carattere idrogeologico.

In particolare, il pozzo che è stato messo in emungimento è il pozzo PN3, l'unico pozzo dotato di pompa, che viene utilizzato attualmente per usi idropotabili. Come pozzi di controllo, sono stati utilizzati tutti i pozzi appartenenti alla rete di monitoraggio in continuo, dotati di *diver*, nonché ulteriori punti della rete misurati in maniera discreta con freatimetro. Si ricorda che alcuni di questi pozzi drenano l'acquifero freatico superficiale, mentre altri drenano la falda profonda.

Per eseguire la prova di emungimento è necessario dotarsi di opportuna attrezzatura:

- pompa sommersa (in questo caso il pozzo ne era già dotato, Fig. 6.14);



**Figura 6.14:** Immagine della pompa che è installata al pozzo PN3, la sua estrazione è stata necessaria per l'installazione del tubo in plastica per facilitare le misure freatiche.

- misuratore di portata (per questo motivo è stato collocato un apposito contatore che consente la misura della portata attraverso i  $m^3$  di acqua emunta (portata =  $m^3$  di acqua emunta/ tempo necessario per emungere quei  $m^3$  di acqua) (Fig. 6.15);



**Figura 6.15: Contatore installato al pozzo PN3 per la misurazione della portata emunta.**

- uno o più freatimetri per misurare l'abbassamento della superficie piezometrica nel pozzo in emungimento e in altri pozzi limitrofi. In particolare, sull'isola sono stati utilizzati due freatimetri per effettuare delle singole misure: uno è stato tenuto fisso al PN3, e un altro è stato invece utilizzato per le misure freatimetriche in tutti gli altri pozzi presi in considerazione durante la fase di emungimento. Inoltre, come specificato precedentemente, è stata utilizzata la rete di monitoraggio in continuo, impostando per tutti i *diver* frequenza di misura di 30 s, per la misura in continuo dei livelli piezometri; anche il pozzo PN3 è stato dotato di *Diver* in occasione della prova di emungimento;
- un cronometro;
- un conducimetro, per misurare la conducibilità elettrica e la temperatura dell'acqua emunta dal PN3 durante la prova, e verificare eventuali cambiamenti di questi parametri;
- una scheda di acquisizione dei dati.

Inoltre, prima dell'inizio della prova è stato inserito nel pozzo PN3 un tubo in plastica per facilitare la misura del livello piezometrico con freatimetro e la

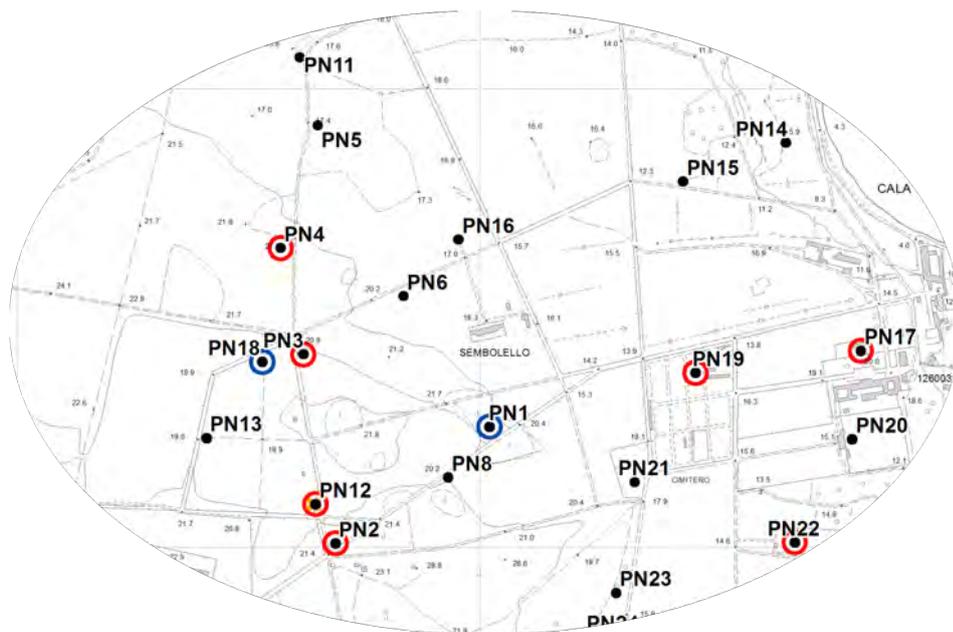
collocazione del *diver*, evitando così la possibilità di incastrare gli strumenti tra flange e cavi all'interno del pozzo; per far ciò è stato necessario estrarre la pompa, operazione per la quale è stato fornito supporto dal personale del penitenziario. Naturalmente tale tubo, prima dell'installazione, è stato opportunamente fessurato per permettere l'entrata dell'acqua (Fig. 6.16).



**Figura 6.16: Installazione del tubo in plastica per facilitare le misure freatiche e l'installazione della sonda multiparametrica.**

Una volta allestita la prova e misurato il livello statico nel pozzo, il pozzo PN3 è stato messo in emungimento. Durante le prime ore, sono stati monitorati attraverso misure freatiche ravvicinate nel tempo, oltre al pozzo PN3, tutti i pozzi profondi e i pozzi superficiali nel suo intorno. Questo perché, se il pompaggio avviene a portata costante il livello nel pozzo si abbassa rapidamente all'inizio e poi con incrementi decrescenti nel tempo.

In particolare sono stati monitorati i seguenti pozzi: PN1, PN2, PN4, PN8, PN12, PN13, PN16, PN17, PN18, PN19, PN22 (Fig. 6.17).



**Figura 6.17: Pozzi il cui livello freaticometrico è stato monitorato più frequentemente durante la prova di emungimento, si riporta inoltre con cerchietto rosso i CTD diver e in blu i CD.**

Successivamente, le misure sono state diradate nel tempo ed è stata effettuata almeno una misura freaticometrica per tutti i punti d'acqua della rete di monitoraggio.

Inoltre, durante la prova di emungimento (circa ogni 24 ore) sono stati prelevati dei campioni di acqua nel pozzo PN3, per verificare eventuali cambiamenti nel tempo della composizione chimica ed isotopica della falda a seguito dell'emungimento prolungato.

È importante sottolineare che, prima dell'inizio della prova di emungimento, è stata effettuata una campagna di misura del livello piezometrico per tutti i punti d'acqua della rete di monitoraggio, per disporre dei vari livelli statici. Inoltre, i dati di tutte le sonde multiparametriche, installate nei pozzi sono stati acquisiti, dopodiché queste sono state riprogrammate con frequenza di misura ogni 30 secondi, ed è stata impostata l'ora e la data di inizio registrazione.

## 6.7 ANALISI DI LABORATORIO

Sui campioni di acque prelevati sull'Isola di Pianosa, al fine di una loro caratterizzazione idrogeochimica, sono state eseguite le seguenti analisi di laboratorio:

- analisi chimiche: per la determinazione delle concentrazioni dei costituenti chimici maggiori (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO<sub>4</sub>) e minori (Br, F, NO<sub>3</sub>);
- analisi isotopiche per la determinazione del  $\delta D$  e  $\delta^{18}O$  e del Trizio (che non verrà però trattato in questo lavoro di tesi in quanto le analisi sono tuttora in corso).

Relativamente al pozzo PN3, vista la sua importanza, in quanto unico pozzo ad uso idropotabile dell'isola, sono state effettuate anche le analisi per la determinazione delle concentrazioni di ferro, arsenico e boro.

Le analisi delle acque sono importanti per comprendere il chimismo, ricostruire eventuali circuiti di circolazione nel sottosuolo e caratterizzare il bacino di alimentazione. Infatti, le caratteristiche fisico-chimiche delle acque sotterranee dipendono da vari fattori, quali la composizione iniziale posseduta dall'acqua di alimentazione (precipitazioni atmosferiche principalmente), la composizione della roccia-serbatoio, fenomeni fisici legati all'interazione acqua-roccia, i tempi di residenza nel sottosuolo e i mescolamenti tra corpi idrici con caratteristiche geochimiche differenti (Celico, 1986).

### 6.7.1 ANALISI CHIMICHE

Le analisi chimiche sono state svolte presso i laboratori dell'Istituto di Geoscienze e Georisorse – CNR di Pisa. Tali analisi sono state eseguite mediante le seguenti tecniche analitiche, seguendo le metodiche di *routine* del laboratorio:

- cromatografo ionico per la determinazione degli anioni (Br<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup> e Cl<sup>-</sup>);
- assorbimento atomico per la determinazione dei cationi (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup>).

Per maggiori dettagli riguardo alle metodiche analitiche si rimanda all'allegato III.

Una volta completate tutte le analisi chimiche, va verificata l'effettiva correttezza delle analisi attraverso il bilancio ionico. Per il principio dell'elettroneutralità per ogni analisi si dovrebbe ottenere l'uguaglianza fra la somma dei cationi e quella degli anioni, espressi in equivalenti/litro (bilancio ionico). In pratica, per gli inevitabili errori insiti nelle procedure analitiche e a causa di quelli commessi dall'operatore è sempre presente un certo sbilanciamento ionico che viene quantificato, in prima approssimazione, dalla formula seguente:

Sbilanciamento % =  $100 \times (\Sigma \text{ anioni} - \Sigma \text{ cationi}) / (\Sigma \text{ anioni} + \Sigma \text{ cationi})$ .

Sono state considerate accettabili solo le analisi con sbilanciamento inferiore al 5%.

### **6.7.2 ANALISI ISOTOPICHE**

Le analisi isotopiche sono state svolte dai laboratori dell'Istituto di Geoscienze e Georisorse del CNR di Pisa. In particolare sono stati analizzati gli isotopi stabili dell'ossigeno e dell'idrogeno costituenti la molecola d'acqua, per caratterizzare dal punto di vista isotopico le acque dell'isola. Le analisi sono state effettuate su campioni di acqua tal quale prelevati durante la campagna di Gennaio 2015 e sulle precipitazioni, campionate con il pluviometro (da Novembre 2014 a Aprile 2015).

La composizione isotopica dell'ossigeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) e dell'idrogeno ( $\delta\text{D}$ ) viene definita come la deviazione in parti per mille del rapporto isotopico di un campione rispetto ad uno *standard* di riferimento, che nel caso delle acque è rappresentato dalla V-SMOW (*Standard Mean Ocean Water*), preparato mescolando campioni diversi di acqua oceanica distillata (Craig, 1961).

Le analisi di questi del  $\delta^{18}\text{O}$  e del  $\delta\text{D}$  sono state eseguite mediante spettrometria di massa in fase gassosa su campioni opportunamente preparati. Il principio su cui si basa il funzionamento dello strumento è la possibilità di separare una miscela di ioni in funzione del rapporto massa/carica utilizzando un campo magnetico.

Per la determinazione del  $\delta D$  il campione è fatto reagire con magnesio o zinco metallici ad una determinata temperatura ( $H_2O + Zn = ZnO + H_2$  oppure  $H_2O + Mg = MgO + H_2$ ) e successivamente viene analizzato l' $H_2$  gassoso. Invece, per quanto riguarda il  $\delta^{18}O$  il campione è fatto reagire ad una determinata temperatura con  $CO_2$  a composizione nota e dopo un certo tempo, necessario perché avvenga lo scambio isotopico ( $C^{16}O^{16}O + H_2^{18}O = C^{16}O^{18}O + H_2^{16}O$ ), si analizza questo gas. L'errore analitico è compreso per il  $\delta D$  nell'intervallo  $\pm 1,0$  ‰ mentre è di  $0,1$  ‰ per il  $\delta^{18}O$ .

## **7. ELABORAZIONE DEI DATI**

In questo capitolo vengono illustrati ed elaborati tutti i dati raccolti nelle due campagne effettuate sull'Isola di Pianosa (Gennaio 2015 e Maggio 2015), nonché tutti i dati del monitoraggio in continuo relativi al periodo Ottobre 2014 – Maggio 2015.

I dati piezometrici e geochimici sono stati comparati con i dati raccolti durante studi pregressi, in particolare è stato effettuato un confronto con i dati della Tesi di Laurea di Nicotra (2008), eseguita nella stessa zona negli anni 2006-2007.

### **7.1 BILANCIO IDROLOGICO**

Nel capitolo precedente si è fatto riferimento ad una serie di parametri fisici fondamentali per la quantificazione delle risorse idriche nel sottosuolo. Questi parametri fanno parte del ciclo idrogeologico terrestre. In natura l'acqua è infatti soggetta ad un ciclo idrologico chiuso messo in moto dall'energia solare e dalla forza di gravità. Infatti, grazie al calore solare l'acqua evapora dal suolo, dalle acque superficiali, dal mare e dagli organismi viventi (evapotraspirazione), per poi condensare e precipitare sotto forma di pioggia o neve.

Le precipitazioni, quando cadono sulle terre emerse, possono subire tre differenti destini: in parte si infiltrano nel terreno, in parte invece rimangono in superficie dando luogo ad un deflusso superficiale o ruscellamento, controllato dalla forza di gravità, e in parte subiscono processi di evaporazione e traspirazione. La ripartizione tra deflusso superficiale e infiltrazione è influenzata da varie componenti tra cui: la quantità o intensità delle precipitazioni, clima e caratteristiche geologiche e morfologiche, uso del suolo, ecc.

L'Isola di Pianosa, come è stato già detto precedentemente, è costituita in affioramento da un litotipo assai permeabile, rappresentato dalle calcareniti organogene e sabbie cementate della Formazione di Pianosa. L'elevata permeabilità di queste rocce e la conformazione sostanzialmente pianeggiante determinano sull'isola la sostanziale assenza di una rete idrografica, per cui gran parte delle precipitazioni, che non tornano in atmosfera mediante evapotraspirazione, è soggetta ad infiltrazione alimentando le falde acquifere.



La valutazione del bilancio idrico è stata effettuata stimando una superficie utile di infiltrazione di circa 5 Km<sup>2</sup> (Vittorini, 1976; Raggi, 1983).

Il valore medio delle precipitazioni risulta, per il periodo 1960-2002, di 480,7 mm, con estremi di 598 mm nel 1972 e di 184 mm nel 1965 (Rapetti et al., 2012; Nicotra et al., 2008).

L'evapotraspirazione reale è stata stimata con la formula di Turc (1955) modificata da Santoro (1970). Egli infatti, a seguito di uno studio effettuato su 192 bacini idrogeologici in Sicilia, ha proposto una formula modificata per il parametro L, che si è dimostrata valida in aree in clima arido e semiarido, per temperature medie annue comprese tra 10° e 18°C.

$$E_r = P / (0,9 + P^2/L^2)^{1/2}$$

$$L \text{ (potere evaporante dell'atmosfera)} = 586 - 10T + 0,05T^3 \text{ (Santoro, 1970).}$$

Dove:

P: precipitazione annua (mm)

T: temperatura media annua (°C).

Per il calcolo d'infiltrazione è stato utilizzato un coefficiente d'infiltrazione potenziale pari ad 0,95, dato dall'assenza di deflusso superficiale e di una rete idrografica (Celico, 1988).

Applicando la seguente formula:  $I = I_p \times P_e$ , è stata ottenuto l'altezza della lama d'acqua corrispondente all'infiltrazione.

Dove:

I: infiltrazione (mm)

$I_p$ : coefficiente d'infiltrazione potenziale (Celico, 1988)

$P_e$ : precipitazione efficace ( $P_e = P - ETR$ ) (mm)

Infine, il deflusso superficiale è stato ottenuto semplicemente sottraendo dalle precipitazioni efficaci il valore di infiltrazione ricavato.

Di seguito la tabella riepilogativa, dove sono riportati i risultati ottenuti per il quarantennio 1960-2002:

mm	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	ANNO
P	44,2	49,3	43,4	40,3	27,5	19,1	8,2	25,1	43,7	64,7	59,5	55,7	480,71±17,0
Er													395,1
PE													85,6
I													81,3
Ds													4,3

**TABELLA 7.1:** In tabella sono riassunti i valori di precipitazioni (P) medie mensili con la rispettiva sommatoria, l'evapotraspirazione reale (Er), precipitazioni efficaci (PE), l'infiltrazione (I) e deflusso superficiale (Ds) (periodo 1960-2002).

Infine, per valutare la disponibilità idrica è stata moltiplicata l'infiltrazione per la superficie utile d'infiltrazione.

La disponibilità idrica che risulta da questi dati è compresa tra  $4,0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$  (Infiltrazione  $\times$  superficie d'infiltrazione). La superficie d'infiltrazione considerata in questo calcolo è di  $5 \text{ Km}^2$  (Raggi, 1983). Se si ipotizza di aumentare la superficie di infiltrazione fino a un massimo di  $7 \text{ Km}^2$  (estensione totale dell'isola  $10,3 \text{ Km}^2$ ) considerando che l'isola è costituita in affioramento quasi interamente da un litotipo permeabile, si ottengono delle disponibilità idriche superiori. Di seguito si riportano i risultati ottenuti:

- superficie  $6 \text{ Km}^2$  = disponibilità idrica pari a  $4,9 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{anno}$ ;
- superficie  $7 \text{ Km}^2$  = disponibilità idrica pari a  $5,7 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{anno}$ .

Sull'isola, durante il periodo Ottobre 2014-Settembre 2015, sono state inoltre campionate le acque di precipitazione con l'utilizzo di un pluviometro totalizzatore. Utilizzando questi dati, seppur pochi in quanto riferiti ad un solo anno, è stato eseguito un bilancio idrologico annuale con il metodo di Thornthwaite (1948). Il quale ha consentito di poter avere una stima sulla disponibilità idrica per l'anno considerato e di avere indicazioni durante quali mesi effettivamente si ha ricarica delle falde acquifere. Rispetto al bilancio precedente, dove è stato impiegato il metodo empirico di Turc, in questo caso è stato scelto il metodo di Thornthwaite (1948) in quanto, essendo pochi dati, consente di valutare l'evapotraspirazione potenziale e quindi reale di ogni mese, fornendo così un dato annuale più realistico.

Il metodo di Thornthwaite (1948) consente di stimare l'evaporazione reale (Er) in funzione dell'evapotraspirazione potenziale (Ep).

Quest'ultima è valutata per tutti i mesi (Epm) attraverso la seguente formula:

$$E_{pm} = K \times 16 \times (10T_m/I)^\alpha$$

dove:

K= coefficiente che tiene conto delle ore di insolazione media mensile ed è funzione esclusiva della latitudine e del mese; in pratica è il rapporto tra le ore diurne e la metà (12) delle ore giornaliere. Questo coefficiente è fornito da apposite tabelle (Fig.7.1);

T<sub>m</sub>= temperatura media mensili [C°]

I= indice termico annuo, dato dalla sommatoria degli indici termici mensili, ciascuno espresso dalla seguente equazione:  $i = (T_m/5)^{1,514}$ ;

$$\alpha = 0,49239 + 1792 \times 10^{-5} \times I + 771 \times 10^{-7} \times I^2 + 675 \times 10^{-9} \times I^3.$$

MESI	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Lat. Nord												
36°	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	0.97	0.86	0.84
37°	0.86	0.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	0.97	0.85	0.83
38°	0.85	0.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	0.96	0.84	0.83
39	0.85	0.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	0.96	0.84	0.82
40°	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
41°	0.83	0.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	0.96	0.82	0.80
42°	0.82	0.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	0.95	0.82	0.79
43°	0.81	0.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	0.95	0.81	0.77
44°	0.81	0.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	0.95	0.80	0.76
45°	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
46°	0.79	0.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	0.94	0.79	0.74
47°	0.77	0.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	0.93	0.78	0.73
48°	0.76	0.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	0.93	0.77	0.72

Figura 7.1: Valori mensili del coefficiente K a varie latitudini. L'isola si trova a circa 43° di latitudine Nord.

Dai valori ottenuti di Epm, si passa ai valori mensili di Er tenendo conto della capacità idrica di campo (C= quantità massima di acqua di ritenzione contenuta nel terreno). In questo caso il valore di C è stato fissato per convenzione a 100 mm (Thorntwaite 1948; Celico 1986; Nicotra, 2008).

Nei mesi in cui le precipitazioni superano la capacità di campo si registra un'eccedenza idrica (e), che può sia defluire in superficie che in sotterraneo,

alimentando così l'acquifero (infiltrazione efficace). In queste condizioni Er coincide con Ep stimata.

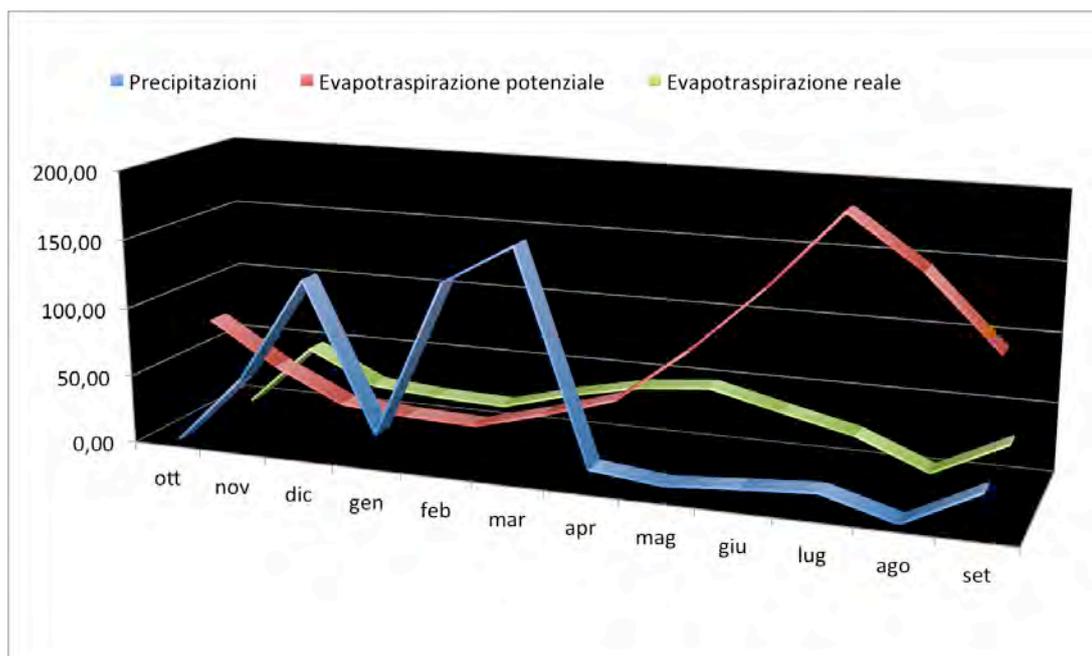
Nel caso in cui tali condizioni non siano rispettate la risorsa idrica del terreno (A) viene intaccata, e se non si registrano precipitazioni nei mesi successivi la risorsa può essere completamente esaurita. In tali situazioni il valore di Er risulterà inferiore ad Ep.

In tabella 7.2 si riportano i dati riepilogativi del bilancio idrico secondo il metodo di Thornthwaite (1948) per l'anno 2014-2015.

	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Anno
T°C	20,3	16,9	11,9	10,5	10	12,1	14,3	18,7	23,4	27,9	26	22,7	
i	8,4	6,3	3,7	3,1	2,8	3,8	4,9	7,4	10,3	13,5	12,1	9,9	86,7
K	0,95	0,81	0,77	0,81	0,82	1,02	1,12	1,26	1,28	1,29	1,20	1,04	
P mm	0,2	50,2	127,7	20,5	134,2	163,5	12,8	7,4	11,4	14,8	0,02	27,5	570,3
Ep mm	77,4	46,4	22,8	19	17,3	31	46,9	87,4	134,5	191,5	155,7	104,4	933,3
P-Ep mm	-77,2	3,8	104,9	1,5	116,9	132,5	-34,1	-80,0	-124,1	-176,7	-154,6	-77	
A mm	0	3,8	100	100	100	100	65,9	0	0	0	0	0	
Er mm	0,3	46,4	22,8	19,0	17,3	31,0	41,7	46,5	34,2	22,4	1,3	27,6	310,5
D mm	77,1	0	0	0	0	0	5,20	40,8	101,4	169,1	154,4	76,9	
e mm	0	0	8,8	1,5	116,9	132,5	0	0	0	0	0		259,8

**Tabella 7.2: Bilancio idrico dell'Isola di Pianosa per il periodo 2014-2015 calcolato con il metodo di Thornthwaite (1948). Con T°:temperatura, i: indice termico, P: precipitazioni, Ep: evapotraspirazione potenziale, A: risorsa idrica disponibile nel suolo, Er: evapotraspirazione reale, D: deficit idrico, e: eccedenza idrica (periodo 2014-2015).**

Sulla base dei dati mensili si può costruire il grafico del bilancio idrico dell'Isola (Fig. 7.2).



**Figura 7.2: Bilancio idrico per l'anno 2014-2015 ottenuto con il metodo di Thornthwaite.**

Dai dati in tabella e del grafico si può osservare che nei mesi umidi (dicembre-marzo) quando il valore delle precipitazioni utili ( $P-E_p$ ) è positivo, l'evapotraspirazione reale coincide con quella potenziale.

Nei mesi asciutti invece, quando l'evaporazione potenziale supera le precipitazioni, la vegetazione utilizza la propria riserva idrica disponibile per i propri processi biologici. Questo avviene nei mesi di ottobre e da aprile a settembre; la riserva idrica viene intaccata fino al suo completo esaurimento nel mese di maggio.

I fenomeni di eccedenza idrica, assunta uguale alla infiltrazione efficace in quanto il deflusso superficiale è stato assunto pari a zero, si verificano nel periodo tardo invernale-primaverile, da dicembre fino a marzo. Queste sono le precipitazioni efficaci, che nell'anno considerato (2015) hanno alimentato le falde acquifere.

Il calcolo rimane comunque puramente teorico, in quanto non vengono presi in considerazione molti fattori di peculiarità della zona studiata, come ad esempio la presenza o meno di una copertura vegetale, il tipo di vegetazione e inoltre viene considerato nullo il deflusso.

La stima della risorsa idrica in acquifero, tenendo in considerazione questi dati, risulta maggiore rispetto a quella ottenuta precedentemente; poiché, l'eccedenza

idrica risulta più elevata. In particolare, si ottiene un valore pari a  $1,3 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/anno; si deve però tenere presente che questo dato fa riferimento ad un unico anno e non è quindi rappresentativo dell'anno idrologico medio; inoltre, essendo pochi i dati, non è stato possibile valutare l'errore commesso.

Inoltre, è stata eseguita una stima dei consumi. In realtà, non si conoscono i reali consumi dell'isola, ma è stato ugualmente possibile fare una stima conoscendo la portata massima della pompa del pozzo PN3 (2,5 l/s), l'unico utilizzato per scopi idropotabili, e i giorni di attività del pozzo per l'anno 2014-2015.

In tabella 7.3 si riporta la stima dei consumi effettuata.

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	ANNO
GIORNI EMUNGIMENTO	10	10	12	12	20	16	20	20	25	13	13	13	184,0
ORE EMUNGIMENTO	240	240	288	288	480	384	480	480	600	312	312	312	4416,0
STIMA CONSUMI (m <sup>3</sup> )	2160	2160	2592	2592	4320	3456	4320	4320	5400	2808	2808	2808	39744

**Tabella 7.3: Stima consumi idrici dell'Isola di Pianosa per l'anno 2014-2015, in rosso si riportano i consumi ipotizzati.**

Secondo questi dati si stima un consumo pari a  $4,0 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/anno, va però tenuto presente che i dati risultano pochi e quindi il risultato risulta affetto da un errore che non è stato possibile valutare. Se si considera la risorsa idrica definita per l'anno 2014-2015 e i consumi, l'isola risulta dal punto di vista idrico autosufficiente. Lo stesso avviene considerando la risorsa idrica stimata per il quarantennio 1960-2002, il quale risulta più attendibile in quanto copre un arco temporale abbastanza esteso; anche se per questo periodo non si conosce con precisione il numero di abitanti e le portate dei pozzi utilizzati. La stima effettuata risulta comunque elevata considerando che sull'isola la popolazione stabile è di circa 40 persone; infatti, se si considera un consumo giornaliero pari a 250 l/g per persona si stima una necessità idrica pari a 3650 m<sup>3</sup>/anno. Probabilmente tali consumi derivano in parte da un'elevata richiesta idrica dell'orto ("Ex Pollaio Razionale") e in parte, durante la stagione estiva, dal ristoro e dall'albergo presenti, nonché dalle numerose abitazioni adibite a foresteria.

Se si prova infine, a fare una speditiva valutazione sui consumi dell'isola, considerando una popolazione di circa 1500 persone con consumi pari sempre a

250 l/g (pari a 0,25 m<sup>3</sup>) per abitante equivalente, si arriva a stimare una necessità idrica annua di circa 130.000 m<sup>3</sup>/anno. Attualmente, come già detto, il numero di abitanti è di circa 40 persone, anche se in passato, nel periodo di massimo popolamento, l'isola contava proprio una popolazione di circa 1500 persone. Nonostante dai due bilanci idrologici l'isola risulti autosufficiente dal punto di vista idraulico, durante il periodo di massimo popolamento, dati i numerosi poderi coltivati e la grande attività di allevamento, la risorsa idrica è stata sovrasfruttata con conseguenti problemi di disponibilità idrica.

Inoltre, il sovrasfruttamento ha determinato non solo un depauperamento della risorsa ma anche un peggioramento della sua qualità, dato non solo da fenomeni di inquinamento ma anche a fenomeni di intrusione marina.

## 7.2 STUDIO PIEZOMETRICO

Al fine di ricostruire la morfologia della superficie piezometrica della falda freatica dell'Isola di Pianosa e individuare le principali vie di deflusso idrico sotterraneo, è stato condotto uno studio piezometrico sui pozzi superficiali, che interessano la falda freatica superficiale. Per completezza sono state effettuate misure di livello piezometrico anche sui 4 pozzi profondi che drenano la falda profonda. Le isopieze delle carte piezometriche, riportate in seguito, fanno riferimento alla falda freatica superficiale, mentre per quanto riguarda i pozzi profondi sono riportati i rispettivi valori piezometrici.

I dati dei livelli piezometrici raccolti sono stati riportati in tabella 7.4, dove si possono osservare, inoltre:

- il codice del punto d'acqua monitorato;
- la profondità esplorata (m);
- la quota di riferimento alla quale è stato riferito il livello piezometrico (m s.l.m.) (la quota qui riportata è stata censita durante una delle due campagne attraverso l'utilizzo di un sistema GPS);
- la soggiacenza misurata in campagna con il freatimetro (rappresenta la profondità della superficie piezometrica rispetto alla superficie topografica);
- il livello piezometrico in m s.l.m. (quota di riferimento – soggiacenza)
- la tipologia di pozzo monitorato (con il termine trivellati si intendono i pozzi profondi che interessano l'acquifero semiconfinato-confinato profondo, mentre con "romano" i pozzi scavati a mano che interessano l'acquifero freatico superficiali).

CODICE PUNTO D'ACQUA	PROFONDITÀ (m)	QUOTA DI RIFERIMENTO (m)	SOGGIACENZA DELLA FALDA (m)	LIVELLO PIEZOMETRICO (m s.l.m)	SOGGIACENZA DELLA FALDA (m)	LIVELLO PIEZOMETRICO (m s.l.m)	TIPOLOGIA
			CAMPAGNA DI GENNAIO 2015		CAMPAGNA DI MAGGIO 2015		
PN1	77,00	21,50	21,68	-0,18	21,66	-0,16	TRIVELLATO
PN2	75,00	21,08	22,22	-1,14	21,98	-0,90	TRIVELLATO
PN3	55,00	18,97	23,70	-4,73	23,01	-4,04	TRIVELLATO
PN4	77,00	20,83	17,72	3,11	17,71	3,12	TRIVELLATO
PN5	26,00	17,30	14,74	2,56	14,81	2,49	TRIVELLATO
PN6	22,00	18,73	19,18	-0,45	19,09	-0,36	TRIVELLATO
PN7	21,70	21,2	19,75	1,45	19,71	1,49	"ROMANO"
PN8	22,30	19,74	19,29	0,45	19,25	0,49	"ROMANO"
PN9	12,10	11,63	11,83	-0,20	11,86	-0,23	"ROMANO"
PN10			NON TROVATO				"ROMANO"
PN11	16,40	17,61	14,08	3,53	13,94	3,67	"ROMANO"
PN12	18,00	19,73	16,10	3,33	16,46	3,27	"ROMANO"
PN13	16,40	18,34	13,90	4,44	13,95	4,39	"ROMANO"
PN14	6,62	6,34	NON TROVATO DURANTE QUESTA CAMPAGNA	-	6,48	-0,14	"ROMANO"
PN15	12,00	12,55	SECCO	-	SECCO	-	"ROMANO"
PN16	17,25	16,24	16,10	0,14	15,92	0,32	"ROMANO"
PN17	20,40	19,23	19,42	-0,19	19,40	-0,17	"ROMANO"
PN18	15,30	16,52	12,53	3,99	12,56	3,96	"ROMANO"
PN19	16,50	15,80	15,83	-0,03	15,85	-0,05	"ROMANO"
PN20	16,25	15,84	15,75	0,09	15,69	0,15	"ROMANO"
PN21	19,70	19,98	19,28	0,70	SECCO	-	"ROMANO"
PN22	15,70	13,48	13,63	-0,15	13,57	-0,09	"ROMANO"
PN23	17,65	18,52	17,31	1,21	17,30	1,22	"ROMANO"
PN24	16,60	16,15	16,07	0,08	16,07	0,08	"ROMANO"
PN25	17,70	20,96	16,99	3,97	17,04	3,92	"ROMANO"
PN26	13,17	23,85	12,87	10,98	12,59	11,26	"ROMANO"
PN27	22,96	26,55	19,39	7,16	19,34	7,21	"ROMANO"
PN28	23,35	22,74	23,03	-0,29	23,05	-0,31	"ROMANO"
PN29	20,07	17,77	17,93	-0,16	17,93	-0,16	"ROMANO"
PN30	23,02	22,34	22,47	-0,13	22,43	-0,09	"ROMANO"
PN31	15,66	15,10	15,63	0,37	15,57	0,43	"ROMANO"

**TABELLA 7.4: Dati piezometrici riportati sia come valore di soggiacenza che riferiti al livello del mare, rilevati nelle due campagne effettuate sull'isola.**

Sulla base dei dati misurati, riportati nella sovrastante tabella, è stato realizzato

un grafico (Fig. 7.3) che mostra in maniera speditiva l'andamento del livello piezometrico nelle due campagne.

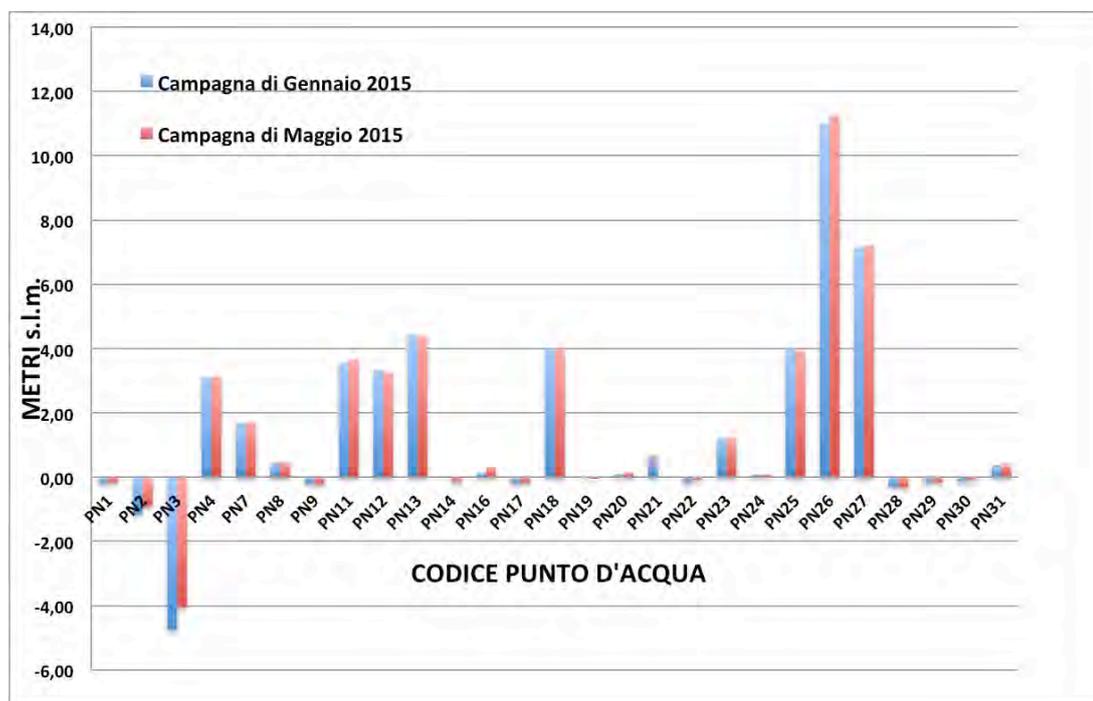


Figura 7.3: Andamento del livello piezometrico dei punti d'acqua della rete di monitoraggio nelle due campagne effettuate.

Da questa rappresentazione grafica (Fig. 7.3) si può osservare come i pozzi profondi, ad eccezione del PN4, abbiano per entrambe le campagne valori piezometrici al di sotto del livello del mare, ed, in particolare, il PN3 mostra un'importante depressione piezometrica. Questo pozzo infatti, come ripetutamente riportato, risulta da molti anni l'unico utilizzato per scopi idropotabili, alimentando la rete idrica presente sull'isola. Per quanto riguarda invece i pozzi superficiali, questi presentano dei valori piezometrici mediamente al di sopra del livello del mare, con alcuni pozzi solo di pochi centimetri al di sotto (PN9, PN14, PN17, PN20, PN22, PN24, PN28, PN29, PN30). Appare poi evidente come nel pozzo PN26, ma anche nel PN27, il livello risulti molto al di sopra del livello del mare; questi valori sono legati all'idrostruttura, in particolare, in questa zona le calcareniti della Formazione di Pianosa affiorano al di sopra del livello del mare.

Simili osservazioni sono state effettuate da Nicotra (2008) di cui si riporta il medesimo grafico (Fig. 7.4), testimoniando una minima variazione nel tempo dei livelli piezometrici, almeno relativamente all'ultimo decennio, in cui lo

sfruttamento della risorsa idrica è stato contenuto per l'esiguo numero di persone presenti sull'isola.

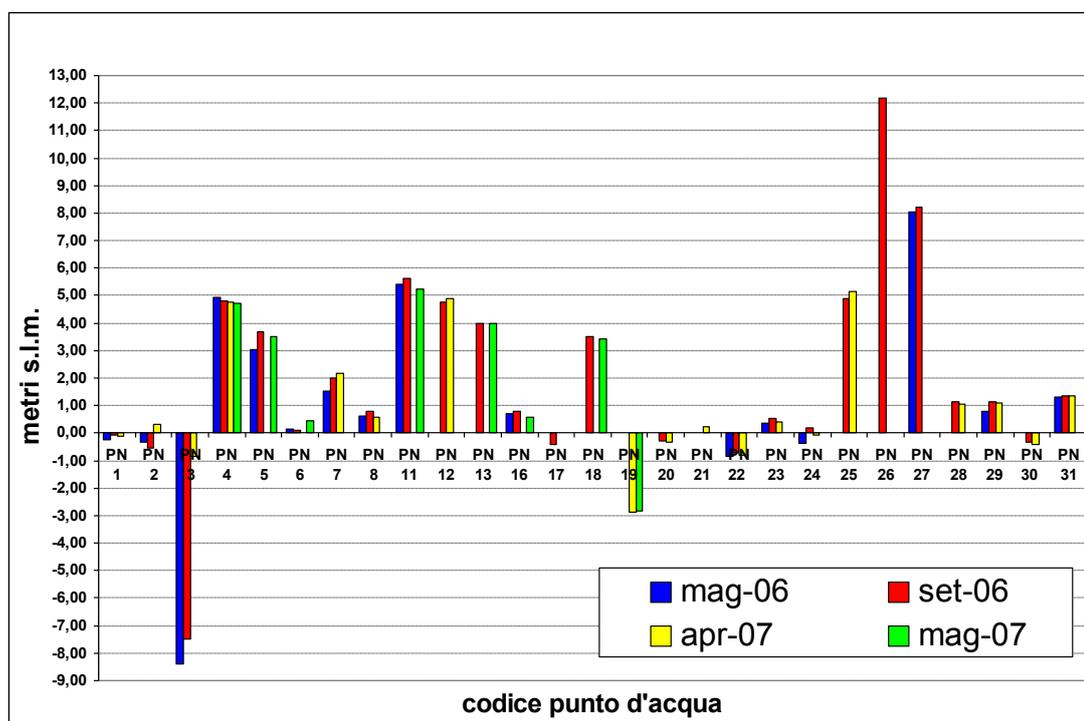


Figura 7.4: Andamento del livello piezometrico dei punti d'acqua della rete di monitoraggio da maggio 2006 a maggio 2007 (Nicotra, 2008).

Come si può notare, infatti, si trova una netta corrispondenza tra i due grafici; l'unica variazione significativa sembra essere la presenza di una depressione importante anche per il pozzo PN19, che come già detto è stato utilizzato diversi anni per l'irrigazione dell'orto presente in quell'area.

In tabella 7.5 e 7.6 sono riportati tutti i dati disponibili, raccolti durante questa tesi e quelli riportati nella Tesi di Nicotra (2008) dei livelli piezometrici, suddivisi rispettivamente in pozzi profondi e pozzi superficiali. I dati raccolti abbracciano un periodo che per i pozzi profondi va dal 1972 al 2015, mentre per i pozzi superficiali dal 1981 al 2015 tenendo conto che comunque i dati risultano molto frammentari.

CODICE PUNTO D'ACQUA	LIVELLO PIEZOMETRICO m slm														
		set-72	ott-81	mag-00	ott-00	dic-00	mar-01	ago-01	ago-02	mag-06	set-06	apr-07	mag-07	gen-15	mag-15
PN1				-0,50	-0,50	-0,30	-0,17	-17,41	0,63	-0,24	-0,06	-0,12		-0,18	-0,16
PN2				-6,09	-5,50	-7,04	-8,19	-4,66	-0,71	-0,34	-0,56	0,31		-1,14	-0,90
PN3	4,23	-22,77	-11,69	-10,41	-3,77	-1,11	0,40	0,23	-8,39	-7,51	-0,85			-4,73	-4,04
PN4			2,45	2,60	2,84	3,10	3,87	0,89	4,94	4,82	4,76	4,71	3,11	3,12	
PN5	-4,60									3,02	3,67		3,50	2,56	2,49
PN6	0,90			-0,40	0,10	0,53	0,90	1,27	0,15	0,11		0,46	-0,45	-0,36	

TABELLA 7.5: Serie di misure del livello piezometrico su i pozzi profondi eseguiti dal 1972 al 2015.

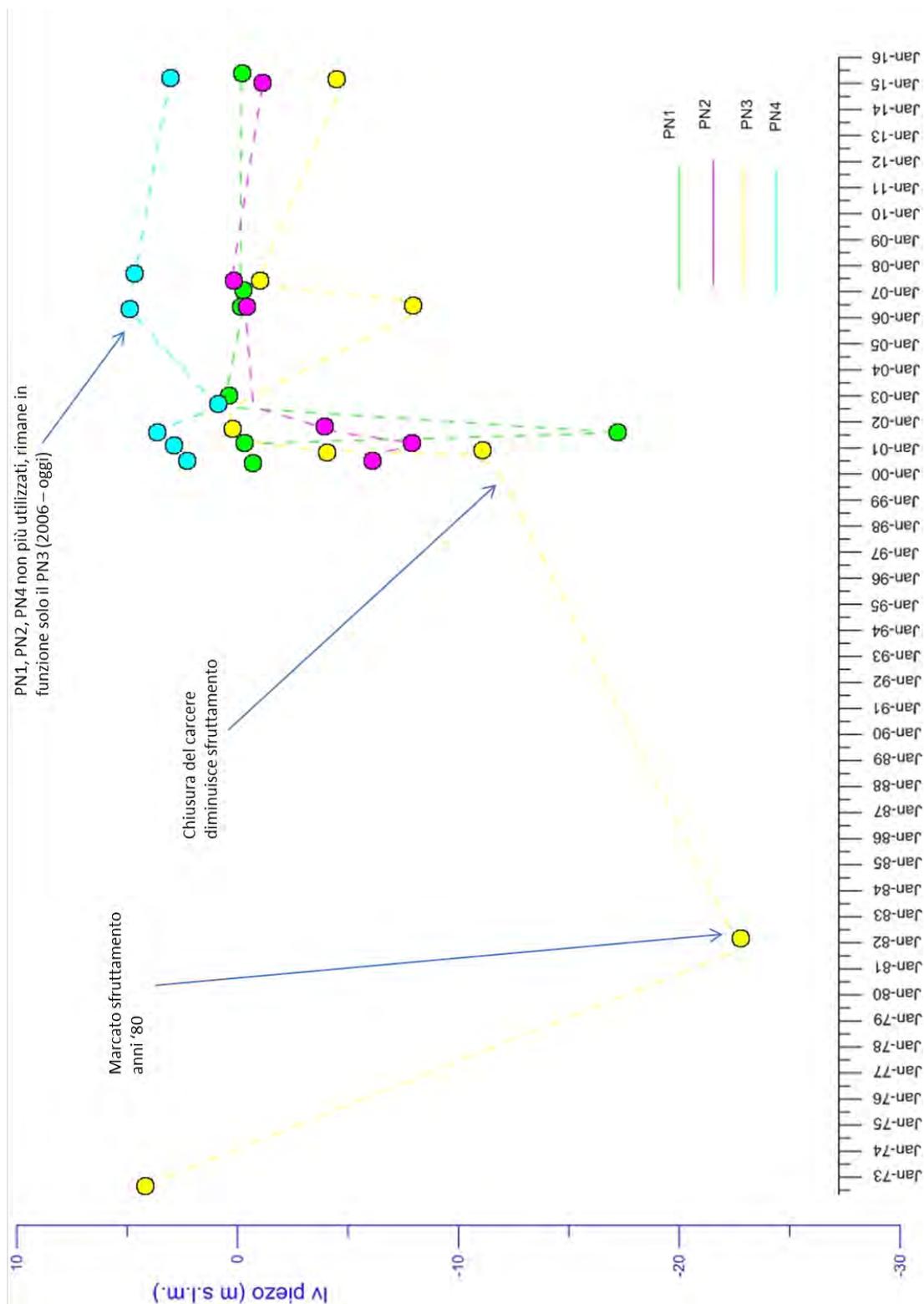
CODICE PUNTO D'ACQUA	LIVELLO PIEZOMETRICO m slm													
		mag-99	mag-00	ott-00	dic-00	mar-01	ago-01	ago-02	mag-06	set-06	apr-07	mag-07	gen-15	mag-15
PN7	1,83			2,08			2,61		1,53	1,98	2,19		4,80	4,84
PN8	0,40	0,30	0,75	-0,24	0,75	1,38	1,42	0,62	0,78	0,59			0,45	0,49
PN9	-2,00		-2,60					0,23	-8,39			-1,84	-0,20	-0,23
PN11	4,65	4,80	4,75						5,42	5,63		5,25	3,53	3,67
PN12	4,00							1,27		4,76	4,87		3,33	3,27
PN13	2,89		2,59	2,79	2,69	3,14	3,36			3,98		3,97	4,44	4,39
PN16	0,49		0,69	0,89			0,69	1,49		0,79		0,56	0,14	0,32
PN17	-0,58	-2,33	-0,23	-0,18			0,33	0,39	0,69	-0,43			-0,19	-0,17
PN18	2,55		2,60							3,49		3,43	3,99	3,96
PN19	-2,87		-2,55								-2,88	-2,84	-0,03	-0,05
PN20	-0,52		0,03	0,03	-0,27	0,86	0,71			-0,28	-0,34		0,09	0,15
PN21	0,85		0,57	0,56			1,33	1,40				0,22	0,70	secco
PN22	-0,75	-0,85	-0,50	-0,65	-0,55	0,29	0,25	-0,84	-0,73	-0,81			-0,15	-0,09
PN23	0,60		0,80				1,47	1,46	0,35	0,54	0,42		1,21	1,22
PN24	0,20		0,50	0,35			1,10	1,18	-0,36	0,20	-0,08		0,08	0,08
PN25	4,80		4,75	4,74			5,30	5,27		4,90	5,15		3,97	3,92
PN26	11,65		12,04						12,39	12,16			10,98	11,26
PN27	7,70	7,60	7,40				8,00	8,03	8,05	8,20			7,16	7,21
PN28	1,60		0,70	0,96			1,23	4,49		1,15	1,05		-0,29	-0,31
PN29	1,99	1,00	1,41	1,58	1,58	2,08	2,12	0,78	1,13	1,08			-0,16	-0,16
PN30	-0,21	-0,31	0,04	0,09	0,09			0,72		-0,33	-0,41		-0,13	-0,09
PN31	1,20		1,70						1,31	1,37	1,34		0,37	0,43

TABELLA 7.6: Serie di misure del livello piezometrico su i pozzi superficiali dal 1981 al 2015.

Partendo da questi dati sono stati realizzati dei grafici che consentono un'immediata valutazione della variazione del livello piezometrico.

Nel grafico (Fig. 7.5) si possono osservare le variazioni dei livelli piezometrici sui pozzi profondi PN1, PN2, PN3 e PN4. Il periodo che viene preso in considerazione va dal 1972, anno in cui sono stati trivellati gli ultimi tre pozzi (i primi pozzi profondi sono stati trivellati nel 1951), al 2015. I dati, come già detto, risultano frammentari, per cui le variazioni evidenziate sul grafico sono da considerare in maniera indicativa, in quanto le curve disegnate rappresentano delle rette di interpolazione su una serie di pochi dati noti, utili solo al fine di una migliore visualizzazione.

Nonostante questo, sulla base delle notizie storiche, si possono effettuare delle valutazioni su come sia stata sfruttata la risorsa idrica dell'isola. Sappiamo infatti che nel 1972 la colonia penale era in piena attività e in continua crescita, come si può intuire dalla necessità di trivellare nuovi pozzi, in quanto quelli "alla romana" e quelli trivellati negli anni '50 (Masini 1953) non né soddisfacevano il fabbisogno idrico. Nonostante questi nuovi pozzi, Raggi (1983) testimonia una carenza di risorsa idrica, data da un marcato sovrasfruttamento connesso anche all'aumento della popolazione residente (anni '80 periodo di massimo popolamento dell'isola). Dopo questo periodo di grande sfruttamento l'isola passa, negli anni 1997 – 1998, ad un progressivo abbandono fino alla situazione attuale, dove si contano più o meno una quarantina di persone stabilmente residenti.



**Figura 7.5: Andamento schematico del livello piezometrico dei pozzi profondi a partire dal 1972 ad oggi.**

All'interno di questo grafico (Fig. 7.5), osservando in particolare l'andamento del livello piezometrico nel pozzo PN3, pozzo su cui si hanno più dati, si trova una corrispondenza con le notizie storiche sopra citate. Infatti, se si osservano nel

dettaglio le misure puntuali del livello piezometrico si nota come:

- nel 1972, anno della sua perforazione, il livello piezometrico è di 4,23 m s.l.m.;
- negli anni '80, periodo di massimo popolamento dell'isola, si osserva una marcata depressione del livello (-22,77 m s.l.m.), legata ad un importante sfruttamento della risorsa, come riporta anche Raggi (1983). Lo stesso autore riporta però che la misura del livello risulta probabilmente inferiore a quella reale della falda in tale periodo. Infatti, questa è stata effettuata poco tempo dopo lo spegnimento del pozzo e quindi il livello risulta probabilmente ancora influenzato dall'emungimento;
- dopo gli anni '90, il livello presenta una sostanziale risalita, anche se sono evidenti ulteriori depressioni di entità minore. La risalita è probabilmente dovuta al minore sfruttamento della risorsa idrica, connesso con il progressivo abbandono dell'isola. La depressione piezometrica che si osserva nel 2006 è legata con molta probabilità al fatto che la misura è stata effettuata poco dopo lo spegnimento del pozzo (Nicotra, 2008); infatti, nella successiva campagna si nota una risalita del livello, connessa probabilmente all'inattività del pozzo. Le misure effettuate nelle due campagne del 2015, sono riferite a momenti di inattività del pozzo PN3.

Per il periodo precedente al 2000 non si hanno misure dei livelli piezometrici sugli altri pozzi profondi, verosimilmente anch'essi molto sfruttati. Le misure relative ai pozzi PN1, PN2 e PN4 partono infatti dal 2000 e non mostrano sostanzialmente grandi variazioni, se non il PN1 e il PN2 nel 2001 e il PN4 nel 2002. Dai dati raccolti da Nicotra (2008), tali depressioni sono probabilmente da relazionare alla messa in funzione di questi pozzi. Dopodiché, data la diminuzione di domanda idrica tali pozzi non sono stati più utilizzati.

Nelle figure successive (Figg. 7.6 e 7.7) si osserva invece la variazione del livello piezometrico nei pozzi superficiali dal 2000 ad oggi. Anche per questi pozzi i dati sono molto frammentari e di conseguenza le semirette visibili sono il risultato di pure interpolazioni sulla base di dati noti. Rispetto alla figura riportata in precedenza (Fig. 7.5) in queste, per una migliore visualizzazione è stato scelto di non riportare tutti i pozzi in un unico grafico.

Rispetto ai pozzi profondi, in questo caso non si possiedono con certezza informazioni sul loro utilizzo negli anni presi in esame, a parte per il pozzo PN19 che viene tuttora utilizzato. Quello che si conosce è che già prima della chiusura del carcere il marcato sovrasfruttamento della risorsa idrica e le attività di allevamento e agricoltura avevano indotto un progressivo deterioramento della qualità delle acque (Raggi, 1983). Quindi, nel periodo considerato, non si sono presumibilmente verificati importanti emungimenti di acqua dalla falda superficiale. Per questo motivo le variazioni che possono essere visualizzate nelle figure (Figg. 7.6 e 7.7) sono da mettere in relazione con fattori naturali, quali:

- variazione del regime pluviometrico;
- influenza dell'emungimento effettuato sui pozzi profondi.

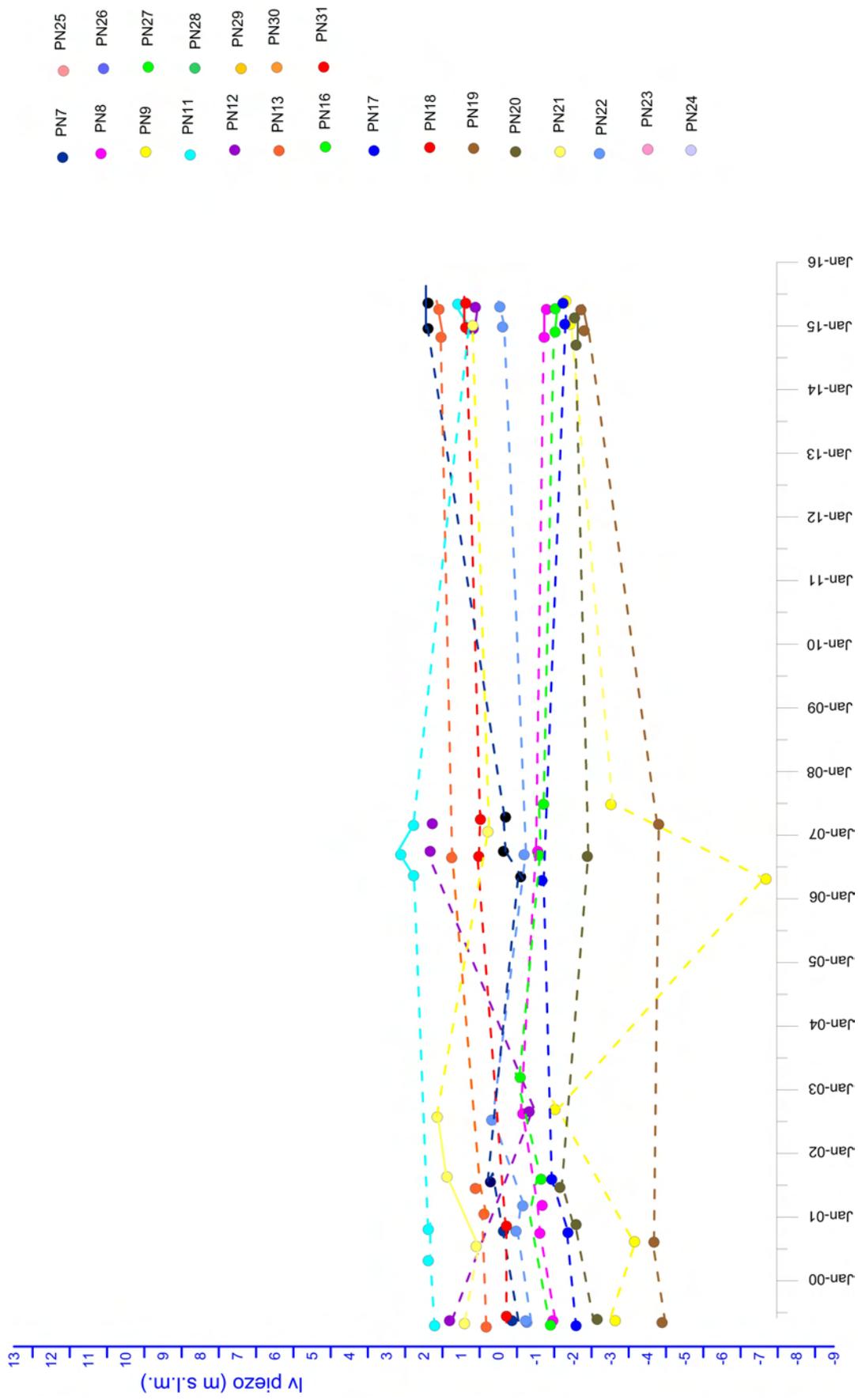


Figura 7.6: Andamento della superficie piezometrica nei pozzi “alla romana” (PN7 – PN22) dal 2000 ad oggi.

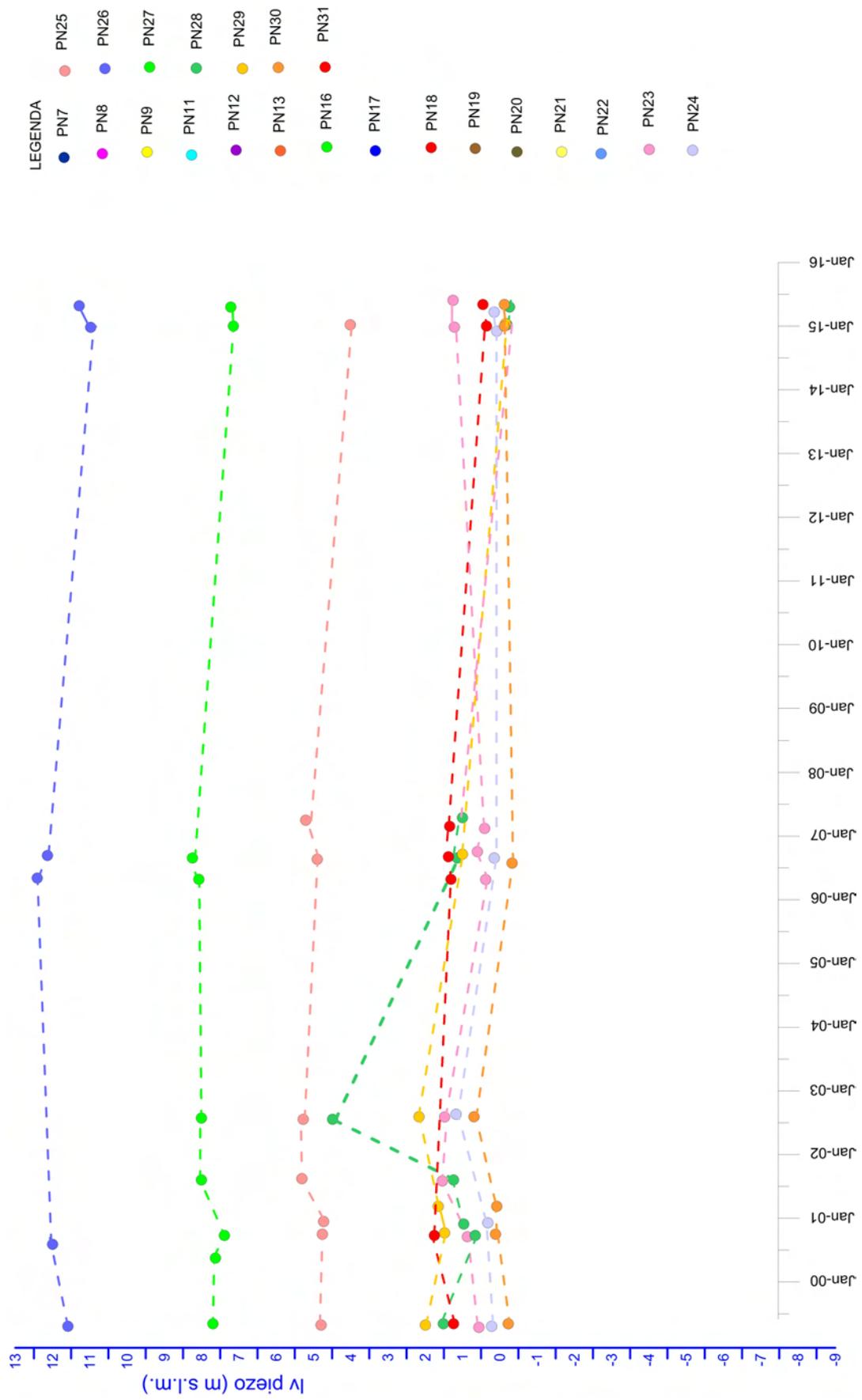


Figura 7.7: Andamento della superficie piezometrica nei pozzi “alla romana” (PN23 - PN31) dal 2000 ad oggi.

I dati riportati nelle figure non mostrano sostanzialmente grandi variazioni, tranne in qualche caso (PN7, PN9, PN28). Questo andamento conferma il probabile scarso utilizzo della maggior parte di questi pozzi nel periodo considerato.

Se si considera che le falde freatiche si trovano a stretto contatto con la zona di areazione del suolo, queste dovrebbero risentire sia delle variazioni pluriennali delle precipitazioni sia di quelle stagionali del regime pluviometrico, si può per questo motivo ipotizzare che le variazioni evidenziate sul grafico dipendano in maniera preponderante da questo fenomeno. Naturalmente questa influenza dipende anche dall'assetto e dalle caratteristiche idrostrutturali dell'acquifero, che ne influenzano i tempi di risposta.

Se si considerano le variazioni pluriennali delle precipitazioni dal 1951 al 2005 (Fig 7.8) (Nicotra, 2008) quello che si nota è un *trend* in diminuzione delle piovosità dagli anni 2000 (anno dal quale si possiedono i dati piezometrici sui pozzi superficiali).

I dati più recenti, mostrano per l'anno 2013 (245,8 mm), una piovosità in linea con il con *trend* di diminuzione, mentre nel 2014 (442,4 mm) la piovosità è risultata in aumento. Il fatto che il 2014 sia risultato molto piovoso può essere legato a delle variazioni annuali del regime pluviometrico in un *trend* principale di diminuzione.



Figura 7.8: Andamento delle precipitazioni dagli anni 1951-2005 in Nicotra (2008).

Il *trend* di diminuzione non sembra ripercuotersi sulle variazioni dei livelli piezometrici dei vari pozzi, che mostrano invece un andamento complessivamente costante. Se si tiene in considerazione che, l’acquifero freatico si trova nelle calcareniti della Formazione di Pianosa, roccia serbatoio dotata di un’elevata permeabilità, ci si aspetterebbe invece, una risposta più marcata a questo *trend*. Probabilmente però, lo scarso sfruttamento della risorsa idrica, operato in questi anni, compensa la diminuzione della piovosità, e questo spiegherebbe la sostanziale omogeneità degli andamenti dei livelli piezometrici. Per quanto riguarda invece l’influenza dell’emungimento dei pozzi profondi su quelli superficiali, essa è stata analizzata durante l’esecuzione della prova di emungimento di cui in seguito si riportano i risultati.

### 7.2.1 CARTE ISOPIEZOMETRICHE

A partire dai dati dei livelli piezometrici (Tab. 7.4) sono state costruite 2 carte isopiezometriche, una per ogni campagna svolta (Gennaio e Maggio 2015), al fine di poter descrivere la morfologia della superficie piezometrica nel periodo di riferimento ed individuare le direzioni preferenziali di deflusso.

Entrambe sono state realizzate tenendo in considerazione unicamente

l'andamento dei livelli piezometrici dell'acquifero freatico, del quale si hanno molti più dati. Infatti, della sottostante falda si possiedono unicamente 4 valori piezometrici (riportati comunque sulle carte come valori puntuali).

L'elaborazione dei dati, eseguita con il metodo d'interpolazione *Kriging* (utilizzando il programma Surfer della Golden Software) e successivamente rivisitata criticamente, ha permesso la ricostruzione della superficie piezometrica riportata nelle Fig. 7.9 e Fig. 7.10.

Osservando la carta isopiezometrica della campagna di gennaio (Fig. 7.9) si può notare come nella zona centrale dove si trova il pozzo PN3, unico pozzo utilizzato, attivo da molti anni, le isopieze non sembrano risentire di tale emungimento. Dalla morfologia della superficie piezometrica si può osservare come il gradiente idraulico sia variabile, con valori maggiori nella parte centrale-occidentale dell'isola (0,75%) e minori verso la costa orientale (0,3%). Inoltre, sempre dalla morfologia, è stato possibile desumere una direzione principale di deflusso; preferenzialmente verso est/sud-est. Tale direzione di flusso è probabilmente legata alla conformazione del substrato impermeabile, che immerge proprio in questa direzione.

La presenza nell'estremità sud-est dell'isola di una direzione di flusso verso nord-ovest indica probabilmente la presenza di uno spartiacque idrogeologico, legato probabilmente all'attività di emungimento sui pozzi profondi.

Invece, la presenza dello stillicidio del Golfo della Botte, sulla costa occidentale, indica la presenza, anche se modesto, di un flusso verso ovest, opposto al flusso principale. Tale flusso non è risultato dalle elaborazioni, probabilmente per la mancanza di dati tra la sorgente e i pozzi che caratterizzano il centro dell'isola. La presenza della sorgente, ad ogni modo, consente di ipotizzare la presenza di uno spartiacque idrogeologico (non rappresentato sulle carte), con probabile direzione nord-est/sud-ovest, che impone due direzioni di flusso, una verso la costa orientale (flusso principale), l'altra verso la costa occidentale.

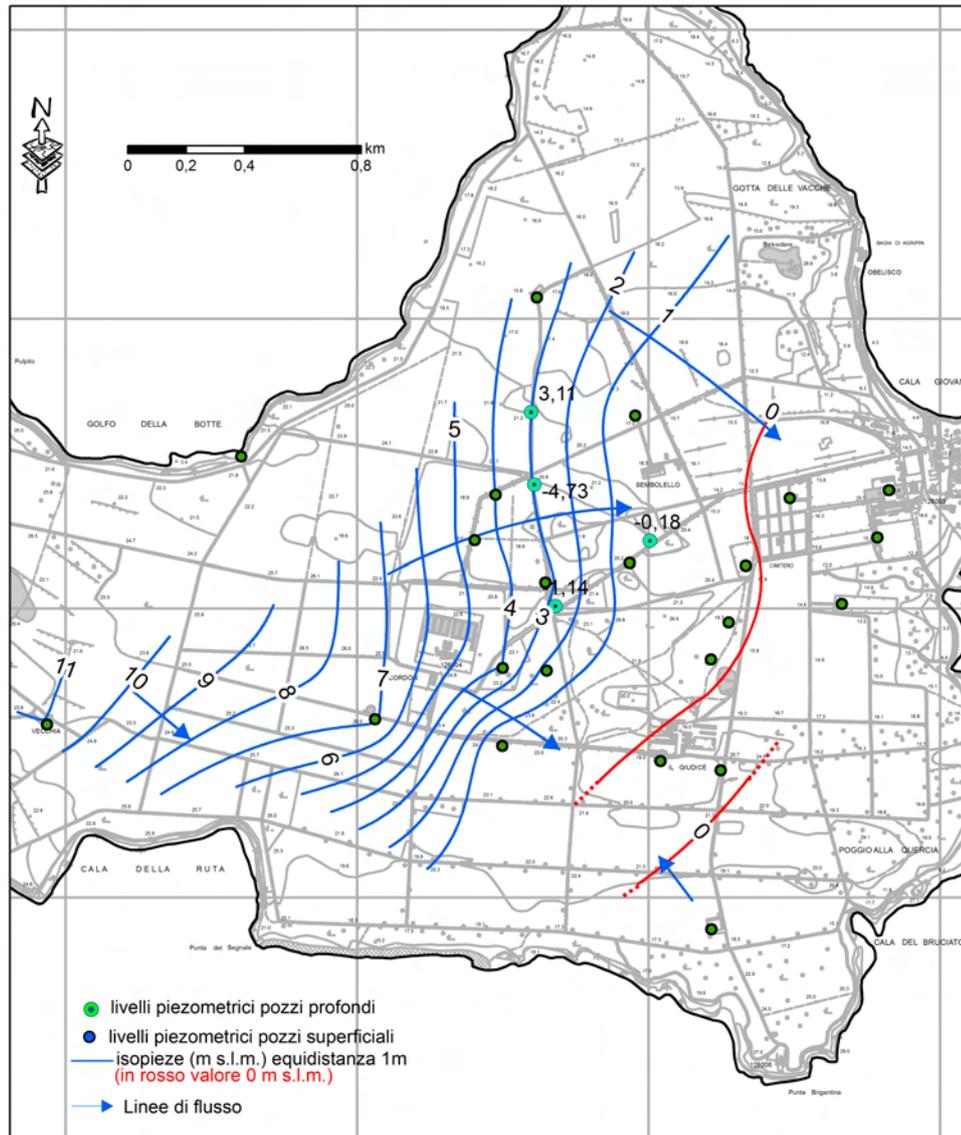
Nella zona orientale è presente un'estesa area con valori prossimi e/o inferiori al livello del mare.

Se si osservano infine i valori del livello piezometrico dei pozzi profondi si può notare come i pozzi PN1, PN2 e PN3 mostrino valori più negativi (al di sotto del

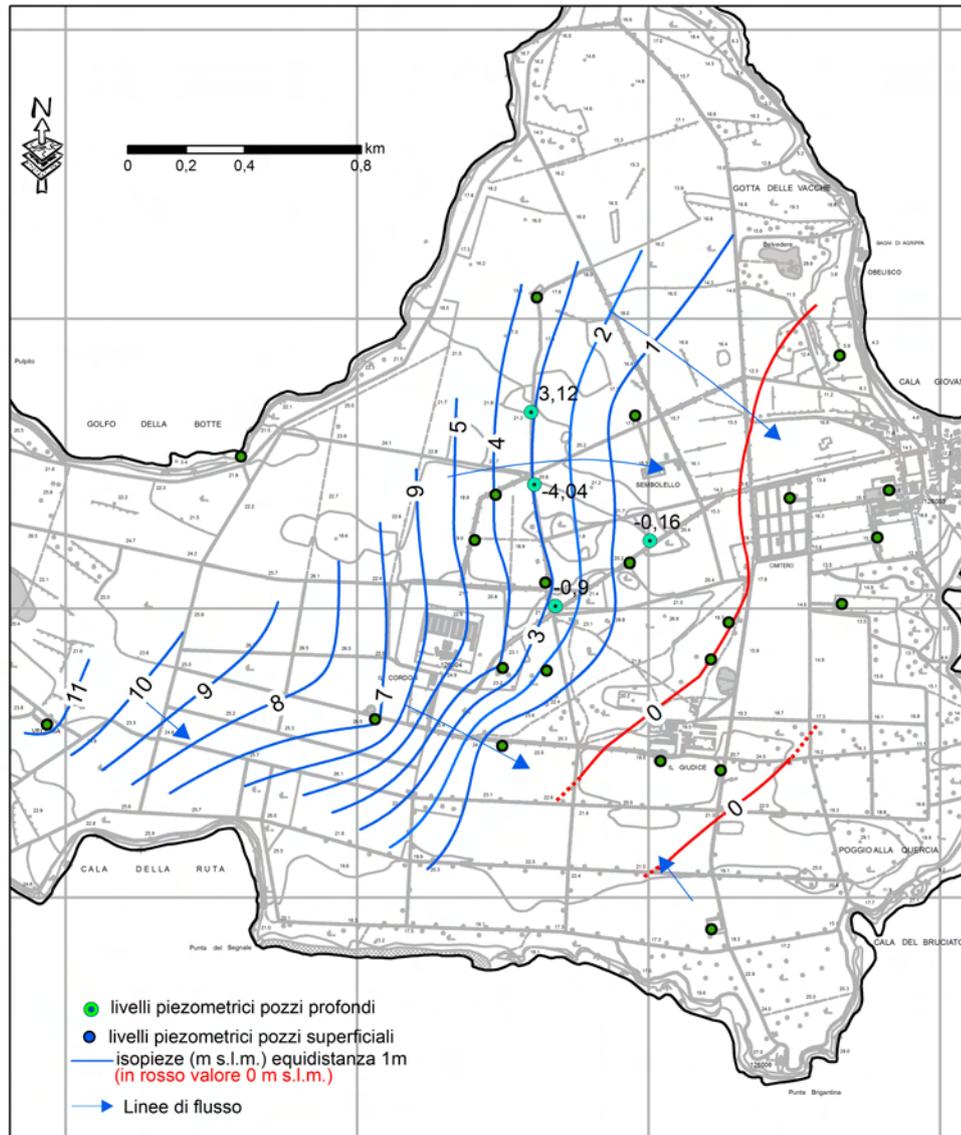
livello del mare) rispetto al PN4, il cui livello si colloca invece alquanto al di sopra del livello del mare.

La carta isopiezometrica di maggio (Fig. 7.10) non mostra sostanziali variazioni, anche se per alcuni pozzi possono essere state registrate piccole variazioni puntuali.

È comunque importante sottolineare che la ricostruzione della superficie piezometrica nella zona occidentale dell'isola, dove si hanno pochi dati, è puramente interpretativa; ciò non esclude infatti la presenza in tale zona di spartiacque idrogeologici con conseguenti variazioni della direzione di flusso.



**Figura 7.9:** Carta isopiezometrica riferita alla campagna di Gennaio 2015. Le isopieze si riferiscono all'acquifero freatico superficiale. Per completezza sono stati riportati anche i livelli piezometrici dei pozzi profondi.



**Figura 7.10: Carta isopiezometrica riferita alla campagna di Maggio 2015. Le isopieze si riferiscono all'acquifero freatico superficiale. Per completezza sono stati riportati anche i livelli piezometrici dei pozzi profondi.**

### **7.3 MAPPE DI CONDUCEIBILITÀ ELETTRICA**

Per entrambe le campagne di indagine sono state costruite anche delle mappe di conducibilità elettrica, che consentono di ottenere indicazioni sulla variabilità spaziale di questo parametro. In Tab. 7.7 si riportano i valori di conducibilità elettrica per ogni punto d'acqua della rete di monitoraggio relativi ad entrambe le campagne. In particolare per i pozzi profondi PN1 e PN2 si riportano due valori, in quanto per tali pozzi sono stati prelevati due campioni a profondità differenti nella campagna di Gennaio 2015.

Come per le carte piezometriche, le due mappe si riferiscono all'acquifero freatico, del quale si hanno molti più dati. I valori di conducibilità elettrica misurati nei pozzi profondi sono stati comunque riportati sulle carte per un confronto immediato.

CODICE PUNTO D'ACQUA	CAMPAGNA DI GENNAIO	CE_25°C	CAMPAGNA DI MAGGIO	CE_25°C
PN1_35	28/01/15	1688	05/05/15	2200
PN1_67	28/01/15	3760		NON MISURATA
PN2_40	27/01/15	1182	05/05/15	1310
PN2_60	27/01/15	2325		NON MISURATA
PN3	28/01/15	998	07/05/15	976
PN4	28/01/15	1096	05/05/15	1086
PN7	29/01/15	2032	05/05/15	1934
PN8	28/01/15	863	06/05/15	859
PN9	29/01/15	8116	06/05/15	2880
PN11	28/01/15	1135	05/05/15	1097
PN12	27/01/15	1034	05/05/15	1041
PN13	28/01/15	917	09/05/15	921
PN14		NON MISURATA	11/05/15	3300
PN15		SECCO		SECCO
PN16	28/01/15	869	05/05/15	878
PN17	28/01/15	4470	06/05/15	3970
PN18	28/01/15	888	06/05/15	865
PN19	28/01/15	1202	06/05/15	1040
PN20	29/01/15	3760	06/05/15	3696
PN21	29/01/15	2580	05/05/15	Secco
PN22	28/01/15	6590	06/05/15	6440
PN23	29/01/15	1198	06/05/15	1151
PN24	29/10/15	1935	06/05/15	1861
PN25	27/01/15	1695	06/05/15	1656
PN26	27/01/15	1822	06/05/15	1147
PN27	27/01/15	825	06/05/15	816
PN28	29/01/15	1946	06/05/15	1834
PN29	29/01/15	2593	06/05/15	2619
PN30	29/01/15	2085	06/05/15	2122
PN31	29/01/15	1505	06/05/15	1380
PN32	29/01/15	1325		NON MISURATA

**TABELLA 7.7: Valori di conducibilità elettrica misurati nei vari pozzi durante le due campagne. Per i pozzi profondi PN1 e PN2 il numero riportato a fianco indica la profondità di campionamento.**

L'elaborazione dei dati, eseguita con il metodo d'interpolazione *Kriging* (utilizzando il programma Surfer della Golden Software) e successivamente rivisitata criticamente, ha portato alla creazione di un *grid* contenente le informazioni spaziali (X ed Y) con associato il valore Z di conducibilità elettrica ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ).

La realizzazione di tali mappe ha permesso di osservare le relazioni spaziali tra i



Dalla mappa si può osservare la presenza di una zona a conducibilità elettrica relativamente elevata nella parte orientale dell'isola, che passa gradualmente verso ovest a zone a minore conducibilità, con valori più bassi verso il centro dell'isola. Valori di conducibilità elettrica oltre i 1.000  $\mu\text{s}/\text{cm}$  sono peraltro comuni a gran parte delle acque sotterranee dell'isola.

Come si può osservare anche in tabella 7.7, i valori di conducibilità elevati corrispondono ai pozzi PN22, PN17 e PN20, che presentano anche livelli piezometrici mediamente al di sotto del livello del mare, come si può notare delle isopieze.

La conducibilità elettrica della sorgente, situata nel Golfo della Botte, ha valori simili a quelli dei pozzi superficiali che si trovano nella parte centrale dell'isola. Tale evidenza è naturale se si considera l'idrostruttura dell'isola; sono infatti le acque dell'acquifero freatico ad alimentare questo stillicidio.

Per quanto riguarda invece i pozzi profondi, si osserva un notevole aumento della conducibilità elettrica passando dal campione più superficiale a quello profondo per i pozzi PN1 e PN2, mentre il PN4 invece, come vedremo in seguito, non mostra una stratificazione della conducibilità elettrica, con valori intorno ai 1.000  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .

Analizzando la mappa di conducibilità del Maggio 2015 (Fig. 7.12) non si notano particolari differenze rispetto alla precedente.

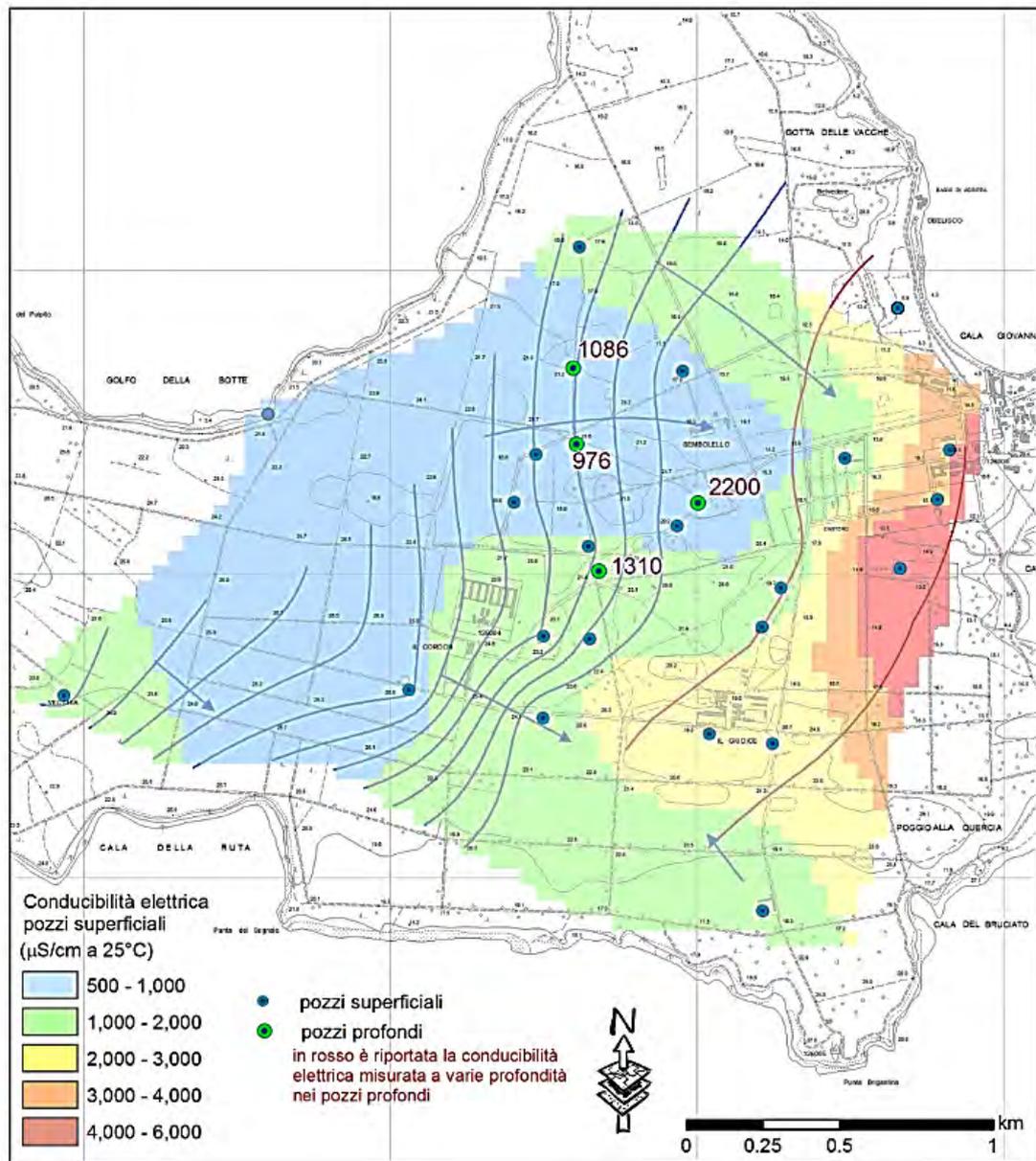


Figura 7.12: Mappa di conducibilità elettrica dell'acquifero freatico riferita al mese di Maggio 2015.

#### **7.4 LOG DI CONDUCEBILITÀ ELETTRICA E TEMPERATURA**

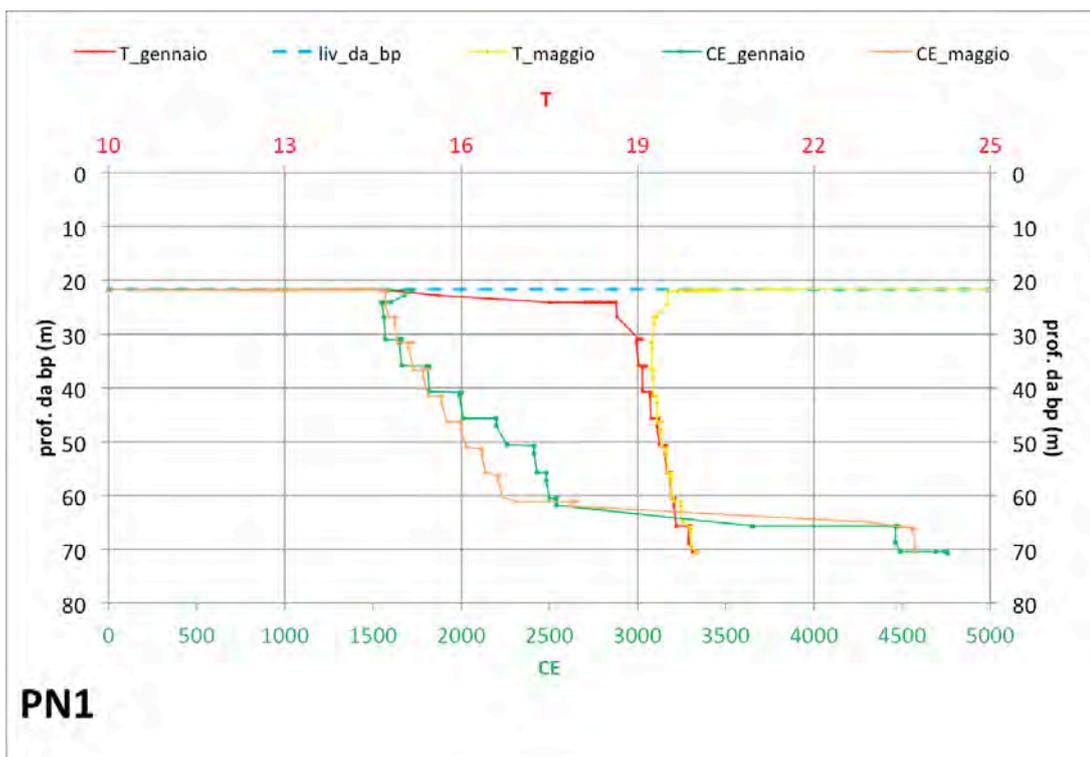
Nei pozzi profondi PN1, PN2, PN4 sono stati eseguiti, sia nella campagna di Gennaio 2015 che in quella di Maggio 2015, dei logs verticali dei seguenti parametri fisici: conducibilità elettrica e temperatura (Fig. 7.13; Fig. 7.14; Fig. 7.15). I log sono stati effettuati mentre il pozzo PN3 non era in emungimento, in modo che i pozzi risultassero in condizioni statiche. Infatti, grazie alle campagne pregresse era stato possibile osservare una probabile influenza dell'emungimento su due di questi tre pozzi, confermata poi dalla prova di emungimento.

I log mostrano la presenza di stratificazioni della acque, relativamente alla conducibilità elettrica, in particolare per i pozzi PN1 e PN2.

Come si può osservare dai grafici, tutti e tre i pozzi, non mostrano importanti variazioni stagionali. I grafici sono stati realizzati in modo da poter osservare la variazione dei parametri in funzione della profondità del pozzo. Inoltre, la conducibilità elettrica e la temperatura sono state riferite per tutti i grafici alla medesima scala, in modo che essi risultino tra loro perfettamente confrontabili.

In figura 7.13 sono riportate le variazioni di conducibilità elettrica e temperatura per il PN1. Dall'andamento della conducibilità elettrica, si può osservare la presenza di acque a diversa salinità con un aumento che si verifica a partire dai 60 m circa. In particolare, quello che si può osservare è la presenza sostanzialmente di due livelli con conducibilità elettrica differente: un primo livello (da 20-60 m), dove si osserva un graduale aumento della conducibilità elettrica andando in profondità (con valori che da 1.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  passano a circa 2.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ); passa poi ad un secondo livello dove si verifica un netto aumento di conducibilità elettrica fino a valori di circa 4.500 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Per quanto riguarda invece, la temperatura non si notano significative variazioni.

Vista questa stratificazione è stato deciso anche di prelevare due campioni a profondità differente (35 m e 67 m) per le analisi di laboratorio.



**Figura 7.13: LOG dei parametri fisici per il pozzo PN1.**

Per quanto riguarda il PN2 (Fig.7.14), si possono sostanzialmente fare le medesime osservazioni. Si nota ancora la presenza di due livelli con diversi valori dei parametri fisici. Il primo (20-60 m) con una conducibilità, che diversamente dal PN1, rimane costante con la profondità; quindi si riscontra un significativo aumento della conducibilità elettrica, da circa 1.100 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) a un valore di circa 2.700 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). La temperatura mostra alla stessa profondità (>60 m) un leggero aumento, passando da 18,7° a 20,7°.

Inoltre, si può osservare una variazione della profondità della fascia di transizione tra le acqua a diversa conducibilità elettrica nella campagna di maggio; infatti, questa fascia si trova ad una profondità leggermente maggiore (circa 3 m).

Come per il pozzo PN1, è stato scelto in fase di campionamento di effettuare due a profondità differente (40 m e 60 m).

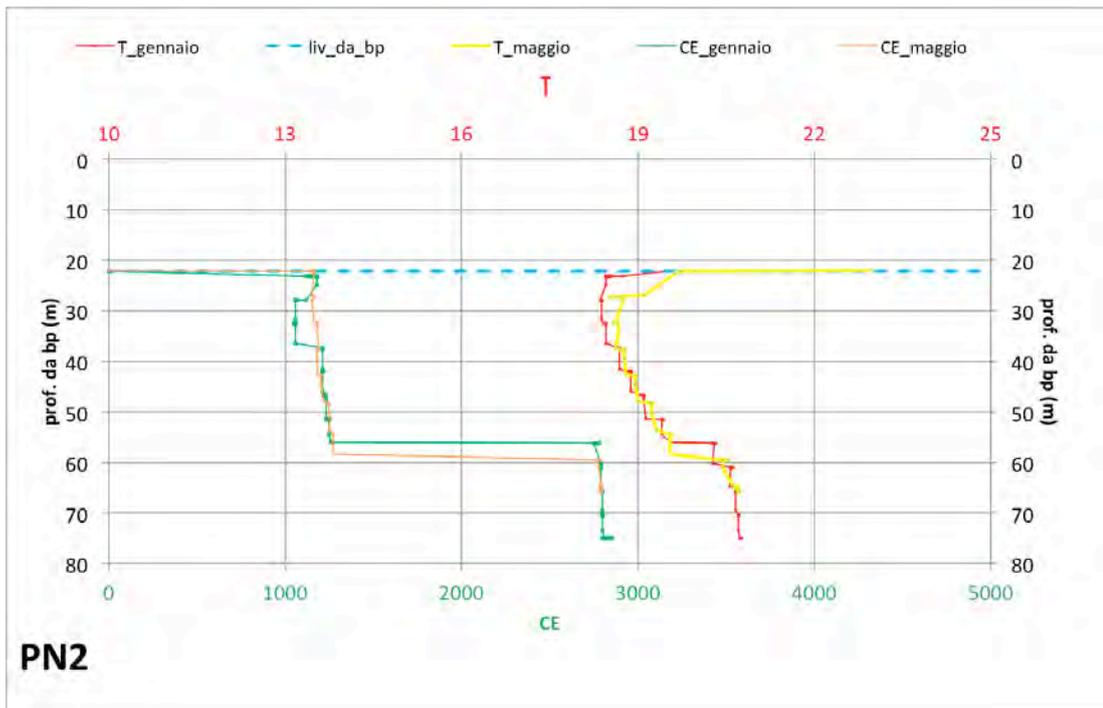


Figura 7.14: LOG dei parametri fisici per il pozzo PN2.

Infine in figura 7.15 si può osservare l'andamento della conducibilità e della temperatura con la profondità per il pozzo PN4. Rispetto agli altri due punti d'acqua, questo non mostra nessun tipo di variazione dei parametri, i quali rimangono costanti per tutto il tratto indagato, escludendo variazioni dei parametri fisici con la profondità.

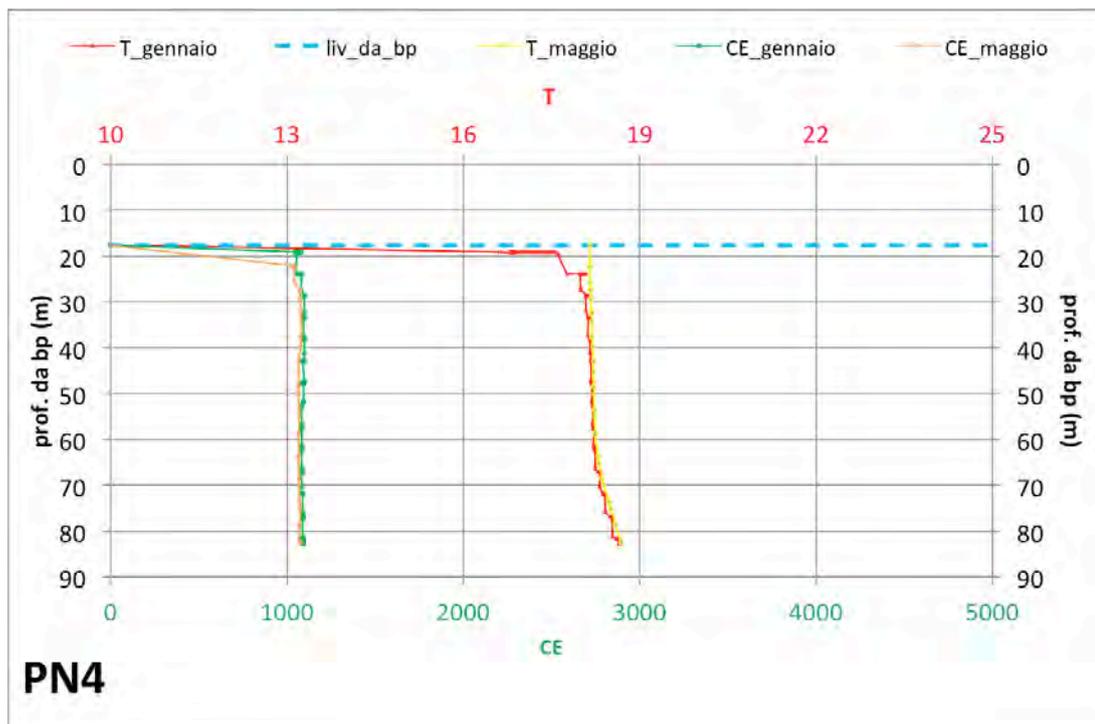


Figura 7.15: LOG dei parametri fisici per il pozzo PN4.

## 7.5 CRONOGRAMMI

Sull'isola, come già ripetutamente detto, alcuni punti d'acqua della rete di monitoraggio sono stati dotati di sonde multiparametriche per il monitoraggio in continuo dei livelli piezometrici, della conducibilità elettrica e della temperatura. L'elaborazione dei dati raccolti ha permesso di realizzare per ognuno dei punti d'acqua cronogrammi rappresentativi dell'andamento nel tempo dei suddetti parametri. In questo capitolo, non verranno riportati tutti quelli realizzati, ma solo quelli più rappresentativi del sistema acquifero in studio; i restanti sono riportati in appendice (Allegato V).

I pozzi presi in considerazione sono i profondi PN1, PN2 e PN4 e i superficiali PN12, PN17 e PN22. Di questi pozzi 4 si trovano vicini al pozzo principale PN3 (PN1, PN2, PN4 e PN12) mentre i restanti due si trovano sulla costa orientale; la loro scelta dipende dalla volontà di capire quali di questi pozzi risultino influenzati dall'emungimento del pozzo PN3.

Nei cronogrammi che seguono sono riportati con linee continue i valori di livello piezometrico (in blu), temperatura (in rosso) e conducibilità elettrica (in verde) misurati in continuo della sonde multiparametriche (linee continue), unitamente ai valori misurati con misuratori portatili (pHmetro e conducimetro) durante i campionamenti effettuati (cerchi), nonché il valore misurato durante l'esecuzione dei log alla profondità dell'installazione del *diver* (croci). Inoltre, su alcuni cronogrammi sono stati riportati i periodi di attività del pozzo PN3 (tratti discontinui neri) per verificare l'influenza dell'emungimento sulle variazioni del livello piezometrico; questo aspetto verrà trattato in maniera più approfondita nel capitolo 7.6, dove viene elaborata la prova di emungimento.

In tabella 7.8 si riportano le date in cui il pozzo PN3 è stato messo in emungimento. Tali periodi sono stati gentilmente forniti dalle guardie penitenziarie, essi non ricoprono però tutto l'arco temporale considerato, in quanto soltanto da gennaio gli è stato chiesto di annotarli.

			<b>ORE DI ACCENSIONE/SPEGNIMENTO (h)</b>
<b>ACCESO</b>	07-02-2015 ore 7,20	11-02-2015 ore 10,30	99
<b>SPENTO</b>	11-02-2015 ore 10,30	17-02-2015 ore 9,30	143
<b>ACCESO</b>	17-02-2015 ore 9,30	22-02-2015 ore 7,30	118
<b>SPENTO</b>	22-02-2015 ore 7,30	27-02-2015 ore 12,30	125
<b>ACCESO</b>	27-02-2015 ore 12,30	02-03-2015 ore 16,00	75
<b>SPENTO</b>	02-03-2015 ore 16,00	07-03-2015 ore 7,30	111
<b>ACCESO</b>	07-03-2015 ore 7,30	09-03-2015 ore 7,10	48
<b>SPENTO</b>	09-03-2015 ore 7,10	13-03-2015 ore 9,22	98
<b>ACCESO</b>	13-03-2015 ore 9,22	15-03-2015 ore 10,00	49
<b>SPENTO</b>	15-03-2015 ore 10,00	20-03-2015 ore 10,29	120
<b>ACCESO</b>	20-03-2015 ore 10,29	22-03-2015 ore 16,00	54
<b>SPENTO</b>	22-03-2015 ore 16,00	28-03-2015 ore 16,43	145
<b>ACCESO</b>	28-03-2015 ore 16,43	31-03-2015 ore 8,05	56
<b>SPENTO</b>	31-03-2015 ore 8,05	06-04-2015 ore 16,05	152
<b>ACCESO</b>	06-04-2015 ore 16,05	10-04-2015 ore 23,50	108
<b>SPENTO</b>	10-04-2015 ore 23,50	16-04-2015 ore 17,10	127
<b>ACCESO</b>	16-04-2015 ore 17,10	24-04-2015 ore 7,50	177
<b>SPENTO</b>	24-04-2015 ore 7,50	01-05-2015 ore 7,10	144
<b>ACCESO</b>	01-05-2015 ore 7,10	02-05-2015 ore 9,15	26

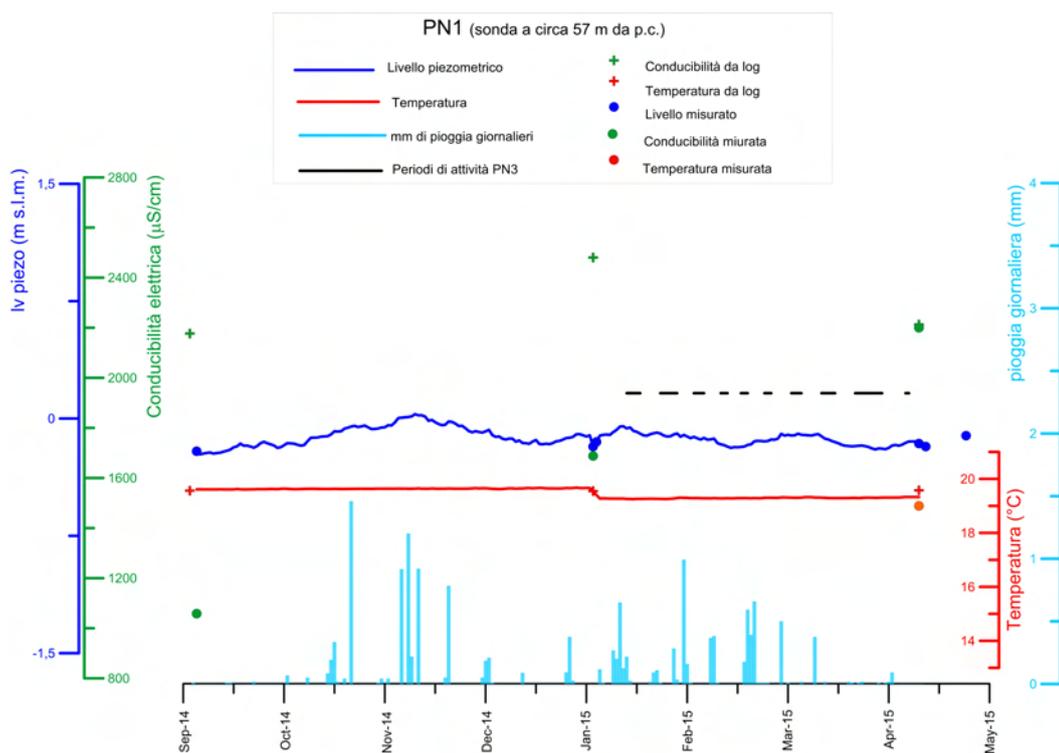
**TABELLA 7.8: Data e ora di accensione e spegnimento del pozzo PN3.**

Per valutare poi il legame tra le variazioni del livello piezometrico e le piogge, nei cronogrammi sono stati inseriti i valori di pioggia giornalieri, forniti dall'IBIMET-CNR.

I dati elaborati vanno dal 1 Ottobre 2014, data di installazione del *diver* al 6 Maggio 2015.

*PN1 (profondità sonda 57 m circa, monitoraggio livello acquifero profondo)*

In figura 7.16 si riporta il cronogramma riferito al pozzo PN1, dove si può osservare l'andamento nel periodo monitorato (Ottobre 2014 – Maggio 2015) del livello piezometrico e della temperatura. Il pozzo in un primo momento era stato dotato di una sonda che effettuava anche misure di conducibilità elettrica, ma a Gennaio 2015 sono stati riscontrati dei problemi di funzionamento della sonda, verosimilmente dovuti alla eccessiva presenza di particellato sospeso nel pozzo.



**Figura 7.16: Cronogramma pozzo PN1**

Nel cronogramma si può osservare come il livello piezometrico del pozzo PN1 mostri delle oscillazioni; in particolare si possono osservare sia variazioni a scala minore, che caratterizzano tutto il periodo monitorato, sia variazioni più importanti di circa 15-20 cm. In particolare, si osservano massimi relativi nei periodi di Novembre-Dicembre 2014 (21 novembre-12 dicembre), Gennaio-Febbraio (23 gennaio- 5 febbraio) e Marzo (25 marzo- 4 aprile) 2015 e minimi in Gennaio (7 gennaio) in Marzo (8 marzo) e in Aprile (9 aprile) 2015.

Le variazioni osservate non possono essere imputate all'attività di questo pozzo, in quanto inattivo dai primi anni 2000. Per questo motivo, si è cercato di spiegare tali oscillazioni considerando sia le precipitazioni registrate sull'isola, che i periodi di emungimento del pozzo PN3. Se si considerano i valori delle precipitazioni ed i periodi in cui il pozzo PN3 era in attività, si possono ipotizzare dei legami con la variazione del livello piezometrico nel PN1:

- l'innalzamento piezometrico che si registra tra Novembre e Dicembre 2014 corrisponde ad un periodo di significative precipitazioni (50 mm a

- novembre e 127 mm a dicembre). Non essendo disponibili dati sull'attività del pozzo, non si possono fare grandi valutazioni in merito, se non ipotizzare la scarsità di fabbisogno idrico in tale periodo, dovuta alla presenza dei soli detenuti e all'inattività del ristoro e dell'albergo presenti;
- l'innalzamento piezometrico, anche se meno marcato, che si registra tra Gennaio e Febbraio 2015 corrisponde anch'esso ad un periodo di abbondanti precipitazioni (febbraio risulta infatti il mese più piovoso dopo marzo con 134,2 mm);
  - i 13 giorni di emungimento (inizio metà e fine febbraio) del pozzo PN3 potrebbero essere la causa del progressivo *trend* di abbassamento del livello piezometrico che si verifica da metà febbraio fino ai primi di Marzo 2015;
  - l'innalzamento piezometrico che si verifica nel mese di Marzo 2015, corrisponde al mese più piovoso di tutto il periodo preso in considerazione (163,5 mm). Durante tale periodo l'attività del pozzo PN3 è stata di circa 9 giorni. In tale periodo non si riscontrano evidenti abbassamenti del livello piezometrico;
  - la depressione piezometrica che caratterizza quasi interamente il mese di Aprile 2015 può essere legata ad un significativo sfruttamento della risorsa (11 giorni di emungimento) ma soprattutto alle scarse precipitazioni (12,8 mm).

Inoltre, se si osservano i dati di precipitazione giornaliera si può osservare che nei tre periodi indicati (Novembre-Dicembre 2014, Gennaio-Febbraio 2015 e Marzo 2015) si ha una certa corrispondenza tra le piogge e gli innalzamenti del livello piezometrico.

Per quanto riguarda le oscillazioni a più piccola scala, esse si verificano con cadenza regolare ed attualmente non se ne conosce però il motivo. Lo stesso fenomeno è stato riscontrato in quasi tutti i pozzi monitorati.

Infine, per quanto riguarda la temperatura non si notano variazioni rimanendo pressoché costante per tutto il periodo considerato.

PN2 (profondità sonda 50 m circa, monitoraggio livello acquifero profondo)

In figura 7.17 si riporta il cronogramma del pozzo PN2, dove oltre all'andamento del livello piezometrico e della temperatura si può osservare quello della conducibilità elettrica.

Il livello piezometrico del pozzo PN2 mostra nel periodo Ottobre 2014-Gennaio 2015 un sostanziale *trend* d'innalzamento, con tendenza a stabilizzarsi. Anche per quanto riguarda il PN2 si possono riscontrare piccole oscillazioni del livello piezometrico, che caratterizzano tutto il periodo monitorato.

Per l'intero periodo sono inoltre osservabili delle depressioni del livello piezometrico più marcate rispetto alla continua oscillazione; due di queste si collocano in corrispondenza di un brusco innalzamento della conducibilità elettrica e della temperatura.

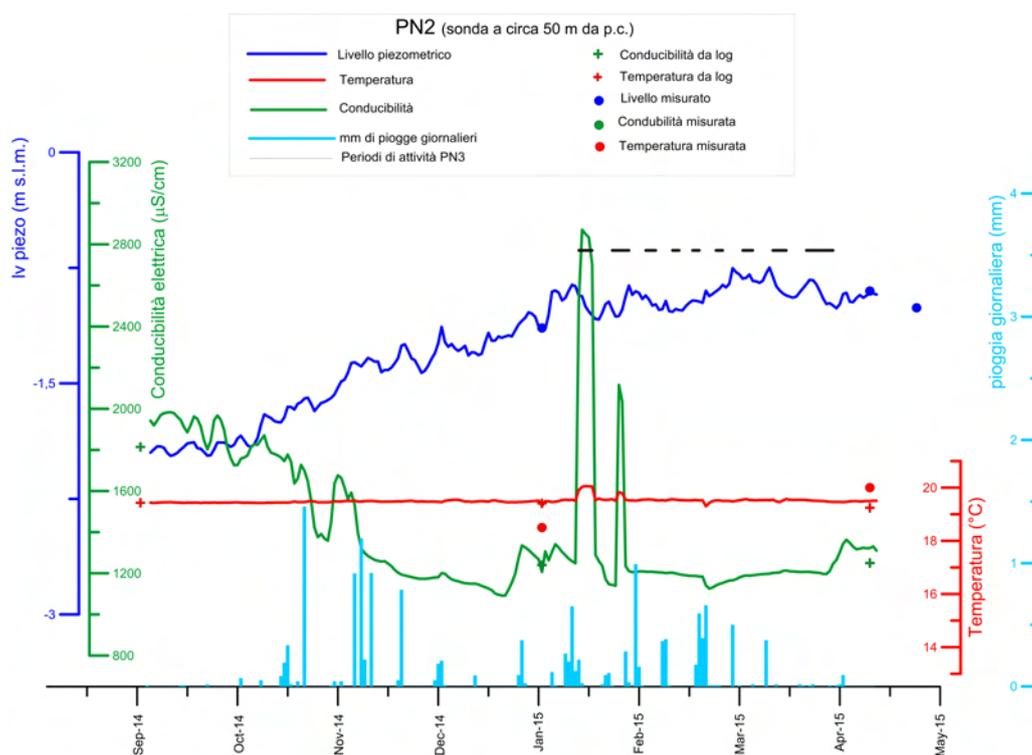


Figura 7.17: Cronogramma pozzo PN2.

Se si considerano i periodi di emungimento riportati sul cronogramma si può notare una corrispondenza tra le depressioni piezometriche e l'attività del pozzo PN3.

In particolare, nel dettaglio si può notare come nei periodi di attività del pozzo PN3 si verificano depressioni del livello piezometrico, mentre nei periodi di inattività il livello tende a risalire. Inoltre, si può notare come la risposta del livello piezometrico all'emungimento non avvenga esattamente in corrispondenza all'accensione del pozzo, ma con un certo ritardo; tale aspetto verrà analizzato nel capitolo successivo.

Non pare riscontrarsi invece un significativo collegamento con le precipitazioni giornaliere. Ciò può essere legato in realtà solo ad un effetto del tempo di risposta dell'acquifero. Infatti, si può notare come il *trend* d'innalzamento, che caratterizza il periodo settembre-gennaio, possa essere legato alle importanti precipitazioni che hanno interessato l'isola nei mesi di novembre e di dicembre (177,9 mm totali di pioggia).

Per quanto riguarda la temperatura, anche per il pozzo PN2 non si riscontrano particolari variazioni, se non in corrispondenza dei due picchi di conducibilità elettrica. In particolare, per quanto riguarda quest'ultima, si può osservare un'ampia variabilità da Settembre 2014 a Gennaio 2015, dopodiché si verifica una certa stabilizzazione del parametro, eccetto per la presenza di due picchi in febbraio.

Dall'elaborazione dei log chimico-fisici riportati precedentemente è stata riscontrata una stratificazione del pozzo PN2 di conducibilità elettrica, temperatura e chimismo. La variabilità nel periodo monitorato della conducibilità elettrica, a volte associata anche a variazioni della temperatura, può essere dovuto semplicemente a variazioni della stratificazione in termini di profondità, probabilmente dovute sia a variazioni stagionali ma anche al richiamo di acqua più profonda ad opera dell'emungimento del pozzo PN3.

PN4 (profondità sonda 61 m circa, monitoraggio livello acquifero profondo)

In figura 7.18 si riporta il cronogramma del pozzo PN4.

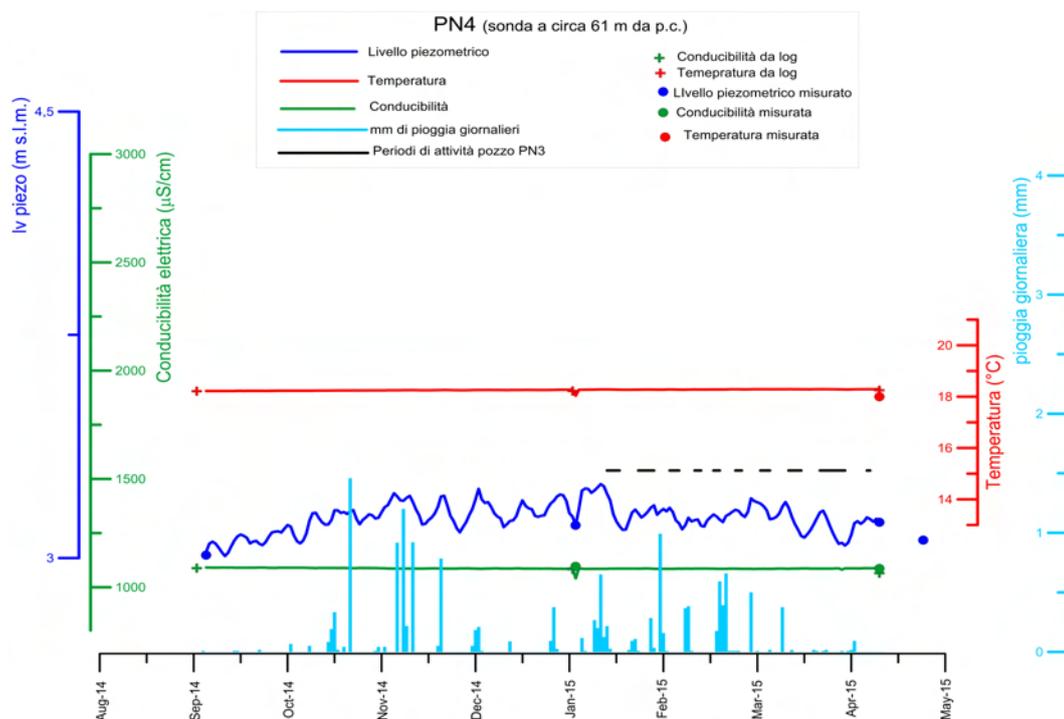


Figura 7.18: Cronogramma pozzo PN4.

Rispetto agli altri due pozzi profondi (PN1 e PN2), il PN4 non mostra sostanziali variazioni dei parametri considerati, nonostante il livello piezometrico mostri delle oscillazioni che caratterizzano l'intero periodo monitorato.

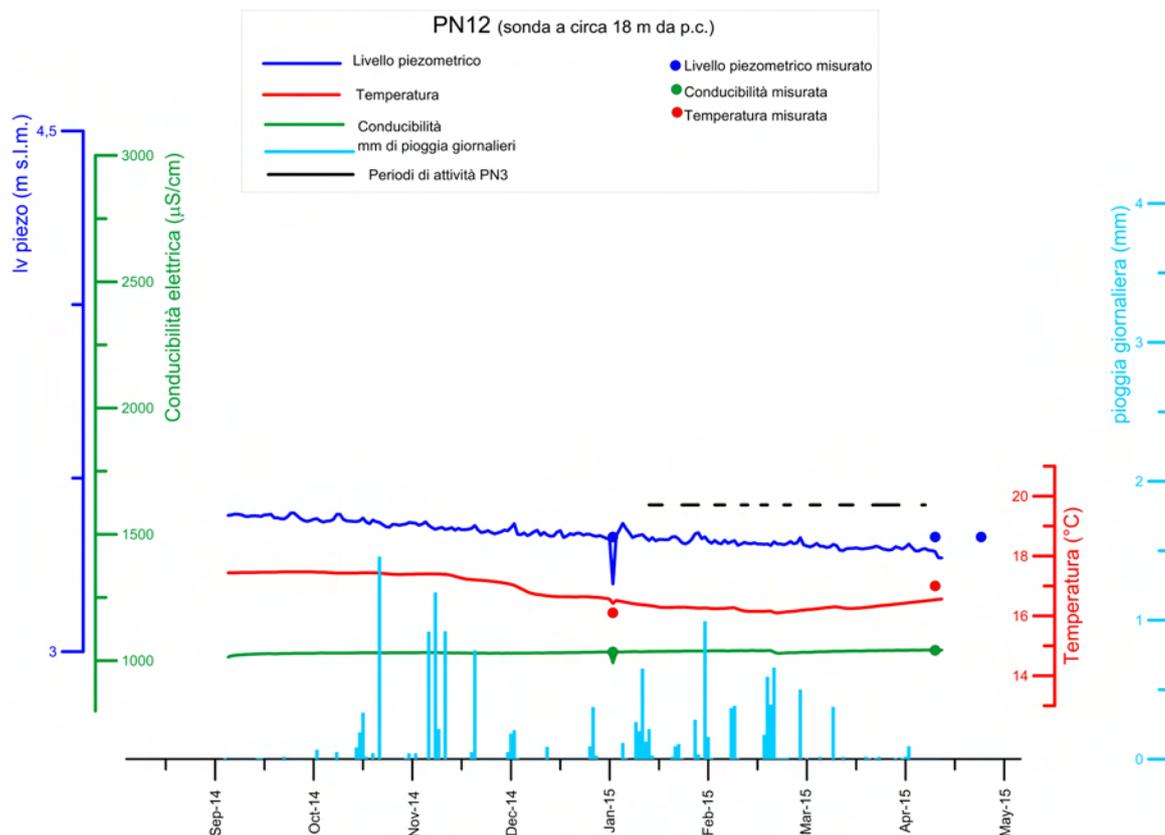
Se si osservano i periodi di emungimento, si può notare una corrispondenza tra questi e le depressioni più marcate presenti nel cronogramma. È da ricordare, come già osservato nelle piezometrie, che il PN4 presenta un livello piezometrico al di sopra del livello del mare, mentre gli altri due pozzi profondi, ed in particolare il PN2 che sembra essere influenzato dall'emungimento del pozzo PN3, hanno livello piezometrico al di sotto del livello del mare.

Infine, se si considerano i dati di pioggia giornaliera, ma anche i cumulativi, non si riscontrano legami con le oscillazioni del livello piezometrico. Anche in questo caso ciò può essere legato ai tempi di risposta dell'acquifero; infatti, interessando

un livello acquifero profondo e in condizioni semi confinate-confinato, è logico supporre tempi più lunghi di ricarica del sistema.

*PN12 (profondità sonda 18 m circa, monitoraggio acquifero freatico)*

In figura 7.19 si riporta il cronogramma per il pozzo superficiale PN12.



**Figura 7.19: Cronogramma pozzo PN12.**

Come si può notare, questo pozzo non mostra sostanziali variazioni né del livello piezometrico né della conducibilità elettrica, ma il parametro che varia maggiormente è la temperatura. La variazione è comunque modesta, dell'ordine di qualche grado. Se si considera che questo è un pozzo "alla romana" di profondità moderata (circa 20 m) con una colonna d'acqua limitata (dell'ordine di poco più di un 1 m), tale variazione può essere collegata alla variazione della temperatura esterna. In tabella 7.9 si possono osservare le temperature medie mensili del periodo monitorato.

<b>mese</b>	<b>temperatura</b>
<b>ott-14</b>	20,3
<b>nov-14</b>	16,9
<b>dic-14</b>	11,9
<b>gen-15</b>	10,5
<b>feb-15</b>	9,9
<b>mar-15</b>	12,1
<b>apr-15</b>	14,3
<b>mag-15</b>	18,7
<b>giu-15</b>	23,4
<b>lug-15</b>	27,9
<b>ago-15</b>	25,9
<b>set-15</b>	22,7

**TABELLA 7.9:** Temperature medie mensili da (ottobre 2014 a settembre 2015).

Dalla tabella si può notare come la temperatura dell'aria da ottobre a febbraio sia andata diminuendo, mentre da marzo a settembre si riscontra un nuovo aumento; *trend* che corrisponde a quello della temperatura nel pozzo.

È importante sottolineare che questo pozzo si trova vicino al pozzo PN3 (circa 315 m); quindi il fatto che non presenti variazioni del livello piezometrico, durante il periodo monitorato, permette di affermare che tale pozzo non risulta influenzato dall'emungimento.

PN17 (profondità sonda 19 m circa, monitoraggio acquifero freatico)

In figura 7.20 si riporta il cronogramma del pozzo superficiale PN17, in quanto questo pozzo sembra essere influenzato dall'emungimento del pozzo PN3.

Nel cronogramma del pozzo superficiale PN17 si possono notare continue oscillazioni del livello piezometrico, che in questo caso risultano più evidenti.

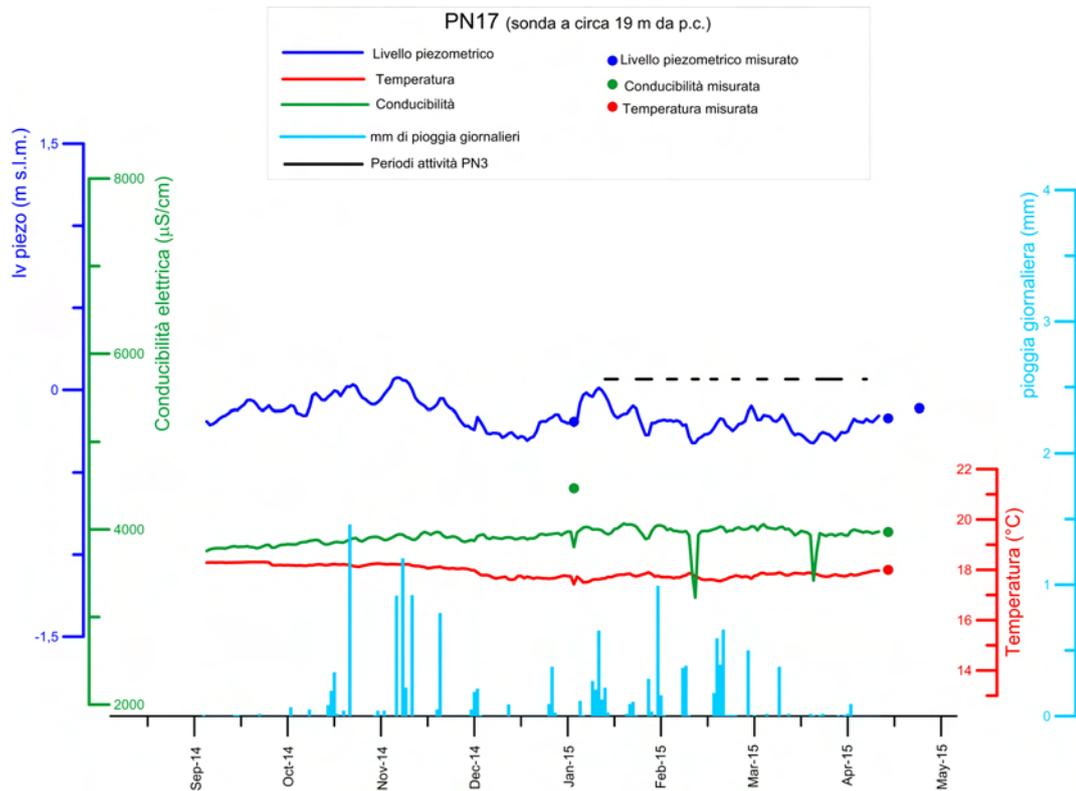
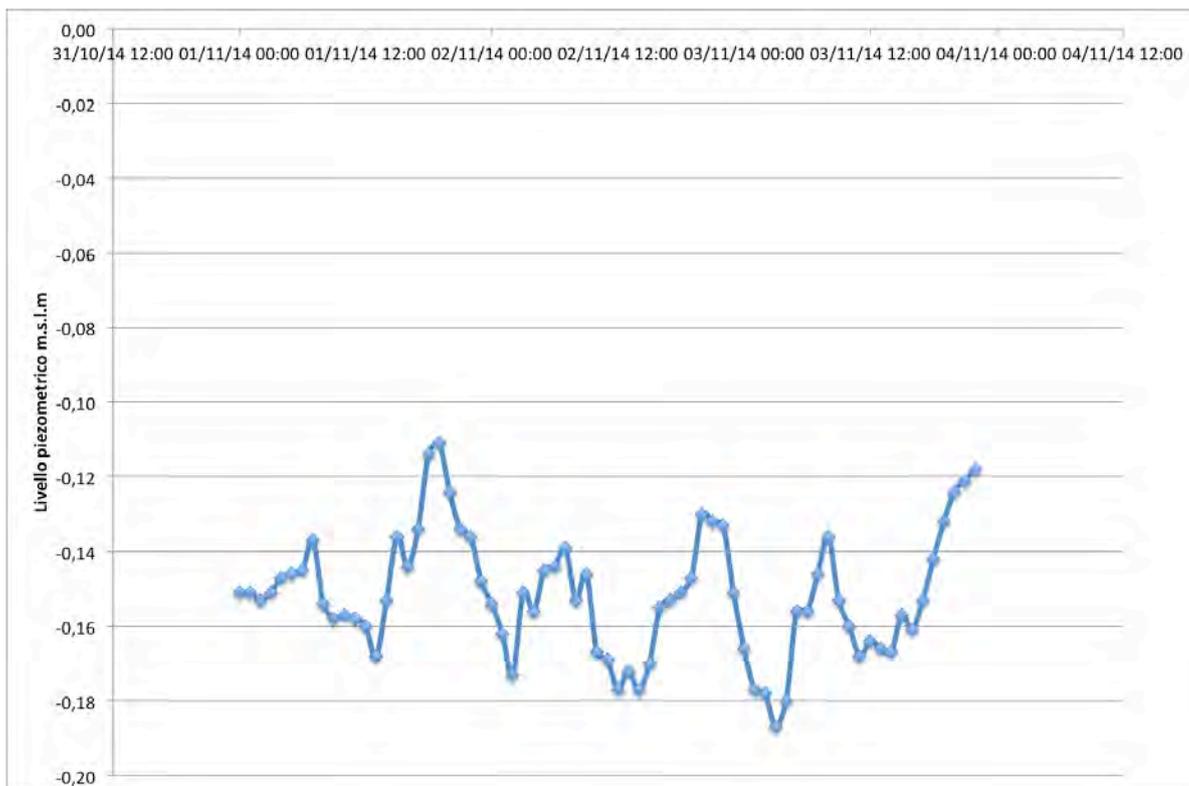


Figura 7.20: Cronogramma pozzo PN17.

Se si osservano queste oscillazioni riferite a due giorni casuali si può osservare come i picchi si verificano più o meno sempre ogni 12 ore (Fig. 7.21).



**Figura 7.21: Oscillazioni del livello piezometrico nel corso di due giorni nel pozzo PN17.**

Questa regolarità ha portato ad ipotizzare che le acque di questo pozzo, subiscano delle variazioni legate al fenomeno delle maree, tendendo anche in considerazione che il pozzo non risulta molto lontano dal mare.

Inoltre, durante la prova di emungimento effettuata sul pozzo PN3, sono state evidenziate delle piccole variazioni del livello piezometrico; e se si osservano i periodi di emungimento (Fig. 7.20) si osserva una corrispondenza tra alcune depressioni e l'attività del pozzo PN3. Non si può comunque escludere che alcune delle variazioni del livello piezometrico, presenti nel cronogramma, siano legate anche alle precipitazioni, notando una certa corrispondenza tra i due parametri. Se si considera che il pozzo PN17 interessa un acquifero freatico dotato di elevata permeabilità, si può ipotizzare che la ricarica avvenga in tempi brevi, e quindi che le precipitazioni possano indurre variazioni del livello piezometrico.

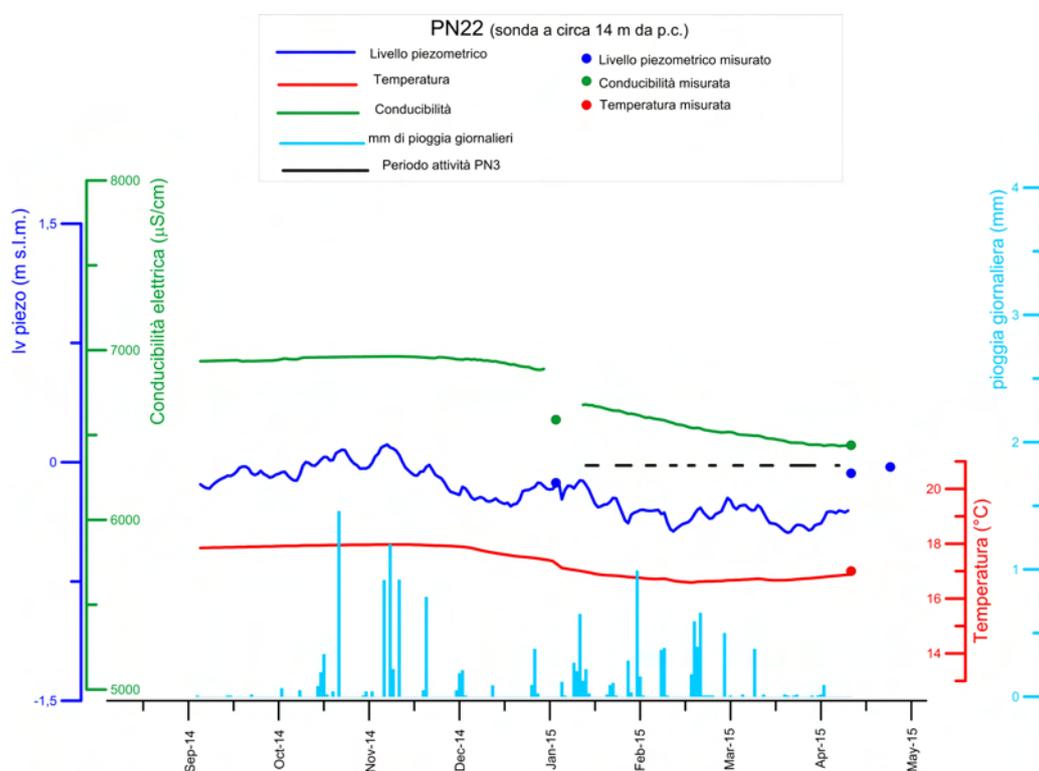
Inoltre, rispetto agli altri pozzi considerati il PN17 mostra una conducibilità elettrica più elevata (circa 4.000  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ), legata probabilmente a fenomeni di

intrusione marina. Questo aspetto verrà trattato ampiamente nelle studio geochimico-isotopico, riportato in seguito nel testo.

Nel cronogramma la conducibilità elettrica rimane pressoché costante, mentre per quanto riguarda la temperatura si notano piccole variazioni che caratterizzano tutto il periodo monitorato.

*PN22 (profondità sonda 14 m circa, monitoraggio acquifero freatico)*

In figura 7.22 si riporta il cronogramma per il pozzo superficiale PN22, in quanto anche questo pozzo sembra essere influenzato dall'emungimento del PN3.



**Figura 7.22: Cronogramma del pozzo PN22.**

Il livello piezometrico di questo pozzo mostra un andamento molto simile a quello del PN17.

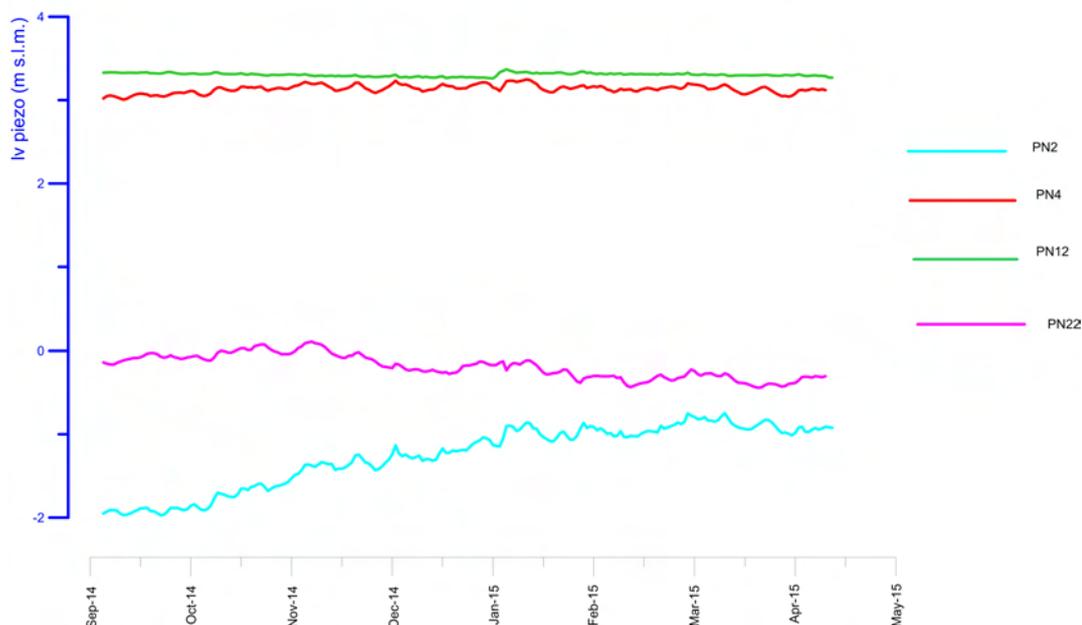
Durante la prova di emungimento sul pozzo PN3, anche per il pozzo PN22, sono state riscontrate piccole oscillazioni e per questo motivo sul cronogramma sono stati riportati i periodi di attività del pozzo PN3. In figura, si può osservare una certa corrispondenza tra i periodi di emungimento e le depressioni del livello piezometrico, che saranno prese in considerazione nell'elaborazione della prova di emungimento.

Inoltre, si riscontra anche una corrispondenza tra i picchi di pioggia giornaliera con alcuni innalzamenti del livello piezometrico. Come per il PN17, tale fenomeno può essere legato ai tempi di risposta dell'acquifero alle precipitazioni. Per quanto riguarda temperatura e conducibilità elettrica, il loro valore rimane pressoché costante per tutto il periodo monitorato. In particolare, come si osservava per il PN17, la conducibilità ha valori molto elevati di circa 7.000  $\mu\text{s}/\text{cm}$  per probabili fenomeni di intrusione marina.

In Fig. 7.23 è riportato il cronogramma con il confronto tra i livelli piezometrici dei pozzi PN1, PN4, PN12 e PN22, per i quali si può osservare quanto segue:

- gli andamenti del livello piezometrico nei pozzi PN2 e PN22 risultano molto simili; si possono infatti osservare evidenti corrispondenze tra picchi e depressioni dei due livelli piezometrici, seppur differenti in termini assoluti;
- l'andamento del livello piezometrico nel pozzo PN4 risulta molto simile a quello del PN2, seppur in modo meno marcato;
- gli andamenti del livello piezometrico del pozzo PN12 sembrano essere indipendenti rispetto ai precedenti, indicando quindi una probabile indipendenza da un punto di vista idraulico.

## Pozzi PN2, PN4, PN12 e PN22



**Figura 7.23: Cronogramma dei livelli piezometrici per i pozzi profondi PN2, PN4 e per i superficiali PN12, PN22.**

Sulla base di queste osservazioni, si può desumere che i pozzi PN2 e PN22, ma anche il PN4, risultano probabilmente in connessione idraulica. È molto probabile che su questi pozzi ci sia l'influenza dell'emungimento nel pozzo PN3, in considerazione del fatto che l'andamento delle oscillazioni sia sostanzialmente identico per i tre pozzi.

È interessante notare come il pozzo PN12, nonostante sia adiacente al PN2 e vicino al PN4 e al PN3, non sembra risentire dell'attività del pozzo PN3. Questo consente di desumere che nella zona centrale dell'isola non è presente una connessione idraulica tra l'acquifero superficiale e i livelli acquiferi profondi; tale connessione è invece probabilmente presente nella zona orientale, dove è situato il PN22.

## **7.6 PROVA D'EMUNGIMENTO**

Per una preliminare caratterizzazione idrodinamica dei livelli acquiferi profondi è stata eseguita una prova d'emungimento di lunga durata (> 72 ore) a portata costante di 2,5 l/s (portata massima della pompa) nel pozzo PN3, utilizzando gli altri pozzi profondi PN1, PN2 e PN4 e numerosi superficiali (PN8, PN12, PN14, PN17, PN18, PN19, PN22) come pozzi di controllo, alcuni dotati di sonda multiparametrica per il monitoraggio in continuo dei livelli ogni 30 s ed altri monitorati con misure discrete con freatometro. Allo spegnimento della pompa è stata monitorata anche la fase di risalita del livello di falda nei pozzi considerati. In realtà, la risalita del livello è stata solo parziale in quanto per problemi di disponibilità idrica le guardie penitenziarie sono state costrette a riattivare il pozzo a meno di 24 ore dallo spegnimento. Nonostante questo, la risalita del livello è risultata abbastanza visibile nel pozzo PN3, ma meno negli altri pozzi. Inoltre, con una certa frequenza temporale (circa una volta ogni 24 ore), durante lo svolgimento della prova sono state anche campionate le acque del pozzo PN3, per verificare eventuali variazioni del chimismo.

### **7.6.1 MONITORAGGIO IN CONTINUO PRE E POST PROVA D'EMUNGIMENTO**

Prima di discutere i metodi interpretativi utilizzati e i risultati dell'elaborazione della prova di emungimento si presentano i dati del monitoraggio in continuo del livello piezometrico per il periodo aprile-giugno, a cavallo della prova di emungimento, per avere un quadro d'insieme dell'andamento dei livelli piezometrici prima e dopo lo svolgimento della prova per alcuni pozzi monitorati. Tali cronogrammi consentono di osservare possibili evoluzioni del livello riconducibili all'emungimento del pozzo PN3. In particolare, si riportano i cronogrammi per i pozzi profondi PN1, PN2 e PN4 e per i pozzi superficiali PN12, PN18, che risultano vicini al pozzo PN3, e per il PN22, il quale si trova invece nell'estremità orientale dell'isola.

Nei cronogrammi che seguono è riportato con una linea continua l'andamento del livello piezometrico (in blu), mentre le rette verticali rappresentano l'accensione del pozzo PN3 (linee rosse) e lo spegnimento (linee verdi). Inoltre, è

stato messo in evidenza il periodo di svolgimento della prova di emungimento (linee verticali magenta).

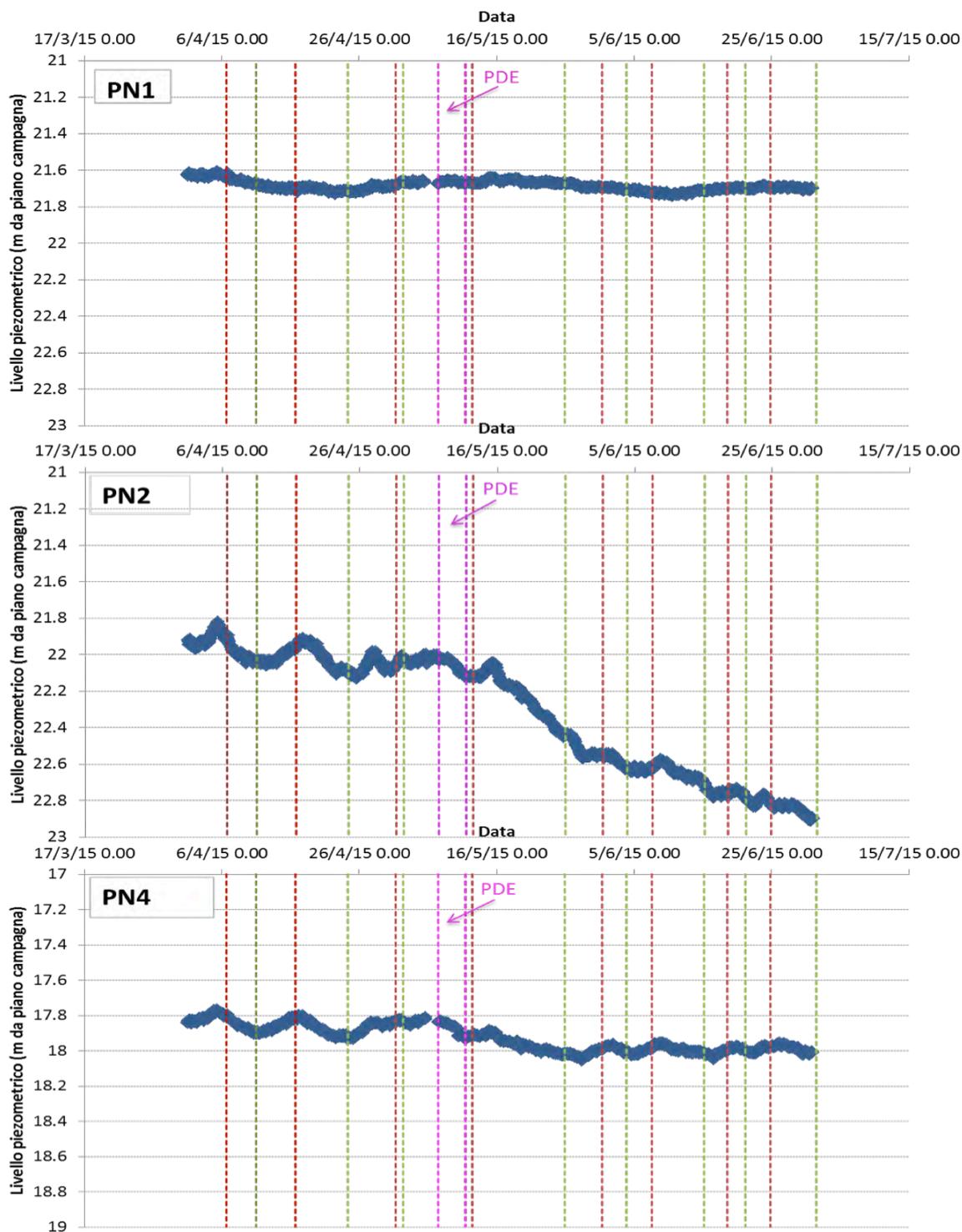


Figura 7.24: Cronogramma dei livelli piezometrici per i pozzi profondi PN1, PN2 e PN4 per il periodo pre-post prova d'emungimento (PDE). Le rette rosse indicano l'accensione del pozzo, mentre quelle blu lo spegnimento, infine le rette magenta indicano il periodo in cui è stata svolta la PDE.

In figura 7.24 si possono osservare i cronogrammi per i tre pozzi profondi presi in considerazione (PN1, PN2 e PN4). Tutti e tre questi pozzi si trovano vicino al pozzo PN3, in particolare il PN1 a circa 426 m, il PN2 a circa 613 m e il PN4 a circa 386 m. Dalla figura si può notare come il pozzo PN1 mostri nel periodo considerato un livello piezometrico mediamente costante, mentre i pozzi PN2 e PN4 mostrano invece continue oscillazioni del livello piezometrico.

In particolare se si osservano in dettaglio tali oscillazioni in funzione dei periodi di emungimento del pozzo PN3, per questi ultimi due pozzi, si può osservare come in concomitanza dell'accensione del pozzo i livelli piezometrici dei due pozzi presentino un *trend* di diminuzione e, viceversa, un *trend* di innalzamento dopo lo spegnimento. Come già osservato nel capitolo precedente, ponendo attenzione ai singoli picchi si osserva che, nonostante la differente entità, i due pozzi presentano sostanzialmente il medesimo andamento.

I pozzi superficiali PN12 e PN18 (Fig. 7.25), sebbene molto vicini al pozzo PN3, durante tutti i periodi di attività del pozzo, e quindi anche durante la prova di emungimento, non mostrano sostanziali variazioni del livello piezometrico. Al contrario, il pozzo PN22, che si trova molto distante dal pozzo PN3, mostra delle oscillazioni del livello piezometrico in concomitanza dei periodi di emungimento. Se si considera il modello idrostrutturale proposto da Raggi (1983), ciò è possibile se si suppone che il livello acquifero profondo captato dal pozzo PN3 risulti in contatto, e quindi in comunicazione idraulica, con le calcareniti permeabili sovrastanti proprio nel settore orientale, dove è situato questo pozzo.

Tenendo presente queste osservazioni, nell'elaborazione della prova di emungimento sono stati utilizzati come pozzi di controllo il pozzo PN2 e il pozzo PN4, che hanno mostrato durante tutto il periodo considerato e anche durante la prova di essere influenzati dall'emungimento del pozzo PN3. Per quanto riguarda il PN22, seppur si supponga che risenta dell'emungimento, dato anche dal fatto che presenta un livello piezometrico al di sotto del livello del mare, come osservato dalle piezometrie, è anche logico supporre che su tale pozzo ci sia la sovrapposizione degli effetti che si hanno sia nell'acquifero freatico, su cui si imposta, ma anche dell'acquifero profondo, da cui è influenzato; per questo

motivo i dati della prova non possono essere presi in considerazione perché difficilmente interpretabili.

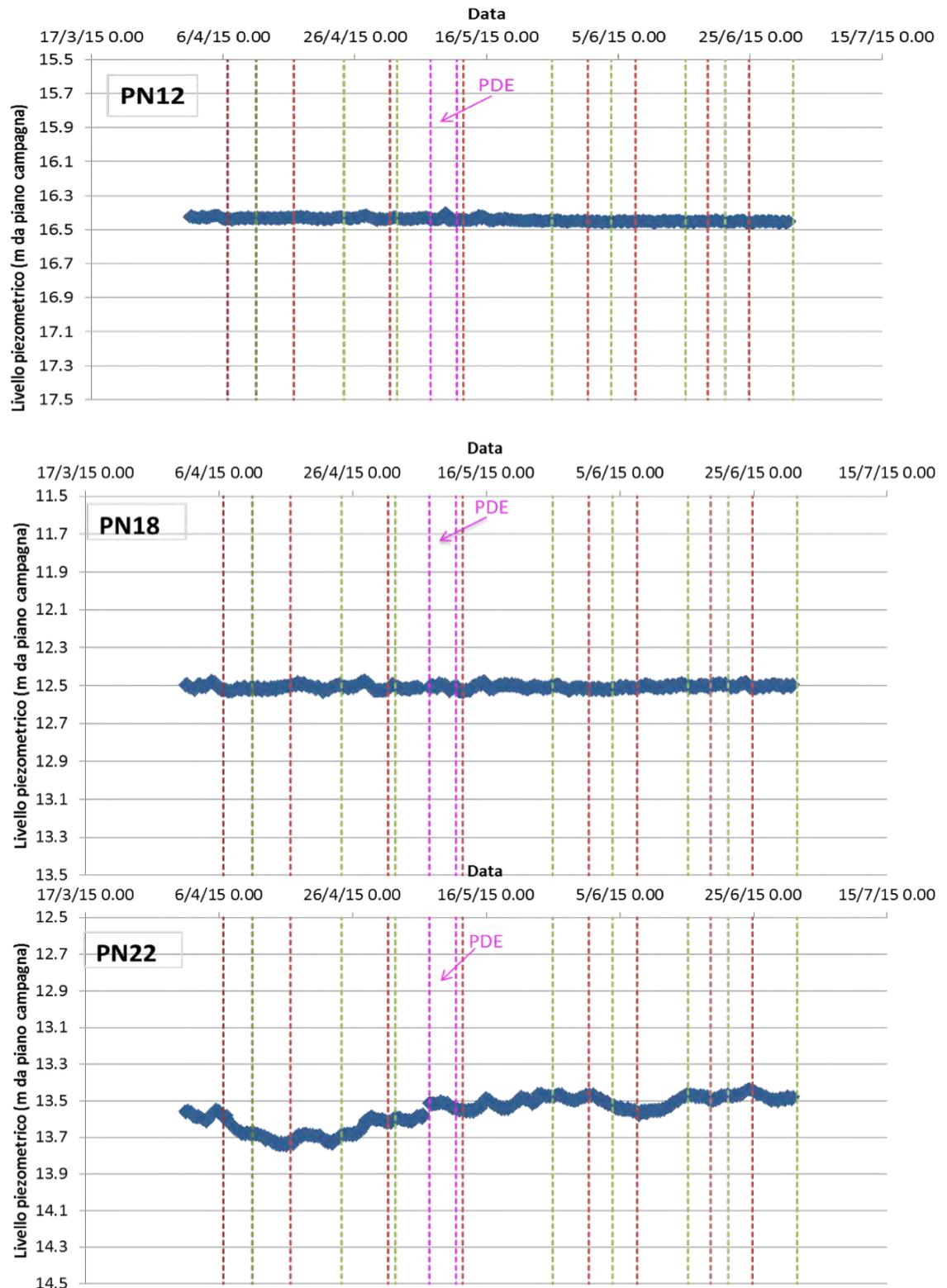


Figura 7.25: Cronogramma dei livelli piezometrici per i pozzi superficiali PN12, PN18 e PN22 per il periodo pre-post prova d'emungimento. Le rette rosse indicano l'accensione del pozzo, mentre quelle blu lo spegnimento, infine le rette magenta indicano il periodo in cui è stata svolta la PDE.

## 7.6.2 ELABORAZIONE DELLA PROVA D'EMUNGIMENTO

Il metodo d'interpretazione scelto per la determinazione dei parametri idrodinamici dell'acquifero è il metodo proposto da Theis (1935) in regime di non equilibrio, semplificato da Jacob (1946). Il regime di non equilibrio di Theis (1935) si basa sul principio che se si emunge per un dato tempo, un volume continuamente maggiore di acquifero viene coinvolto. Ciò implica che non esiste un raggio di influenza fisso, come definito da Dupuit nella teoria dell'equilibrio, ma il cono di depressione continua ad allargarsi fino ai limiti dell'acquifero. L'utilizzo di questo metodo, applicabile ad acquiferi confinati (il metodo può essere esteso anche ad acquiferi freatici se rispettate determinate condizioni), implica delle semplificazioni:

- acquifero omogeneo e isotropo;
- presenza di una falda infinita di spessore costante, compresa tra due orizzonti impermeabili e orizzontali, escludendo fenomeni di drenanza.

Queste approssimazioni fanno sì che i valori dei parametri calcolati (T, S e K) non sono da considerarsi del tutto rappresentativi dell'acquifero, in quanto in natura esso risulta eterogeneo. Infatti, tutte le formazioni geologiche sono in linea di principio eterogenee, con una marcata variabilità spaziale delle proprietà idrauliche. Nonostante queste approssimazioni gli errori che si commettono sulla stima dei parametri risultano accettabili.

L'equazione proposta da Theis (1935) per il calcolo di T ed S valida su stazioni di prova (pozzo + pozzo o piezometro di controllo) è stata semplificata da Cooper e Jacob (1946) nella seguente equazione di approssimazione logaritmica:

$$\Delta h_p = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25Tt}{r'^2 S}$$

$\Delta h_p$ : depressione piezometrica misurata nel piezometro a distanza  $r'$  dal pozzo in cui si emunge la portata Q (m);

Q: portata del pozzo ( $m^3/s$ );

T: trasmissività dell'acquifero ( $m^2/s$ );

S: coefficiente d'immagazzinamento dell'acquifero;

t: tempo di pompaggio dall'inizio della prova (s).

Questa equazione è applicabile per distanze pozzo-piezometro piccole e tempi di emungimento lunghi.

Da questa si ricavano T e S, rispettivamente:

$$T = \frac{0,183Q}{C}$$

dove con C si intende il coefficiente angolare della retta nel piano semi-logaritmico tempo di emungimento-depressione piezometrica;

$$S = \frac{2,25Tt_0}{r'^2}$$

dove con  $t_0$  si intende il prolungamento della curva fino ad incontrare l'asse del tempo (Fig. 7.26).

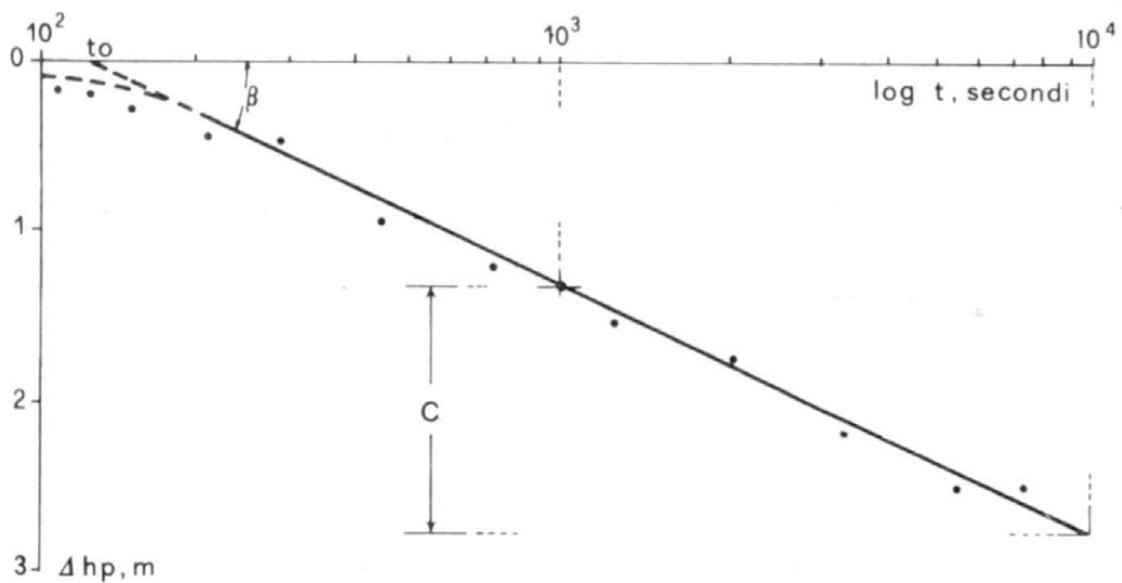


Figura 7.26: Rappresentazione grafica della relazione di Jacob (Celico, 1986).

Una volta ricavata T si può ricavare anche la permeabilità  $K = T \times e$ , se è noto lo spessore dell'acquifero (e).

La fase di risalita è stata elaborata in maniera analoga, sostituendo nel grafico al logaritmo del tempo il logaritmo di [(tempo totale prova + tempo di inizio risalita)/ tempo di inizio risalita].

Durante la prova, come detto, sono stati utilizzati come pozzi di controllo il pozzo PN2 e il PN4, i quali hanno mostrato di essere influenzati dal emungimento.

In figura 7.27 si riporta l'andamento del livello piezometrico (m da piano campagna)-tempo (s) del pozzo PN3 durante la prova di emungimento e dopo lo spegnimento.

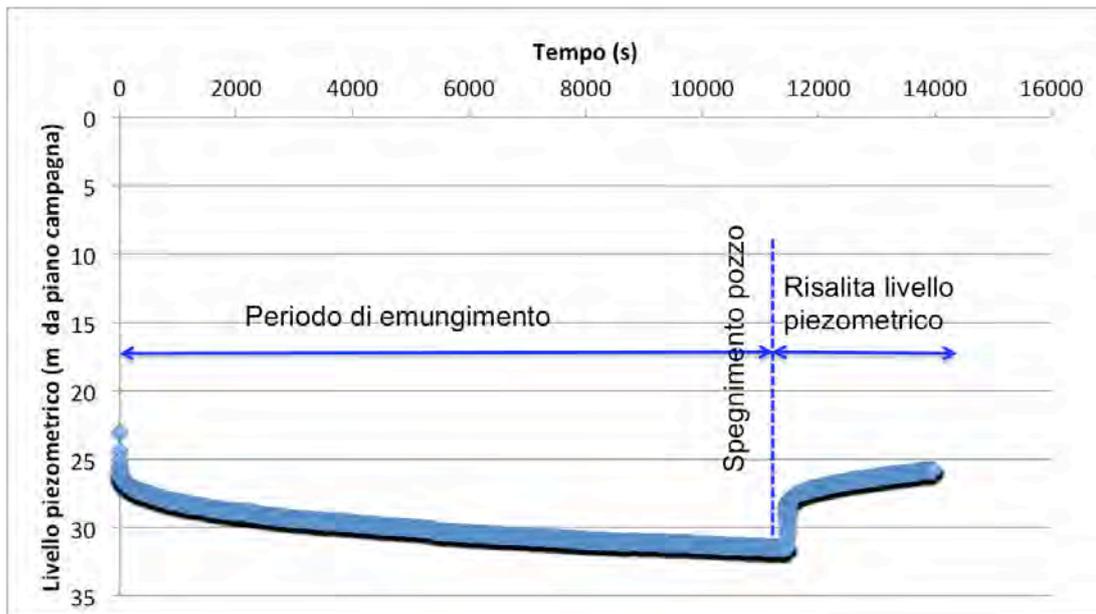


Figura 7.27: Grafico livello piezometrico-tempo della prova di emungimento.

In questo grafico si può notare come al momento dell'accensione della pompa il livello sia calato velocemente da 23,01 m, livello statico prima dell'inizio della prova, a 26,3 m; successivamente gli abbassamenti risultano più moderati e si raggiunge un livello dinamico o stabilizzato al momento dello spegnimento della pompa di 31,46 m (dopo 96 ore). Lo stesso si può notare durante la risalita, più rapida inizialmente, più lenta in prossimità del livello statico. Questo andamento è dovuto al fatto che la prova è stata condotta a portata costante e si spiega facendo riferimento alla legge di Darcy (portata= permeabilità x sezione della falda x gradiente idraulico, dove il gradiente idraulico = perdite di carico/percorso compiuto dell'acqua); infatti, se si emunge a portata costante, il livello piezometrico nel pozzo si abbassa più rapidamente all'inizio, in quanto la portata emunta è superiore a quella che il sistema falda-pozzo è in grado di fornire, e quindi inizialmente si ha un elevato gradiente idraulico; l'aumento progressivo della superficie del cono di depressione fa sì che venga richiamata più acqua inducendo così una diminuzione del gradiente idraulico, che comporta abbassamenti più lenti nel tempo. Al momento dello spegnimento della pompa, il livello risale all'inizio più rapidamente poiché la superficie del cono di depressione è grande e in grado di apportare molta acqua, poi al diminuire del gradiente idraulico sempre più lentamente. Purtroppo, a causa della riaccensione

della pompa a meno di 24 ore dallo spegnimento, il livello piezometrico non ha ancora raggiunto il livello statico misurato prima dell'inizio della prova.

Il grafico di Fig. 7.28, logaritmo del tempo-abbassamenti, viene utilizzato per il calcolo della trasmissività dalla porzione di acquifero interessata dall'emungimento del pozzo PN3.

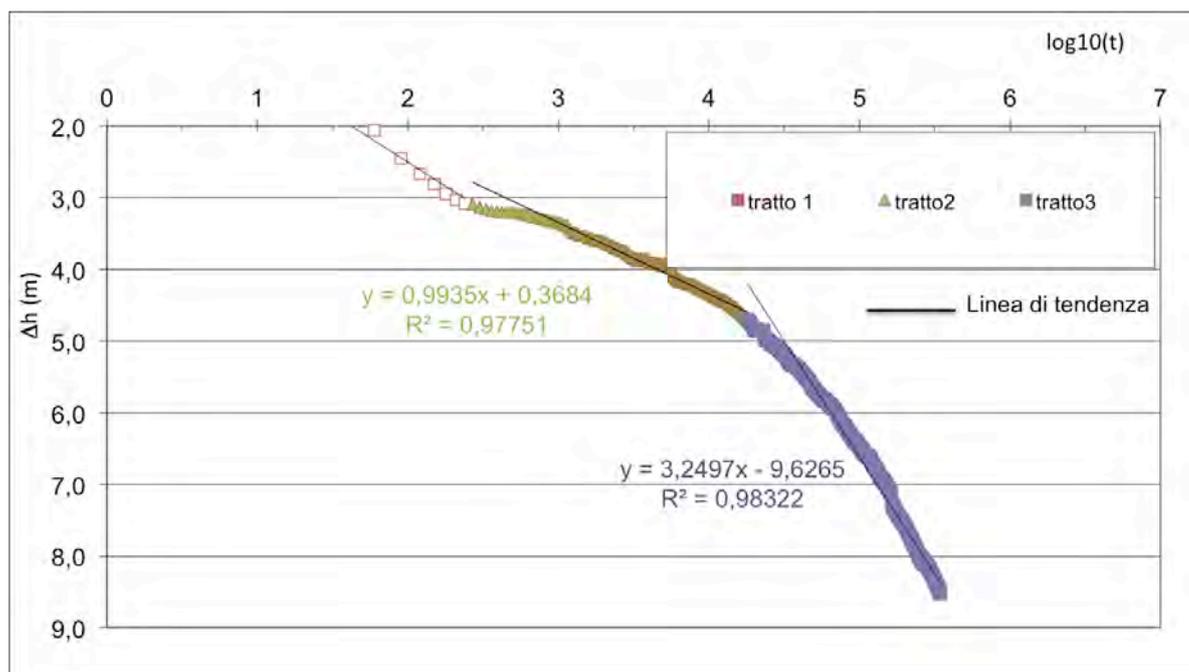


Figura 7.28: Grafico logaritmo del tempo-abbassamenti.

Dal grafico si possono individuare tre differenti gradienti di abbassamento del livello piezometrico durante la fase di emungimento. Osservando il cambiamento di pendenza della curva sono infatti riconoscibili tre differenti rette di interpolazione lineare e sono stati calcolati i rispettivi coefficienti angolari, grazie ai quali è stato possibile ricavare il valore di trasmissività ( $T = 0,183Q/C$ ) per ogni tratto in funzione della portata di emungimento utilizzata. In realtà il primo tratto non è stato preso in considerazione, in quanto probabilmente dovuto a perdite di carico nel pozzo, durante le fasi iniziali dell'emungimento. La variazione di pendenza della curva, tenendo presente che in un acquifero omogeneo e isotropo gli abbassamenti in funzione del tempo dovrebbero essere rappresentati da una retta, sono probabilmente legati alla disomogeneità dell'acquifero, caratterizzato da zone aventi differenti proprietà idrauliche

intercettate dal cono di depressione durante la prova.

Il valore di portata utilizzato nei calcoli di trasmissività è pari a 2,5 (l/s), portata massima della pompa utilizzata, durante la prova è stata misurata ripetutamente per controllare che si mantenesse costante nel tempo.

I valori di trasmissività ottenuti sono i seguenti (Tab. 7.10):

	<b>Coefficiente angolare</b>	<b>T (m<sup>2</sup>/s)</b>
<b>Tratto 2</b>	C = 0,99	T = 4,6×10 <sup>-4</sup>
<b>Tratto 3</b>	C = 3,24	T = 1,4×10 <sup>-4</sup>

**TABELLA 7.10:** Valori di trasmissività ottenuti per il pozzo PN3 con l'utilizzo della formula di Jacob.

Dai valori ottenuti si evidenzia una trasmissività medio alta.

Come già detto, una volta calcolata la trasmissività si può ricavare la permeabilità ( $K = T \times e$ ), anche in questo caso il valore è stato calcolato per ogni tratto definito nel grafico.

Considerando che, dai dati raccolti in campagna la profondità esplorata per il pozzo PN3 è di 55 m, il valore di permeabilità è stato calcolato sulla base dello spessore della prima falda confinata intercettata dal pozzo, pari a 7 m (Fig. 7.29).

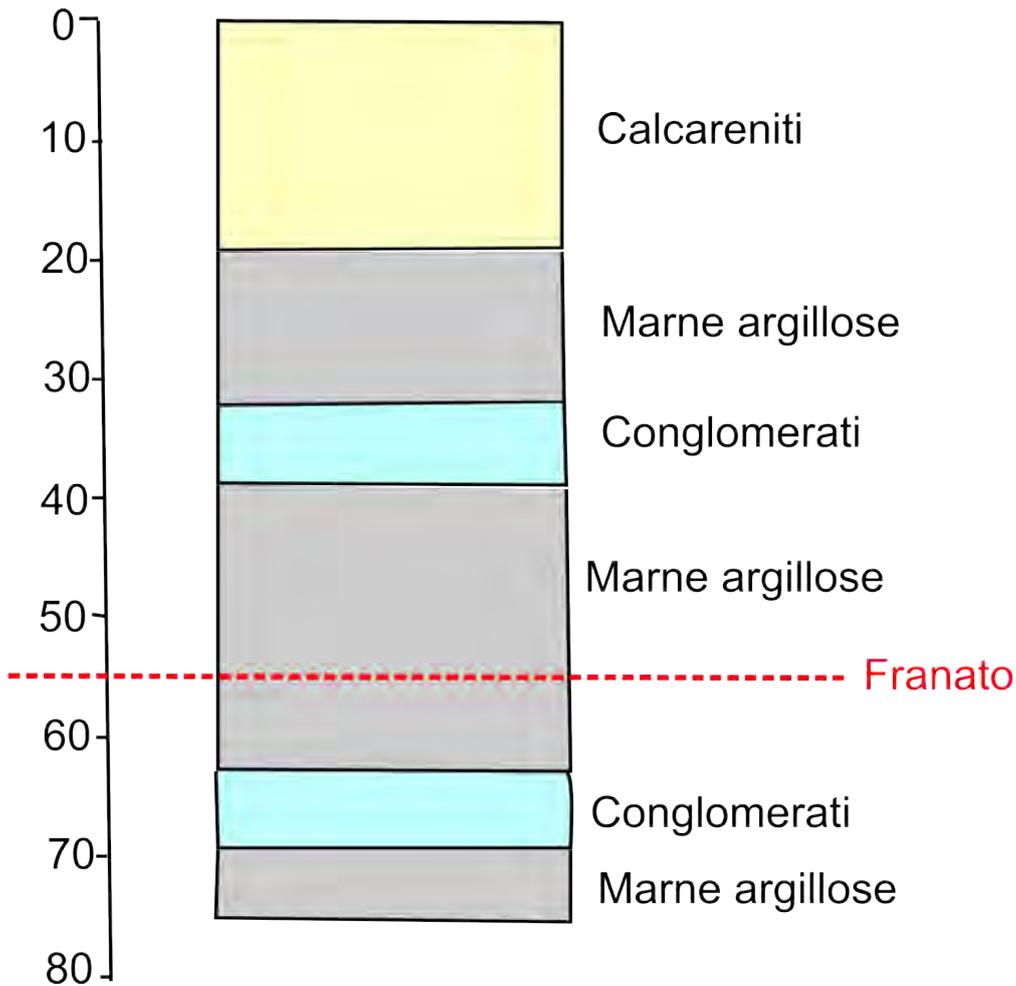


Figura 7.29: Log Stratigrafico semplificato del pozzo PN3, dove in azzurro sono riportati i potenziali acquiferi profondi, in giallo l'acquifero freatico nelle calcareniti e in grigio gli orizzonti impermeabili.

Non è stata considerata, quindi, la seconda falda, in quanto il pozzo ha subito fenomeni di collasso (Bocchini, 2013), per questo la profondità è attualmente di 55 m rispetto ai 75 iniziali.

I valori ottenuti sono riportati in tabella 7.11.

	K (m/s)
Tratto 2	$6,6 \times 10^{-5}$
Tratto 3	$2,0 \times 10^{-5}$

TABELLA 7.11: Valori di permeabilità ottenuti per il pozzo PN3 con l'utilizzo della formula di Jacob.

Osservando i valori di permeabilità ottenuti, il complesso idrogeologico risulta mediamente permeabile.

Per quanto riguarda invece i pozzi di controllo PN2 e PN4, sono stati elaborati i dati con la stessa metodologia. In particolare, nei calcoli è stato utilizzato uno spessore dell'acquifero costante, pari a 7 (spessore definito per il pozzo PN3), in

quanto le stratigrafie riportate in appendice IV non consentono, dato lo scarso dettaglio e probabilmente la disomogeneità laterali del livello acquifero di poter individuare con certezza il medesimo livello acquifero captato dal pozzo PN3; tale assunzione si può ritenere accettabile perché si suppone che gli spessori dei livelli acquiferi profondi siano costanti.

Il pozzo PN2 si trova a 613 m di distanza dal PN3 e ha registrato un abbassamento del livello piezometrico, durante lo svolgimento della prova, pari a circa 0,10 m (Fig. 7.30).

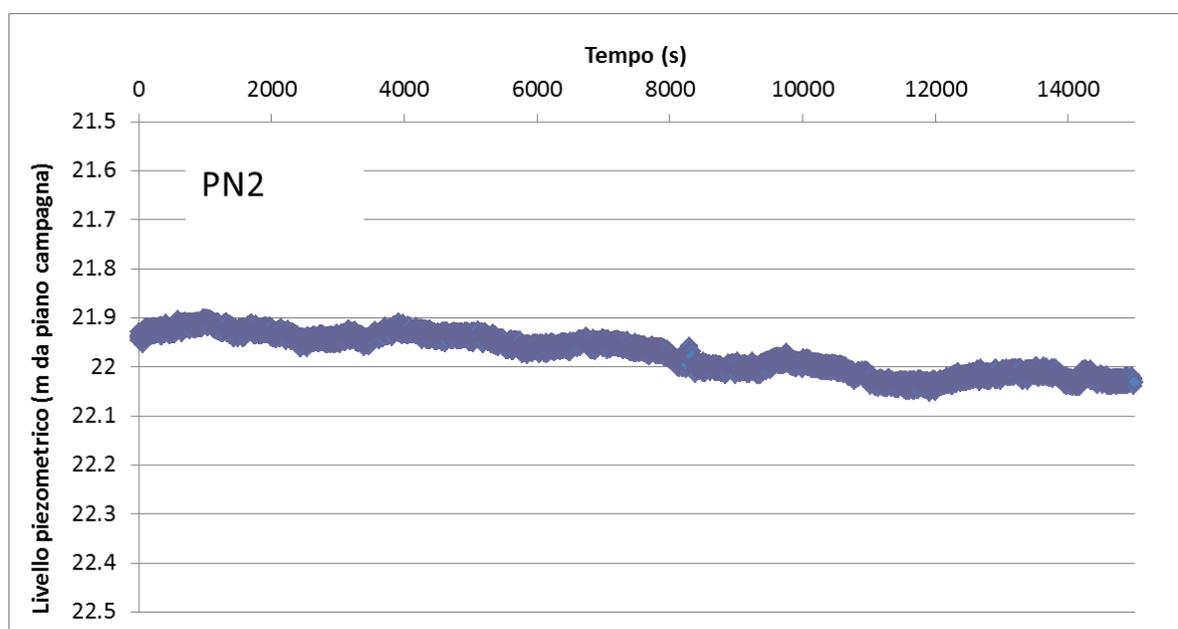


Figura 7.30: Grafico livello piezometrico-tempo della prova di emungimento per il pozzo PN2.

In figura si può osservare come al momento dell'accensione del pozzo PN3 il livello piezometrico risulti più o meno costante; dopo circa 48 ore esso inizia gradualmente ad abbassarsi. Il fatto che la risposta non avvenga nell'immediato è probabilmente legato sia alla distanza esistente tra i due pozzi, sia dalla diffusività dell'acquifero (rapporto tra la trasmissività e il coefficiente d'immagazzinamento), la quale condiziona il tempo necessario con cui si propagano le perturbazioni indotte nell'acquifero.

In figura 7.31 (grafico logaritmo del tempo-abbassamenti) si può osservare anche per il pozzo PN2 la presenza di diversi andamenti. Ciò potrebbe essere un'ulteriore conferma, in accordo con il modello definito da Raggi (1983), che tali pozzi profondi interessino lo stesso orizzonte acquifero confinato. I diversi tratti

visibili rappresenterebbero anche in questo caso delle disomogeneità del livello acquifero. Comunque, nonostante la presenza di questi diversi andamenti è stato scelto, dato il minimo abbassamento piezometrico e la distanza dal pozzo PN3, di utilizzare un'unica retta per interpolare tutti i dati.

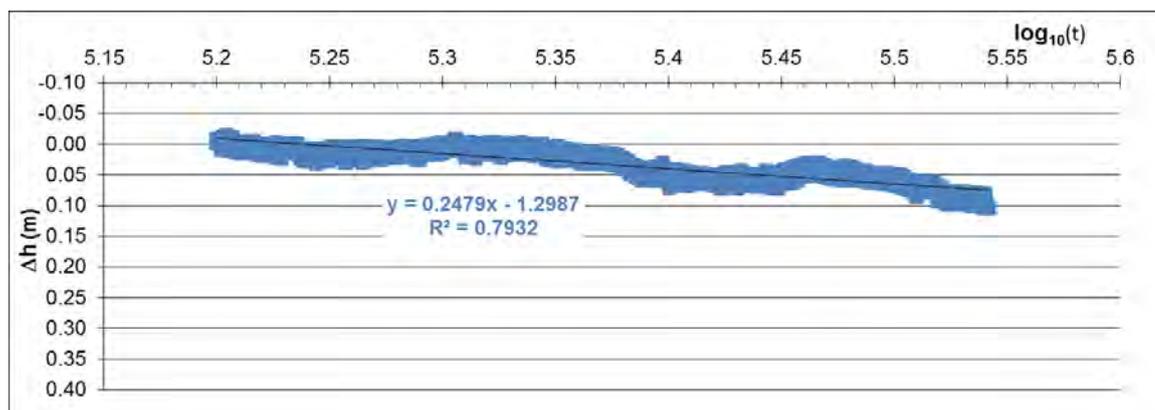


Figura 7.31: Grafico logaritmo del tempo-abbassamenti per il pozzo di controllo PN2.

I valori di trasmissività ( $T = 0,183Q/C$ ) e di permeabilità ( $K = T \times e$ ) ottenuti per il pozzo di controllo sono stati riportati nella seguente tabella (Tab. 7.12):

	Coefficiente angolare	T (m <sup>2</sup> /s)	K (m/s)
<b>Tratto 1</b>	C = 0,2479	T = 1,9×10 <sup>-3</sup>	K = 2,6×10 <sup>-4</sup>

TABELLA 7.12: Dati utilizzati per il calcolo del coefficiente di immagazzinamento relativo al PN2.

Il valore di trasmissività ottenuto per il pozzo PN2 è più elevato di quelli del PN3, indice che a parità di spessore corrisponde una permeabilità più elevata. Comunque, anche in questo caso il complesso idrogeologico risulta mediamente permeabile.

Applicando la formula di Jacob si può ricavare anche il coefficiente di immagazzinamento ( $S = 2,25Tt_0/r^2$ ).

In tabella 7.13, si riportano i dati utilizzati nel calcolo di S:

T (m <sup>2</sup> /s)	t <sup>0</sup> (log t)	r' (m)	S
1,9*10 <sup>-3</sup>	63095	613	7,0×10 <sup>-4</sup>

TABELLA 7.13: Dati utilizzati per il calcolo del coefficiente di immagazzinamento relativo al PN2.

Il valore del coefficiente di immagazzinamento ottenuto è compatibile con i

valori tipici di un acquifero confinato, che come ordine di grandezza variano da  $10^{-3}$  a  $10^{-6}$ .

Lo stesso procedimento è stato utilizzato anche per l'elaborazione dell'altro pozzo di controllo PN4. Rispetto al pozzo precedente, questo si trova a distanza minore (386 m) dal pozzo PN3. L'abbassamento del livello piezometrico registrato durante la prova di emungimento è anche in questo caso di circa 0,10 m (Fig. 7.32).

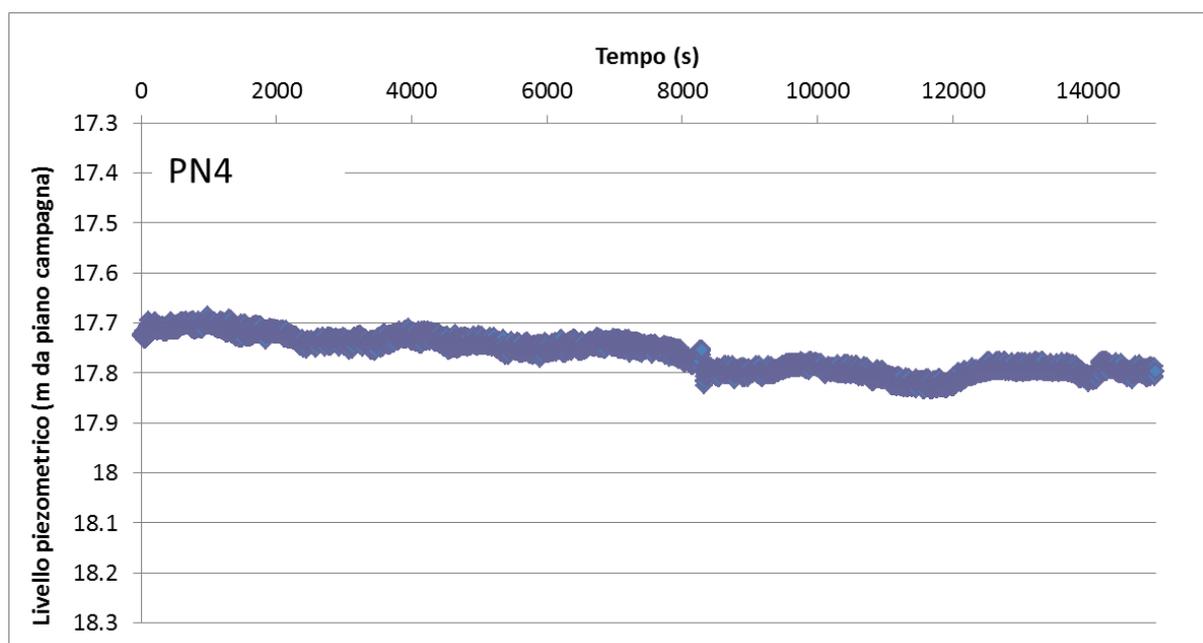


Figura 7.32: Grafico livello piezometrico-tempo della prova di emungimento per il pozzo PN4.

Anche in questo caso, si può osservare come all'accensione del pozzo PN3, non si registri immediatamente una depressione del livello piezometrico, che in questo caso avviene, sempre in maniera molto graduale, dopo circa 24 ore dall'accensione del pozzo. Il fatto che, rispetto al PN2, questo pozzo risponda in anticipo è probabilmente legato al fatto che si trova più vicino al pozzo in emungimento, e quindi con il proseguire dell'emungimento il cono di depressione che si crea intercetta prima il pozzo PN4, rispetto al PN2. Il ritardo nella risposta è probabilmente dovuto, come accennato in precedenza, alla diffusività dell'acquifero. Nei cronogrammi riportati precedentemente (Fig. 7.24), era stato osservato come le depressioni piezometriche per il pozzo PN4 risultassero di entità minore rispetto a quelle del pozzo PN2. In realtà, considerando soltanto i dati temporali della prova di emungimento,

l'abbassamento piezometrico dei due pozzi risulta il medesimo. Questo è probabilmente legato al tempo di attività del pozzo, infatti se, osservando sempre il cronogramma (Fig. 7.24), si considera il periodo successivo alla prova di emungimento, dove il pozzo PN3 è stato attivo più di una settimana, effettivamente si riconosce un andamento piezometrico molto simile, ma un'entità di variazione abbastanza differente. Questa differenza può essere sostanzialmente legata a variazioni laterali della permeabilità nell'orizzonte acquifero.

Se si riporta anche per il pozzo PN4 il grafico logaritmo del tempo-abbassamenti (Fig. 7.33), si può osservare sostanzialmente che l'andamento del livello piezometrico è molto simile a quello del PN2, con presenza di differenti andamenti.

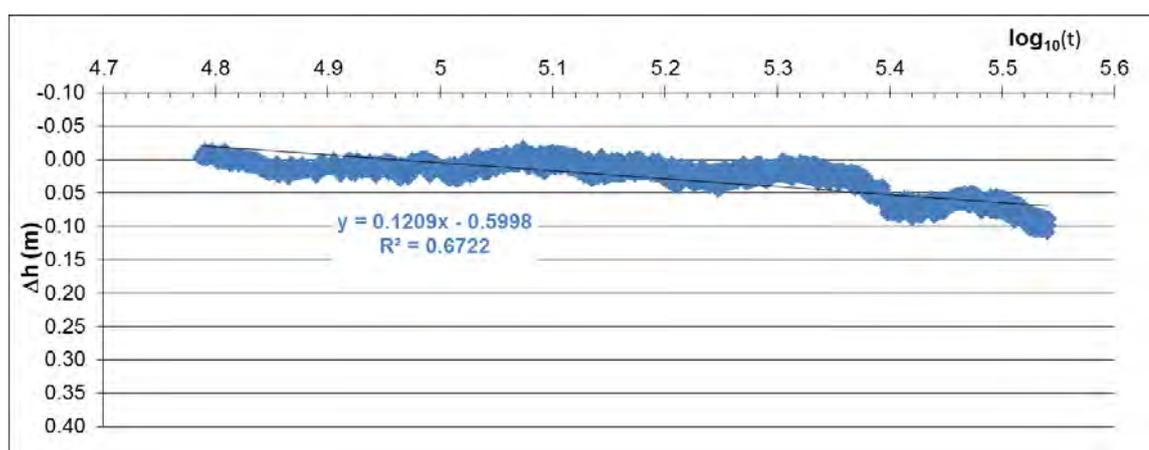


Figura 7.33: Grafico logaritmo del tempo-abbassamenti per il pozzo di controllo PN4.

I valori di trasmissività ( $T = 0,183Q/C$ ) e di permeabilità ( $K = T \times e$ ) ottenuti per il secondo pozzo di controllo sono riportati nella tabella 7.14:

	Coefficiente angolare	T (m <sup>2</sup> /s)	K (m/s)
Tratto 1	C = 0,1209	T = 3,8×10 <sup>-3</sup>	K = 5,4×10 <sup>-4</sup>

TABELLA 7.14: Dati utilizzati per il calcolo del coefficiente di immagazzinamento relativo al PN4.

Sia il valore di trasmissività, che quello di permeabilità, risultano dello stesso ordine di grandezza di quelli ottenuti per il pozzo PN2. Si individua infatti, una trasmissività medio-alta e una permeabilità media.

Anche in questo caso dai valori ottenuti è stato ricavato il coefficiente di

immagazzinamento ( $S = 2,25Tt_0/r'^2$ ).

In tabella 7.15, si riportano i dati utilizzati nel calcolo di S:

T (m <sup>2</sup> /s)	t <sup>0</sup> (log t)	r' (m)	S
3,8*10 <sup>-3</sup>	15848	386	9,1*10 <sup>-4</sup>

**TABELLA 7.15: Dati utilizzati per il calcolo del coefficiente di immagazzinamento relativo al PN4.**

Anche per il pozzo PN4, il valore ottenuto del coefficiente d'immagazzinamento risulta compatibile con un acquifero confinato. Ciò a testimonianza che probabilmente entrambi i pozzi (PN2 e PN4) interessano il medesimo livello acquifero. In realtà, se si considerano i valori piezometrici registrati in entrambe le campagne d'indagine, il pozzo PN4, mostra un livello piezometrico molto al di sopra di quello del pozzo PN2 (rispettivamente 3,11 e -1,14); ciò è probabilmente legato al fatto che il pozzo PN4, interessa probabilmente un ulteriore livello acquifero profondo non sfruttato, che ne determina un livello piezometrico maggiore.

Dopo lo spegnimento della pompa è stata monitorata anche la risalita del livello piezometrico, che, come già detto, risulta parziale.

Anche questa fase può essere elaborata con l'utilizzo delle formule di Jacob per ricavare il valore di T e quindi di K. In questo caso il grafico utilizzato è logaritmo del [(tempo totale prova + tempo di inizio risalita)/ tempo di inizio risalita]-abbassamenti.

In figura 7.34 è riportato il grafico per il pozzo PN3; si possono osservare anche in questa fase due tratti a diversa pendenza, che rispecchia l'ipotesi fatta in precedenza sulla presenza di zone con differenti proprietà idrauliche.

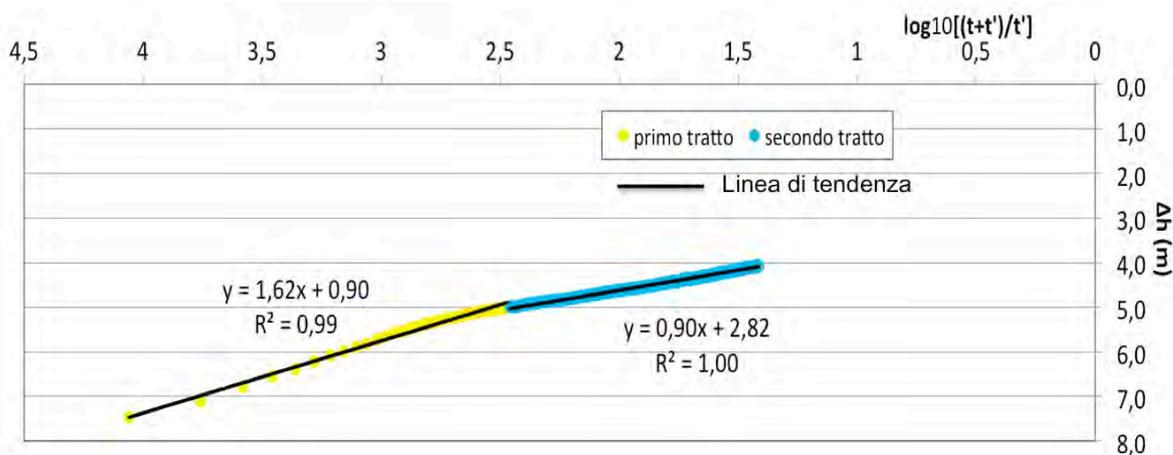


Figura 7.34: Grafico logaritmo del [(tempo totale prova + tempo di inizio risalita)/ tempo di inizio risalita]-abbassamenti pozzo PN3.

I valori di T e K ottenuti per entrambi i tratti sono riportati in Tab. 7.16.

	T (m <sup>2</sup> /s)	K(m/s)
<b>Tratto 1</b>	$2,8 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-5}$
<b>Tratto 2</b>	$5,1 \times 10^{-4}$	$7,3 \times 10^{-5}$

TABELLA 7.16: Valori di T e K calcolati per il pozzo PN3 in fase di risalita.

Questi valori risultano compatibili con quelli ottenuti durante le fasi di emungimento.

Non si riporta la risalita dei pozzi PN2 e PN4 in quanto, come già accennato, risulta poco visibile e condizionata da una successiva riaccensione del pozzo a meno di 24 ore dello spegnimento.

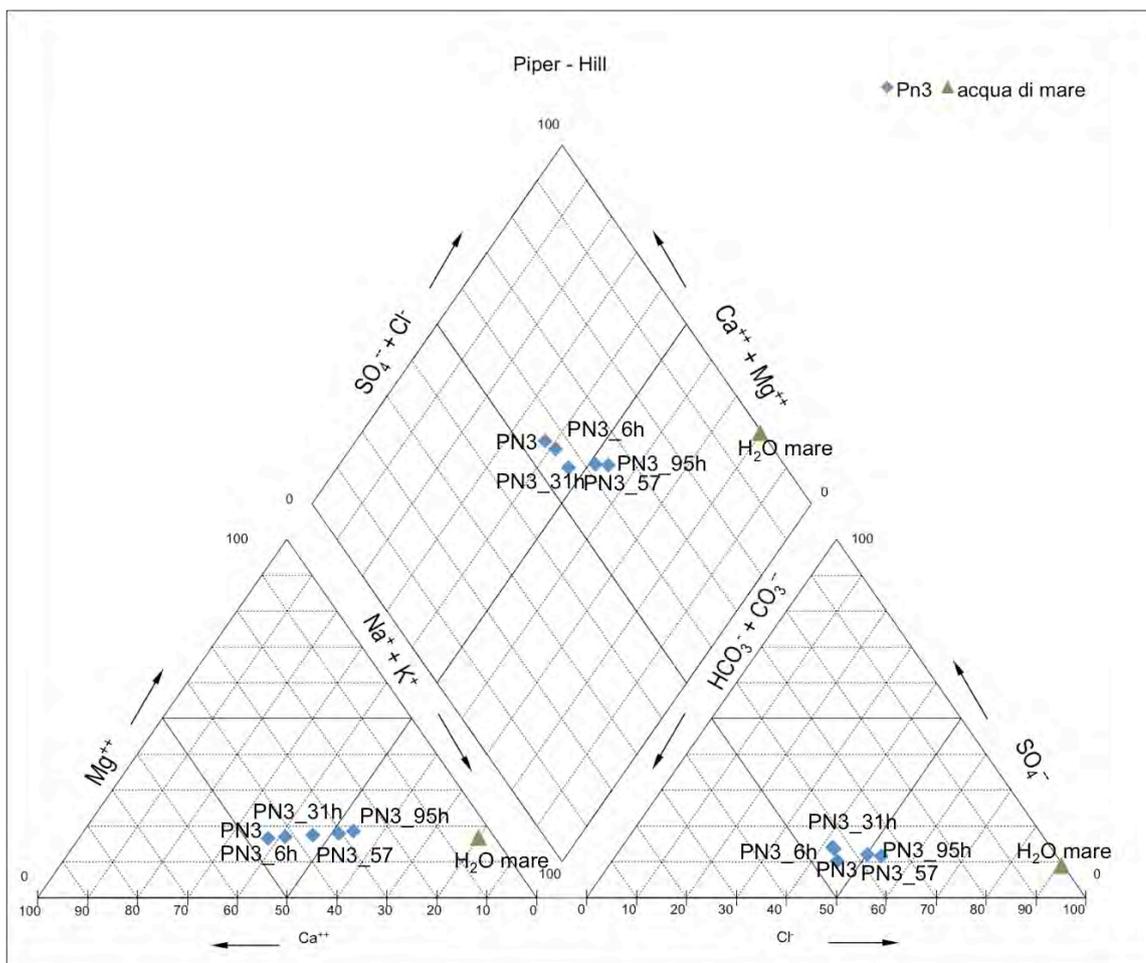
Durante la prova di emungimento sono stati anche prelevati una serie di campioni nel pozzo PN3, al fine di verificare eventuali variazioni del chimismo durante l'emungimento.

In tabella 7.17 sono riportati i risultati delle analisi chimiche dei campioni raccolti durante la prova di emungimento.

Codice	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	NO <sub>3</sub> (mg/l)	SO <sub>4</sub> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> (mg/l)	B (mg/l)	As (µg/l)
PN3	89,2	19,7	82,9	3,6	139,9	60,7	43,0	238,0	0,1	2,1
PN3 6h	78,3	19,3	86,0	4,0	133,6	41,6	60,7	241,0	159,8	2,0
PN3 31h	70,7	20,8	101,3	5,6	137,5	48,2	59,2	241,0	216,6	3,9
PN3 57h	65,0	23,3	120,5	7,6	188,5	22,7	62,0	244,0	293,0	5,7
PN3 95h	61,2	25,0	132,8	8,2	208,5	12,6	61,9	237,9	346,0	6,5

**TABELLA 7.17:** Parametri chimici determinati su campioni di acqua prelevati durante lo svolgimento della prova di emungimento.

I dati di Tab. 7.17 sono stati riportati sia sul diagramma classificativo di Piper-Hill (1944) (per dettagli sulla metodologia di classificazione si rimanda al paragrafo 7.7.1) che su alcuni diagrammi binari. In figura 7.35 si può osservare la posizione dei vari campioni sul diagramma Piper-Hill.



**Figura 7.35:** Diagramma Piper-Hill con riportati i campioni presi durante lo svolgimento della prova. Nel diagramma con h si intendono ore da inizio prova.

Sul grafico, oltre ai campioni presi durante lo svolgimento della prova, è stato

riportato anche il campione d'acqua preso durante la campagna di gennaio (campione denominato PN3), durante la quale il pozzo PN3 era inattivo. Si possono osservare delle variazioni per quanto riguarda le concentrazioni relative, in particolare si osserva: nel diagramma triangolare di sinistra (cationi) un aumento in sodio e potassio e una diminuzione in calcio nel tempo; nel triangolo di destra (anioni) un aumento in cloruri associato ad una lieve diminuzione in bicarbonati. In generale, i campioni raccolti nel tempo sembrano allinearsi verso la composizione dell'acqua di mare (rappresentata nel diagramma con un triangolo verde), passando da una composizione mista bicarbonato-clorurato calcica-sodica verso *facies* clorurato sodiche.

Inoltre, se si osservano i valori riportati in tabella 7.17, si può notare un aumento notevole di Boro e di Arsenico. Importante sottolineare che valori così alti di Boro e di Arsenico (fino a 350 ppm e 6,5 ppb, rispettivamente) non si ritrovano nell'acqua di mare, che presenta un contenuto medio di Boro pari 4,5 ppm e in Arsenico pari 1,2 ppb. Tali concentrazioni riscontrate nelle acque del PN3 durante la prova di emungimento non sembrano imputabili quindi ad un processo di mescolamento con acqua di mare, ma più verosimilmente ad un richiamo di acque relativamente salate ed arricchite da metalli pesanti, la cui origine è ancora da definire.

Per quanto riguarda i diagrammi binari, in particolare il diagramma Na-Cl (Fig 7.36), dove è stata riportata la retta che rappresenta il rapporto Na-Cl dell'acqua di mare, i campioni non si allineano lungo tale retta, ma sono caratterizzati da un rapporto Na-Cl maggiore rispetto a quello dell'acqua di mare.

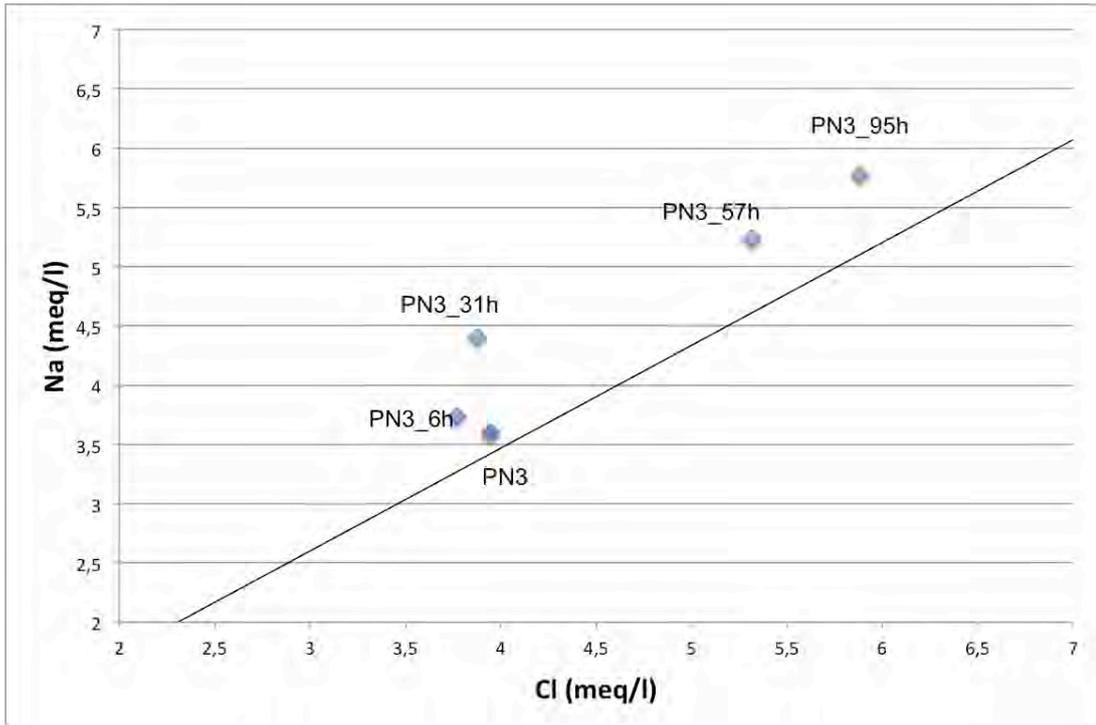


Figura 7.36: Diagramma binario Na-Cl, con retta rappresentativa del rapporto di questi elementi per l'acqua di mare

## 7.7 STUDIO IDROGEOCHIMICO

Lo studio idrogeochimico risulta necessario quando si vogliono conoscere e caratterizzare dal punto di vista chimico-fisico e chimico-isotopico le acque. Questo consente inoltre di definirne la qualità e di individuare i possibili fenomeni chimico-fisici attivi nel corpo idrico.

In tabella 7.18 sono riportati per ogni punto d'acqua campionato, i risultati delle analisi chimiche insieme ai parametri chimico-fisici. Le analisi, come già detto, sono state svolte presso il laboratorio dell'IGG-CNR e sono state determinate le concentrazioni dei costituenti maggiori (Ca, Mg, Na, HCO<sub>3</sub>, K, Cl, SO<sub>4</sub>) e minori (Br, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>) delle acque campionate. La determinazione dell'alcalinità è stata invece effettuata in situ, insieme alle misure di conducibilità elettrica, temperatura e pH, come precedentemente descritto.

Codice punto d'acqua	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	NO <sub>3</sub> (mg/l)	SO <sub>4</sub> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> (mg/l)	NH <sub>4</sub> (mg/l)	Br (mg/l)	Cond. 25°C	pH	T (°C)
PN1_35	59,86	19,09	322,24	6,63	427,30	2,22	62,75	286,76	1,00	2,0	1688	8,0	16,8
PN1_67	39,65	21,52	783,50	11,63	1241,0	35,12	7,00	274,56	7,00	<dl	3760	7,9	17,7
PN2_40	60,74	34,69	113,46	11,94	193,00	4,70	93,13	268,46	<dl	<dl	1182	7,7	18,5
PN2_60	20,60	11,47	444,04	7,04	629,14	-	23,15	274,56	3,00	2,6	2325	8,2	18,6
PN3	89,17	19,74	82,86	3,59	139,90	60,74	43,03	237,95	<dl	<dl	998	7,8	18,1
PN4	84,73	15,39	96,64	4,74	173,90	37,30	32,90	256,25	<dl	<dl	1096	7,5	17,1
PN8	95,39	12,77	55,35	5,23	99,13	56,81	50,83	198,29	<dl	<dl	863	8,0	14,9
PN11	81,18	18,44	103,52	8,65	179,35	67,66	56,74	215,38	<dl	<dl	1135	8,1	15,9
PN12	116,00	13,00	67,60	4,70	137,30	97,20	50,75	213,54	<dl	<dl	1034	7,6	16,1
PN13	117,60	11,68	58,41	1,11	106,92	64,33	49,84	280,66	<dl	<dl	917	7,2	15,6
PN16	98,94	10,59	52,29	0,95	87,90	105,21	17,61	231,85	<dl	<dl	869	7,9	15,8
PN17	129,14	73,74	606,12	24,13	1052,5	93,81	135,52	259,30	<dl	4,1	4470	7,5	16,7
PN18	101,61	12,12	53,06	9,69	91,86	147,62	35,26	183,04	<dl	<dl	888	7,7	13,4
PN19	51,86	25,40	134,10	15,23	182,85	41,85	47,51	256,25	<dl	<dl	1202	8,3	12,7
PN20	117,60	65,03	569,79	26,69	970,80	96,60	137,20	266,02	<dl	<dl	3760	7,9	14,9
PN22	166,45	103,92	1017,1	29,09	1906,0	107,58	268,84	271,51	<dl	<dl	6590	7,6	16,1
PN23	95,39	13,43	111,93	2,62	211,38	39,40	45,75	211,10	<dl	<dl	1198	7,9	13,3
PN24	106,94	29,03	200,61	21,41	386,84	109,16	53,83	262,36	<dl	<dl	1935	7,9	13,8
PN25	141,58	19,52	176,15	5,64	250,65	156,83	112,63	280,66	<dl	<dl	1695	7,7	12,9
PN26	130,37	30,34	178,44	6,40	391,62	5,01	107,17	268,46	<dl	1,9	1822	8,1	12,9
PN27	80,29	12,12	62,23	2,71	92,46	34,45	37,03	228,80	<dl	<dl	825	7,8	14,9
PN28	138,92	36,43	186,85	1,11	507,00	3,60	60,08	228,80	<dl	2,2	1946	7,8	13,5
PN29	122,04	37,31	269,72	82,04	396,43	113,65	152,00	347,77	<dl	2,0	2593	7,9	15,5
PN31	55,41	18,00	203,67	27,83	164,39	101,40	152,76	266,38	<dl	<dl	1505	8,1	15,3

**TABELLA 7.18: Dati chimico-fisici raccolti a Gennaio 2015 per alcuni punti d'acqua della rete di monitoraggio. Con <dl si intende inferiore al detection limit.**

In totale sono stati campionati 22 punti d'acqua (per il PN1 e PN2 sono stati effettuati due prelievi ciascuno a profondità diverse) per un totale di 24 campioni. I dati ottenuti sono stati comparati con analisi pregresse (Nicotra, 2008), il che ha permesso di fare considerazioni su possibili variazioni di un dato parametro nel tempo.

Da una prima analisi dei dati riportati in tabella 7.18 si può osservare come i punti d'acqua mostrino contenuti alti in cloruri e in sodio rispetto alle acque che circolano comunemente in rocce carbonatiche. La presenza di alti contenuti in cloruri è da valutare in funzione di diversi fattori:

- “spray marino”: deposizione di sali marini nel terreno ad opera del moto ondoso e del vento. Solitamente l'effetto diminuisce allontanandosi dalla costa; in questo caso trattandosi di un'isola di piccole dimensioni si può supporre che il fenomeno interessi l'intero territorio. Una volta raggiunto il suolo, le precipitazioni dilavando la superficie affiorante si arricchiscono in ioni  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^-$  e  $\text{Cl}^-$ ;
- intrusione marina: legata a fenomeni di interazione dell'acqua di mare con l'acqua dolce di falda. Questo processo avviene probabilmente, come già accennato, nella parte orientale dell'isola, dove le calcareniti si trovano anche al di sotto del livello del mare;
- inquinamento antropico, connesso anche alla presenza di elevate concentrazioni in nitrato e in potassio.

I valori di pH mostrano un *range* di variabilità compresa tra un minimo di 7.6 e un massimo di 8.2. Il pH delle acque naturali è funzione dei litotipi attraversati, del tempo di residenza in essi, della temperatura e dei fenomeni che avvengono in acquifero. Se si considera che, la maggior parte dei punti d'acqua campionati interessa l'acquifero freatico superficiale, dove la roccia serbatoio è rappresentata da calcareniti organogene e sabbie cementate, i valori di pH possono essere messi in relazione a fenomeni di dissoluzione di rocce carbonatiche, dove la reazione di riferimento è la seguente:



Infatti, l'interazione tra le acque e i carbonati producono un aumento del pH della soluzione legato al consumo di ioni  $\text{H}^+$ .

Anche i pozzi che interessano l'acquifero profondo mostrano valori di pH elevati. La possibile spiegazione di tali valori può essere connessa sia al fatto che i due acquiferi, secondo il modello di Raggi (1983), risultano tra loro connessi, sia al fatto che questi livelli acquiferi siano caratterizzati da litotipi calcarenitici.

La temperatura mostra, invece, un *range* di variabilità che va da un minimo di 12° a un massimo di 18°. Mediamente, considerando questi dati, le acque dell'Isola di Pianosa possono essere classificate come acque fredde secondo la classificazione di Mouren (1910, in Celico 1986), avendo rilevato su tutti i campioni una temperatura inferiore ai 20°. Si può anche osservare come, le temperature delle acque nei pozzi profondi siano mediamente maggiore di quelle nei pozzi superficiali; il fenomeno può essere spiegato con la collocazione dei livelli acquiferi al di sotto della zona neutra (che si identifica a seconda del tipo di roccia a profondità maggiore di 30 m) quindi nella zona di omotermia, dove la temperatura è influenzata dal gradiente termico locale. Tali valutazioni sono comunque da considerarsi con cautela in quanto definite sulla base di un'unica misura.

Infine, per quanto riguarda la conducibilità elettrica, di cui si possiedono valori relativi a due campagne, compresa quella di Maggio 2015 (Tab. 7.7), si può osservare un *range* di valori estremamente ampio (da 816  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 6.590  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Se si applica la classificazione riportata in Civita (2005) in funzione della conducibilità elettrica, le acque dell'Isola di Pianosa possono essere classificate in alcuni casi come minerali ( $> 1.320 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) in altri medio minerali (260-1.320  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Se si considerano le variazioni fra le due campagne (Tab. 7.7), per la maggior parte dei pozzi si possono osservare piccole differenze di questo parametro, talvolta trascurabili.

Nei capitoli successivi si è cercato di caratterizzare le acque sotterranee dell'isola dal punto di vista chimico e isotopico.

#### 7.7.1 CLASSIFICAZIONE CHIMICA DELLE ACQUE

Dopo aver analizzato un'acqua, il passo successivo è quello di classificarla per poi decidere non solo come può essere utilizzata, ma anche per individuare i possibili processi in atto.

I dati chimici di anioni e cationi vengono organizzati in tabelle secondo differenti unità di misura (mg/l, ppm, meq/l). Poiché le tabelle non permettono una interpretazione rapida del dato, i dati vengono poi rappresentati in diagrammi classificativi.

In questo studio per la classificazione delle acque è stato utilizzato il diagramma di Piper-Hill (1944). Questo tipo di diagramma, qualitativo, è caratterizzato da due triangoli equilateri, uno per i cationi (Ca, Mg, Na, K) e uno per gli anioni (Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub>) principali, posti ai lati di un rombo. Per riportare i punti all'interno di questo diagramma si inizia posizionando i punti relativi a ogni singolo campione nei due triangoli alla base. Per fare ciò si sommano le concentrazioni dei tre ioni in meq/l e si riporta nel triangolo la percentuale di ciascuno ione rispetto al totale. Una volta individuata la posizione relativa dei cationi e degli anioni nei rispettivi triangoli, si identifica la posizione del campione nel rombo superiore proiettando i due punti parallelamente al lato Mg<sup>2+</sup>, sul triangolo dei cationi, e a SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> su quello degli anioni. L'intersezione di queste due rette individua la posizione del campione nel rombo in funzione delle concentrazioni relative di cationi e anioni.

I vantaggi di utilizzare questo tipo di diagramma rispetto ad altri sono: la possibilità di rappresentare più campioni su uno stesso diagramma, la possibilità di classificare le acque, individuare le *facies* dominanti e riconoscere *mixing* tra acque (Fig. 7.37). Con *facies* geochimica si intende la coppia catione e anione (in meq/l) prevalente all'interno dell'acqua. La nomenclatura della *facies* viene effettuata usando il sostantivo dell'anione e l'aggettivo del catione dominante.

Esistono 4 *facies* chimiche principali:

- *facies* solfato-calcica;
- *facies* bicarbonato-calcica e/o magnesiacca;
- *facies* bicarbonato-alcalina;
- *facies* clorurato-alcalina.

Lo svantaggio principale del metodo è che non vengono incluse le acque che hanno al loro interno altri cationi o anioni presenti in concentrazioni significative. Inoltre, questa tipologia di diagramma è unicamente qualitativa, non fornendo informazioni in termini di concentrazioni assolute.

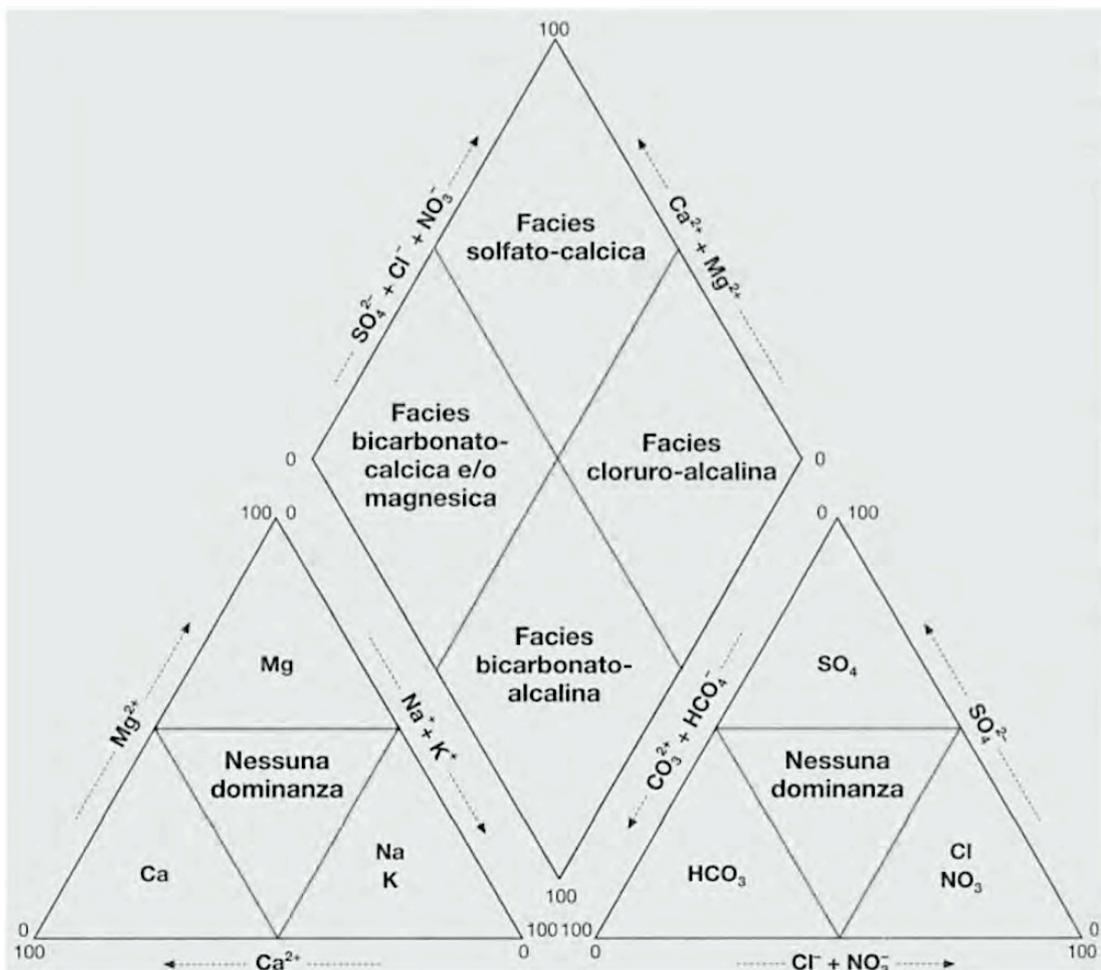


Figura 7.37: Diagramma di Piper-Hill dove si può osservare la rappresentazione delle facies chimiche principali (da Civita, 2005).

Per completezza è stato anche utilizzato il diagramma di Langelier-Ludwig (1942) (LL) che utilizza anch'esso le concentrazioni relative delle specie ioniche principali. In particolare, è stata utilizzata la sezione del diagramma LL, considerando il diagramma come base quadrata di una piramide il cui asse è funzione del TDS (Fig. 7.38). Infatti, osservando solo la base del diagramma si potrebbero male interpretare alcuni andamenti che suggeriscono processi di mescolamento o di evoluzione del chimismo per interazione con rocce di tipo diverso. Queste evidenze possono essere verificate solo attraverso gli andamenti del contenuto ionico (TDS). Il diagramma LL consente di individuare *mixing* tra acque che appartengono a famiglie diverse quando i campioni cadranno su uno stesso allineamento sia sulla base quadrata della piramide sia nelle sezioni triangolari.

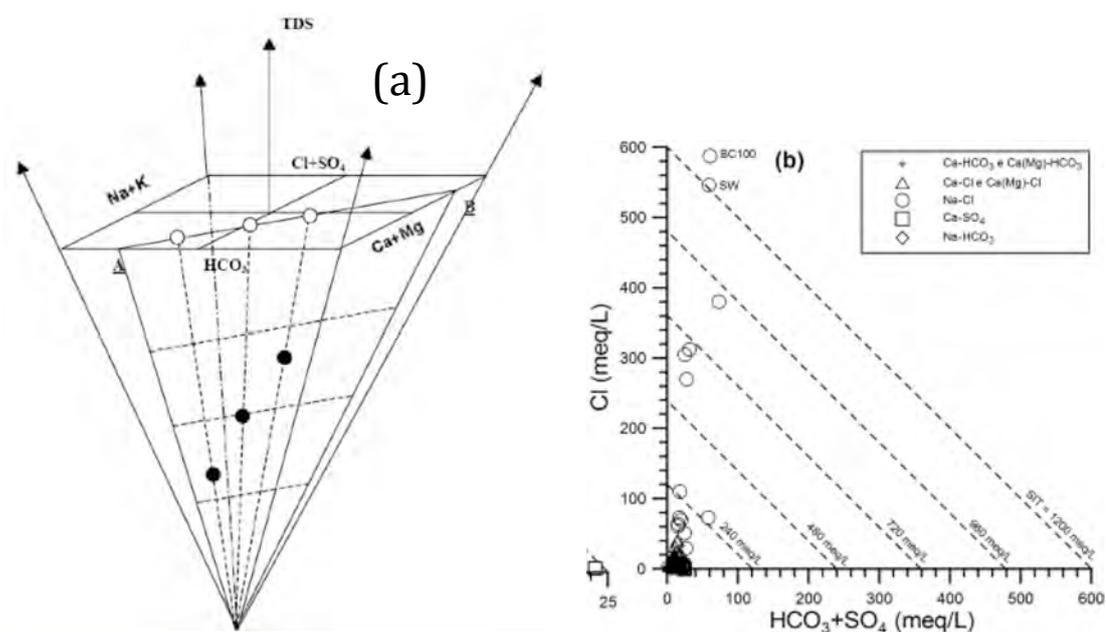
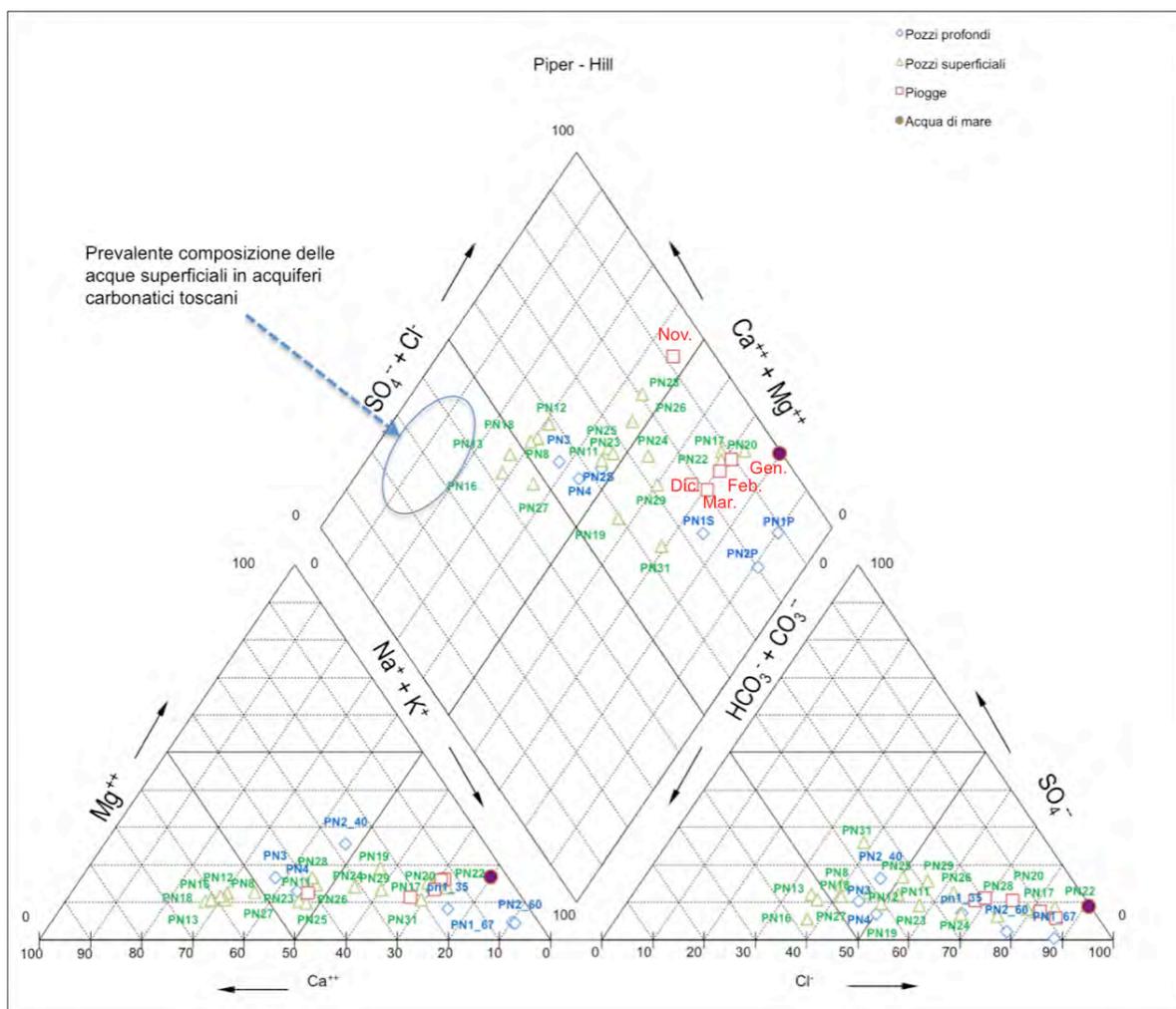


Figura 7.38: a) Immagine del diagramma LL come base quadrata di una piramide il cui asse è funzione del TDS; b) sezione del diagramma di LL.

In figura 7.39 è riportato il diagramma classificativo di Piper-Hill relativo alle acque prelevate a Pianosa nel Gennaio 2015, ad alcuni campioni di pioggia mensili (da Ottobre 2014 ad Aprile 2015) ed il punto indicativo della composizione dell'acqua di mare.



**Figura 7.39: Diagramma di Piper-Hill (1994) per la classificazione delle acque di falda**

Nel diagramma sono stati distinti i pozzi superficiali da quelli profondi e, per confronto, è stato anche riportato il campo dove generalmente si collocano le acque in *facies* bicarbonato-calcica che circolano in acquiferi carbonatici in Toscana.

Questo studio idrogeochimico ha consentito di classificare la maggior parte delle acque sotterranee in una *facies* intermedia cloruro-sodica/bicarbonato calcica, nonostante le rocce serbatoio siano a prevalente composizione carbonatica; nonché ulteriori campioni a cloruro di sodio. Risulta inoltre evidente un allineamento dei punti dal campo delle acque bicarbonato-calciche al campo delle cloruro-sodiche, tendendo verso il punto rappresentativo dell'acqua di mare (in particolare i pozzi PN17, PN20 e PN22). Se si considera la posizione dei punti PN16, PN13, PN27 e PN18, i quali rappresentano i punti più prossimi al

campo definito precedentemente come caratteristico di una *facies* bicarbonato-alcalina tipica degli acquiferi toscani, si può in linea di principio affermare che questi siano rappresentativi dell'acquifero in roccia e possono essere considerati come termine estremo (*end-member*) in un possibile mescolamento con acqua di mare.

Il comportamento dei punti PN1 profondo e PN2 profondo che, nel triangolo degli anioni, mostrano un'assenza di solfati mentre i bicarbonati risultano estremamente alti, può far supporre la presenza di fenomeni chimico-fisici in acquifero, in particolare riduzione solfato-batterica. Inoltre, in questi pozzi come si può vedere in tabella 7.18 è stata riscontrata la presenza di ammoniaca, probabilmente riferibile anche a processi di riduzione dei nitrati. Per quanto riguarda invece la collocazione di PN31 e PN1 superficiale, dove i solfati sono presenti, la posizione nel triangolo dei cationi potrebbe far pensare all'influenza di sale marino, però smentita dalla loro posizione nel triangolo degli anioni, osservando anche come il rapporto sodio/cloruro sia più alto di quello dell'acqua di mare. Tale comportamento può essere probabilmente riconducibile a processi di scambio ionico, dovuti alla presenza di fenomeni di alterazione delle rocce serbatoio (presenza di minerali argillosi).

Tali fenomeni possono essere riscontrati, anche se in minore entità, anche su altri pozzi; ed è questo probabilmente il motivo per cui si verifica una dispersione dei dati sul diagramma Piper-Hill rispetto all'allineamento fra punto rappresentativo dell'acquifero freatico e acqua di mare.

La gran parte dei punti d'acqua campionati non ha mostrato variazioni rispetto allo studio precedente (Nicotra, 2008) di cui si riporta il relativo diagramma di Piper-Hill (Fig. 7.40). Le uniche variazioni evidenti sono rappresentate dal PN1 (campionamento nello studio precedente solo in superficie) PN29, PN28 e PN31. Lo spostamento di questi punti sul diagramma è legato probabilmente a scambi ionici (PN29 e PN28 mostrano un aumento di calcio rispetto al sodio) e deboli processi di riduzione dei solfati.

Inoltre, in figura 7.40 si può osservare la particolare posizione nel diagramma del punto PN6, dove fu riscontrata la presenza di ammoniaca, alti bicarbonati e l'assenza di nitrati e solfati. Queste caratteristiche sono state interpretate da

Nicotra (2008) e Doveri et al. (2012) come indice di condizioni per la formazione di un ambiente riducente con probabile attività batterica originata dalla presenza di materia organica e da una limitata capacità di circolazione. Tuttavia durante la campagna di Gennaio 2015 è stato scelto di non campionare questo pozzo, perché non considerato rappresentativo in quanto, dai preliminari dati di campagna, è possibile che abbia subito un fenomeno di collasso che genera ristagno di acqua piovana.

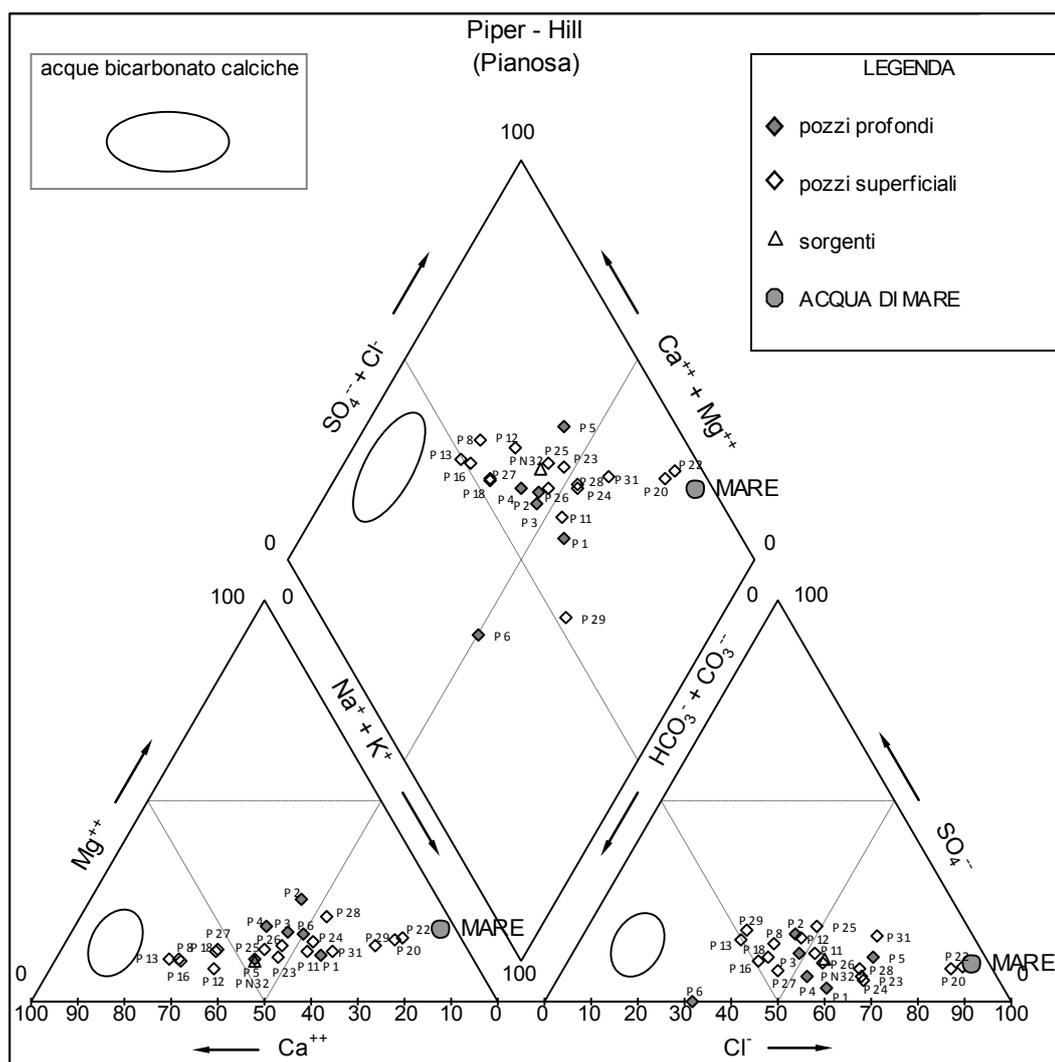


Figura 7.40: Diagramma di Piper-Hill (1994) per la classificazione delle acque di falda (Nicotra, 2008).

Come detto in precedenza, per una migliore caratterizzazione geochimica delle acque è stata anche elaborata la sezione del diagramma di Langelier e Ludwig (Fig 8.41 e Fig 8.42), che permette di individuare mescolamenti tra acque appartenenti a differenti famiglie. Le linee trasversali del diagramma

rappresentano diversi valori di TDS (*Total Dissolved Solids*).

Dall'analisi della figura 7.41 si può osservare come la maggior parte dei punti d'acqua delle reti di monitoraggio presenti un TDS inferiore a 50 (meq/l) ad eccezione di PN17, PN20, PN22 e PN1 profondo. I primi tre punti, come già visto nel diagramma precedente, presentano un chimismo prossimo a quello dell'acqua di mare; inoltre se si osserva la figura 7.42 a scala minore, dove è riportata anche la posizione dell'acqua di mare, si può osservare una sostanziale tendenza all'allineamento con essa. Questo può far ipotizzare la presenza di fenomeni di mescolamento tra l'acqua dolce di questi pozzi e l'acqua di mare (confermando quanto evidenziato nelle mappe di conducibilità). Per quanto riguarda invece il PN1 profondo non si può fare la stessa osservazione; esso infatti presenta un TDS elevato, indice di un'elevata salinità, ma probabilmente imputabile ad altri fenomeni, in quanto il punto non presenta una tendenza all'allineamento verso il chimismo dell'acqua di mare.

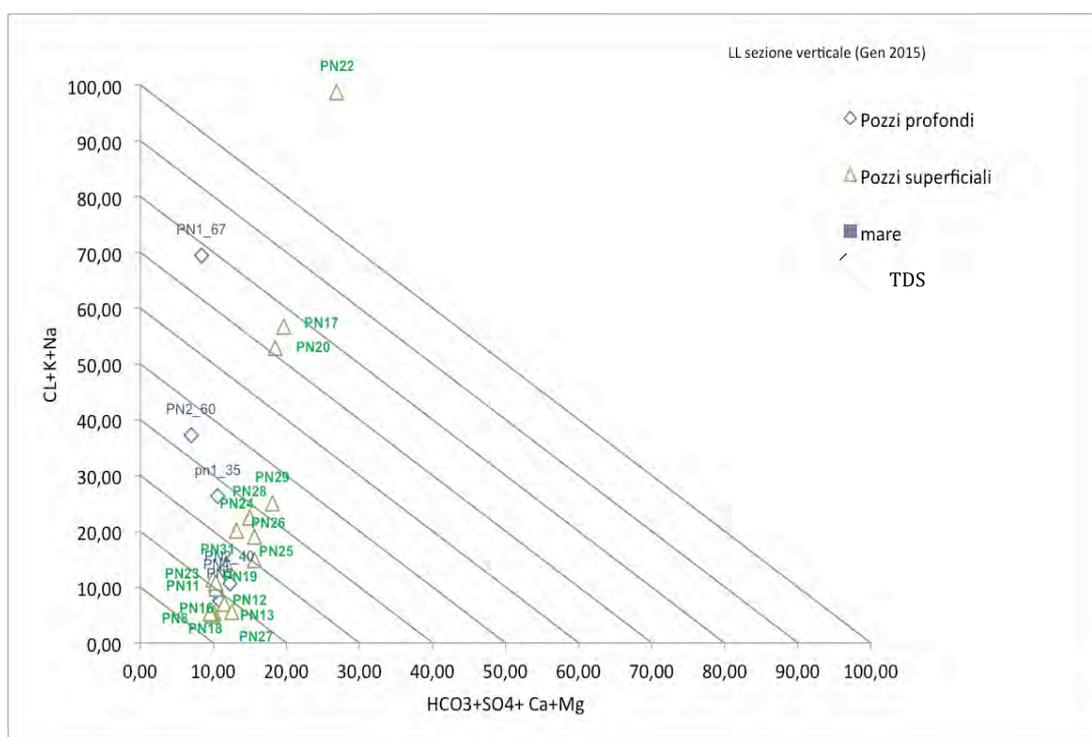
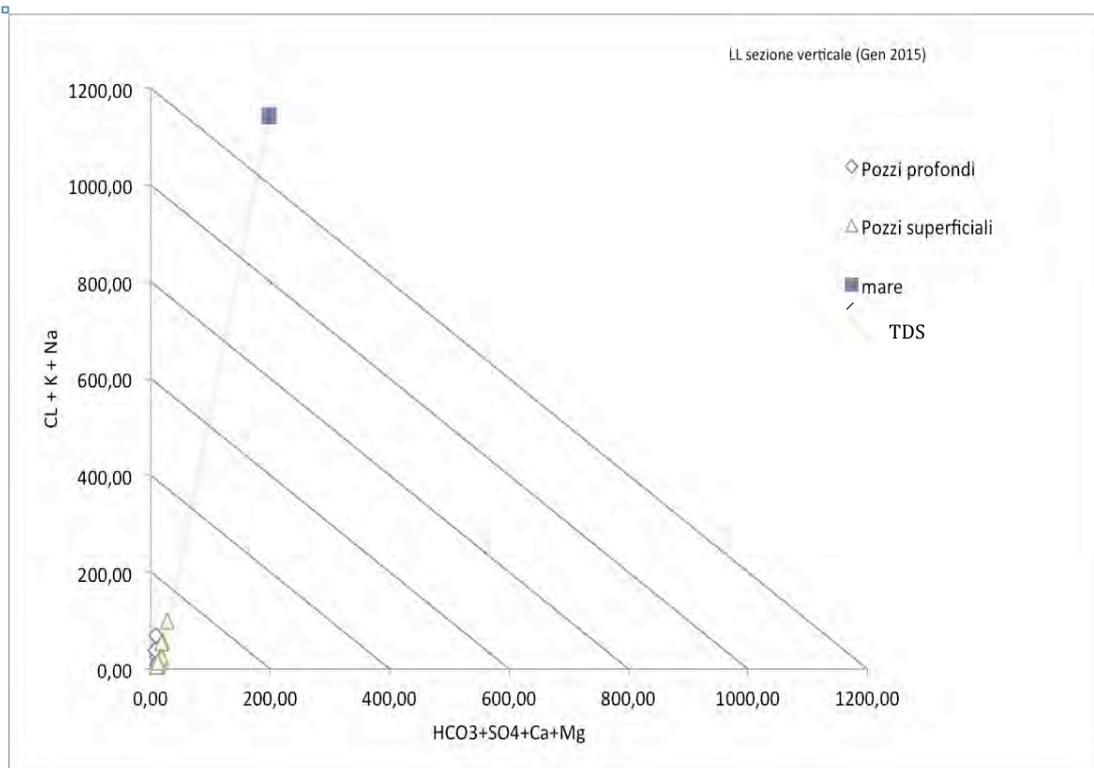


Figura 7.41: Sezione del diagramma di Langelier e Ludwing.



**Figura 7.42: Sezione del diagramma di Langelier e Ludwing.**

Se infine si considera la posizione delle piogge nel diagramma di Piper-Hill (quadrati rossi), si può osservare come esse presentino tutte una *facies* cloruro alcalina, ad eccezione delle precipitazioni di novembre che risultano invece più ricche in calcio. Il fatto che le precipitazioni risultino relativamente arricchite in Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup> è probabilmente legato allo *spray* marino presente nell'aria.

### 7.7.2 DIAGRAMMI BINARI

Uno dei limiti del diagramma di Piper-Hill è che non fornisce indicazioni in termini di concentrazioni assolute ed è quindi puramente qualitativo. Per caratterizzare meglio da un punto di vista chimico le acque, è stata quindi realizzata anche una serie di diagrammi binari: Na<sup>+</sup>-Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>-K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Cl<sup>-</sup>. Per tutti è stata inserita la retta che rappresenta il rapporto degli elementi considerati per l'acqua di mare.

Nel diagramma sodio-cloruri (Fig. 7.43) si può osservare come alcuni pozzi presentino probabili fenomeni di mescolamento con acqua di mare, come rappresentato dalla loro ubicazione sulla retta rappresentativa del rapporto di

questi due elementi per l'acqua di mare. I pozzi PN22, PN17 e PN20 risultano quelli che tendono di più verso le concentrazioni dell'acqua di mare, probabilmente perché più influenzati dal mescolamento con essa. Il fenomeno risulta comunque visibile anche per altri punti, anche se in minore entità.

Al contrario, i punti PN1\_35, PN1\_67 e PN2\_60 non sembrano subire fenomeni di mescolamento con acqua di mare, per cui le elevate concentrazioni di sodio e cloro devono derivare da altri fenomeni, come già osservato nei diagrammi precedenti.

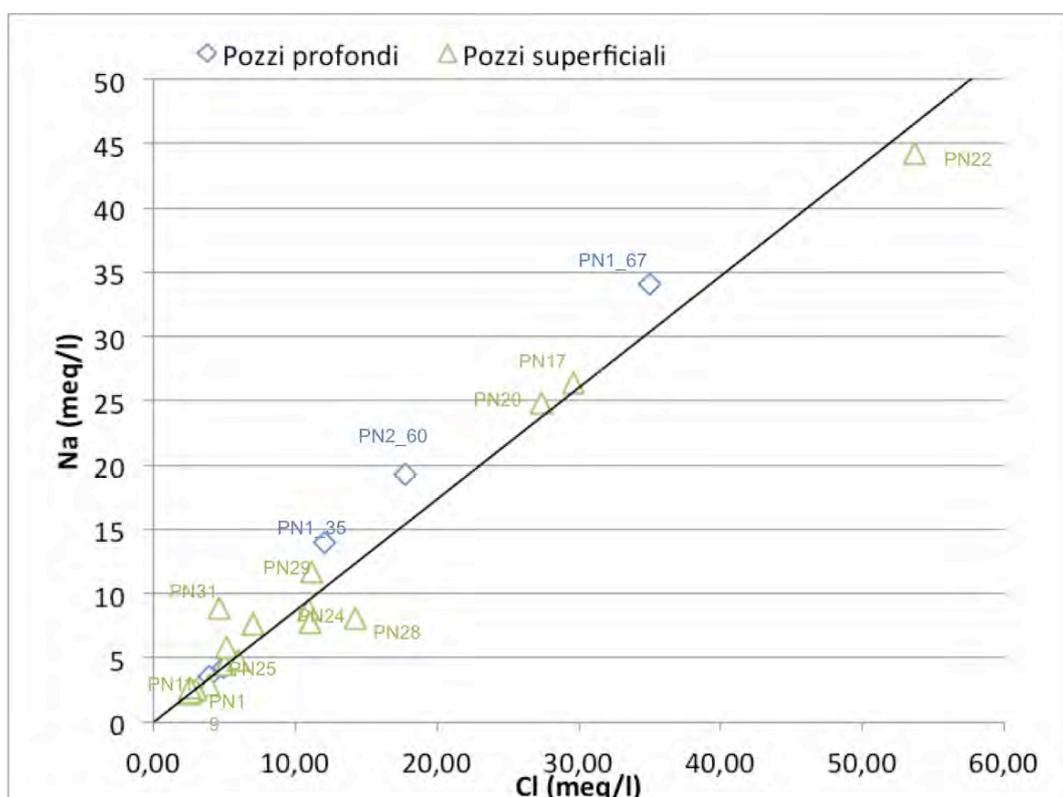


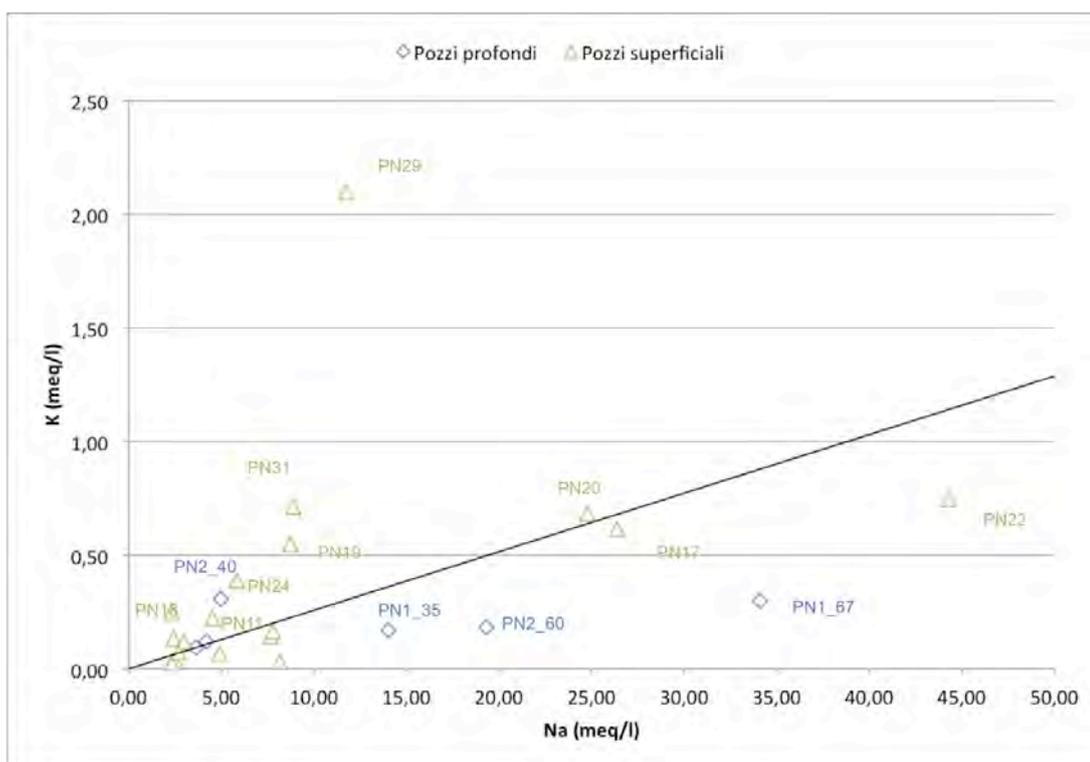
Figura 7.43: Diagramma binario Na<sup>+</sup>-Cl<sup>-</sup>, con retta rappresentativa del rapporto di questi elementi per l'acqua di mare.

Il diagramma Na<sup>+</sup>-K<sup>+</sup> (Fig. 7.44) è utile per identificare possibili punti che hanno subito fenomeni di contaminazione dovuti all'attività antropica.

Ad esempio il PN29, che nel diagramma di Piper si posiziona in una zona prossima al chimismo dell'acqua di mare, mostra qui un contenuto in potassio molto elevato, che non rispecchia assolutamente quello marino. Esso presenta inoltre elevati contenuti in nitrati (Tab. 7.18), derivante da possibili fenomeni di contaminazione antropica. Quest'ipotesi risulta realistica, se si pensa che questo pozzo si trova in prossimità dalla zona dove vi erano allevamenti di animali.

Inoltre, la presenza di una contaminazione antropica viene confermata anche dall'elevato contenuto in cloruri, legato all'utilizzo di fertilizzanti e concimi. Per quanto riguarda invece, i pozzi PN17, PN20 e PN22 il rapporto  $K^+/Na^+$  risulta compatibile con quello dell'acqua di mare. Nonostante questo, probabilmente la presenza di un contenuto in potassio più elevato rispetto alla maggior parte degli altri pozzi, associato anche ad contenuto in nitrati elevato (Tab. 8.18), indica verosimilmente che questi pozzi (PN17, PN20 e PN22) sono interessati anche da una certa contaminazione antropica. Questi si trovano infatti in zone che sono state coltivate negli anni di attività del carcere, quindi tali contenuti sono probabilmente imputabili all'utilizzo di fertilizzanti.

Il processo di contaminazione antropica è rilevabile, anche se con minore entità, anche per i pozzi PN19 e PN31, rispettivamente i pozzi dell'ex Pollaio Razionale e dell'ex Porcile.



**Figura 7.44: Diagramma binario  $K^+-Na^+$ , con retta rappresentativa del rapporto di questi elementi per l'acqua di mare.**

Nel diagramma  $Cl^-SO_4^{2-}$  (Fig. 7.45) si può osservare come la composizione dei solfati nelle acque dell'isola sia estremamente variabile. Tale variabilità è probabilmente dovuta alla disomogeneità dei solfati nelle rocce-serbatoio. Nel grafico è anche riportata la retta che mostra il rapporto  $Cl^-/SO_4^{2-}$  dell'acqua di

mare, in cui si osserva ancora una volta come i punti PN17, PN20 e PN22 risultino allinearsi. Altri pozzi invece si discostano da tale retta, indicando ancora una volta che la composizione di queste acque sia ascrivibile ad un diverso processo.

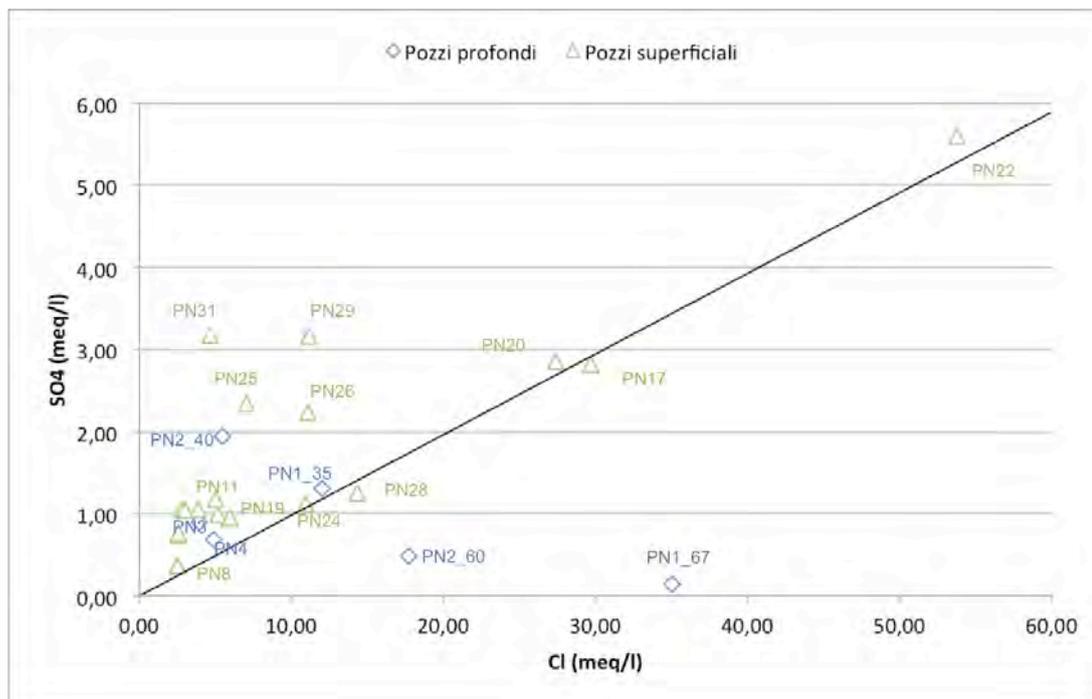
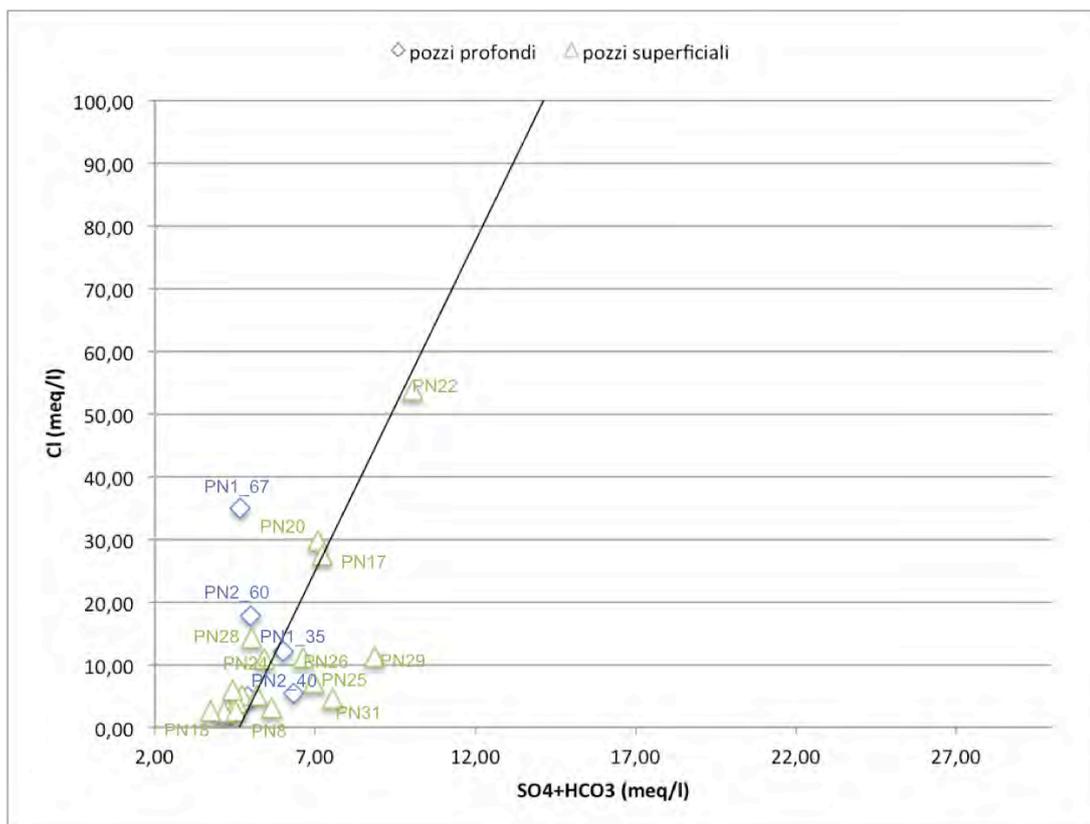


Figura 7.45: Diagramma binario Cl-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, con retta rappresentativa del rapporto di questi elementi per l'acqua di mare.

Il diagramma binario HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>-</sup>-Cl<sup>-</sup> (Fig 7.46) consente di discriminare la presenza di fenomeni di intrusione marina da fenomeni di riduzione dei solfati. Utilizzando infatti la somma solfati-bicarbonati si annullano i fenomeni di riduzione dei solfati e quindi la loro somma è conservativa. In figura è riportata anche la retta che rappresenta il rapporto di questi elementi per l'acqua di mare. Anche in questo diagramma i pozzi PN22, PN17 e PN20 si allineano sulla retta, mentre i pozzi PN1\_67 e PN2\_60, ovvero quelli prelevati in profondità nei pozzi PN1 e PN2, caratterizzati da fenomeni di riduzione di solfati, presentano contenuti alti in cloruri ma non riconducibili ad interazione con acqua di mare.



**Figura 7.46: Diagramma binario  $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^- - \text{Cl}^-$ , con retta rappresentativa del rapporto di questi elementi per l'acqua di mare.**

In definitiva, quello che si è potuto osservare dall'elaborazione dei dati geochimici è la presenza sicuramente per alcuni pozzi di fenomeni di mescolamento con acqua di mare (PN17, PN20, PN22); altri (PN1\_67, PN2\_60), sebbene alcuni abbiano contenuti in cloruri molto elevati, sembrano essere interessati da un diverso processo e più verosimilmente ad un mescolamento con acque salate e, come si vedrà in seguito, ricche in metalli pesanti. Oltre a questi processi, è stato anche possibile osservare come alcuni pozzi siano molto probabilmente interessati da fenomeni di inquinamento legati all'attività agricola e pastorizia; infatti, nelle zone che sono state maggiormente coltivate o in quelle dove venivano allevati gli animali negli anni di attività del carcere, sono stati rilevati contenuti in potassio e nitrati elevati (PN29, e con entità minore PN17, PN19, PN20, PN22 e PN31). In particolare, considerando i nitrati (Fig. 7.47) si può osservare come la maggior parte dei pozzi superficiali abbia contenuti in nitrati superiori al limite di legge (50 mg/l, D.lgs 31/2001); mentre i pozzi profondi, ad eccezione del pozzo PN3, mostrano contenuti in nitrati bassi o

comunque al di sotto del limite di legge.

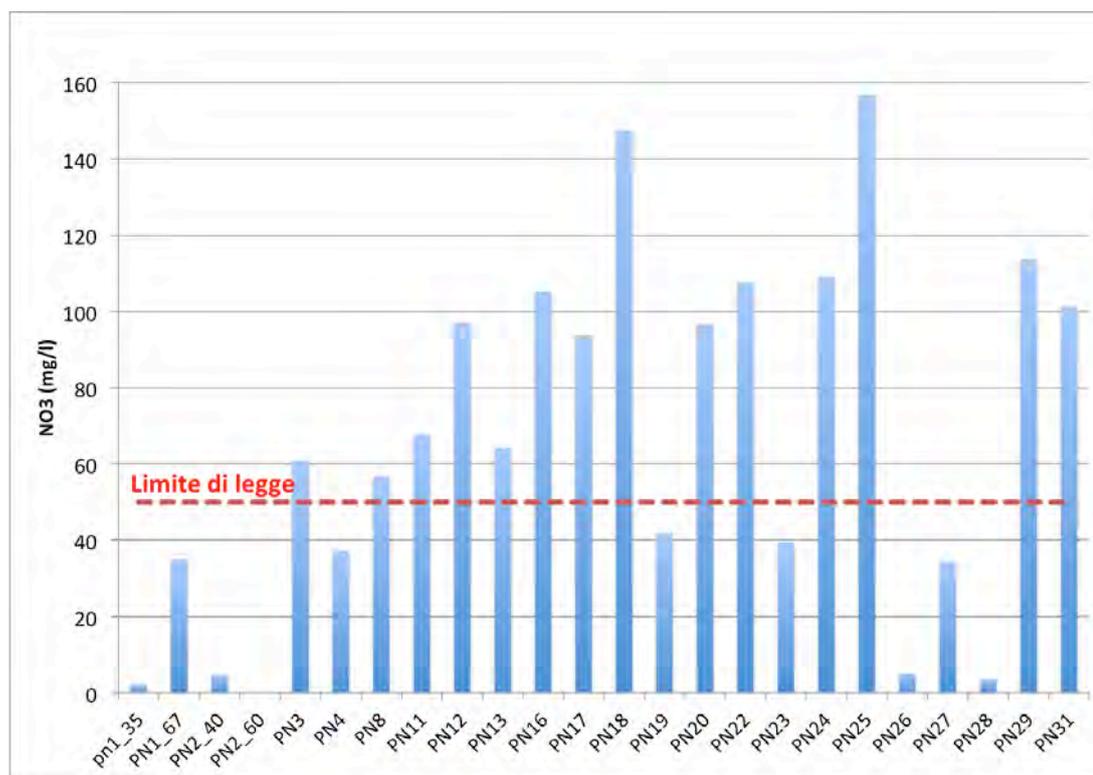


Figura 7.47: Variabilità dei Nitrati nei pozzi dell'isola.

### 7.7.3 ELEMENTI IN TRACCE

Oltre ai costituenti maggiori e minori delle acque è stato effettuato uno studio di alcuni elementi in tracce, in particolare per il pozzo PN3, l'unico utilizzato per scopi idropotabili; i dati ottenuti sono stati poi comparati con quelli di analisi pregresse, fornite dall'ARPAT di Livorno. In queste analisi sono stati ricercati tre elementi potenzialmente dannosi alla salute umana, se presenti con concentrazioni superiori ai limiti definiti dalla legge (D.lgs 31/2001):

- ferro (limite per usi idropotabili 200 µg/l);
- arsenico (limite per usi idropotabili 10 µg/l);
- boro (limite per usi idropotabili 1 mg/l).

È stato scelto di analizzare ferro, arsenico e boro perché in passato sono state rinvenute nelle acque concentrazioni significative di questi elementi.

I dati analizzati per il pozzo PN3 fanno riferimento ad un periodo che va dall'Agosto 2010 alla campagna di Gennaio 2015.

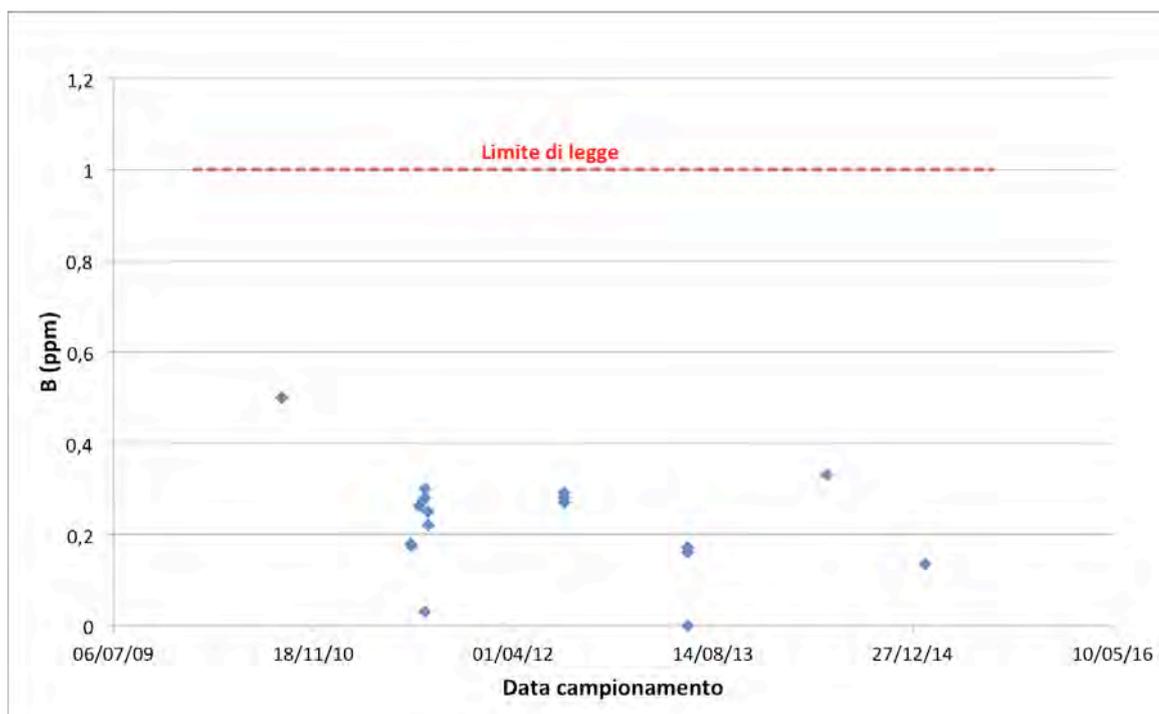
In tabella 7.19 vengono riportati i dati in ordine di data.

Data di campionamento	B (mg/l)	As (µg/l)	Fe (µg/l)
30/08/10	0,5	-	64
30/08/10	0,5	-	17
19/07/11	0,2	3,0	34
21/07/11	0,2	3,4	15
10/08/11	0,3	3,9	44
10/08/11	0,3	5,0	242
18/08/11	0,3	12,0	<10
24/08/11	0,3	4,6	45
24/08/11	0,03	4,9	<10
24/08/11	0,3	8,9	234
31/08/11	0,2	4,4	13
31/08/11	0,3	5,1	<10
06/08/12	0,3	7,0	147
06/08/12	0,3	6,6	11
06/08/12	0,3	6,6	17
06/08/12	0,3	6,4	<10
06/08/12	0,3	7,8	285
06/08/12	0,3	6,6	11
12/06/13	0,2	2,8	61
12/06/13	-	2,6	13
12/06/13	0,2	2,6	23
12/06/13	0,2	2,3	18
26/05/14	0,3	7,2	11
28/01/15	0,1	2,1	15

TABELLA 7.19: Valori di B, Fe e As presenti nelle acque del pozzo PN3 dall'Agosto 2010 a Gennaio 2015 (Arpat di Livorno). In rosso sono riportati i valori superiori al limite di legge.

Se si osservano i dati in tabella, si può notare come durante alcuni campionamenti tali parametri abbiano superato i limiti di legge. Alcuni campionamenti fanno riferimento allo stesso giorno, quello che cambia è il punto di campionamento; infatti, a parte la misura di Gennaio 2015 che è stata effettuata dal rubinetto presente nel pozzo, le restanti sono state effettuate da ARPAT o dal rubinetto del ristorante o dell'albergo presente sull'isola.

Da questi valori per ognuno dei tre elementi sono stati realizzati dei grafici che mostrano la loro variabilità nel tempo. Nel grafico di Fig. 7.48 si può osservare la variazione del boro. Questo parametro rimane sempre al di sotto del limite di legge, mostra comunque una grande variabilità nel tempo, il valore più elevato si registra ad Agosto 2010 (pari a 0,5 mg/l), dopodiché i valori rimangono sostanzialmente al di sotto di questo con una variabilità che va da 0 mg/l a 0,35 mg/l.



**Figura 7.48.: Variabilità del Boro nel tempo (2010-2015).**

La presenza di boro nell'acqua può essere legata a vari fattori: dissoluzione di minerali contenenti boro, utilizzo di fertilizzanti o insetticidi, dissoluzione di sali marini nel terreno legati alla deposizione di questi negli strati superficiali del suolo ("spray marino").

Nel grafico di figura 7.49 si può osservare la variazione dell'arsenico nel tempo, che mostra anch'essa una grande variabilità, con il superamento del limite di legge nell'Agosto 2010. L'arsenico è un elemento molto comune nelle rocce e la sua presenza nelle acque può essere legata alla dissoluzione di minerali che lo contengono. In particolare, l'arsenico si trova anche nelle arenarie che, come abbiamo visto dalla stratigrafia, sono presenti in intercalazioni nelle formazioni mioceniche. Da non sottovalutare è comunque la possibilità che l'arsenico presente nell'acqua sia legato alle pratiche agricole svolte sull'isola negli anni '90, in cui venivano utilizzati diserbanti e pesticidi che lo contenevano.

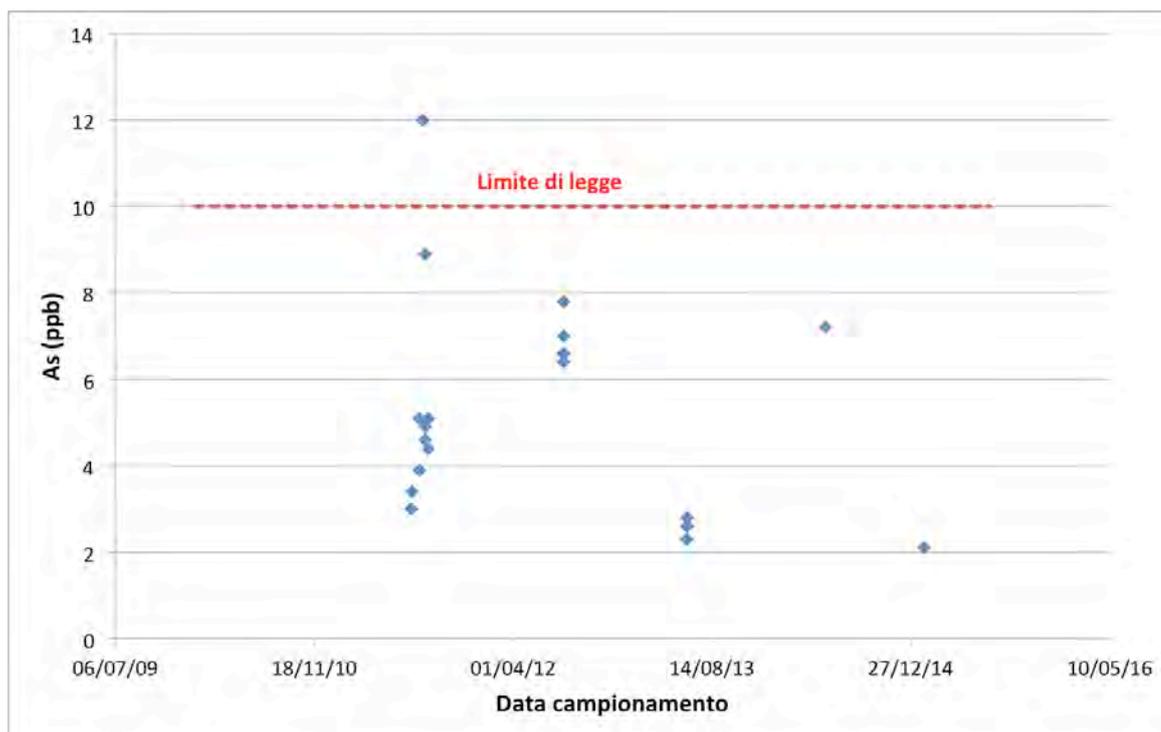


Figura 7.49: Variabilità dell'arsenico nel tempo (2010-2015).

Infine, nell'ultimo grafico (Fig. 7.50) si può osservare la variabilità del ferro.

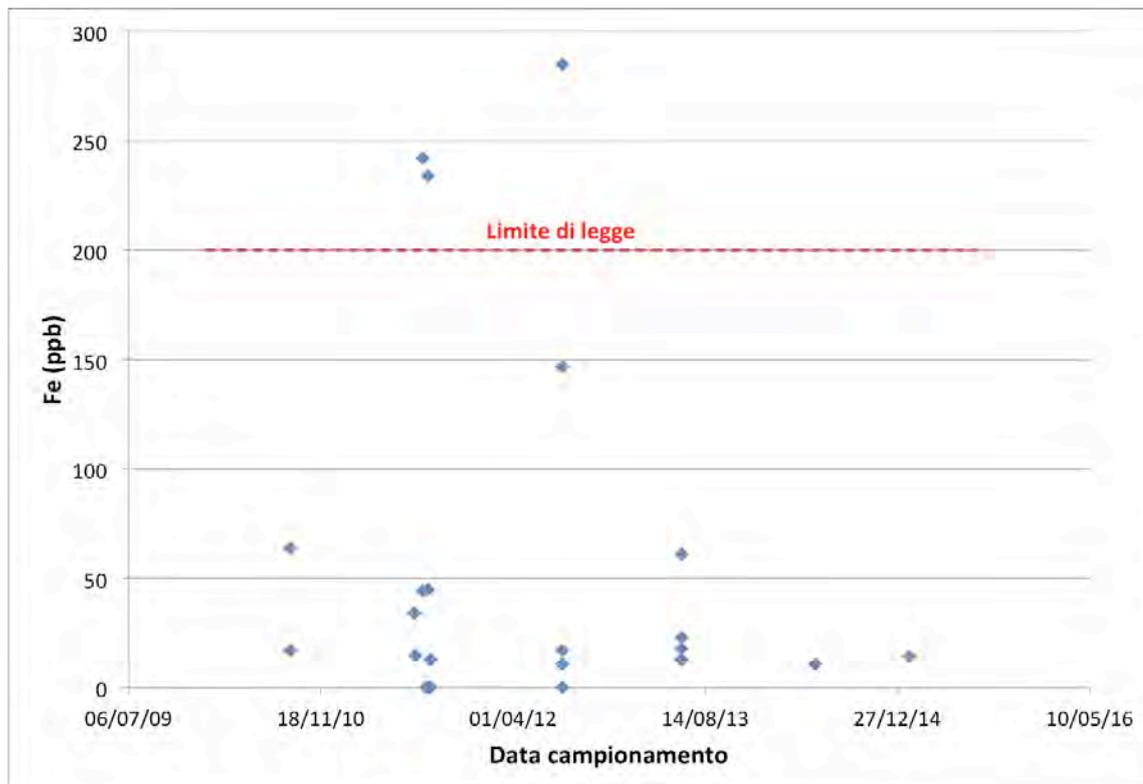


Figura 7.50: Variabilità del ferro nel tempo (2010-2015).

Anche per quanto riguarda il ferro si può osservare una certa variabilità e un superamento dei limiti di legge (200 µg/l) nel mese di Agosto negli anni 2010, 2011 e 2012.

Il ferro è un elemento molto comune nelle rocce e può trovarsi in natura sotto forma di ossidi e idrossidi. Solitamente il ferro risulta stabile come precipitato a pH basici, ma se si verificano fenomeni di diminuzione del pH si possono verificare fenomeni di dissoluzione dei composti contenenti ferro. Il ciclo del ferro influenza anche una serie di elementi potenzialmente tossici come lo stesso arsenico. Queste considerazioni sono comunque puramente indicative, in quanto non si conoscono i valori di pH dell'acqua al momento del prelievo dei campioni. Un ulteriore aspetto da non sottovalutare sono le stesse tubazioni sia del pozzo PN3, ma anche di tutti gli altri pozzi profondi e della rete di distribuzione, che risalgono alla metà degli anni '50, e potrebbero aver subito fenomeni di corrosione con rilascio di ferro nelle acque.

In tabella 7.20 sono riportati infine i dati raccolti nella campagna di gennaio per i restanti pozzi campionati, che permettono di fare ulteriori osservazioni:

- tutti e tre gli elementi risultano più abbondanti nei pozzi profondi rispetto a quelli superficiali;
- il ferro risulta assente nella maggior parte dei pozzi superficiali ad eccezione del PN16, PN18 e PN19, dove risulta presente ma in esigue concentrazioni;
- i campioni dei pozzi PN1 e PN2, presi alle profondità rispettivamente di 60 m e 67 m, risultano più ricchi in boro rispetto ai campioni più superficiali nei medesimi pozzi.

Codice	ppm B	ppb As	ppb Fe
pn1_35	2,207	16,6	1020
PN1_67	9,922	15,0	3209
PN2_40	0,503	<0,5	80
PN2_60	2,372	<0,5	154
PN3	0,134	2,1	15
PN4	0,075	0,95	< 1
PN8	0,088	1,35	< 1
PN11	0,078	0,8	< 1
PN12	0,123	<0,5	< 1
PN13	0,075	<0,5	< 1
PN16	0,061	3,7	2
PN17	0,349	1,5	< 1
PN18	0,081	0,5	1
PN19	0,291	2,8	3
PN20	0,371	1,2	< 1
PN22	0,415	0,65	< 1
PN23	0,074	<0,5	< 1
PN24	0,234	2,1	< 1
PN25	0,418	0,85	< 1
PN26	0,190	0,50	< 1
PN27	0,087	1,6	< 1
PN28	0,093	<0,5	< 1
PN29	0,477	1,2	< 1
PN31	0,230	1,7	< 1

**TABELLA 7.20: Concentrazioni di B, Fe e As nei pozzi campionati nella campagna di gennaio.**

Queste osservazioni per il boro portano probabilmente ad escludere per i pozzi profondi l'ipotesi che la presenza di tale elemento sia legata a fattori antropici e allo spray marino, poiché i pozzi superficiali, che interessano la falda freatica superficiale ad elevata vulnerabilità, risultano avere valori inferiori rispetto ai profondi. Tale evidenza potrebbe essere un indice per sostenere la tesi della presenza di acque più vecchie caratterizzate da un'importante salinità.

Anche per quanto riguarda l'arsenico probabilmente si può fare la medesima considerazione, data anche dalla variabilità di questo parametro per il pozzo PN3, come abbiamo visto in figura 7.49, che non può essere spiegata come effetto dell'attività antropica. Infatti, negli ultimi anni l'utilizzo di arsenico, vista la sua pericolosità, è andata diminuendo nel tempo. Per poter comunque affermare che la presenza di arsenico nelle acque sia di origine naturale, bisognerebbe conoscere con maggiore precisione la composizione mineralogica delle rocce.

Ciò nonostante la presenza di questi due elementi (B e As) nei pozzi superficiali

può comunque essere legata all'attività antropica svolta negli anni di massimo sfruttamento della colonia agricola, e per il boro anche alla dissoluzione di sali depositi del terreno “*spray* marino”.

Per quanto riguarda il ferro, salta all'occhio il valore elevatissimo di concentrazione nel pozzo PN1. È difficile spiegare tale fenomeno, che si verifica esclusivamente in questo pozzo, come legato ad un fattore naturale. Probabilmente tale valore potrebbe essere realmente legato a fenomeni di corrosione delle tubazioni del pozzo, connessi anche alla presenza di acqua con significativa salinità.

## 7.8 STUDIO ISOTOPICO

Per caratterizzare meglio i corpi idrici dell'isola sono stati analizzati i rapporti isotopici degli isotopi stabili della molecola d'acqua ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta\text{D}$ ).

Le variazioni di  $\delta^{18}\text{O}$  e di  $\delta\text{D}$  nelle acque naturali sono attribuibili alle diverse proprietà delle molecole “leggere” e “pesanti” dell'acqua durante i processi di evaporazione e condensazione. Questo perché, durante il ciclo idrologico, la composizione isotopica dell'acqua è condizionata da una serie di frazionamenti isotopici. Il frazionamento isotopico è fortemente influenzato dalla temperatura, con variazioni del contenuto isotopico delle acque in funzione dei fattori climatico-geografici.

La composizione isotopica delle precipitazioni è soggetta ad alcuni importanti effetti spaziali e temporali, tra cui la latitudine, la stagionalità e la quota, correlati alla variazione di temperatura. L'effetto “latitudine” si origina per la progressiva condensazione del vapore delle masse d'aria umide generate alle basse latitudini mano a mano che si spostano verso latitudini maggiori. Ciò determina una negativizzazione dei rapporti isotopici dall'equatore verso i poli. L'effetto “stagionalità” è legato alle differenti temperature di formazione delle precipitazioni. Per questo motivo, in una stessa area si registrano precipitazioni con contenuto isotopico più negativo nei mesi invernali, mentre le acque meteoriche dei mesi caldi risultano arricchite in isotopi pesanti e quindi più positive. Infine, l'effetto “quota”, con l'aumento della quota di precipitazione, ipotizzando un'infiltrazione in loco più o meno rapida, si osserva un progressivo impoverimento in isotopi pesanti. Questo impoverimento varia tra 0.1 e 0,5‰ per 100 m e deriva principalmente dal raffreddamento delle masse d'aria all'aumentare della quota.

Le variazioni del contenuto isotopico, legate ai processi di evaporazione e condensazione, risultano utili negli studi idrogeologici perché permettono di ottenere informazioni circa la quota dell'area di ricarica di un acquifero, la profondità del circuito idrogeologico, i tempi medi di residenza di acqua nel sottosuolo ed eventuali mescolamenti tra corpi idrici differenti. Una volta che l'acqua si infila infatti, non subisce più processi di frazionamento e la sua composizione isotopica, che deriva dalle acque di precipitazione al suolo, può

considerarsi conservativa. Infatti, l'interazione con materia organica e con diversi litotipi non influenza la composizione isotopica, ad eccezione dei processi geotermici.

$\delta D$  e  $\delta^{18}O$  delle precipitazioni risultano linearmente correlati (Craig, 1961; Dansgaard, 1964). Per questo motivo, a scala globale è stata definita la retta meteorica globale (GMWL,  $\delta D=8\delta^{18}O+10$ ). Questa linearità consente di evidenziare la presenza di fenomeni di evaporazione di un corpo idrico e meccanismi di interazione e mescolamenti tra acque di diversa origine.

In Tab. 7.21 sono riportati i rapporti isotopici relativi ai campioni raccolti durante la campagna di Gennaio 2015, nonché i valori delle acque di pioggia campionate da Novembre 2014 ad Aprile 2015.

Codice punto d'acqua	$\delta O18$	$\delta D$
pn1_35	-5,91	-36,65
PN1_67	-5,75	-36,66
PN2_40	-5,93	-36,70
PN2_60	-6,18	-37,39
PN3	-5,63	-35,16
PN4	-5,60	-34,97
PN8	-5,52	-34,53
PN11	-5,23	-31,61
PN12	-5,40	-33,93
PN13	-5,32	-33,43
PN16	-5,49	-34,31
PN17	-5,38	-32,75
PN18	-5,35	-33,34
PN19	-5,33	-33,25
PN20	-5,20	-32,09
PN22	-4,68	-29,06
PN23	-5,48	-35,66
PN24	-4,95	-30,06
PN25	-5,86	-35,80
PN26	-4,44	-24,91
PN27	-5,57	-33,97
PN28	-4,43	-26,74
PN29	-5,77	-36,32
PN31	-5,58	-34,35
PN32	-5,39	-33,33
PLP_nov14	-5,72	-33,75
PLP_dic14	-8,23	-53,10
PLP_gen15	-7,37	-45,35
PLP_feb15	-8,65	-56,38
PLP_mar15	-6,25	-37,64
PLP_apr15	-4,68	-32,05

TABELLA 7.21: Valori di  $\delta^{18}O$  e  $\delta D$ .

I contenuti isotopici variano rispettivamente da -4,43 a -8,65 per il  $\delta^{18}\text{O}$  e da -24,91 a -56,38 per il  $\delta\text{D}$ .

Con questi dati è stato costruito il diagramma binario  $\delta\text{D}$ - $\delta^{18}\text{O}$  (Fig. 7.51) sul quale sono state anche riportate le seguenti rette meteoriche:

- retta delle acque meteoriche globali (GMWL)  $\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$  (Craig, 1961; Dansgaard, 1964);
- retta delle acque meteoriche del Mar Mediterraneo (MWL)  $\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 15$  (Longinelli e Selmo, 2003)

Si può osservare che tutti i campioni di acqua e anche quelli della sorgente si distribuiscono in un'area limitata del grafico; in tale area si trovano anche le piogge di Marzo 2015 e di Novembre 2014. Le piogge di Gennaio 2015, Febbraio 2015 e Dicembre 2014 mostrano invece contenuti isotopici più negativi. Tale evidenza, può essere collegata al cosiddetto “effetto stagionalità”, come precedentemente discusso. Infine, le precipitazioni di Aprile 2015 risultano più ricche in isotopi pesanti rispetto alle altre.

Dall'analisi del grafico di figura 7.51 è possibile osservare che la maggior parte dei punti d'acqua si dispone lungo le rette meteoriche suddette, confermando un'origine meteorica delle acque. Tuttavia, alcuni campioni (PN28, PN22, PN24, PN20) si discostano da esse allineandosi verso la composizione isotopica dell'acqua di mare. Questo può essere dovuto sia ad un mescolamento con acqua di mare che a processi di evaporazione.

Il fenomeno di evaporazione, che interessa probabilmente alcuni pozzi, può essere legato alla pratica agricola in quanto l'irrigazione, con prelievo di acqua dalla falda, può generare una ricarica della falda stessa per percolazione dell'acqua in eccesso. Considerando che sull'isola gli apporti sono relativamente modesti questo fenomeno ne risulta accentuato. Inoltre, molti dei pozzi romani presentano un ampio diametro che potrebbe indurre fenomeni di evaporazione direttamente dal pozzo.

Sullo stesso grafico di figura 7.51 è stato riportato anche il punto rappresentativo del valore isotopico medio delle precipitazioni efficaci (triangolo verde) campionate sull'isola. Il valore isotopico medio delle acque di precipitazione efficace è stato calcolato tramite la media pesata delle precipitazioni efficaci e

dei propri contenuti isotopici. Nel calcolo della media sono state prese in considerazione soltanto le piogge che, secondo il bilancio idrico di Thornthwaite, riportato all'inizio di questo capitolo (Tab. 7.2), hanno alimentato la falda acquifera. Se si confronta tale valore isotopico medio delle precipitazioni efficaci ( $\delta D = -46,64$   $\delta^{18}O = -7,40$ ) rispetto ai contenuti isotopici delle acque sotterranee si osserva una notevole differenza. Ad ogni modo, i contenuti isotopici dei pozzi profondi e dei pozzi superficiali mostrano una sostanziale affinità che permette di affermare per entrambi i sistemi acquiferi la medesima alimentazione. Quindi, nonostante non si trovi una netta corrispondenza tra le precipitazioni efficaci e le acque sotterranee si può supporre che l'alimentazione sia comunque meteorica; infatti, l'elevata permeabilità delle calcareniti plioceniche, che caratterizzano quasi interamente la parte sommitale dell'isola, determinano un'elevata infiltrazione delle acque di precipitazione (naturalmente, come abbiamo già detto precedentemente, nei mesi in cui si verifica un'eccedenza idrica).

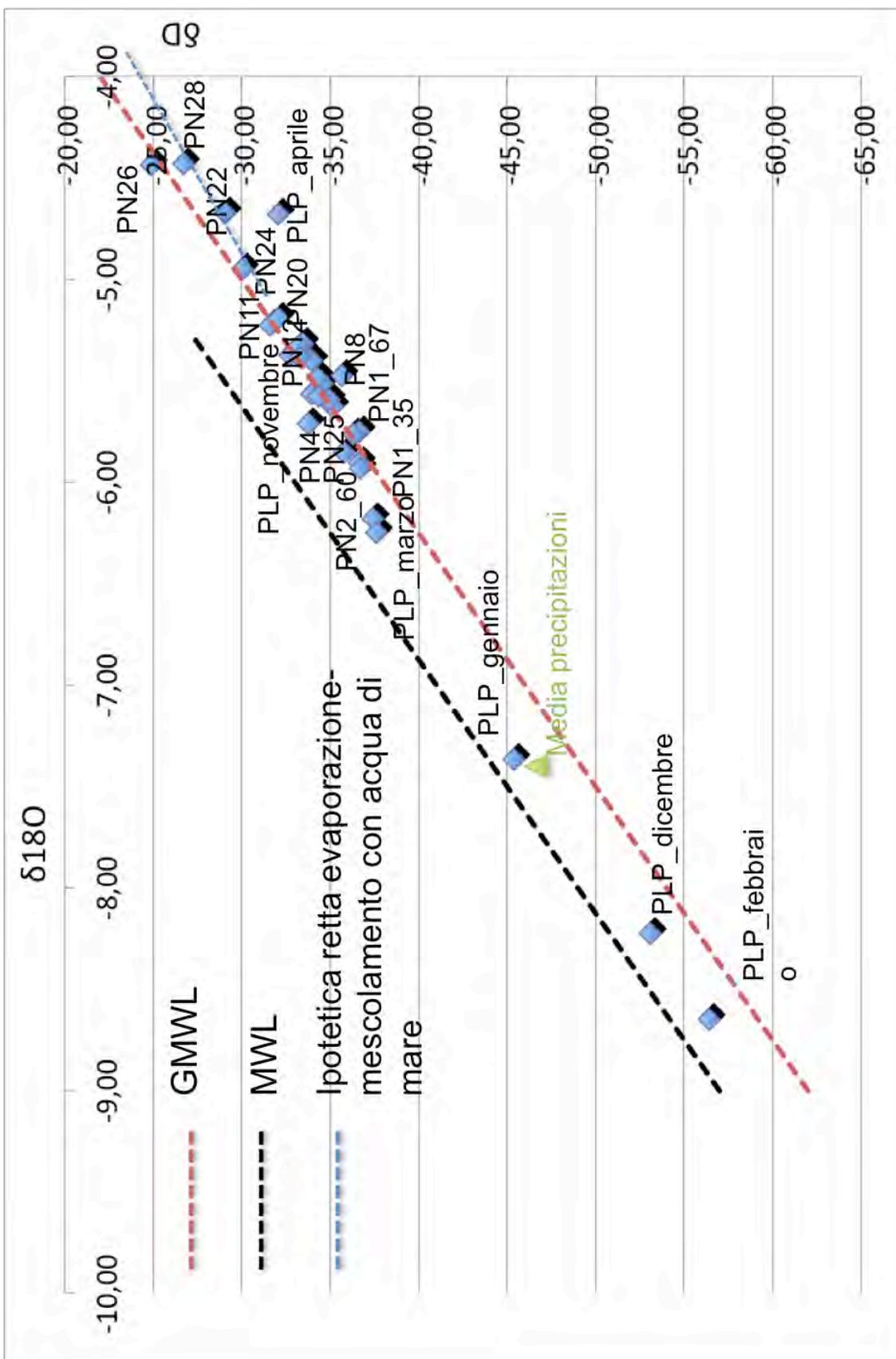


Figura 7.51: Diagramma  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$ , con riportata la composizione isotopica media delle precipitazioni efficaci, e le rette meteoriche GMWL (Retta meteorica mondiale) e MWL (Retta meteorica del Mar Mediterraneo).

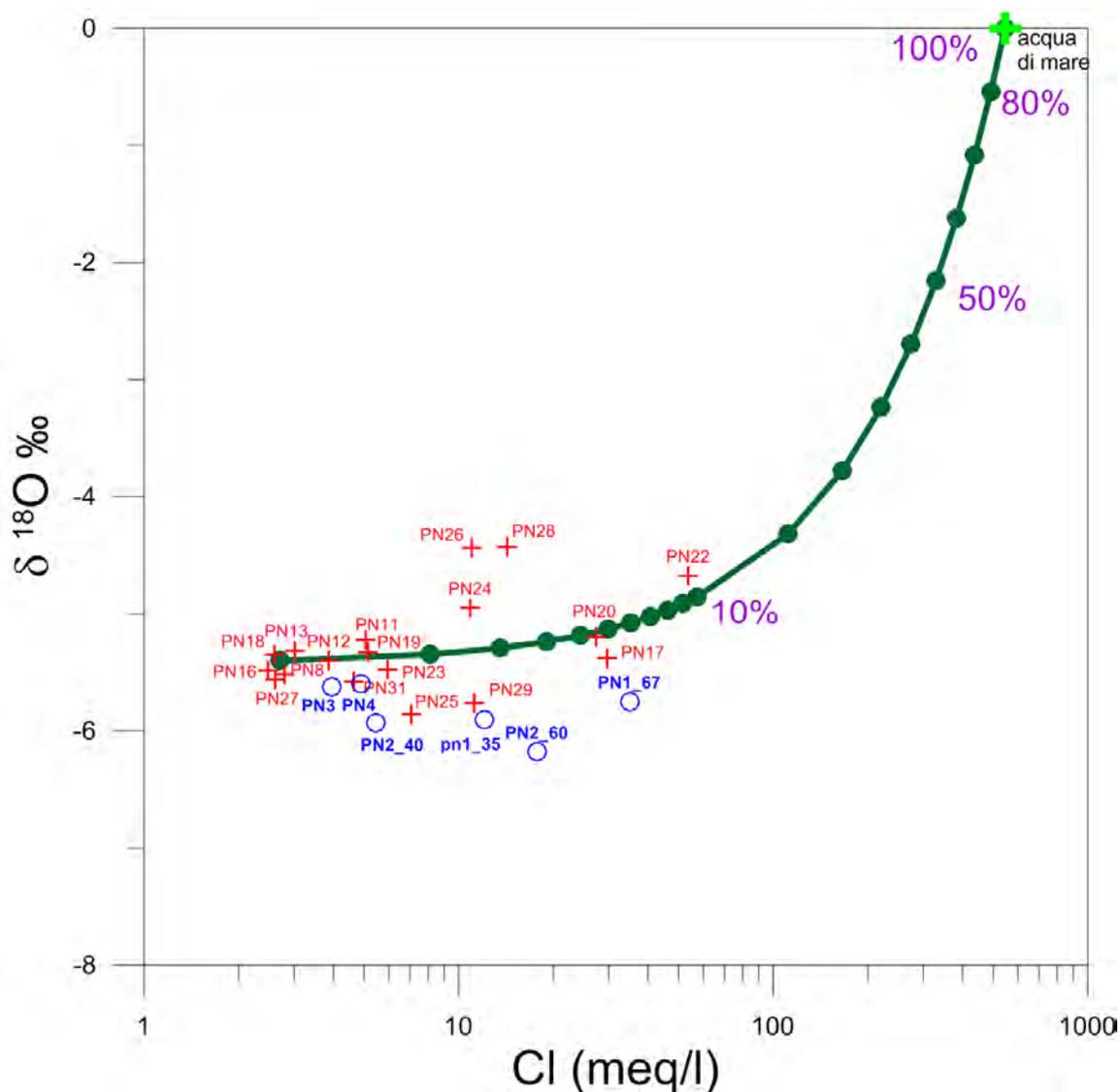


Figura 7.52: Diagramma Cl<sup>-</sup>- δ<sup>18</sup>O.

Infine, nel diagramma semilogaritmico di figura 7.52 si riportano le concentrazioni dei cloruri rispetto al rapporto isotopico  $\delta^{18}\text{O}$ , unitamente alla curva che mostra un mescolamento della falda in oggetto con l'acqua di mare. Tale curva è stata ottenuta calcolando un'ipotetica miscela tra le concentrazioni di  $\text{Cl}^-$  e i contenuti di  $\delta^{18}\text{O}$  delle acque rappresentative dell'acquifero in roccia (PN13, PN16, PN27 e PN18) e l'acqua di mare (546 meq/l e 0‰). Tale grafico viene spesso utilizzato in idrogeologia per verificare la presenza di un possibile mescolamento con acqua di mare e quantificarne l'entità. In particolare, si può osservare come per la maggior parte dei punti d'acqua la percentuale di acqua di mare sia <5%; i pozzi che presentano valori più elevati sono il PN22 (circa il

10%), il PN20 e il PN17 (intronano al 5%), che, come già visto in quasi tutti i diagrammi, mostrano evidenti fenomeni di mescolamento.

Per quanto riguarda invece, i pozzi che non si allineano con il possibile mescolamento si possono individuare differenti ragioni. Il PN24, PN26 e PN28 mostrano valori di  $\delta^{18}\text{O}$  più positivi rispetto agli altri pozzi, come già era stato evidenziato nel diagramma precedente, probabilmente per fenomeni di evaporazione. Anche il PN22 sembra subire leggeri fenomeni di evaporazione poiché, osservando il diagramma, risulta avere concentrazioni isotopiche di poco sopra la retta di mescolamento. Infine, PN25, PN29 e i pozzi profondi non si allineano sulla retta rappresentativa del mescolamento con acqua di mare, avendo un contenuto isotopico più negativo rispetto agli altri. Il loro elevato contenuto in cloruri non sembra quindi essere ascrivibile ad un mescolamento con acqua di mare, bensì potrebbe essere legato alla presenza di acque più vecchie caratterizzate da un'elevata salinità ma con contenuti isotopici più negativi.

Per verificare l'origine di queste acque sono fondamentali le analisi di Trizio, attualmente in corso, che permetteranno di datare le acque e quindi dare preziose informazioni a riguardo.

## **8. MODELLO IDROGEOLOGICO CONCETTUALE (STUDIO PRELIMINARE)**

Sulla base dei dati disponibili è stato possibile definire un modello idrogeologico concettuale in grado di fornire elementi utili sui meccanismi che regolano la circolazione idrica nel sottosuolo, sulle caratteristiche idrauliche del serbatoio sotterraneo, sulle fonti di ricarica e sui processi chimico-fisici attivi.

Il sistema acquifero dell'Isola di Pianosa è costituito da due differenti complessi idrogeologici: un acquifero freatico (calcareniti superficiali della Formazione di Pianosa, localmente si può trovare al di sopra anche la panchina tirreniana) e una serie di livelli acquiferi profondi in condizioni semi confinate-confinato, inclusi nella Formazione del Golfo della Botte. Il complesso idrogeologico superficiale poggia in discordanza angolare sugli orizzonti acquiferi profondi, immergenti verso ovest e intercalati a rocce impermeabili.

La direzione principale di deflusso idrico del sistema è da W verso SE, secondo la direzione di immersione del contatto tra le calcareniti permeabili e i litotipi miocenici scarsamente permeabili. In realtà, la presenza della sorgente presso il Golfo della Botte, indica l'esistenza anche di un debole flusso verso ovest (data la modesta portata della sorgente di Lavanderia Vecchia di circa 2 l/min). Per questo motivo, in prossimità della sorgente deve essere presente uno spartiacque idrogeologico (che i dati non hanno permesso di palesare), con probabile direzione nord-est/sud-ovest, che impone due direzioni preferenziali di flusso, una verso la costa orientale (flusso principale) e l'altro verso la costa occidentale, che alimenta la sorgente. La superficie piezometrica dell'acquifero freatico presenta un esteso minimo piezometrico nella zona orientale dell'isola. Per quanto riguarda invece i pozzi terebrati nei livelli acquiferi profondi risultano tutti al di sotto del livello del mare ad eccezione di uno.

I livelli acquiferi profondi sono caratterizzati da valori di trasmissività compresi tra  $1,4 \times 10^{-4}$  e  $5,1 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, e di coefficiente di permeabilità tra  $2,0 \times 10^{-5}$  e  $7,3 \times 10^{-5}$  m/s. Il valore del coefficiente d'immagazzinamento, dell'ordine di  $10^{-4}$  conferma le condizioni di confinamento della falda in pressione.

L'assetto strutturale della Formazione di Pianosa e della Formazione del Golfo della Botte suggeriva, già ipotizzato da Raggi (1983), un collegamento idraulico

tra i litotipi permeabili superficiali e quelli profondi. Tale collegamento è stato confermato anche in questo studio mediante il monitoraggio in continuo, le informazioni desunte dalla prova di emungimento e lo studio isotopico. Infatti, alcuni pozzi superficiali situati nella parte orientale dell'isola presentano variazioni del livello piezometrico in parte dovuti all'idrodinamica dell'acquifero freatico, in parte imputabili all'emungimento del pozzo profondo PN3, situato nel centro dell'isola. Ciò si riflette in una depressione piezometrica con valori mediamente al di sotto del livello del mare. Non è superfluo aggiungere che i pozzi superficiali di questa zona risultano in disuso da prima degli anni 2000, e quindi il minimo piezometrico non può essere spiegato a seguito dell'estrazione di acqua in questi punti, ma solo considerando il richiamo di acqua da parte del pozzo PN3. È altrettanto interessante notare come invece i pozzi superficiali posti a breve distanza dal pozzo PN3 non risultino condizionati dall'emungimento, confermando quindi come nella zona centrale dell'isola non sussista collegamento idraulico tra l'acquifero superficiale e quello profondo per effetto della presenza delle intercalazioni impermeabili (circa 28 m di spessore) nella Formazione del Golfo della Botte, che determinano condizioni di confinamento dell'acquifero profondo nella zona centrale dell'isola.

Si può pertanto concludere che l'emungimento di acqua nel pozzo PN3 non solo determina un abbassamento piezometrico nel livello conglomeratico da cui attinge, ma anche in quello freatico in corrispondenza del contatto tra i due nella porzione orientale dell'isola.

L'emungimento nel pozzo PN3 si risente anche nel PN2, che mostra valori piezometrici al di sotto del livello del mare, evidentemente perforato nel medesimo orizzonte produttivo, ma anche nel pozzo PN4. Quest'ultimo, tuttavia, presenta un livello piezometrico ben al di sopra del livello del mare (+3,11), probabilmente perché tale pozzo, come detto in precedenza, non solo interessa il livello acquifero da cui emunge il pozzo PN3, ma anche un ulteriore livello attualmente non sfruttato, il quale ne determina un valore piezometrico maggiore. In figura 8.1 si riporta uno schema del possibile assetto idrodinamico dell'acquifero.

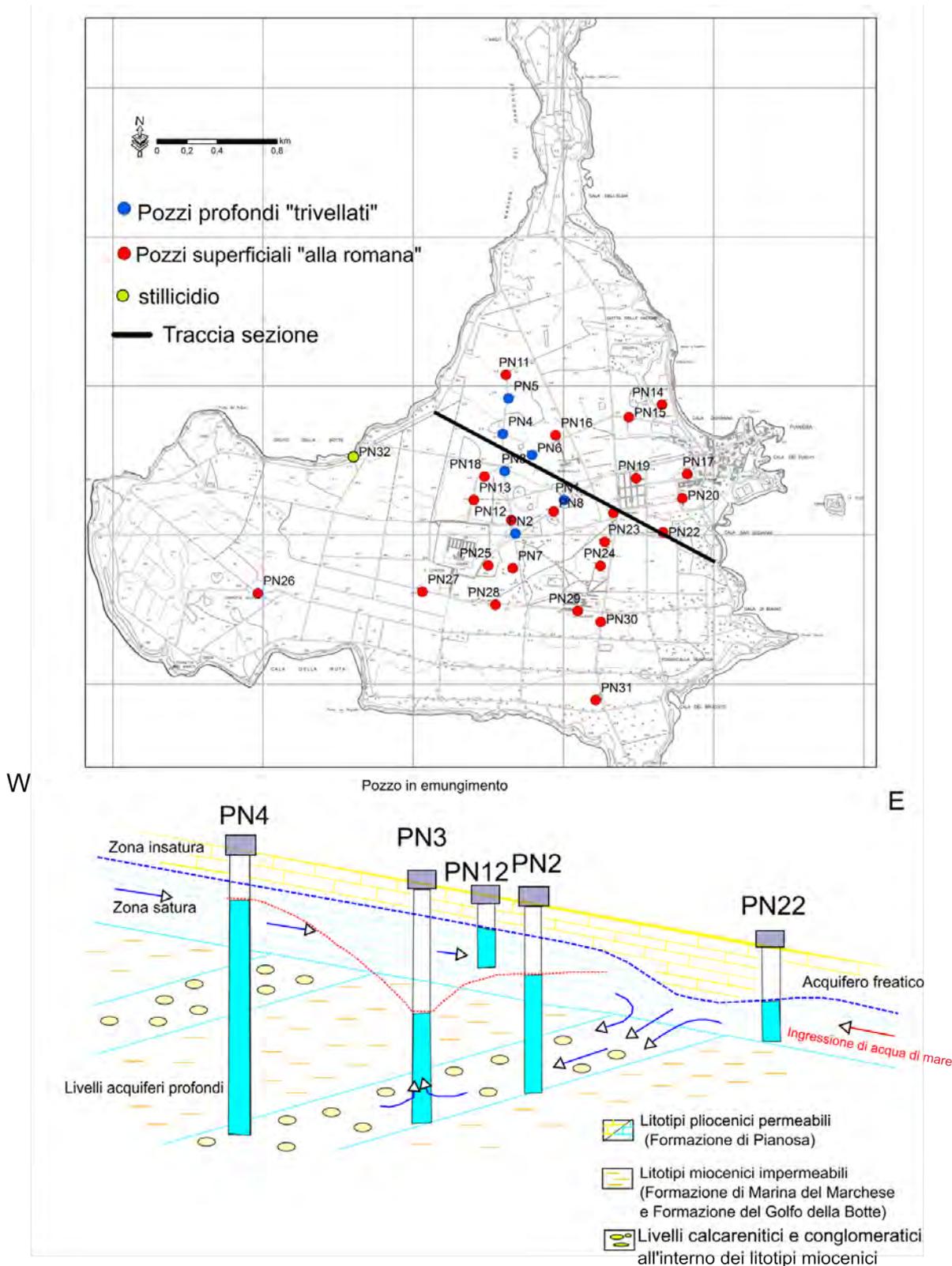


Figura 8.1: Carta dei pozzi e schema idrodinamico del sistema acquifero dell'isola. In giallo è riportata la zona insatura all'interno delle rocce calcarenitiche, mentre la zona in azzurro indica l'acquifero freatico superficiale. Sono poi riportati i livelli acquiferi profondi in azzurro (spessori desunti da stratigrafie pozzi), immergenti verso ovest, mentre in arancione sono riportate le rocce impermeabili. In rosso è riportata il livello piezometrico dell'orizzonte conglomeratico dal quale emunge il pozzo PN3 e il tratteggio blu rappresenta il livello piezometrico dell'acquifero freatico (Appendice VI).

L'interconnessione tra i due complessi acquiferi consente, grazie al particolare assetto idrostrutturale, la ricarica dei livelli conglomeratici ad opera della falda freatica superficiale. Tale alimentazione è anche confermata dal confronto tra i rapporti isotopici ( $\delta D$  e  $\delta^{18}O$ ) delle acque dei pozzi superficiali e profondi, che mostrano una sostanziale affinità. La ricarica dei complessi acquiferi avviene ad opera della infiltrazione diretta locale delle precipitazioni, seppur scarse. L'acquifero superficiale, in presenza di precipitazioni efficaci (che generalmente si hanno nel periodo invernale-inizio primavera), subisce una ricarica quasi immediata, data la sua permeabilità, mentre per i livelli acquiferi profondi le condizioni di locale confinamento generano tempi più lunghi.

L'interconnessione tra i due acquiferi nella parte orientale dell'isola, dove le calcareniti della Formazione di Pianosa si ritrovano anche al di sotto del livello del mare, favorisce inoltre il fenomeno di intrusione marina. L'emungimento, infatti, seppur concentrato sui pozzi profondi, determina una riduzione del carico idraulico nell'acquifero freatico, inducendo quindi un richiamo di acqua di mare nel sistema. Nell'area orientale dell'isola, in corrispondenza della depressione piezometrica, si osservano valori significativi di conducibilità elettrica (4.000-6.000  $\mu s/cm$ ) che confermano la presenza di acqua salmastra in acquifero.

In figura 8.2 si riporta il possibile schema della circolazione idrica sotterranea.

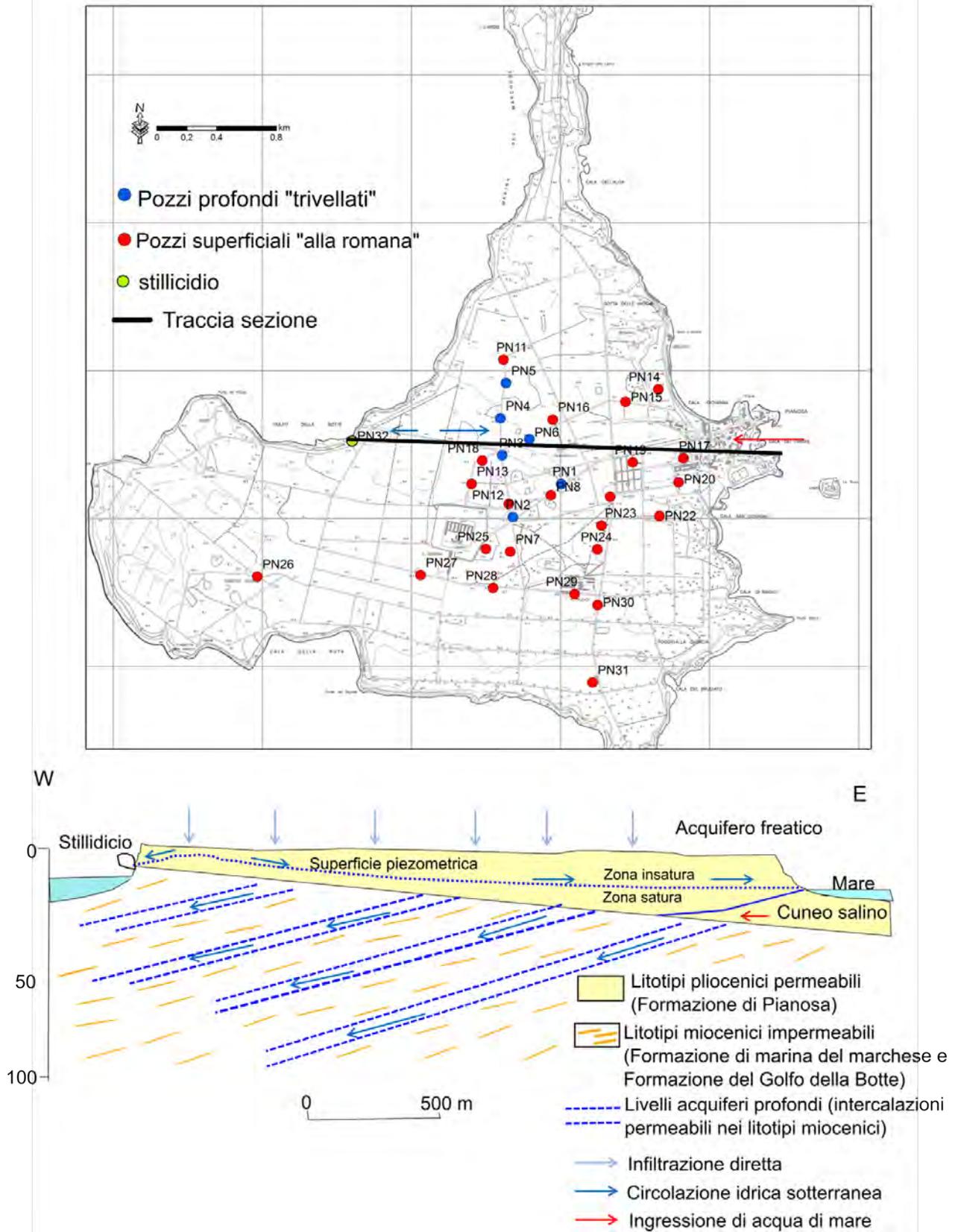


Figura 8.2: Sezione schematica della circolazione idrica dell'Isola di Pianosa (la traccia è visibile nella carta topografica in alto). In giallo è riportato l'acquifero freatico, mentre in arancione gli orizzonti impermeabili miocenici. Sono inoltre riportati in azzurro i livelli acquiferi profondi immergenti verso ovest.

Il fenomeno dell'intrusione marina risulta attualmente abbastanza limitato, coinvolgendo soltanto la zona orientale dell'isola, e di entità non troppo rilevante (soltanto in tre pozzi è stata quantificata acqua salata in acquifero nell'ordine del 5%). Anche nei pozzi profondi è stata riscontrata una certa salinità, con aumento della conducibilità elettrica con la profondità. Tuttavia, questo fenomeno non è attribuibile all'intrusione marina, infatti, nonostante l'interconnessione idraulica tra i due sistemi acquiferi mediante lo studio geochimico-isotopico è stato accertato che i valori elevati di Na, Cl e B riscontrati in queste acque non sono dovuti ad interazione con acqua di mare, ma probabilmente ad acque più vecchie caratterizzate da una certa salinità e con significative concentrazioni di alcuni metalli pesanti (Fe e As). Tale fenomeno è stato riscontrato anche durante l'emungimento; infatti, al procedere dell'emungimento si è verificato un cambiamento della composizione chimica delle acque con un aumento in Na, Cl e B rispetto alle condizioni iniziali. L'origine e la circolazione di queste acque è tuttora da definire.

È stata evidenziata anche la presenza di ulteriori processi chimico-fisici attivi nel sistema, quali processi di riduzione solfato-batterica e di riduzione dei nitrati rilevata in alcuni pozzi. Inoltre, in alcuni pozzi, in particolare all'interno di poderi che negli anni di intensa attività del carcere sono stati ampiamente interessati da attività agricola o di allevamento, è stata diagnosticata la presenza in falda di elementi inquinanti quali K e NO<sub>3</sub>.

La presenza di acque inquinate è dovuta alla elevata vulnerabilità dell'acquifero freatico, il quale oltre a presentare una permeabilità elevata è spesso privo di terreni di copertura o questa mostra modesti spessori.

Nel complesso le acque dell'Isola di Pianosa sono state classificate come appartenenti ad una *facies* intermedia tra bicarbonato-calcica, tipica di acque circolanti in acquiferi carbonatici, e clorurato-sodica, legata sia alla presenza di fenomeni di mescolamento con acqua di mare (nella zona orientale dell'isola) sia all'influenza dello "spray marino". Infatti, nella maggior parte dei pozzi le acque mostrano comunque una conducibilità elettrica superiore a 1.000 µs/cm, legata verosimilmente proprio all'influenza dello "spray marino" che, data la piccola estensione areale dell'isola, interessa tutto il territorio.

Lo studio isotopico ha inoltre evidenziato per alcuni pozzi superficiali fenomeni di evaporazione. Tale fenomeno può essere legato sia alla pratica agricola, in particolare all'irrigazione che può generare ricarica della falda stessa per percolazione dell'acqua in eccesso, sia al fatto che questi pozzi presentano grandi diametri e quindi sono maggiormente esposti alle variazioni termiche superficiali. È proprio quest'ultima l'ipotesi più realistica considerando che attualmente le pratiche agricole sono molto limitate.

Nel complesso risulta come il sistema acquifero dell'Isola di Pianosa sia abbastanza produttivo e sostenibile viste le attuali idroesigenze, anche se presenta delle criticità legate alla sua vulnerabilità, sia per fenomeni di intrusione marina, sia legati all'inquinamento antropico.

## 9. CONCLUSIONI

Lo studio del sistema acquifero dell'Isola di Pianosa, condotto attraverso metodologie idrogeologiche ed idrogeochimiche-isotopiche, ha permesso di fornire informazioni aggiuntive a supporto della definizione del modello idrogeologico concettuale. In particolare, sono stati caratterizzati in modo abbastanza dettagliato i due sistemi acquiferi, soprattutto per quanto riguarda la circolazione idrica nel sottosuolo e sono stati evidenziati eventuali problemi di inquinamento di origine antropico o per effetto dell'intrusione marina.

Dal modello idrogeologico di sottosuolo definito si evince come la circolazione delle acque sotterranee sia sostanzialmente controllata dall'assetto idrostrutturale e dalla idrodinamica legata allo sfruttamento della risorsa idrica. I valori isotopici delle acque sotterranee, in accordo con l'assetto piezometrico, indicano un'alimentazione dei livelli acquiferi profondi a partire dall'acquifero freatico superficiale per infiltrazione meteorica diretta.

Lo studio ha anche messo in evidenza, confermando studi pregressi (Raggi, 1983; Nicotra, 2008; Doveri et al., 2012) una certa salinità delle acque dell'acquifero freatico, in particolare nella porzione orientale dell'isola, legati a fenomeni di intrusione marina e ad interazione con lo “*spray* marino” che determinano una *facies* chimica delle acque sotterranee intermedia tra bicarbonato-calcica e clorurato-sodica. Infine, sono stati riconosciuti fenomeni di inquinamento legati alle pregresse attività agricole e zootecniche, attualmente tuttavia poco praticate.

Dal punto di vista geochimico, questo studio, a confronto con quello condotto nel 2006-2007, non ha mostrato grandi variazioni in termini di qualità delle acque.

Il modello concettuale ricostruito, pur già significativo, presenta comunque dei limiti oggettivi che potranno essere migliorati in futuro:

- l'assetto geologico-strutturale è stato ricostruito sulla base dei dati esistenti, derivanti dai rilievi di superficie e dalla perforazione dei 6 pozzi profondi;
- non sono disponibili al momento dati sulla parametrizzazione idraulica dell'acquifero freatico, che sono in corso di acquisizione ed elaborazione;
- la parametrizzazione idraulica del sistema acquifero profondo è stata

ottenuta con una sola prova di emungimento, peraltro effettuata con portata non troppo elevata, necessariamente legata alle caratteristiche della pompa esistente nel pozzo;

- durante l'elaborazione della prova di emungimento sono state effettuate alcune assunzioni (ad. esempio, aver assunto costante lo spessore dell'acquifero);
- sebbene i dati della prova di emungimento e del monitoraggio in continuo confermino che risente dell'emungimento del pozzo PN3, il pozzo PN4 presenta rispetto a quest'ultimo e al PN2 caratteristiche chimiche delle acque differenti. Infatti, non è stata riscontrata per questo pozzo una stratificazione della falda in riferimento alla salinità, presente invece negli altri due. Questo è un aspetto da chiarire, in quanto è stato riscontrato che le acque del pozzo PN3 si arricchiscono in Na, Cl e B al procedere dell'emungimento, indicando come a seguito di un emungimento prolungato vengano richiamate nel sistema acque relativamente più salate. Bisogna comunque tenere presente che il pozzo PN4 risulta aver subito fenomeni di collasso, quindi attualmente non si può escludere la presenza di una stratificazione della salinità a profondità maggiori di quelle raggiunte con il campionamento. È comunque necessario capire se effettivamente il pozzo PN4 risponde perché intercetta il medesimo livello acquifero, o se la perturbazione indotta dall'estrazione di acqua si propaga ad esempio per richiamo dall'acquifero freatico nella zona orientale dell'isola;
- la presenza in profondità per i pozzi profondi PN1, PN2 e PN3 di acque arricchite in alcuni metalli pesanti (Fe e As) e caratterizzate da un aumento in Na Cl e B è da chiarire. Lo studio isotopico ha infatti escluso che si tratti di un fenomeno di intrusione di acqua di mare. L'ipotesi sostenuta in questo studio è la presenza di acque più vecchie ricche in metalli pesanti e caratterizzate da una maggiore salinità. Questa ipotesi potrebbe essere smentita o confermata a seguito delle analisi, attualmente in corso, del Trizio, le quali permetteranno di stabilire l'età di queste acque;

- dal punto di vista idrico, il bilancio idrogeologico eseguito sembra indicare che l'isola risulti ecosostenibile per una popolazione di circa 5.000 persone; in realtà un marcato sfruttamento potrebbe indurre problemi di disponibilità idrica, in quanto la ricarica degli orizzonti profondi, data la complessa idrostruttura, avviene con tempi più o meno lunghi difficilmente quantificabili. Inoltre, un maggiore sfruttamento indurrà sicuramente fenomeni di intrusione marina più accentuati che limiterebbero quindi la risorsa disponibile, come del resto è avvenuto in un recente passato quando l'isola era abitata da oltre 1.500 persone.

Il modello concettuale risulta quindi ancora preliminare seppur utile nel dare indicazioni sulle modalità di sfruttamento e sulle possibili criticità. Attraverso ulteriori studi può essere tuttavia certamente migliorato. In particolare, sarebbe utile conoscere più approfonditamente il sottosuolo dell'isola attraverso prove geognostiche dirette, con ad esempio una serie di sondaggi a carotaggio continuo per definire più precisamente l'assetto idrostrutturale dell'isola. I sondaggi a carotaggio continuo potrebbero essere integrati da indagini geofisiche, quali indagini geoelettriche (alcune per la verità già testate ed in corso di elaborazione) e sismiche. Inoltre, nei fori di sondaggio, attrezzati a piezometri, e in alcuni pozzi superficiali esistenti sarebbe utile eseguire prove di permeabilità per precisare la parametrizzazione idraulica di entrambi i sistemi acquiferi in termini di trasmissività, coefficiente di permeabilità e coefficiente di immagazzinamento. In questo senso, sarebbero necessarie ulteriori e più adeguate prove di emungimento di lunga durata sia nei nuovi piezometri che nei pozzi esistenti, profondi e superficiali. Al fine di definire meglio i rapporti esistenti tra l'acquifero freatico e quello profondo dovrebbero poi essere predisposte prove di tracciamento.

Tutti i dati potrebbero confluire nell'impostazione del modello idrogeologico numerico del sistema acquifero sia di flusso che di trasporto, strumento estremamente utile, se correttamente impostato o basato su un robusto *set* di dati, nella comprensione di come si propagano le perturbazioni idrodinamiche e idrochimiche nel sistema e per quantificare la disponibilità idrica dell'isola.

Il modello numerico può fornire importanti indicazioni sulla dispersione di sostanze potenzialmente contaminanti e sull'evoluzione spazio-temporale

dell'intrusione marina, che determinerebbe un deterioramento della qualità della risorsa.

Nel complesso, si può affermare come l'Isola di Pianosa sia caratterizzata da un sistema acquifero piuttosto vulnerabile sia per fenomeni di intrusione marina, sia per l'attività antropica. Per questo motivo, lo sviluppo turistico o anche la stessa eventuale espansione del sistema penitenziario devono essere necessariamente precedute dall'accertamento della sostenibilità del sistema con strumenti adeguati quali possono essere gli studi idrogeologici-idrogeochimici-isotopici di dettaglio, a supporto di una efficace modellizzazione numerica.

Concludendo grazie ai dati raccolti è stato possibile:

- definire la circolazione idrica sotterranea, individuando le principali direzioni di deflusso idrico (flusso principale verso sud-est e flusso secondario verso w);
- stimare il bilancio idrologico per il quarantennio 1960-2002 e per l'anno 2014-2015;
- parametrizzare per la prima dal punto di vista idraulico i livelli acquiferi profondi (dotati nel complesso di una buona trasmissività e permeabilità);
- evidenziare la presenza di una connessione idraulica tra i due complessi acquiferi nella zona orientale dell'isola;
- caratterizzare da un punto di vista idrogeochimico-isotopico le acque sotterranee e di precipitazione;
- individuare la presenza di fenomeni di intrusione marina (costa orientale), di contaminazione antropica (attività agricola o zootecnica);
- individuare in profondità per i pozzi profondi acque più vecchie caratterizzate da una significativa salinità.

Tutti i dati raccolti sono stati utilizzati per la ricostruzione di un modello idrogeologico del sistema acquifero dell'Isola di Pianosa.

## **BIBLIOGRAFIA**

ARIGOLI D., COLTORTI M., D'OREFICE M., DRAMIS F., FEDERICI P.R., FORESI L.M., GRACIOTTI R., IOTTI A., MOLIN P., MORETTI S., PAPPALARDO M., PIERANTONI P.P., PIERUCCINI P., RIBOLINI A. e TARCHIANI U. (2009) – Carta geomorfologica dell'Arcipelago Toscano. Memorie Descrittive. Carta Geologica d'Italia, vol. 86, p. 7-107.

ASSOCIAZIONE PER LA DIFESA DELL'ISOLA DI PIANOSA - <http://www.associazionepianosa.it/>.

BARTOLOZZI CASTI G. (1994) – Da archivi romani documenti inediti per la storia di Pianosa e dello Stato di Piombino feudo Boncompagni. Studi Romani, Anno XLII, nn 3-4, Roma.

BENVENUTI PAPI A. (1996) – Breve storia dell'Elba. Pacini editore, Pisa, pp.132.

BETTI CARBONCINI A. (1999) – Le linee di navigazione marittima dell'Arcipelago Toscano dal 1847 ai giorni nostri. Grafiche Calosci, Cortona, pp. 304.

BOCCINI L. (2013) – Relazione tecnica, esecuzione di n°2 video ispezioni in pozzo. Isola di Pianosa, comune di Campo nell'Elba, pp.4.

BOSSIO A., CORNAMUSINI G., FERRANDINI J., FERRANDINI M., FORESI L.M., MAZZANTI R., MAZZEI R. e SALVATORINI G. (2000) – L'evoluzione sedimentaria neogenica dell'area tirrenica settentrionale (Toscana Marittima, Isola di Pianosa, Bacino di Aléria). Atti del Congresso Environnement et Identité en Méditerranée Imprimerie Pierre-Dominique Sammarcelli, Biguglia, p. 72-79.

CARNAMUSINI G., FORESI L.M., DALL'ANTONIO B., BOSSIO A., MAZZEI R. e SALVATORINI G. (2014) – The miocene of Pianosa Island: Key to understanding the opening of the Northern Tyrrhenian back-arc basin (Central Mediterranean). *Journal of the Geological Society, Londra*, vol. 10, p. 2-18.

CATERINI F. (1921) – Resti fossili di uccelli della breccia ossifera del Monte Argentario e del deposito quaternario dell'isola di Pianosa (Arcipelago Toscano, Mar Tirreno). *Giornale di Geologia*, vol. 39, p. 287-302.

CELICO P. (1986) – Prospezioni idrogeologiche. I volume, Liguori editore, pp. 736.

CELICO P. (1988) – Prospezioni idrogeologiche. II volume, Liguori editore, pp. 536.

CIVITA M. (2005) – Idrogeologia applicata e ambientale. Casa editrice Ambrosiana, Milano, p.794.

CHIERICI G. (1875) – Antichi monumenti della Pianosa. *Bollettino di Paleontologia italiana*, III volume. Ristampa a cura di L. Totaro e G. Soria, CSDE, Portoferraio, 1995, pp.100.

COLLANTONI P e BORSETTI A.M. (1973) – Geologia e stratigrafia dell'Isola di Pianosa (Arcipelago Toscano – Mar Tirreno). *Giornale di Geologia*, fascicolo 1, p.287-302.

COLOMBO M. e FORESI F.A. (2002) – Pianosa. Bandecchi e Vivaldi, Pontedera, pp.210.

COOPER H.H. e JACOB C.E. (1946) – A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Geophysical, Union Transactions*, vol.27, p. 526-534.

CRAIG H. (1961) – Isotopic variations in meteoric water. *Science*, vol.133, p. 1702-1703.

CRAIG H. (1961b) - Standards of reporting concentrations of Deuterium and Oxygen-18 in natural waters. *Science*, 133, 1833-1834.

D'ALBERTIS E. (1878) – La crociera del *Violante*. Genova, *Annali del Museo Civico di Scienze Naturali*, pp366.

DANSGAARD W. (1964) – Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, vol.16, p. 436-468.

DECRETO LEGISLATIVO 3 APRILE 2006, n.152 (2006)- Norme in materia ambientale. *Gazzetta ufficiale* n.88, 14 Aprile 2006.

DIONEX (1998) – Ion chromatograph operator's manual. Dionex corporation pp. 1-162.

DOVERI M., GIANNECCHINI R., MUSSI M., NICOTRA I. e PUCCINELLI A. (2012) – Aspetti geologici e idrogeologici del peculiare acquifero dell'isola di Pianosa (Arcipelago Toscano). *Giornale di Geologica Applicata*, vol.15, p. 17-30.

DUCCI SANNA RANDACCIO S. (2000) – La neolitizzazione dell'Arcipelago Toscano: alcuni dati di recente acquisizione. *La neolitizzazione tra Oriente e Occidente*, Convegno di studi (Udine 1999). Udine, p. 333-340.

EPA (1991) – Test method: the determination of inorganic anions in water by ion chromatography. Method 300.0.

FORESI F.A. (2003) – Il Porto di Pianosa. Dall'epoca romana a oggi. Il Tagliamare Editore, seconda edizione 2003, pp.84.

FORESI L.M, CORNAMUSINI G., BOSSIO A., MAZZEI R., SALVATORNI G. e ARGENTI P. (2000) – La successione miocenica dell'Isola di Pianosa nel Mar Tirreno settentrionale. Atti del congresso Environnement et Identité en Méditerranée Imprimerie Pierre-Dominique Sammarcelli, Biguglia, p. 175-178.

GIOLI G. (1889) – Briozoi neogenici dell'Isola di Pianosa nel Mar Tirreno. Atti della società geografica italiana vol.10, p. 251-266.

GRACIOTTI R., FORESI L.M. e PANTALONI M. (2003) – Caratteristiche geomorfologiche dell'Isola di Pianosa (Arcipelago Toscano). Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, vol. 108, p. 95-111.

ISPRA:<http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/suolo-e-territorio-1/lineamenti-geologici-e-geomorfologici-dellisola-di-pianosa/default>.

KÖPPEN W. (1936) – Das geographische system der kilmate. Berlino, p. 1-44.

LA BOLINA J. (1914) – L'Arcipelago Toscano. Istituto Italiano di Arti Grafiche, Bergamo, pp.130.

LANGELIER W. e LUDWING H. (1942) – Graphical methods for indicating the mineral character of natural water. Water association vol. 34, p. 335-352.

LONGINELLI A. e SELMO E. (2003) - Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map. Journal of Hydrology 270 75–88.

MACKENZIE-GRIEVE A. (1964) – *Aspect of Elba*. Londra, Cape, pp.228.

MASINI R. (1953) – Note geoidrologiche sui nuovi pozzi dell’Isola di Pianosa dell’Arcipelago Toscano. Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, vol LX serie A, p. 1-10.

MELLINI V. (1914) – L’Isola dell’Elba durante il governo di Napoleone I. Nuovo Giornale. Ristampa con il titolo “Napoleone all’Isola dell’Elba”, Olschki editore, Firenze 1962.

NEVIANI A. (1902) - I briozoi pliocenici e miocenici di Pianosa. Bollettino Società Geografica Italiana, vol. 21, p 329-343.

NINCI G. (1815) – Storia dell’Isola dell’Elba. Ristampa Portolongone, Arnaldo Forni editore 1988, pp. 66.

NICOTRA I. – Tesi di Laurea “Studio idrogeologico e idrogeochimico del sistema acquifero dell’isola di Pianosa. Università di Pisa, anno accademico 2006-2007.

NICOTRA I.; PRIMO VACCARI F. e CRISCI A. (2008) – Analisi climatica dell’Isola di Pianosa. Codice Armonico, anno 2008, p. 94-102.

PAGLIALUNGA L. (1993) – Paleobiologia dei reperti scheletrici umani dell’Isola di Pianosa – loc. La Scola (LI). In Preistoria e Protostoria in Etruria. Atti del I Incontro di studi (Manciano – Farnese 1991). Milano, p. 173-178.

PIGA P.; FORESI F.A. (2014) – L’Isola di Pianosa. II Edizione Debate, Livorno, pp.119.

PINNA M. e VITTORINI S. (1985) – Contribuito alla determinazione dei regimi pluviometrici in Italia. Contributi di climatologia. Memorie della Società Geografica Italiana, vol. 39, p. 147- 167.

PIPER A.M. (1944) – A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Geophysical, Union Transactions, vol.25, p. 914-923.

PROVINCIA DI LIVORNO (1999- 2002) – Rapporto sulle risultanze delle campagne d'indagine dal Maggio 1999 al Luglio 2002. Valutazione sulla situazione idrogeologico sull'Isola di Pianosa. Rapporto tecnico.

RAGGI G. (1983) – Le acque del sottosuolo dell'Isola di Pianosa. Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, vol. 90, p. 75-84.

RAPETTI F. e VITTORINI S. (2012) – Carta climatica della Toscana centro-meridionale e insulare. CNR Centro di studio per la Geologia Strutturale e Dinamica dell'Appennino.

RAPETTI F. e VITTORINI S. (2012) – Note illustrative della carta climatica della Toscana. Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, p. 117-119.

REGIONE TOSCANA:

<http://web.rete.toscana.it/pta/servlet/Scarica?foglio=328>

REGIONE TOSCANA:

<http://web.rete.toscana.it/pta/servlet/Scheda?foglio=341>

SANACORE M. (1991) – La privatizzazione di Pianosa nella prima impresa capitalista agraria di Livorno. Studi livornesi VI. Ugo Bastogi Editore, Livorno, pp.426.

SANTORO M. (1970) – Sull'applicabilità della formula di Turc per il calcolo dell'evapotraspirazione effettiva in Sicilia. Atti del convegno, acque del sottosuolo, Palermo, pp.15.

SCHMIEDT G. (1972) – Il livello antico del Mar Tirreno. Arte e Archeologia studi e documenti. Firenze, Leo S. Olschki, vol.4, pp.323.

SIMONELLI V. (1889) – Terreni fossili dell'Isola di Pianosa nel Mar Tirreno. Bollettino della Società Geografica Italiana, vol. 10 (2°serie), p. 193-237.

SMALL H.; STEVENS T. e BAUMAN W.C. (1975) – Novel ion exchange chromatographic method using conductometric detection. Analytical chemistry, vol.47, p. 1801-1809.

SOMMIER S. (1909) – L'isola di Pianosa nel Mar Tirreno. Rivista Geografica Italiana vol. 16, p. 585-606

VITTORINI S. (1976) – Le condizioni climatiche dell'Arcipelago Toscano. L'Universo, vol. 56, p. 147-176.

TACITO – Annales. I, 3.1 e 5.1.

THEIS C.V. (1935) – The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of well using groundwater storage. Geophysical, Union Transactions, vol. 16, p.519-524.

THORNTHWAITE C.W. (1948) – An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Review, vol. 38, p. 55-94.

THORNTHWAITE C.W. e MATHER J.R. (1957) – Instruction and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Publications in Climatology, Centerton, New Jersey, vol.10, p. 55-94.

VARRONE – De re rustica. III,6.

ZUCCAGNI-ORLANDINI ATTILIO (1836) – Topografia fisico-storica dell'Isola di Pianosa del Mar Toscano. Firenze, pp.37.

## **RINGRAZIAMENTI**

*Innanzitutto desidero ringraziare il Professor Roberto Giannecchini e la Dottoressa Matia Menichini, relatori di questa tesi, ed il Dottor Marco Doveri, correlatore, per la grande disponibilità e cortesia dimostratami, e per tutto l'aiuto fornito durante le campagne d'indagini e durante la stesura di questa tesi.*

*Intendo poi ringraziare le guardie penitenziare in presidio sull'isola, che con il loro aiuto e disponibilità hanno reso il soggiorno sull'isola e la raccolta dei dati possibile e piacevole.*

*I ringraziamenti più grandi vanno a mia mamma e mio papà, che con il loro incrollabile sostegno morale e economico, mi hanno permesso di completare questo ciclo di studi e di raggiungere quest'importante traguardo; un ringraziamento speciale va ai miei fratelli (reali e pelosi) che mi hanno sopportata e incoraggiata durante tutto il mio percorso di studi.*

*Un ringraziamento speciale va inoltre al mio fidanzato Niccolò, alla sua famiglia e a tutti i miei amici e compagni di corso che mi sono sempre stati vicini e mi hanno sempre sostenuta anche nei momenti più difficili.*

*Ringrazio infine tutti i membri della mia famiglia per il grande affetto dimostratomi.*