

**Relazioni di scambio idrico tra la falda freatica e le acque superficiali in
un settore della pianura ferrarese (Comune di Codigoro)
nel periodo aprile 2017 – giugno 2019**

A cura di

Paolo Severi e Luciana Bonzi (Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli. Regione Emilia-Romagna)

Con contributi di

*Roberto Genovesi, Tommaso Letterio e Stefano Raimondi (Consorzio di Bonifica di secondo grado
per il Canale Emiliano Romagnolo)*

Agosto 2019

Inquadramento

L'area oggetto del presente studio è ubicata nel Comune di Codigoro, in provincia di Ferrara (Figura 1).



Figura 1 – Ubicazione dell'area di studio

Si tratta di un appezzamento di terreno molto ampio, adibito alla coltivazione di pere. A causa dell'ingressione del cuneo salino dal mare Adriatico, la falda più superficiale in quest'area è caratterizzata da valori di salinità piuttosto elevati e dal momento che questa caratteristica può compromettere la produttività del sito, si è pensato di valutare l'eventuale contributo che può derivare dalla vicinanza con il corso del Po di Volano, che scorre lungo il confine dell'appezzamento in esame, a pochi metri dal pereto (Figura 2). Si tratta quindi di capire se il contributo del Fiume, il cui regime in questa zona è in stretta connessione con l'oscillazione del livello del mare e con le regimazioni idrauliche, possa diluire la salinità della falda intercettata dagli apparati radicali o se, in determinati periodi dell'anno, possa influenzarla negativamente.

Dal punto di vista geologico, il sito in questione ricade nel Foglio n. 187 - Codigoro ed è ubicato nell'unità stratigrafica AES8a (Unità di Modena di età olocenica, post-Romana); il sistema deposizionale è quello delle sabbie di riempimento di canale distributore, caratterizzate da sabbie da medie a fini, localmente ricoperte da argille e limi d'abbandono fluviale.

La distribuzione delle litologie è caratterizzata da porzioni più o meno sabbiose che si interdigitano tra loro in modo complesso. Le fasce più chiare, ben visibili in Figura 2 a sud del Po di Volano, con andamento circa Nord - Sud, rappresentano parte della cuspidè deltizia di questo Fiume. Queste porzioni sono costituite da tessiture più sabbiose rispetto alle fasce più scure che le separano. La geologia di superficie della zona a nord del Volano, in cui si sviluppa il pereto, pare essere più influenzata dal sistema meandriforme del fiume. Tuttavia, anche in questo caso è verosimile prevedere una certa variabilità complessiva del sito rispetto alla distribuzione delle tessiture grossolane e fini.

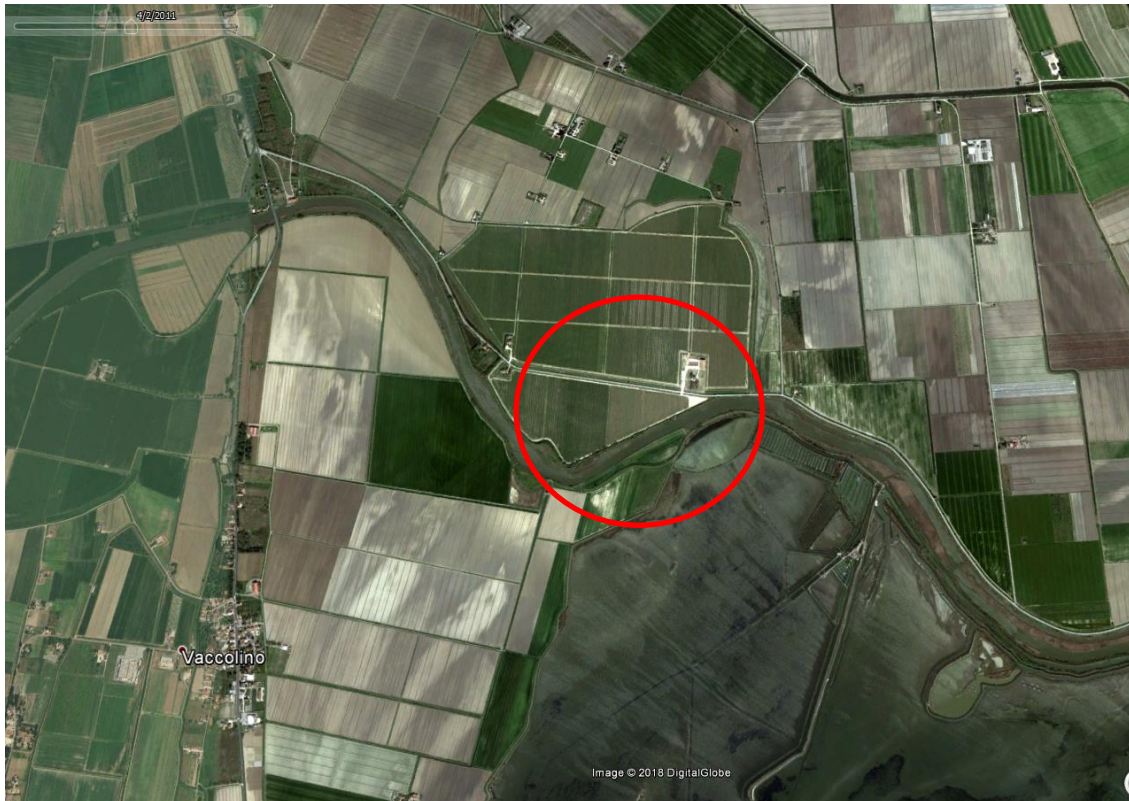


Figura 2 – Ubicazione dell'area di studio. Le tessiture più grossolane corrispondono alle aree più chiare.

Sistema di monitoraggio della falda freatica

Per definire le relazioni di scambio idrico tra la falda freatica e le acque superficiali nella zona oggetto di analisi, in accordo e collaborazione con i tecnici del Canale Emiliano-Romagnolo, è stato dimensionato un apposito sistema di monitoraggio che prevede:

- la messa in opera di un congruo numero di piezometri strumentati con sensori per il monitoraggio in continuo del livello della falda, della conducibilità elettrica (funzione della salinità) e della temperatura all'interno di un appezzamento di terreno adibito a pereto;
- la messa in opera di una sonda dentro l'alveo del Po di Volano, per il monitoraggio in continuo del livello del fiume, e della sua conducibilità elettrica e temperatura, in modo da creare un transetto coi piezometri perforati nel pereto.

Nel mese di aprile del 2017, sono stati installati 4 sensori in continuo in altrettanti piezometri posti a distanza crescente rispetto al Fiume e nel mese di luglio dello stesso anno è stato invece installato il sensore nel Po di Volano, per un totale di 5 sensori.

Il sito 7 è distante 25 metri da Po di Volano, il sito 9 è distante 150 metri dal fiume, e 135 metri dal sito 7.

Il monitoraggio è proseguito fino al mese di giugno del 2019; sono quindi disponibili oltre 24 mesi di monitoraggio in continuo. L'ubicazione dei piezometri e dei rispettivi sensori è riportata in Figura 3.



Figura 3 – Ubicazione dei piezometri in cui sono state installate le sonde per il monitoraggio

Per installare le sonde sono stati scelti due siti (denominati P7 e P9 in Figura 3) ciascuno dei quali è formato da due piezometri così completati:

- Sito P7 (quota -0,63 m s.l.m.):
 - Piezometro P7a: profondità = 2.10 m da bocca-foro; sonda a 1.90 m da bocca-foro
 - Piezometro P7b: profondità = 1.63 m da bocca-foro; sonda a 1.60 m da bocca-foro
- Sito P9 (quota -0,78 m s.l.m.):
 - Piezometro P9a: profondità = 2.92 m da bocca-foro; sonda a 2.70 m da bocca-foro
 - Piezometro P9b: profondità = 1.78 m da bocca-foro; sonda a 1.60 m da bocca-foro

I piezometri sono fenestrati da 120 cm dalla bocca foro fino alla fine del tubo piezometrico.

Al momento dell'installazione delle sonde è stato eseguito un profilo di conducibilità elettrica (CE) in ciascun punto per valutare a quale profondità installare la sonda, nei limiti concessi dalla logistica del sito e dalle considerevoli dimensioni dei sensori. I profili realizzati sono riportati nelle Figure 4 e 5.

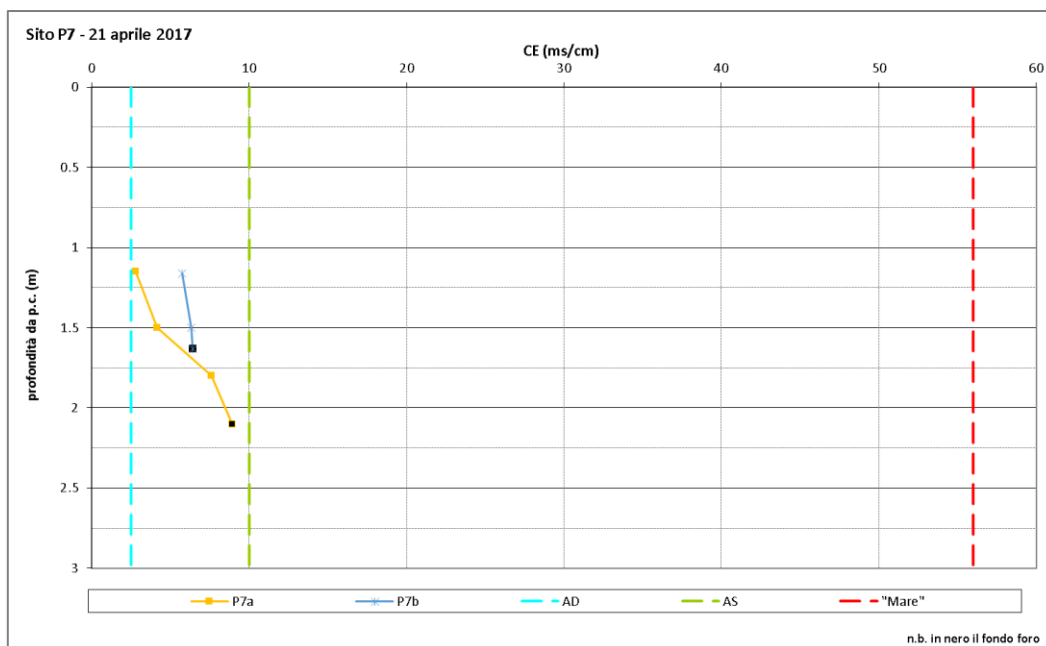


Figura 4 – Profili di conducibilità elettrica nei piezometri P7a e P7b

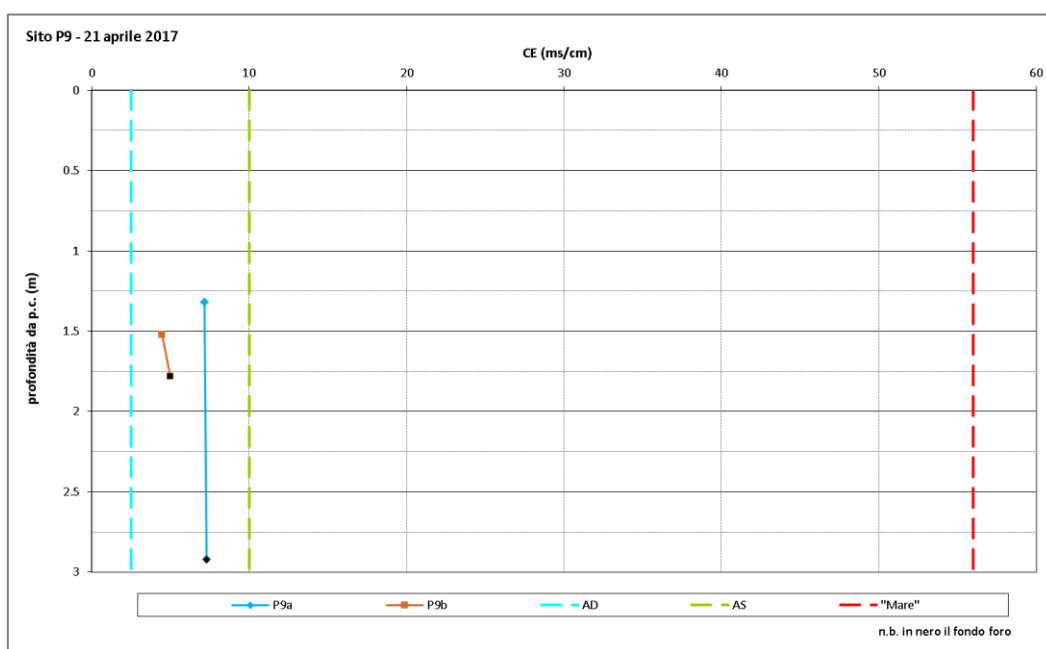


Figura 5 – Profili di conducibilità elettrica nei piezometri P9a e P9b

Nei grafici vengono rappresentati come riferimento per la CE: con la linea verticale azzurra il valore di 2.5 mS/cm (limite massimo delle acque destinate al consumo umano D.Lgs 31/01); con la linea verticale verde il valore (scelto a riferimento in modo convenzionale) di 10 mS/cm; con la linea rossa il valore di 56 mS/cm come CE media del Mare Adriatico, così come riportato nella letteratura di settore.

Come si vede, la CE è piuttosto elevata in tutti e quattro i piezometri e tende ad aumentare con la profondità: nel piezometro P7a si passa da una conducibilità di 2.8 mS/cm a 1.16 m di profondità ad una CE di 8.92 mS/cm a fondo foro; nel piezometro P7b la CE è piuttosto alta già nella parte più superficiale, passando da 5.76 mS/cm a 1.16 m a 6.39 mS/cm a fondo foro; nel piezometro P9a sembra essere più costante, pur avendo un valore piuttosto elevato (7.16 mS/cm a 1.32 m e 7.31 mS/cm a 2.92 m); anche nel piezometro P9b la CE sembra costante, passando da 4.47 mS/cm a 1.52 m a 4.99 mS/cm a 1.78 m.

I dati acquisiti in continuo (con cadenza oraria) dagli strumenti installati sono stati scaricati periodicamente in campo e successivamente analizzati per comprendere se e quanto il Po di Volano sia in grado di influenzare la salinità nella falda freatica ad esso connessa. I dati raccolti sono stati messi in relazione tra loro e con le piogge cumulate.

Per comprendere la reale dinamica di una falda così superficiale, infatti, è indispensabile tenere in considerazione tutti i termini che possono concorrere all'ingresso e all'uscita dell'acqua e che possano quindi influenzarne il grado di salinità.

La conducibilità elettrica rilevata in continuo è chiaramente riferita alla profondità di installazione della sonda.

Analisi dei dati raccolti

Nella serie di figure che seguono vengono rappresentati i dati raccolti da aprile 2017 al giugno 2019, suddivisi per sito, e confrontati tra loro.

- Sito P7:

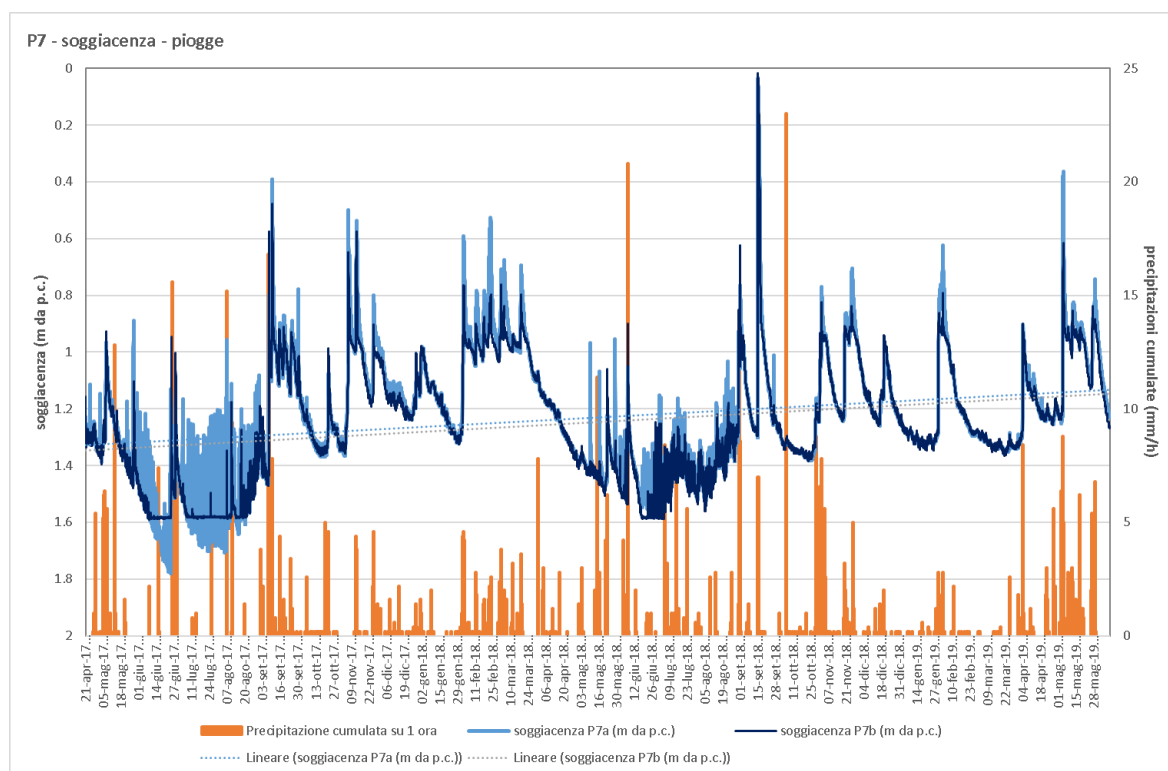


Figura 6 – Confronto tra soggiacenza e precipitazioni nel sito P7

Nella Figura 6 sono messe a confronto la soggiacenza nei due piezometri P7a (più profondo) e P7b (più superficiale) e le precipitazioni cumulate su un'ora nel pluviometro "Campello".

Il livello nei due piezometri si mantiene sostanzialmente alla stessa quota per la gran parte del periodo analizzato. La falda ha un andamento stagionale, con valori che nei mesi estivi (giugno – agosto) sono inferiori di 30 - 40 cm rispetto agli altri periodi dell'anno. I minimi assoluti si sono toccati nell'estate del 2017, in corrispondenza di un periodo particolarmente siccitoso.

L'influenza delle piogge è piuttosto evidente, dato che ad ogni picco di precipitazione, anche di bassa intensità (pochi millimetri all'ora), corrisponde praticamente sempre un innalzamento della falda. Si noti tuttavia che l'innalzamento del livello non è proporzionale all'entità della precipitazione. Gli innalzamenti dovuti alle precipitazioni sono più marcati nel piezometro 7a (sino a circa 20 centimetri più del 7b), forse a causa della presenza di orizzonti fini nella stratigrafia del sito.

Da maggio a settembre si osservano delle oscillazioni molto frequenti, dell'ordine di qualche decimetro, causate molto probabilmente dall'irrigazione (Figura 17a).

Quando la falda non è perturbata dalle precipitazioni e dalle irrigazioni, si osservano delle leggere oscillazioni con frequenza giornaliera, verosimilmente dovute all'andamento delle maree che si risente nel Po di Volano e di conseguenza nella falda (vedi Figure 12 e 17a); è possibile che queste oscillazioni rappresentino una perturbazione di pressione e non un effettivo trasferimento di massa.

Le linee di tendenza indicano, nel periodo monitorato, un aumento del livello della stessa entità in entrambi i piezometri (circa 20 cm), dovuto fondamentalmente al minimo toccato nell'estate del 2017.

Analizzando singolarmente i due piezometri si osserva quanto segue.

- **P7a** (Figura 6a, sensore a -1.9 m) la soggiacenza è compresa tra 0.04 m e 1.78 m. Il livello della falda nei mesi tardo primaverili-estivi appare molto perturbato, con innalzamenti e abbassamenti repentini, dovuti all'apporto irriguo. Il livello nell'estate del 2018 appare meno perturbato rispetto all'estate precedente, forse proprio per il minor apporto irriguo causa il periodo meno secco dell'estate precedente. Durante tutto il periodo monitorato il piezometro non è mai rimasto all'asciutto.

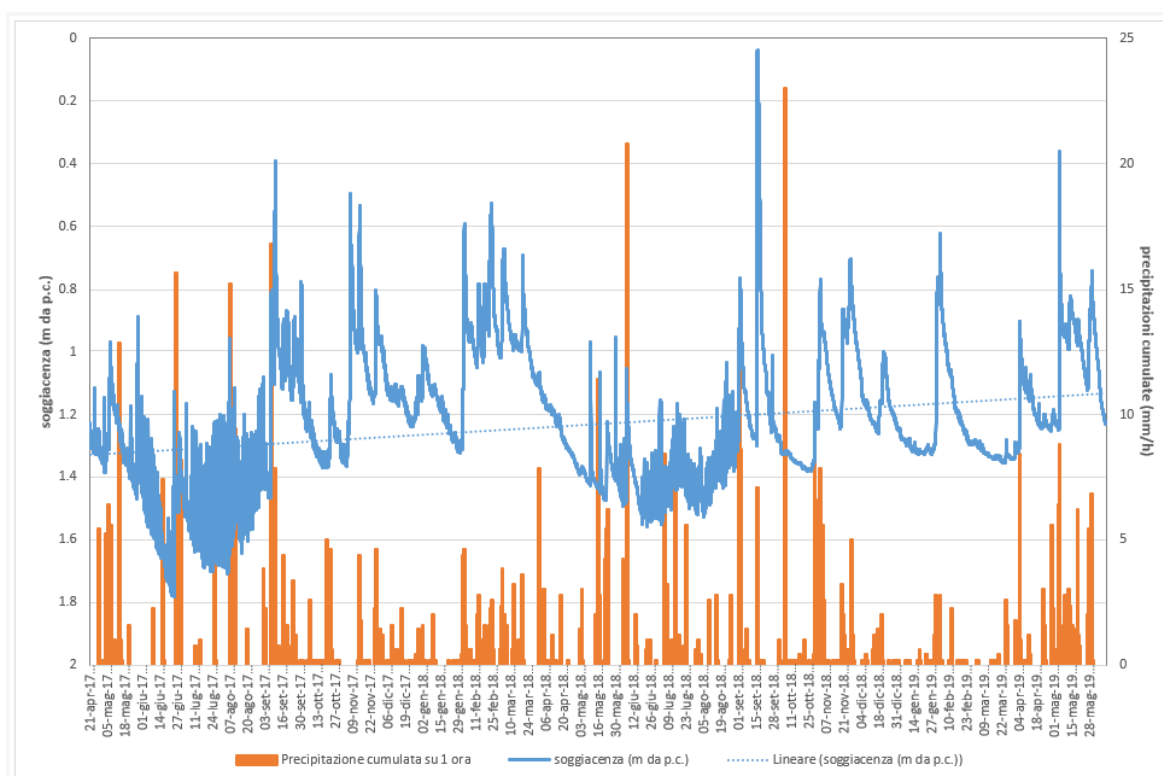


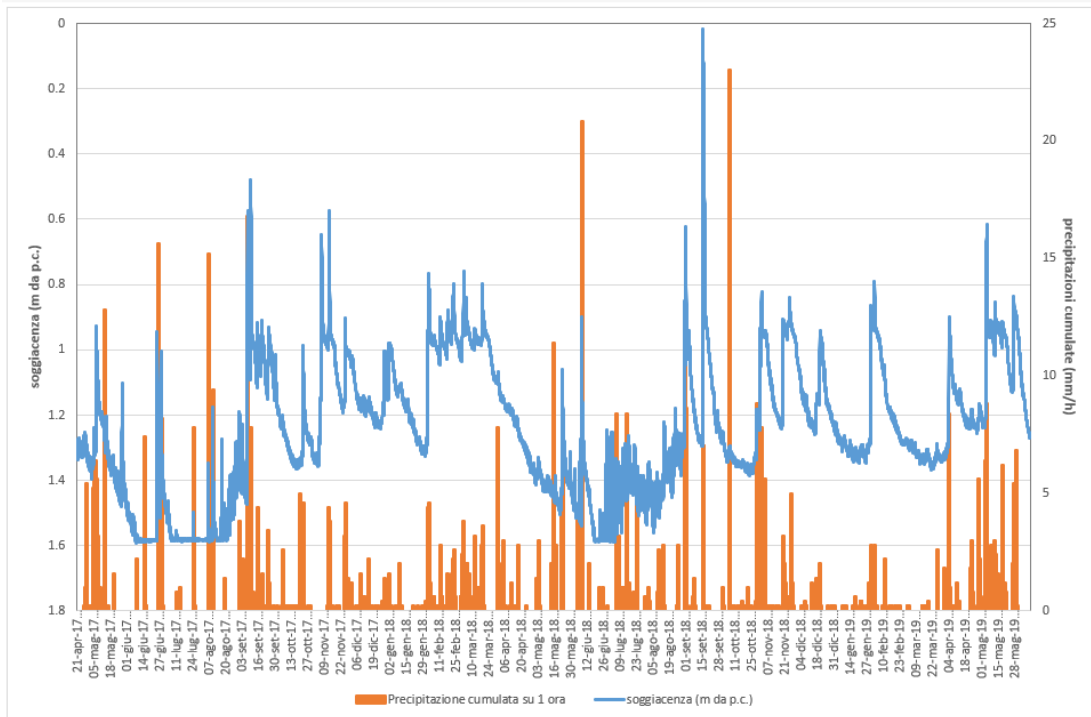
Figura 6° - Confronto tra soggiacenza di 7a e precipitazioni

- **P7b** (Figura 6b, sensore a -1.6 m): la soggiacenza è compresa tra 0.02 m e 1.6 m. Il livello della falda nei mesi tardo primaverili-estivi appare molto perturbato, con innalzamenti e abbassamenti repentini, dovuti all'apporto irriguo. Nei mesi di giugno e luglio (sia nel 2017 che nel 2018) sono stati

registrati dei valori costanti di soggiacenza su valori corrispondenti al fondo del piezometro che ne fanno intuire il prosciugamento, con un abbassamento della falda al di sotto del sensore.

Nella Figura 7 sono messe a confronto la soggiacenza e la conducibilità elettrica nei due piezometri P7a e P7b.

Complessivamente l'andamento della CE nei 2 piezometri mostra un andamento stagionale, con valori superiori in novembre – maggio e inferiori durante i mesi più caldi (figura 7); è del tutto verosimile che la diminuzione estiva della CE sia da mettere in relazione con le pratiche di irrigazione e con la ricarica operata sulla falda dal Po di Volano (vedi Sito Po di Volano).



- Figura 6b - Confronto tra soggiacenza di 7b e precipitazioni

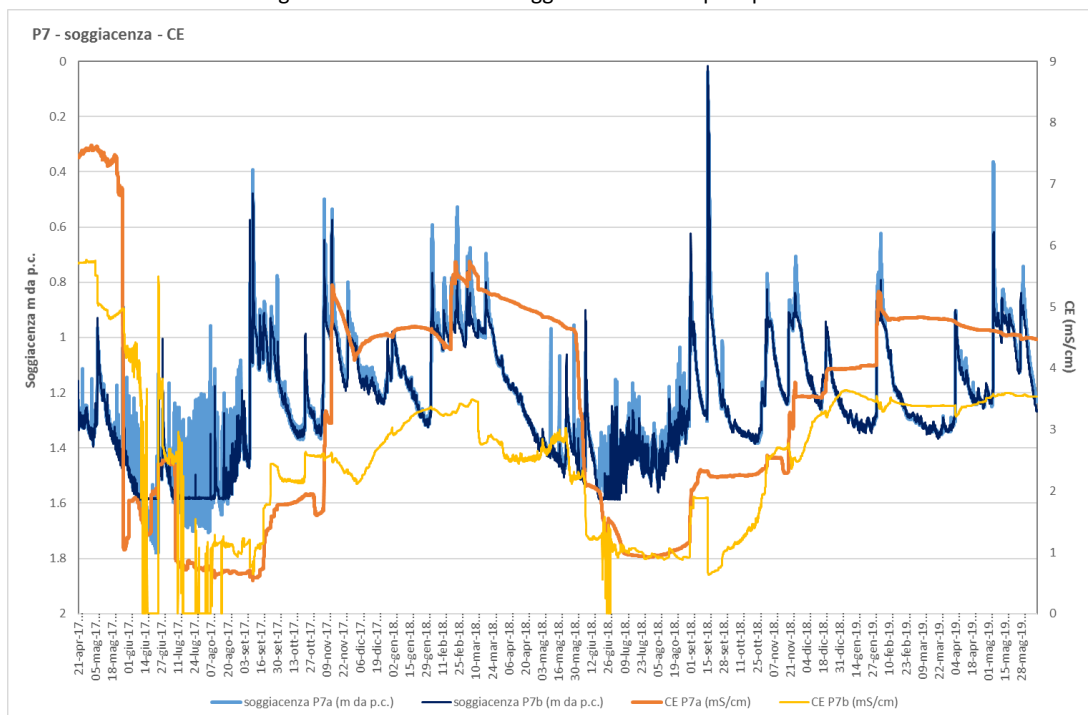


Figura 7 – Confronto tra soggiacenza e CE nel sito P7

Si nota che i valori di CE nel piezometro più profondo sono più alti nel periodo non irriguo, a significare che la CE in condizioni indisturbate aumenta con la profondità. Durante l'estate l'apporto di acque dolci irrigue e/o la ricarica dal Po di Volano abbassano i valori della CE in entrambi i piezometri, azzerando le differenze dovute alla profondità.

In entrambi i piezometri i valori della CE raggiunti nell'aprile - maggio 2017 sono notevolmente superiori rispetto a quelli dello stesso periodo negli anni successivi, verosimilmente a causa delle minori precipitazioni nel 2017 rispetto agli anni successivi.

In occasione di alcuni eventi di precipitazione si osserva che la CE aumenta improvvisamente (es. inizio novembre 2017) nel piezometro 7a, ma non nel 7b.

Analizzando singolarmente i due piezometri si osserva quanto segue.

- **P7a:** la CE (linea arancio in Figura 7) nel periodo invernale (da novembre a fine maggio) ha valori alti, superiori a 7 mS/cm nel 2017 e attorno a 4.5 mS/cm nel 2018 e nel 2019, mentre nel periodo estivo (da fine maggio a novembre) diminuisce fino a circa 1 mS/cm, per alzarsi a circa 2 mS/cm da settembre in poi. Nel periodo giugno luglio 2017 la CE mostra alcuni innalzamenti sino a oltre 2 mS/cm; a partire dal settembre 2018, la CE è in costante crescita, ma non raggiunge mai i valori registrati all'inizio del monitoraggio nel 2017.;
- **P7b:** la CE (linea gialla in Figura 7) nel periodo invernale (da novembre a fine maggio) ha valori alti, oltre 5 mS/cm nel 2017 e attorno a 3 mS/cm nel 2018, mentre nel periodo estivo (da fine maggio a novembre) la CE diminuisce fino a circa 1 mS/cm. Nel periodo giugno luglio 2017 la CE mostra alcuni innalzamenti sino a oltre 2 mS/cm; a partire dal settembre 2018, la CE è in costante crescita, ma non raggiunge mai i valori registrati all'inizio del monitoraggio nel 2017.

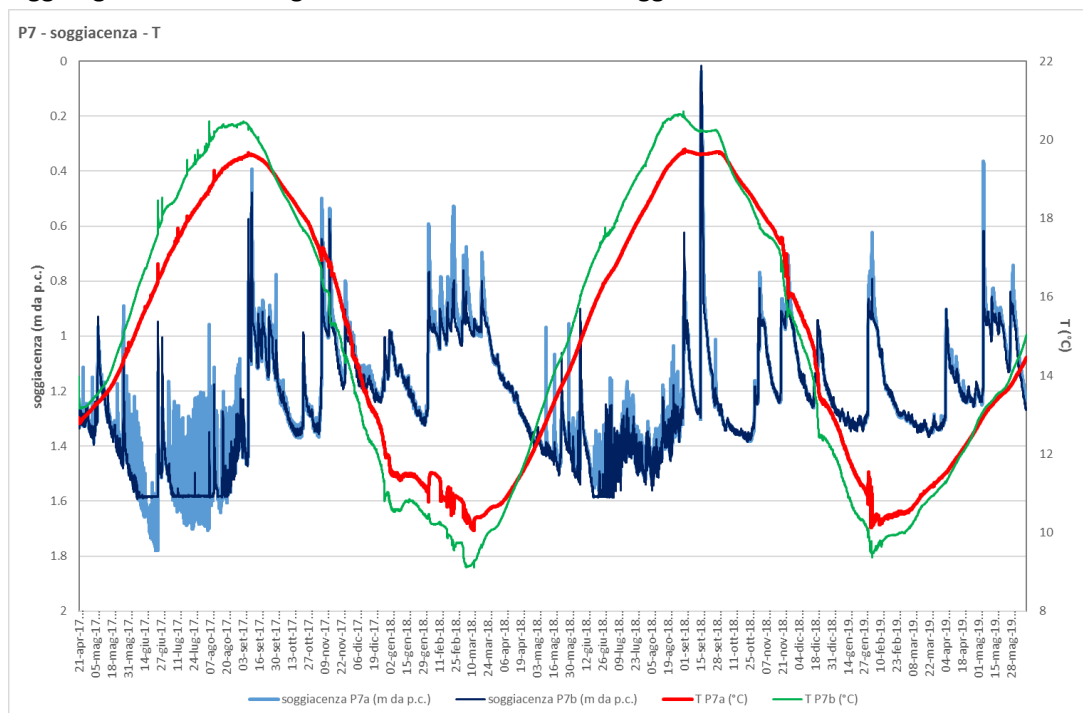


Figura 8 – Confronto tra soggiacenza e temperatura nel sito P7

Nella Figura 8 sono messe a confronto la soggiacenza e la temperatura nei due piezometri P7a e P7b. In entrambi i piezometri, la temperatura ha un andamento che riflette la stagionalità. In qualche caso si notano dei leggeri rialzi (in estate) e degli abbassamenti (in inverno), spesso corrispondenti ad oscillazioni del livello

e quindi delle precipitazioni. Il piezometro P7b ha una temperatura mediamente più alta del P7a probabilmente perché è meno profondo e quindi più vicino alle variazioni di temperatura della superficie.

- **Sito P9:**

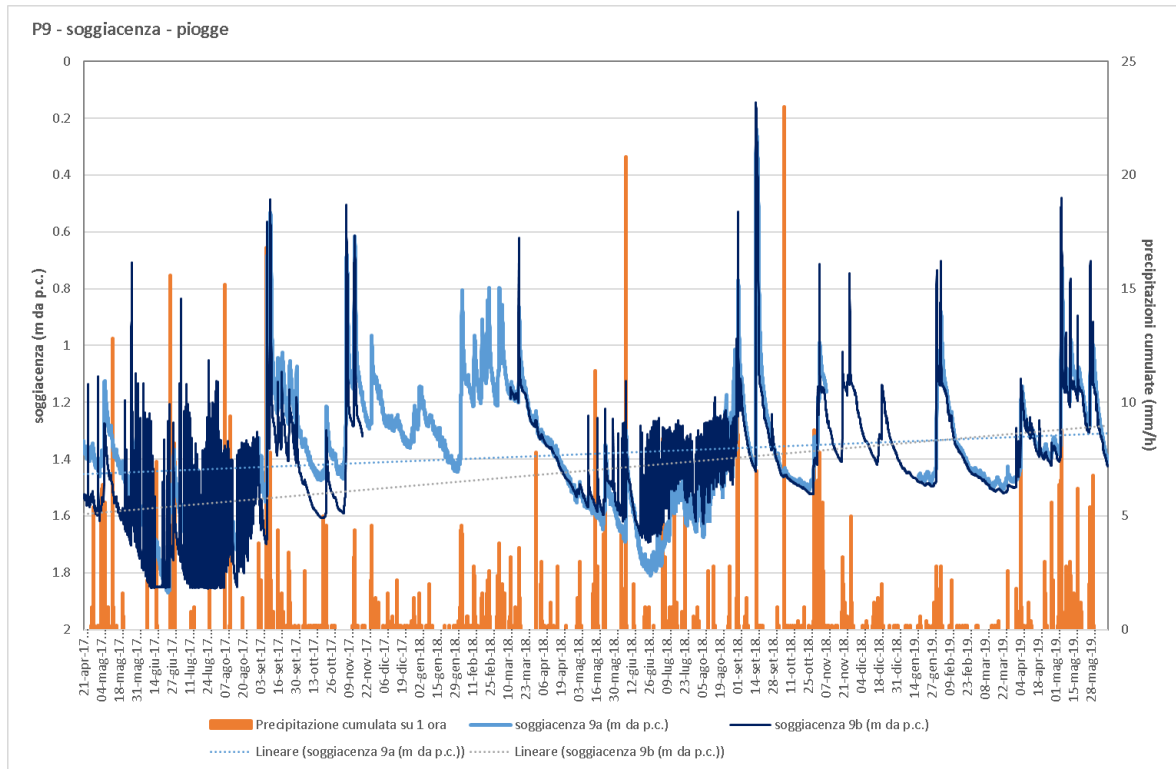


Figura 9 – Confronto tra soggiacenza e precipitazioni nel sito P9

Nella Figura 9 sono messe a confronto la soggiacenza nei due piezometri P9a e P9b e le precipitazioni cumulate su un’ora nel pluviometro “Campello”.

La falda ha avuto un andamento stagionale, con valori nei mesi estivi (giugno – agosto) inferiori di 30 - 40 cm rispetto agli altri periodi dell’anno. I minimi assoluti si sono toccati nell’estate del 2017, in corrispondenza di un periodo particolarmente siccitoso. Nel periodo aprile-maggio e settembre-novembre 2017 il livello di 9a è stato più alto di circa 10 cm del 9b. Nell’estate del 2018 il livello di 9b è stato maggiore di quello di 9a di circa 10 cm. Successivamente i due livelli sono stati simili.

Anche in questo caso sembra evidente l’influenza delle piogge, dato che ad ogni picco di precipitazione, anche di bassa intensità (pochi millimetri all’ora), corrisponde praticamente sempre un innalzamento della falda. Si noti tuttavia che l’innalzamento del livello non è proporzionale all’entità della precipitazione. I picchi delle precipitazioni nel 9b sono un poco più alti rispetto al 9a.

Nei periodi estivi il piezometro 9b mostra delle oscillazioni ampie e frequenti, dovute verosimilmente all’irrigazione, che non sono quasi per nulla visibili nel P9a (Figura 17a).

Nei periodi in cui il livello non è perturbato dalle precipitazioni o dall’irrigazione, il piezometro P9a mostra delle leggere oscillazioni giornaliere, da mettere in relazione con le maree (Figura 17a).

Queste differenze nell’andamento dei due piezometri sono verosimilmente dovute alla maggiore profondità del 9a rispetto al 9b.

Analizzando singolarmente i due piezometri si osserva quanto segue.

- **P9a** (Figura 9a, sensore a – 2.7 mt): La soggiacenza è compresa tra 0.24 m e 1.87 m. Tra novembre 2018 e gennaio 2019 c’è un’interruzione nei dati dovuta ad un malfunzionamento della sonda di

monitoraggio. Non sembrano esserci particolari differenze nella risposta del piezometro nei periodi irrigui e non irrigui. Sono visibili delle leggere oscillazioni dovute verosimilmente all'influenza delle maree attraverso il Po di Volano e quindi sulla falda. Il trend mostra un leggerissimo aumento del livello.

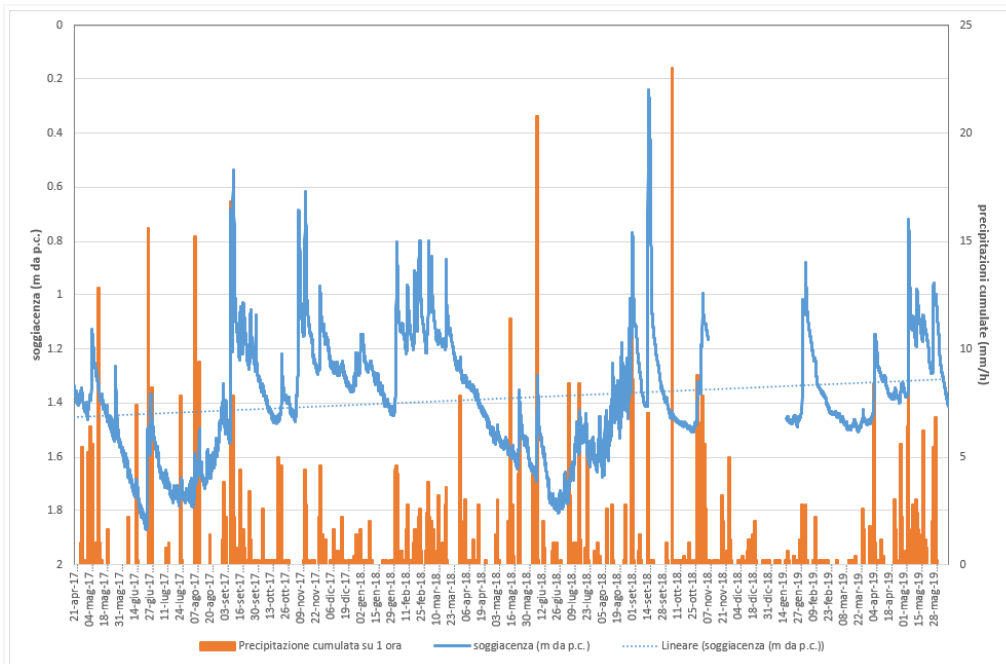
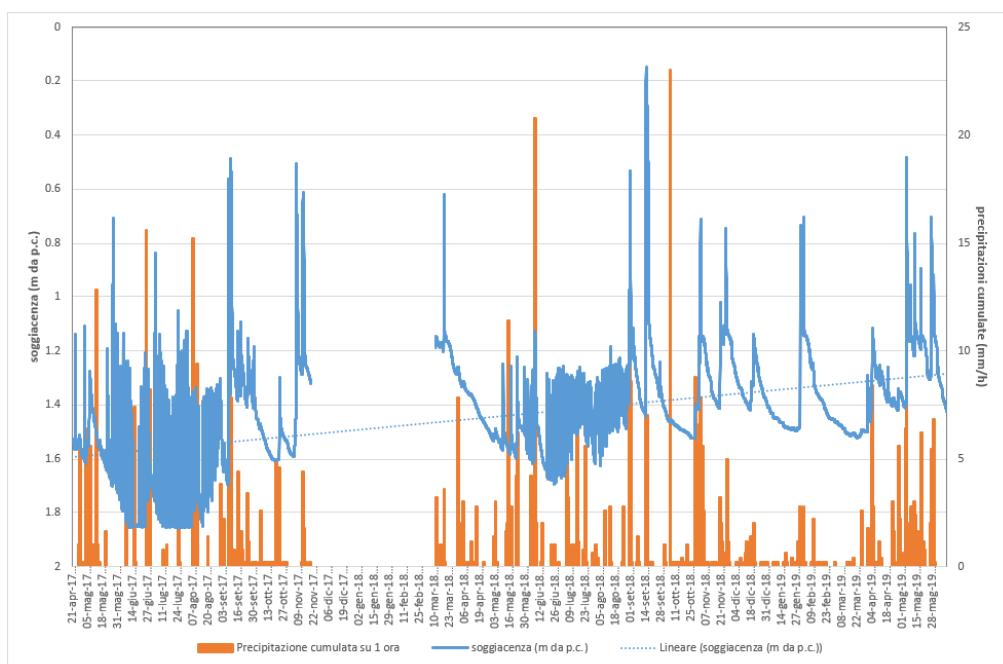


Figura 9a – Confronto tra soggiacenza del piezometro 9a e precipitazioni

- **P9b** (figura 9b, sensore a -1.6 mt): La soggiacenza è compresa tra 0.15 m e 1.86 m. La serie storica ha un'interruzione nei dati che va da novembre 2017 a marzo 2018 per un malfunzionamento della sonda installata. Molto evidenti sono le ampie oscillazioni nei periodi estivi, dovute all'apporto irriguo. Intorno alla seconda metà del mese di giugno 2017, il piezometro si è asciugato o, comunque, il livello di falda si trovava ad una quota inferiore al sensore installato. Il trend indicato evidenzia un deciso aumento del livello. Nel periodo giugno inizio agosto 2017 il piezometro è rimasto all'asciutto.



- Figura 9b – Confronto tra soggiacenza del piezometro 9b e precipitazioni

Nella Figura 10 sono messe a confronto la soggiacenza e la conducibilità elettrica nei due piezometri P9a e P9b.

Analogamente a quanto osservato per il livello, anche la CE nei due piezometri del sito 9 ha un andamento abbastanza diverso, in relazione alla diversa profondità dei due piezometri e forse a delle differenze nella stratigrafia del sito.

Il P9b ha un andamento stagionale, simile a quello dei piezometri del sito 7, con valori inferiori da maggio a settembre in relazione all'irrigazione ed all'apporto dal Po, e valori più alti negli altri mesi.

Il P9a non mostra un chiaro andamento stagionale. Ha valori sempre alti dall'inizio del monitoraggio sino all'agosto 2018, quando diminuisce rapidamente, per poi seguire con dei valori simili a quelli del P9b, anche se con un andamento più lineare.

Analizzando singolarmente i due piezometri si osserva quanto segue.

- **P9a:** all'inizio del periodo monitorato, la CE ha dei valori molto elevati (tra 6 e 7 mS/cm). A partire dal mese di settembre 2017, la CE comincia a scendere, in corrispondenza di un significativo aumento del livello dell'acqua e delle precipitazioni. La CE rimane su valori alti (attorno a 5 mS/cm) sino al luglio del 2018, quando abbassa, più o meno in corrispondenza della maggiore risposta del piezometro alle variazioni di livello nel periodo irriguo, ed in concomitanza di forti piogge. A seguito di questo abbassamento la CE arriva a valori di circa 1 mS/cm nel giro di quasi 2 mesi per poi risalire sino a 2 mS/cm. Nel 2019, in cui è stato rilevato solo il periodo non irriguo, la CE cresce costantemente, ma non raggiunge mai i livelli del 2017;
- **P9b:** la CE mostra un andamento stagionale, con valori maggiori da settembre a maggio in inverno (da 3 a 5 mS/cm nel 2017 e circa 2.5 mS/c, nel 2018) e inferiori da giugno ad agosto (circa 1 mS/cm). Occorre però precisare che l'acquisizione dei dati non è stata continua. Nel 2019, in cui è stato rilevato solo il periodo non irriguo, la CE cresce costantemente fino a raggiungere i livelli del 2017.

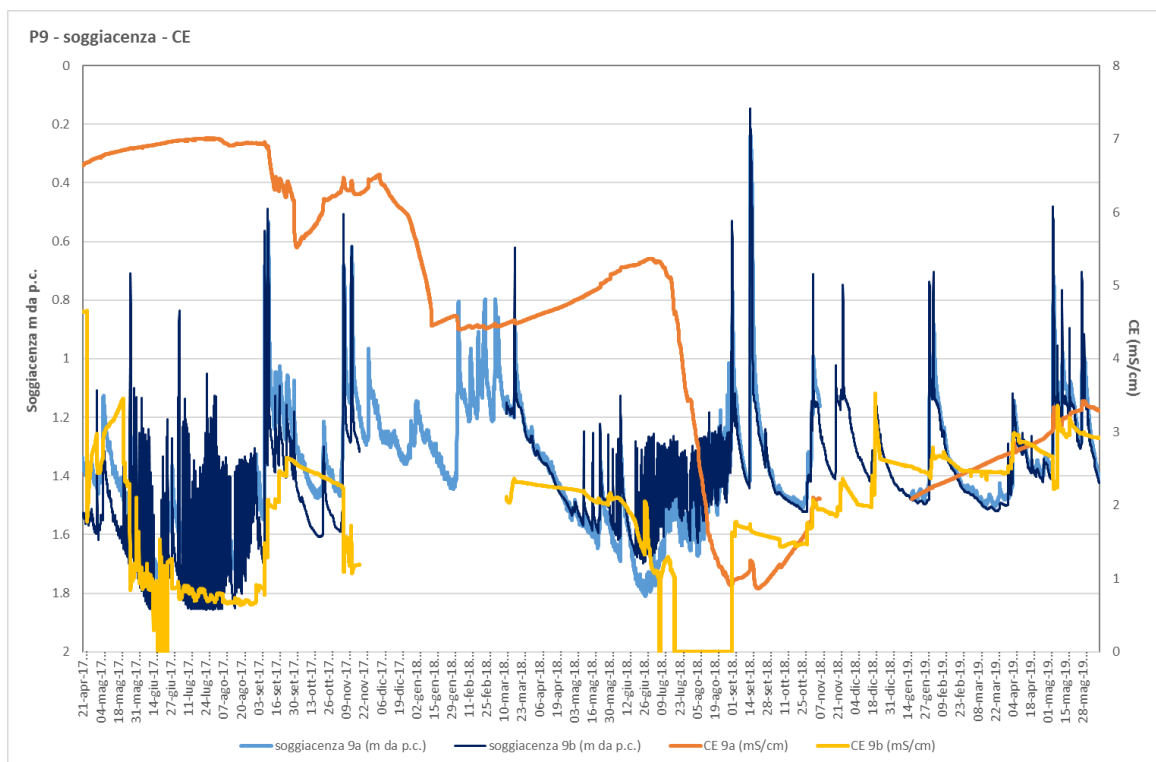


Figura 10 – Confronto tra soggiacenza e CE nel sito P9

Nella Figura 11 sono messe a confronto la soggiacenza e la temperatura nei due piezometri P9a e P9b. In entrambi i piezometri, la temperatura ha un andamento stagionale. Si osservi tuttavia che il P9a ha il massimo spostato rispetto al P9b. Il piezometro P9b ha inoltre una temperatura massima più alta del P9a, e un'oscillazione complessiva maggiore, probabilmente perché meno profondo e più vicino alle variazioni di temperatura della superficie. Nel piezometro P9b, si notano dei leggeri rialzi, spesso corrispondenti ad innalzamenti del livello, probabilmente correlabili con le irrigazioni.

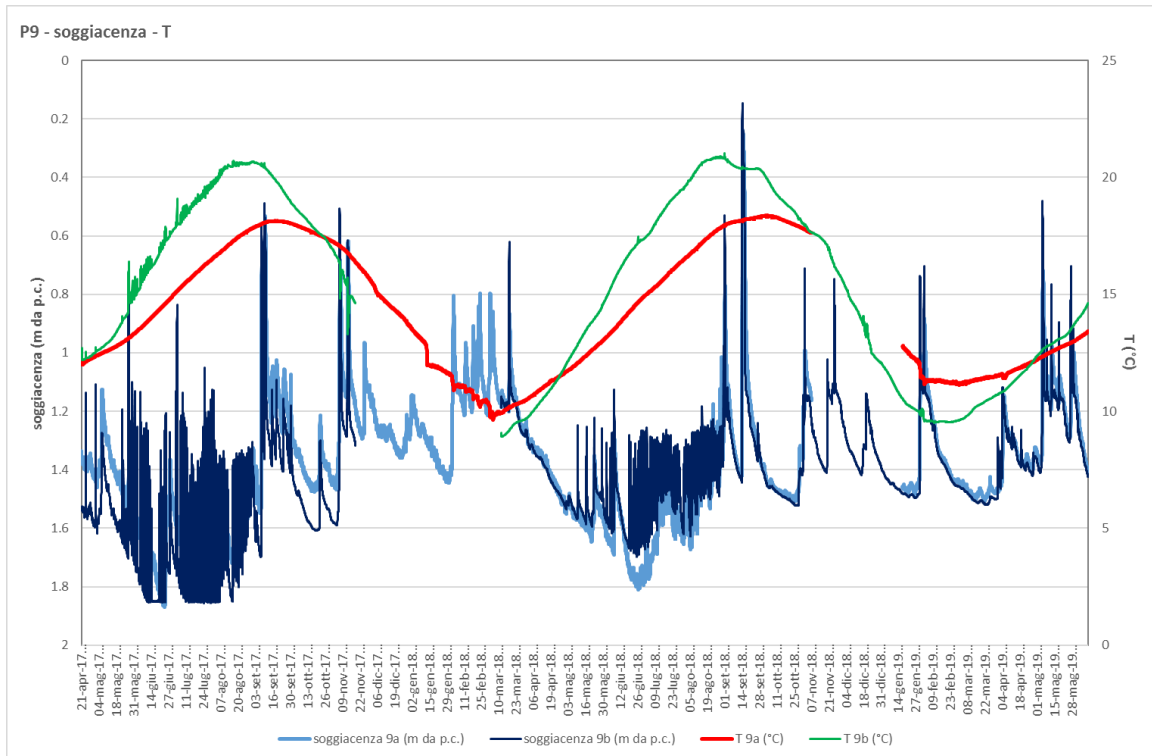


Figura 11 – Confronto tra soggiacenza e temperatura nel sito P9

- Sito Po di Volano

La Figura 12 rappresenta l'andamento del livello idrometrico e della conducibilità elettrica del Po di Volano, misurati in continuo a partire dal 5 luglio 2017.

Occorre premettere che il livello idrometrico del Fiume è fortemente condizionato dall'attività antropica. Il Po di Volano è infatti regimato da alcune traverse lungo il suo corso che mantengono sostanzialmente stabile il suo livello per permetterne la navigazione (Ing. A. Bondesan, comunicazione personale).

Il livello idrometrico ha un andamento che evidenzia la presenza di due fenomeni distinti, entrambi con andamento sinusoidale: uno, con frequenza giornaliera, che conferisce alla curva un aspetto complessivamente seghettato, con ampiezza variabile da pochi decimetri fino a circa un metro, verosimilmente collegato alle maree; l'altro con frequenza di 15 – 20 giorni e ampiezza di 20 – 40 centimetri (Figura 13), anch'esso in fase con le oscillazioni marine di grado superiore evidenziate anche dall'andamento del mareografo di Lido di Volano (Figura 14).

Al di là di queste oscillazioni molto evidenti, il livello del Po di Volano non mostra particolari variazioni di quota durante il periodo monitorato, fatto salvo un aumento nel febbraio - marzo 2018 e qualche picco più accentuato nell'autunno-inverno 2018-2019; tuttavia il trend generale nel periodo monitorato mostra una generale diminuzione del livello idrometrico.

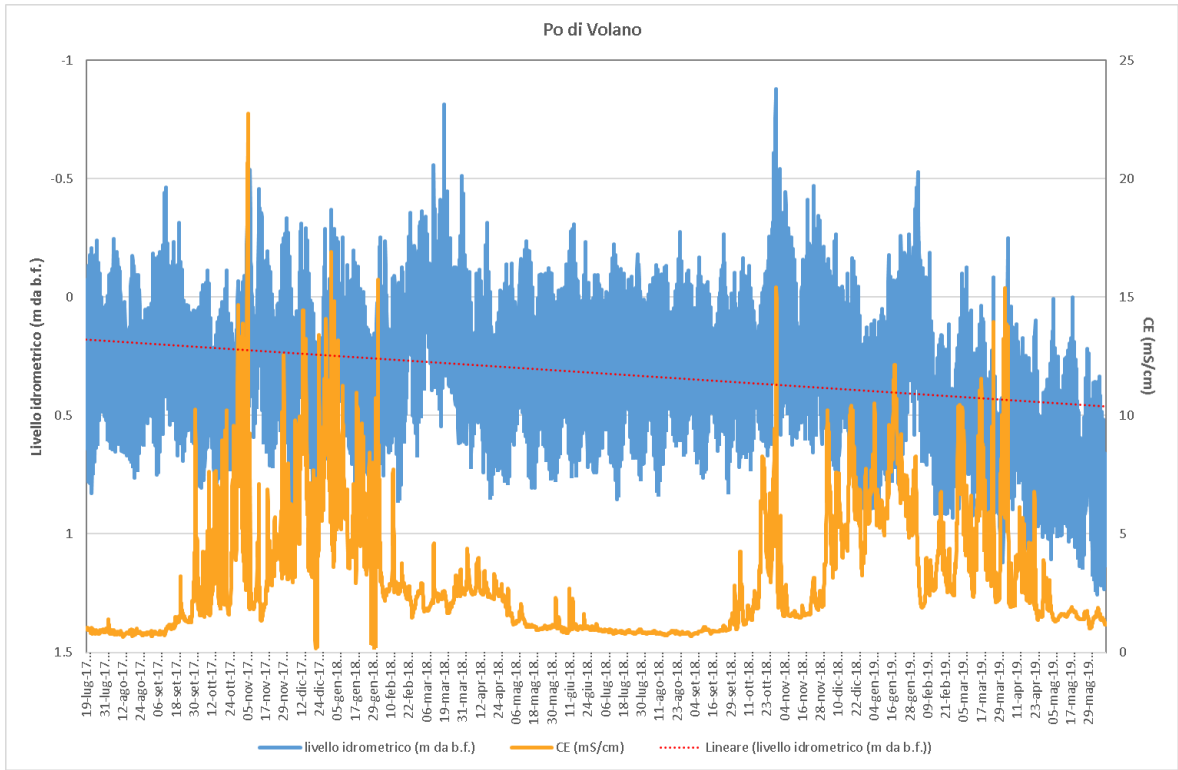


Figura 12 – Confronto tra livello idrometrico e CE nel Po di Volano.

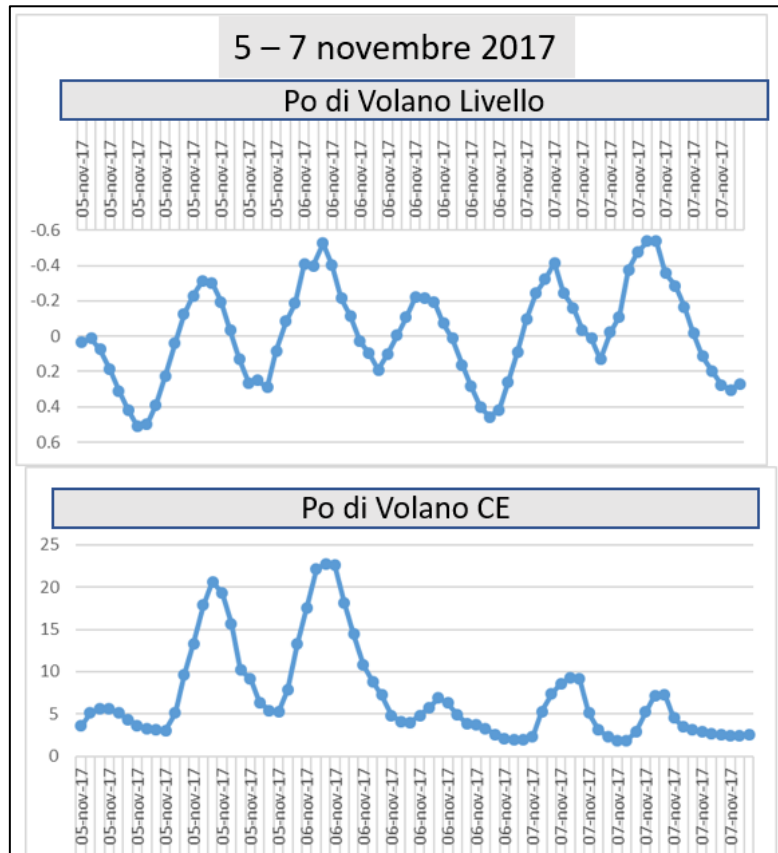


Figura 12a – Particolare della Figura 12

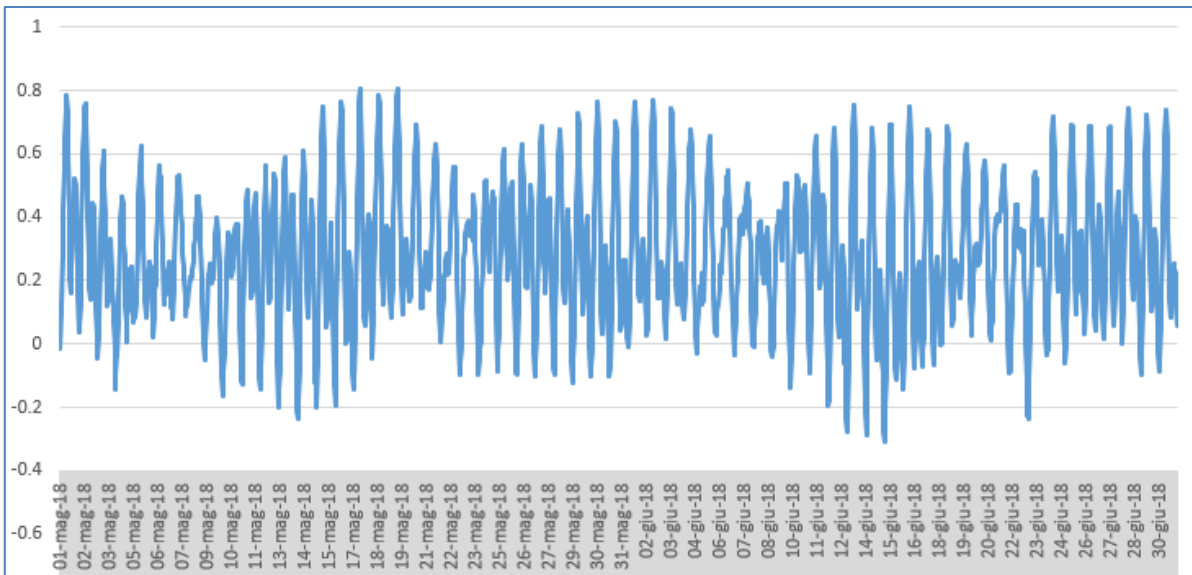


Figura 13. Dettaglio dell'andamento del livello idrometrico del Fiume Po di Volano nel periodo maggio – giugno 2018

Il confronto tra livello idrometrico e precipitazioni nel piezometro installato nel fiume (Figura 15) appare poco significativo a riprova che probabilmente, in questo tratto, il Fiume è molto più influenzato dall'oscillazione del livello del mare e dalla regimazione della Bonifica che non dal regime delle piogge; a questo proposito, osservando il periodo da marzo a maggio 2019 si nota che, a fronte di precipitazioni abbondanti e intense, il livello del Po tende a scendere visibilmente.

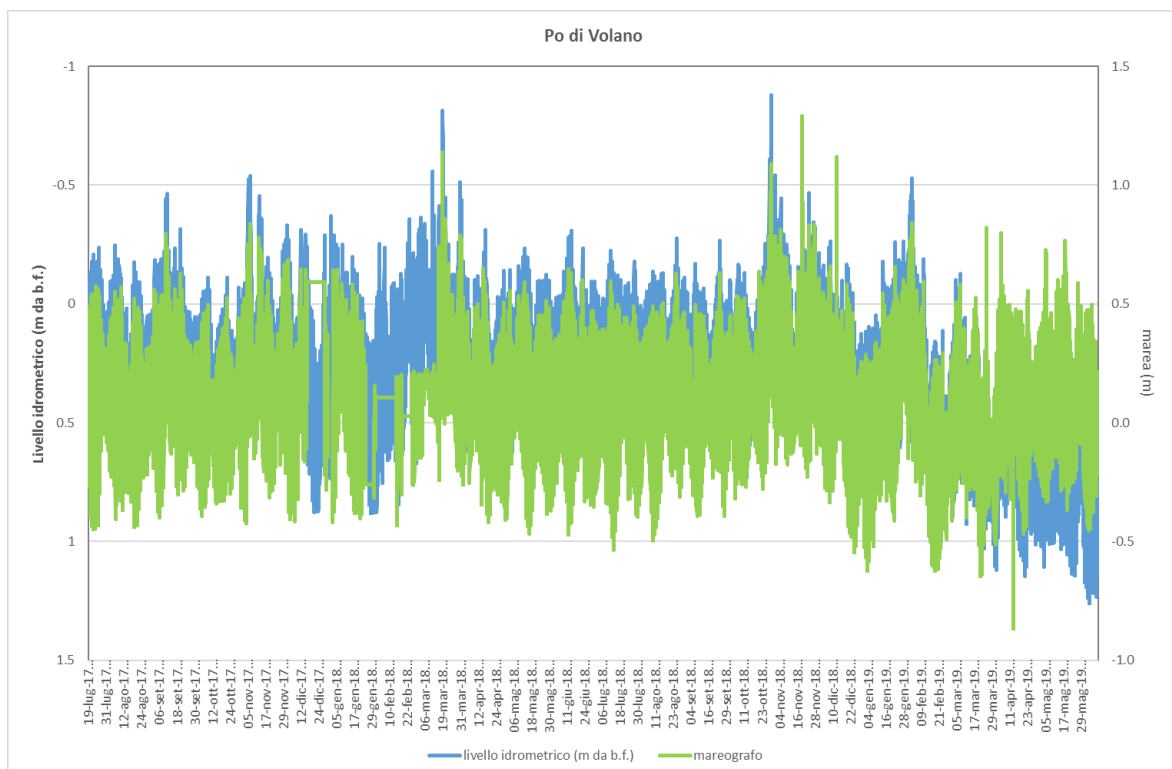


Figura 14 – Confronto tra livello idrometrico del Po di Volano (azzurro) e il livello del mare nel mareografo di Porto Garibaldi (verde). Si osservi che il livello idrometrico del Po di Volano non è riportato in quota assoluta.

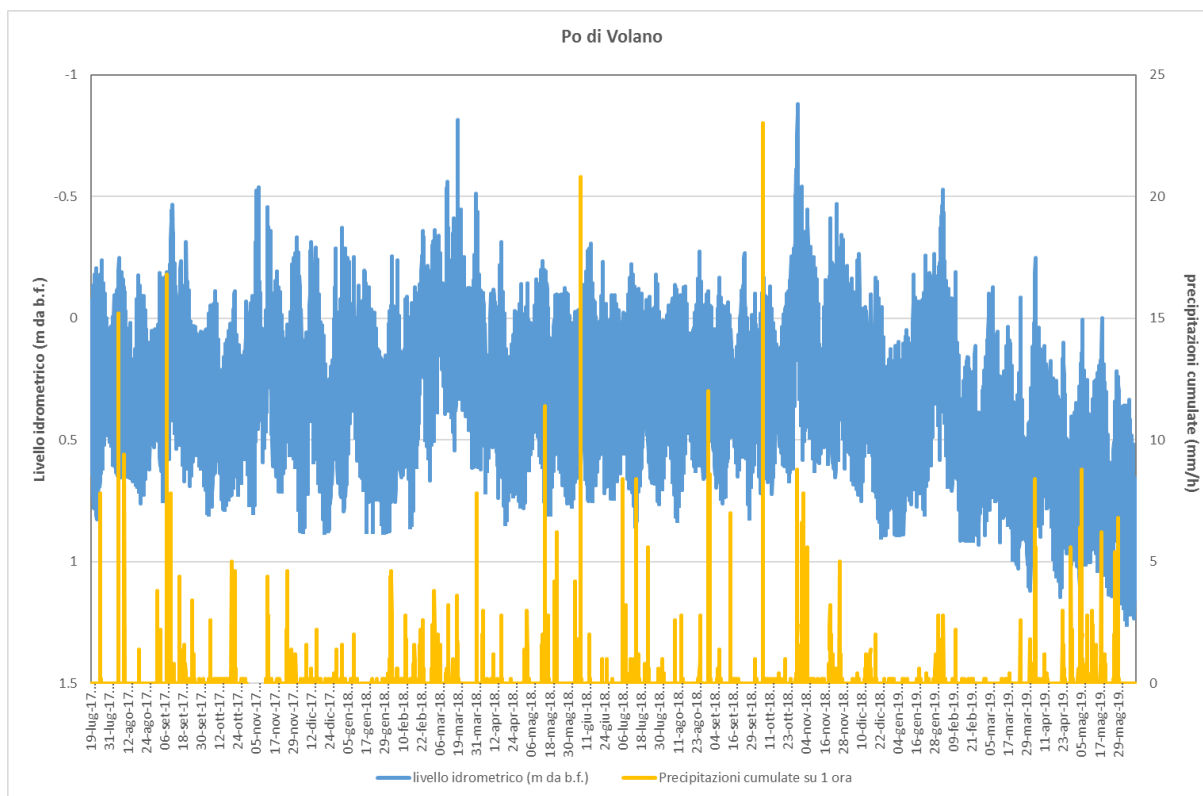


Figura 15 – Confronto tra livello idrometrico nel Po di Volano e precipitazioni cumulate nell'idrometro di Campello

La CE ha un andamento molto diverso nei diversi momenti dell'anno (Figura 12).

In estate (da maggio a settembre) è stabilmente bassa (circa 1 mS/cm). Nei periodi autunnali e invernali essa è complessivamente molto maggiore, con valori spesso superiori a 10 mS/cm e fino a oltre i 20 mS/cm, e mostra oscillazioni frequenti.

Da febbraio a maggio 2018 ha valori attorno a 2.5 mS/cm con frequenti oscillazioni; dal maggio 2019 alla fine del periodo di osservazione si è mantenuta su valori attorno a 2 mS/cm.

Le oscillazioni della CE nei periodi autunnali e invernali sono generalmente in fase con le oscillazioni del livello idrometrico (Figura 12a), ovvero la CE ha valori maggiori durante i picchi del livello idrometrico dovuti alle oscillazioni positive della marea. Quindi gli aumenti della CE nel periodo autunnale - invernale sono sostanzialmente legati a ingressione di acque marine nel Po causa l'alta marea o dalle mareggiate.

In analogia con l'andamento del livello idrometrico del Po di Volano, anche l'andamento della CE nel fiume è fortemente condizionato dalla gestione dalla rete di bonifica della pianura ferrarese. Da aprile i canali di bonifica e irrigazione vengono invasi con l'acqua dolce del Po; l'acqua dolce di questi canali viene poi drenata dal Po di Volano, che è topograficamente più basso della rete di bonifica. Inoltre, il Po di Volano nel periodo irriguo riceve l'acqua, anch'essa dolce, del grande impianto idrovoro di Codigoro (Ing. A. Bondesan, comunicazione personale).

In altre parole, nel periodo estivo la CE del Fiume è mantenuta bassa a causa dell'intervento antropico, mentre negli altri periodi dell'anno l'acqua è naturalmente salata a causa dell'ingressione del mare dentro il fiume durante le oscillazioni di marea e le mareggiate.

Il confronto tra livello idrometrico e temperatura nel piezometro installato nel fiume (Figura 16) appare poco significativo e riflette sostanzialmente un andamento stagionale.

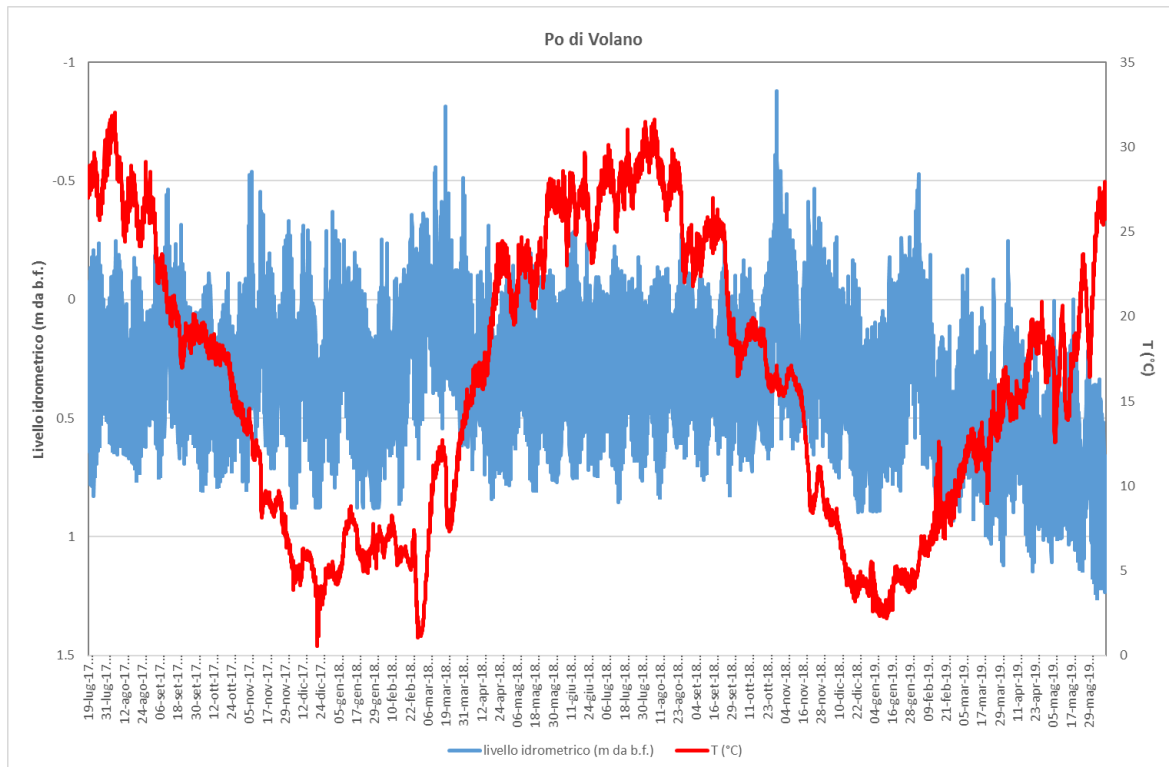


Figura 16 – Confronto tra livello idrometrico e temperatura nel Po di Volano

- Analisi comparata dei tre siti monitorati.

La Figura 17 riporta l'andamento, in quota rispetto al livello del mare, del livello piezometrico dei 4 piezometri relativi ai siti 7 e 9 e del livello idrometrico del Po di Volano. Non conoscendo in modo preciso la quota di quest'ultimo punto, si è posizionato il livello del Po considerando che esso abbia mediamente una quota simile allo zero sul livello del mare (è chiaro che si tratta di una approssimazione per difetto, ovvero che la quota dovrebbe essere un po' maggiore, forse fino a 0.5 metri, Ing. A. Bondesan comunicazione personale). La quota del Po è maggiore di oltre un paio di metri rispetto a quella della falda rilevata nei 4 piezometri, quindi è logico immaginare un flusso idrico dal Po verso il sito 7, e quindi anche verso il sito 9, anche in considerazione dei terreni molto permeabili presenti nel primo sottosuolo dell'area in questione.

Si osservi inoltre che il livello dei piezometri del sito 7, più alti topograficamente e più vicini al fiume, è sempre maggiore rispetto a quello dei piezometri nel sito 9 (più basso topograficamente).

L'andamento del livello di falda è complessivamente diverso rispetto al livello idrometrico del fiume, soprattutto per quel che riguarda l'andamento stagionale, che è riscontrato nei piezometri (più alti in autunno – inverno, più bassi in estate) e non nel fiume. Le oscillazioni dovute alla marea nel fiume hanno un'ampiezza di alcuni decimetri fino al metro, mentre nei piezometri sono di pochi centimetri, e quindi sono visibili solamente in assenza di altri fenomeni che causano modificazioni al livello (irrigazione e piogge, vedi Figura 17a).

In alcuni casi i picchi positivi del livello piezometrico della falda sono visibili anche nel Po (es. cerchi rossi in figura 17), in altre occasioni ciò invece non è apprezzabile (es. cerchio verde).

In Figura 17a sono riportati gli andamenti del livello idrometrico del Po di Volano e di tutti i piezometri in alcuni giorni del periodo analizzato (5-7 novembre 2017, 23 – 25 luglio 2018, 22- 24 gennaio 2019). Nel periodo estivo (23-25 luglio 2018) le oscillazioni del Po non sono visibili nei piezometri, che risentono invece dell'irrigazione in modo molto simile tra loro, fatto salvo il P9a, che ne risente in modo decisamente inferiore. In autunno, in un momento un po' perturbato dalle piogge (5-7 novembre 2017), l'oscillazione mareale del

fiume non è visibile in nessuno dei piezometri. Nel periodo invernale (22-24 gennaio 2019), in un momento in cui il livello delle falde non è perturbato dalle precipitazioni, nei piezometri del sito 7 e nel P9a si osservano delle deboli oscillazioni (maggiori nel sito 7 che nel P9a), riconducibili alla marea visibile nel Po.

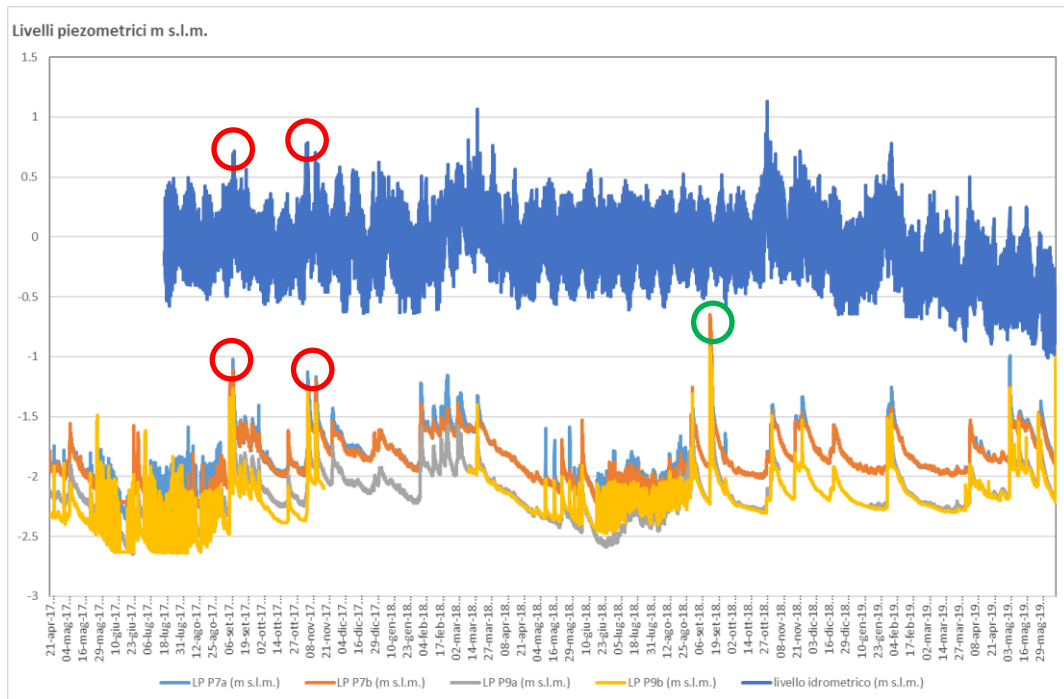


Figura 17 - Confronto tra i livelli piezometrici nel sito 7, 9 e livello idrometrico del Po di Volano.

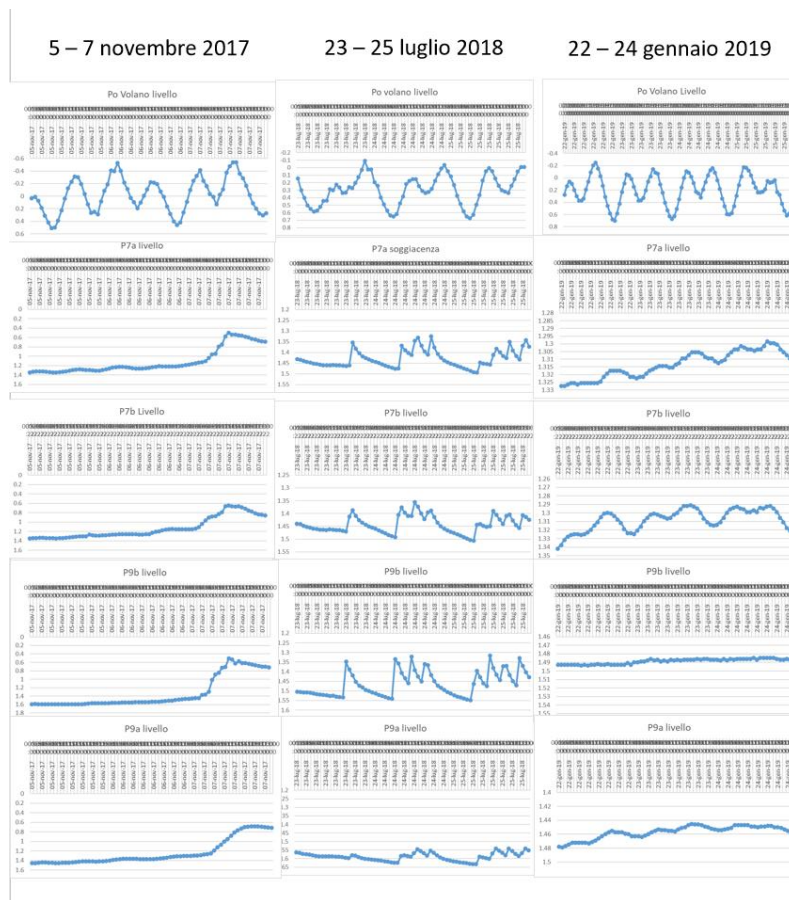


Figura 17a - analisi dettagliata dei livelli in alcuni periodi analizzati nel sito 7, 9 e Po di Volano.

Nella Figura 18 viene confrontata la CE misurata in tutti i punti di controllo. La CE risente di variazioni stagionali, raggiungendo i massimi in inverno ed i minimi in estate in tutti i punti monitorati, tranne il 9a.

In buona parte delle due estati monitorate e nella primavera del 2018 i valori della CE del Po, dei piezometri 7a, 7b e 9b sono sostanzialmente identici e pari a circa 1 mS/cm.

Visto che il fiume alimenta la falda, è del tutto verosimile che il fiume concorra, assieme all'irrigazione, a tenere la CE bassa nelle falde durante l'estate. Essendo i valori della CE nel fiume e nelle falde praticamente identici, sembra che il fiume abbia un ruolo preminente, rispetto all'irrigazione, nel mantenere bassa la CE della falda.

Il fatto che la CE del P9a non si abbassi durante l'estate 2017, e si abbassi solo tardivamente nell'estate del 2018, è probabilmente dovuto sia a fattori geologici locali che alla maggiore profondità di questo piezometro rispetto agli altri; ciò significa che l'acqua dolce dal Po (e dall'irrigazione), non riesce a penetrare nel terreno sino alla profondità di questo piezometro (sonda a 2.7 metri dal terreno, le altre sonde da 1.9 metri in su).

In inverno la CE del Po ha delle oscillazioni molto ampie, accompagnate da valori molto alti (fino a oltre 20 mS/cm), dovuti all'ingressione marina (Figura 12a). Al netto delle oscillazioni, i valori medi sono dell'ordine di circa 5 mS/cm, in analogia con i piezometri P7a e P9a (i due piezometri più profondi).

La CE nei piezometri più superficiali si mantiene invece su valori più bassi.

Mentre la CE del Fiume è sostanzialmente regolata dalla vicinanza del mare e dalle operazioni della Bonifica, il valore della CE nella falda dipende dalle precipitazioni, dall'irrigazione, dalla ricarica dal Po di Volano e dall'ingressione del cuneo salino nell'acquifero freatico costiero.

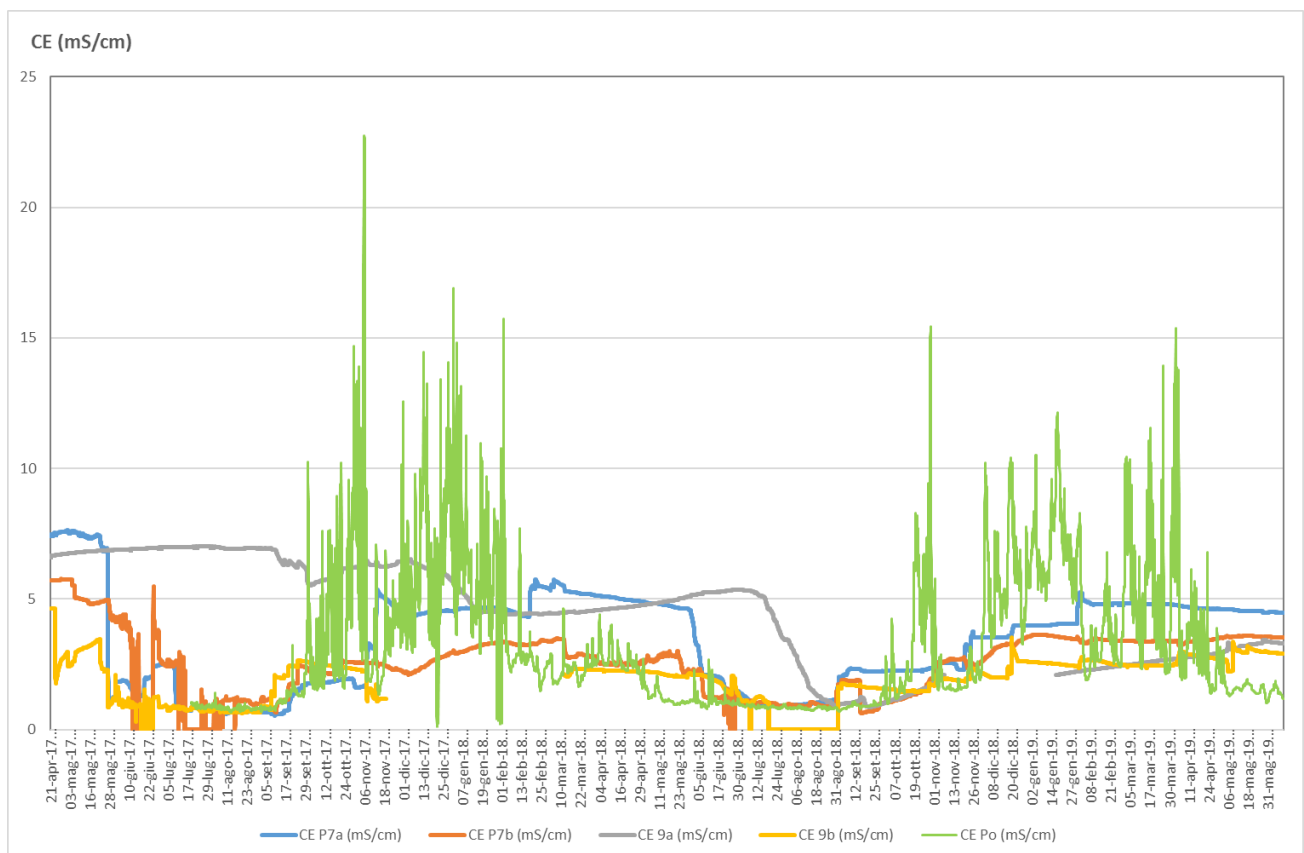


Figura 18 – Confronto tra le CE nel sito 7, 9 e Po di Volano.

Conclusioni

Per definire le relazioni di scambio idrico tra la falda freatica e le acque superficiali nella zona di Pomposa (FE), in accordo e collaborazione coi i tecnici del CER (Canale Emiliano-Romagnolo), è stato dimensionato un apposito sistema di monitoraggio costituito da cinque piezometri strumentati con sonde per la misura in continuo del livello, della temperatura e della conducibilità elettrica specifica.

Il livello della falda ha un andamento stagionale, più basso durante l'estate (giugno – agosto) e più alto nei restanti mesi dell'anno. Il minimo si è toccato nell'estate del 2017, in un periodo particolarmente siccitoso e caldo, con valori fino a oltre 1.8 metri dal piano campagna. Da maggio a settembre esso è influenzato dall'irrigazione (pochissimo il piezometro P9a), mentre nei restanti mesi dell'anno risente dell'andamento delle precipitazioni.

Il livello idrometrico del Po è caratterizzato da frequenti oscillazioni dovute alla vicinanza del mare e non risente di oscillazioni stagionali, anche in relazione alle regimazioni operate dalla Bonifica.

Il livello della falda è sempre più basso rispetto al livello del Po che quindi la alimenta durante tutto il periodo analizzato, anche in considerazione dell'alta permeabilità dei terreni presenti. Il flusso idrico va quindi dal fiume verso il sito 7 e quindi verso il sito 9.

La salinità della falda, qui misurata come conducibilità elettrica, ha un andamento stagionale, essendo più bassa e molto regolare in estate, e più alta e più variabile in inverno (ad esclusione del P9a).

La salinità del Po di Volano ha, in relazione alle operazioni della Bonifica, un andamento fortemente stagionale. In estate è bassa e molto regolare con valori del tutto analoghi a quelli delle falde, mentre in inverno è molto più alta per la forte influenza del mare.

La salinità della falda risulta essere influenzata dalla ricarica del Po di Volano (forse preponderante rispetto alle altre componenti), dal regime delle irrigazioni, dalle precipitazioni, dall'ingresso del cuneo salino nell'acquifero freatico costiero e, forse, anche dall'uso di particolari sostanze fertilizzanti.

L'influenza dell'irrigazione e della ricarica del Po sulla salinità delle falde sembra essere confinata nei primi 2 metri circa dal piano campagna.