

PROVINCIA DI FERRARA
COMUNE DI OSTELLATO

OGGETTO E ZONA DELL'INTERVENTO

**PROGETTO PER LA COLTIVAZIONE DI CAVA DI SABBIA – IV STRALCIO
IN LOCALITA' "CAVALLARA" – SAN GIOVANNI DI OSTELLATO**



COMMITTENTE

CANTONIERA CAVALLARA s.r.l. - via per Ostellato n.9/a MIGLIARINO
44027 FISCAGLIA (FE)

IL TECNICO

RUTTILIO Ing. ANTONELLO
Via Manzolli n. 19
44020 ROVERETO (FE)
cel 339-2856619

TAV.N°

12

ELABORATO

STUDIO IDROGEOLOGICO

DATA Marzo 2025

**SOCIETÀ CANTONIERA CAVALLARA S.R.L.
VIA OSTELLATO 9/A, MIGLIARINO (FE)**



Monitoraggio e modellazione numerica a densità variabile a supporto della proposta di variante al PAE del Comune di Ostellato (Ferrara)

Report finale



Consorzio Futuro in Ricerca

13/10/2023

Autori:

Prof. Leonardo Piccinini (Responsabile Scientifico)
Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova

Dott.ssa Geol. Valentina Vincenzi

Indice

1	Premessa	12
1.1	Cronistoria	12
1.2	Obiettivi dello studio	13
2	Contesto idrogeologico	15
2.1	Acquifero freatico costiero a scala regionale	15
2.2	Stato di salinizzazione	18
2.3	Quadro conoscitivo sull'area di cava	20
3	Piano di monitoraggio	23
3.1	Metodologia	25
3.1.1	Monitoraggio del carico idraulico	25
3.1.2	Profili verticali di conducibilità e temperatura (logs CT)	26
3.1.3	Stazione di monitoraggio Lago pontile	29
3.1.4	Logs CT nel lago	30
3.2	Cronologia delle attività svolte	30
3.3	Regime climatico sull'anno di monitoraggio	30
3.4	Risultati: distribuzione ed andamento del carico idraulico	33
3.5	Risultati: distribuzione della salinità e della temperatura	36
3.5.1	Piezometro PZP1	37
3.5.2	Piezometro PZ1	40
3.5.3	Piezometro PZS8	42
3.5.4	Piezometro PZ4bis	45
3.5.5	Piezometro PZ4	48
3.5.6	Piezometro PZ3	50
3.5.7	Piezometro PZ5	52
3.5.8	Piezometro PZ2	55
3.5.9	Piezometro PZS3	58
3.5.10	Piezometro P33 (RER)	61
3.5.11	Piezometro NP1	63
3.6	Analisi temporale dei logs di salinità	66
3.7	Acque del lago	84
3.7.1	Stazione di monitoraggio fissa	84

3.7.2	Logs CT nel lago	92
4	Dati meteorologici ed idrometrici	100
4.1	Dati meteorologici	100
4.1.1	Bilancio idrico del suolo	106
4.1.2	Individuazione ed analisi delle tendenze climatiche	108
4.2	Dati idrometrici	118
4.2.1	Canale Navigabile	119
4.2.2	Canale Circondariale	122
5	Modello idrogeologico concettuale	124
6	Simulazioni numeriche	127
6.1	Descrizione del codice numerico	127
6.2	Implementazione delle simulazioni di calibrazione e verifica	130
6.2.1	Discretizzazione spaziale del dominio	132
6.2.2	Discretizzazione temporale e metodi risolutivi	134
6.2.3	Parametrizzazione delle unità idrogeologiche	135
6.2.4	Parametrizzazione del lago di cava	137
6.2.5	Conversione dei valori di conducibilità in concentrazioni di solidi totali disciolti (TDS)	140
6.2.6	Condizioni al contorno ed interne	140
6.2.7	Distribuzione iniziale del carico idraulico e della salinità	145
6.3	Risultati delle simulazioni di calibrazione e verifica	146
6.3.1	Approccio metodologico	146
6.3.2	Punti di controllo	148
6.3.3	Simulazione C1	152
6.3.4	Simulazione C2	157
6.3.5	Simulazione C3	160
6.3.6	Simulazione C4	163
6.4	Implementazione delle simulazioni previsionali	166
6.4.1	Discretizzazione spaziale del lago di cava	168
6.4.2	Discretizzazione temporale e metodi risolutivi	168
6.4.3	Parametrizzazione del lago di cava	168
6.4.4	Condizioni al contorno ed interne	170
6.4.5	Distribuzione iniziale del carico idraulico e della salinità	171

6.5	Risultati delle simulazioni previsionali	171
6.5.1	Simulazione P1	172
6.5.2	Simulazione P2	176
6.5.3	Simulazione P3	179
7	Conclusioni	183
8	Riferimenti bibliografici	187

Indice delle Tabelle

Tabella 3.1. Rete di monitoraggio: coordinate geografiche (UTM-ED1950 fuso 32N) e principali caratteristiche tecniche dei piezometri.	25
Tabella 3.2. Campagne di misura eseguite sul sito e tipologie di attività svolte.	30
Tabella 3.3. Elenco delle stazioni meteorologiche più vicine al sito di studio.	31
Tabella 3.4. Misure di soggiacenza (in m da rif.) rilevate ai piezometri di monitoraggio e corrispondenti valori di carico idraulico (m s.l.m.); in verde sono evidenziati i piezometri in cui sono stati acquisiti i logs CT.	34
Tabella 3.5. SpCE delle acque del lago: valori mediati sulla verticale di ogni log e valori medi del lago per le quattro campagne.	97
Tabella 4.1. Caratteristiche delle stazioni meteorologiche utilizzate e percentuali delle lacune di registrazione della precipitazione (%P) e della temperatura (%T); longitudine (Long.) e latitudine (Lat.) sono nel sistema di riferimento WGS84.	102
Tabella 4.2. Valori medi decennali di precipitazione e temperatura atmosferica registrati presso la stazione di Guagnino nel periodo 1962-2022.	105
Tabella 4.3. Sintesi dei risultati dei test statistici sulle serie dei parametri misurati e calcolati presso la stazione di Guagnino per il periodo 1962-2022; OLS è la pendenza della regressione lineare semplice in 1/anni; T-S è la pendenza dello stimatore di Theil-Sen in 1/anni; in rosso sono evidenziati i risultati statisticamente significativi.	115
Tabella 4.4. Valori di livello idrometrico massimo, minimo e medio rilevati presso la conca di Valpagliaro (valle) nel periodo compreso tra il 10/07/2020 ed il 30/06/2023 e presso la conca di Valle Lepri (monte e valle) nel periodo compreso tra il 29/05/2020 ed il 30/06/2023.	122
Tabella 4.5. Valori massimo, minimo e medio di livello idrometrico rilevati nel Canale Circondariale a monte dell'impianto idrovoro di Valle Lepri nel periodo compreso tra il 13/08/2010 ed il 05/07/2023.	123
Tabella 6.1. Valori di conducibilità idraulica (K), porosità efficace (n_e) e dispersività longitudinale (α_L) associati alle unità idrostratigrafiche attraverso le zone.	137
Tabella 6.2. Valori di conducibilità idraulica (K) e di porosità efficace (n_e) assegnati alle celle rappresentanti il lago nelle simulazioni di verifica.	137
Tabella 6.3. Livelli di performance di NSE definiti in Moriasi et al. (2007).	148
Tabella 6.4. Punti di osservazione del carico idraulico derivati dal monitoraggio in continuo ed utilizzati per la verifica della simulazione C1 (CFR per Cantoniera Cavallara, 2009); le coordinate X e Y sono nel sistema di riferimento UTM-ED1950, fuso 32.	150

Tabella 6.5. Punti di osservazione della concentrazione derivati dal monitoraggio in continuo ed utilizzati per la verifica della simulazione C1 (CFR per Cantoniera Cavallara, 2009); le coordinate X e Y sono nel sistema di riferimento UTM-ED1950, fuso 32.	150
Tabella 6.6. Punti di controllo del livello idrometrico del lago utilizzati nelle simulazioni di verifica C2 (LC2), C3 (LC3) e C4 (LC4).	151
Tabella 6.7. Indicatori statistici di calibrazione/verifica e livello di performance.	154
Tabella 6.8. Bilancio di massa del flusso al termine della simulazione C1; i termini IN e OUT sono i flussi rispettivamente in ingresso ed in uscita dal dominio.	155
Tabella 6.9. Indicatori statistici di calibrazione/verifica e livello di performance.	158
Tabella 6.10. Bilancio di massa del flusso al termine della simulazione C2; i termini IN e OUT sono i flussi rispettivamente in ingresso ed in uscita dal dominio.	158
Tabella 6.11. Indicatori statistici di calibrazione/verifica e livello di performance.	161
Tabella 6.12. Bilancio di massa del flusso al termine della simulazione C3; i termini IN e OUT sono i flussi rispettivamente in ingresso ed in uscita dal dominio.	161
Tabella 6.13. Indicatori statistici di calibrazione/verifica e livello di performance.	164
Tabella 6.14. Bilancio di massa del flusso al termine della simulazione C4; i termini IN e OUT sono i flussi rispettivamente in ingresso ed in uscita dal dominio.	164
Tabella 6.15. Valori di precipitazione media mensile (P_m) e temperatura atmosferica media mensile (T_{am}) registrati presso la stazione di Guagnino nel periodo 2012-2022.	171
Tabella 6.16. Confronto tra i valori di carico idraulico calcolati al termine delle simulazioni C4 (2022) e P1 (2072), nei punti di controllo A2, B3, C1, C3, D1, D2 e D3 (Figura 6.34).	174
Tabella 6.17. Bilancio di massa del flusso al termine della simulazione P1; i termini IN e OUT sono i flussi rispettivamente in ingresso ed in uscita dal dominio.	175
Tabella 6.18. Confronto tra i valori di concentrazione calcolati al termine delle simulazioni C4 (2022) e P1 (2072), nei punti di controllo B2, C2, D1 e D2 (Figura 6.34).	175
Tabella 6.19. Confronto tra i valori di carico idraulico calcolati al termine delle simulazioni C4 (2022) e P2 (2072), nei punti di controllo A2, B3, C1, C3, D1, D2 e D3 (Figura 6.34).	178
Tabella 6.20. Bilancio di massa del flusso al termine della simulazione P2; i termini IN e OUT sono i flussi rispettivamente in ingresso ed in uscita dal dominio.	178
Tabella 6.21. Confronto tra i valori di concentrazione calcolati al termine delle simulazioni C4 (2022) e P2 (2072), nei punti di controllo B2, C2, D1 e D2 (Figura 6.34).	179
Tabella 6.22. Confronto tra i valori di carico idraulico calcolati al termine delle simulazioni C4 (2022) e P3 (2072), nei punti di controllo A2, B1, B2, B3, C1, C3, D1, D2 e D3 (Figura 6.34).	181
Tabella 6.23. Bilancio di massa del flusso al termine della simulazione P3; i termini IN e OUT sono i flussi rispettivamente in ingresso ed in uscita dal dominio.	181
Tabella 6.24. Confronto tra i valori di concentrazione calcolati al termine delle simulazioni C4 (2022) e P3 (2072), nei punti di controllo B1, B2, C2, D1 D2 e D3 (Figura 6.34).	182

Indice delle Figure

Figura 1.1. Inquadramento geografico della Cava Cavallara (immagine satellitare Google Earth aprile 2022).	12
--	----

Figura 2.1. Geometria dell’acquifero freatico costiero (estratti da Bonzi et al., 2012): il circoletto giallo individua il sito di studio.	16
Figura 2.2. Sezione geologica n. 5 sull’acquifero freatico costiero (estratto da SGSS-RER webgis-banche dati).	17
Figura 2.3. Logs di conducibilità elettrica specifica (mS/cm) rilevati al piezometro P33–Corte Ancona; dati estratti da SGSS-RER webgis-banche dati.	19
Figura 2.4. Sezione n. 5: stato di salinizzazione dell’acquifero freatico costiero in estate (sopra) ed inverno (sotto); estratto da SGSS-RER webgis-banche dati.	20
Figura 2.5. a) Indagini geognostiche sull’area di cava e traccia della sezione; b) Sezione litostratigrafica tra i sondaggi PZP6, PZP1, PZP2 e NP1 (da Consorzio Ferrara Ricerche per Cantoniera Cavallara, 2009).	22
Figura 3.1. Rappresentazione planimetrica della rete di monitoraggio.	24
Figura 3.2. Caratteristiche tecniche del sensore Solinst Levelogger 5 LTC – M10.	26
Figura 3.3. Esempio di restituzione grafica di logs di SpCE (sull’asse x, in mS/cm).	28
Figura 3.4. SpCE rilevata presso la stazione mareografica di Porto Garibaldi dal 2010 al 2015.	28
Figura 3.5. Stazione di monitoraggio fissa Lago pontile, allestita per il monitoraggio del livello idrometrico, della SpCE e della T del lago.	29
Figura 3.6. Ubicazione delle stazioni meteorologiche più vicine al sito di studio (in verde).	31
Figura 3.7. a) precipitazioni totali giornaliere, b) precipitazioni giornaliere cumulate e c) temperature giornaliere medie dell’aria rilevate sull’intorno dell’area di studio (le linee grigie tratteggiate individuano le campagne di misura).	32
Figura 3.8. Andamento del carico idraulico nel tempo: AD) piezometri con colonna di acqua dolce, AS) piezometri con colonna di acqua a salinità variabile.	35
Figura 3.9. Confronto tra i valori di carico idraulico registrati a) con il monitoraggio del 2016-2017 e b) quelli del 2022-2023.	36
Figura 3.10. Logs CT misurati al piezometro PZP1 nel monitoraggio 2022-2023.	38
Figura 3.11. Logs CT misurati al piezometro PZP1 nel monitoraggio 2016-2017.	39
Figura 3.12. Logs CT misurati al piezometro PZP1 nel monitoraggio 2007-2008.	39
Figura 3.13. Logs CT misurati al piezometro PZ1 nel monitoraggio 2022-2023.	41
Figura 3.14. Logs CT misurati al piezometro PZ1 nel monitoraggio 2016-2017.	42
Figura 3.15. Logs CT misurati al piezometro PZS8 nel monitoraggio 2022-2023.	43
Figura 3.16. Logs CT misurati al piezometro PZS8 nel monitoraggio 2016-2017.	44
Figura 3.17. Logs CT misurati al piezometro PZS8 nel monitoraggio 2005-2006.	44
Figura 3.18. Posizione del piezometro PZ4bis, a ridosso dell’attuale sponda del lago.	45
Figura 3.19. Logs CT misurati al piezometro PZ4bis nel monitoraggio 2022-2023.	46
Figura 3.20. Logs CT misurati al piezometro PZ4bis nel monitoraggio 2016-2017.	47
Figura 3.21. Logs CT misurati al piezometro PZ4bis nel monitoraggio 2007-2008.	47
Figura 3.22. Logs CT misurati al piezometro PZ4 nel monitoraggio 2022-2023.	49
Figura 3.23. Logs CT misurati al piezometro PZ4 nel monitoraggio 2016-2017.	50
Figura 3.24. Logs CT misurati al piezometro PZ3 nel monitoraggio 2016-2017.	51
Figura 3.25. Logs CT misurati al piezometro PZ3 nel monitoraggio 2007-2008.	52
Figura 3.26. Logs CT misurati al piezometro PZ5 nel monitoraggio 2022-2023.	53
Figura 3.27. Logs CT misurati al piezometro PZ5 nel monitoraggio 2016-2017.	54

Figura 3.28. Logs CT misurati al piezometro PZ5 nel monitoraggio 2007-2008.	54
Figura 3.29. Logs CT misurati al piezometro PZ2 nel monitoraggio 2022-2023.	56
Figura 3.30. Logs CT misurati al piezometro PZ2 nel monitoraggio 2016-2017.	57
Figura 3.31. Logs CT misurati al piezometro PZ2 nel monitoraggio 2007-2008.	57
Figura 3.32. Logs CT misurati al piezometro PZS3 nel monitoraggio 2022-2023.	59
Figura 3.33. Logs CT misurati al piezometro PZS3 nel monitoraggio 2016-2017.	60
Figura 3.34. Logs CT misurati al piezometro PZS3 nel monitoraggio 2005-2006 (ante operam).	60
Figura 3.35. Logs CT misurati al piezometro P33 (RER) nel monitoraggio 2022-2023.	62
Figura 3.36. Logs CT misurati al piezometro P33 (RER) nel monitoraggio 2016-2017.	63
Figura 3.37. Logs CT misurati al piezometro NP1 nel monitoraggio 2022-2023.	64
Figura 3.38. Logs CT misurati al piezometro NP1 nel monitoraggio 2016-2017.	65
Figura 3.39. Logs CT misurati al piezometro NP1 nel monitoraggio 2007-2008.	65
Figura 3.40. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZP1: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2007-2008, c) nel 2016-2017, d) nel 2022-2023, e) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.	69
Figura 3.41. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZM5: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2016-2017 e c) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.	70
Figura 3.42. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZS4: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2016-2017 e c) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.	71
Figura 3.43. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZ1: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2007-2008, c) nel 2016-2017, d) nel 2022-2023 ed e) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.	72
Figura 3.44. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZS8: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2016-2017, c) nel 2022-2023 e d) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.	73
Figura 3.45. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZ3: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2007-2008, c) nel 2016-2017 e c) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.	74
Figura 3.46. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZ4bis: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2007-2008, c) nel 2016-2017, d) nel 2022-2023 ed e) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.	75
Figura 3.47. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZ4: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2007-2008, c) nel 2016-2017, d) nel 2022-2023 ed e) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.	76
Figura 3.48. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZ5: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2007-2008, c) nel 2016-2017, d) nel 2022-2023 ed e) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.	77
Figura 3.49. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZ2: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2007-2008, c) nel 2016-2017, d) nel 2022-2023 ed e) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.	78

Figura 3.50. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZS3: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2016-2017, c) nel 2022-2023 e d) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.	79
Figura 3.51. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZP2: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2016-2017, c) nel 2022-2023 e d) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.	80
Figura 3.52. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro P33: a) nel 2016-2017, b) nel 2022-2023 e c) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.	81
Figura 3.53. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro NP1: a) nel 2007-2008, b) nel 2016-2017, c) nel 2022-2023 e d) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.	82
Figura 3.54. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZS7 durante il monitoraggio ante-opera del 2005-2006; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.	83
Figura 3.55. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZS9 durante il monitoraggio ante-opera del 2005-2006; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.	83
Figura 3.58. Serie dati acquisite presso la stazione Lago pontile: a) livello idrometrico del lago (in m di profondità da b.f. del tubo pvc) e temperatura dell'acqua rilevata dal sensore di livello; b) conducibilità elettrica specifica a 25 °C e temperatura rilevate dal sensore di conducibilità.	85
Figura 3.59. a) Livello idrometrico del lago (in m s.l.m.); b) confronto con il regime pluviometrico; c) confronto con il regime termometrico.	86
Figura 3.60. Monitoraggio in continuo alla stazione Lago pontile negli anni 2016-2017: a) livello idrometrico e temperatura e b) livello idrometrico e conducibilità elettrica specifica (da CFR per Società Cantoniera Cavallara, 2017).	88
Figura 3.61. Ubicazione della stazione di monitoraggio del lago nel 2008-2009 (da CFR per Società Cantoniera Cavallara, 2009).	90
Figura 3.62. Andamento del livello idrometrico orario e a) temperatura e b) SpCE misurati presso il lago di cava dal 18/02/2008 al 12/03/2009 (da CFR per Società Cantoniera Cavallara, 2009).	91
Figura 3.63. Ubicazione planimetrica dei logs CT eseguiti nel lago a) nel 2022 e b) 2023.	92
Figura 3.64. Logs CT eseguiti nel lago in data 13/06/2022 (campagna 3).	93
Figura 3.65. Logs CT eseguiti nel lago in data 28/10/2022 (campagna 7).	94
Figura 3.66. Logs CT eseguiti nel lago in data 30/01/2023 (campagna 9).	95
Figura 3.67. Logs CT eseguiti nel lago in data 09/05/2023 (campagna 12).	96
Figura 3.68. Ubicazione planimetrica dei logs CT eseguiti nel lago durante i monitoraggi del 2016-2017.	98
Figura 3.69. Logs CT eseguiti nel lago durante i monitoraggi del 2016-2017.	98
Figura 3.70. Logs CT eseguiti presso nel lago in data 05/05/2008.	99
Figura 4.1. Ubicazione delle stazioni meteorologiche di Guagnino, idrovora di Guagnino, Codigoro, Lavezzola e Sellarino-Voghiera.	102
Figura 4.2. Matrice di correlazione dei valori di: a) precipitazione mensile nel periodo 1962-2022, per le stazioni di Guagnino, idrovora di Guagnino e Codigoro e b) temperatura media mensile nel periodo 1962-2022, per le stazioni di Guagnino, Codigoro, Lavezzola e Sellarino-Voghiera.	103

Figura 4.3. Scatter plot dei valori di P_m e rette di regressione per le coppie di stazioni di: a) Idrovora di Guagnino – Guagnino e b) Codigoro – Guagnino, nel periodo 1962-2022.	103
Figura 4.4. Scatter plot dei valori di T_{a_m} e rette di regressione per le coppie di stazioni di: a) Codigoro – Guagnino, b) Lavezzola – Guagnino e c) Sellarino-Voghiera - Guagnino, nel periodo 1962-2022.	104
Figura 4.5. Andamento dei valori di precipitazione (in blu) e temperatura atmosferica (in rosso) della stazione di Guagnino nel periodo 1962-2022: a) valori mensili e b) valori annui.	105
Figura 4.6. Confronto tra l'andamento dei valori medi decennali di precipitazione (linea blu continua) e temperatura atmosferica (linea arancione continua) ed i valori medi di precipitazione (linea nera tratteggiata) e temperatura atmosferica (linea rossa tratteggiata) del periodo 1062-2022 registrati presso la stazione di Guagnino.	106
Figura 4.7. Bilancio idrico del suolo secondo Thornthwaite & Mather per la stazione di Guagnino nell'anno 2022; P_m , precipitazione mensile; E_{p_m} , evapotraspirazione potenziale media mensile, E_{r_m} , evapotraspirazione reale media mensile.	107
Figura 4.8. Andamento dei valori annui di: evapotraspirazione potenziale (E_p , in blu), evapotraspirazione reale (E_r , in rosso), deficit (D , in nero) e surplus (S , in verde) calcolati con il metodo di Thornthwaite & Mather per la stazione di Guagnino nel periodo 1962-2022.	108
Figura 4.9. Correlogrammi dei valori di precipitazione a) mensile e b) annua registrati nel periodo 1962-2022 nella stazione di Guagnino; in rosso i valori di ACF ed in verde quelli del ci95%.	112
Figura 4.10. Correlogrammi dei valori di temperatura atmosferica a) mensile e b) annua registrati nel periodo 1962-2022 nella stazione di Guagnino; in rosso i valori di ACF ed in verde quelli del ci95%.	113
Figura 4.11. Correlogrammi dei valori di: a) evapotraspirazione potenziale annua, b) evapotraspirazione reale annua, c) deficit annuo e d) surplus annuo calcolati nel periodo 1962-2022 per la stazione di Guagnino; in rosso i valori di ACF ed in verde quelli del ci95%.	114
Figura 4.12. Rette di regressione individuate attraverso la regressione lineare semplice (linea grigio continua) e lo stimatore T-S (linea nera tratteggiata) per le serie mensili di: a) precipitazione e b) temperatura atmosferica registrate nel periodo 1962-2022 nella stazione di Guagnino.	115
Figura 4.13. Rette di regressione individuate attraverso la regressione lineare semplice (linea grigio continua) e lo stimatore T-S (linea nera tratteggiata) per le serie annue di: a) precipitazione e b) temperatura atmosferica registrate nel periodo 1962-2022 nella stazione di Guagnino.	116
Figura 4.14. Rette di regressione individuate attraverso la regressione lineare semplice (linea grigio continua) e lo stimatore T-S (linea nera tratteggiata) per le serie annue di: a) evapotraspirazione potenziale, b) evapotraspirazione reale, c) deficit e d) surplus calcolate nel periodo 1962-2022 per la stazione di Guagnino.	117
Figura 4.15. Ubicazione della conca di navigazione di Valpagliari (in blu), della conca di navigazione di Valle Lepri (in verde), dell'impianto idrovoro di Valle Lepri (in arancione) e dei canali Navigabile (linea verde) e Circondariale (linea arancione).	119
Figura 4.16. Andamento del livello idrometrico orario a valle (in rosso) e a monte (in blu) della Conca di Valle Lepri e a valle (in ciano) della conca di Valpagliari: a) nel periodo compreso tra maggio 2020 e giugno 2023 e b) nel mese di giugno 2022; l'ubicazione dei punti di monitoraggio è in Figura 4.15.	121
Figura 4.17. Andamento del livello idrometrico orario del Canale Circondariale a monte dell'impianto idrovoro di Valle Lepri: a) nel periodo compreso tra il 13/08/2010 ed il 05/07/2023 e b) nel mese di giugno 2022; l'ubicazione del punto di monitoraggio è in Figura 4.15.	123

Figura 6.1. Schema esemplificativo del concetto di carico equivalente di acqua dolce (da Guo & Langevin, 2002).	130
Figura 6.2. Griglia di discretizzazione del dominio nel piano XY.	133
Figura 6.3. Discretizzazione verticale: a) lungo la riga 25 e b) lungo la colonna 25; fattore di esagerazione verticale 1 a 10; in bianco le celle corrispondenti all'acquitarzo superficiale, in blu quelle del 1° litosoma sabbioso, in verde quelle dell'acquitarzo alla base dell'acquifero e dell'acquicludo alla base di tutto il sistema ed in ciano le celle corrispondenti 2° litosoma sabbioso.	134
Figura 6.4. Parametrizzazione delle celle corrispondenti al lago (in rosso) per le simulazioni: a) C2, b) C3 e c) C4.	139
Figura 6.5. Parametrizzazione delle celle corrispondenti al lago di cava (in rosso) lungo la riga 30 della griglia di discretizzazione (vista da SO verso NE) per le simulazioni: a) C2, b) C3 e c) C4; fattore di esagerazione verticale 1 a 10; i valori dei parametri di ciascuna zona sono riportati in Tabella 6.1 ed in Tabella 6.2.	140
Figura 6.6. Rappresentazione delle condizioni al contorno assegnate sul piano XY: in marrone le celle con carico idraulico specificato (CHD) e concentrazione costante, in nero le celle con flusso nullo (no flow).	143
Figura 6.7. Rappresentazione delle condizioni al contorno lungo la riga 30: a) in marrone le condizioni di carico idraulico specificato (CHD) e b) in viola le condizioni di concentrazione costante associate a CHD, RIV ed al layer 16.	143
Figura 6.8. Rappresentazione delle condizioni interne per la simulazione dell'infiltrazione (RCH); in nero il limite del paleoalveo secondo la Carta Geomorfologica della Provincia di Ferrara.	144
Figura 6.9. Rappresentazione delle condizioni interne per la simulazione dell'interazione acque superficiali/sotterranee sui layers 1 (RIV L1), 2 (RIV L2) e 3 (RIV L3); in rosso la rete idrografica.	145
Figura 6.10. Ubicazione dei punti controllo utilizzati per le simulazioni di calibrazione/verifica, relativamente al carico idraulico (head), alla concentrazione di TDS (conc) ed alla concentrazione di TDS rilevata lungo la verticale con i logs (log).	151
Figura 6.11. Ubicazione dei punti di controllo del livello idrometrico del lago associati alle simulazioni C2, C3 e C4.	152
Figura 6.12. Confronto tra i valori osservati (obs) e calcolati (calc) al termine della simulazione C1: a) carico idraulico, b) concentrazione del monitoraggio in continuo e c) concentrazione dei logs.	154
Figura 6.13. Bilancio di massa al termine della simulazione C1.	155
Figura 6.14. Distribuzione di carico idraulico (Head) calcolata sul layer 2 al termine della simulazione C1.	156
Figura 6.15. Distribuzione della concentrazione di TDS al termine della simulazione C1 (100 anni): a) lungo la riga 23 e b) lungo la colonna 20; fattore di esagerazione verticale 10:1.	156
Figura 6.16. Distribuzione tridimensionale della concentrazione di TDS al termine della simulazione C1 (100 anni); in bianco le tracce planimetriche dei canali Circondariale e Navigabile; fattore di esagerazione verticale 10:1.	157
Figura 6.17. Confronto tra i valori osservati (obs) e calcolati (calc) al termine della simulazione C2: a) carico idraulico e b) concentrazione dei logs.	158
Figura 6.18. Bilancio di massa al termine della simulazione C2.	159
Figura 6.19. Distribuzione di carico idraulico (Head) calcolata sul layer 2 al termine della simulazione C2.	159
Figura 6.20. Distribuzione della concentrazione di TDS al termine della simulazione C2 (2 anni): a) lungo la riga 23 e b) lungo la colonna 20; fattore di esagerazione verticale 10:1.	160

Figura 6.21. Confronto tra i valori osservati (obs) e calcolati (calc) al termine della simulazione C3: a) carico idraulico e b) concentrazione dei logs.	161
Figura 6.22. Bilancio di massa al termine della simulazione C3.	162
Figura 6.23. Distribuzione di carico idraulico (Head) calcolata sul layer 2 al termine della simulazione C3.	162
Figura 6.24. Distribuzione della concentrazione di TDS al termine della simulazione C3 (9 anni): a lungo la riga 23 e b) lungo la colonna 20; fattore di esagerazione verticale 10:1.	163
Figura 6.25. Confronto tra i valori osservati (obs) e calcolati (calc) al termine della simulazione C4: a) carico idraulico e b) concentrazione dei logs.	164
Figura 6.26. Bilancio di massa al termine della simulazione C4.	165
Figura 6.27. Distribuzione di carico idraulico (Head) calcolata sul layer 2 al termine della simulazione C4.	165
Figura 6.28. Distribuzione della concentrazione di TDS al termine della simulazione C4 (5 anni): a lungo la riga 23 e b) lungo la colonna 20; fattore di esagerazione verticale 10:1.	166
Figura 6.29. Distribuzione tridimensionale della concentrazione di TDS al termine della simulazione C4 (5 anni); in bianco il perimetro del lago di cava di novembre 2022 e le tracce planimetriche dei canali Circondariale e Navigabile; fattore di esagerazione verticale 10:1.	166
Figura 6.30. Confronto tra il perimetro di progetto attuale e le ipotesi di futuri ampliamenti ipotizzate in CFR per Cantoniera Cavallara (2009).	167
Figura 6.31. Parametrizzazione delle celle corrispondenti al lago (in rosso) per le simulazioni previsionali.	169
Figura 6.32. Parametrizzazione delle celle corrispondenti al lago di cava (in rosso) lungo la riga 30 della griglia di discretizzazione (vista da SO verso NE) per le simulazioni: a) P1, b) P2 e c) P3; fattore di esagerazione verticale 10:1; i valori dei parametri di ciascuna zona sono riportati in Tabella 6.1 ed in Tabella 6.2	170
Figura 6.33. Ubicazione planimetrica dei punti di controllo del carico idraulico e della concentrazione utilizzati nelle simulazioni previsionali.	172
Figura 6.34. Confronto tra le distribuzioni di carico idraulico (Head) calcolate sul layer 2 al termine delle simulazioni C4 (2022) e P1 (2072).	174
Figura 6.35. Confronto tra i bilanci di massa delle simulazioni C4 (2022) e P1 (2072).	175
Figura 6.36. Distribuzione della concentrazione di TDS al termine della simulazione P1 (50 anni): a lungo al riga 23 e b) lungo la colonna 20; fattore di esagerazione verticale 10:1.	176
Figura 6.37. Confronto tra le distribuzioni di carico idraulico (Head) calcolate sul layer 2 al termine delle simulazioni C4 (2022) e P2 (2072).	177
Figura 6.38. Confronto tra i bilanci di massa delle simulazioni C4 (2022) e P2 (2072).	178
Figura 6.39. Distribuzione della concentrazione di TDS al termine della simulazione P2 (50 anni): a lungo al riga 23 e b) lungo la colonna 20; fattore di esagerazione verticale 10:1.	179
Figura 6.40. Confronto tra le distribuzioni di carico idraulico (Head) calcolate sul layer 2 al termine delle simulazioni C4 (2022) e P3 (2072).	180
Figura 6.41. Confronto tra i bilanci di massa delle simulazioni C4 (2022) e P3 (2072).	181
Figura 6.42. Distribuzione della concentrazione di TDS al termine della simulazione P3 (50 anni): a lungo al riga 23 e b) lungo la colonna 20; fattore di esagerazione verticale 10:1.	182

1 Premessa

1.1 Cronistoria

La Società Cantoniera Cavallara S.r.l. è titolare di un'attività di estrazione di inerti in località "Cavallara", San Giovanni di Ostellato, nel Comune di Ostellato, Provincia di Ferrara: l'ubicazione della cava è mostrata in Figura 1.1.



Figura 1.1. Inquadramento geografico della Cava Cavallara (immagine satellitare Google Earth aprile 2022).

In sede autorizzativa, allo scopo di presentare un piano di coltivazione che ottemperasse alle linee guida tracciate dal Piano infraregionale delle attività estrattive (PIAE) e recepite nel Piano comunale delle attività estrattive (PAE) del Comune di Ostellato, in particolar modo relativamente alla minimizzazione degli effetti ambientali dell'escavazione, è stato realizzato un primo studio idrogeologico finalizzato alla previsione degli effetti dell'attività sul sistema acquifero locale. Tale studio (Consorzio Ferrara Ricerche per Magnani Sas, 2006), basato su attività di indagine geognostica, monitoraggio idrogeologico e modellazione numerica, ha verificato la fattibilità idrogeologica del progetto di cava con possibilità di scavo fino a 7 m di profondità da piano campagna (p.c.) su una superficie di circa 63.270 m².

Nel 2007-2008, su prescrizione della Conferenza dei Servizi, è stato quindi eseguito un monitoraggio in corso d'opera finalizzato a verificare le previsioni modellistiche; il monitoraggio è stato inserito in uno studio idrogeologico di approfondimento (Consorzio Ferrara Ricerche per Società Cantoniera Cavallara, 2009) che aveva come secondo obiettivo una valutazione di fattibilità idrogeologica relativa a diverse ipotesi di

ampliamento ed approfondimento dell'escavazione fino a profondità di 15 m da p.c., per la programmazione della futura attività estrattiva.

Negli anni 2016-2017, con scavi che sino ad allora si erano limitati ai primi 7 m di profondità, è stato eseguito un nuovo studio idrogeologico (Consorzio Futuro in Ricerca per Società Cantoniera Cavallara, 2017) con monitoraggio in corso d'opera, al fine ottemperare alla prescrizione fornita dal Comune di Ostellato in sede di Conferenza dei Servizi, nello specifico riportata al punto H. 22 dell'Autorizzazione Convenzionata all'Attività Estrattiva prot. N° 4563 del 25/03/2013, in base alla quale la Società titolare dell'attività estrattiva doveva procedere con l'ampliamento della cava per lotti, secondo quanto riportato nel progetto sottoposto a valutazione ambientale (4 lotti in ampliamento del lago di cava con scavo a -7 m dal p.c.) e poteva procedere con la realizzazione del previsto approfondimento del lotto di lago a -12 m (ultimo lotto di escavazione in ordine di tempo) solo previa acquisizione del parere congiunto di Comune, Agenzia Regionale per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia dell'Emilia-Romagna (ARPAE), Servizio Tecnico di Bacino, Consorzio di Bonifica e Provincia sui dati del monitoraggio e revisione della modellistica presentata.

Per verificare gli effetti dell'escavazione sul sistema idrogeologico (in termini di salinità e carico idraulico) nelle tre dimensioni dello spazio, al netto delle variazioni stagionali legate alle condizioni meteorologiche, è stato realizzato un piano di monitoraggio idrogeologico in corso d'opera di durata annuale (anni 2016-17), che, confrontato con i dati dei precedenti monitoraggi, evidenziava una stazionarietà del sistema, al netto delle oscillazioni stagionali legate alla variazione delle precipitazioni meteoriche. La distribuzione della salinità era ancora comparabile a quanto rilevato nel 2006 e nel 2009; quanto osservato risultava in accordo con lo stato di avanzamento degli scavi, che sino ad allora si erano limitati ai primi 7 m di profondità, dove le acque sotterranee presentano sempre bassi valori di salinità sull'area di cava.

Accertato che il sistema idrogeologico si trovava in condizioni analoghe a quelle dell'ante operam, le simulazioni realizzate nel 2009 (descrittiva e previsionali), basate su una condizione iniziale accomunabile alla condizione attuale, potevano considerarsi ancora ampiamente valide e non necessitavano di un processo di revisione o post-audit. Poiché lo studio del 2009 aveva già indicato la compatibilità idrogeologica dell'approfondimento degli scavi fino a 15 m, sulla base del nuovo monitoraggio realizzato e della validità delle previsioni modellistiche, si confermava la compatibilità idrogeologica dell'ipotesi di ampliamento oggetto di richiesta, ossia approfondire gli scavi sul lotto cinque da -7 m a -12 m dal p.c.

1.2 Obiettivi dello studio

Nel 2022 è stato avviato un nuovo studio idrogeologico, a supporto della proposta di variante al PAE del Comune di Ostellato (Ferrara), che intendeva (1) verificare lo stato di interazione tra l'attività estrattiva presso la Cava Cavallara ed il sistema idrogeologico e (2) prevedere gli effetti dell'approfondimento dell'escavazione fino alla profondità massima di 19 m da p.c. attraverso modellazione numerica a densità variabile.

Per quanto riguarda il primo punto, lo studio intendeva verificare le variazioni indotte dall'escavazione di sabbia e conseguente formazione del lago di cava sul sistema idrogeologico in termini di distribuzione del carico idraulico e di salinità, in continuità con quanto realizzato nel 2017; i risultati sono stati utilizzati per aggiornare le simulazioni numeriche a densità variabile realizzate nel 2009, durante la fase autorizzativa, e

prevedere gli effetti dell'estensione dell'attività di scavo dai 12 m di profondità, attualmente autorizzati, fino alle profondità di 15, 17 e 19 m.

Tale studio si è sviluppato nelle seguenti fasi:

- monitoraggio idrogeologico su un intervallo temporale annuale, analogo a quello svolto sul periodo 2016-2017, e finalizzato a valutare eventuali variazioni delle condizioni idrogeologiche (carico idraulico e distribuzione della salinità) sull'intorno dell'area di cava;
- simulazione numerica del flusso a densità variabile per la riproduzione delle condizioni ante operam, in corso d'opera e per la previsione dei potenziali effetti dell'escavazione fino alle profondità di 15, 17 e 19 m da p.c.

Il presente documento illustra i risultati del nuovo studio. Dopo una breve premessa sul contesto idrogeologico regionale e locale (Par. 2), nel paragrafo 3 viene presentato il piano di monitoraggio applicato, entrando nel dettaglio della metodologia e dei risultati, con una sintesi dei risultati presentata nei paragrafi 3.6 e 3.7. Nel paragrafo 4 sono presentati ed analizzati i dati meteorologici, con un'analisi dei trend temporali in riferimento al tema dei cambiamenti climatici in atto, e i dati idrometrici dei canali limitrofi all'area estrattiva, Canale Navigabile e Canale Circondariale. Nel paragrafo 5 è sintetizzato il modello idrogeologico concettuale, fondamentale all'implementazione delle simulazioni numeriche, presentate nel paragrafo 6. Infine le conclusioni dello studio sono illustrate nel paragrafo 7.

2 Contesto idrogeologico

2.1 Acquifero freatico costiero a scala regionale

L'area oggetto di intervento è ubicata in prossimità dell'estremità occidentale di quello che dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (SGSS-RER) è stato classificato come l'acquifero freatico costiero. Negli ultimi anni, infatti, questo acquifero è stato oggetto di studi approfonditi sull'intero territorio regionale, a cura del SGSS-RER. Tali studi hanno permesso la definizione di un dettagliato modello geologico-stratigrafico del corpo acquifero, oltre che la valutazione del suo stato di salinizzazione. Nell'ambito di tali studi è stata, infatti, allestita una rete di monitoraggio composta inizialmente da 30 piezometri (successivamente implementata con altri punti di misura), sulla quale è stato eseguito il monitoraggio del carico idraulico e della salinità delle acque sotterranee dal 2009 al 2015. Una sintesi dei primi risultati è presentata nella pubblicazione Bonzi et al. (2012), mentre uno studio scientifico di ulteriore approfondimento è disponibile in Giambastiani et al. (2013). Tutti i dati sono inoltre consultabili all'interno del portale webgis-banche dati¹.

Vale la pena presentarne qui una breve sintesi, al fine di definire il contesto geologico regionale all'interno del quale il sito di studio va ad inquadrarsi, soprattutto in reazione alla tematica dello stato di salinizzazione dell'acquifero. Ciò che segue è tratto dalle fonti sopra citate.

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

L'estensione laterale e verticale dell'acquifero può essere ricavata dalle mappe ad isolinee delle quote del tetto e del letto, oltre che dalla mappa delle isopache (uguali spessori), di cui si riportano alcuni estratti in Figura 2.1: l'area di studio ricade sul margine occidentale dell'acquifero costiero, in corrispondenza di spessori elevati di acquifero, legati alla locale sovrapposizione tra corpi sabbiosi alluvionali (paleoalvei) e l'unità delle sabbie litorali.

¹ SGSS-RER webgis banche dati:
https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss/user/viewer.jsp?service=costa

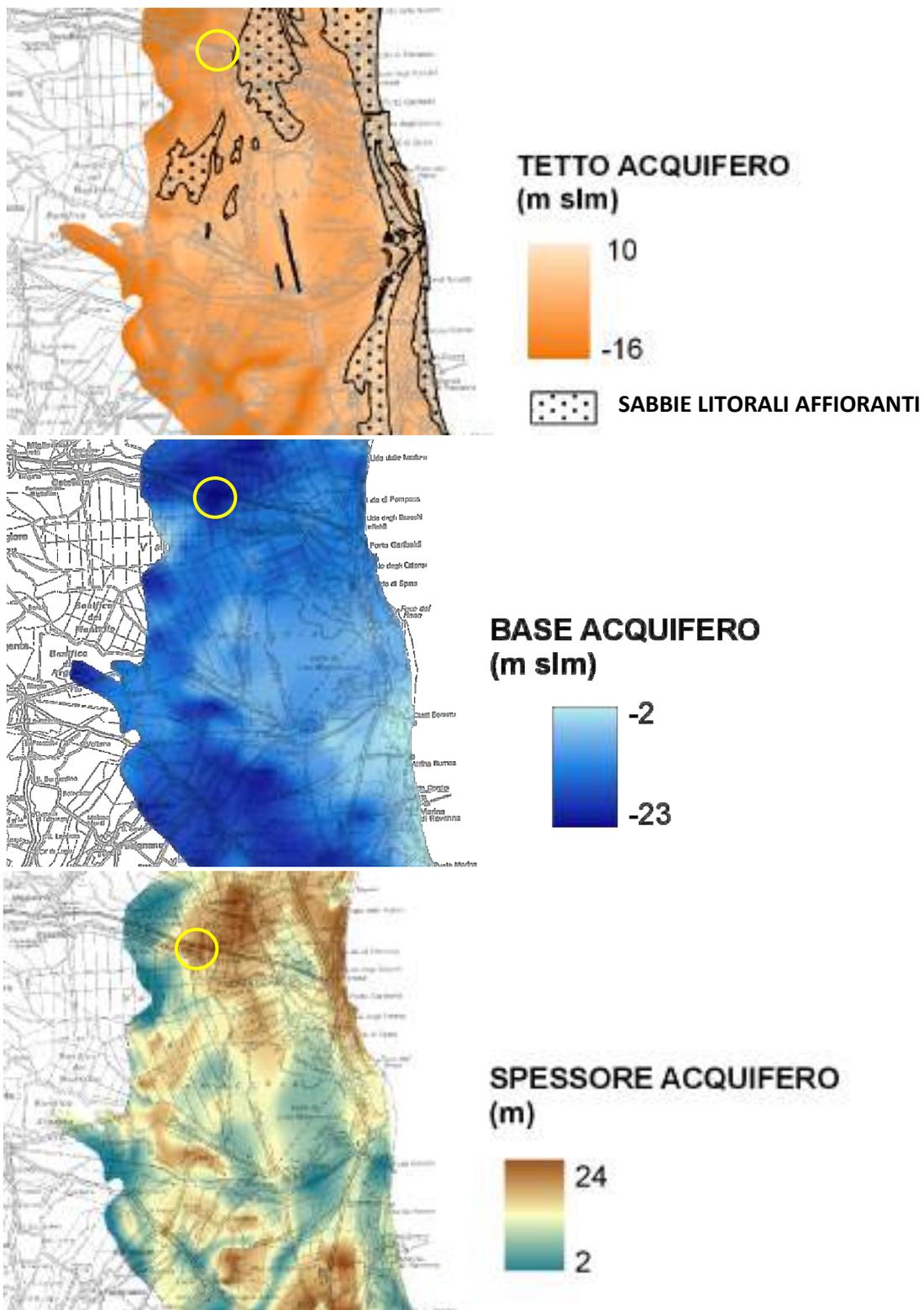


Figura 2.1. Geometria dell'acquifero freatico costiero (estratti da Bonzi et al., 2012): il circoletto giallo individua il sito di studio.

Inoltre, per il sito di studio può essere presa a riferimento dell'assetto litostratigrafico la sezione n. 5 elaborata dal SGSS-RER (Figura 2.2): essa, con orientazione circa O-E, ha inizio al piezometro P33, ubicato in corrispondenza del sito di studio, e si dirige circa perpendicolare alla linea di costa passando per gli abitati di Volania (piezometro P3) e San Giuseppe di Comacchio (piezometro P8). Dalla sezione si può comprendere meglio il modello idrostratigrafico dell'acquifero in questione: i depositi di cordone litorale sono caratterizzati da litologie sabbiose permeabili e costituiscono il corpo acquifero, mentre i depositi di pro-delta e quelli di barriera trasgressiva (colori azzurri) sono caratterizzati da depositi fini a bassa permeabilità e vanno a costituire l'acquitardo/acquiclude che delimita l'acquifero al letto. I depositi di canale e argine costituiscono i corpi dei paleoalvei, che sono anch'essi prevalentemente sabbiosi, a medio-alta permeabilità, e si trovano localmente affiancati o sovrapposti ai depositi di cordone litorale: essi, quindi, vanno a sostituire i depositi di cordone litorale e a costituire la porzione superiore del corpo acquifero.

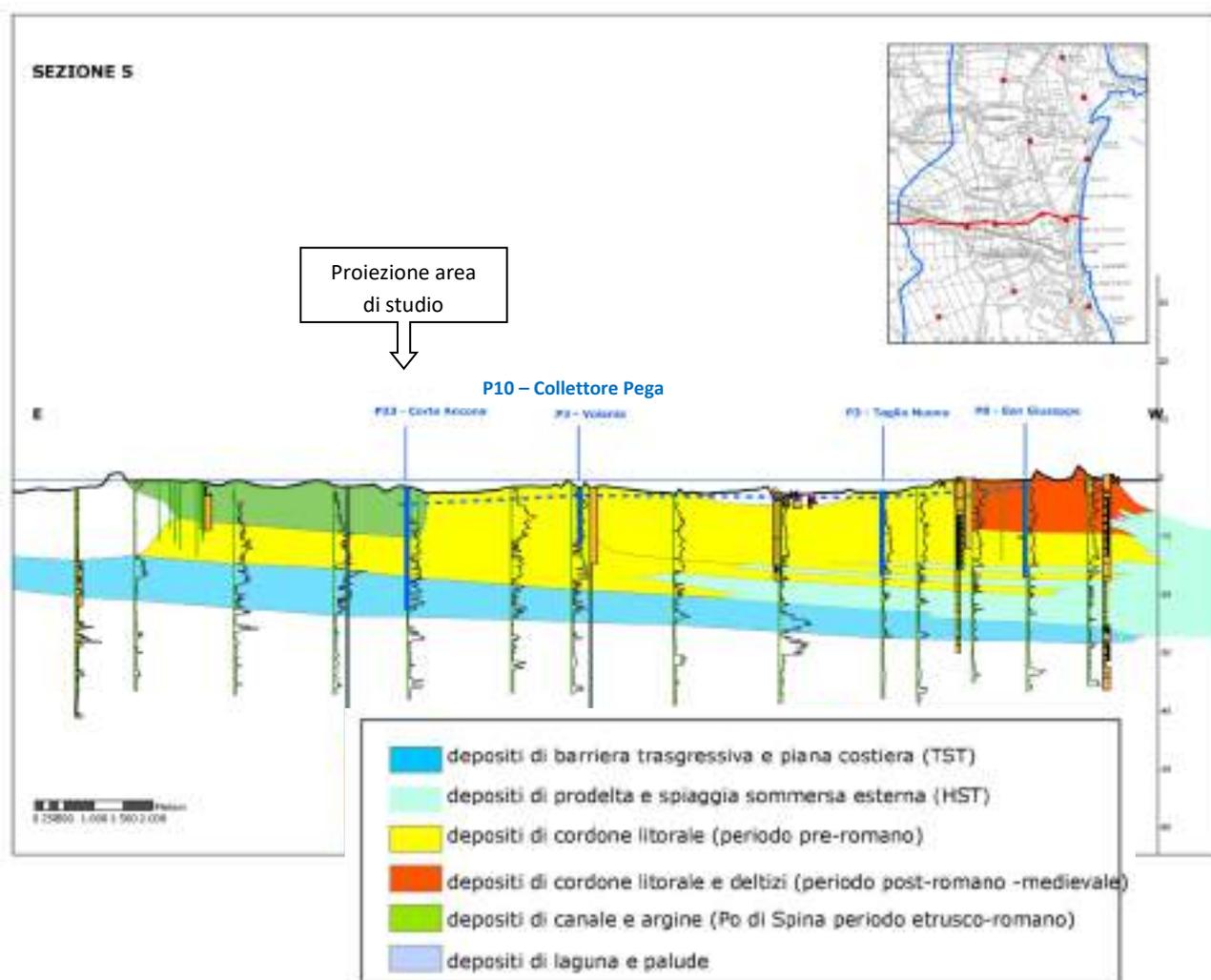


Figura 2.2. Sezione geologica n. 5 sull'acquifero freatico costiero (estratto da SGSS-RER webgis-banche dati).

2.2 Stato di salinizzazione

Lo stato di salinizzazione dell'acquifero costiero a scala regionale è stato definito dal SGSS-RER attraverso il confronto di tutti i logs di conducibilità elettrica specifica a 25 °C (SpCE) delle acque sotterranee realizzati all'interno dei piezometri costituenti la rete di monitoraggio.

Un'analisi sul sito di interesse può essere fatta osservando i logs di conducibilità rilevati al piezometro P33 (Figura 2.3), che ricade all'interno dell'area di studio, anche se esternamente all'area di cava (precisamente tra i piezometri PZP2 ed NP1, come rappresentato nella planimetria di Figura 3.1). Sono disponibili n. 15 rilievi eseguiti tra giugno 2011 e giugno 2021: essi rilevano salinità elevate per tutto lo spessore di sottosuolo investigato, con valori massimi variabili da circa 48 a 60 mS/cm. In alcuni rilievi è presente una lente superficiale di acqua sotterranea a minore salinità, caratterizzata comunque da valori di SpCE superiori a 2.5 mS/cm e quindi caratteristici di acque comunque salmastre.

Inoltre, per la sezione geologica n. 5 (Figura 2.2) è disponibile anche la rappresentazione schematica ed interpretata dello stato di salinizzazione dell'acquifero in estate e in inverno, elaborata dal SGSS-RER, che viene riportata in Figura 2.4: nell'intorno dell'area di studio il carico idraulico si trova diversi metri sotto il livello del mare e lo stato di salinizzazione è elevato, l'intero spessore saturo è interessato dalla presenza di acque salate/salmastre in entrambe le stagioni rappresentate.

Analizzando nel complesso i risultati presentati in Bonzi et al. (2012), ed in particolare quelli sulle porzioni di territorio bonificate più recentemente (Valli del Mezzano, Valli di Comacchio), se ne ricava che l'acquifero freatico costiero nell'intorno dell'area di studio presenta ad oggi uno stato di salinizzazione elevato nonostante la notevole distanza dalla linea di costa attuale. Il processo di intrusione marina dalla costa (inteso come ingressione del cuneo di acqua salata dal mare attraverso la base dell'acquifero, secondo il classico modello di Ghyben-Herzberg) non può in alcun modo essere responsabile di questa condizione; bensì occorre considerare la più recente storia geologica/geomorfologica del sottosuolo, caratterizzata da processi (anche recenti) di bonifica di terreni precedentemente invasi dal mare o appartenenti ad ambienti lagunari e/o lacustri contraddistinti dalla presenza di acqua salata/salmastra in superficie. In conseguenza della bonifica, l'utilizzo agricolo del suolo ha comportato un progressivo incremento della disponibilità di acqua dolce utilizzata a fini irrigui, che ha avviato un processo (lento e graduale) di sostituzione dell'originaria acqua salata con acqua relativamente dolce negli strati più superficiali dell'acquifero, confinando l'originaria acqua salata alle porzioni più profonde di sottosuolo, dove attualmente si registra una salinità anche molto elevata. Tale processo di sostituzione e addolcimento delle acque sotterranee nelle zone di bonifica è stato localmente favorito dal processo di ricarica verticale e laterale indotto dalla presenza dei paleoalvei, per due motivi principali: la presenza di alti topografici a maggiore permeabilità che costituiscono aree di ricarica preferenziale dell'acquifero da parte delle acque meteoriche; la frequente contestuale presenza di canali irrigui con acqua dolce che rappresentano limiti di ricarica aggiuntivi (ad es. i canali Navigabile e Circondariale nei pressi dell'area di studio).

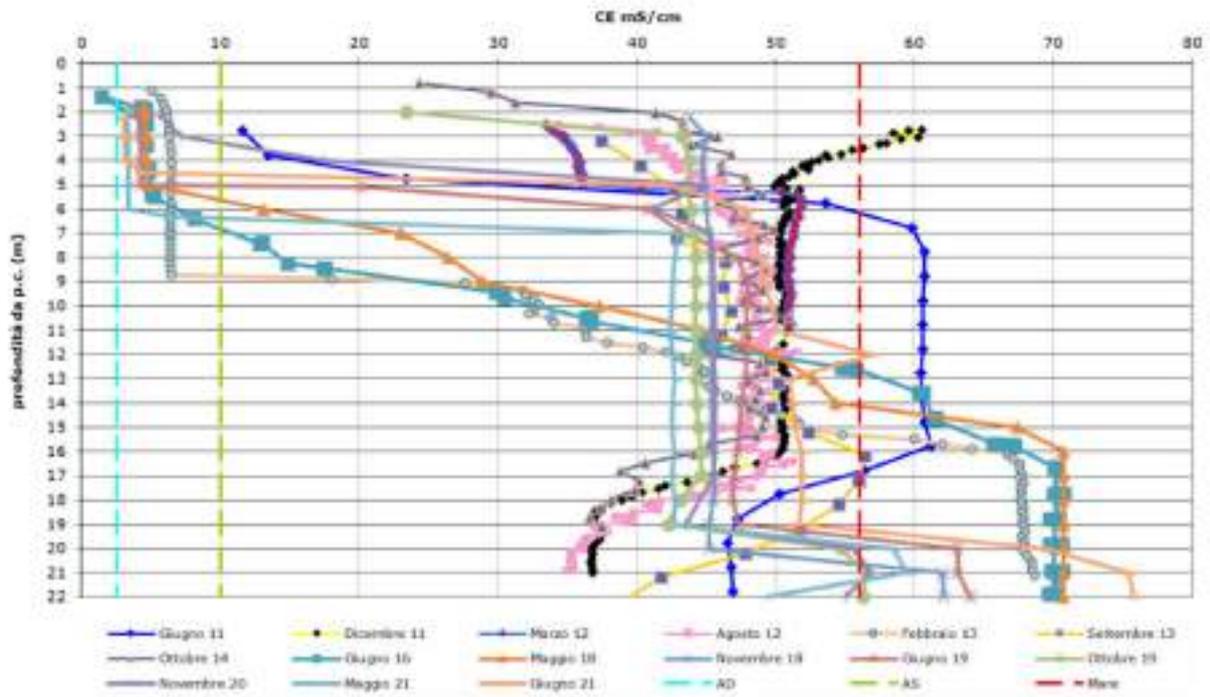


Figura 2.3. Logs di conducibilità elettrica specifica (mS/cm) rilevati al piezometro P33–Corte Ancona; dati estratti da SGSS-RER webgis-banche dati².

² Download in data 22/05/2023

https://mappegis.regione.emilia-romagna.it/gstatico/documenti/freatico_costiero/P33%20-%20Corte%20Ancona.pdf

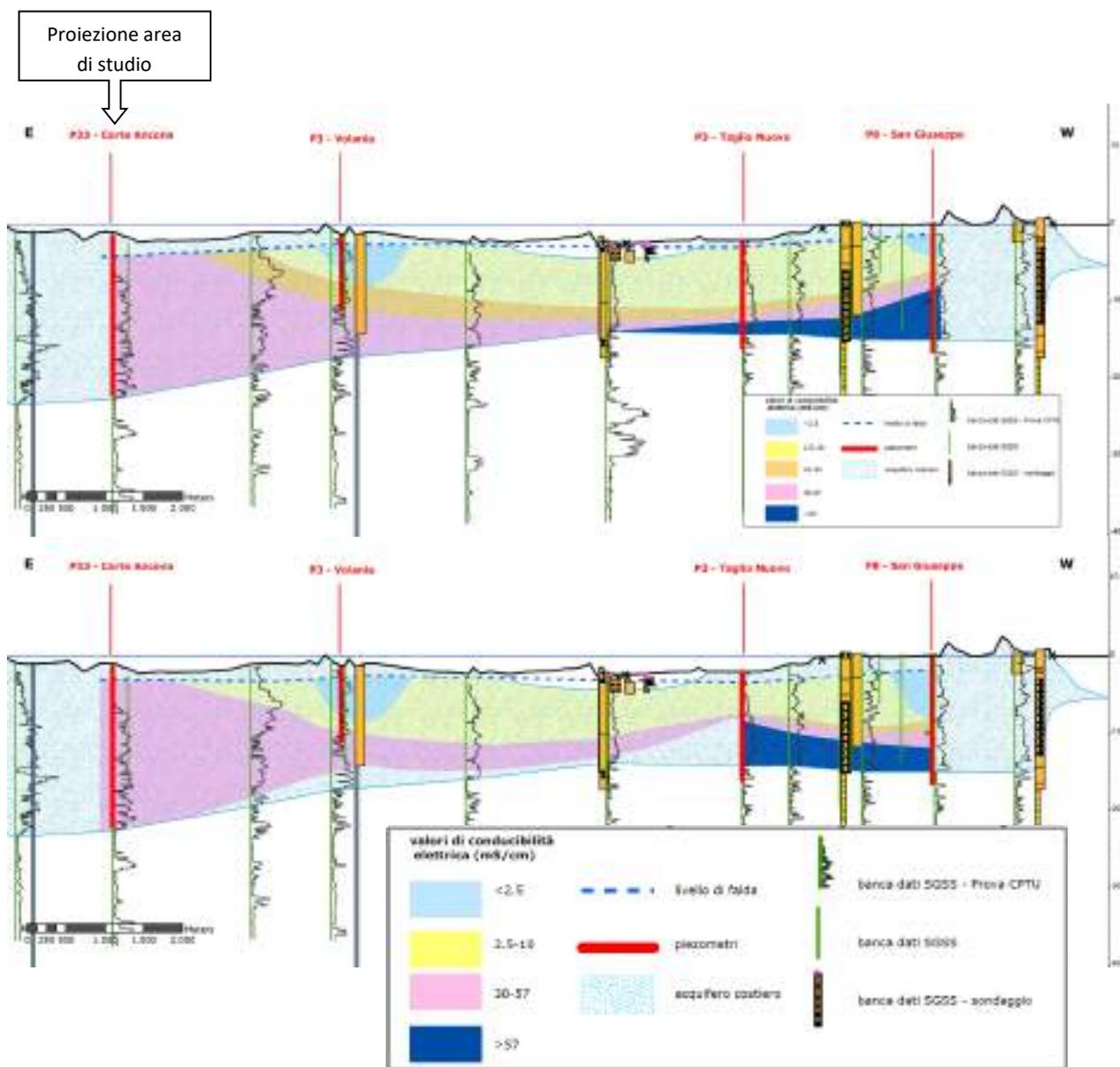


Figura 2.4. Sezione n. 5: stato di salinizzazione dell'acquifero freatico costiero in estate (sopra) ed inverno (sotto); estratto da SGSS-RER webgis-banche dati.

2.3 Quadro conoscitivo sull'area di cava

Dal punto di vista stratigrafico l'area della Cava Cantoniera Cavallara è stata dettagliatamente caratterizzata attraverso numerose indagini geognostiche eseguite tra il 1995 ed il 2007 (Figura 2.5a).

L'area è caratterizzata dalla presenza di un litosoma sabbioso principale (1° litosoma sabbioso e corpo del paleoalveo) di spessore compreso tra 14 e 19 m, che è il risultato della sedimentazione alluvionale legata al sistema distributore meandriforme del Padà - Eridano che divagava nella piana deltizia del Po durante l'Olocene e progradava sugli adiacenti depositi litorali. Questo orizzonte è subaffiorante in corrispondenza

dei canali Circondariale e Navigabile e per oltre metà della larghezza del paleoalveo (stimata complessivamente in circa 400-500 m); oltre, in direzione N-NE, è sovrastato da un livello limoso/argilloso che, congruentemente all'approfondimento del tetto delle sabbie, aumenta di spessore da 1 a 5 m. La base del litosoma sabbioso principale si trova a profondità comprese tra 16 e 21 m da p.c. ed è costituita da almeno 3 m di limi argillosi ed argille limose. Questo livello divide il litosoma sabbioso principale da un secondo orizzonte, prevalentemente sabbioso (2° litosoma sabbioso), che dalla zona di cava si sviluppa in allontanamento dal paleoalveo con spessori tra 1 e 2.5 m. La base di tutto il sistema è posta a circa 24 – 26 m di profondità da p.c. ed è rappresentata da argille grigie compatte, di almeno 4 m di spessore. In Figura 2.5b è riportata la sezione litostratigrafica elaborata in CFR per Cantoniera Cavalla (2009), tracciata in direzione SSO-NNE, dove è chiaramente rappresentata la successione litologica descritta.

Dal punto di vista idrogeologico il litosoma sabbioso principale è classificabile come un acquifero libero direttamente esposto all'infiltrazione nei pressi dei canali e del paleoalveo, mentre in allontanamento da essi la presenza del livello superficiale limoso/argilloso dà luogo a condizioni di semiconfinamento.

Le acque sotterranee sono caratterizzate da una salinità estremamente variabile compresa tra 1.2 g/l (1200 mg/l, SpCE pari a 1380 μ S/cm o 1.38 mS/cm) e 48.0 g/l (48000 mg/l, SpCE pari a 41140 μ S/cm o 41.14 mS/cm). La transizione tra gli estremi di salinità non avviene in maniera graduale ma con lo sviluppo di una zona di transizione molto netta e dallo spessore compreso tra 3 e 4 m. La dimensione e la forma della zona di transizione individuano, all'interno del 1° litosoma sabbioso e, sotto i canali, anche nell'acquitrando e nel 2° litosoma sabbioso, una lente di acqua dolce (salinità compresa tra 1.2 e 2.0 g/l) allungata secondo la direzione del sistema paleoalveo/canale e sovrapposta ad un originario strato di acqua salata/salmastra. Al di fuori del paleoalveo tutto il sistema acquifero è saturo di acque salate/salmastre (Figura 2.3).

I dati pluriennali di monitoraggio evidenziavano come durante l'anno idrologico l'areale e lo spessore della zona di transizione subiscono delle fluttuazioni in funzione dell'infiltrazione; queste fluttuazioni rimangono, comunque, all'interno di un range di variabilità regolato dai valori medi di infiltrazione e ricarica laterale ad opera della rete idrografica. Il confronto tra i dati acquisiti durante la fase ante operam (2005-2006) e quelli acquisiti in corso d'opera (2008-2009 e 2016-2017) non ha rilevato alterazioni di rilievo né sulla dinamica idrogeologica né sulla distribuzione della salinità. I valori di carico idraulico e quelli di SpCE misurati nei tre periodi, su punti tra loro confrontabili per profondità del sensore e spessore del tratto filtrato, sono risultati comparabili. Non si sono evidenziate diminuzioni localizzate o diffuse del carico idraulico che non trovassero spiegazione nella dinamica indotta dalle precipitazioni o dal regime idraulico dei canali, come non si sono registrati aumenti anomali di salinità.

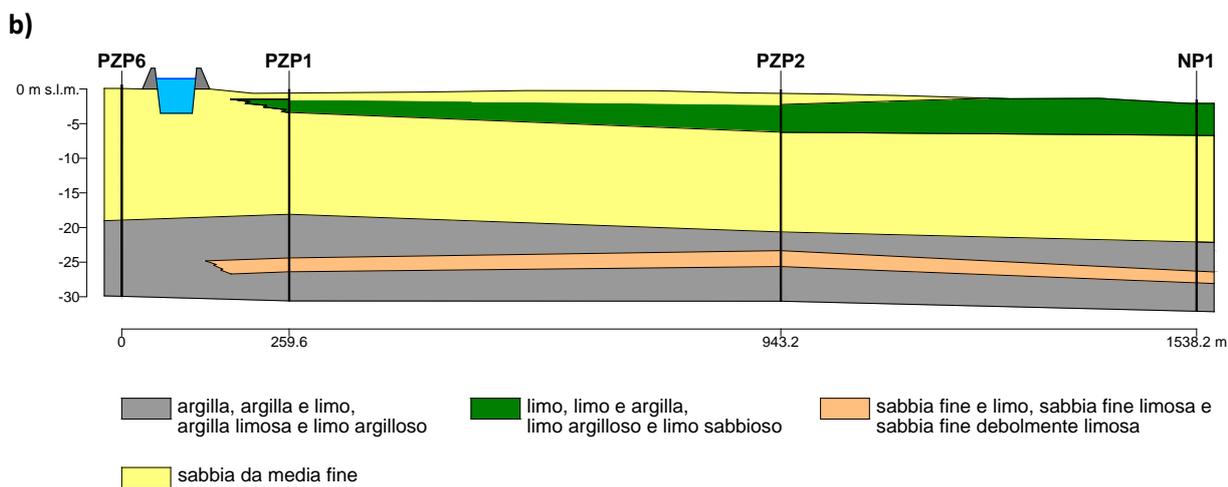
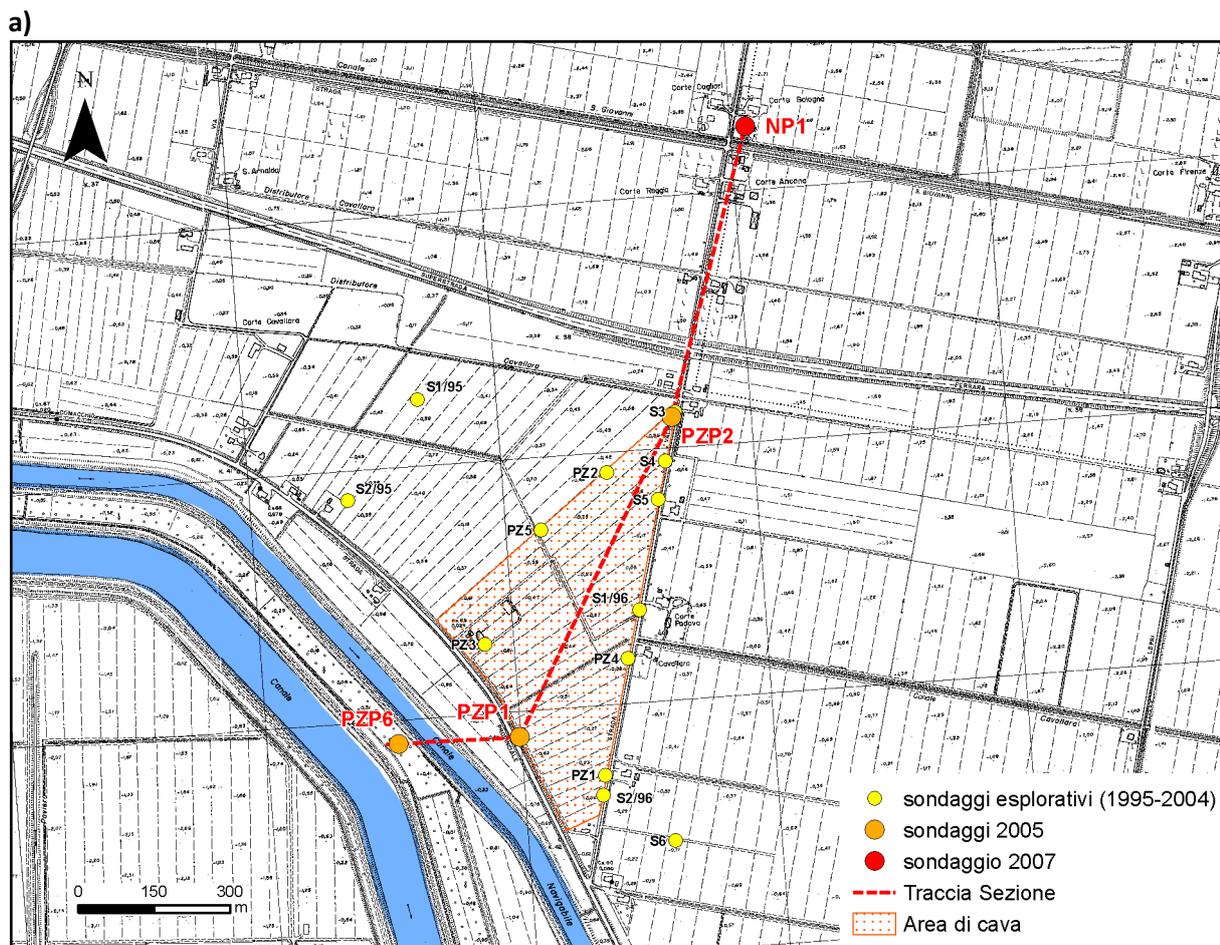


Figura 2.5. a) Indagini geognostiche sull'area di cava e traccia della sezione; b) Sezione litostratigrafica tra i sondaggi PZP6, PZP1, PZP2 e NP1 (da Consorzio Ferrara Ricerche per Cantoniera Cavallara, 2009).

3 Piano di monitoraggio

Come già illustrato negli obiettivi dello studio, il piano di monitoraggio è stato finalizzato alla caratterizzazione delle condizioni attuali del sistema idrogeologico oggetto di studio, dopo 16 anni di attività estrattiva, ossia definire le attuali distribuzioni di salinità e carico idraulico, al fine di valutare le eventuali variazioni indotte dall'estrazione di sabbia.

In ragione delle variabilità stagionali della distribuzione verticale di salinità, osservate sin dal primo studio sull'area e coerenti con quanto rilevato dai monitoraggi del SGSS-RER sull'acquifero freatico costiero (Bonzi et al., 2012; Giambastiani et al., 2013), in coerenza agli studi precedenti sull'area si è optato per un monitoraggio della durata di un intero anno, al fine di ottenere una caratterizzazione dinamica del sistema.

Sono state programmate campagne di rilevamento a cadenza circa mensile, compatibilmente alla logistica delle attività in sito e alle condizioni meteorologiche. Ogni campagna di monitoraggio ha previsto lo svolgimento delle seguenti attività:

- monitoraggio del carico idraulico: misure di soggiacenza con freatimetro su tutti i piezometri accessibili della rete di monitoraggio esistente;
- monitoraggio della salinità nell'acquifero: profili verticali di SpCE e temperatura (d'ora in avanti log CT) delle acque sotterranee all'interno di 9 piezometri della rete di monitoraggio esistente.

Al fine di caratterizzare anche l'interazione tra il lago e le acque sotterranee del 1° litosoma sabbioso, è stata attrezzata una stazione di monitoraggio fissa delle acque del lago, presso la quale sono state misurate in continuo la SpCE e la temperatura dell'acqua. Inoltre, sono stati eseguiti diversi logs CT delle acque del lago, su postazioni mobili, effettuando le misurazioni da una piccola imbarcazione a motore.

La rete di monitoraggio del carico idraulico, costituita da 13 piezometri, è rappresentata nella mappa di Figura 3.1, che utilizza come sfondo un'immagine satellitare dell'aprile 2022 disponibile in Google Earth©. La rete include tutti i piezometri ad oggi esistenti ed accessibili (colore verde in Figura 3.1), ad eccezione del piezometro PZS9 che risultava già da anni non più accessibile e di scarso interesse per la sua posizione molto marginale rispetto all'area di cava e del piezometro PZ3 che all'inizio del presente studio risultava distrutto (entrambi rappresentati con colore grigio in Figura 3.1). La rete è stata integrata in corso d'opera con il piezometro P33 (RER) della rete di monitoraggio dell'acquifero freatico costiero della Regione Emilia-Romagna (RER), che ricade in una posizione utile ai fini dello studio (colore blu in Figura 3.1).

La rete di monitoraggio della salinità nell'acquifero è costituita invece da 9 piezometri: PZP1, PZS8, PZ4bis, PZ4, PZ5, PZ2, PZS3, P33 (RER), NP1. Sono stati selezionati i piezometri con tratti filtrati adeguati alla realizzazione dei logs CT, in continuità a quanto precedentemente monitorato nel 2005-2006, 2008-2009 e 2016-2017, per poter disporre di dati storici di confronto.

La stazione di monitoraggio fissa sul lago è rappresentata in colore ciano in Figura 3.1 (Lago pontile).

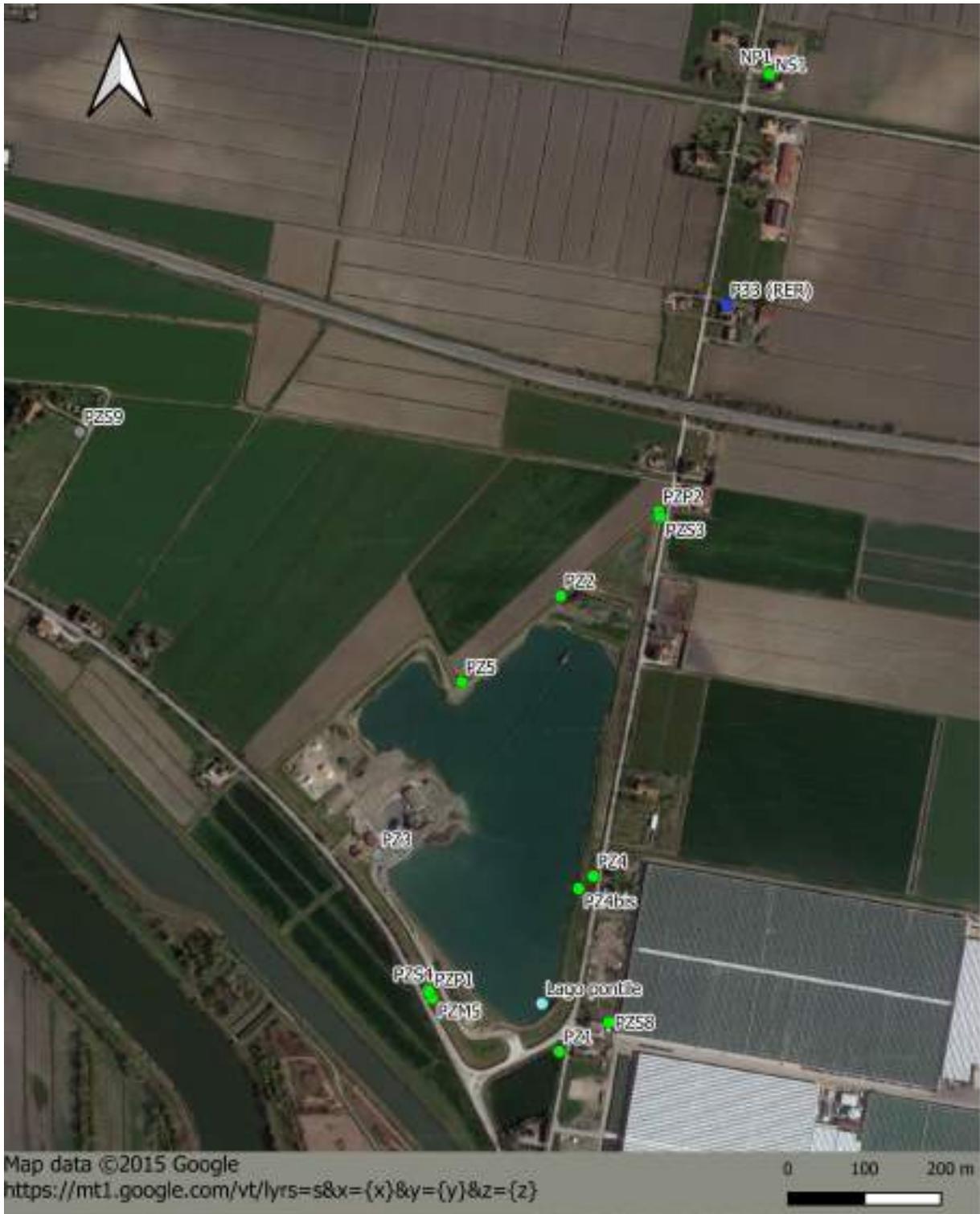


Figura 3.1. Rappresentazione planimetrica della rete di monitoraggio.

Le principali caratteristiche tecniche dei piezometri e le coordinate geografiche (UTM-ED1950 fuso 32N) di tutti i punti della rete di monitoraggio sono riportate in Tabella 3.1.

ID	X	Y	Diametro (")	Profondità tratto filtrato (m da p.c.)	Misura soggiacenza	Log CT
NP1	745247.6	4957369.5	3	1 - 25	X	X
NS1	745249.5	4957368.7	3	5 - 6	X	
PZP2	745104.7	4956791.6	3	21 - 24	X	
PZS3	745106.6	4956784.3	3	6 - 13		
PZ2	744976.2	4956680.2	3	4 - 25	X	X
PZ5	744846.7	4956566.6	2	4 - 20	X	X
PZS8	745039.4	4956118.0	3	6 - 12	X	X
PZ1	744974.2	4956079.6	3	8 – n.d.	X	
PZP1	744805.2	4956154.9	4	3 - 27	X	X
PZM5	744807.8	4956149.9	3	21 - 25	X	
PZS4	744802.8	4956159.4	3	6 - 12	X	
PZ4bis	744999.5	4956294.5	2	4 - 16	X	X
PZ4	745018.8	4956311.0	2	4 - 20	X	X
PZ3	744736.3	4956339.5	3	4 - 23	X	X
PZS9	744346.2	4956896.9	2	6 - 12		
P33 (RER)	745193.5	4957064.2	2	1 - 22	X	X
Lago pontile	744951.3	4956143.0	-	-	X	X

Tabella 3.1. Rete di monitoraggio: coordinate geografiche (UTM-ED1950 fuso 32N) e principali caratteristiche tecniche dei piezometri.

3.1 Metodologia

3.1.1 Monitoraggio del carico idraulico

Ad ogni campagna di misura, su tutti i piezometri accessibili di Tabella 3.1 è stata misurata con freatimetro manuale la soggiacenza da un riferimento quotato (bocca foro o chiusino metallico).

Le misure di soggiacenza sono state poi convertite in carico idraulico (H in m s.l.m.), utilizzando le quote topografiche dei riferimenti, come di seguito:

$$\text{Carico idraulico (m s.l.m.)} = \text{Quota topografica del riferimento (m s.l.m.)} - \text{Soggiacenza (m da rif.)}$$

3.1.2 Profili verticali di conducibilità e temperatura (logs CT)

I profili verticali o logs CT forniscono un'istantanea della distribuzione verticale della conducibilità elettrica specifica a 25 °C (SpCE) e della temperatura (T) dell'acqua all'interno di un tubo piezometrico al momento della misura: la buona permeabilità dei depositi sabbiosi permette di assumere che l'acqua nel tubo piezometrico, in corrispondenza del tratto filtrato, sia in equilibrio con l'acqua nel sottosuolo. Quindi un insieme di logs CT eseguiti su una rete di piezometri distribuiti spazialmente sull'area di studio permette la ricostruzione tridimensionale della distribuzione di SpCE e T. Se poi consideriamo che SpCE è direttamente proporzionale alla salinità dell'acqua, attraverso la realizzazione dei logs CT è possibile ricostruire la distribuzione tridimensionale della salinità nel sottosuolo.

I logs CT sono stati realizzati utilizzando un sensore di livello, T e SpCE (Modello Levellogger 5 LTC – M10, Solinst) con frequenza di acquisizione di 5 secondi e registrazione dei dati nel data-logger integrato: le caratteristiche tecniche di tale strumento sono sintetizzate in Figura 3.2.



Figura 3.2. Caratteristiche tecniche del sensore Solinst Levellogger 5 LTC – M10.

La SpCE e la T dell'acqua sono registrate ogni mezzo metro di profondità, calando lentamente il sensore lungo la verticale, al fine di evitare ogni perturbazione nella stratificazione dell'acqua all'interno del piezometro.

La restituzione grafica dei logs CT consiste poi nella costruzione di grafici che riportano sull'asse delle ordinate la quota del punto di acquisizione (in m s.l.m.) e sull'asse delle ascisse il parametro SpCE o T.

Relativamente alla SpCE, in Figura 3.3 viene riportato un esempio di restituzione grafica dei logs rilevati durante le diverse campagne di misura, dove ogni log è rappresentato con una serie di linee di colore diverso; con le linee tratteggiate nere, invece, sono rappresentate le quote di inizio e fine del tratto filtrato (o fenestrato) del piezometro, all'interno del quale la SpCE è effettivamente in equilibrio con quella delle acque sotterranee (mentre le misure effettuate in corrispondenza di tratti ciechi del tubo piezometrico non sono da considerarsi significative).

In conformità alla metodologia adottata dal SGSS-RER nei suoi studi e monitoraggi dell'acquifero freatico costiero (Bonzi et al., 2012), sull'asse x del grafico di Figura 3.3 sono inoltre riportati i range di SpCE utilizzati per classificare l'acqua in relazione al suo stato di salinità:

- SpCE < 2.7 mS/cm: entro questo valore, derivato dalla normativa sulle acque destinate al consumo umano (D.Lgs. 31/01³, recentemente sostituito dal D.Lgs. 18/23⁴), le acque possono essere definite nettamente dolci, o più correttamente a bassa salinità; va precisato che tale valore non è da considerarsi limite di legge per il caso di studio, in quanto non si tratta di acque ad uso idropotabile;
- 2.7 < SpCE < 10 mS/cm: possiamo definire tali acque come salmastre, o acque a media salinità, seppure non esista un limite superiore univoco adatto a tale definizione;
- 10 < SpCE < 25 mS/cm: oltre il valore di 10 mS/cm le acque sono certamente ad elevata salinità;
- 25 < SpCE < 55 mS/cm: le acque di mare attuali presentano oscillazioni annuali prevalentemente all'interno di questo range, come si può osservare dal grafico di Figura 3.4;
- SpCE > 55 mS/cm: tali acque possono essere definite ipersaline, in quanto presentano salinità superiori alle massime attualmente registrate nel Mare Adriatico vicino al sito di studio: si tratta di acque marine o lacustri intrappolate nei sedimenti al momento della loro deposizione e lì rimaste senza aver subito alcun processo di sostituzione per ricarica meteorica o laterale, da parte dei canali.

³ D.Lgs. 2 febbraio 2001, n. 31 "Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano"

⁴ D.Lgs. 23 febbraio 2023, n. 18 "Attuazione della direttiva (UE) 2020/2184 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 16 dicembre 2020, concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano" – Allegato I, Parte C, Tabella C1. Parametri indicatori: Conduttività 2500 μ S/cm a 20°C.

Il valore di 2500 μ S/cm (2.5 mS/cm) riferito alla temperatura di 20°C corrisponde a 2741 μ S/cm (2.7 mS/cm) riferito alla temperatura di 25°C (come i dati di cui al presente studio).

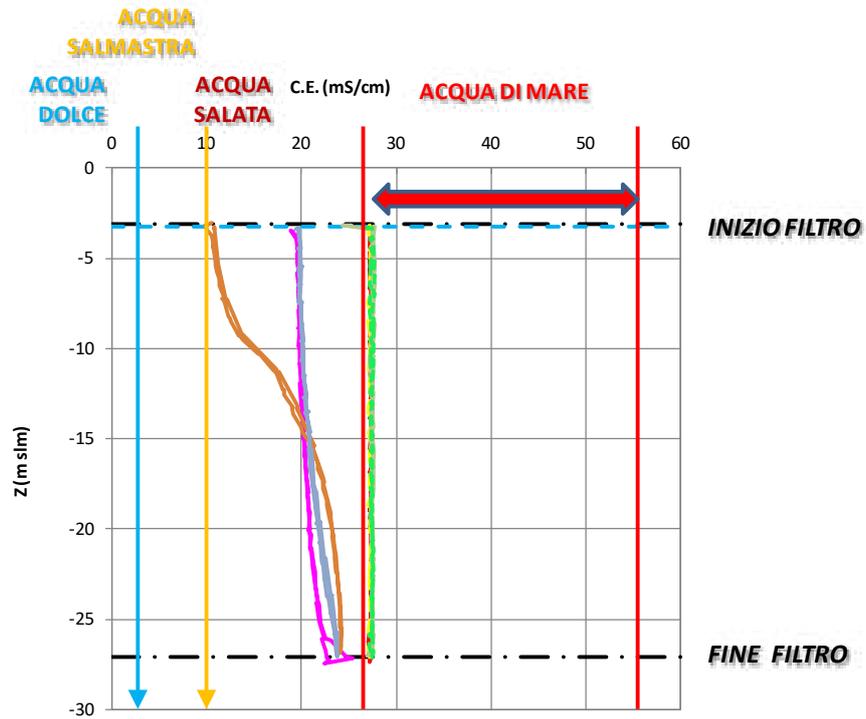


Figura 3.3. Esempio di restituzione grafica di logs di SpCE (sull'asse x, in mS/cm).

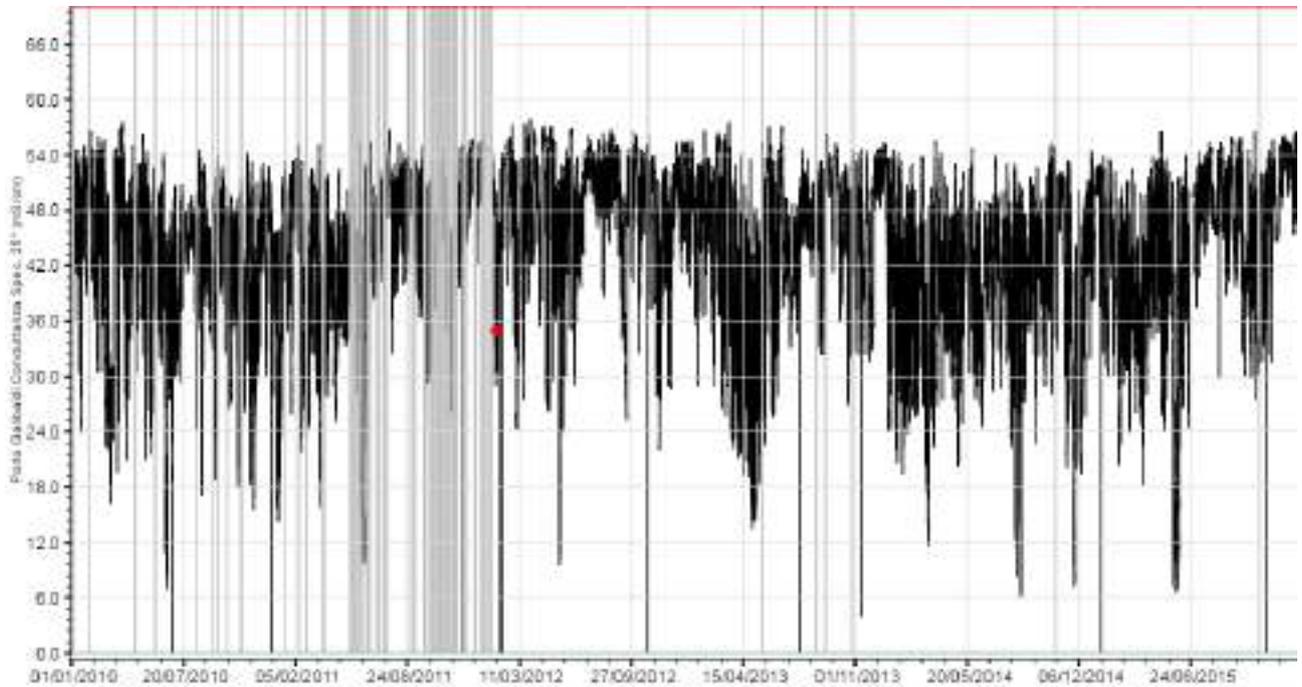


Figura 3.4. SpCE rilevata presso la stazione mareografica di Porto Garibaldi dal 2010 al 2015.

3.1.3 Stazione di monitoraggio Lago pontile

Al fine di monitorare eventuali variazioni di salinità del lago, è stata attrezzata una stazione di monitoraggio fissa delle acque del lago, nei pressi dell'ingresso alla cava (planimetria di Figura 3.1 e fotografia di Figura 3.5). La stazione è stata posizionata lontano dalle zone attuali di dragaggio, per evitare intorbidimenti eccessivi delle acque che potessero disturbare l'acquisizione dei dati e contemporaneamente non interferire con le attività della cava.

Un tubo piezometrico fessurato per l'intera sua lunghezza è stato infisso nel fondo del lago in posizione verticale e stabile, ancorato ad un pontile galleggiante con rampa di raccordo alla riva.

Un sensore di pressione e temperatura (ONSET, modello HOBO U20L-01) ed un sensore di temperatura e conducibilità elettrica specifica (ONSET, modello HOBO data-logger U24-002) installati in posizione fissa all'interno del tubo piezometrico fessurato hanno acquisito con frequenza oraria i parametri pressione, SpCE e T dell'acqua del lago dal 27/04/2022 al 09/05/2023.

All'interno del chiusino piezometrico del vicino piezometro PZ4 è stato installato 1 sensore barometrico (ONSET, modello HOBO U20L-04) per l'acquisizione con frequenza oraria dei parametri temperatura e pressione atmosferica, necessari per la compensazione barometrica dei valori di pressione acquisiti nel lago ed il calcolo dello spessore di colonna d'acqua sovrastante lo strumento.

La battitura topografica del bocca foro (b.f.) del tubo piezometrico ha permesso di convertire le altezze di colonna d'acqua (manuali e automatiche) in livelli idrometrici riferiti al livello medio mare.

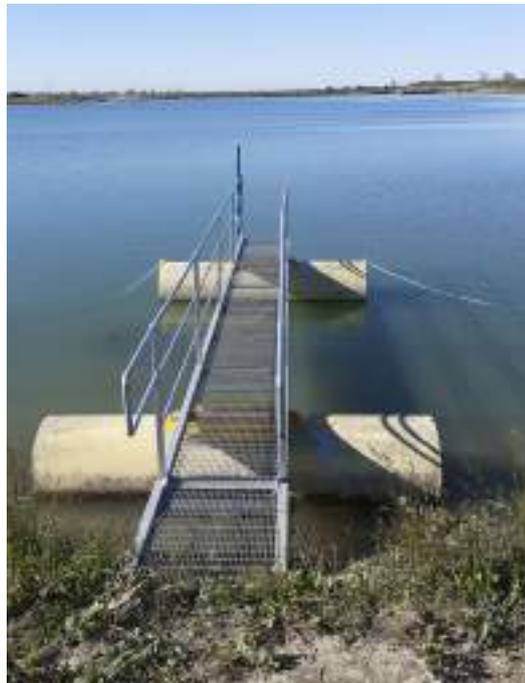


Figura 3.5. Stazione di monitoraggio fissa Lago pontile, allestita per il monitoraggio del livello idrometrico, della SpCE e della T del lago.

3.1.4 Logs CT nel lago

Durante diverse campagne di monitoraggio sono stati eseguiti alcuni logs CT nelle acque del lago, in punti diversi dalla stazione Lago pontile, al fine di verificare se esistessero zonazioni o stratificazioni di salinità all'interno del bacino. A tali punti si accedeva utilizzando una piccola imbarcazione a motore.

I logs CT sono stati eseguiti con le medesime modalità di quelli nei piezometri, anche se con passo d'acquisizione minore sulla verticale (circa 30 cm).

Questi rilievi sono disponibili per le campagne di giugno e ottobre 2022, gennaio e maggio 2023.

3.2 Cronologia delle attività svolte

Il piano di monitoraggio è iniziato ad aprile 2022 ed è terminato a maggio 2023.

Lo schema cronologico delle attività svolte è sintetizzato in Tabella 3.2, dove sono indicate le tipologie di rilievi eseguiti, in corrispondenza di ogni campagna di misura e della data di esecuzione.

	12/04/2022	19/05/2022	13/06/2022	26/07/2022	25/08/2022	29/09/2022	28/10/2022	21/12/2022	30/01/2023	06/03/2023	30/03/2023	09/05/2023
ID campagna di misura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Misure piezometriche	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Logs CT nei piezometri	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Monitoraggio in continuo alla stazione Lago pontile		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Logs CT nelle acque del lago			X				X		X			X

Tabella 3.2. Campagne di misura eseguite sul sito e tipologie di attività svolte.

3.3 Regime climatico sull'anno di monitoraggio

Il regime climatico dell'anno di monitoraggio è stato ricostruito a partire dai dati di temperatura media giornaliera dell'aria (a 2 m dal suolo) e di precipitazione totale giornaliera registrati presso le più vicine stazioni meteorologiche disponibili, scaricati dal portale del servizio Dexter ARPAE⁵.

L'elenco delle stazioni è presentato in Tabella 3.3 e l'ubicazione nella planimetria di Figura 3.6.

In Figura 3.7 sono rappresentati, invece, gli andamenti della temperatura media giornaliera dell'aria e della precipitazione giornaliera cumulata registrate presso le stazioni, sull'intervallo temporale dal 01/01/2022 al

⁵ Servizio Dexter ARPAE: <http://www.smr.arpa.emr.it/dext3r/>

10/05/2023. Si precisa che relativamente alle precipitazioni sono rappresentate solo le serie dati complete sul periodo di monitoraggio, disponibili alle stazioni di Final di Rero e Guagnino.

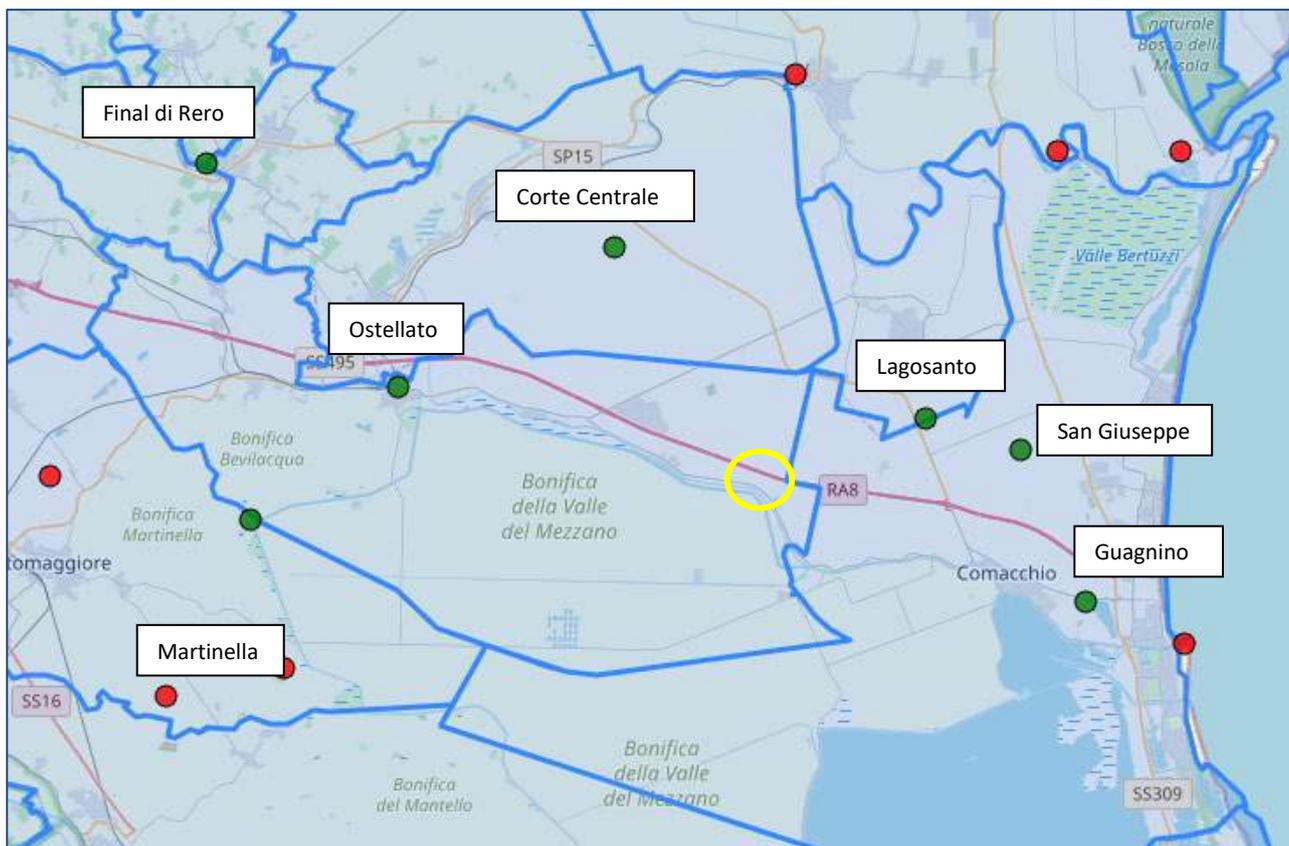


Figura 3.6. Ubicazione delle stazioni meteorologiche più vicine al sito di studio (in verde).

Nome della stazione	Rete di misura	Comune	Altezza (m s.l.m.)	Longitudine (°)	Latitudine (°)	Variabili disponibili
Final di Rero	profe	TRESIGNANA	-2	11.86766	44.81082	P, T
Ostellato	profe	FISCAGLIA	-2	11.9427	44.74798	P (serie incompleta), T
Lagosanto	profe	LAGOSANTO	-4	12.14884	44.73955	P (serie incompleta), T
Guagnino	simnbo	COMACCHIO	1	12.211614	44.688402	P, T
S. Giuseppe	profe	COMACCHIO	-5	12.18604	44.7304	P (serie incompleta), T
MARTINELLA	locali	OSTELLATO	-3	11.88483	44.71096	P (serie incompleta), T
Corte Centrale	Profe	FISCAGLIA	-2	12.02761	44.7872	T

Tabella 3.3. Elenco delle stazioni meteorologiche più vicine al sito di studio.

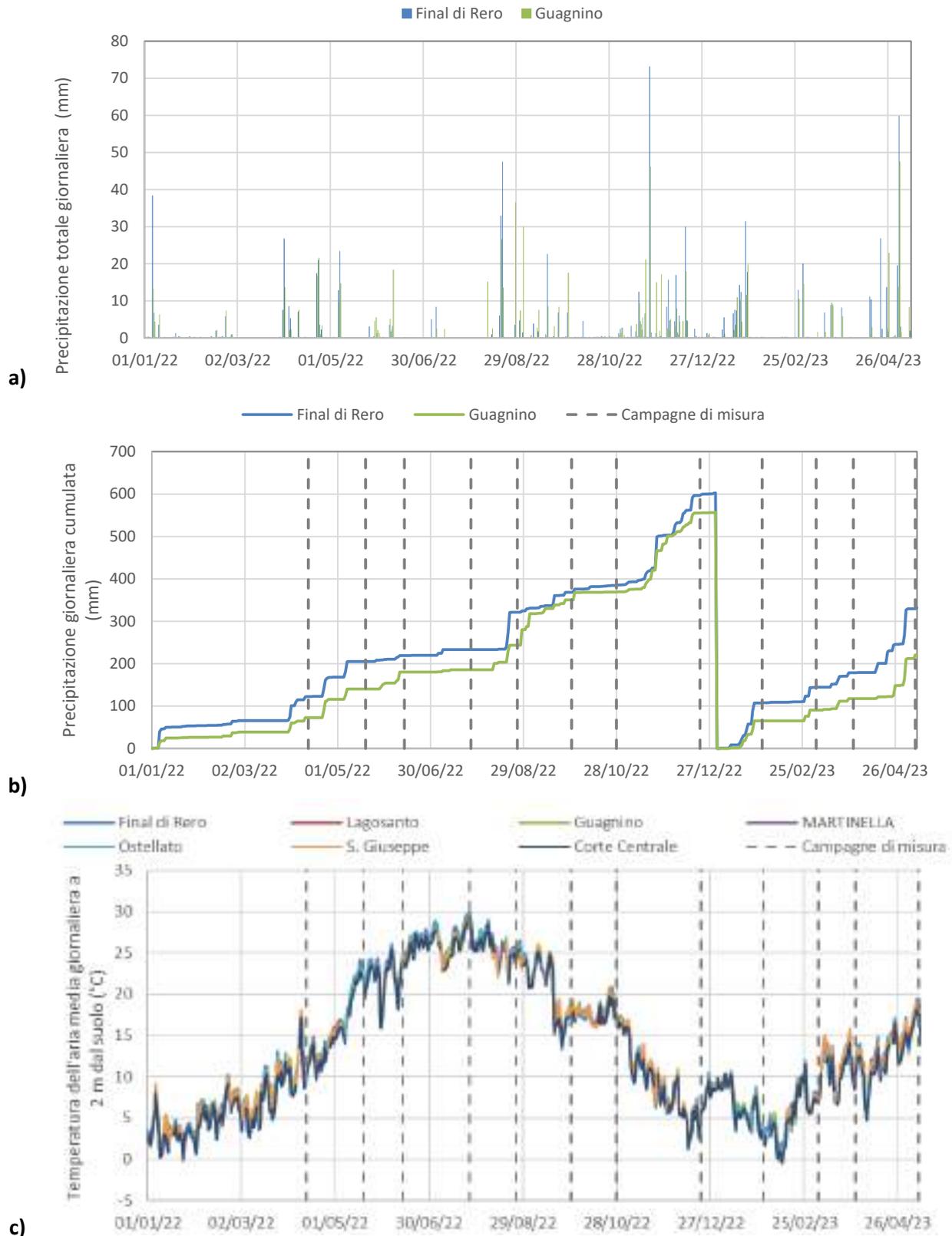


Figura 3.7. a) precipitazioni totali giornaliere, b) precipitazioni giornaliere cumulate e c) temperature giornaliere medie dell'aria rilevate sull'intorno dell'area di studio (le linee grigie tratteggiate individuano le campagne di misura).

3.4 Risultati: distribuzione ed andamento del carico idraulico

Le misure di soggiacenza e carico idraulico rilevate manualmente alle diverse campagne di monitoraggio sono riportate in Tabella 3.4.

In Figura 3.8 sono mostrati gli andamenti del carico idraulico in funzione del tempo, suddivisi in due gruppi: i piezometri con l'intera colonna d'acqua dolce (AD) ed i piezometri con colonna d'acqua a salinità variabile (AS; dolce, zona di transizione e salata).

I trend sono tutti coerenti tra loro, a dimostrazione del fatto che i piezometri sono rappresentativi dello stesso sistema acquifero: le escursioni di carico idraulico sono limitate ad un ristretto range di variazione, a causa della regimazione artificiale operata dalla rete consortile di canali di scolo; le variazioni osservate corrispondono agli eventi meteorici più significativi. L'andamento del carico idraulico nei piezometri è congruo con quanto rilevato nella campagna di monitoraggio 2016-2017 (Figura 3.9).

				Soggiacenza (m da rif.)											
ID	X	Y	Z rif. (m slm)	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08	C09	C10	C11	C12
				12/04/22	19/05/22	13/06/22	26/07/22	25/08/22	29/09/22	28/10/22	21/12/22	30/01/23	06/03/23	30/03/23	09/05/23
Lago pontile	744908.00	4956121.00	-0.620		1.48	1.55	1.74	1.79	1.75	1.78	1.53	1.30	1.30	1.30	1.23
PZ4bis (interno)	744999.51	4956294.52	0.118	1.99	1.99	2.05	2.23	2.25	2.24	2.24	2.00	1.82	1.84	1.84	1.77
PZ4 (esterno)	745018.79	4956311.00	0.328	2.09	2.10	2.15	2.29	2.35	2.32	2.33	2.08	1.92	1.95	1.96	
PZ2	744976.18	4956680.24	0.583	2.65	2.68	2.76	2.96	2.98	2.95	2.96	2.68	2.45	2.48	2.51	
PZ5	744846.70	4956566.59	0.510	2.60	2.60	2.68	2.87	2.91	2.90	2.90	2.64	2.42	2.41	2.43	
PZP2	745104.67	4956791.57	-0.560	1.85	1.89	1.93	2.03	2.06	2.06	2.15	1.90	1.64	1.68	1.80	
PZS3	745106.56	4956784.28	-0.537	1.97	1.97	2.02	2.18	2.25	2.23	2.26	1.90	1.58	1.72	1.79	
PZP1	744805.23	4956154.89	-0.269	1.49	1.54	1.60	1.75	1.78	1.77	1.75	1.50	1.33	1.39	1.39	1.31
PZM5	744807.78	4956149.87	-0.167	1.63	1.69	1.70	1.88	1.88	1.88	1.89	1.63	1.49	1.51	1.54	1.45
PZS4	744802.83	4956159.41	-0.106	1.69	1.76	1.79	1.96	1.96	1.98	1.96	1.71	1.55	1.58	1.60	1.51
PZ1	744974.25	4956079.63	0.517	2.49	2.51	2.59	2.85	2.76	2.77	2.75	2.47	2.31	2.36	2.37	
PZS8	745039.44	4956117.96	0.080	2.21	2.20	2.28	2.45	2.47	2.45	2.45	2.17	2.30	2.07	2.10	
P33 (RER)	745193.51	4957064.22	-1.270	1.98	1.93	1.95	2.05		2.20	2.29	1.79	1.42	1.63	1.75	
NP1	745247.59	4957369.54	-1.820	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.40	1.35	1.08	0.90	1.00	1.05	
NS1	745249.47	4957368.71	-1.840	1.41	1.48	1.54	1.67	1.72	1.72	1.82	1.35	1.11	1.34	1.43	

				Carico idraulico (m s.l.m.)											
ID	X	Y	Z rif. (m slm)	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08	C09	C10	C11	C12
				12/04/22	19/05/22	13/06/22	26/07/22	25/08/22	29/09/22	28/10/22	21/12/22	30/01/23	06/03/23	30/03/23	09/05/23
Lago pontile	744908.00	4956121.00	-0.620		-2.10	-2.17	-2.36	-2.41	-2.37	-2.40	-2.15	-1.92	-1.92	-1.92	-1.85
PZ4bis (interno)	744999.51	4956294.52	0.118	-1.87	-1.87	-1.93	-2.11	-2.13	-2.12	-2.12	-1.88	-1.70	-1.72	-1.72	-1.65
PZ4 (esterno)	745018.79	4956311.00	0.328	-1.76	-1.77	-1.82	-1.96	-2.02	-1.99	-2.00	-1.75	-1.59	-1.62	-1.63	
PZ2	744976.18	4956680.24	0.583	-2.07	-2.10	-2.18	-2.38	-2.40	-2.37	-2.38	-2.10	-1.87	-1.90	-1.93	
PZ5	744846.70	4956566.59	0.510	-2.09	-2.09	-2.17	-2.36	-2.40	-2.39	-2.39	-2.13	-1.91	-1.90	-1.92	
PZP2	745104.67	4956791.57	-0.560	-2.41	-2.45	-2.49	-2.59	-2.62	-2.62	-2.71	-2.46	-2.20	-2.24	-2.36	
PZS3	745106.56	4956784.28	-0.537	-2.51	-2.51	-2.56	-2.72	-2.79	-2.77	-2.80	-2.44	-2.12	-2.26	-2.33	
PZP1	744805.23	4956154.89	-0.269	-1.76	-1.81	-1.87	-2.02	-2.05	-2.04	-2.02	-1.77	-1.60	-1.66	-1.66	-1.58
PZM5	744807.78	4956149.87	-0.167	-1.80	-1.86	-1.87	-2.05	-2.05	-2.05	-2.06	-1.80	-1.66	-1.68	-1.71	-1.62
PZS4	744802.83	4956159.41	-0.106	-1.80	-1.87	-1.90	-2.07	-2.07	-2.09	-2.07	-1.82	-1.66	-1.69	-1.71	-1.62
PZ1	744974.25	4956079.63	0.517	-1.97	-1.99	-2.07	-2.33	-2.24	-2.25	-2.23	-1.95	-1.79	-1.84	-1.85	
PZS8	745039.44	4956117.96	0.080	-2.13	-2.12	-2.20	-2.37	-2.39	-2.37	-2.37	-2.09	-2.22	-1.99	-2.02	
P33 (RER)	745193.51	4957064.22	-1.270	-3.25	-3.20	-3.22	-3.32		-3.47	-3.56	-3.06	-2.69	-2.90	-3.02	
NP1	745247.59	4957369.54	-1.820	-2.82	-2.82	-2.82	-2.82	-2.82	-3.22	-3.17	-2.90	-2.72	-2.82	-2.87	
NS1	745249.47	4957368.71	-1.840	-3.25	-3.32	-3.38	-3.51	-3.56	-3.56	-3.66	-3.19	-2.95	-3.18	-3.27	

Tabella 3.4. Misure di soggiacenza (in m da rif.) rilevate ai piezometri di monitoraggio e corrispondenti valori di carico idraulico (m s.l.m.); in verde sono evidenziati i piezometri in cui sono stati acquisiti i logs CT.

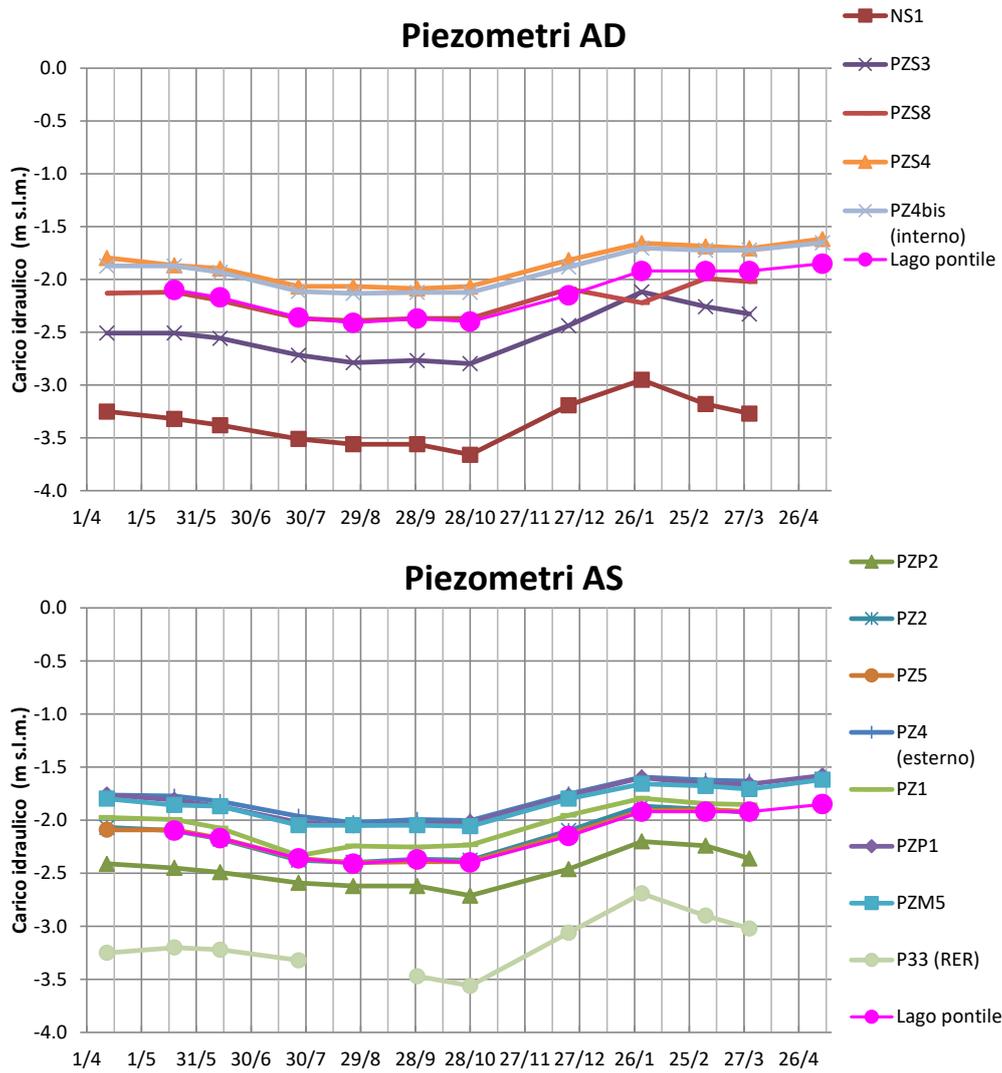


Figura 3.8. Andamento del carico idraulico nel tempo: AD) piezometri con colonna di acqua dolce, AS) piezometri con colonna di acqua a salinità variabile.

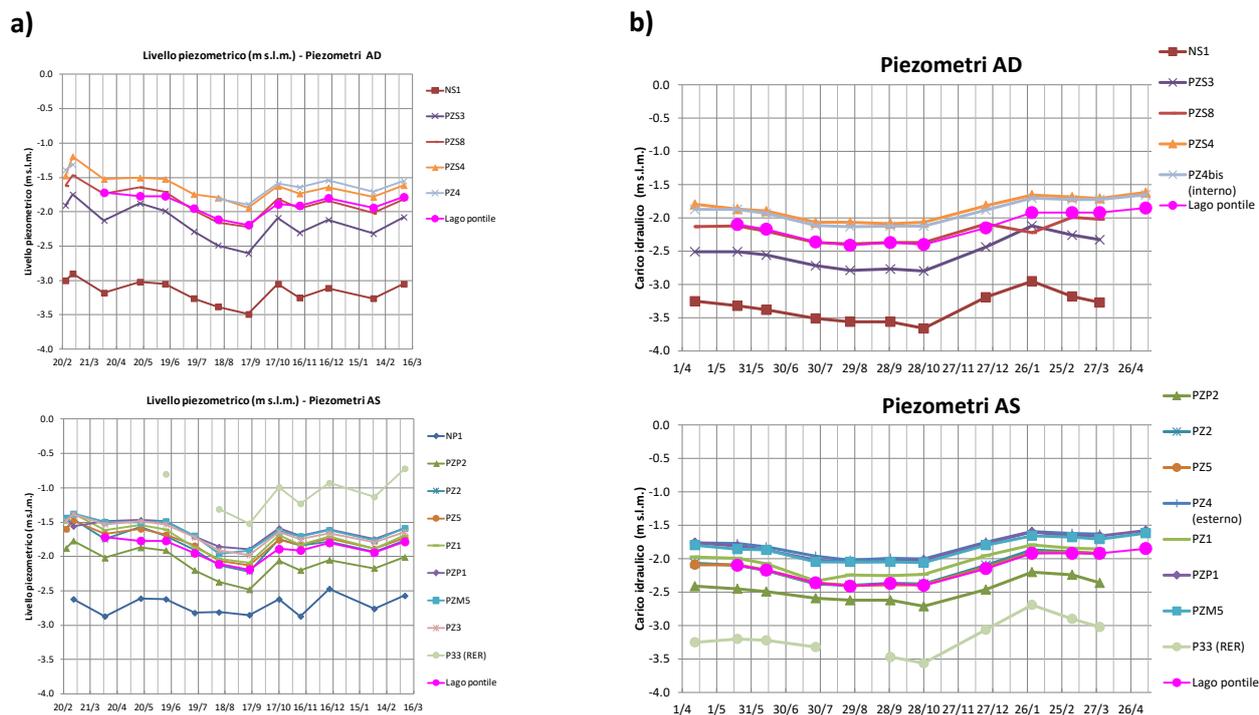


Figura 3.9. Confronto tra i valori di carico idraulico registrati a) con il monitoraggio del 2016-2017 e b) quelli del 2022-2023.

3.5 Risultati: distribuzione della salinità e della temperatura

Di seguito vengono presentati i dati dei logs CT rilevati ai piezometri, in ordine da sud verso nord. Per ogni piezometro sono presentati i grafici:

- logs di SpCE rilevati nel 2022-2023, distinti per data del rilievo (con scala delle ascisse uniforme su tutti i grafici);
- logs di T rilevati nel 2022-2023, distinti per data del rilievo (con scala delle ascisse uniforme su tutti i grafici);
- vista di dettaglio sui logs SpCE, con scala delle ascisse adattata (non uniforme su tutti i grafici).

Nei grafici sono rappresentate le posizioni del carico idraulico in data 12/04, campagna C1 (linea orizzontale tratteggiata azzurra) e di inizio e fine del tratto fessurato del tubo piezometrico (linee orizzontali tratteggiate nere).

È stato poi eseguito un confronto qualitativo con i dati storici disponibili, vale a dire il monitoraggio in corso d'opera sugli anni 2016-2017, il monitoraggio in corso d'opera sugli anni 2008-2009 oppure, quando non disponibile, il monitoraggio ante operam (2005-2006). Tale confronto, per comodità di lettura, viene riportato al termine della trattazione relativa ai nuovi dati (2022-2023) di ciascun piezometro.

3.5.1 Piezometro PZP1

Il piezometro PZP1 è stato realizzato nel 2005 sul paleoalveo in prossimità del Canale Navigabile (Figura 3.1). Si tratta di un piezometro profondo 27 m, filtrato tra 3 e 27 m da p.c.

In Figura 3.10 sono riportati i logs CT registrati durante le campagne di misura realizzate.

Si rileva la presenza di una lente di acqua dolce di spessore rilevante: SpCE risulta inferiore a 2.5 mS/cm fino a -16/-17.5 m s.l.m. a seconda delle stagioni. Al di sotto di questa inizia una zona di transizione di pendenza e spessore leggermente variabili a seconda della campagna di misura, con estensione fino a -19/-20 m s.l.m. Nella porzione inferiore si rileva la presenza costante di acqua ad elevata salinità, con valori variabili nel tempo, compresi nel range 7.5-12 mS/cm.

Questa situazione conferma quanto rilevato durante i monitoraggi antecedenti (si vedano i dati del 2016-2017 e del 2007-2008 presentati nei grafici di Figura 3.11 e Figura 3.12), anzi evidenzia salinità minori per lo strato sottostante l'interfaccia: nel paleoalveo, il 1° litosoma sabbioso è quasi completamente saturo di acqua dolce mentre i limi argillosi e le sabbie sottostanti sono, invece, saturi di acqua più salata, che comunque non raggiunge i valori rilevati nelle porzioni più distali (piezometri NP1 e P33).

Le variazioni della temperatura atmosferica indotte dall'alternarsi delle stagioni influenzano la temperatura dell'acqua sotterranea fino a circa -10 m s.l.m.: tale porzione di sottosuolo si definisce zona di eterotermia, all'interno della quale la temperatura varia durante l'anno per effetto della variazione della temperatura atmosferica; al di sotto di questa zona l'acquifero presenta una temperatura costante, nel caso specifico attorno ai 16 °C: si definisce tale porzione di sottosuolo zona di omotermia. In primavera e inverno la temperatura della zona di eterotermia annuale è solitamente più bassa rispetto a quella della zona di omotermia, viceversa in estate e autunno la temperatura della zona di eterotermia annuale è maggiore rispetto a quella della zona di omotermia. Questo sfasamento ha solitamente un ritardo compreso tra 3 a 6 mesi in relazione alle proprietà idrogeologiche e termiche del sottosuolo insaturo e saturo.

In PZP1 la temperatura media della zona di omotermia è di circa 16 °C, e si rinviene ad una quota di circa -14 m s.l.m. La massima differenza positiva di temperatura registrata tra la base ed il tetto del tratto fessurato è di circa +4 °C ad agosto, mentre la massima negativa è di -4 °C a gennaio. La zona di eterotermia mostra in questo piezometro una elevata escursione termica, probabilmente dovuta alla conducibilità idraulica e termica delle sabbie che costituiscono il sottosuolo da cui deriva una maggiore propensione all'infiltrazione in corrispondenza del paleoalveo.

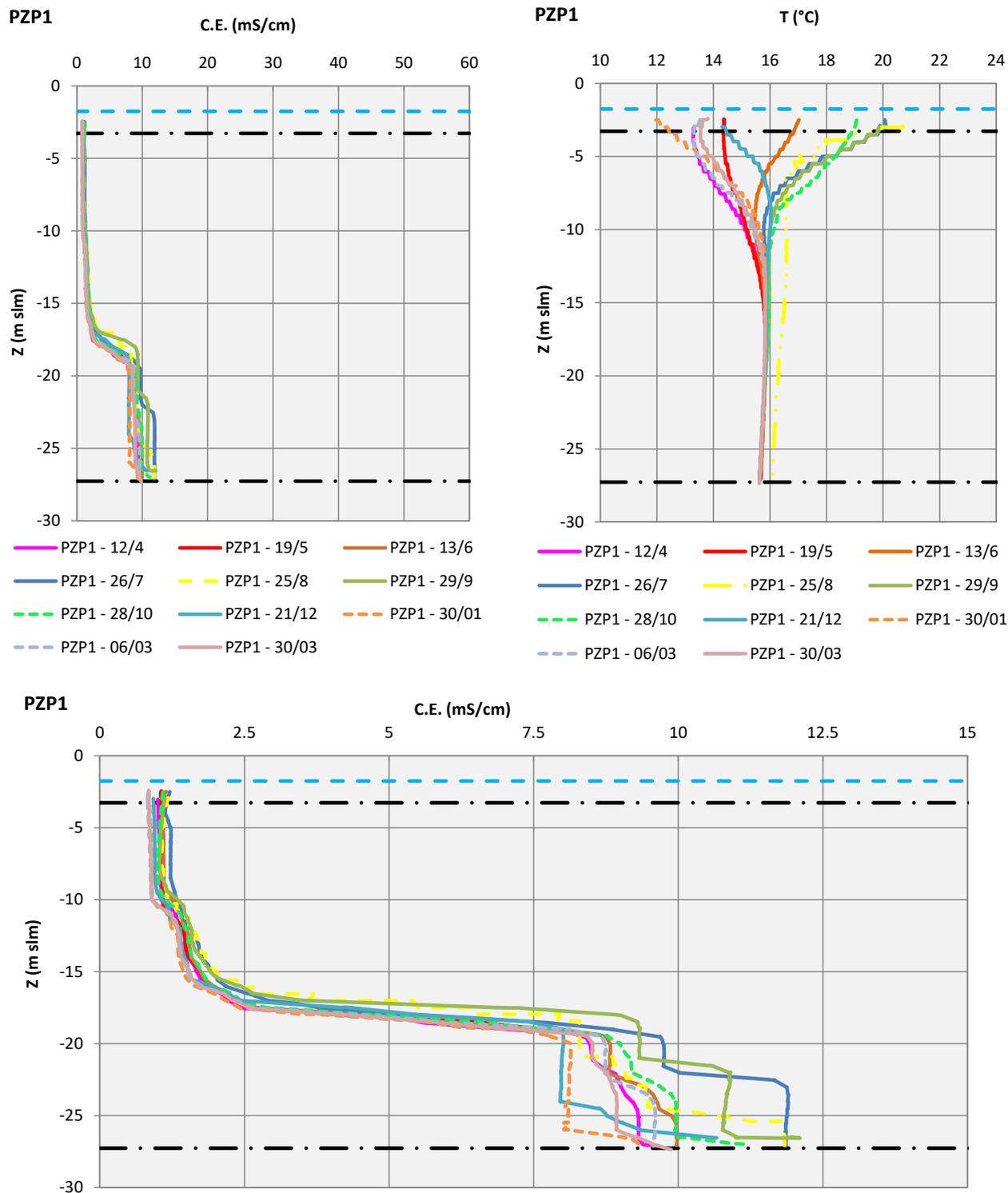


Figura 3.10. Logs CT misurati al piezometro PZP1 nel monitoraggio 2022-2023.

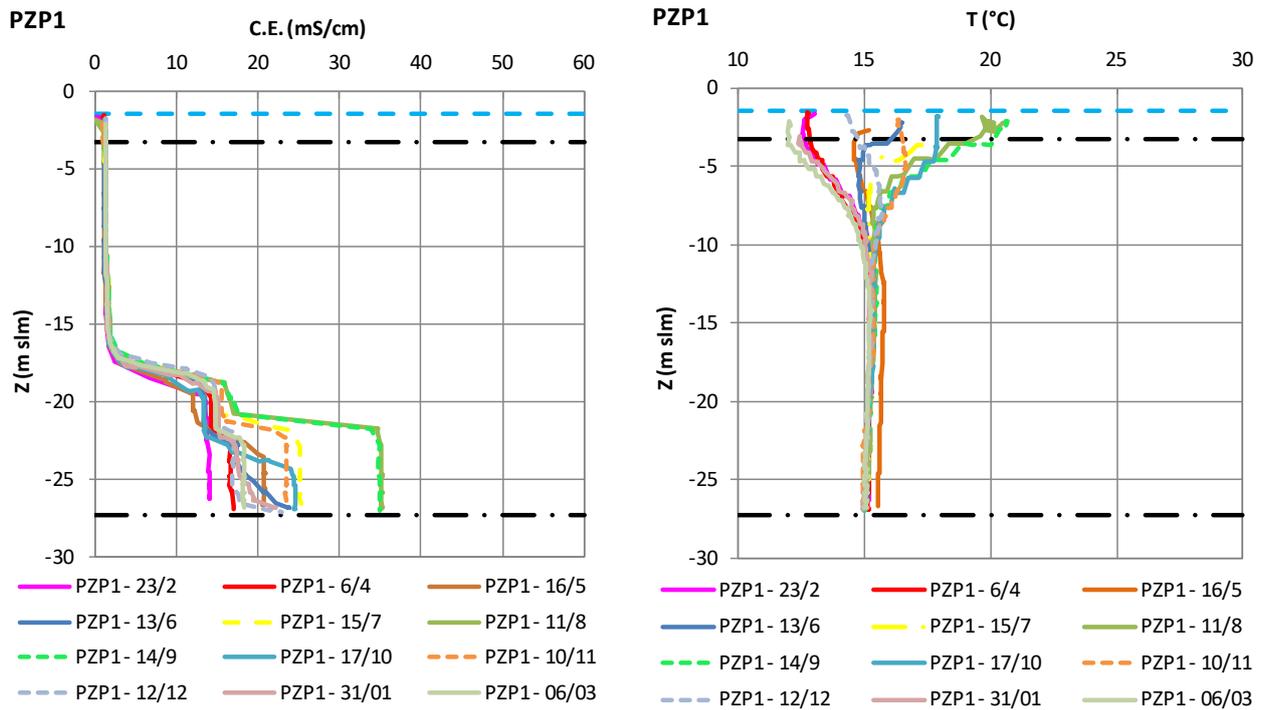


Figura 3.11. Logs CT misurati al piezometro PZP1 nel monitoraggio 2016-2017.

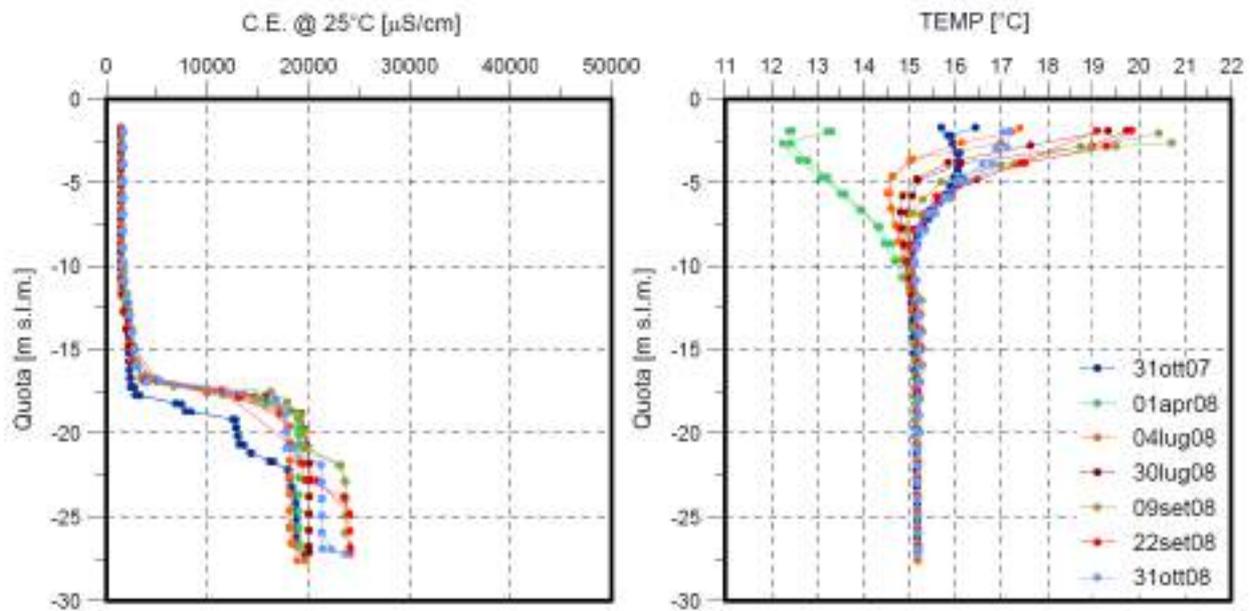


Figura 3.12. Logs CT misurati al piezometro PZP1 nel monitoraggio 2007-2008.

3.5.2 Piezometro PZ1

Il piezometro PZ1 è stato realizzato nel 2003 al centro del paleoalveo (Figura 3.1). Si tratta di un piezometro profondo 25 m, filtrato tra 8 e 25 m da p.c.

In Figura 3.13 sono riportati i logs CT registrati durante le campagne di misura realizzate nel 2022-2023: sono rappresentati solamente i valori acquisiti all'interno del tratto filtrato del piezometro, rappresentativi della distribuzione di salinità nel sottosuolo.

Si osserva durante tutte le stagioni la presenza di acqua dolce su buona parte della colonna d'acqua, fino alla profondità di -15/-17 m s.l.m., con valori molto inferiori a 1 mS/cm e omogenei sulla verticale. Da qui inizia una zona di interfaccia molto brusca che porta rapidamente le acque sotterranee a valori di SpCE oltre i 10 mS/cm, che poi crescono progressivamente con la profondità, con pendenze diverse nelle diverse campagne, fino a raggiungere valori massimi di 22-32 mS/cm al fondo del piezometro.

La zona di omotermia inizia a -14 m s.l.m. ed è caratterizzata da una temperatura di circa 16 °C. I gradienti di temperatura tra la base ed il tetto del tratto fenestrato sono di lieve entità in tutti i rilievi (± 1 °C) perché l'inizio del tratto filtrato è piuttosto profondo (8 m da p.c.).

Il profilo verticale di salinità risulta coerente con quanto rilevato nel monitoraggio 2016-2017 in corso d'opera (Figura 3.14), dimostrando una buona stazionarietà nel tempo.

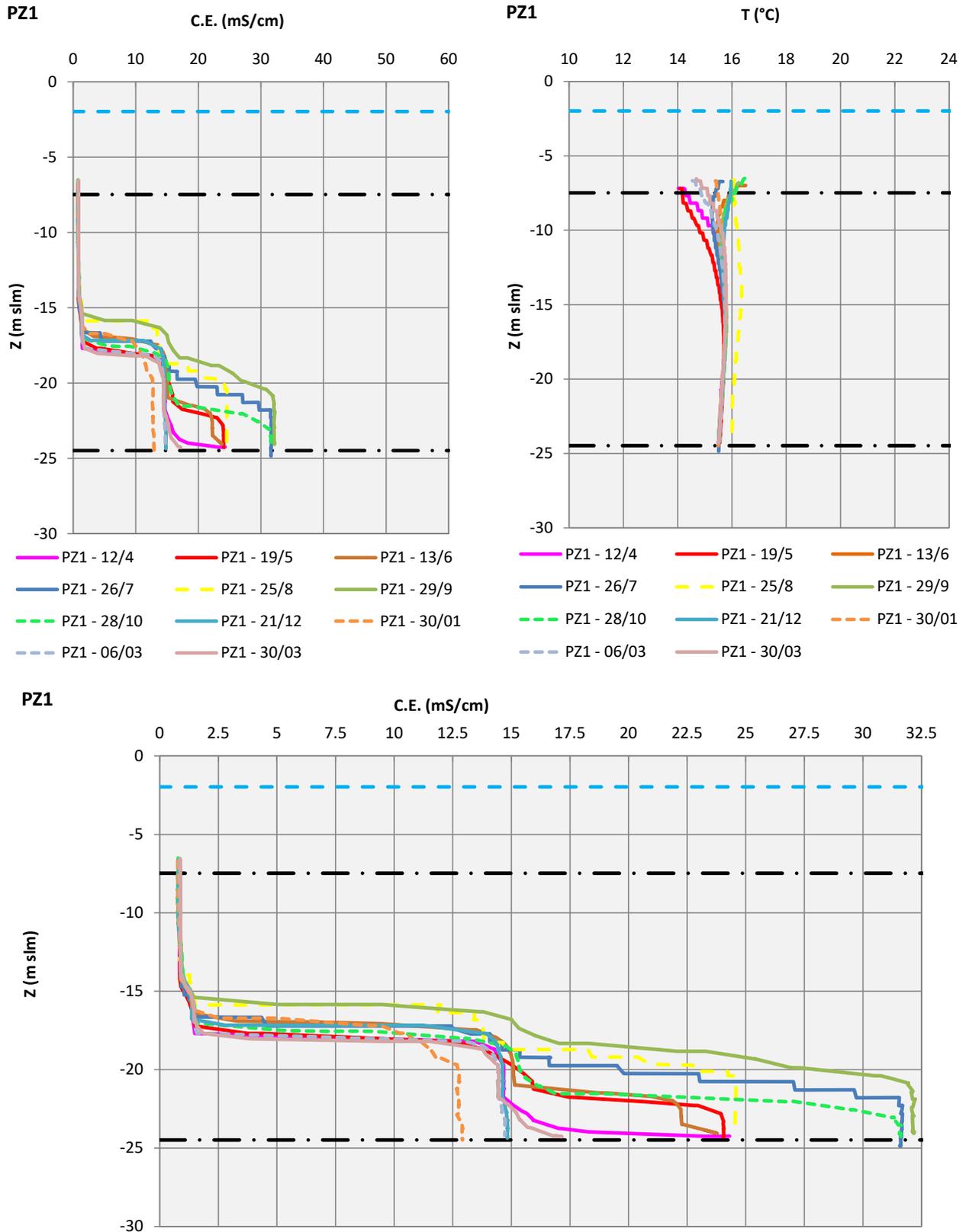


Figura 3.13. Logs CT misurati al piezometro PZ1 nel monitoraggio 2022-2023.

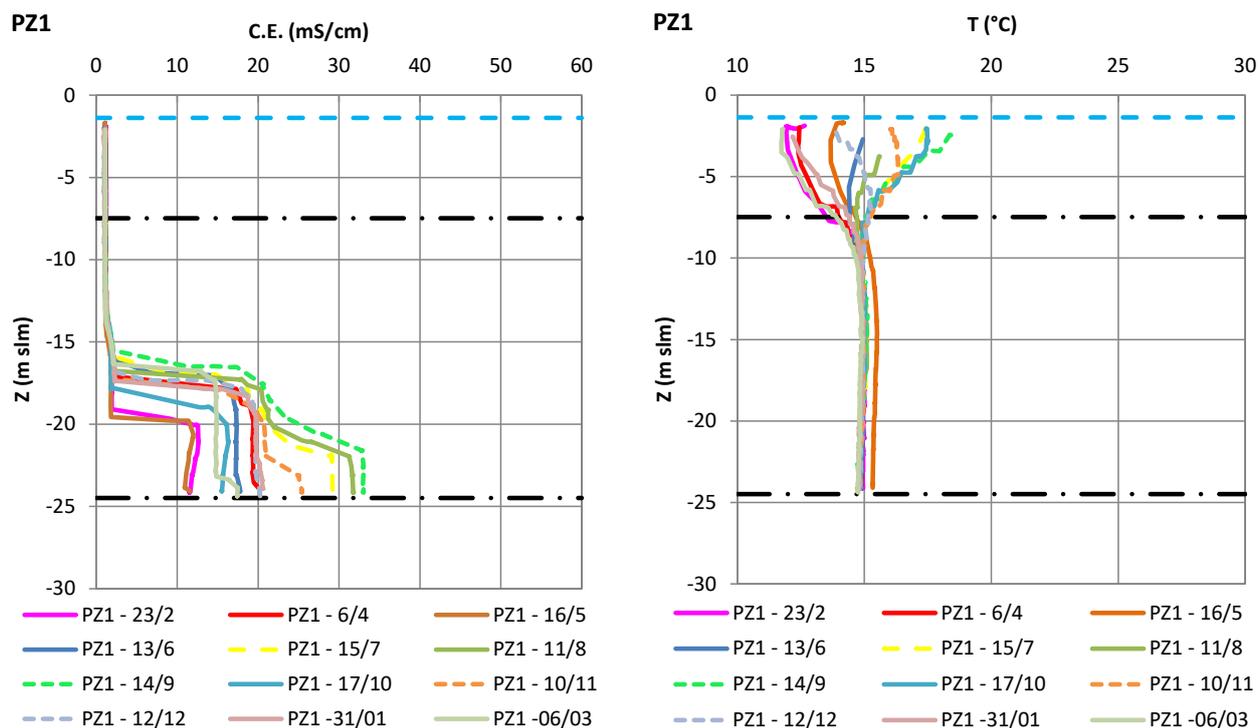


Figura 3.14. Logs CT misurati al piezometro PZ1 nel monitoraggio 2016-2017.

3.5.3 Piezometro PZS8

Il piezometro PZS8 è stato realizzato nel 2004 al centro del paleoalveo (Figura 3.1). Si tratta di un piezometro profondo 12 m, filtrato tra 6 e 12 m da p.c.

In Figura 3.15 sono riportati i logs CT registrati durante le campagne di misura realizzate: sono rappresentati solamente i valori acquisiti all'interno del tratto fenestrato del piezometro, i soli rappresentativi della distribuzione di salinità nel sottosuolo.

Si osserva durante tutte le stagioni la presenza di acqua dolce sull'intera colonna, con valori molto prossimi a 1 mS/cm e omogenei sulla verticale.

La zona di omotermia sembra iniziare poco sotto la base del piezometro, sotto i -12 m s.l.m. ed è presumibilmente caratterizzata da una temperatura di circa 16 °C. La massima differenza positiva di temperatura tra la base ed il tetto del tratto fessurato è di circa +3 °C a settembre/ottobre e la negativa di -2.5 °C ad aprile.

Il profilo verticale di salinità risulta coerente con quanto rilevato nel monitoraggio 2016-2017 in corso d'opera (Figura 3.16) e 2005-2006 in ante operam (Figura 3.17), dimostrando anche in questo caso una buona stazionarietà nel tempo.

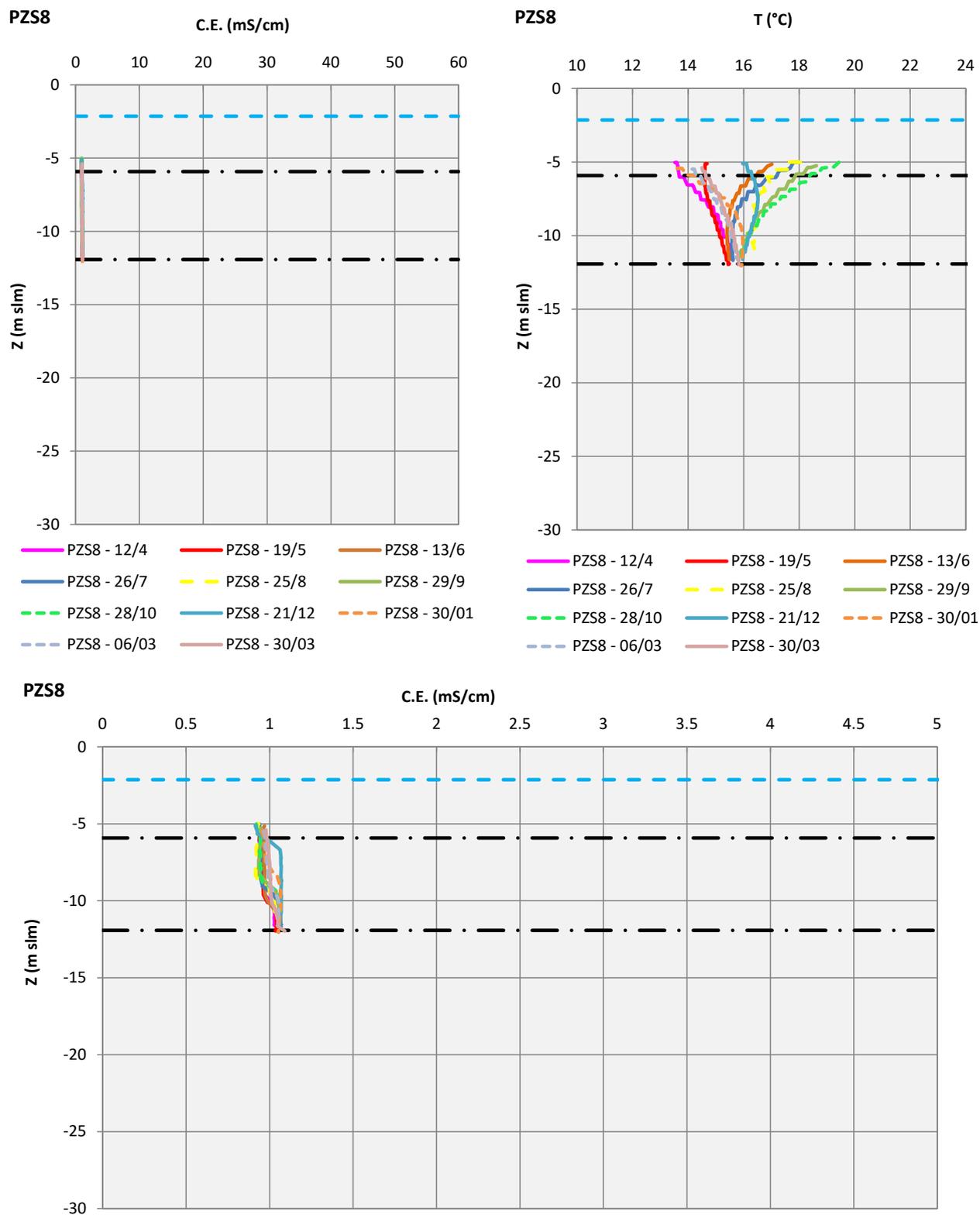


Figura 3.15. Logs CT misurati al piezometro PZS8 nel monitoraggio 2022-2023.

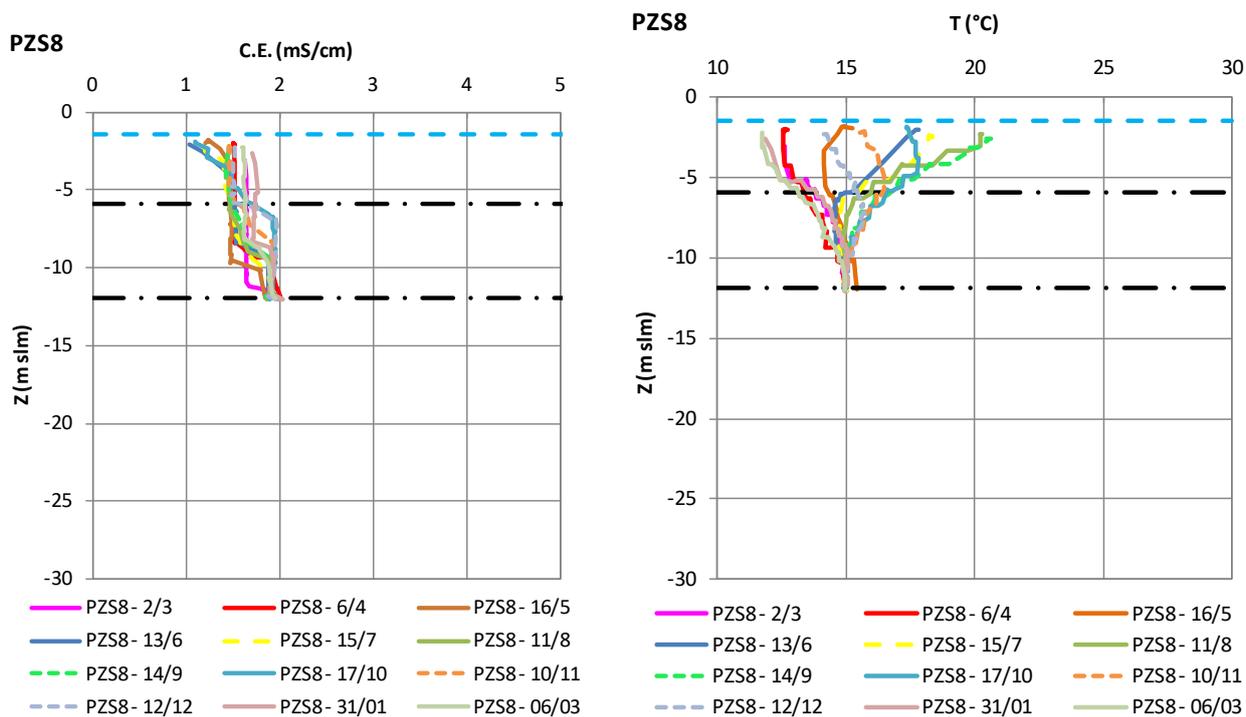


Figura 3.16. Logs CT misurati al piezometro PZS8 nel monitoraggio 2016-2017.

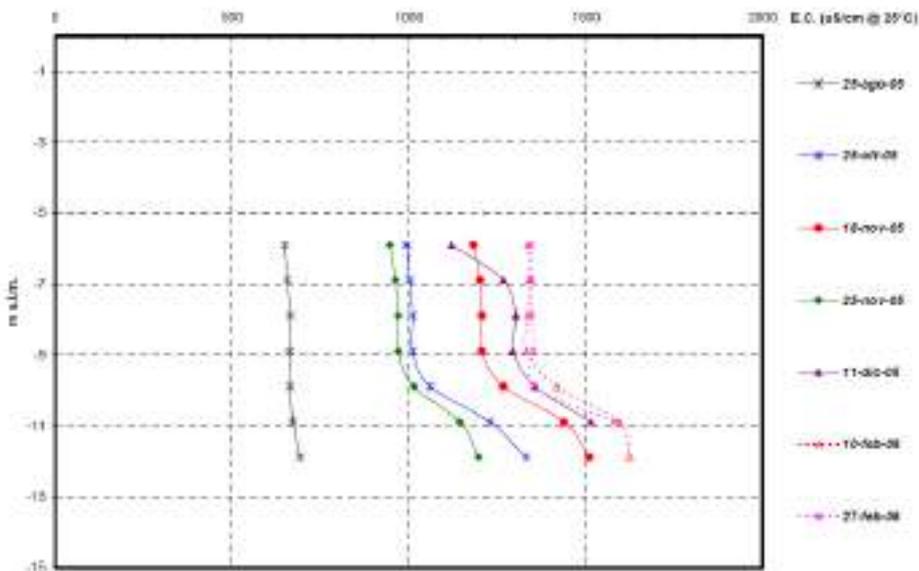


Figura 3.17. Logs CT misurati al piezometro PZS8 nel monitoraggio 2005-2006.

3.5.4 Piezometro PZ4bis

Il piezometro PZ4bis è stato realizzato nel 2004 al centro del paleoalveo (Figura 3.1). Si tratta di un piezometro profondo 16 m, filtrato tra 4 e 16 m da p.c.; attualmente questo piezometro si trova a ridosso della sponda del lago (Figura 3.18).

In Figura 3.19 sono riportati i logs CT registrati durante le campagne di misura realizzate.

Durante tutte le stagioni si osserva la presenza di una lente di acqua dolce, con valori di SpCE sempre inferiori ai 2 mS/cm fino a circa -14/-15 m s.l.m. Sotto a questa lente di spessore rilevante inizia una zona di transizione di pendenza costante nel tempo, che al fondo del piezometro (-15 m s.l.m.) raggiunge valori massimi compresi nel range 10-11 mS/cm.

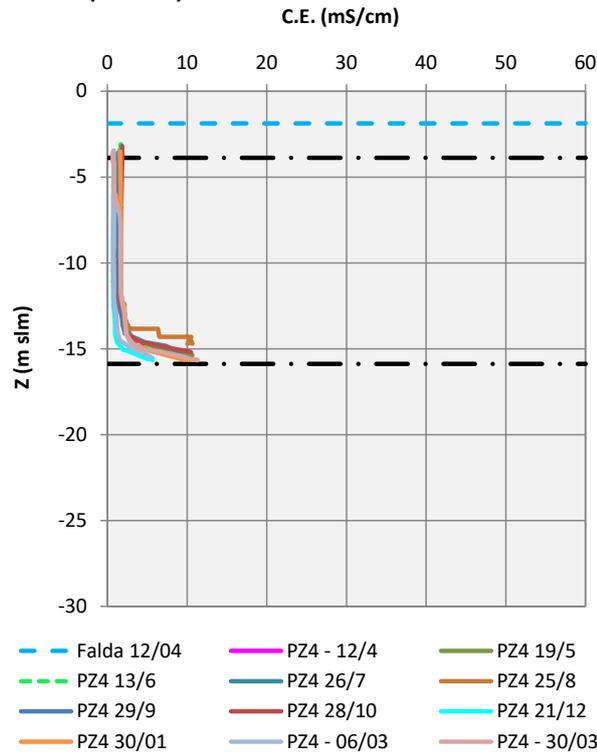
La zona di eterotermia si estende fino al fondo del piezometro; la sottostante zona di omotermia non è attraversata dal piezometro, ma si può dedurre che inizi poco oltre i -16 m s.l.m. e sia caratterizzata da una temperatura di circa 15 °C. Le massime differenze di temperatura tra la base ed il tetto del tratto filtrato sono state rilevate nel mese di agosto (circa +8 °C) e nel mese di aprile (circa -3 °C): per la sua posizione questo piezometro risente fortemente del regime termico delle acque del lago.

Il profilo verticale di salinità risulta assolutamente coerente con quanto rilevato nel monitoraggio 2016-2017 (Figura 3.20) e 2007-2008 (Figura 3.21), dimostrando un'ottima stazionarietà nel tempo.

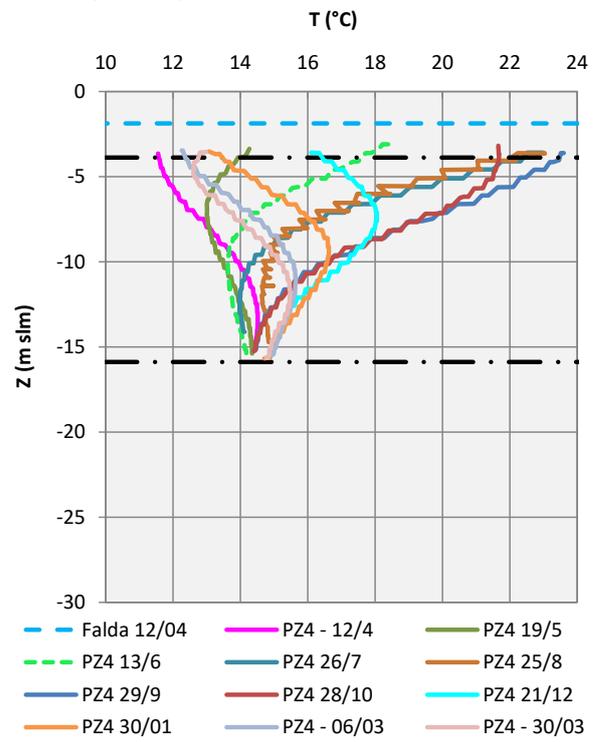


Figura 3.18. Posizione del piezometro PZ4bis, a ridosso dell'attuale sponda del lago.

PZ4bis (interno)



PZ4bis (interno)



PZ4bis (interno)

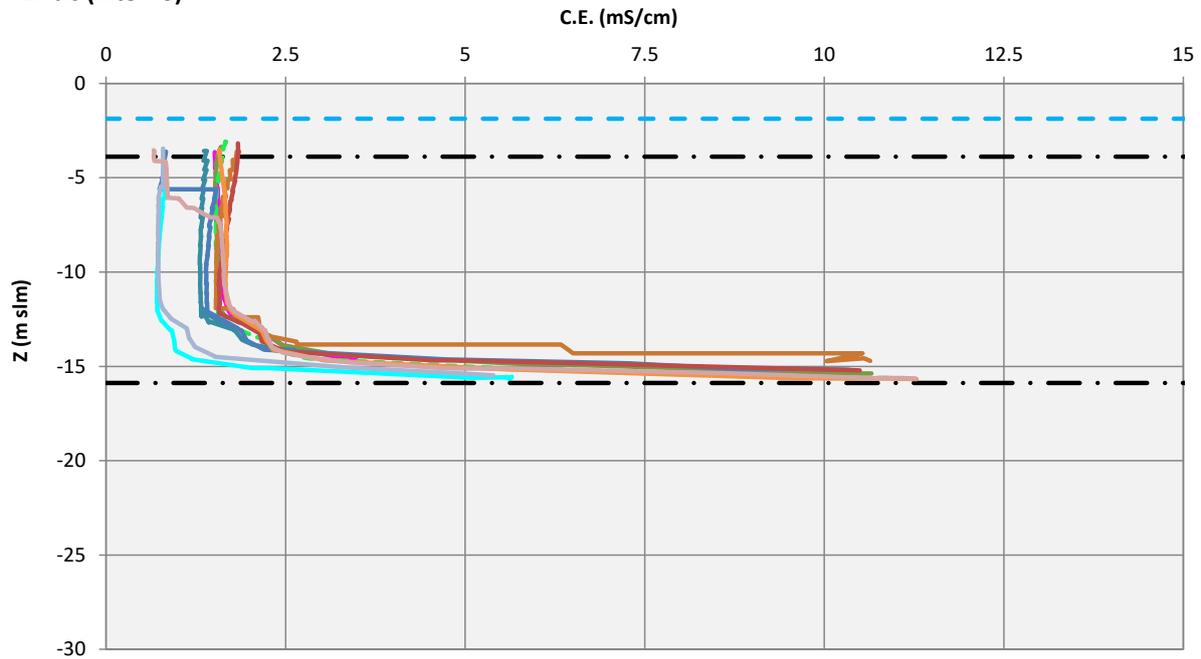
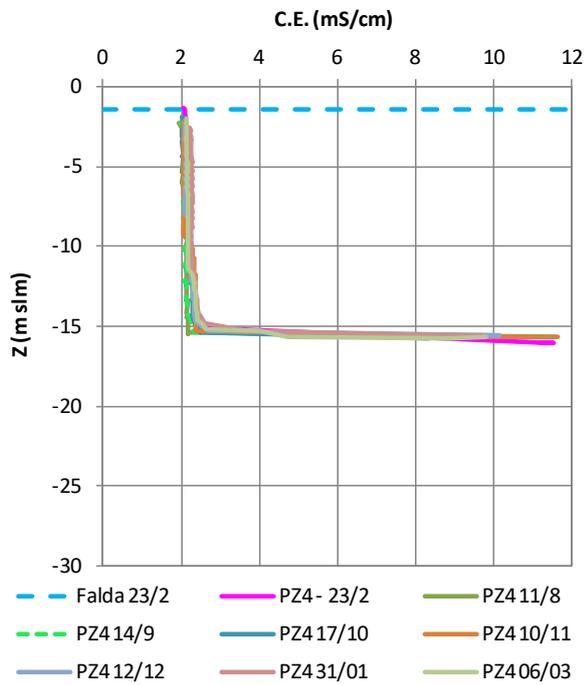


Figura 3.19. Logs CT misurati al piezometro PZ4bis nel monitoraggio 2022-2023.

PZ4



PZ4

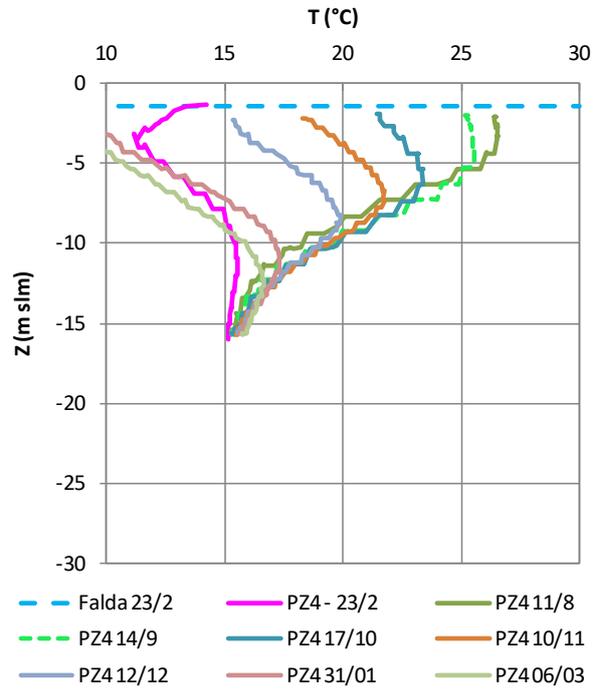


Figura 3.20. Logs CT misurati al piezometro PZ4bis nel monitoraggio 2016-2017.

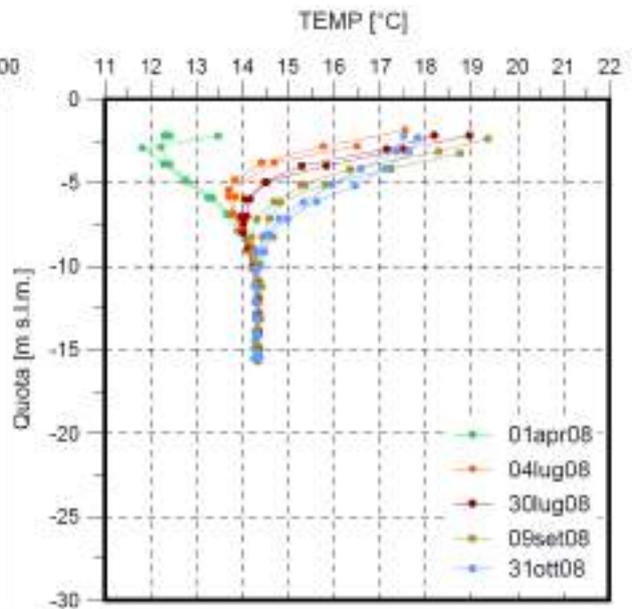
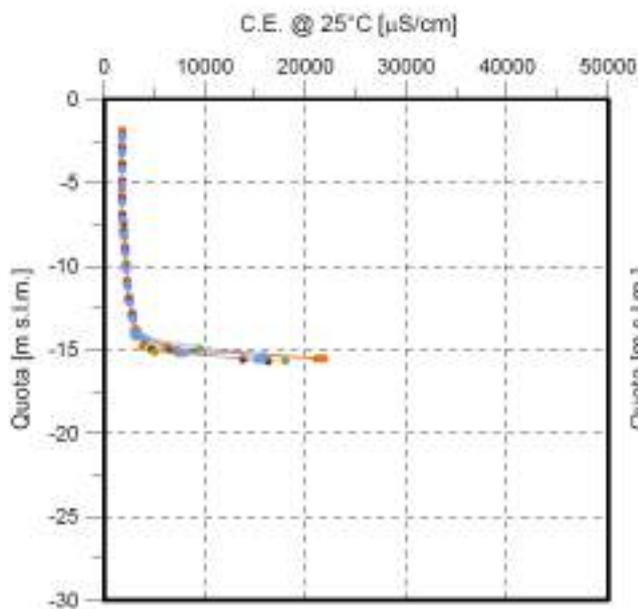


Figura 3.21. Logs CT misurati al piezometro PZ4bis nel monitoraggio 2007-2008.

3.5.5 Piezometro PZ4

Il piezometro PZ4 è stato realizzato nel 2004 al centro del paleoalveo (Figura 3.1). Si tratta di un piezometro profondo 20 m, filtrato tra 4 e 20 m da p.c.; questo piezometro si trova vicino al piezometro PZ4bis, ma più distante dalla sponda del lago.

In Figura 3.22 sono riportati i logs CT registrati durante le campagne di misura realizzate nel 2022-2023.

Durante tutte le stagioni si osserva la presenza di una lente di acqua dolce, con valori di SpCE sempre inferiori ai 2 mS/cm fino a circa -13/-14 m s.l.m. Sotto a questa lente di spessore rilevante inizia una zona di transizione di pendenza costante nel tempo, che al fondo del piezometro (-20 m s.l.m.) raggiunge valori massimi compresi nel range 35-37 mS/cm.

La zona di eterotermia si estende fino a circa -15 m s.l.m.; la sottostante zona di omotermia è caratterizzata da una temperatura di circa 14.5 °C. Le massime differenze di temperatura tra la base ed il tetto del tratto fenestrato sono state rilevate nel mese di settembre (circa +5.5 °C) e nel mese di aprile (circa -2.5 °C): analogamente a PZ4bis anche questo piezometro probabilmente risente del regime termico delle acque del lago.

Il profilo verticale di salinità risulta coerente con quanto rilevato nel monitoraggio 2016-2017 (Figura 3.23), anche se si rileva un leggero innalzamento della zona di interfaccia (circa 1 metro) ed una minore SpCE per lo strato più salato posizionato al fondo del piezometro.

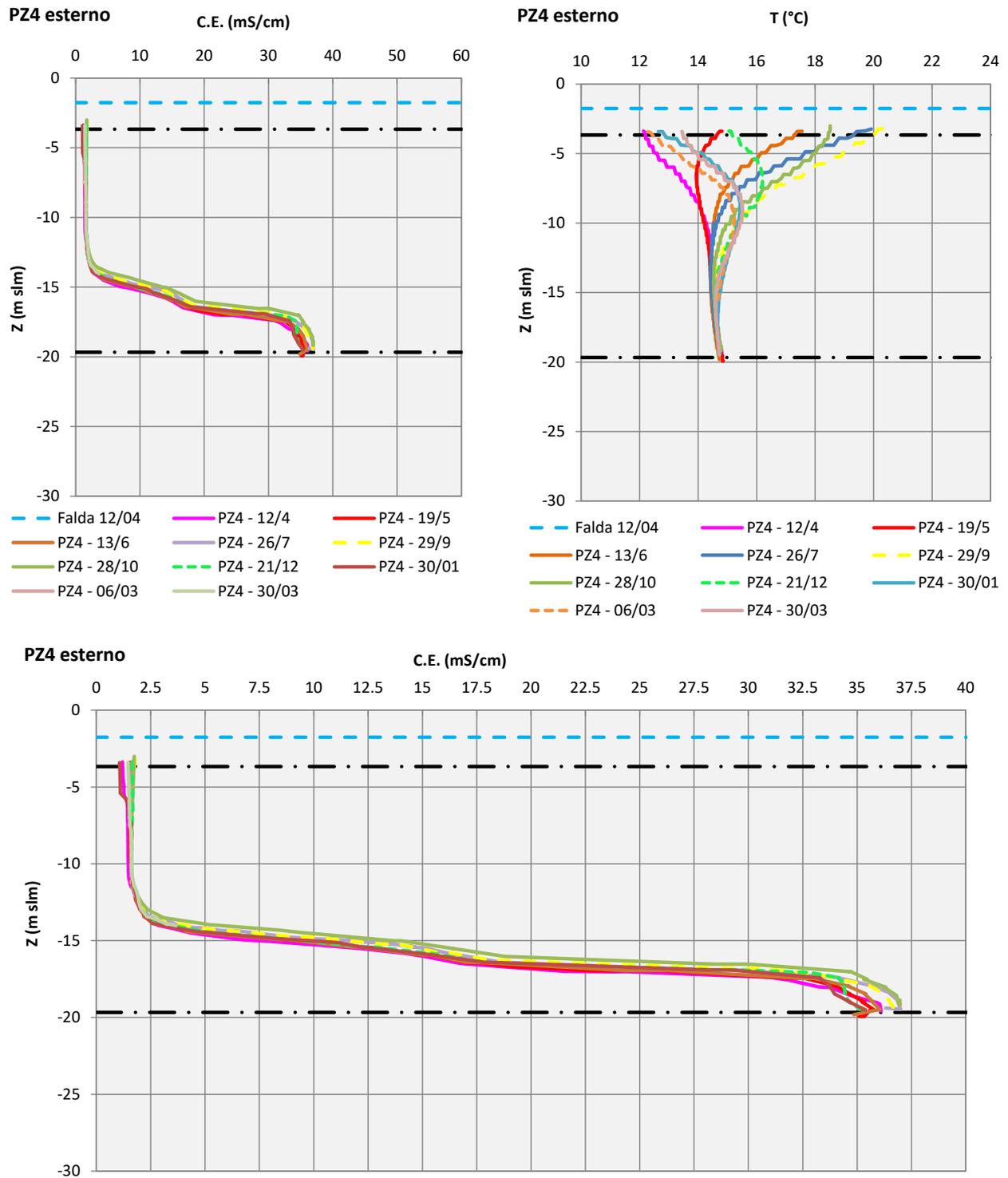


Figura 3.22. Logs CT misurati al piezometro PZ4 nel monitoraggio 2022-2023.

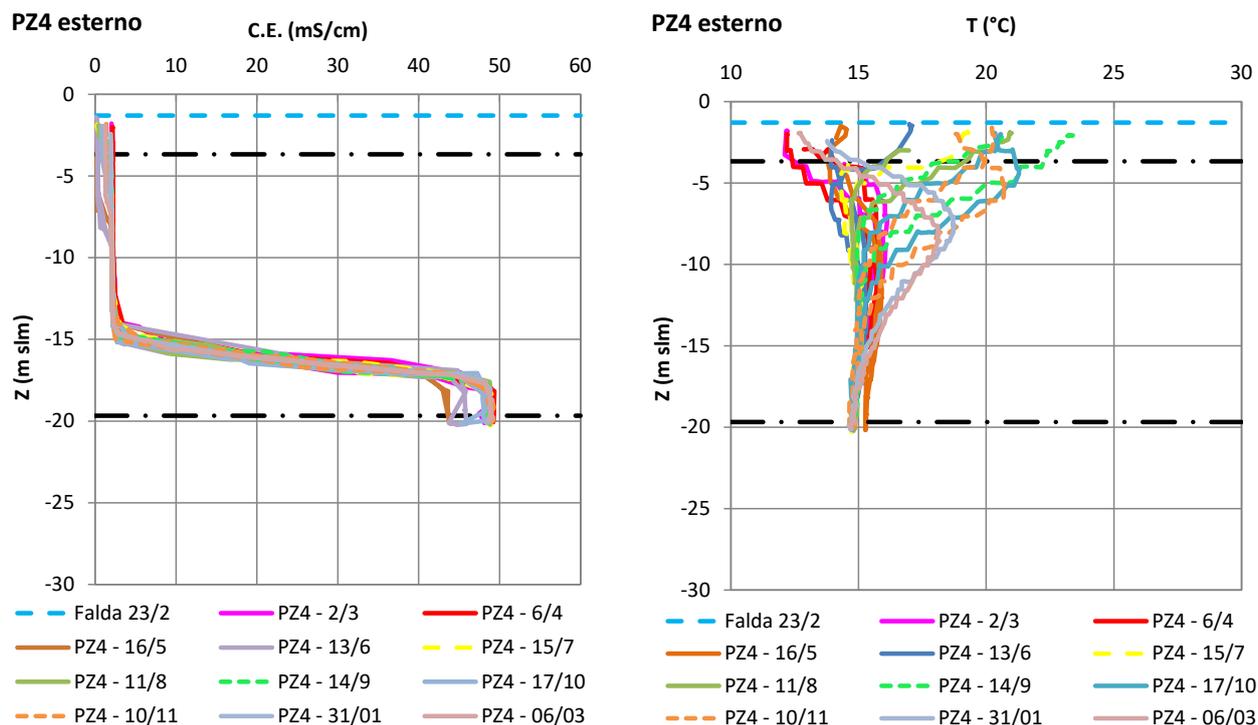


Figura 3.23. Logs CT misurati al piezometro PZ4 nel monitoraggio 2016-2017.

3.5.6 Piezometro PZ3

Il piezometro PZ3 è stato realizzato nel 2001 sul paleoalveo in prossimità del Canale Navigabile (Figura 3.1). Si tratta di un piezometro profondo 25 m, filtrato tra 4 e 25 m da p.c.

Questo piezometro risulta danneggiato in modo irreparabile e non è stato possibile monitorarlo, per cui in Figura 3.24 sono riportati i logs CT registrati durante le 12 campagne di misura realizzate nel 2016-2017.

Si rileva la presenza di una lente di acqua dolce di spessore rilevante (circa 1-1.6 mS/cm fino a 16 m di profondità da p.c.) durante tutte le stagioni. Al di sotto di questa inizia una zona di transizione di pendenza e spessore abbastanza costanti nel tempo, con estensione fino a 20-22 m di profondità. Nella porzione inferiore si rileva la presenza costante di acqua ad elevata salinità, con valori leggermente variabili nel tempo, compresi nel range 34-37 mS/cm.

La zona di omotermia si attesta ad una quota di circa -11 m s.l.m. ed è caratterizzata da una temperatura di 14.9 °C. La massima differenza di temperatura tra la base ed il tetto dell'acquifero è stata rilevata nel mese di settembre ed è risultata di 7.5 °C. Come in PZP1 la zona di eterotermia è caratterizzata da elevata escursione termica indotta dall'infiltrazione in corrispondenza del paleoalveo. L'assenza o il ridotto spessore di un livello prevalentemente fine al tetto del sistema favorirebbe, infatti, l'infiltrazione diretta delle acque di precipitazione in equilibrio con la temperatura atmosferica.

Il profilo di SpCE è molto stazionario nel tempo, presenta solo piccole oscillazioni della zona di interfaccia lungo la verticale, comprese in una fascia di circa 1.5 m; la zona di interfaccia però mantiene una pendenza costante nel tempo; i valori di minimo e massimo della SpCE sono anch'essi piuttosto costanti. Inoltre, risulta totalmente coerente con i rilievi del monitoraggio 2007-2008 (Figura 3.25).

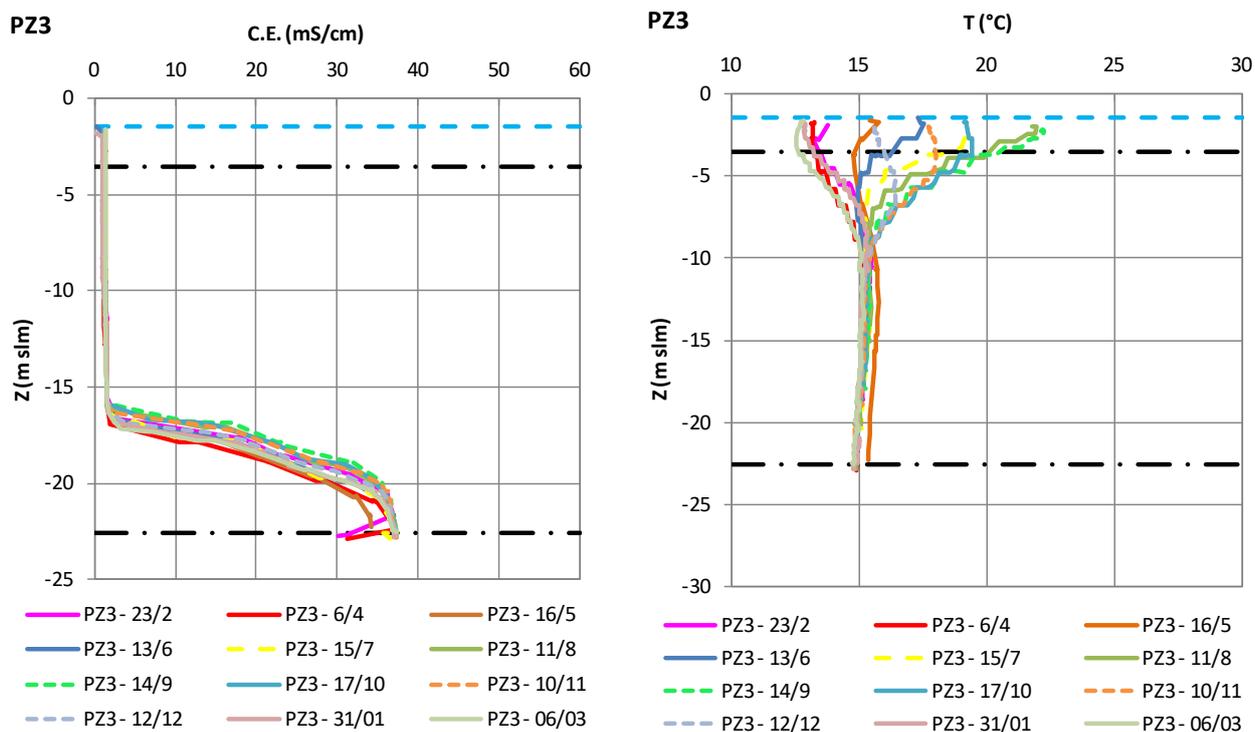


Figura 3.24. Logs CT misurati al piezometro PZ3 nel monitoraggio 2016-2017.

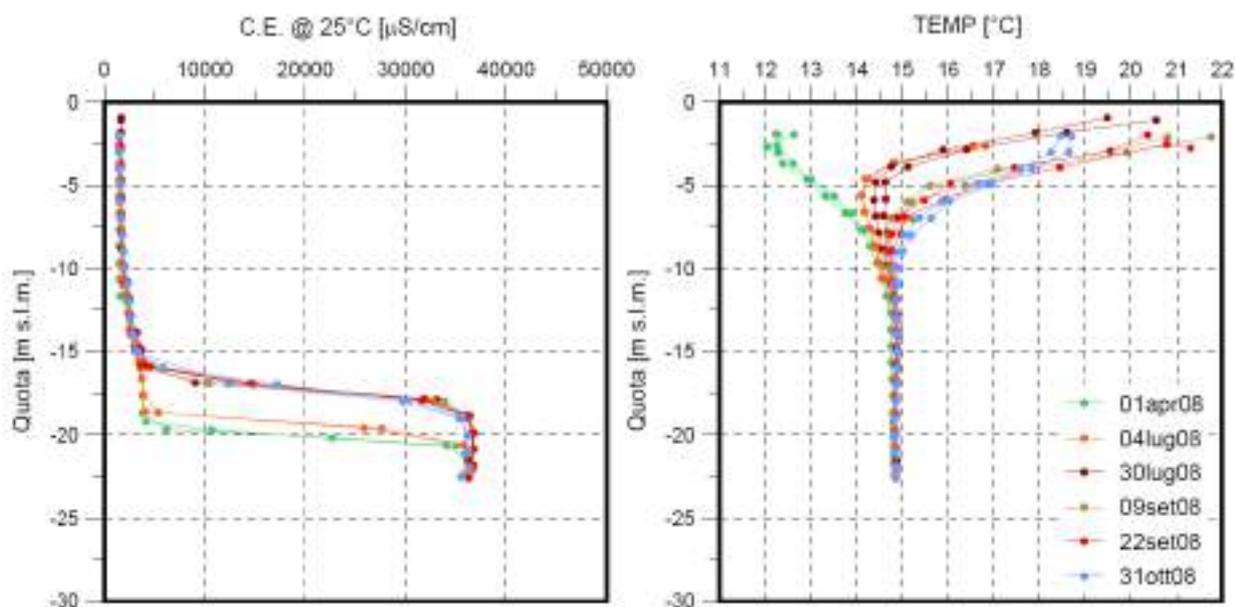


Figura 3.25. Logs CT misurati al piezometro PZ3 nel monitoraggio 2007-2008.

3.5.7 Piezometro PZ5

Il piezometro PZ5 è stato realizzato nel 2004 al centro del paleoalveo (Figura 3.1). Si tratta di un piezometro profondo 20 m, filtrato tra 4 e 20 m da p.c.

In Figura 3.26 sono riportati i logs CT registrati durante le campagne di misura realizzate nel 2022-2023.

Si osserva la presenza di una lente di acqua dolce (con valori crescenti con la profondità da 1 a 3 mS/cm) di spessore rilevante (fino a circa -15 m s.l.m.). Inferiormente a questa inizia una zona di transizione di pendenza e spessore piuttosto costanti nel tempo, che si estende fino a -17/-18 m s.l.m., raggiungendo valori massimi compresi nel range 42-43 mS/cm.

La zona di omotermia inizia ad una quota di circa -13 m s.l.m. ed è caratterizzata da una temperatura di 15 °C. La massima differenza positiva di temperatura tra la base ed il tetto del tratto filtrato è stata rilevata nel mese di luglio ed è risultata di +7 °C, mentre a gennaio e marzo è stata rilevata una differenza negativa di -3 °C.

Il profilo verticale di SpCE risulta coerente con quanto rilevato nei monitoraggi 2016-2017 (Figura 3.28) e 2007-2008 (Figura 3.28); anche in questo caso si osserva la risalita di circa 1 metro della zona di interfaccia e una minore SpCE dello strato più profondo a maggiore salinità.

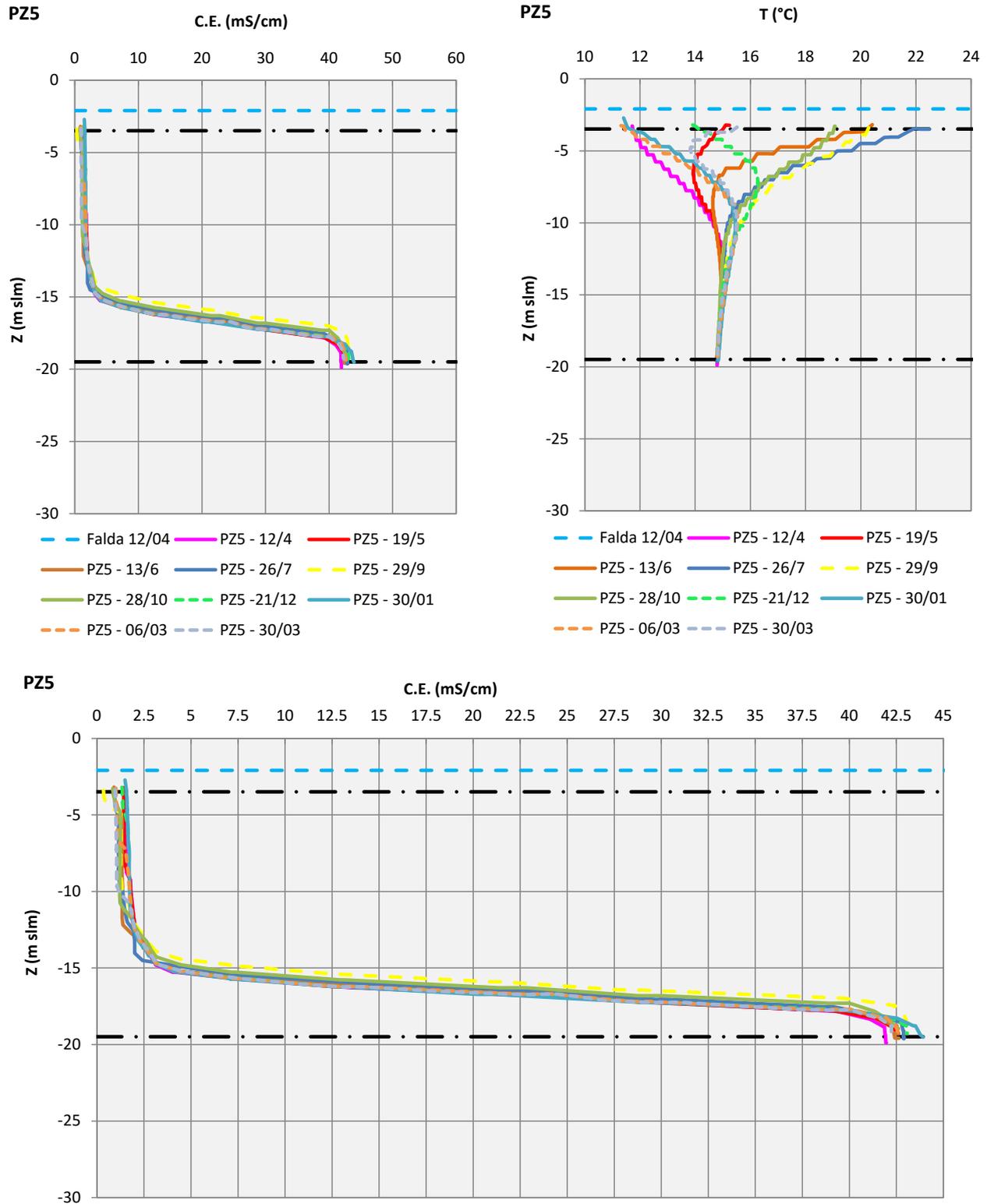


Figura 3.26. Logs CT misurati al piezometro PZ5 nel monitoraggio 2022-2023.

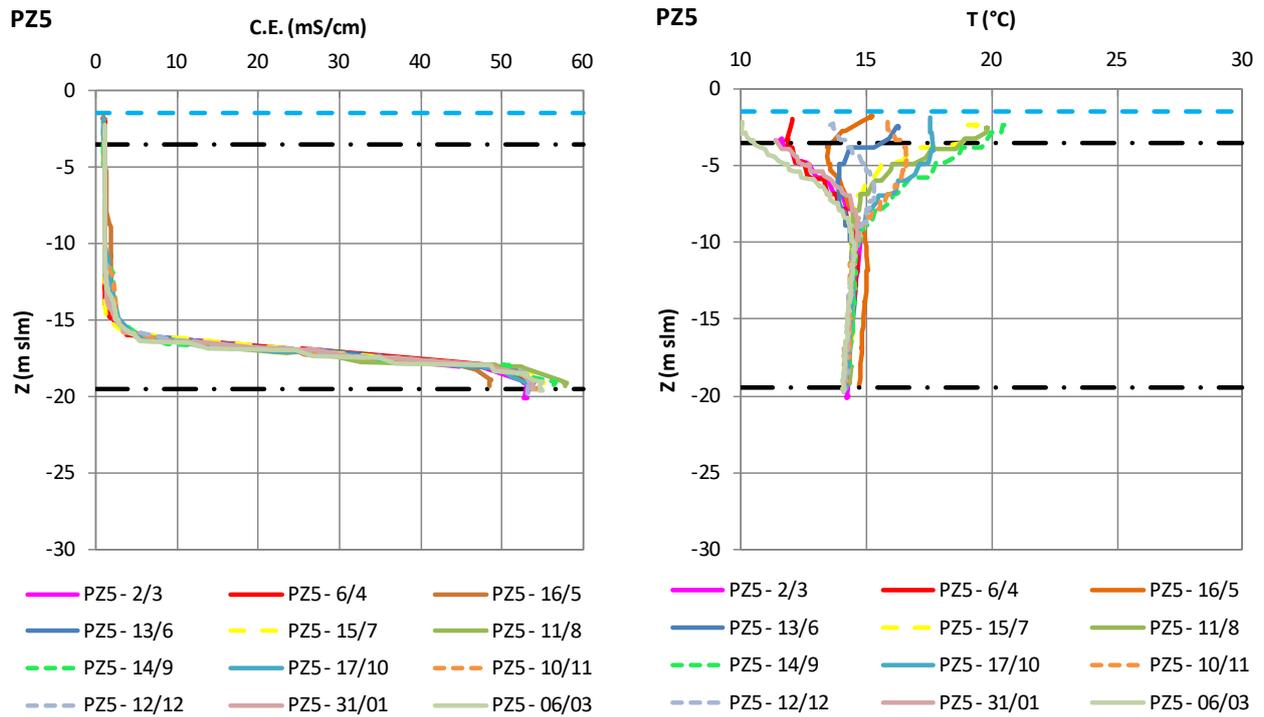


Figura 3.27. Logs CT misurati al piezometro PZ5 nel monitoraggio 2016-2017.

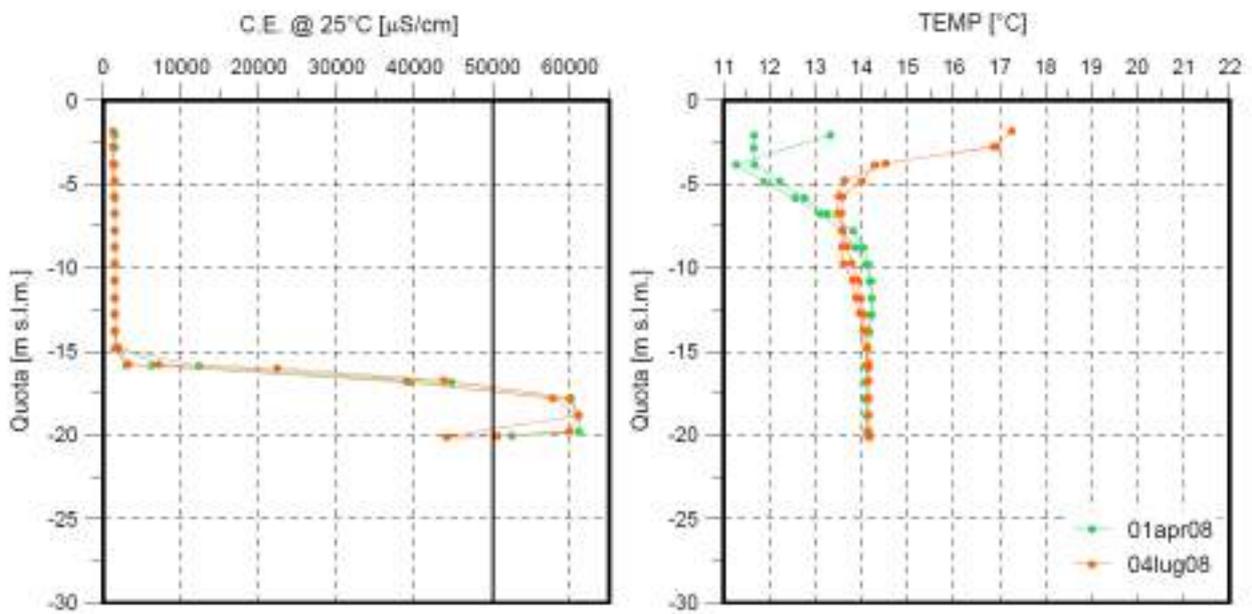


Figura 3.28. Logs CT misurati al piezometro PZ5 nel monitoraggio 2007-2008.

3.5.8 Piezometro PZ2

Il piezometro PZ2 è stato realizzato nel 2003 in prossimità del limite settentrionale del paleoalveo (Figura 3.1). Si tratta di un piezometro profondo 25 m, filtrato tra 4 e 25 m da p.c.

In Figura 3.29 sono riportati i logs CT registrati durante le campagne di misura realizzate nel 2022-2023.

Si osserva durante tutti i rilievi la presenza di una lente di acqua dolce (circa 1.5-2 mS/cm) di spessore rilevante (fino a circa -13/-14 m s.l.m.). Inferiormente a questa inizia una zona di transizione di pendenza e spessore piuttosto costanti nel tempo, che si estende fino a circa -17 m s.l.m., raggiungendo valori massimi compresi nel range 25-29 mS/cm.

La zona di omotermia si attesta ad una quota di circa -13 m s.l.m. ed è caratterizzata da una temperatura di circa 15 °C. La massima differenza positiva di temperatura tra la base ed il tetto del tratto filtrato è stata rilevata nel mese di agosto ed è risultata di +6 °C; la massima differenza negativa a gennaio, pari a -3 °C.

I rilievi effettuati presso il piezometro PZ2 sono particolarmente interessanti perché mostrano l'andamento della salinità in una posizione intermedia tra quanto rilevato in prossimità dei canali e quanto rilevato in allontanamento da essi. Il piezometro PZ2 è caratterizzato dalla presenza in superficie di acque relativamente dolci e dalla presenza di un'interfaccia che, da -13.5 m s.l.m., e per uno spessore di 3-4 m, porta la SpCE verso i valori propri dell'acqua salata registrati nelle zone distali dal paleoalveo.

Il profilo verticale di salinità dimostra una elevata stazionarietà nel tempo, soprattutto se confrontato ai dati di monitoraggio storici: in Figura 3.31 sono mostrati i grafici del monitoraggio eseguito negli anni 2016-2017 e in Figura 3.31 quelli negli anni 2007-2008, che mostrano una sostanziale analogia, anzi talvolta rilevavano valori di SpCE maggiori sia sulla lente superficiale (fino a 5 mS/cm) e sia al di sotto della zona di transizione, compresi nel range 25-48 mS/cm.

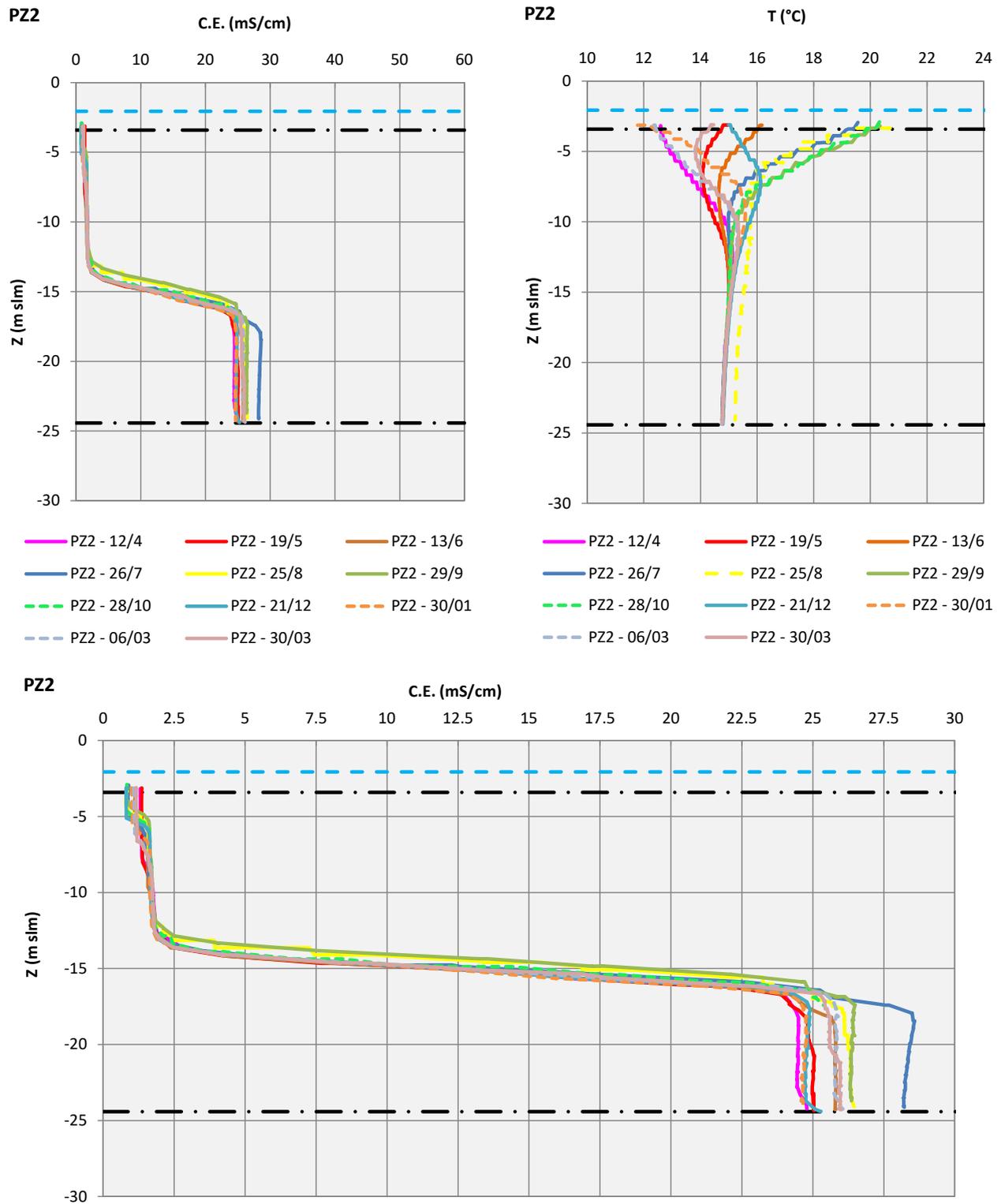


Figura 3.29. Logs CT misurati al piezometro PZ2 nel monitoraggio 2022-2023.

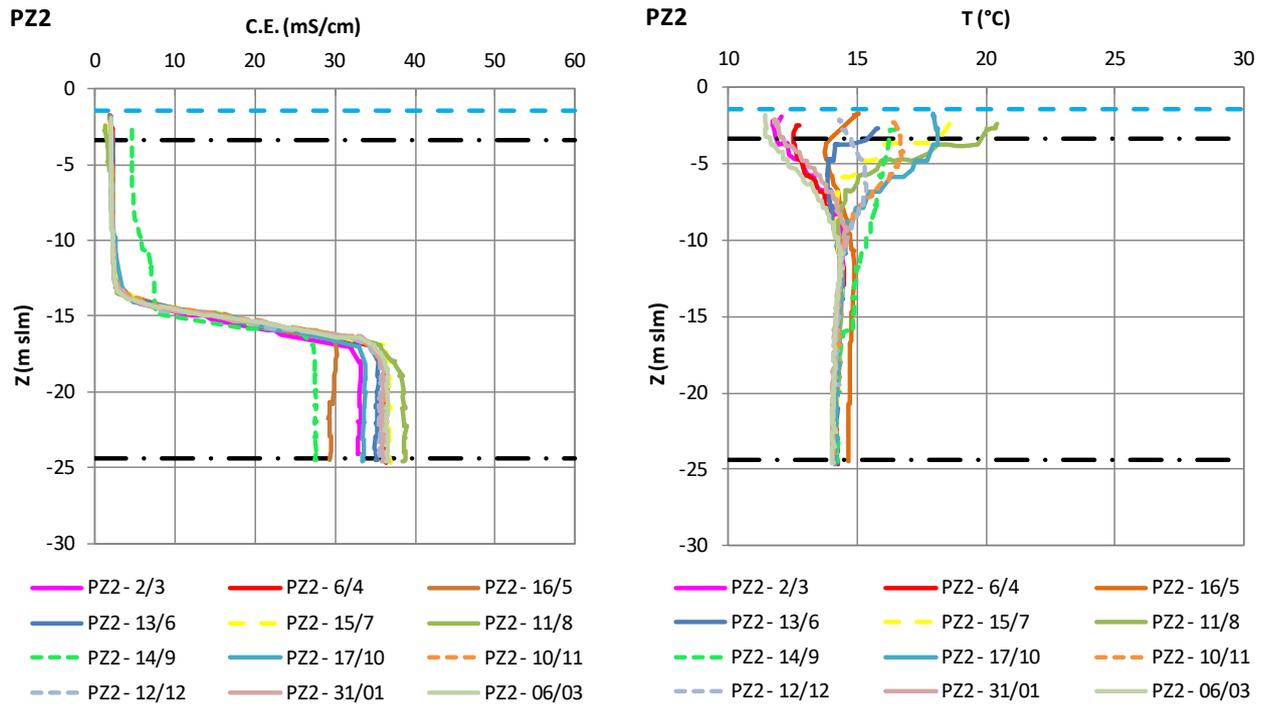


Figura 3.30. Logs CT misurati al piezometro PZ2 nel monitoraggio 2016-2017.

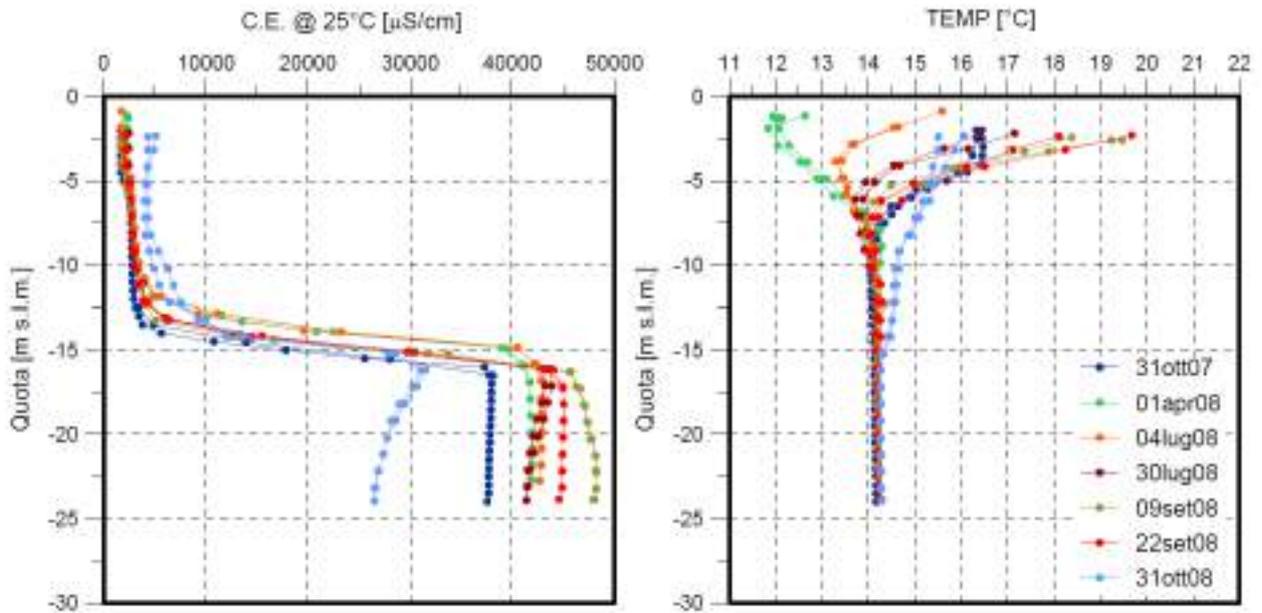


Figura 3.31. Logs CT misurati al piezometro PZ2 nel monitoraggio 2007-2008.

3.5.9 Piezometro PZS3

Il piezometro PZS3 è stato realizzato nel 2005 a pochi metri dal PZP2, ossia immediatamente a nord dell'areale di affioramento del paleoalveo (Figura 3.1). Si tratta di un piezometro superficiale, con profondità 13 m, filtrato tra 6 e 13 m da p.c.

In Figura 3.32 sono riportati i logs CT registrati durante le campagne di misura realizzate nel 2022-2023: sono rappresentati solamente i valori acquisiti all'interno del tratto fenestrato del piezometro, rappresentativi della distribuzione di salinità nel sottosuolo.

Si rileva sempre la presenza di una lente di acqua debolmente salmastra (tra 2.5 e 5 mS/cm) di spessore rilevante (fino a circa -12 m s.l.m.). Da qui inizia una zona di transizione di pendenza molto brusca e posizione costante nel tempo, che si estende fino al termine del tratto filtrato, raggiungendo valori massimi di 20 mS/cm.

La zona di omotermia si attesta ad una quota di circa -12 m s.l.m. ed è caratterizzata da una temperatura di 15 °C. La massima differenza positiva di temperatura tra la base ed il tetto del tratto fessurato è stata rilevata nei mesi da luglio ad ottobre ed è risultata di circa +3 °C; la massima differenza negativa ad aprile e marzo, con -1 °C.

Il profilo verticale di salinità dimostra una elevata stazionarietà nel tempo, soprattutto se confrontato ai dati di monitoraggio storici: in Figura 3.34 sono mostrati i grafici del monitoraggio eseguito in corso d'opera (2016-2017) ed in Figura 3.34 quelli del monitoraggio ante operam (anni 2005-2006), che evidenziano una sostanziale analogia, anzi rilevavano valori di SpCE maggiori sulla lente superficiale (circa 3.5 mS/cm nel rilievo più recente e superiore ai 5 mS/cm in ante operam).

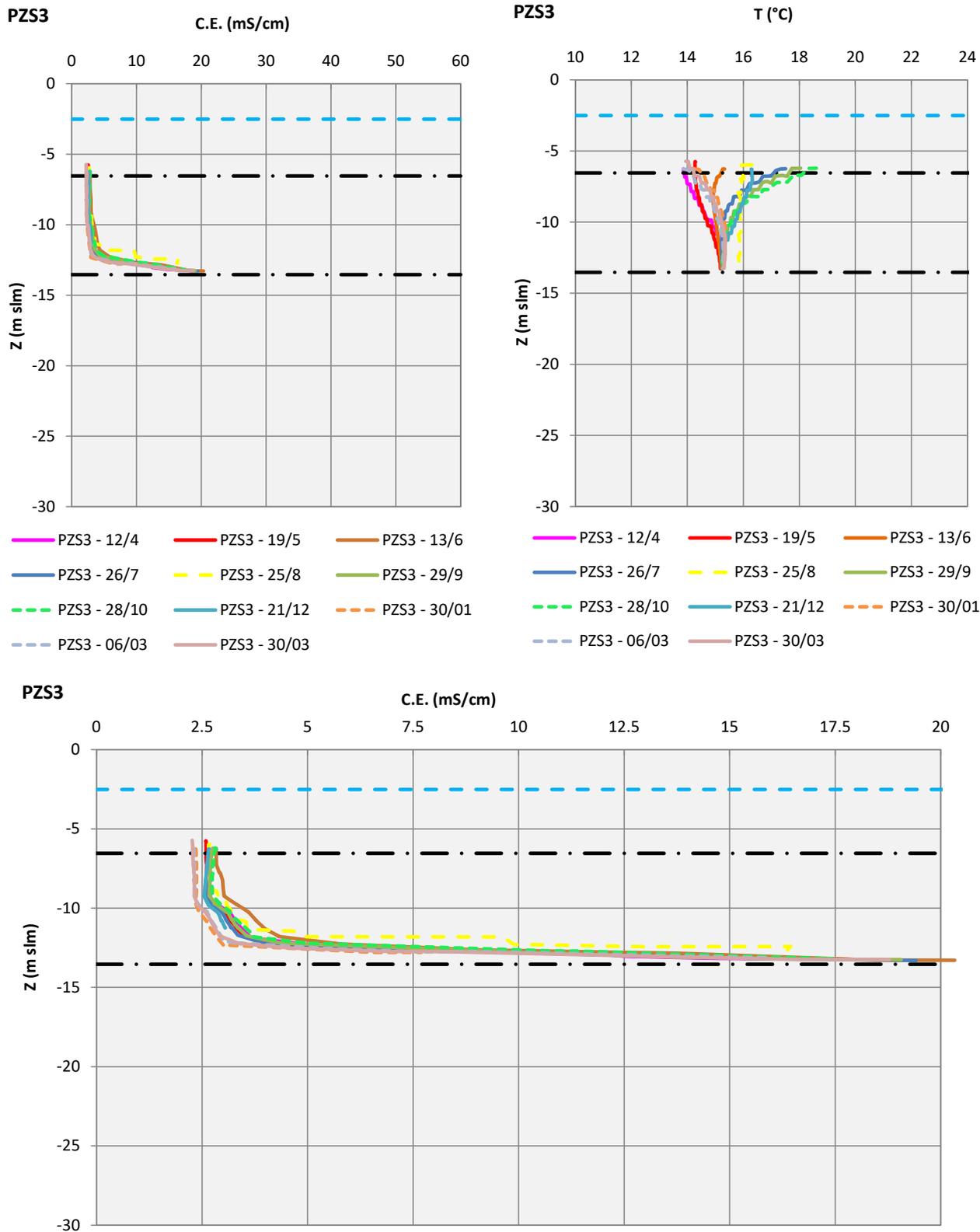


Figura 3.32. Logs CT misurati al piezometro PZS3 nel monitoraggio 2022-2023.

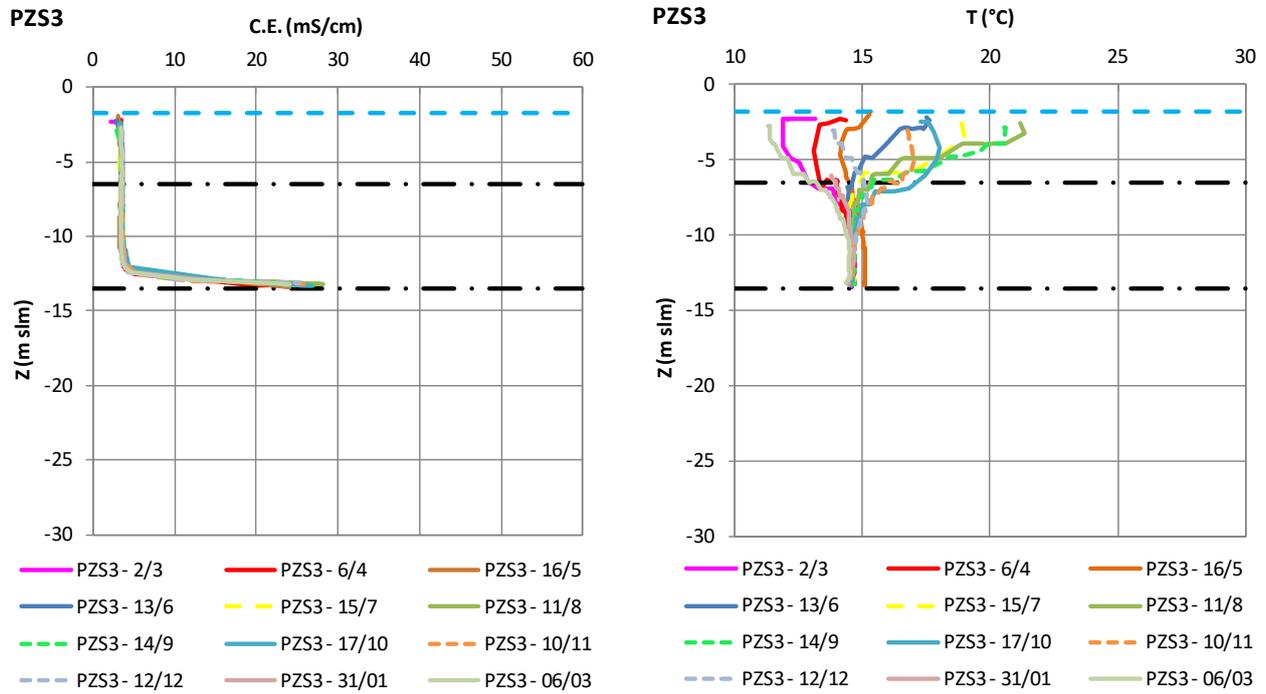


Figura 3.33. Logs CT misurati al piezometro PZS3 nel monitoraggio 2016-2017.

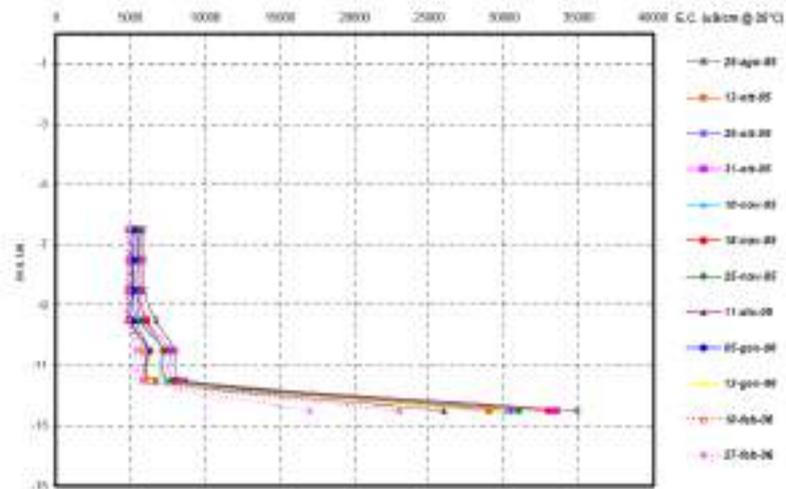


Figura 3.34. Logs CT misurati al piezometro PZS3 nel monitoraggio 2005-2006 (ante operam).

3.5.10 Piezometro P33 (RER)

Il piezometro P33 (RER) appartiene alla rete regionale di monitoraggio del sistema acquifero freatico costiero ed è stato realizzato nell'aprile 2011: ha profondità di 22 m da p.c. e tratto fessurato da 1 a 22 m.

Essendo ubicato all'interno dell'area di studio, in posizione distale rispetto al paleoalveo (Figura 3.1), verificata la disponibilità del SGSS-RER in tal senso, si è ritenuto opportuno integrarlo nel piano di monitoraggio.

In Figura 3.35 sono riportati i logs CT registrati durante le campagne di misura realizzate nel 2022-2023, che rilevano una stratificazione della salinità lungo la verticale (con la presenza di 2 e talora 3 strati a differente salinità) e contestualmente mostrano un'elevata variabilità stagionale.

In alcuni logs viene rilevata la presenza di una lente d'acqua a minore salinità in superficie, con valori di SpCE compresi tra circa 4 e 15 mS/cm, e con spessori di pochi metri; in altri tale lente si riduce considerevolmente di spessore o scompare del tutto, come nei mesi di settembre e ottobre in cui sin dalla tavola d'acqua SpCE risulta maggiore di 20 mS/cm. Una zona di transizione, anch'essa di spessore variabile a seconda del rilievo, porta poi a raggiungere salinità elevate verso la porzione più profonda del piezometro, con valori massimi di 57-58 mS/cm, i massimi valori che si rilevano sull'area di studio.

La zona di eterotermia si estende fino ad una profondità di circa -10 m s.l.m.; al di sotto di questa quota il sottosuolo presenta una temperatura costante attorno ai 15 °C (zona di omotermia). La massima differenza positiva di temperatura tra la base ed il tetto dell'acquifero è stata rilevata nei mesi di settembre ed è risultata di +6 °C; la massima differenza negativa nei mesi di aprile e marzo, con -2 °C.

Per confronto, in Figura 3.36 sono riportati i dati pregressi disponibili per tale piezometro (rilevati negli anni 2016-2017): anch'essi mostrano una significativa variabilità stagionale, la presenza effimera di una lente superficiale a minore salinità ed un generale stato di salinizzazione elevata per le acque intercettate dal piezometro.

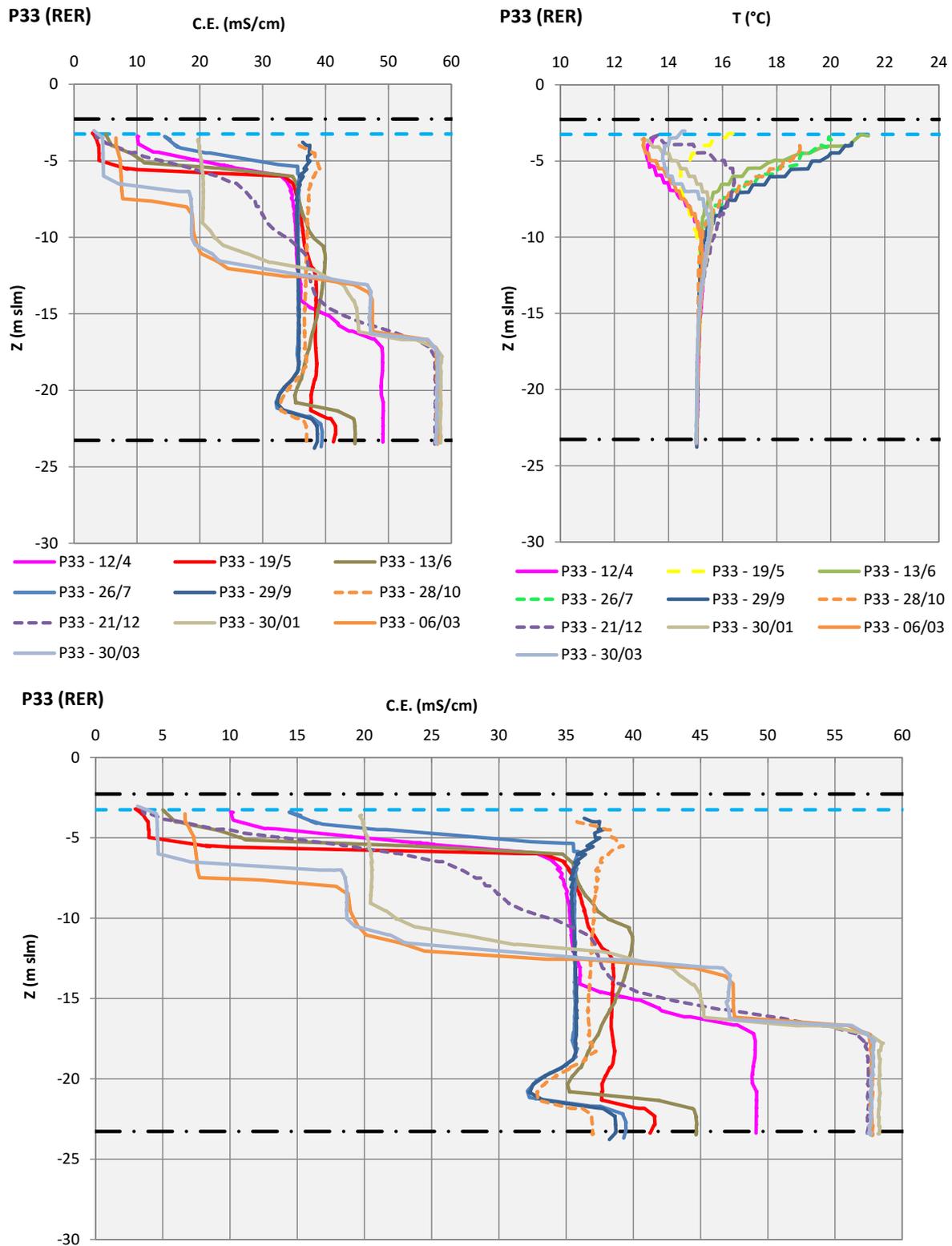


Figura 3.35. Logs CT misurati al piezometro P33 (RER) nel monitoraggio 2022-2023.

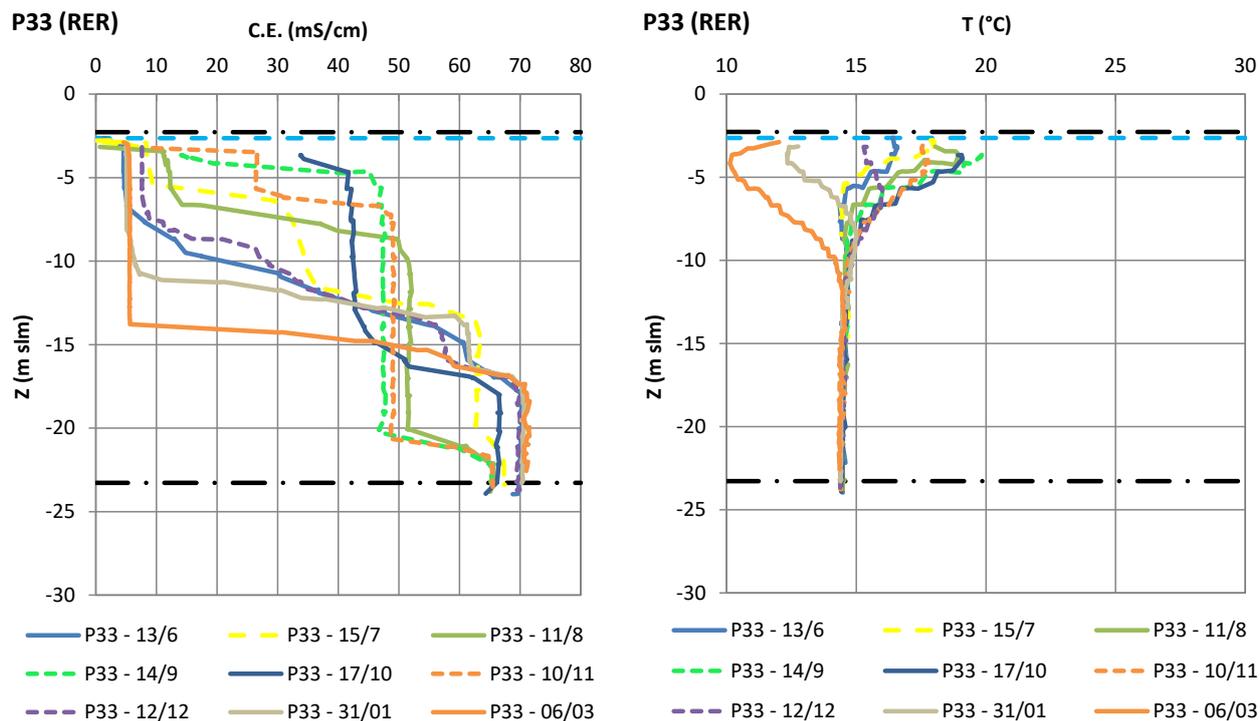


Figura 3.36. Logs CT misurati al piezometro P33 (RER) nel monitoraggio 2016-2017.

3.5.11 Piezometro NP1

Il piezometro NP1 è stato realizzato nel 2007 in posizione distale rispetto al paleoalveo per verificare la successione stratigrafica e lo stato di salinità oltre il paleoalveo (Figura 3.1). Si tratta di un piezometro profondo 25 m, filtrato tra 1 e 25 m da p.c.

In Figura 3.37 sono riportati i logs CT registrati durante le campagne di misura realizzate nel 2022-2023.

Tutti i logs rilevano la presenza di acque salate su tutta la colonna d’acqua, senza rilevanti gradienti di salinità. La SpCE è elevata e varia stagionalmente tra valori di circa 20 e 24 mS/cm.

La zona di eterotermia si estende fino alla profondità di circa -17 m s.l.m.; inferiormente a questa quota l’acquifero presenta una temperatura costante attorno ai 16 °C (zona di omotermia). La massima differenza positiva di temperatura tra la base ed il tetto dell’acquifero è stata rilevata nel mese di giugno ed è risultata di +4 °C; la massima differenza negativa ad aprile, con -1.5 °C.

Per confronto, in Figura 3.39 ed in Figura 3.39 sono riportati i risultati dei monitoraggi antecedenti (anni 2016-2017 e 2007-2008): si osserva che le salinità attualmente rilevate sono molto simili a quelle del 2016-2017 e addirittura inferiori a quelle misurate nel 2007-2008 (SpCE sempre superiori ai 30 mS/cm su tutta la colonna di acqua).

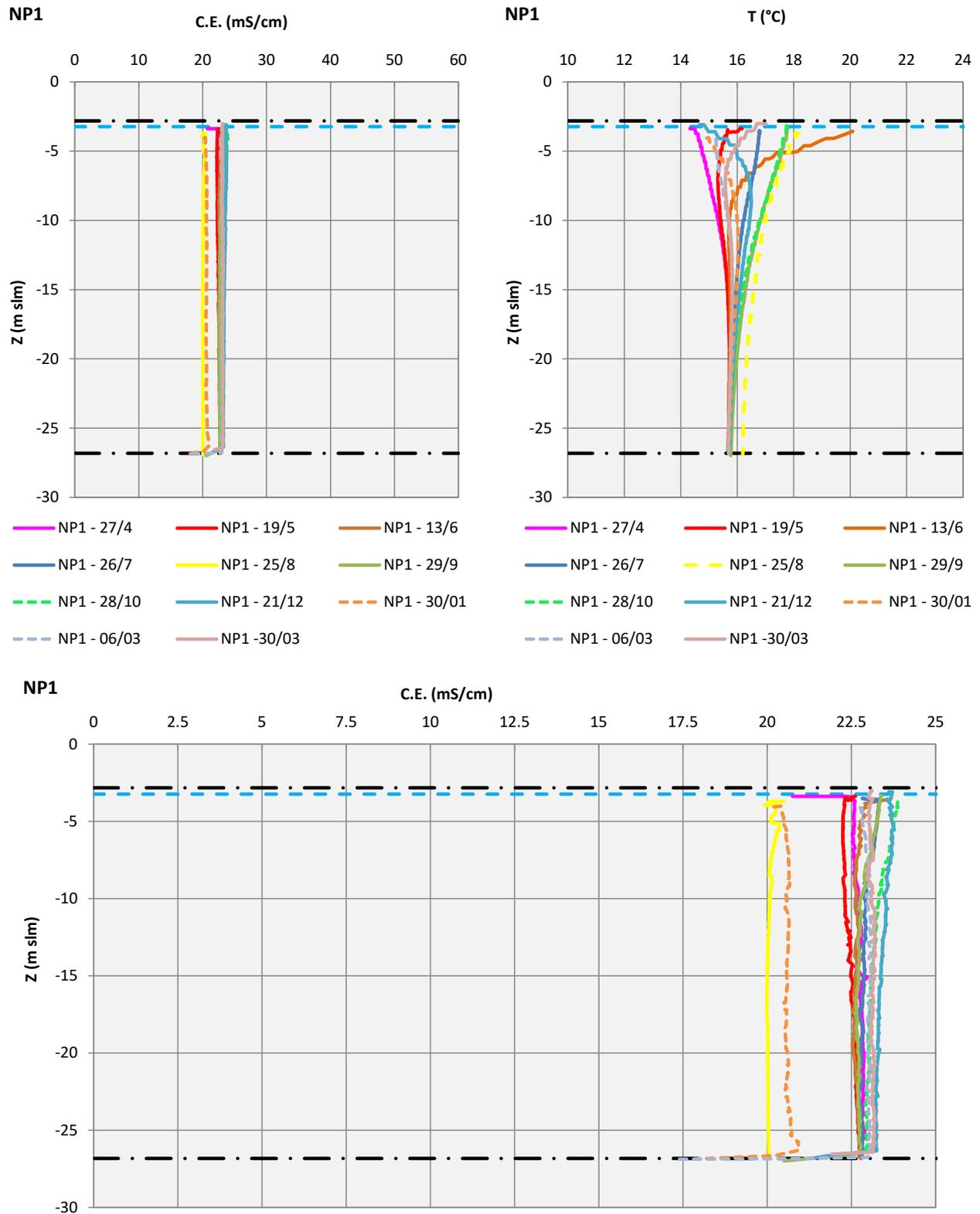


Figura 3.37. Logs CT misurati al piezometro NP1 nel monitoraggio 2022-2023.

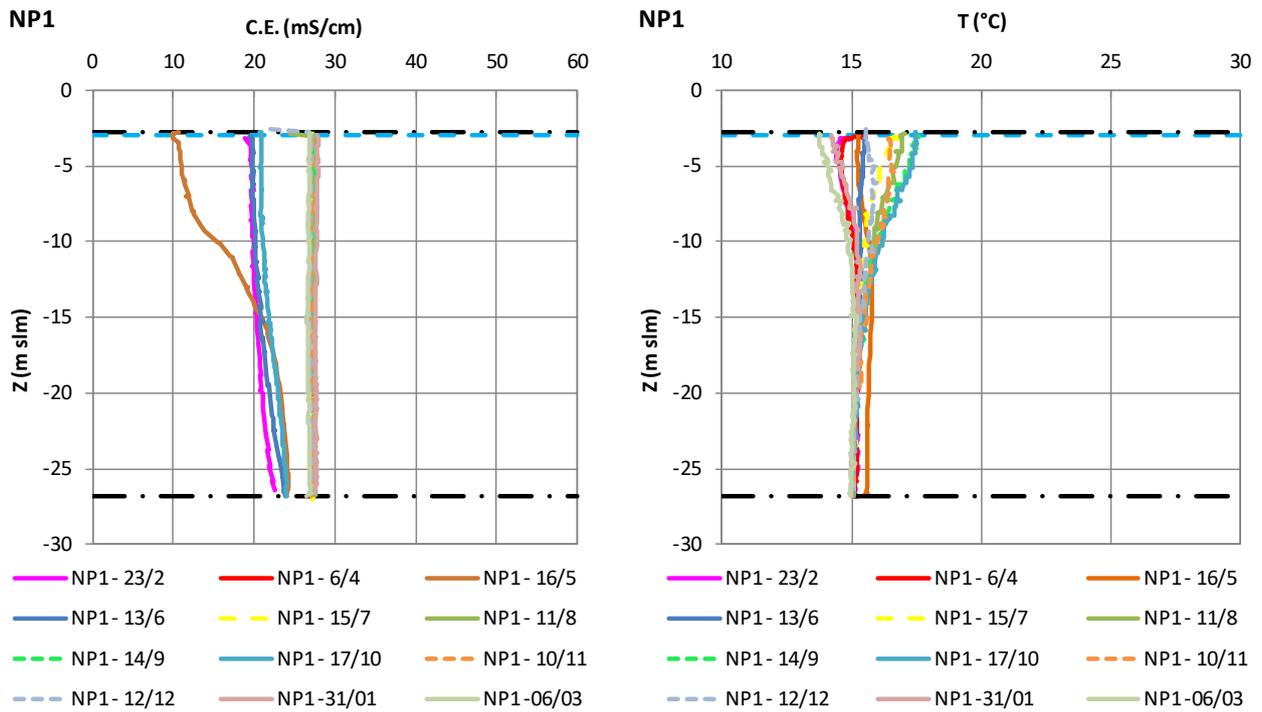


Figura 3.38. Logs CT misurati al piezometro NP1 nel monitoraggio 2016-2017.

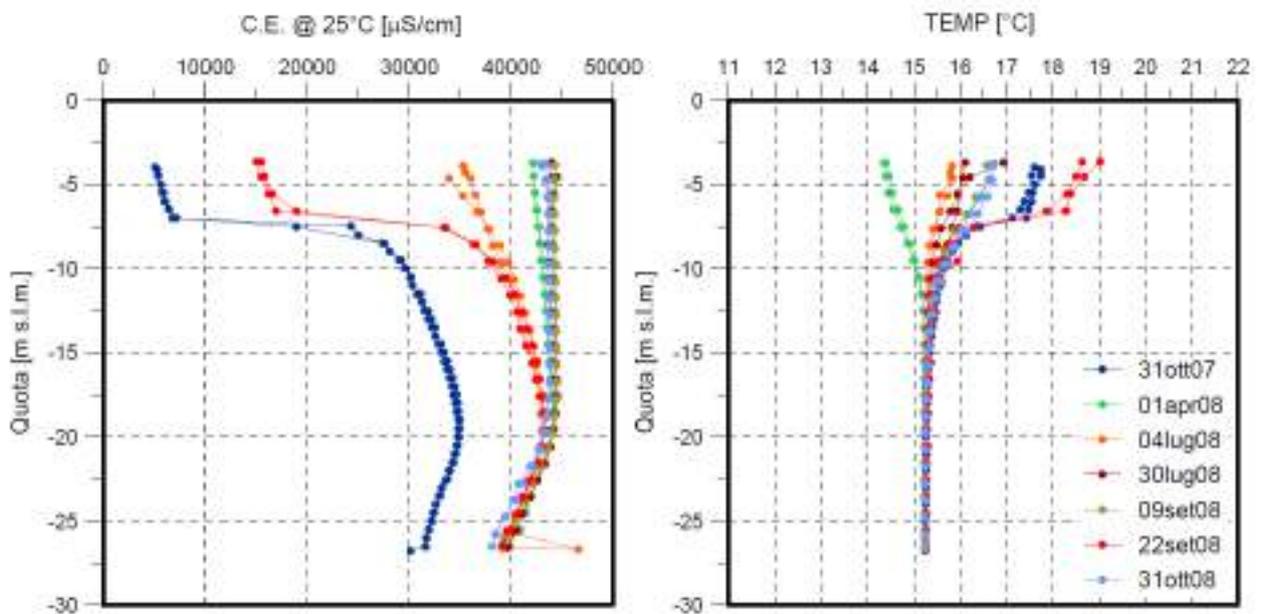


Figura 3.39. Logs CT misurati al piezometro NP1 nel monitoraggio 2007-2008.

3.6 Analisi temporale dei logs di salinità

Con l'obiettivo di sintetizzare tutti i rilievi di salinità disponibili sul sito dall'ante operam ad oggi, nel presente paragrafo per ciascun piezometro sono riportati i log medi di salinità realizzati per ciascuna fase di monitoraggio disponibile, tra le seguenti:

- 2005-2006: ante operam;
- 2007-2008: primo monitoraggio in corso d'opera;
- 2016-2017: secondo monitoraggio in corso d'opera;
- 2022-2023: ultimo monitoraggio, realizzato nel presente studio.

I valori di SpCE sono stati aggregati secondo intervalli di profondità di spessore pari a 1 m; quindi, su ciascuno degli intervalli individuati, sono stati calcolati i valori minimo, medio e massimo di SpCE. Infine, i valori di SpCE sono stati convertiti in concentrazione dei solidi totali disciolti (TDS in g/l) attraverso l'applicazione dell'equazione sperimentale di riferimento per il sito, disponibile in CFR per Cantoniera Cavallara (2009) e riportata al paragrafo 6.2.5 (pag. 140), e quindi graficati a rappresentare 3 andamenti lungo la verticale (logs) per ciascuna campagna di monitoraggio, rispettivamente di:

- salinità minima;
- salinità media;
- salinità massima.

I grafici sono presentati qui di seguito, in ordine da sud verso nord, dalla Figura 3.40 alla Figura 3.55; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato del piezometro.

Queste elaborazioni sono state propedeutiche alla successiva fase di modellazione numerica, dove i logs sono stati utilizzati come punti di controllo nelle simulazioni di verifica, nelle modalità illustrate al paragrafo 6.3.2. Permettono inoltre di valutare la variabilità all'interno di ciascun periodo di monitoraggio osservando la distanza tra log min e log max e la variabilità tra i diversi periodi di monitoraggio osservando nell'ultimo grafico le differenze tra i log medi dei diversi periodi di monitoraggio.

Al piezometro PZP1 (Figura 3.40) la variabilità stagionale dei log è maggiore nel monitoraggio 2016-2017, molto bassa nelle altre campagne. Le differenze tra i log medi dei diversi monitoraggi si riscontrano solo sulla porzione più profonda a maggiore salinità, ma sono abbastanza contenute, nel range 5-25 g/l di TDS.

Al piezometro PZM5 (Figura 3.41) sia la variabilità stagionale delle due campagne disponibili, sia la variabilità tra i due log medi risultano piuttosto contenute, anche in ragione del fatto che la profondità del piezometro intercetta solo il tratto iniziale dell'interfaccia, con salinità contenute tra 20 e 40 g/l di TDS.

Il piezometro PZS4 (Figura 3.42) intercetta solamente acque dolci e la variabilità tra log e tra monitoraggi risulta trascurabile.

Al piezometro PZ1 (Figura 3.43) la variabilità stagionale tra logs si riscontra solo nelle ultime due campagne, che però restituiscono valori medi totalmente coerenti tra loro; per la porzione profonda a maggiore salinità si osserva una variabilità tra i primi due monitoraggi e gli ultimi due, nel range 2-20 g/l di TDS.

Il piezometro PZS8 (Figura 3.44) intercetta solamente acque dolci e la variabilità tra log e tra monitoraggi risulta trascurabile.

Al piezometro PZ3 (Figura 3.45) si rileva una variabilità stagionale nell'ambito dello stesso monitoraggio abbastanza contenuta e una certa variabilità tra log medi dei diversi monitoraggi.

Il piezometro PZ4bis (Figura 3.46) intercetta solamente acque dolci, sfiorando la sommità della zona di interfaccia; pertanto, la variabilità tra log e tra monitoraggi risulta trascurabile.

Al piezometro PZ4 (Figura 3.47) viene attraversata tutta la zona di interfaccia, che presenta una morfologia abbastanza stabile stagionalmente nell'ambito di ciascun monitoraggio, Si rileva invece una variabilità maggiore relativamente ai log medi dei diversi monitoraggi, ma solamente per le salinità più elevate della porzione profonda.

Per i piezometri PZ5 (Figura 3.48) e PZ2 (Figura 3.49) valgono considerazioni analoghe a quelle del precedente PZ4.

Il piezometro PZS3 (Figura 3.50) intercetta solamente acque dolci, sfiorando la sommità della zona di interfaccia; pertanto, la variabilità tra log e tra monitoraggi risulta trascurabile sulla porzione di acque dolce, mentre diventa visibile sulla porzione più profonda.

Al piezometro PZP2 (Figura 3.51) il tratto filtrato è molto corto, sulla porzione profonda che intercetta acque a maggiore salinità: si osserva una certa variabilità stagionale all'interno di ciascun monitoraggio ed una certa variabilità anche tra i log medi dei diversi monitoraggi, nel range 40-80 g/l di TDS.

Il piezometro P33 (RER) (Figura 3.52) ha una distribuzione verticale di salinità piuttosto anomala rispetto ai piezometri del sito, come già osservato al paragrafo 3.5.10, e mostra una elevata variabilità stagionale ed elevata variabilità tra le medie dei due monitoraggi disponibili.

Il piezometro NP1 (Figura 3.53) presenta una variabilità stagionale più evidente nel monitoraggio 2007-2008, poi minore per le successive campagne; la prima campagna si differenzia anche in termini di valori medi, rispetto alle successive, più coerenti tra loro.

I piezometri PZS7 (Figura 3.54) e PZS9 (Figura 3.55) intercettano solamente acque dolci e le variabilità tra log e tra monitoraggi risultano trascurabili.

Nell'osservare le variabilità tra i diversi monitoraggi, bisogna necessariamente considerare due aspetti. Prima di tutto il fatto che il numero di logs disponibili all'interno di ciascun monitoraggio è molto più basso nei primi monitoraggi (2005-2006, 2007-2008), e pari a 12 per gli ultimi due monitoraggi (rilievi mensili nel 2016-2017 e nel 2022-2023), che quindi rappresentano due data-set più coerenti tra loro e meglio confrontabili. In secondo luogo, va considerato che le strumentazioni utilizzate per i rilievi non sono le stesse sui diversi monitoraggi, per ovvi motivi tecnici, in ragione dei 18 anni trascorsi tra i primi rilievi del 2005 e quelli più recenti appena ultimati: in merito a questo aspetto va evidenziato che l'aggiornamento della strumentazione ha portato ad un miglioramento progressivo dell'accuratezza della misura, soprattutto per i valori di SpCE/salinità più elevati. Tutto ciò ha probabilmente influito sulla magnitudo dei valori salinità attribuiti all'acqua salata/salmastra, come testimoniato dalla loro progressiva diminuzione nelle ultime due campagne

di misura (Figura 3.40, Figura 3.47, Figura 3.48, Figura 3.49, Figura 3.50, Figura 3.51 e Figura 3.53), ma non ha sicuramente influito sulla capacità dei logs di distinguere tra l'acqua dolce e quella salata/salmastra e di individuare la posizione della loro zona di transizione.

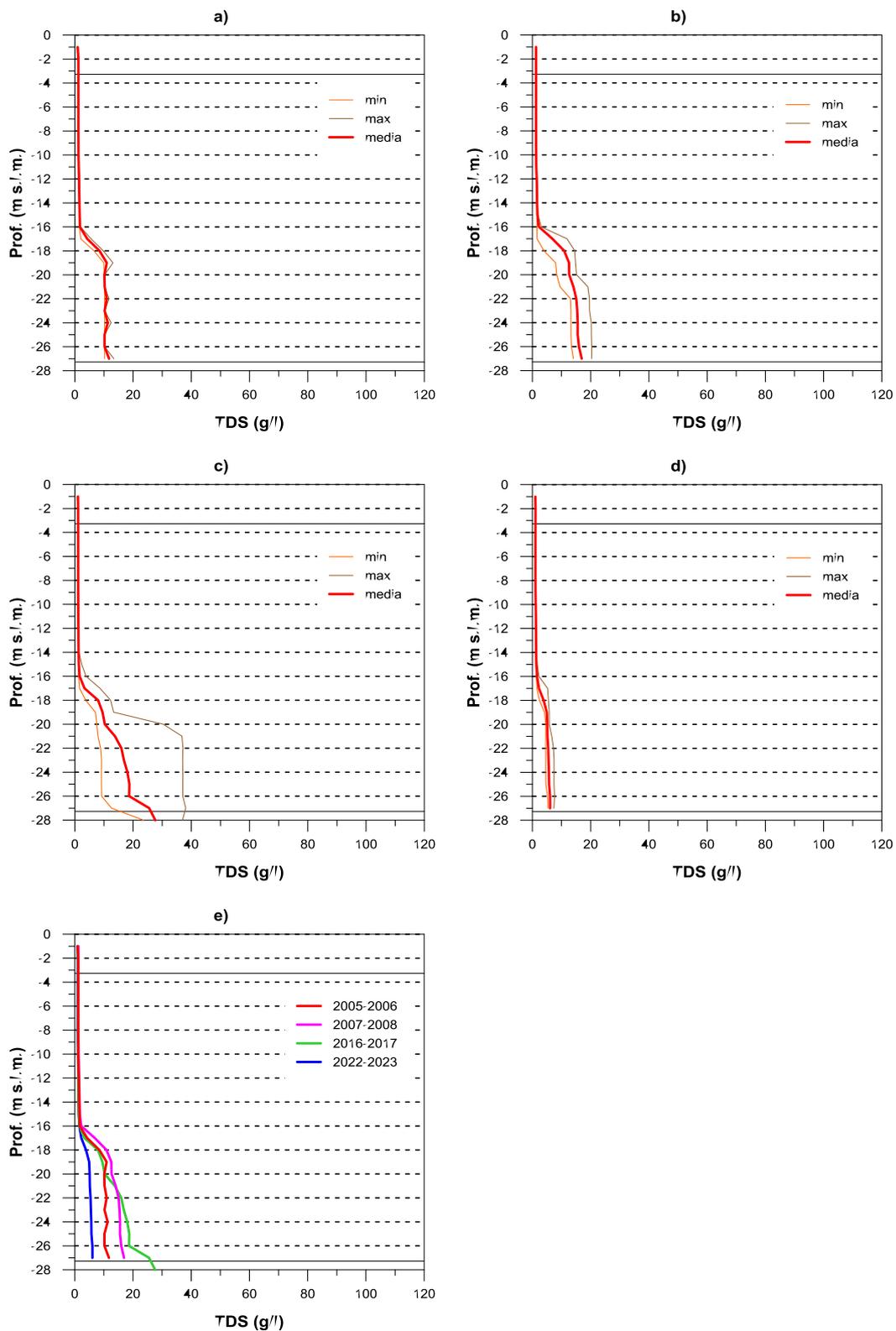


Figura 3.40. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZP1: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2007-2008, c) nel 2016-2017, d) nel 2022-2023, e) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.

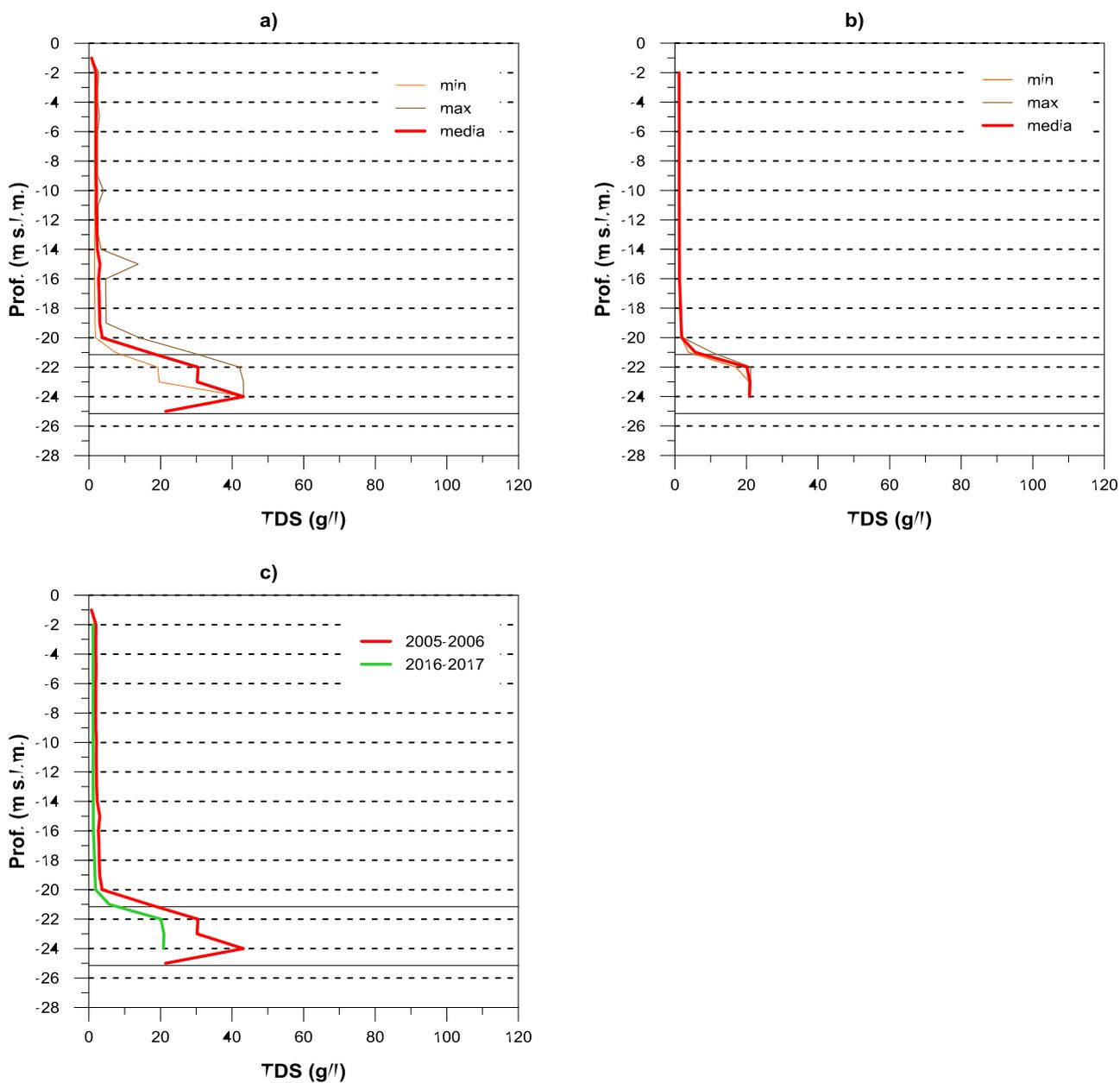


Figura 3.41. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZM5: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2016-2017 e c) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.

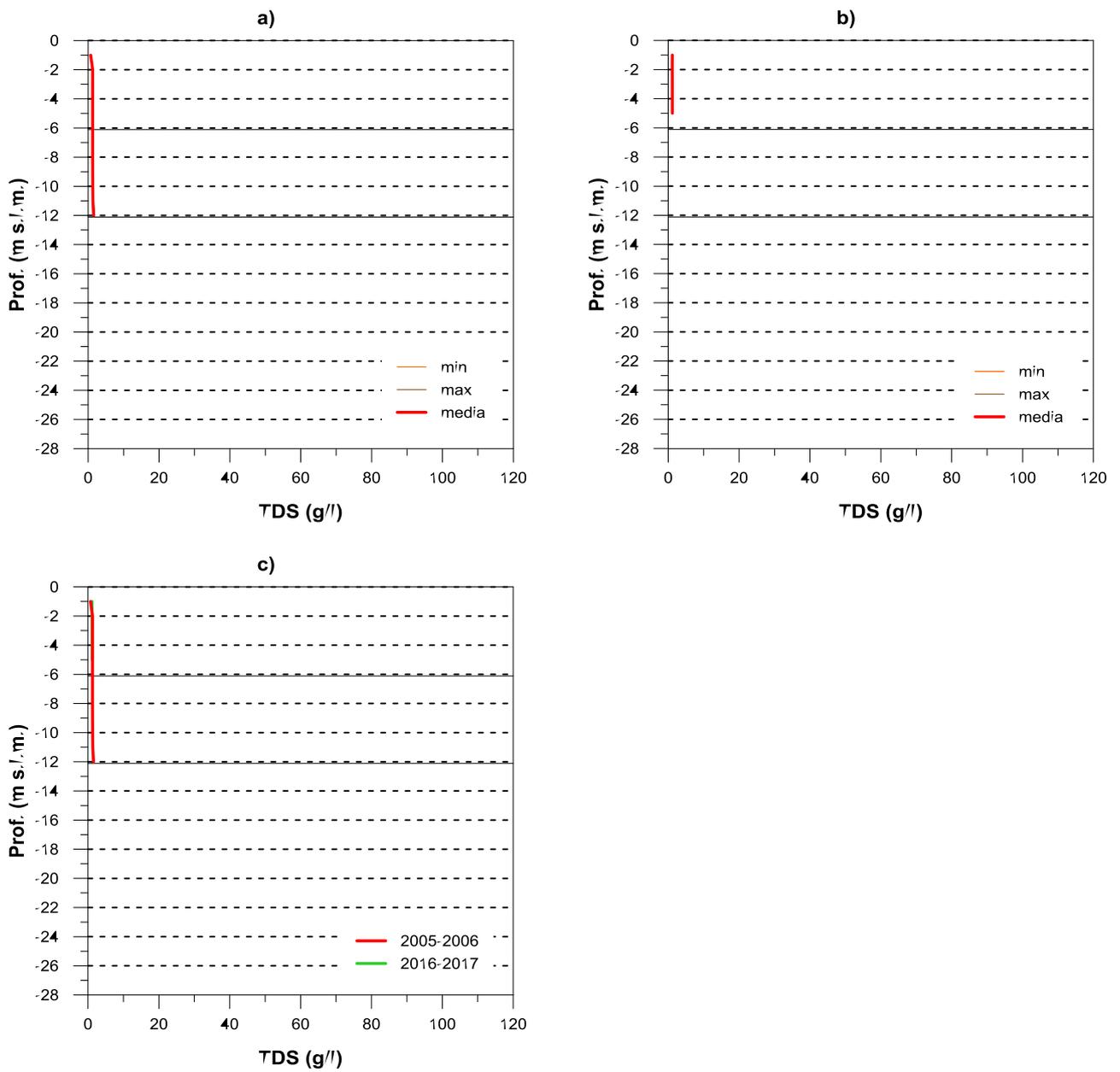


Figura 3.42. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZS4: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2016-2017 e c) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.

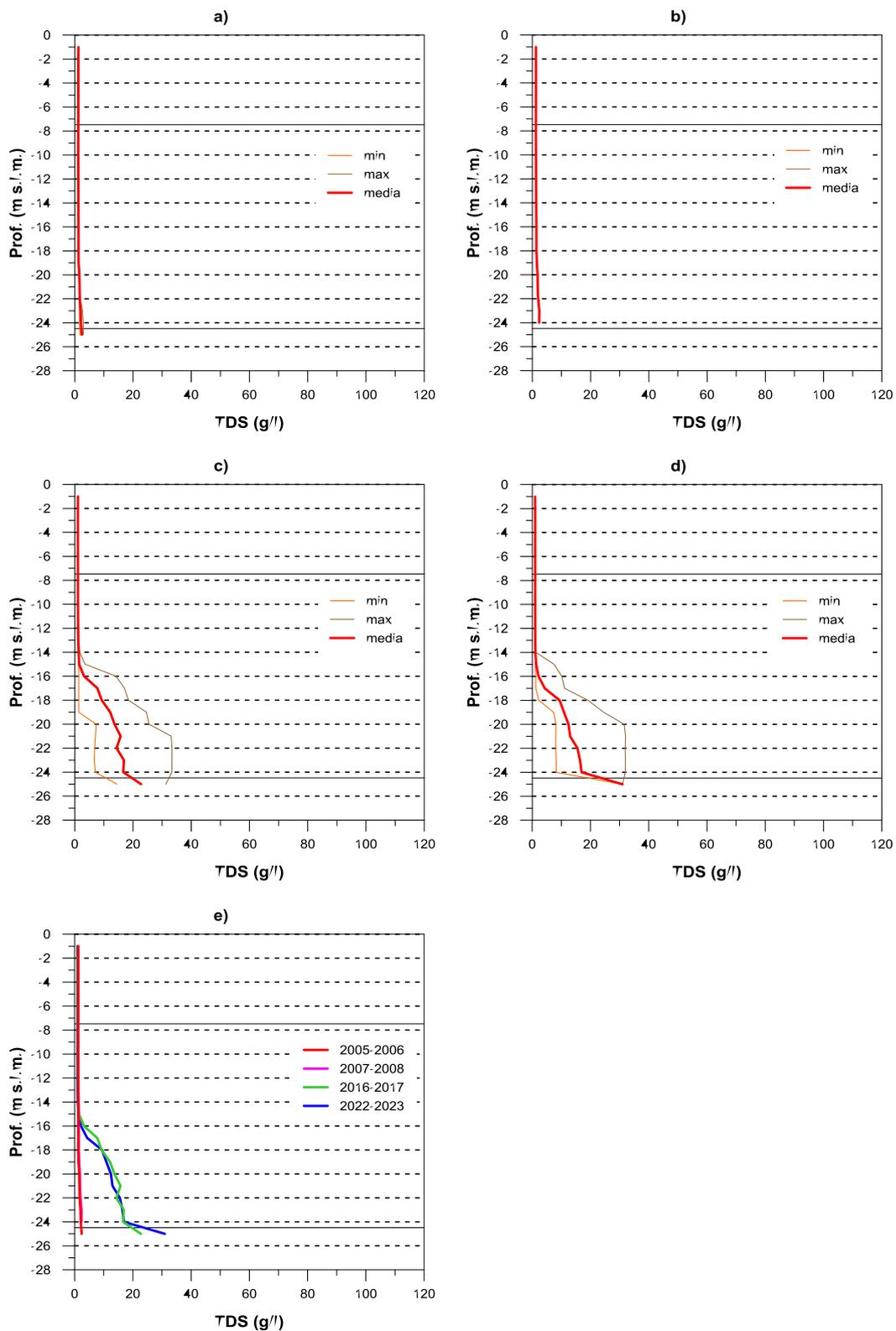


Figura 3.43. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZ1: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2007-2008, c) nel 2016-2017, d) nel 2022-2023 ed e) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.

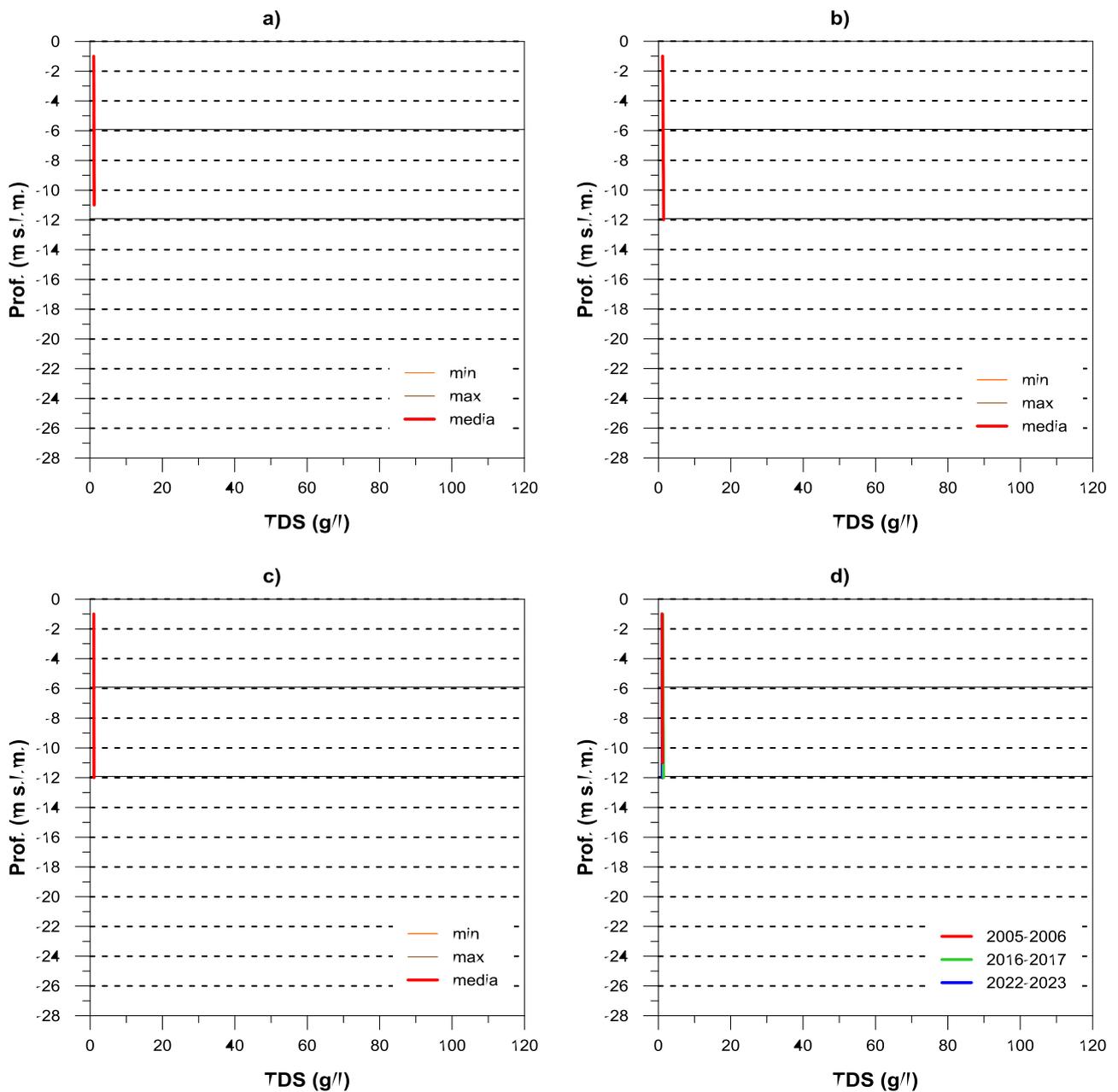


Figura 3.44. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZS8: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2016-2017, c) nel 2022-2023 e d) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.

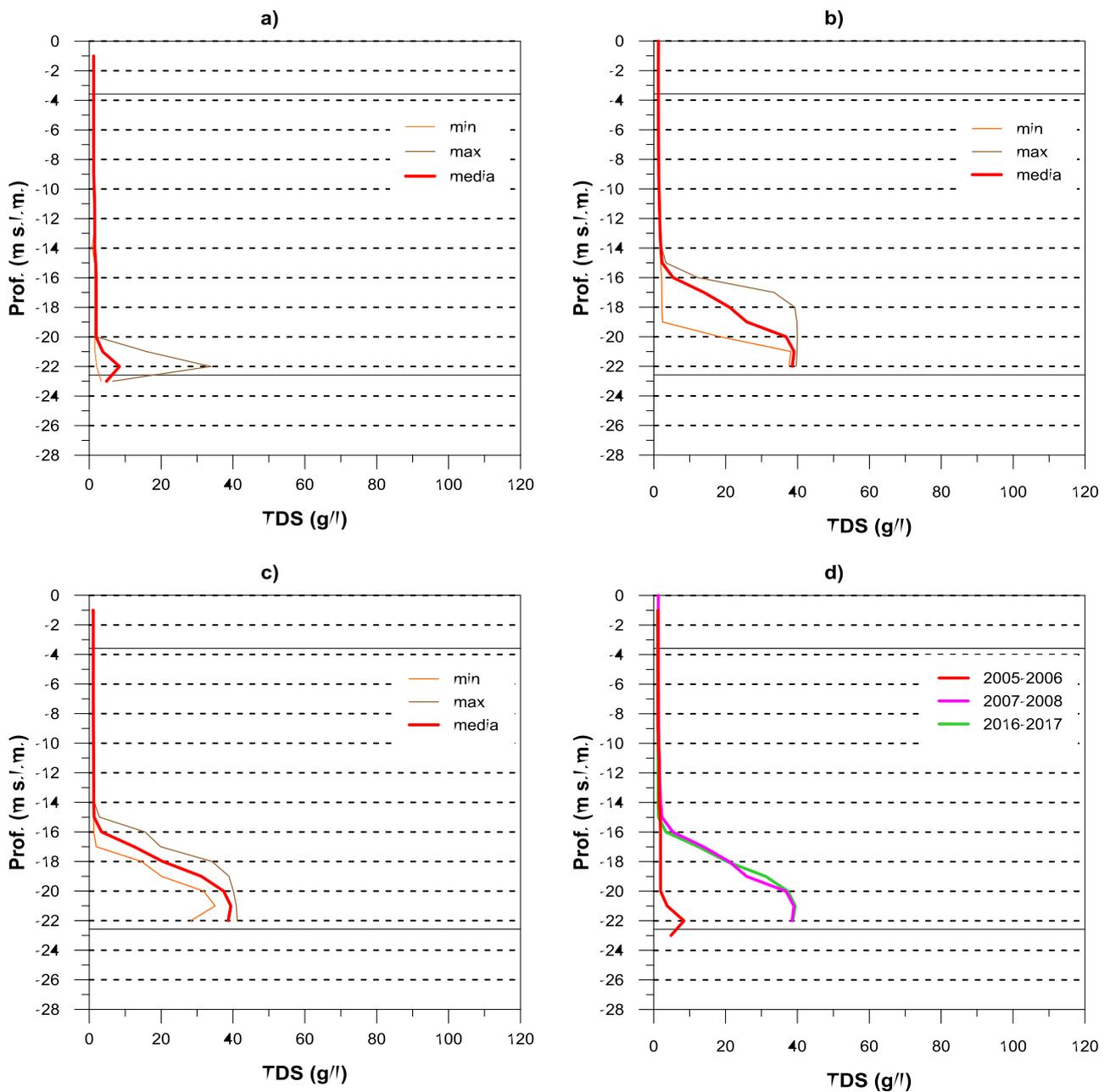


Figura 3.45. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZ3: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2007-2008, c) nel 2016-2017 e c) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.

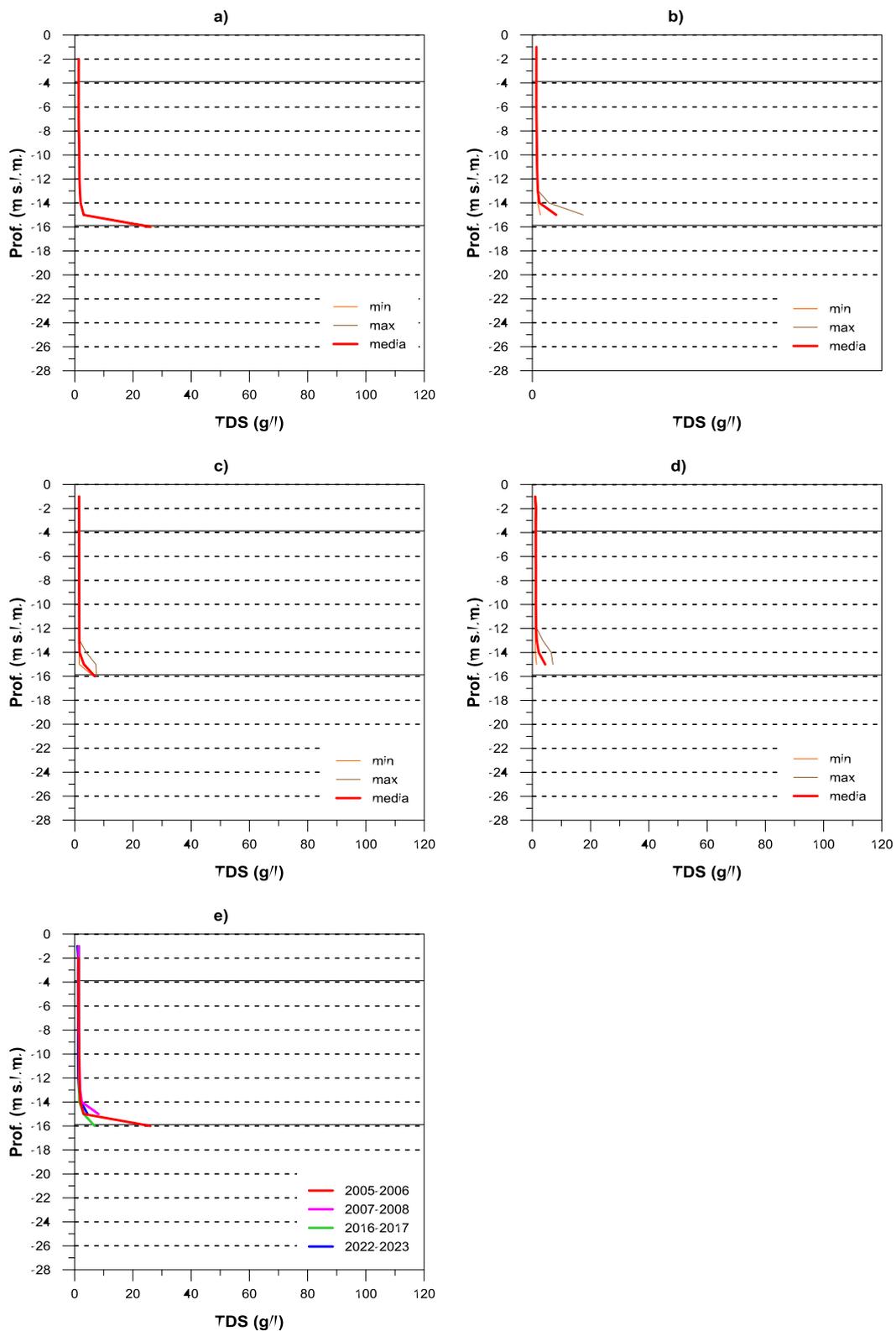


Figura 3.46. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZ4bis: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2007-2008, c) nel 2016-2017, d) nel 2022-2023 ed e) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.

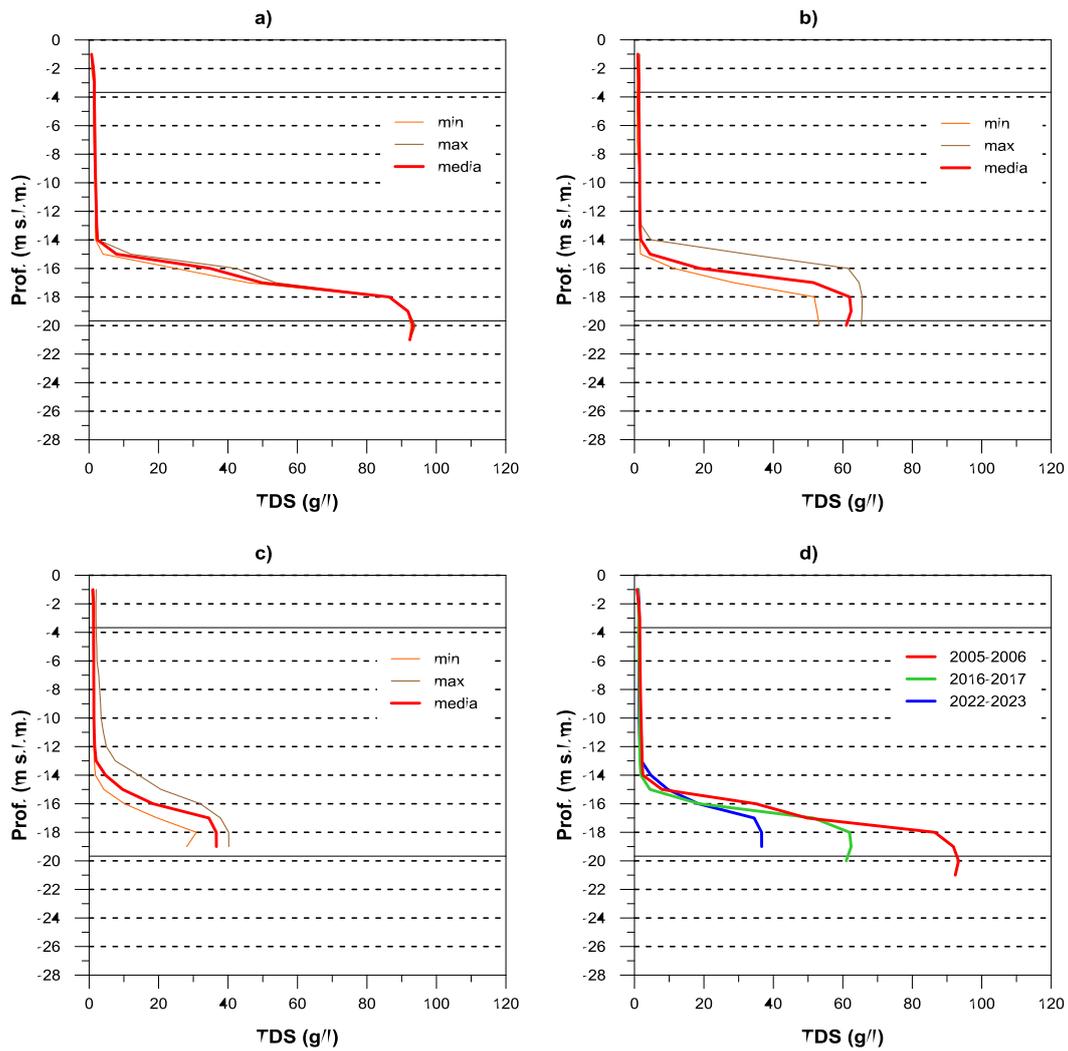


Figura 3.47. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZ4: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2007-2008, c) nel 2016-2017, d) nel 2022-2023 ed e) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.

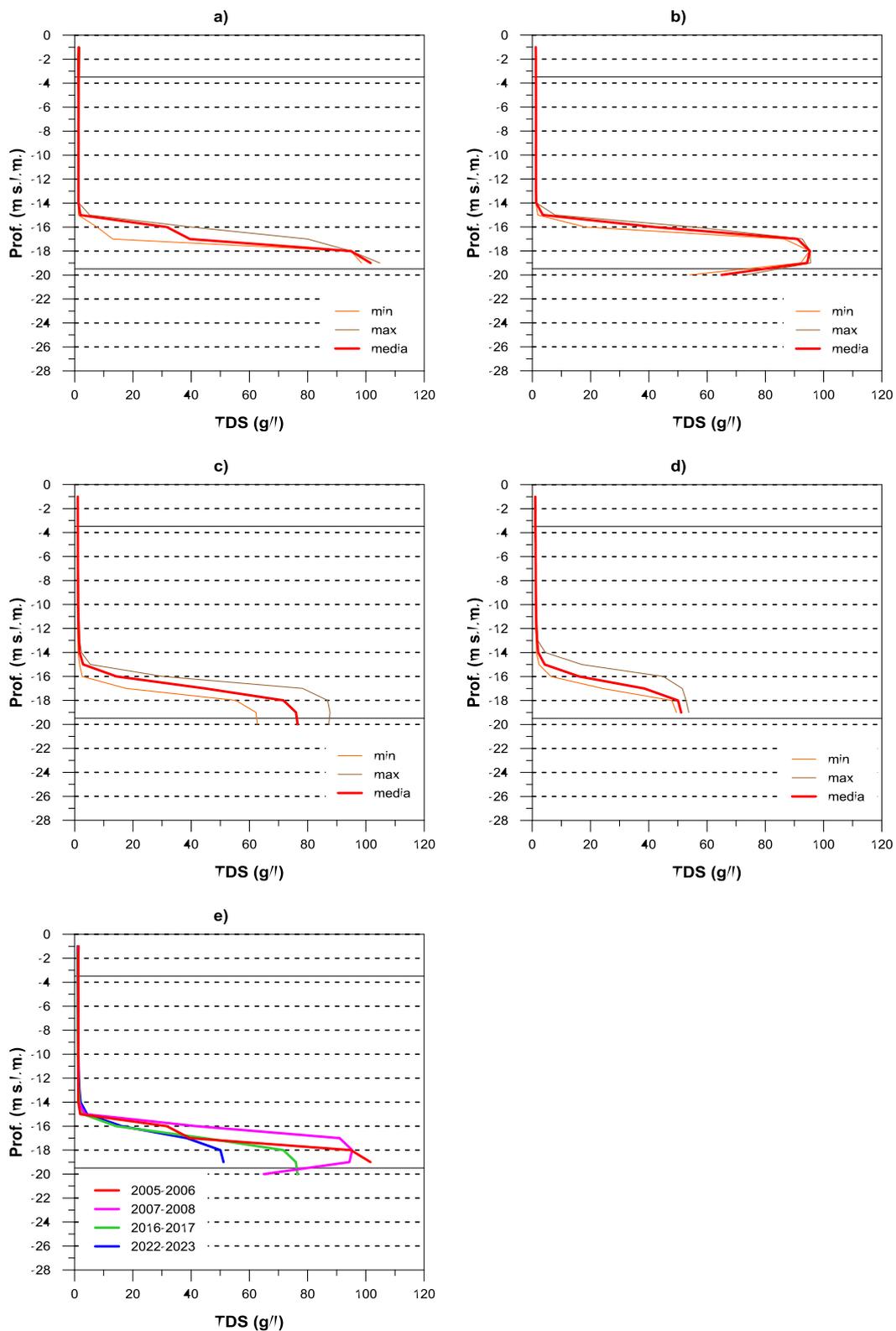


Figura 3.48. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZ5: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2007-2008, c) nel 2016-2017, d) nel 2022-2023 ed e) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.

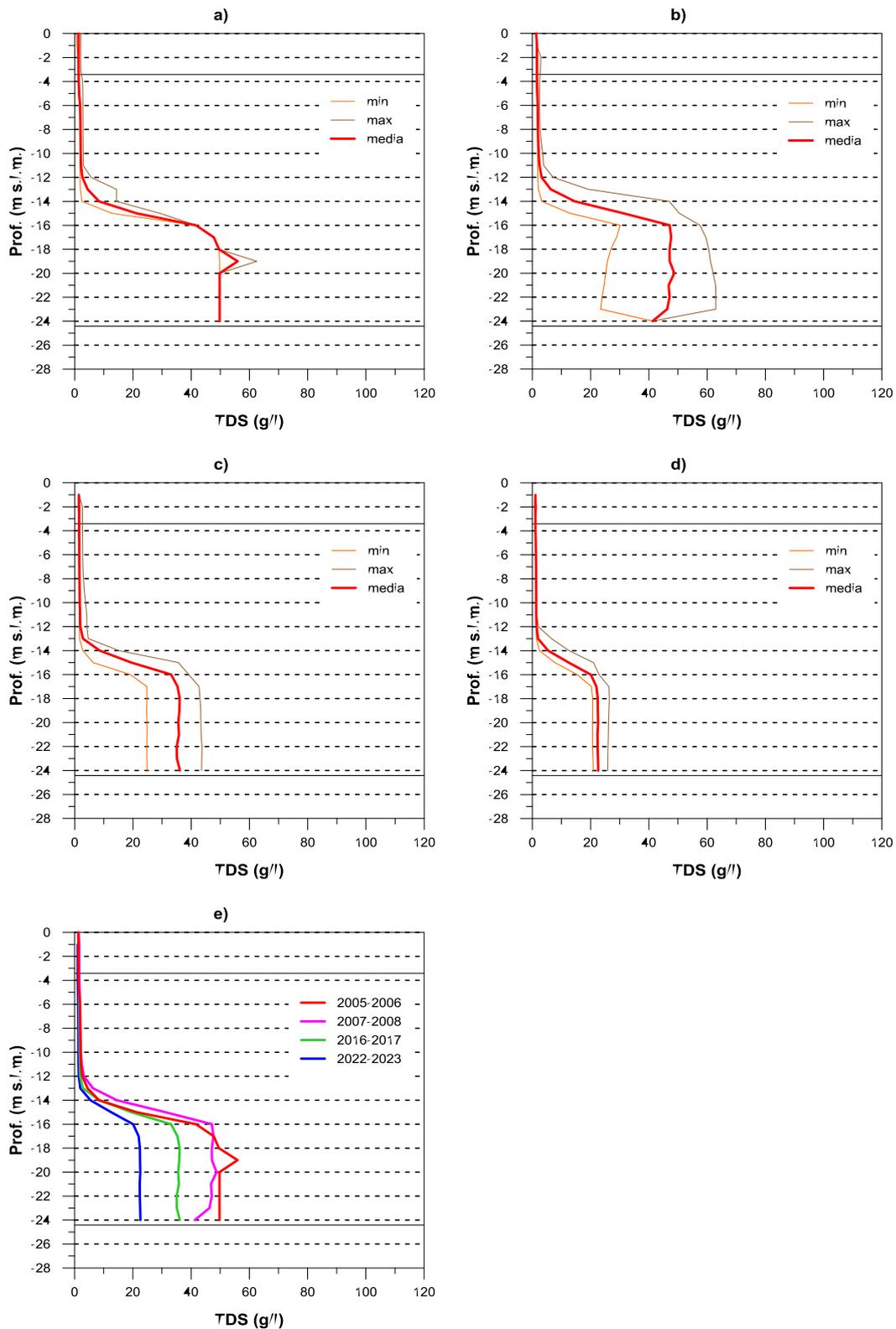


Figura 3.49. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZ2: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2007-2008, c) nel 2016-2017, d) nel 2022-2023 ed e) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.

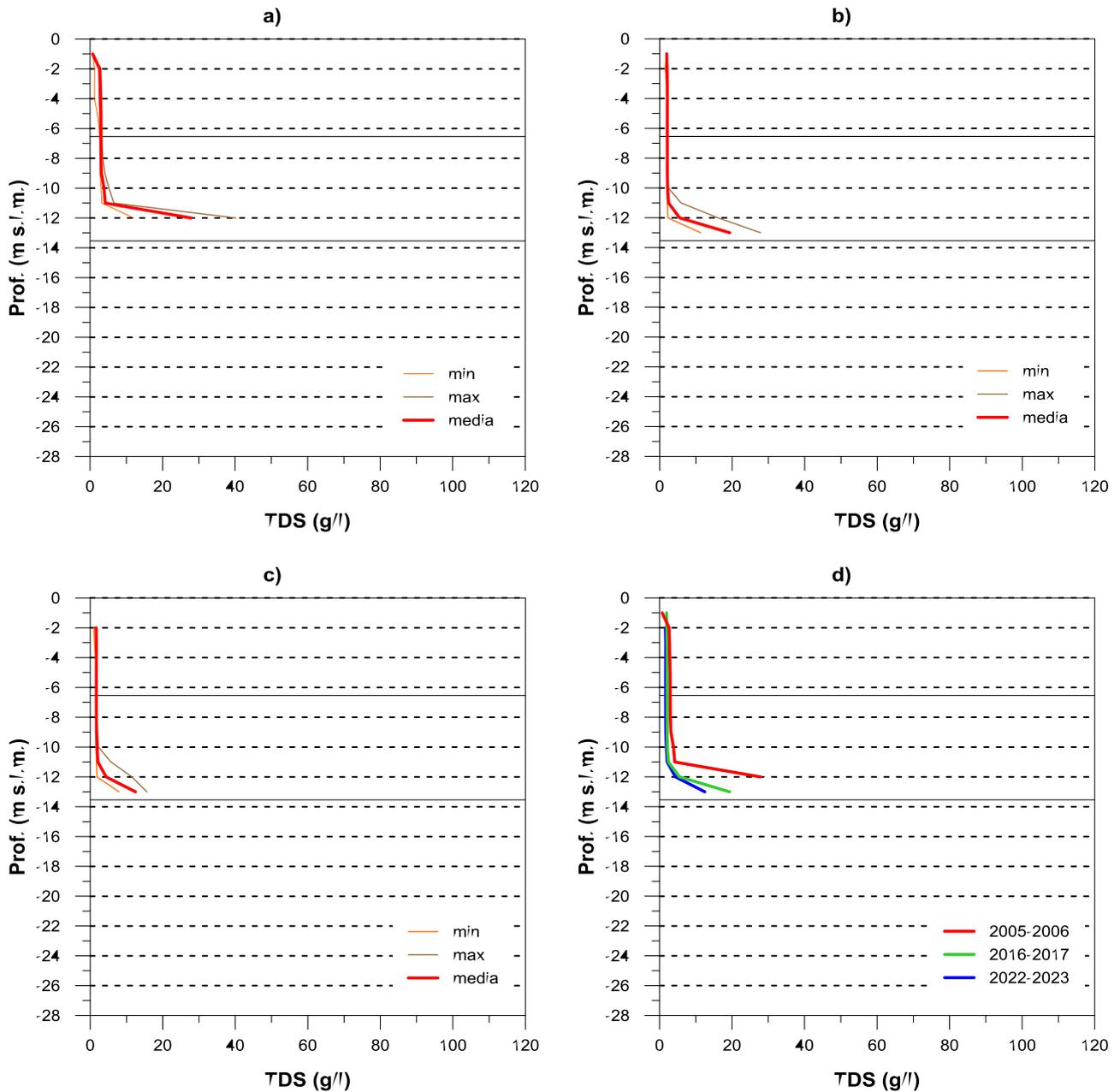


Figura 3.50. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZS3: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2016-2017, c) nel 2022-2023 e d) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.

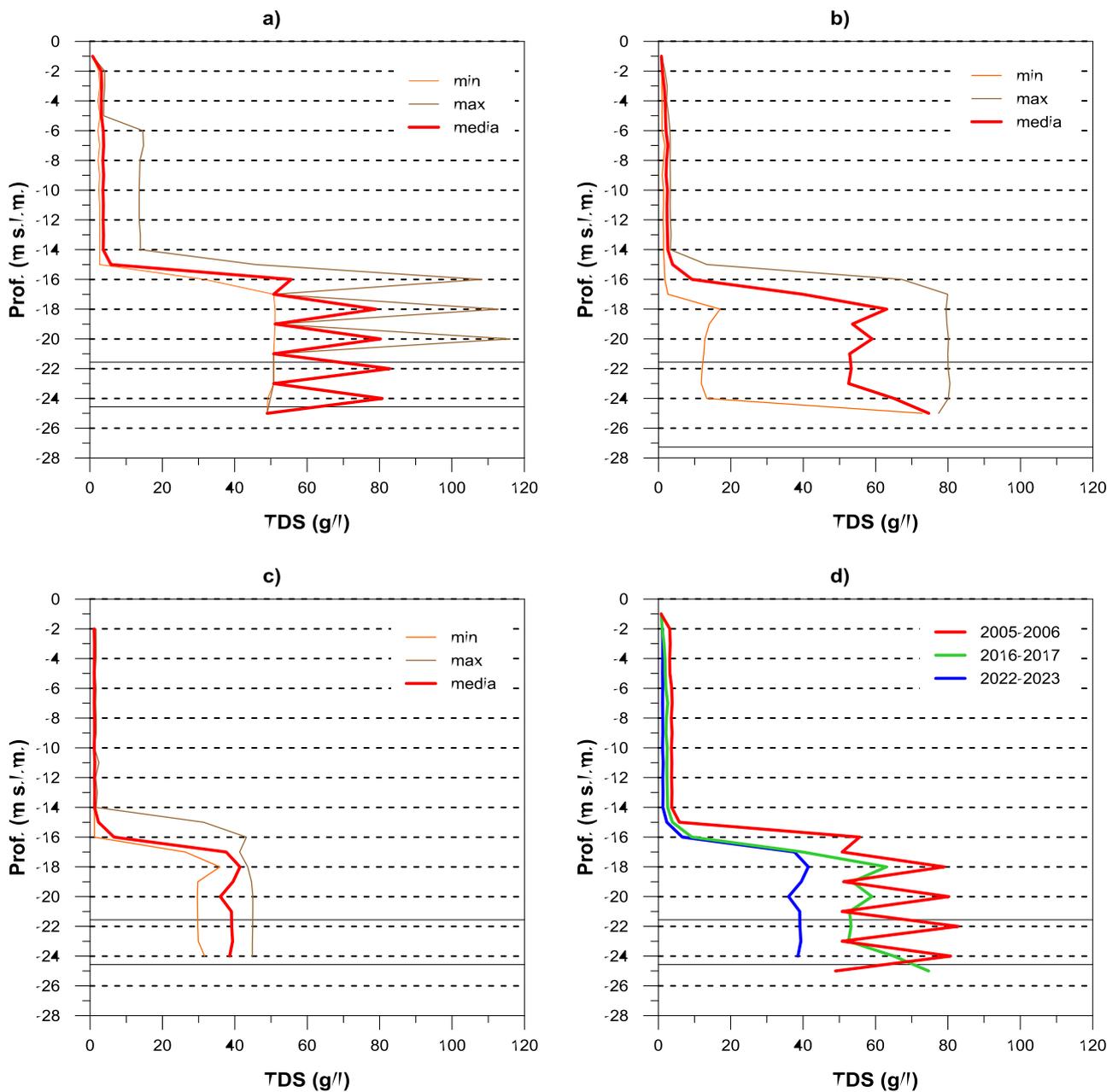


Figura 3.51. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZP2: a) nel 2005-2006 (ante-opera), b) nel 2016-2017, c) nel 2022-2023 e d) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.

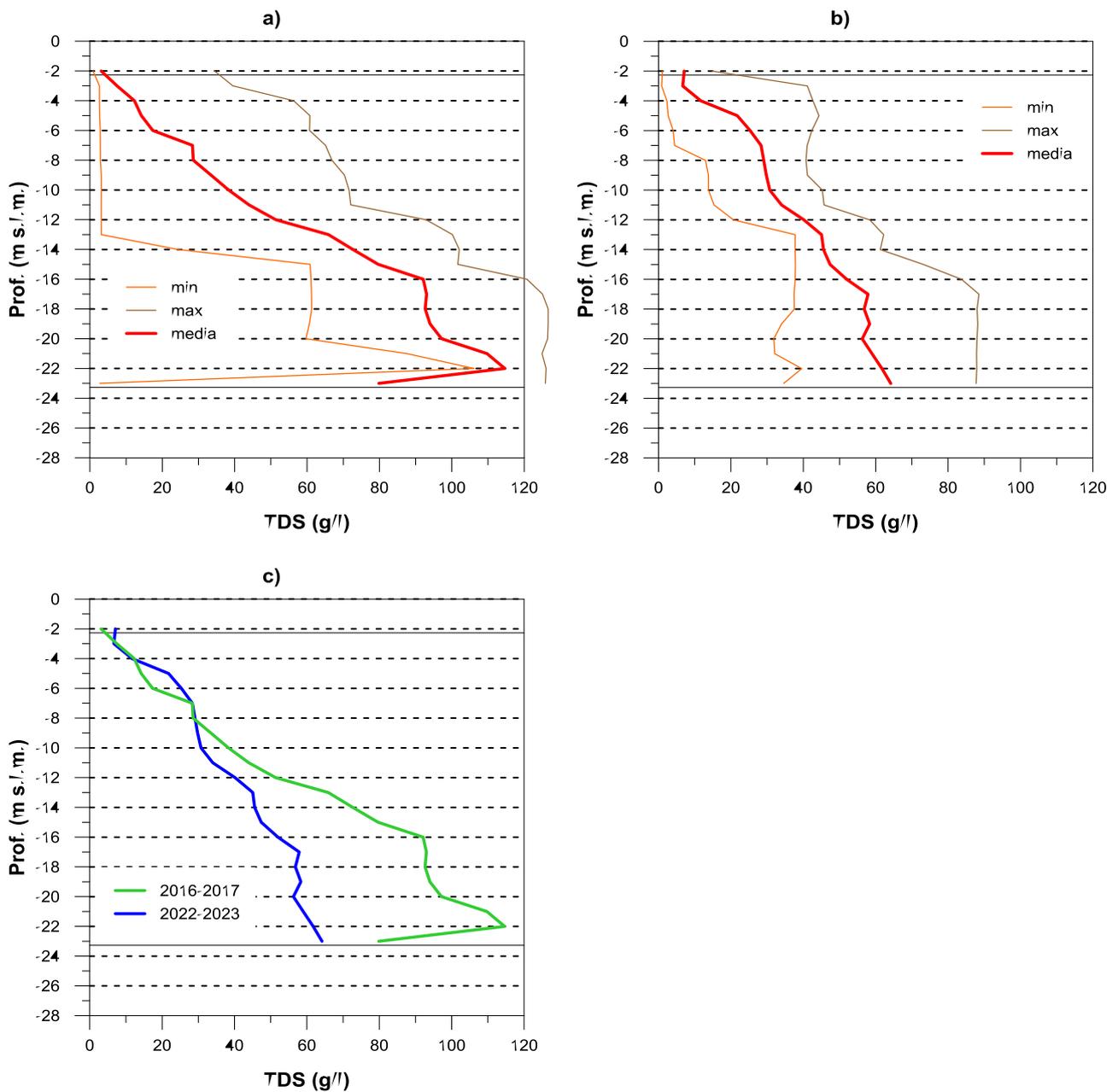


Figura 3.52. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro P33: a) nel 2016-2017, b) nel 2022-2023 e c) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.

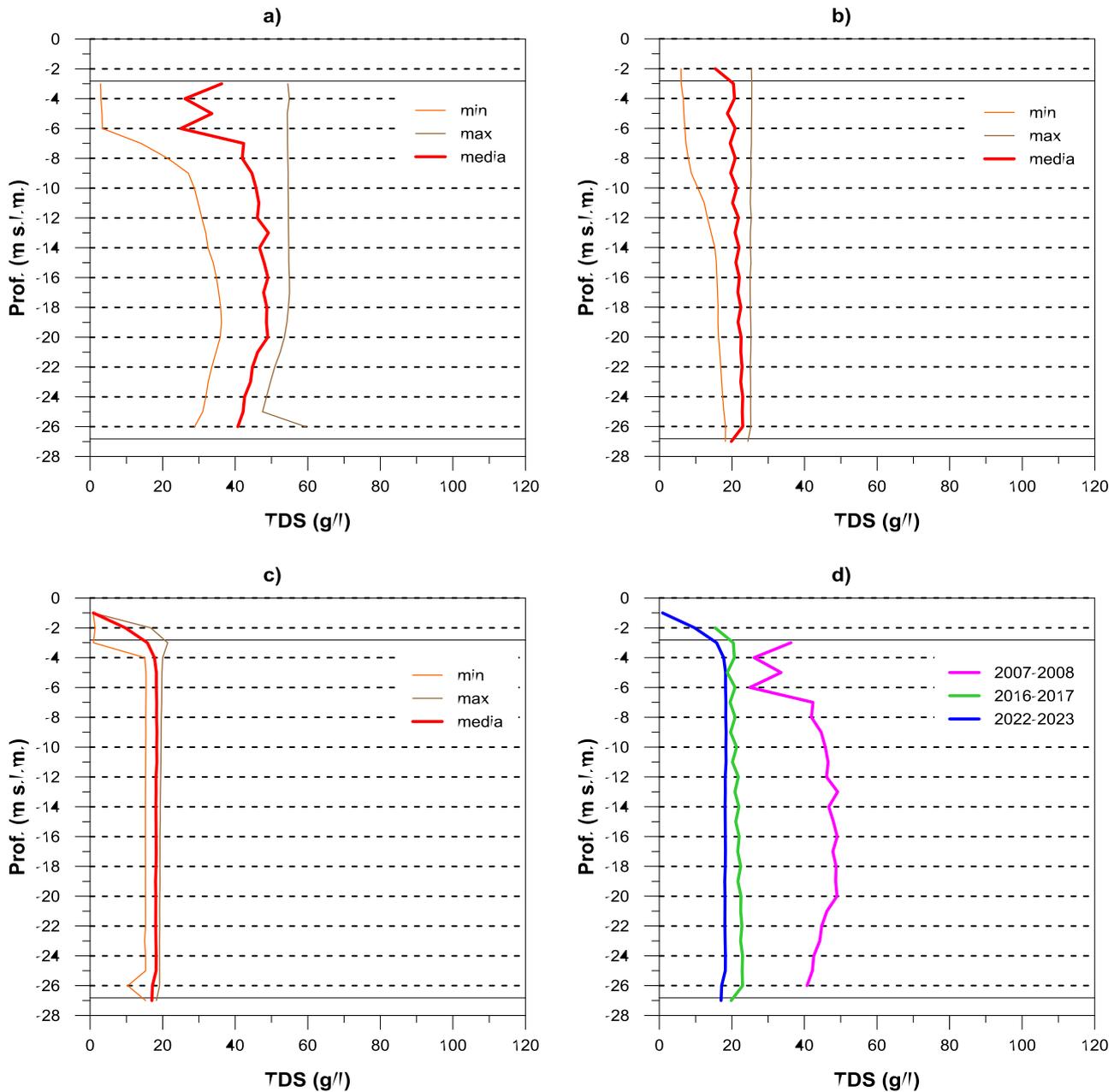


Figura 3.53. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro NP1: a) nel 2007-2008, b) nel 2016-2017, c) nel 2022-2023 e d) confronto tra l'andamento dei valori medi di tutti i periodi di monitoraggio disponibili; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.

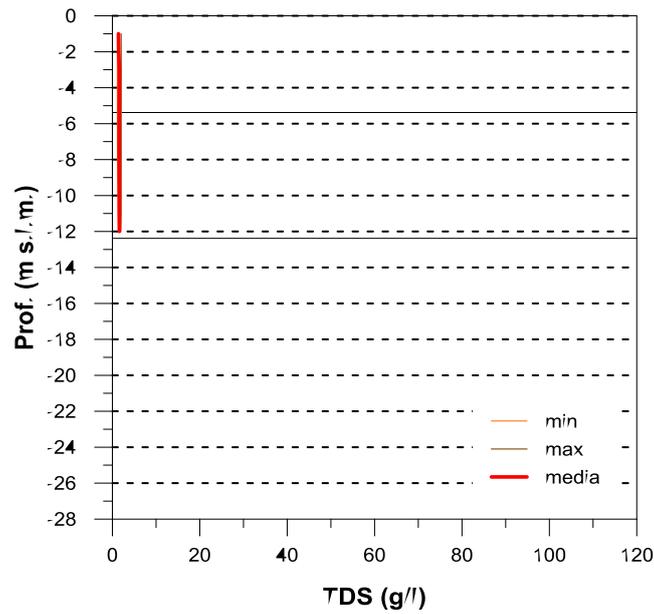


Figura 3.54. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZS7 durante il monitoraggio ante-opera del 2005-2006; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.

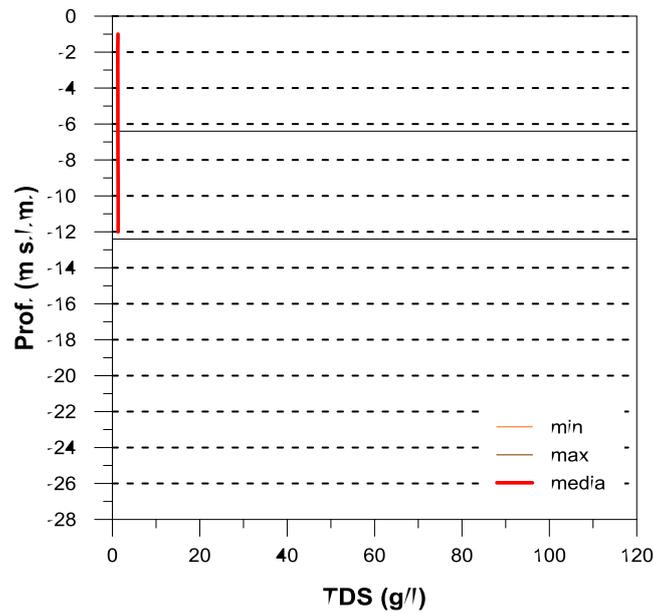


Figura 3.55. Sintesi dei log di salinità realizzati nel piezometro PZS9 durante il monitoraggio ante-opera del 2005-2006; le linee nere orizzontali individuano l'inizio e la fine del tratto filtrato.

3.7 Acque del lago

3.7.1 Stazione di monitoraggio fissa

Presso la stazione di monitoraggio fissa denominata Lago pontile (ubicazione planimetrica in Figura 3.1, fotografia in Figura 3.5) sono stati monitorati in continuo il livello idrometrico del lago, la T e la SpCE dell'acqua con frequenza di acquisizione oraria, dal 27/04/2022 al 09/05/2023.

I dati di livello idrometrico del lago (in m s.l.m.) sono ricavati utilizzando la quota assoluta del punto di riferimento delle misure determinata con apposito rilievo topografico (testa in PVC del tubo piezometrico pari a -0.62 m s.l.m.).

In Figura 4.16 sono mostrate le serie dati acquisite alla stazione di monitoraggio Lago pontile:

- a) livello idrometrico del lago (in m di profondità da b.f. del tubo pvc) e T dell'acqua rilevata dal sensore di livello;
- b) SpCE e T rilevate dal sensore di conducibilità.

La temperatura dell'acqua varia da un minimo di circa 6 °C, rilevato a febbraio 2023, ad un massimo di circa 30 °C, rilevato nei mesi di luglio e agosto 2022.

Le variazioni di SpCE sono limitate ad un range molto ristretto, che si estende da un minimo di 1.12 mS/cm, rilevato a febbraio 2023, ad un massimo di 2.22 mS/cm, rilevato a luglio-agosto 2022. Nonostante il range di variazione della SpCE sia veramente molto ridotto, è evidente la correlazione diretta tra temperatura e conducibilità e la correlazione inversa tra livello e conducibilità: in presenza di eventi di precipitazione e nelle stagioni più fredde il livello del lago aumenta e la concentrazione dei sali disciolti diminuisce; nelle stagioni più calde ed in assenza di precipitazioni il livello diminuisce, aumenta l'evaporazione e la concentrazione dei sali disciolti aumenta. Al netto di queste variazioni stagionali molto contenute, tutti i valori di SpCE sono rappresentativi di acque nettamente dolci. Si ricorda infatti che il limite di legge per le acque destinate al consumo umano è pari a 2.5 mS/cm a 20 °C (che corrisponde a 2.74 mS/cm a 25 °C).

In Figura 3.57 il livello idrometrico del lago è restituito in m s.l.m. e confrontato graficamente con il regime pluviometrico e termometrico rilevato alle stazioni di Final di Rero e Guagnino (dati illustrati al capitolo 3.3). Il livello idrometrico varia da un minimo di -2.44 m s.l.m. ad un massimo di -1.82 m s.l.m. nel periodo di monitoraggio.

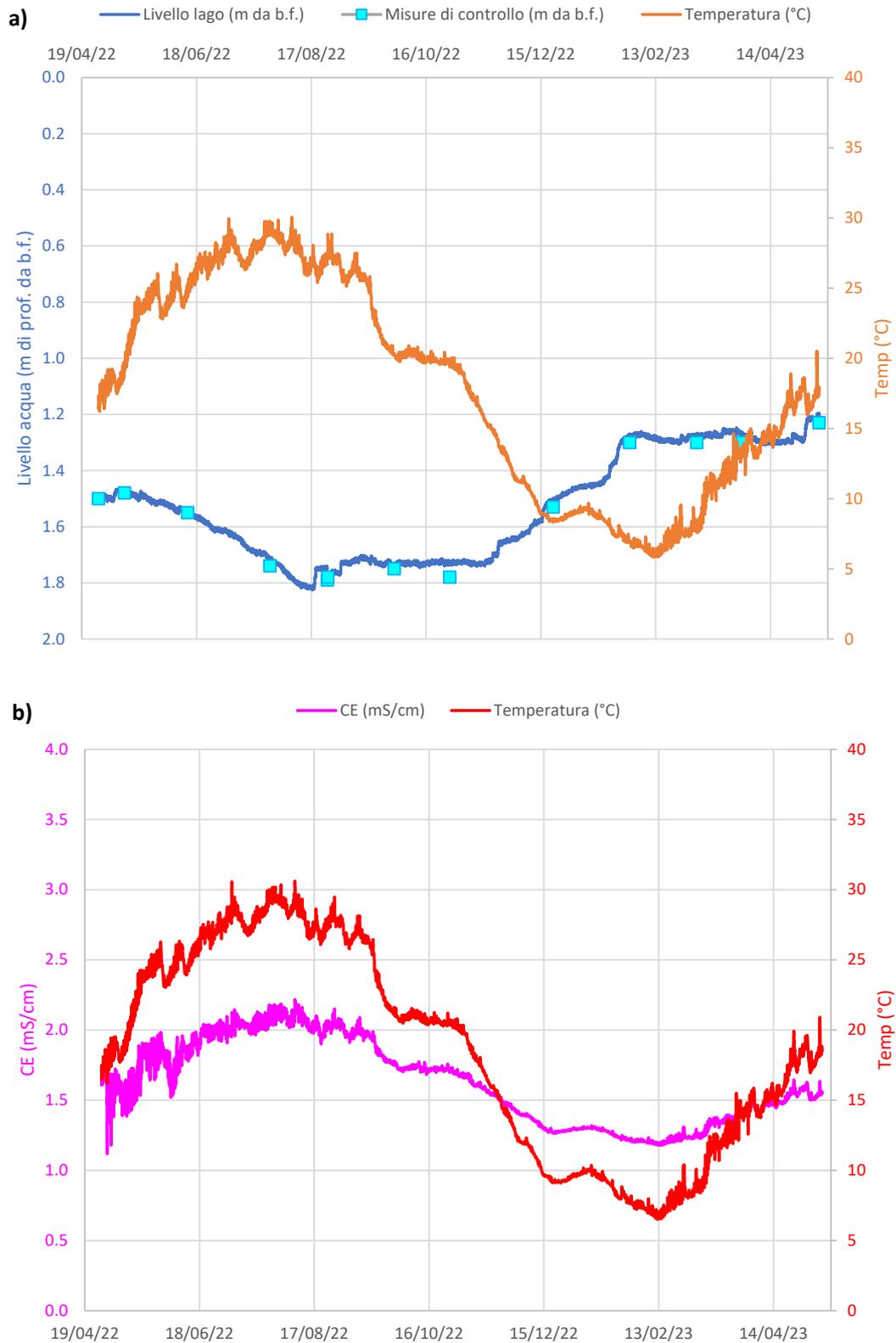


Figura 3.56. Serie dati acquisite presso la stazione Lago pontile: a) livello idrometrico del lago (in m di profondità da b.f. del tubo pvc) e temperatura dell'acqua rilevata dal sensore di livello; b) conducibilità elettrica specifica a 25 °C e temperatura rilevate dal sensore di conducibilità.

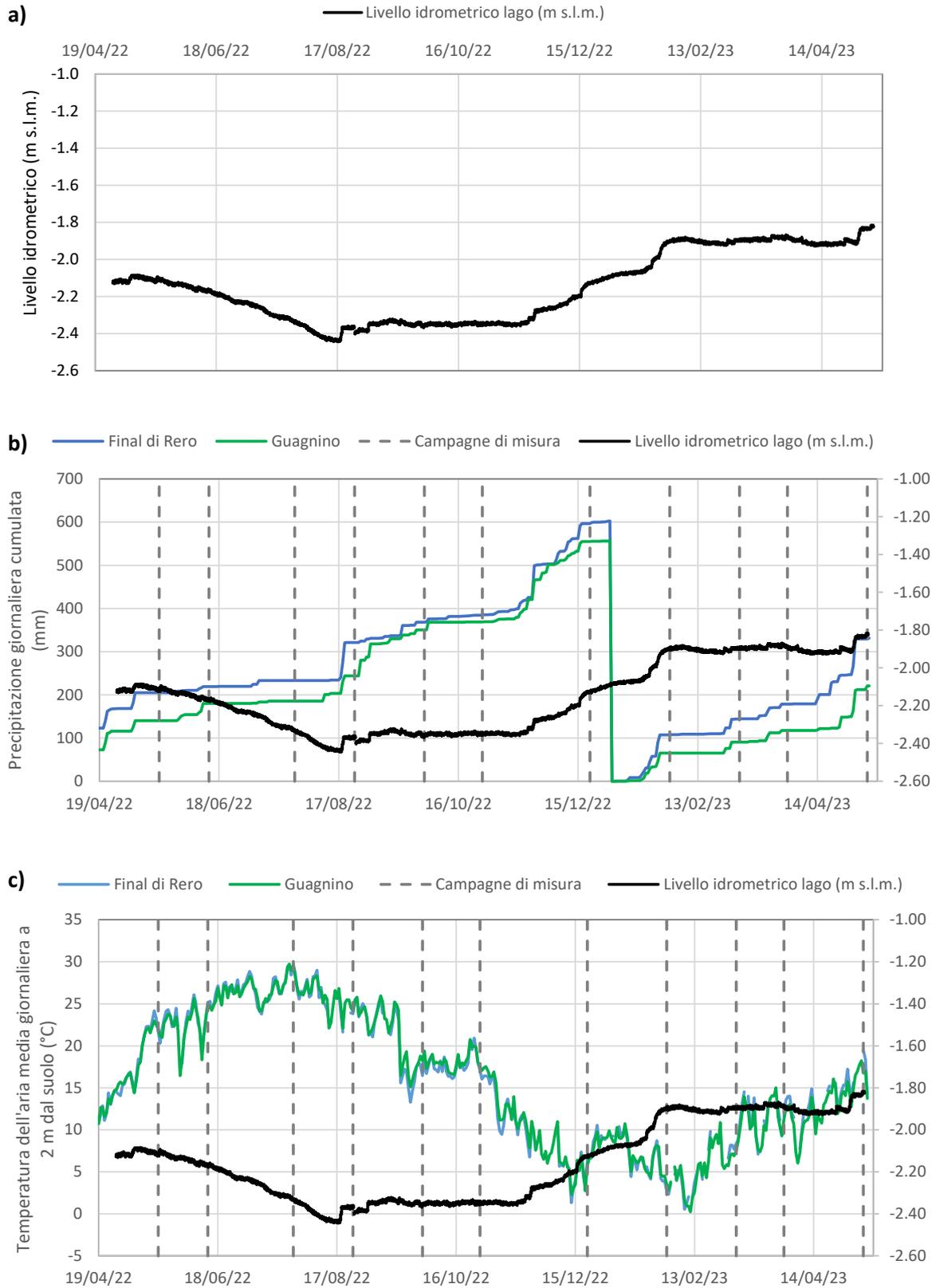


Figura 3.57. a) Livello idrometrico del lago (in m s.l.m.); b) confronto con il regime pluviometrico; c) confronto con il regime termometrico.

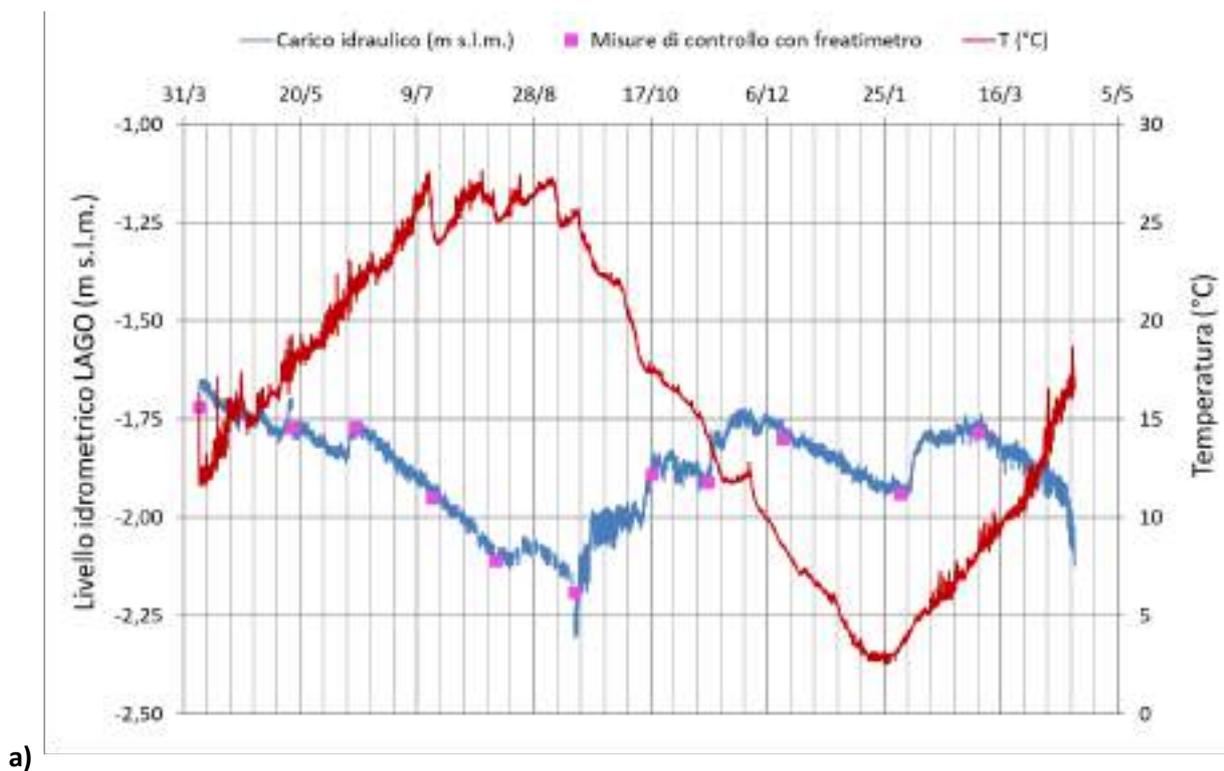
3.7.1.1 Confronto con i precedenti monitoraggi

Si riportano, a titolo di confronto, i risultati del monitoraggio in continuo del lago di cava realizzati negli anni 2016-2017 (Figura 3.58) e tra il 2008 e il 2009 (Figura 3.60), entrambi monitoraggi in corso d'opera.

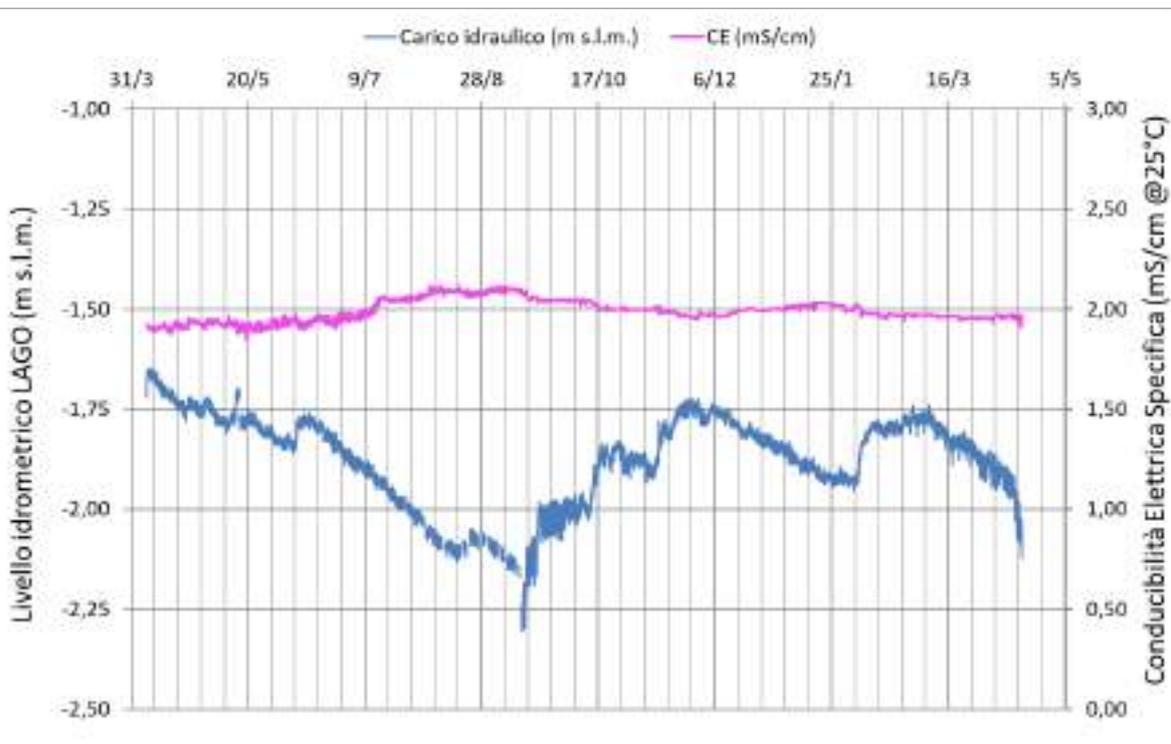
Negli anni 2016-2017 il livello idrometrico varia da un massimo di -1.65 m s.l.m. rilevato ad inizio monitoraggio (primavera 2016) ad un minimo di -2.31 m s.l.m. rilevato nel periodo di magra (settembre 2016), con un valore medio di -1.87 m s.l.m.: nel periodo compreso tra questi due valori si osserva la fase di recessione estiva, ossia la progressiva discesa del livello idrometrico legato all'aumento delle temperature ed all'assenza di eventi piovosi rilevanti. Poi, da settembre a dicembre 2016 si registra la fase di ricarica del sistema legata alle precipitazioni autunnali; ed infine una nuova fase di recessione invernale causata dall'estrema siccità verificatasi in tali mesi, ed interrotta solo da alcuni eventi meteorici non particolarmente significativi.

La temperatura dell'acqua varia da un minimo di 2.5 °C rilevato a fine gennaio ad un massimo di 27.6 °C rilevato a metà luglio, con analoghi valori rilevati anche nel mese di agosto. La temperatura media annua risulta pari a 15.7 °C; la massima escursione termica annuale è di circa 25 °C.

Le variazioni di SpCE sono limitate ad un range molto ristretto, che si estende da un minimo di 1.85 mS/cm ad un massimo di 2.12 mS/cm, con un valore medio pari a 1.99 mS/cm, tutti valori rappresentativi di acque marcatamente dolci.



a)



b)

Figura 3.58. Monitoraggio in continuo alla stazione Lago pontile negli anni 2016-2017: a) livello idrometrico e temperatura e b) livello idrometrico e conducibilità elettrica specifica (da CFR per Società Cantoniera Cavallara, 2017).

Nel settembre 2007 l'inizio dell'attività estrattiva ha coinciso con l'asportazione del cappellaccio superficiale da una porzione del primo lotto autorizzato e questo ha favorito da subito la messa a giorno delle acque sotterranee e la nascita di un lago artificiale. Il monitoraggio del lago è iniziato il 18/02/2008, in un momento in cui su alcune porzioni del primo lotto era già stata raggiunta la profondità di 7 m da p.c.; al novembre 2008 il bacino copriva complessivamente una superficie di circa 21595 m² (Figura 3.59), per un totale di 86000 m³ estratti.

Dall'andamento del livello idrometrico (Figura 3.60a) si ricavava che, a seguito del progressivo aumento della superficie e del volume interessati dallo scavo, il lago iniziava ad assumere una dinamica coincidente con quella del sistema idrogeologico. I livelli massimo, minimo e medio registrati nel periodo di monitoraggio sono stati, rispettivamente: -1.29 m s.l.m., -2.32 m s.l.m. e -1.89 m s.l.m., a cui corrisponde un'escursione tra massimo e minimo di 1.03 m.

La temperatura registrata (Figura 3.60a) era chiaramente influenzata dalle condizioni atmosferiche, in misura leggermente superiore a quella rilevata nel 2016-2017 perché il sensore si trovava a profondità minore (-2.44 m s.l.m. nel 2008 contro i -5 m s.l.m. del 2016); le temperature massima, minima e media registrate nel periodo di monitoraggio sono state, rispettivamente: 30.1 °C, 1.5 °C e 15.6 °C, da cui deriva un'escursione tra massimo e minimo di 28.6 °C.

Anche la SpCE, inizialmente, risentiva delle dimensioni del bacino e soprattutto delle attività connesse all'escavazione (Figura 3.60b). L'escavazione attraverso il dragaggio, infatti, comporta la mobilitazione di una parte della matrice fine presente nella sabbia: questo può influire direttamente sulla torbidità delle acque del lago e, indirettamente, sulla sua SpCE, soprattutto in bacini di piccole dimensioni. A partire da giugno 2008, l'aumento delle dimensioni del lago e le intense precipitazioni del periodo rendevano più stabile la misura della SpCE, che iniziava progressivamente ad assestarsi attorno ai 2.2 mS/cm, valore caratteristico delle acque sotterranee in quest'area. I valori di SpCE massimo, minimo e medio registrati sono stati, rispettivamente: 2.87 mS/cm, 1.42 mS/cm e 2.18 mS/cm, da cui deriva un'escursione tra massimo e minimo di 1.45 mS/cm.

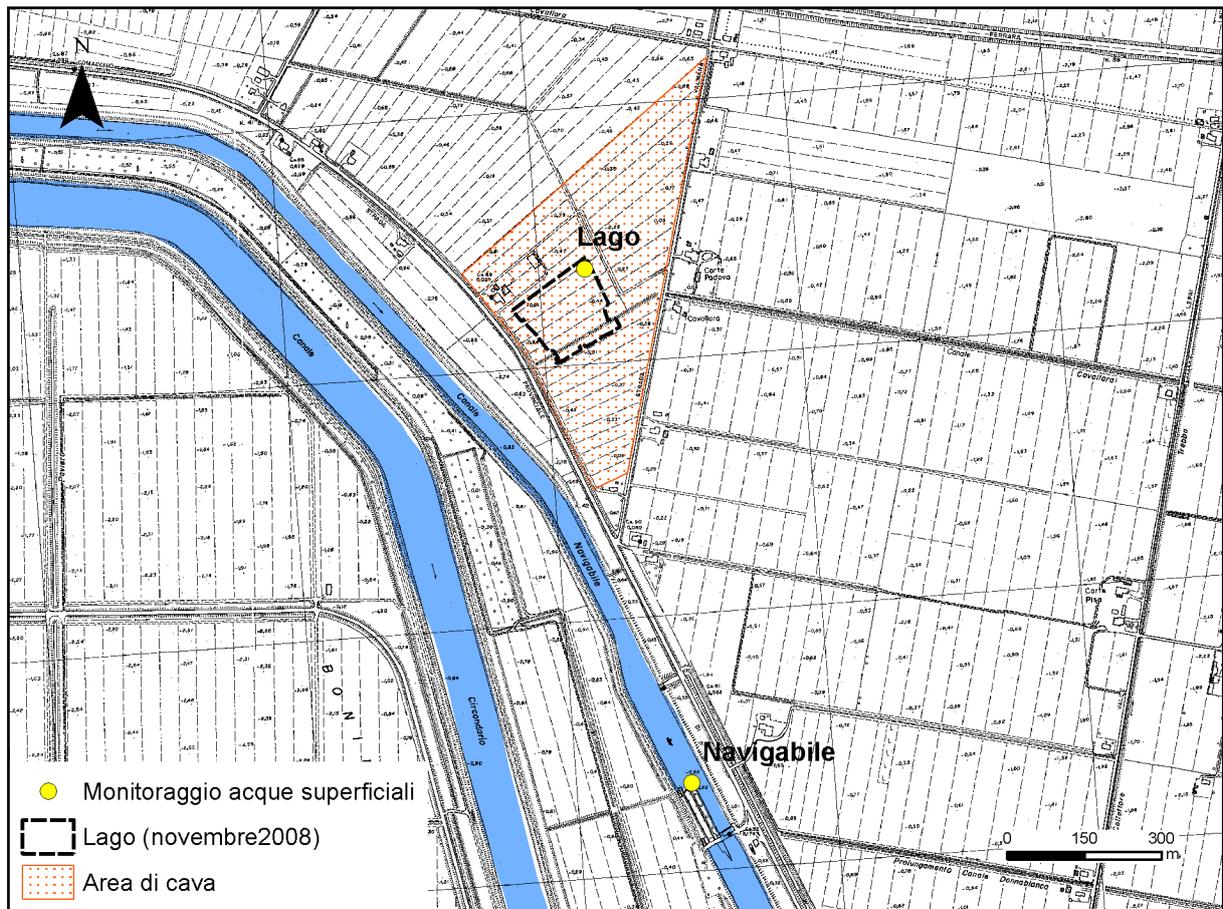


Figura 3.59. Ubicazione della stazione di monitoraggio del lago nel 2008-2009 (da CFR per Società Cantoniera Cavallara, 2009).

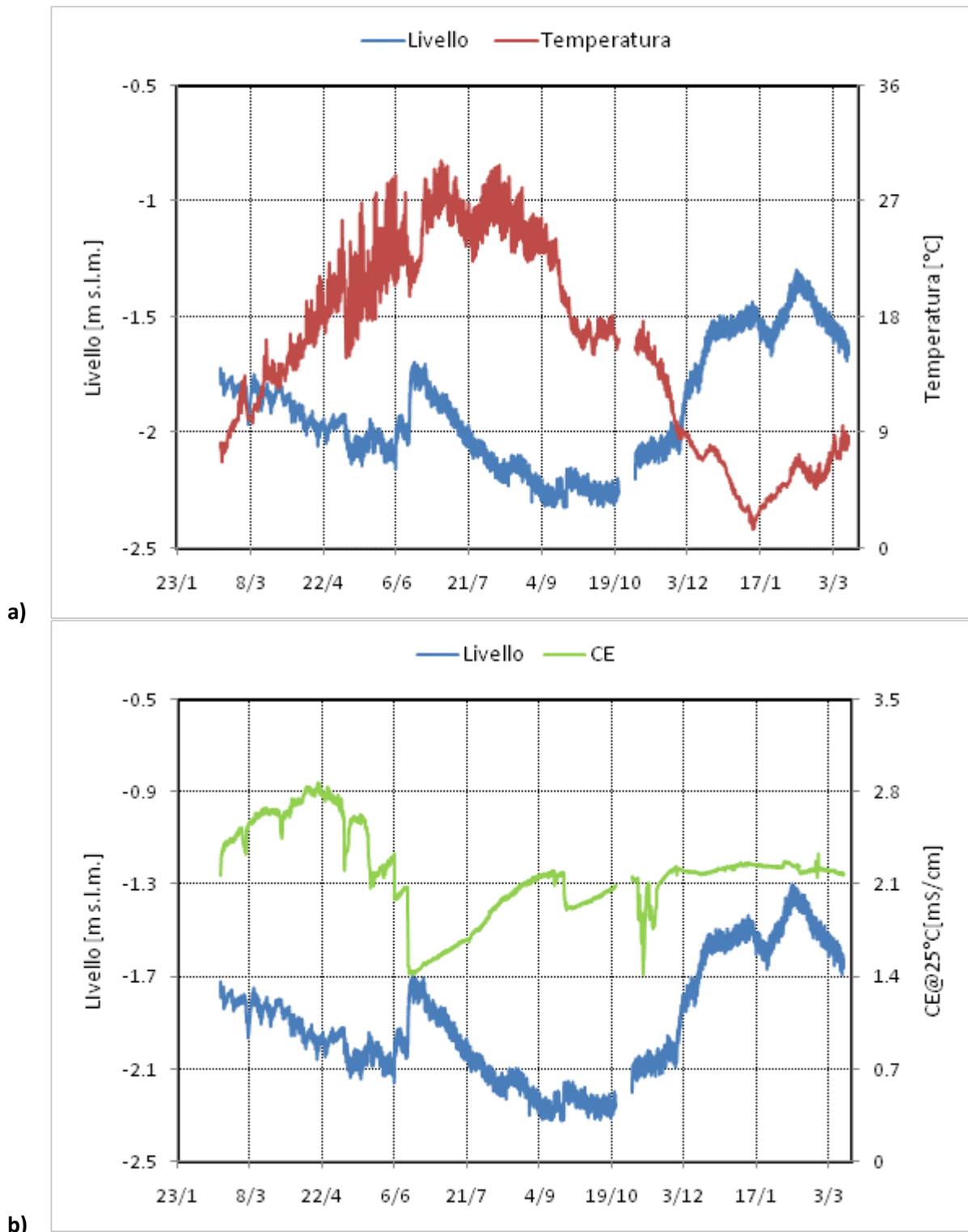


Figura 3.60. Andamento del livello idrometrico orario e a) temperatura e b) SpCE misurati presso il lago di cava dal 18/02/2008 al 12/03/2009 (da CFR per Società Cantoniera Cavallara, 2009).

3.7.2 Logs CT nel lago

Al fine di verificare l'eventuale stratificazione della salinità nelle acque del lago, ad integrazione e verifica di quanto rilevato in continuo presso la stazione di monitoraggio Lago pontile, periodicamente sono stati effettuati rilievi della salinità in posizioni interne al corpo idrico superficiale, utilizzando una piccola imbarcazione a motore. I rilievi sono stati effettuati nelle date del 13/06/2022, 28/10/2022, 30/01/2023 e 09/05/2023. L'ubicazione planimetrica dei logs è mostrata in Figura 3.61. I risultati sono presentati graficamente nelle seguenti figure:

- Figura 3.62: rilievo del 13/06/22 (campagna 3, C03);
- Figura 3.63: rilievo del 28/10/2022 (campagna 7, C07);
- Figura 3.64: rilievo del 30/01/2023 (campagna 9, C09);
- Figura 3.65: rilievo del 09/05/2023 (campagna 12, C12).

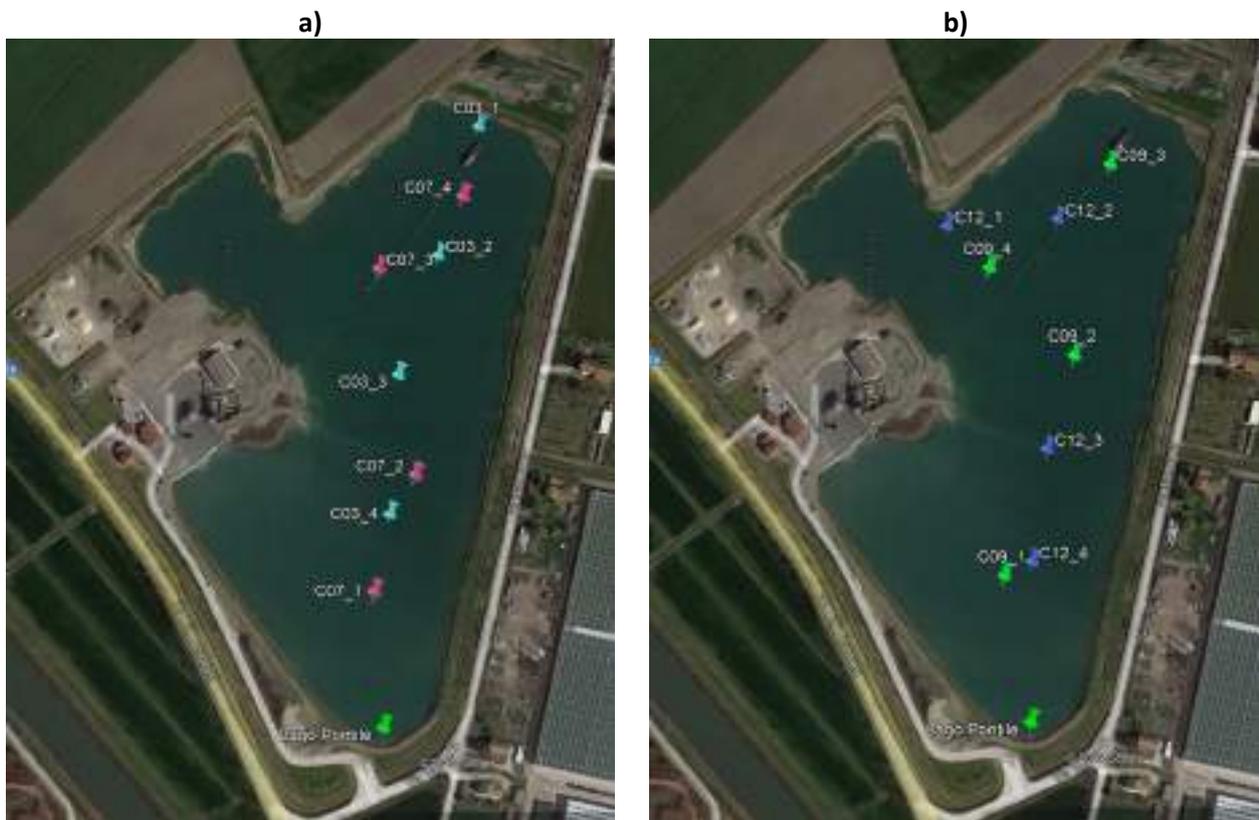


Figura 3.61. Ubicazione planimetrica dei logs CT eseguiti nel lago a) nel 2022 e b) 2023.

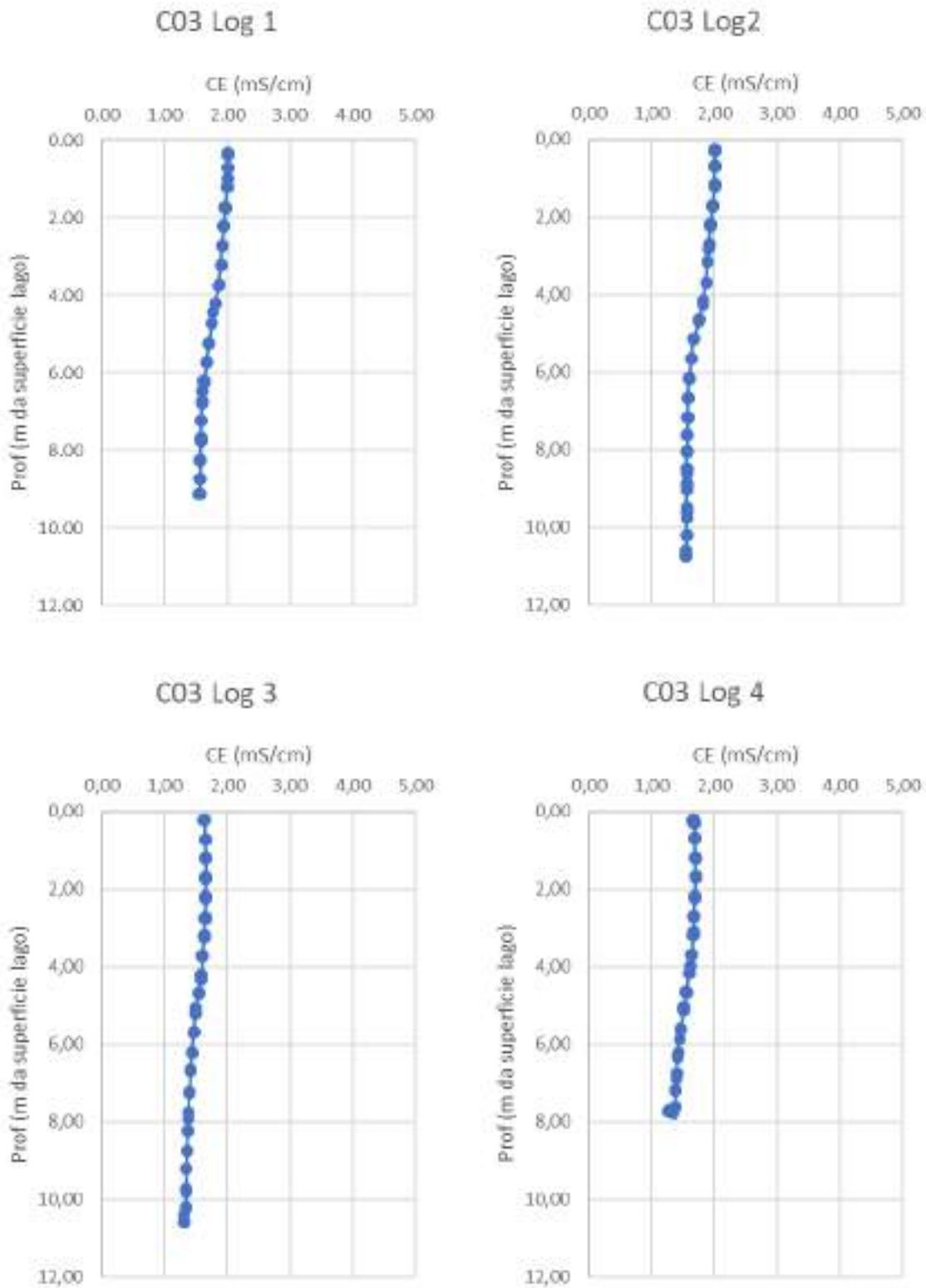


Figura 3.62. Logs CT eseguiti nel lago in data 13/06/2022 (campagna 3).

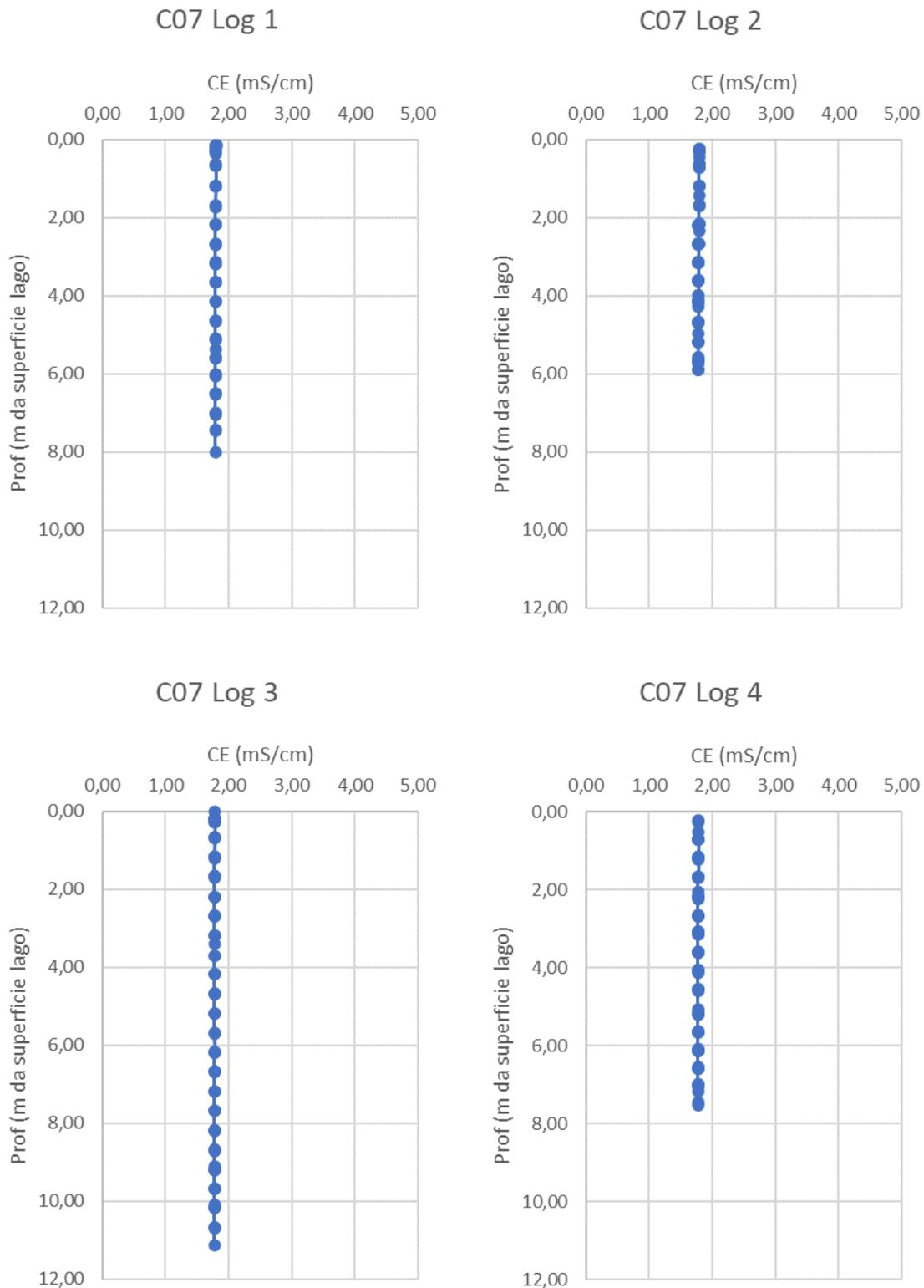


Figura 3.63. Logs CT eseguiti nel lago in data 28/10/2022 (campagna 7).

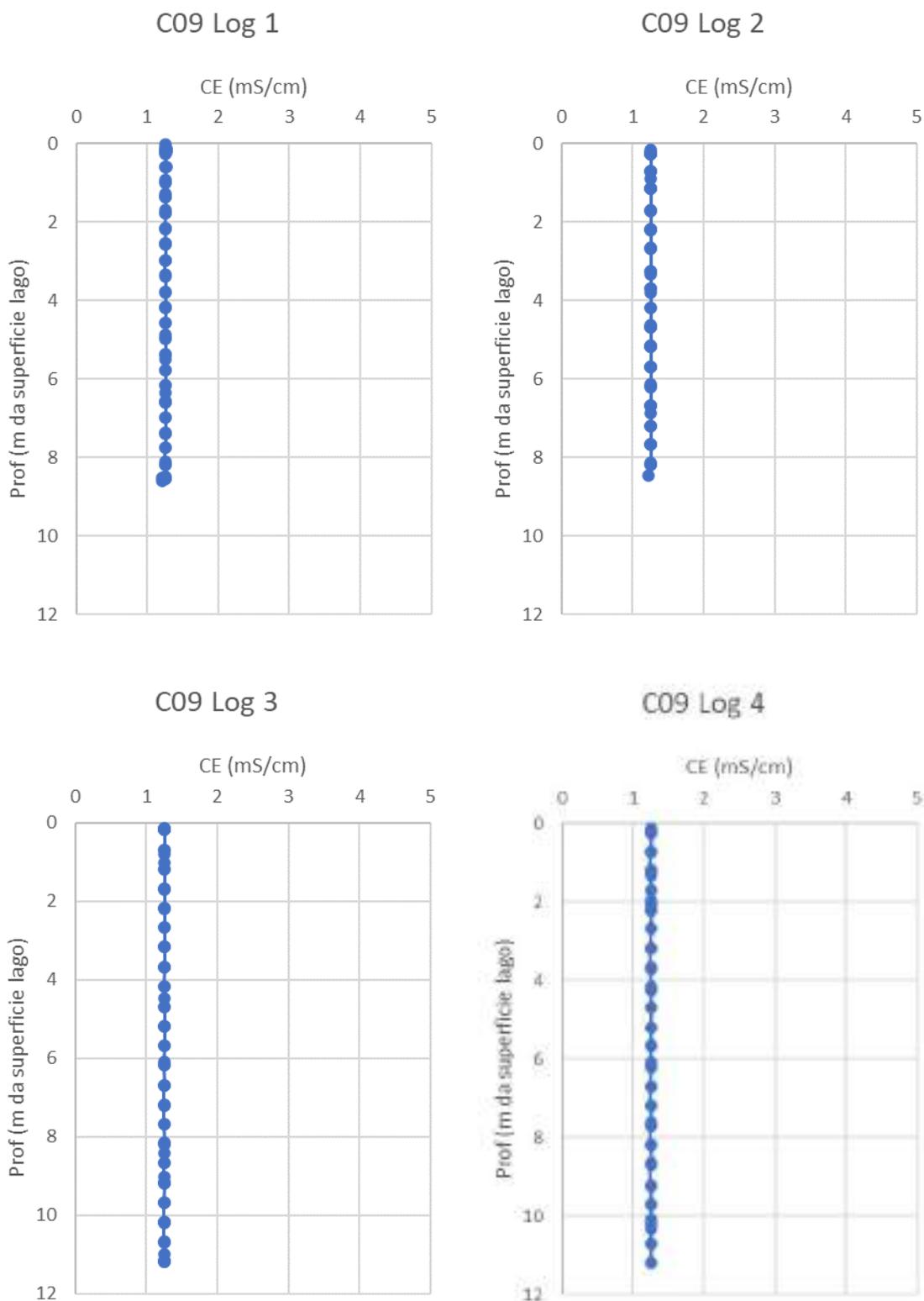


Figura 3.64. Logs CT eseguiti nel lago in data 30/01/2023 (campagna 9).

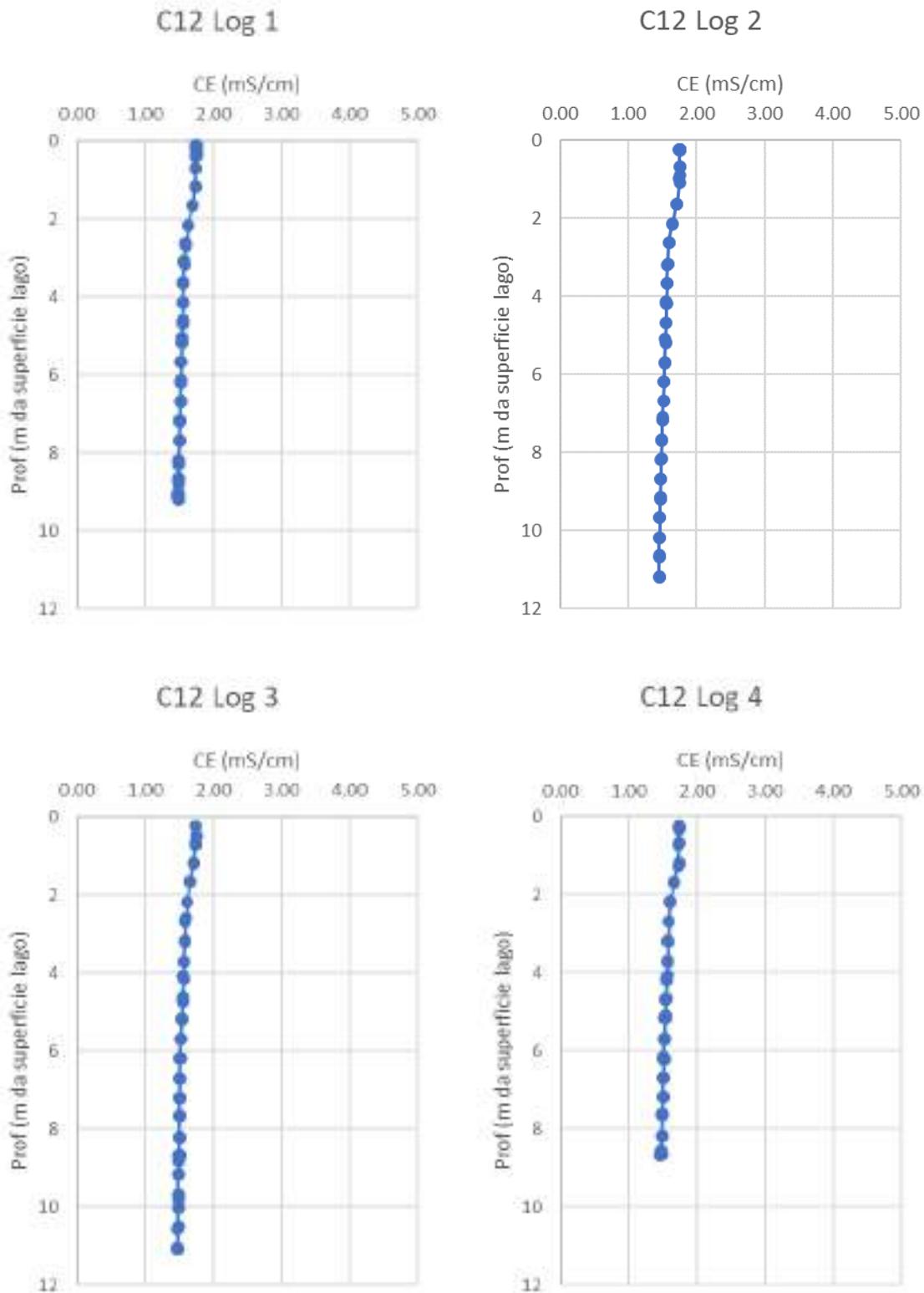


Figura 3.65. Logs CT eseguiti nel lago in data 09/05/2023 (campagna 12).

Tutti i logs rilevano valori di SpCE inferiori o al massimo pari a 2.00 mS/cm; a giugno 2022 e maggio 2023 si osserva un modestissimo gradiente di concentrazione dall'alto verso il basso, mentre ad ottobre 2022 e gennaio 2023 la salinità risulta costante su tutta la verticale del corpo d'acqua.

In Tabella 4.4 è presentato un riepilogo dei dati acquisiti: per ogni log è riportata la SpCE mediata sull'intera verticale acquisita ed espressa in mS/cm (unità di misura dello strumento); per ogni campagna è calcolato il valore medio dei precedenti 4 valori, che si può considerare rappresentativo della salinità media del lago in quel momento.

Campagna	3	7	10	12
Data	13/06/2022	28/10/2022	30/01/2023	09/05/2023
SpCE (mS/cm)				
Log1	1.75	1.80	1.26	1.60
Log2	1.71	1.79	1.26	1.58
Log3	1.49	1.78	1.25	1.55
Log4	1.55	1.78	1.25	1.57
Media lago	1.62	1.79	1.26	1.58

Tabella 3.5. SpCE delle acque del lago: valori mediati sulla verticale di ogni log e valori medi del lago per le quattro campagne.

3.7.2.1 Confronto con i precedenti monitoraggi

Durante i monitoraggi degli anni 2016-2017 questi rilievi sono stati effettuati nelle date del 23/02/2016, 17/10/2016 e 02/05/2016, sulle posizioni presentate nella planimetria di Figura 3.66. In Figura 3.67 sono riportate le restituzioni grafiche. Si rileva una distribuzione omogenea della salinità sia sulla verticale del corpo d'acqua, che nelle diverse aree del lago. Le variazioni stagionali sono praticamente nulle: la SpCE media sulla verticale risulta pari a 2.06 mS/cm per il primo rilievo, 2.05 mS/cm per il secondo e 2.00 mS/cm per il terzo.

Per comparazione in Figura 3.68 sono presentati anche i logs CT eseguiti nelle acque del lago durante il monitoraggio del 2008 (in data 05/05/2008): anch'essi rilevavano valori di circa 2.20 mS/cm ed una distribuzione omogenea della salinità lungo la verticale.

La situazione attuale del lago risulta quindi invariata rispetto al 2008, dopo 9 anni di attività che hanno visto aumentare progressivamente areale e volumetria di scavo.

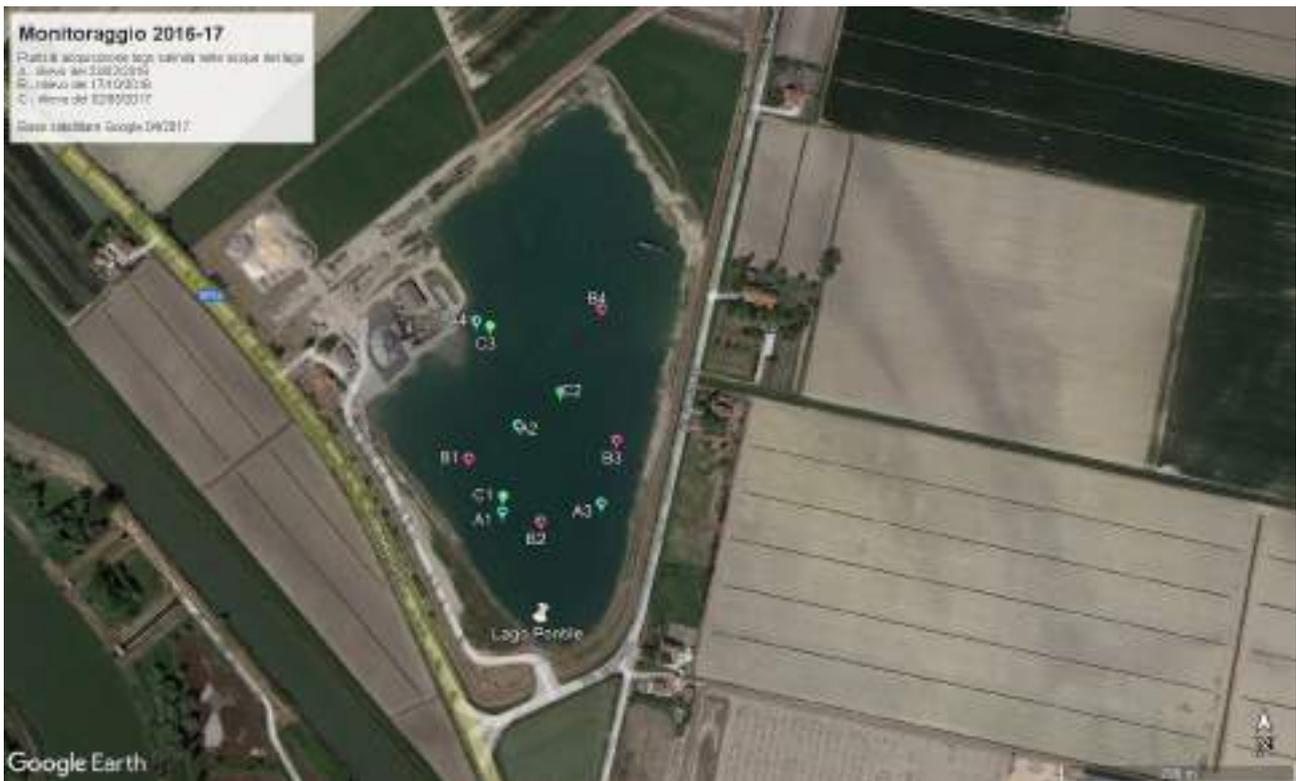


Figura 3.66. Ubicazione planimetrica dei logs CT eseguiti nel lago durante i monitoraggi del 2016-2017.

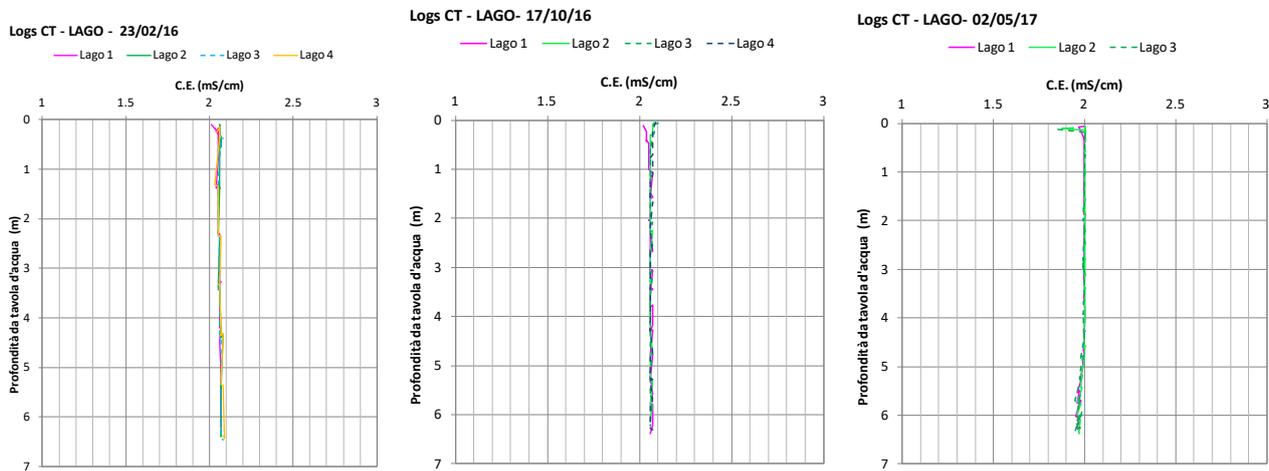


Figura 3.67. Logs CT eseguiti nel lago durante i monitoraggi del 2016-2017.

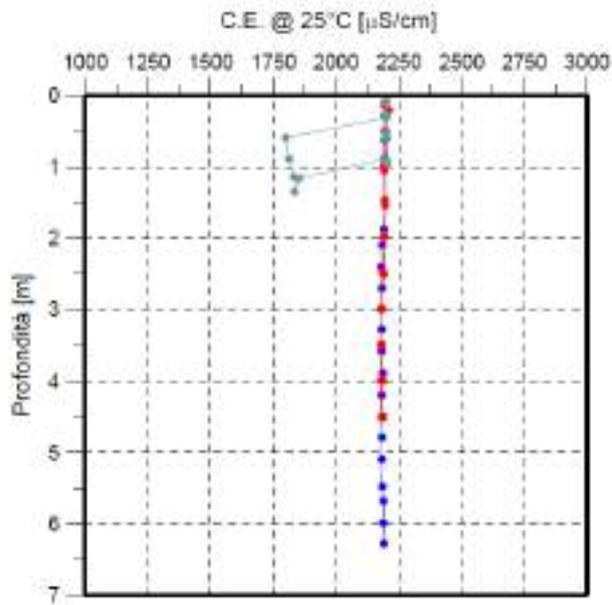


Figura 3.68. Logs CT eseguiti presso nel lago in data 05/05/2008.

4 Dati meteorologici ed idrometrici

4.1 Dati meteorologici

La strategia di simulazione utilizzata in CFR per Cantoniera Cavallara (2009) per riprodurre gli effetti del lago di cava ha richiesto la caratterizzazione dei regimi pluviometrico e termometrico dell'area di studio. Questi dati sono stati utilizzati per stimare i valori da associare alle condizioni al contorno che simulano l'infiltrazione delle acque meteoriche, la ricarica e l'evaporazione verso e dalla superficie del lago.

L'implementazione di nuovi scenari previsionali richiede la verifica del regime termo-pluviometrico, soprattutto in relazione ai cambiamenti climatici in atto. Per questa ragione sono stati acquisiti, attraverso il portatile del Sistema nazionale per la raccolta, l'elaborazione e la diffusione di dati Climatici di Interesse Ambientale (SCIA) dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), i dati di precipitazione mensile (P_m) e temperatura atmosferica media mensile ($T_{a,m}$) registrati presso la stazione di Guagnino nel periodo 1962-2022 (61 anni). La stazione di Guagnino, gestita dal Servizio Idro-Meteo-Clima di ARPAE, si trova ad una quota di 1 m s.l.m. e dista circa 10 km dal lago di cava (Figura 4.1). Tra le stazioni vicine all'area di studio, quella di Guagnino è risultata la stazione con le serie temporali più lunghe e complete ed è già stata utilizzata come riferimento per la precipitazione in CFR per Cantoniera Cavallara (2009) e per l'analisi dei dati di monitoraggio acquisiti per il presente studio (Par. 3.3). Nonostante ciò per ricostruire i dati mancanti è stato necessario acquisire anche le precipitazioni mensili delle stazioni: Idrovora di Guagnino e Codigoro e le temperature medie mensili delle stazioni di: Codigoro, Lavezzola e Sellarino-Voghiera per il periodo 1962-2022 (Figura 4.1 e Tabella 4.1). Questo perché non è disponibile una stazione priva di lacune nell'intervallo temporale considerato.

Preliminarmente alla ricostruzione dei dati mancanti, attraverso il coefficiente di correlazione di Pearson (Davis, 2002), è stata valutata la forza e la direzione dell'eventuale relazione lineare tra i valori di P_m e $T_{a,m}$ acquisiti presso le stazioni sopraelencate. Il coefficiente di Pearson (r) calcolato tra due variabili x e y è dato da:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

dove x_i ed y_i sono i valori delle variabili e \bar{x} e \bar{y} sono i rispettivi valori medi. Nella pratica si possono distinguere vari tipi di correlazione:

- diretta o positiva se $r > 0$;
- inesistente se $r = 0$;
- inversa o negativa se $r < 0$.

Inoltre la correlazione diretta è definita:

- debole quando $0 < r < 0.3$;
- moderata se $0.3 < r < 0.7$;
- forte se $r > 0.7$.

I dati di P_m e T_{a_m} mancanti nelle serie della stazione di Guagnino sono stati ricostruiti attraverso delle funzioni lineari tra le serie delle stazioni disponibili. I parametri delle rette di regressione sono stati individuati attraverso l'applicazione del metodo dei minimi quadrati, in Microsoft Excel, e dall'analisi del coefficiente di determinazione (R^2). Nel caso della regressione lineare semplice, cioè tra due variabili, R^2 è pari al quadrato del coefficiente di correlazione di Pearson e la bontà dell'adattamento è tanto migliore quanto più l'indice si avvicina ad 1.

Le matrici di correlazione di Figura 4.2 mostrano che la correlazione tra i valori di P_m e T_{a_m} delle stazioni considerate è sempre diretta e forte. Le rette di regressione relative a P_m per le coppie di stazioni Idrovora Guagnino - Guagnino e Codigoro - Guagnino sono presentate in Figura 4.3, mentre quelle relative a T_{a_m} per coppie di stazioni Codigoro - Guagnino, Lavezzola - Guagnino e Sellarino-Voghiera - Guagnino, invece, sono visualizzabili in Figura 4.4. Come anticipato dalla matrice di correlazione, i valori di R^2 derivati dai fittaggi di T_{a_m} sono maggiori rispetto a quelli di P_m , con l'eccezione, data la vicinanza delle stazioni, della coppia Idrovora di Guagnino – Guagnino. In Figura 4.4 è mostrato l'andamento dei valori mensili e annui della precipitazione cumulata e della temperatura media della stazione di Guagnino a seguito della ricostruzione dei dati mancanti, mentre in Tabella 4.2 sono riepilogati i valori medi ogni 10 anni e su tutto il periodo considerato. La precipitazione media registrata alla stazione di Guagnino nel periodo 1962-2022 è di 643.03 mm, praticamente uguale a quella del decennio 2012-2022 pari a 643.84 mm. Per quanto riguarda la temperatura atmosferica, a partire dal decennio 1992-2002 si registra un progressivo incremento della temperatura media ogni 10 anni, che porta i valori degli ultimi due decenni al di sopra della media di riferimento rispettivamente di circa 0.5 ed 1.0 °C (Figura 4.6). I valori di precipitazione media ogni 10 anni, invece, oscillando attorno alla media di riferimento e non evidenziano alcuna tendenza significativa.

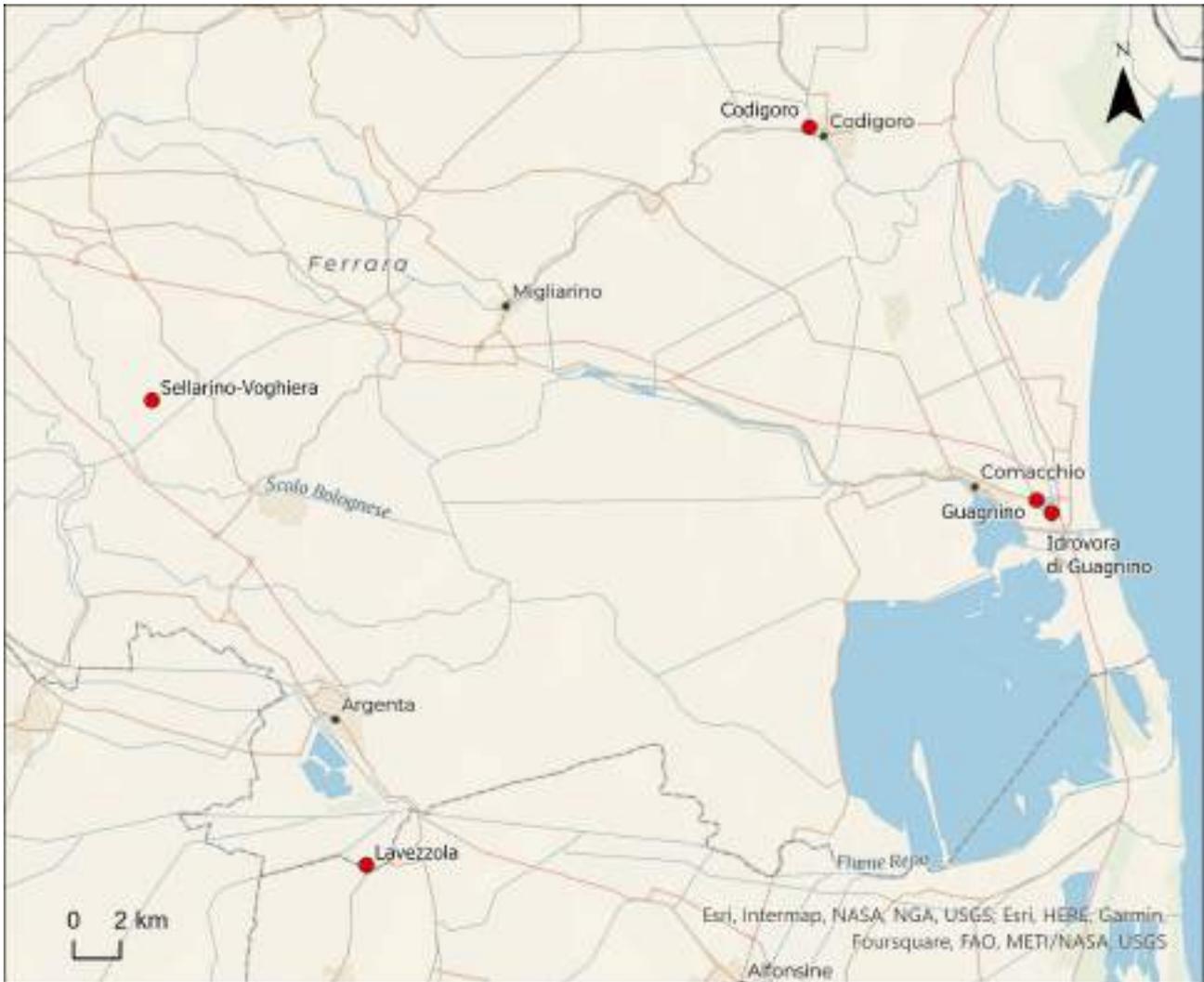


Figura 4.1. Ubicazione delle stazioni meteorologiche di Guagnino, idrovora di Guagnino, Codigoro, Lavezzola e Sellarino-Voghiera.

Stazione	Parametro	Long. (°)	Lat. (°)	Quota (m s.l.m.)	%P	%T
Guagnino	P _m -T _{am}	12.211590	44.688420	1	0.96	
Idrovora di Guagnino	P _m	12.219444	44.683333	1	55.74	
Codigoro	P _m -T _{am}	12.09771	44.83513	1	8.88	14.62
Lavezzola	T _{am}	11.846004	44.557756	5		60.66
Sellarino-Voghiera	T _{am}	11.74001	44.739250	3		73.22

Tabella 4.1. Caratteristiche delle stazioni meteorologiche utilizzate e percentuali delle lacune di registrazione della precipitazione (%P) e della temperatura (%T); longitudine (Long.) e latitudine (Lat.) sono nel sistema di riferimento WGS84.

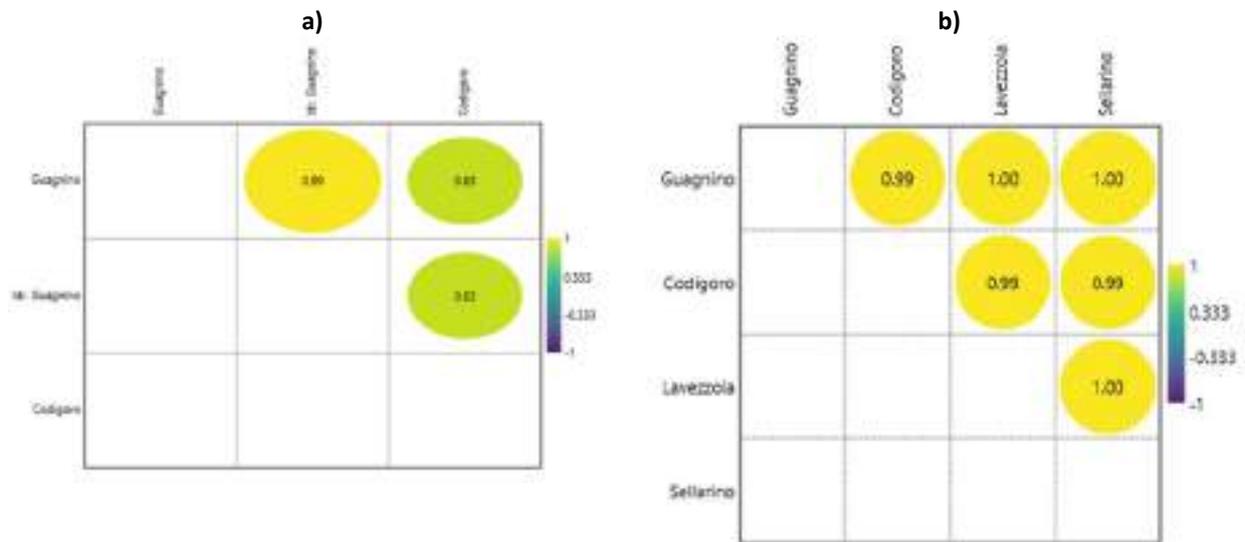


Figura 4.2. Matrice di correlazione dei valori di: a) precipitazione mensile nel periodo 1962-2022, per le stazioni di Guagnino, idrovora di Guagnino e Codigoro e b) temperatura media mensile nel periodo 1962-2022, per le stazioni di Guagnino, Codigoro, Lavezzola e Sellarino-Voghiera.

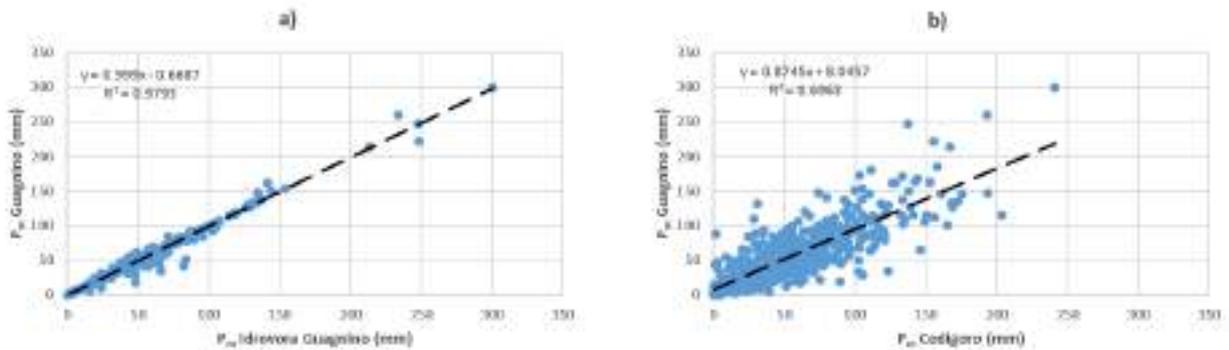


Figura 4.3. Scatter plot dei valori di P_m e rette di regressione per le coppie di stazioni di: a) Idrovora di Guagnino – Guagnino e b) Codigoro – Guagnino, nel periodo 1962-2022.

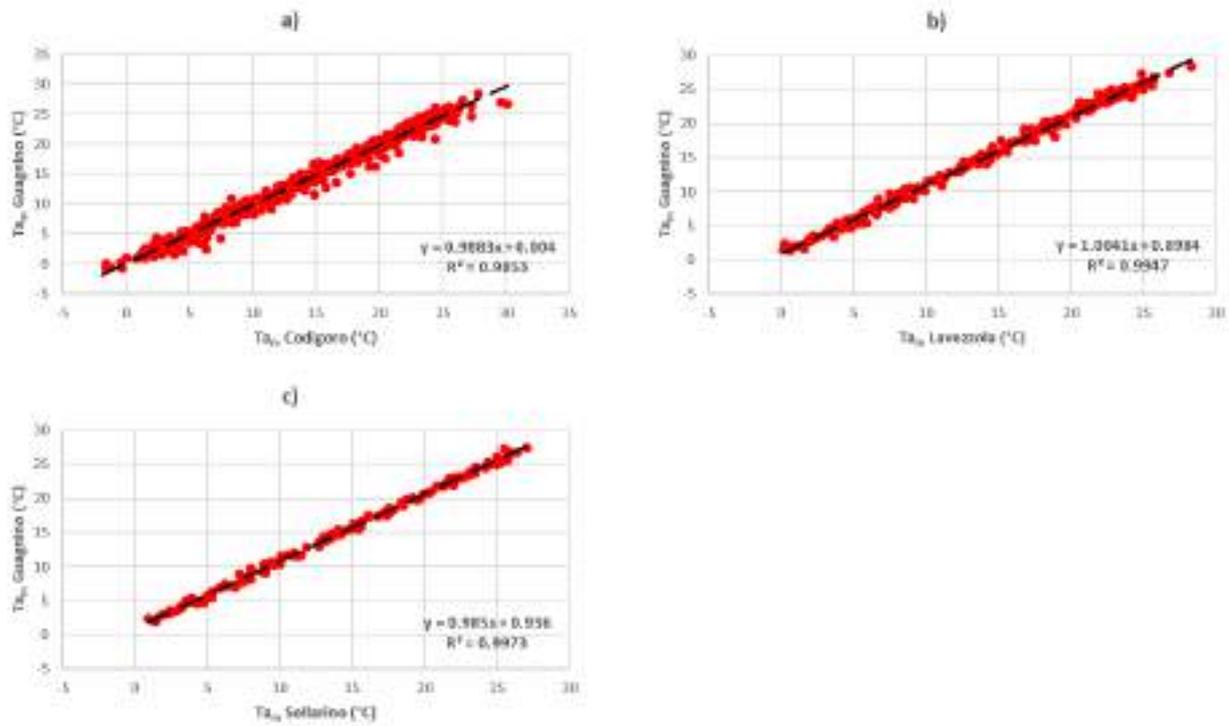


Figura 4.4. Scatter plot dei valori di T_m e rette di regressione per le coppie di stazioni di: a) Codigoro – Guagnino, b) Lavezzola – Guagnino e c) Sellarino-Voghiera - Guagnino, nel periodo 1962-2022.

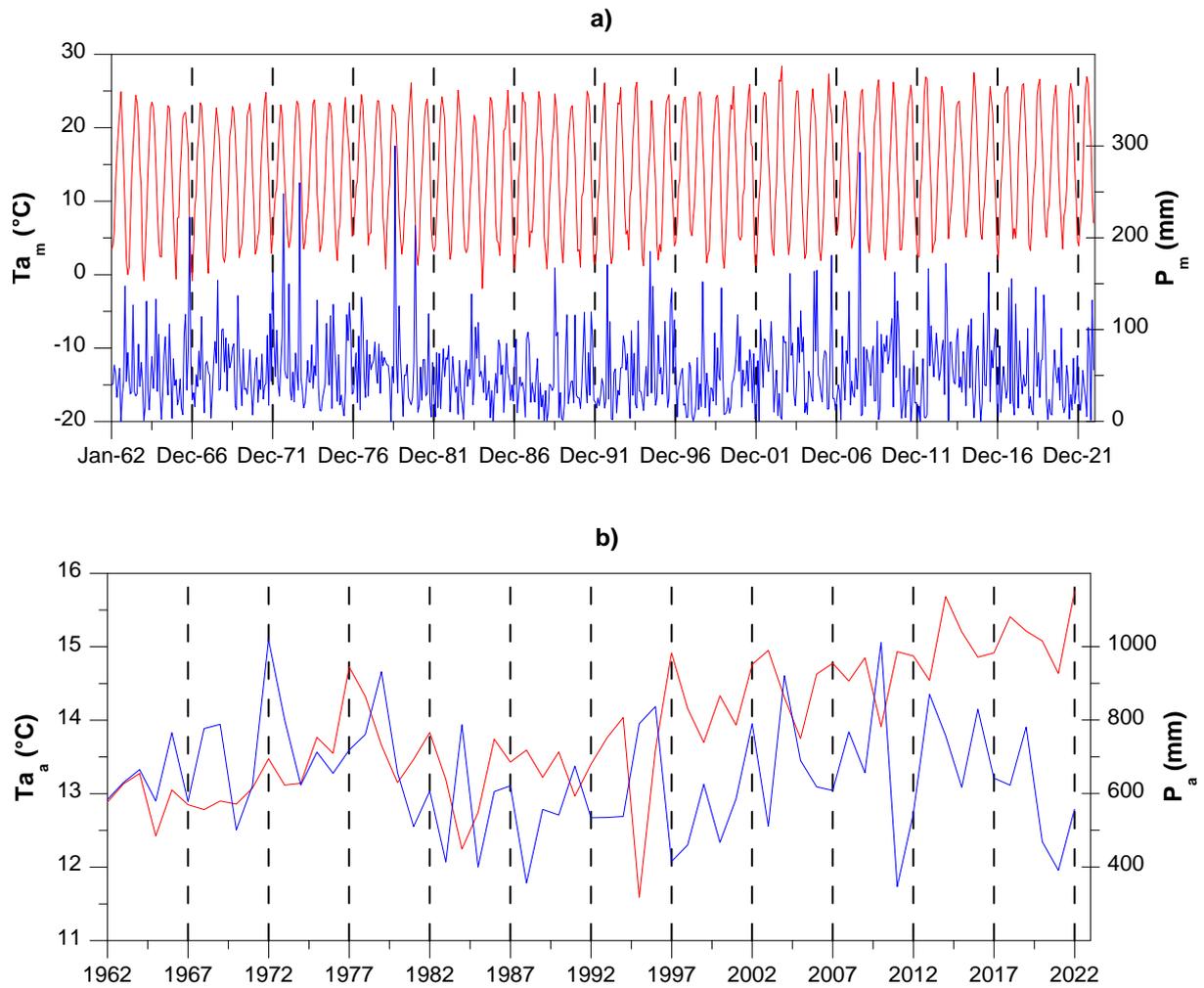


Figura 4.5. Andamento dei valori di precipitazione (in blu) e temperatura atmosferica (in rosso) della stazione di Guagnino nel periodo 1962-2022: a) valori mensili e b) valori annui.

Periodo	P _{10anni} (mm)	Ta _{10anni} (°C)
1962-2022	643.03	13.89
1962-1971	648.80	12.92
1972-1981	738.65	13.64
1982-1991	556.22	13.25
1992-2001	578.58	13.74
2002-2011	692.02	14.54
2012-2022	643.84	15.11

Tabella 4.2. Valori medi decennali di precipitazione e temperatura atmosferica registrati presso la stazione di Guagnino nel periodo 1962-2022.

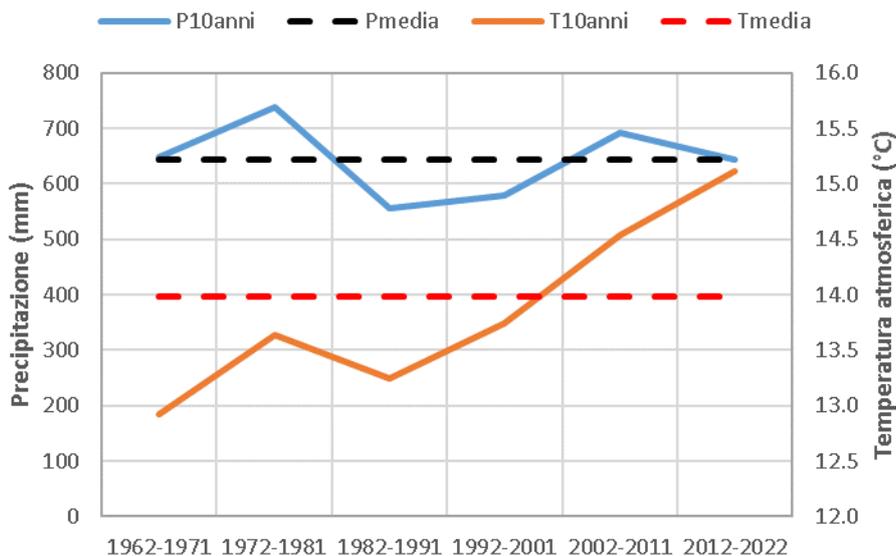


Figura 4.6. Confronto tra l'andamento dei valori medi decennali di precipitazione (linea blu continua) e temperatura atmosferica (linea arancione continua) ed i valori medi di precipitazione (linea nera tratteggiata) e temperatura atmosferica (linea rossa tratteggiata) del periodo 1062-2022 registrati presso la stazione di Guagnino.

4.1.1 Bilancio idrico del suolo

L'evapotraspirazione reale (E_r) è la quantità di acqua restituita all'atmosfera sotto forma di vapore, sia per evaporazione diretta che per traspirazione delle piante, e la sua intensità dipende prevalentemente dalla temperatura atmosferica, oltre che dalla disponibilità di acqua. E' chiaro che un aumento della temperatura può indurre un incremento di E_r provocando la conseguente diminuzione del quantitativo di acqua disponibile per l'infiltrazione ed il ruscellamento superficiale. La stima di E_r può essere realizzata attraverso il metodo proposto da Thornthwaite & Mather (1957), uno dei più noti e largamente usati in idrogeologia, oltre che per la sua relativa semplicità, anche per una vasta casistica che lo propone come affidabile per svariati ambienti climatici (Barazzuoli & Salleolini, 1993). Il metodo si basa sul calcolo dell'evapotraspirazione potenziale media mensile (Ep_m), che rappresenta la quantità di acqua disponibile per l'evapotraspirazione, nel caso in cui, in termini di bilancio idrico del suolo, ve ne fosse una disponibilità continua e sufficiente a sostenere il fenomeno. Ep_m è calcolata in base ad una relazione sperimentale che la lega alla temperatura media mensile (T), secondo:

$$Ep_m = J \cdot 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{T}{I}\right)^\beta$$

dove J è un coefficiente di correzione di latitudine riferito al mese i -esimo, pari al rapporto tra le ore diurne e la metà (12) delle ore giornaliere, I è l'indice termico annuale, pari alla sommatoria degli indici mensili (i) dei dodici mesi dell'anno, ciascuno espresso da:

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$$

mentre β è la funzione cubica dell'indice termico annuale data da:

$$\beta = 0.49239 + (1.792 \cdot 10^{-5} \cdot I) - (771 \cdot 10^{-7} \cdot I^2) + (6.75 \cdot 10^{-9} \cdot I^3)$$

L'evapotraspirazione potenziale media annua (E_p) viene calcolata come somma dei contributi mensili. La successiva stima dell'evapotraspirazione reale mensile ($E_{r,m}$) avviene attraverso una procedura indiretta, che tiene conto del contenuto di acqua, che, mensilmente, è presente nel suolo in relazione al suo bilancio idrico. Il meccanismo di calcolo è quindi subordinato alla quantità delle precipitazioni e alla capacità di ritenuta dell'acqua da parte del suolo (riserva idrica del suolo, legata alla capacità di campo ed al punto di appassimento). Nel caso specifico è stata utilizzata una riserva idrica del suolo generica e pari a 100 mm, ritenuta valida per studi a carattere regionale (Celico, 1988; Barazzuoli & Salleolini, 1993). Applicando il bilancio idrico del suolo di Thornthwaite & Mather, a partire dai valori di precipitazione mensile (P_m) e temperatura atmosferica mensile ($T_{a,m}$), è possibile valutare l'evapotraspirazione reale (E_r), il deficit idrico (D) e l'eccedenza idrica o surplus (S) al suolo; quest'ultimo equiparabile, in prima approssimazione, alla precipitazione efficace (P_e).

Per verificare i potenziali effetti dell'aumento delle temperature medie degli ultimi 20 anni su E_p ed E_r (Figura 4.6) è stato calcolato il bilancio idrico del suolo su base annua per ciascuno degli anni del periodo 1962-2022, a partire dai valori mensili di P_m e $T_{a,m}$ della stazione di Guagnino (Figura 4.7). I risultati in termini di andamento di E_p , E_r , D ed S sono visualizzabili in Figura 4.8. I valori medi di E_p ed E_r per il periodo 1962-2022 risultano rispettivamente pari a 799.29 mm e 479.13, mentre il surplus medio nello stesso periodo è di 71.52 mm.

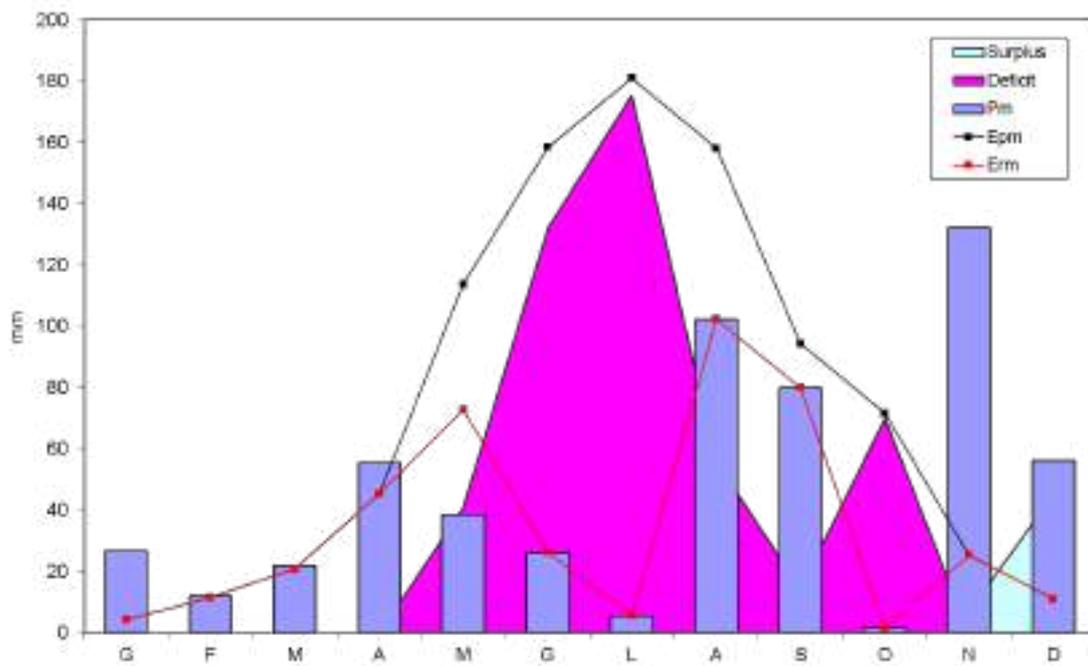


Figura 4.7. Bilancio idrico del suolo secondo Thornthwaite & Mather per la stazione di Guagnino nell'anno 2022; P_m , precipitazione mensile; $E_{p,m}$, evapotraspirazione potenziale media mensile, $E_{r,m}$, evapotraspirazione reale media mensile.

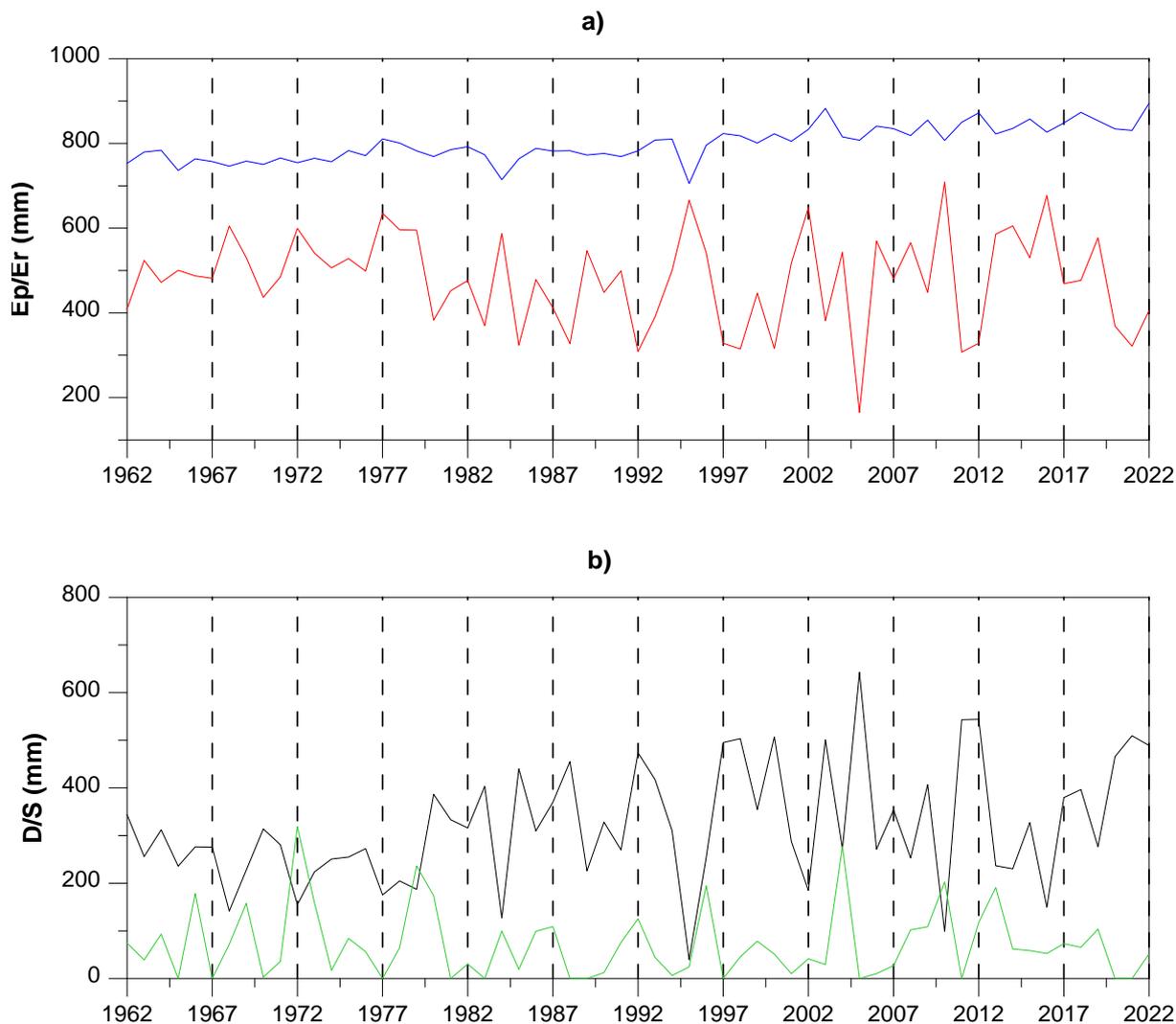


Figura 4.8. Andamento dei valori annui di: evapotraspirazione potenziale (Ep, in blu), evapotraspirazione reale (Er, in rosso), deficit (D, in nero) e surplus (S, in verde) calcolati con il metodo di Thornthwaite & Mather per la stazione di Guagnino nel periodo 1962-2022.

4.1.2 Individuazione ed analisi delle tendenze climatiche

Per validare le osservazioni sopra riportate sono state applicate alcune tecniche di analisi di comune utilizzo per individuare e quantificare i trend nelle serie temporali, attraverso l'ausilio del software ProUCL 5.2.0 dell'United States Environmental Protection Agency (US-EPA, 2020). I metodi sono: la regressione lineare semplice, il test di Mann-Kendall (M-K; Mann, 1945; Kendall, 1975) e lo stimatore di Theil-Sen (T-S; Sen, 1968). I test sono stati applicati alle serie temporali mensili ed annue di precipitazione e temperatura disponibili per il periodo 1962-2022 per la stazione di Guagnino ed a quelle annue di evapotraspirazione potenziale, evapotraspirazione reale, surplus e deficit, calcolate per lo stesso periodo nella medesima stazione.

La regressione lineare semplice (Ordinary Least Squares Regression o OLS) è un modello comunemente adottato per rappresentare l'evoluzione dei dati nel tempo. Tale scelta è legata prevalentemente alla semplicità analitica di tale modello e consente, in prima approssimazione, di verificare la presenza ed il segno di una tendenza significativa, a tasso di variazione costante, entro l'intervallo di tempo considerato. Con il modello OLS la variabile climatologica $y(t)$ è espressa come:

$$y(t) = a + b \cdot f(t) + e(t)$$

dove $f(t)$ è il valore atteso di $y(t)$, $e(t)$ è l'errore legato alla variabilità casuale del fenomeno ed a e b sono i coefficienti della regressione. Se gli errori sono indipendenti e identicamente distribuiti, ad esempio secondo una distribuzione normale, allora è possibile ottenere una stima ottimale dei coefficienti a e b , rispettivamente intercetta e pendenza della retta di regressione. La stima di b , in particolare, fornisce una quantificazione del trend della serie temporale, la cui significatività statistica può essere verificata mediante test. Questo approccio è detto di tipo parametrico, in quanto basato sull'assunzione della normalità dei residui.

Un'alternativa non parametrica, impiegata spesso nello studio delle tendenze climatiche, è costituita dall'uso combinato del M-K e dello stimatore T-S (Toreti & Desiato, 2008). Lo stimatore T-S, infatti, prescinde dall'ipotesi di normalità, da cui sovente i dati climatologici si discostano ed è robusto rispetto alla presenza di dati anomali (outliers). Poiché, però, lo stimatore T-S non fornisce alcuna informazione riguardo la significatività del trend individuato, si può utilizzare il test non parametrico M-K a tale scopo.

Il test M-K prevede il calcolo della statistica S tra tutte le $n(n-1)/2$ coppie distinte di valori y_i, y_j , con $j>i$, di una serie temporale spaziate in modo uniforme e non, costituita da n valori. La statistica S è data da:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(y_j - y_i)$$
$$\text{sgn}(y_j - y_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } (y_j - y_i) > 0 \\ 0 & \text{se } (y_j - y_i) = 0 \\ -1 & \text{se } (y_j - y_i) < 0 \end{cases}$$

Un valore di S positivo implica che la maggior parte delle differenze tra le coppie di valori sono positive, suggerendo la presenza di una potenziale tendenza all'aumento nel tempo. Viceversa, un valore di S negativo implica che la maggior parte delle differenze tra le coppie di valori sono negative, suggerendo la presenza di una potenziale tendenza al decremento. Infine, un valore di S prossimo a 0 evidenzia un numero di punteggi positivi e negativi circa uguale e suggerisce l'assenza di trend. Il test M-K, inoltre, verifica le seguenti ipotesi:

- H_0 , assenza di trend;
- H_1 , presenza di un trend monotono crescente e non necessariamente lineare;
- H_2 , presenza di un trend monotono decrescente e non necessariamente lineare.

Per serie complete e prive di vincoli in cui $n>22$, la significatività statistica viene avvalorata dal calcolo di un p-value del parametro Z derivato da S , secondo:

$$Z = \frac{(S - 1)}{sd(S)} \text{ se } S > 0$$

$$Z = 0 \text{ se } S = 0$$

$$Z = \frac{(S + 1)}{sd(S)} \text{ se } S < 0$$

dove:

$$sd(S) = \sqrt{\frac{1}{18} [n(n - 1)(2n + 5)]}$$

se il p-value è maggiore del livello di significatività (α ; ad es. 0.05), allora l'ipotesi nulla (H_0) non può essere respinta. Il test M-K non è parametrico, ma assume l'ipotesi che i dati della serie temporale siano indipendenti, cioè che non siano autocorrelati. In caso contrario, la probabilità per la variabile di test tende ad essere sottostimata, portando a rigettare H_0 (assenza di trend) anche nei casi in cui essa è in realtà valida. In questo caso, prima di utilizzare il test è necessario decorrelare la serie filtrandola.

Per valutare l'autocorrelazione di una serie temporale si può utilizzare la funzione di autocorrelazione (ACF), la quale consiste nel comparare una sequenza di dati con sé stessa in istanti di tempo successivi e che fornisce il grado di similarità della serie al passare del tempo (Davis, 2002). Per effettuare tale analisi è necessario disporre di una serie di dati continua ed acquisita ad intervalli di tempo regolari e costanti, detti lags (τ). L'autocovarianza di un lag (cov_τ) per un τ è definita come la varianza tra tutte le osservazioni y_τ e tutte le osservazioni $y_{\tau+1}$, secondo (Davis, 2002):

$$cov_\tau = \frac{1}{n - \tau} \sum_{t=1+\tau}^n y_t y_{t-\tau} - \bar{Y}_t \bar{Y}_{t-\tau}$$

Una formula equivalente è data da:

$$cov_\tau = \frac{(n - \tau)(\sum_{t=1+\tau}^n y_t y_{t-\tau}) - \sum_{t=1+\tau}^n y_t \sum_{t=1+\tau}^n y_{t-\tau}}{(n - \tau)(n - \tau - 1)}$$

L'ACF, invece, è data dal rapporto tra cov_τ e la varianza della serie temporale ($varY$), secondo:

$$ACF_\tau = \frac{cov_\tau}{varY} = \frac{[\sum_{t=1+\tau}^n y_t y_{t-\tau} - (n - \tau) \bar{Y}_t \bar{Y}_{t-\tau}] / (n - \tau - 1)}{[\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{Y})^2] / (n - 1)}$$

che può anche essere ricavata da:

$$ACF_\tau = \frac{(n - \tau) \sum y_t y_{t-\tau} - (\sum y_t \sum y_{t-\tau})}{\sqrt{((n - t) \sum y_t^2 - (\sum y_t)^2)((n - t) \sum y_{t-\tau}^2 - (\sum y_{t-\tau})^2)}}$$

I coefficienti di autocorrelazione, compresi tra -1 e +1, sono solitamente visualizzati, in funzione dei lags, su un grafico bidimensionale detto correlogramma. Nei correlogrammi il valore massimo di ACF si trova sempre

a lag 0, in quanto in quel punto ogni valore della serie viene confrontato con sé stesso. Un modo per delimitare la significatività dell'autocorrelazione è quella di individuare l'intervallo di confidenza al 95% (ci95) attraverso la relazione (Davis, 2002):

$$ci95 = \pm 1.76 \sqrt{\frac{1}{n - \tau + 3}}$$

Quando il valore di ACF cade all'interno del ci95 significa che l'autocorrelazione è statisticamente indistinguibile da 0 e quindi il processo può essere considerato casuale e quindi è possibile utilizzare il test M-K per individuare eventuali tendenze nella serie. In questo caso, la ACF delle serie temporali analizzate è stata calcolata con l'ausilio del software PAST versione 4.13 (Hammer et al., 2001).

Infine, lo stimatore T-S si basa sull'idea che la mediana delle pendenze calcolabili tra ogni coppia di valori di una serie temporale sia la migliore approssimazione della pendenza sconosciuta della serie. Utilizzando la pendenza mediana delle coppie di valori anziché la pendenza media, vengono ignorati i valori estremi di pendenza dovuti ad esempio alla presenza di outliers o ad altri errori nella serie, facendo in modo che questi abbiano un impatto minimo o trascurabile sulla stima finale. La pendenza finale (m) di ogni possibile coppia di valori, (y_i, y_j) per $i > j$, di una serie temporale è data da:

$$m_{ij} = \frac{(y_j - y_i)}{j - i}$$

mentre la mediana (Q) dei valori di pendenza può essere calcolata con:

$$Q = \begin{cases} m_{([N+1]/2)} & \text{se } N = \text{dispari} \\ (m_{([N/2])} + m_{([N/2]+1)})/2 & \text{se } N = \text{pari} \end{cases}$$

dove N è il numero di coppie di valori della serie temporale. In ultimo, lo stimatore T-S viene visualizzato attraverso una linea di tendenza calcolata con:

$$y = \tilde{y} + Q(t - \tilde{t}) = (\tilde{y} - Q\tilde{t}) + Qt$$

dove \tilde{y} e \tilde{t} sono le mediane rispettivamente dei valori della serie e del tempo.

I correlogrammi delle serie mensili analizzate mostrano che la precipitazione è un fenomeno casuale (Figura 4.9a), mentre la temperatura atmosferica è autocorrelata per tutta la durata della serie (Figura 4.10a). L'autocorrelazione della temperatura viene in parte rimossa aggregando i dati su base annua (Figura 4.10b), mentre la precipitazione continua ad essere una variabile casuale (Figura 4.9b). In merito ai parametri del bilancio idrico, E_p , derivando dalla temperatura, risulta autocorrelata almeno fino al lag 15, mentre l'autocorrelazione di E_r , D ed S si mantiene sempre al disotto delle soglie di significatività (Figura 4.11).

Per quanto riguarda i potenziali trend in atto, in Tabella 4.3 sono sintetizzati i risultati della regressione semplice, dello stimatore T-S e del test M-K. Come si può verificare dalla pendenza delle regressioni (OLS e T-S), la precipitazione, mensile (Figura 4.12a) ed annua (Figura 4.13a), l'evapotraspirazione reale (Figura 4.14b) ed il surplus (Figura 4.14d) mostrano dei trend di diminuzione che però non risultano statisticamente

significativi (p -value > della soglia di significatività), mentre la temperatura atmosferica, mensile (Figura 4.12b) ed annua (Figura 4.13b), l'evapotraspirazione potenziale (Figura 4.14a) ed il deficit (Figura 4.14c) evidenziano dei trend di crescita significativi anche dal punto di vista statistico (p -value < della soglia di significatività). Nel caso delle serie annue di T_a ed E_p permane un certo grado di incertezza legato alla parziale autocorrelazione delle serie.

In sintesi, i dati climatici degli ultimi 61 anni della stazione di Guagnino, rappresentativa delle condizioni dell'area di studio, mostrano che le temperature medie mensili ed annue presentano un trend di incremento statisticamente significativo, che può essere quantificato in circa 0.04 °C/anno. Questa tendenza produce incrementi di rilievo su alcuni parametri del bilancio idrico del suolo quali: l'evapotraspirazione potenziale e il deficit (calcolato come differenza tra precipitazione ed evapotraspirazione potenziale). L' E_p in particolare aumenta di circa 1.8 mm/anno. Al contrario le precipitazioni mensili e annue non mostrano alcuna tendenza statisticamente significativa e questo comporta che non si registrano variazioni di rilievo nemmeno sull'evapotraspirazione reale e il surplus. In pratica, si può affermare che, nonostante l'aumento della temperatura atmosferica, il quantitativo di acqua disponibile al suolo per l'infiltrazione e il ruscellamento superficiale possa considerarsi invariato rispetto al passato e che, al momento, questa indicazione possa ritenersi valida anche per il futuro. Tutto ciò può essere spiegato ipotizzando che nella porzione costiera della Pianura Padana l'incremento della temperatura atmosferica produca un aumento del deficit idrico soprattutto nel periodo compreso tra maggio e settembre, mesi in cui il surplus risultava nullo anche negli anni passati.

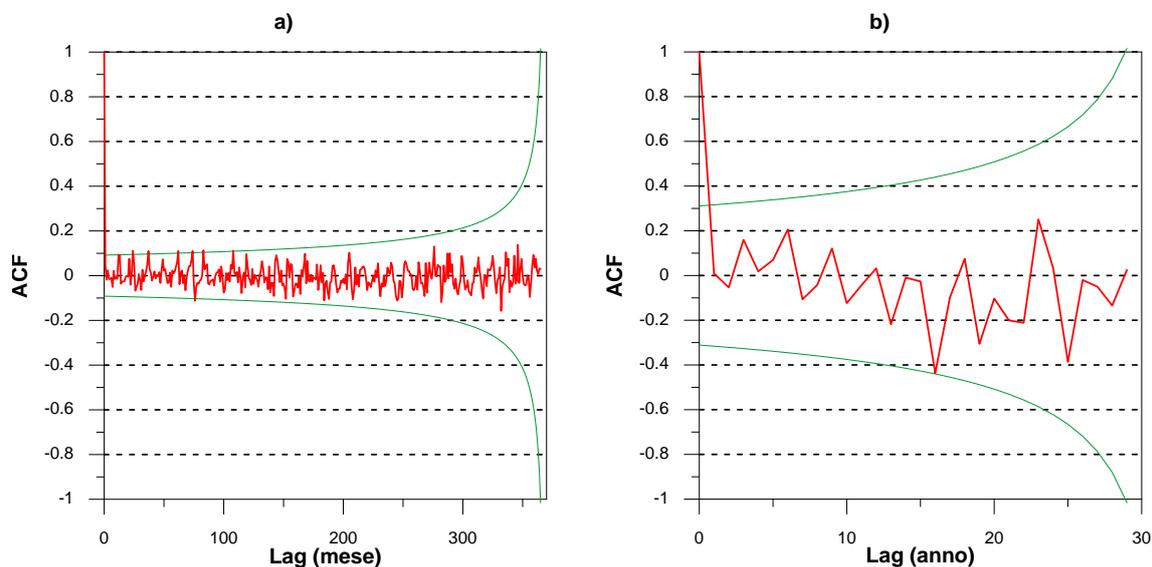


Figura 4.9. Correlogrammi dei valori di precipitazione a) mensile e b) annua registrati nel periodo 1962-2022 nella stazione di Guagnino; in rosso i valori di ACF ed in verde quelli del ci95%.

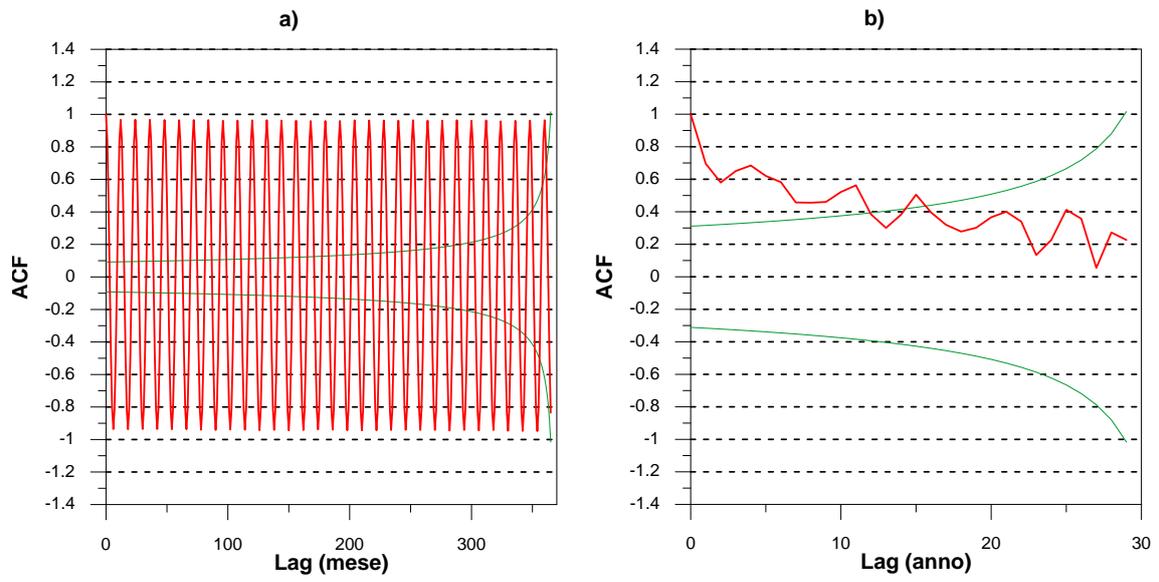


Figura 4.10. Correlogrammi dei valori di temperatura atmosferica a) mensile e b) annua registrati nel periodo 1962-2022 nella stazione di Guagnino; in rosso i valori di ACF ed in verde quelli del ci95%.

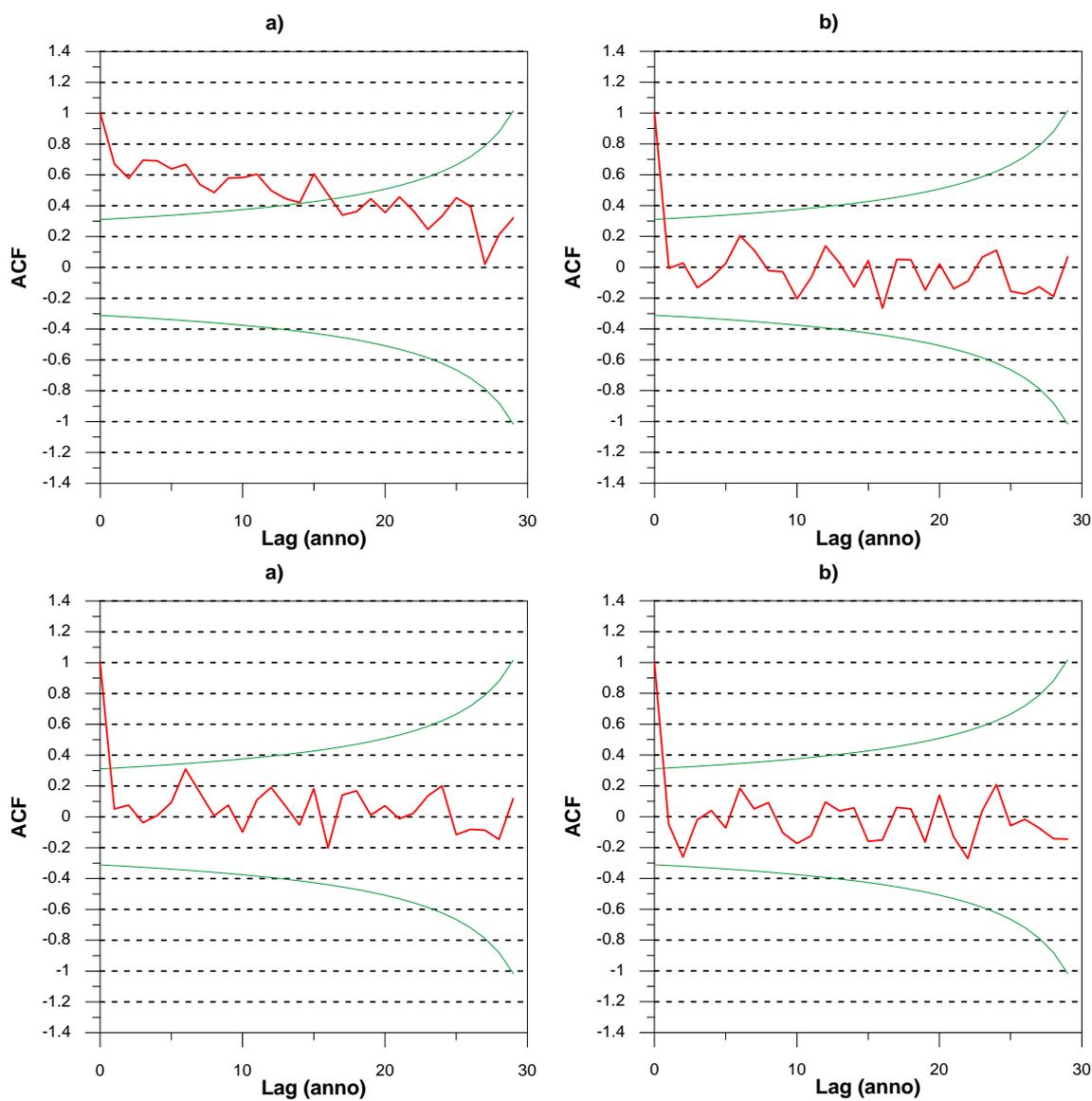


Figura 4.11. Correlogrammi dei valori di: a) evapotraspirazione potenziale annua, b) evapotraspirazione reale annua, c) deficit annuo e d) surplus annuo calcolati nel periodo 1962-2022 per la stazione di Guagnino; in rosso i valori di ACF ed in verde quelli del ci95%.

Parametro	Sigla	OLS	T-S	S	Z	p-value	significatività
Precipitazione mensile	P _m	-0.0365	-0.069423	-6484	-0.981	0.163	no
Temperatura atmosferica mensile	Ta _m	0.0365	0.04255	18220	7.257	2.92E-03	si
Precipitazione annua	P _a	-0.6637	-0.518	-93	-0.573	0.283	no
Temperatura atmosferica annua	Ta _a	0.0400	0.0412	1161	7.219	2.62E-13	si
Evapotraspirazione potenziale annua	Ep	1.8314	1.798	1186	7.374	8.271E-14	si
Evapotraspirazione reale annua	Er	-0.6303	-0.573	-124	-0.765	0.222	no
Deficit annuo	D	2.4617	2.59	428	2.657	3.94E-03	si
Surplus annuo	S	-0.2732	0	-26	-0.156	0.438	no

Tabella 4.3. Sintesi dei risultati dei test statistici sulle serie dei parametri misurati e calcolati presso la stazione di Guagnino per il periodo 1962-2022; OLS è la pendenza della regressione lineare semplice in 1/anni; T-S è la pendenza dello stimatore di Theil-Sen in 1/anni; in rosso sono evidenziati i risultati statisticamente significativi.

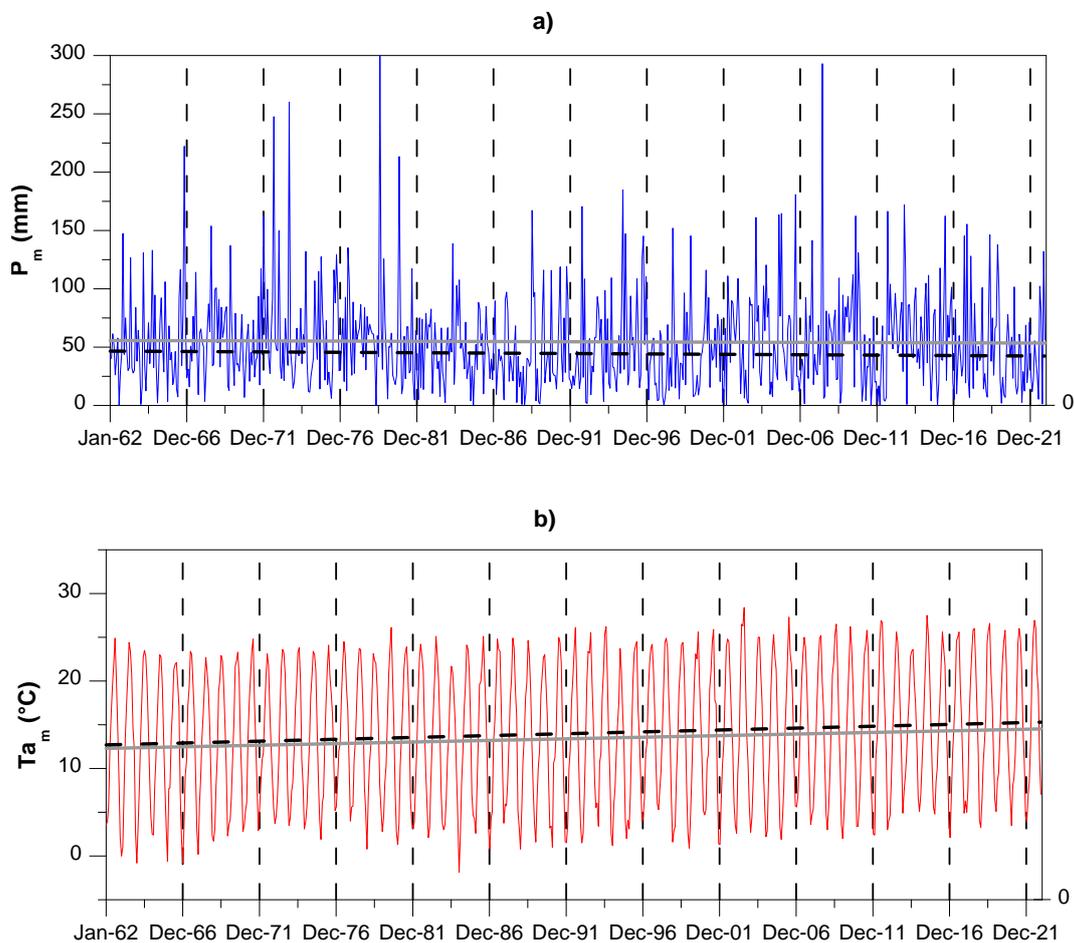


Figura 4.12. Rette di regressione individuate attraverso la regressione lineare semplice (linea grigio continua) e lo stimatore T-S (linea nera tratteggiata) per le serie mensili di: a) precipitazione e b) temperatura atmosferica registrate nel periodo 1962-2022 nella stazione di Guagnino.

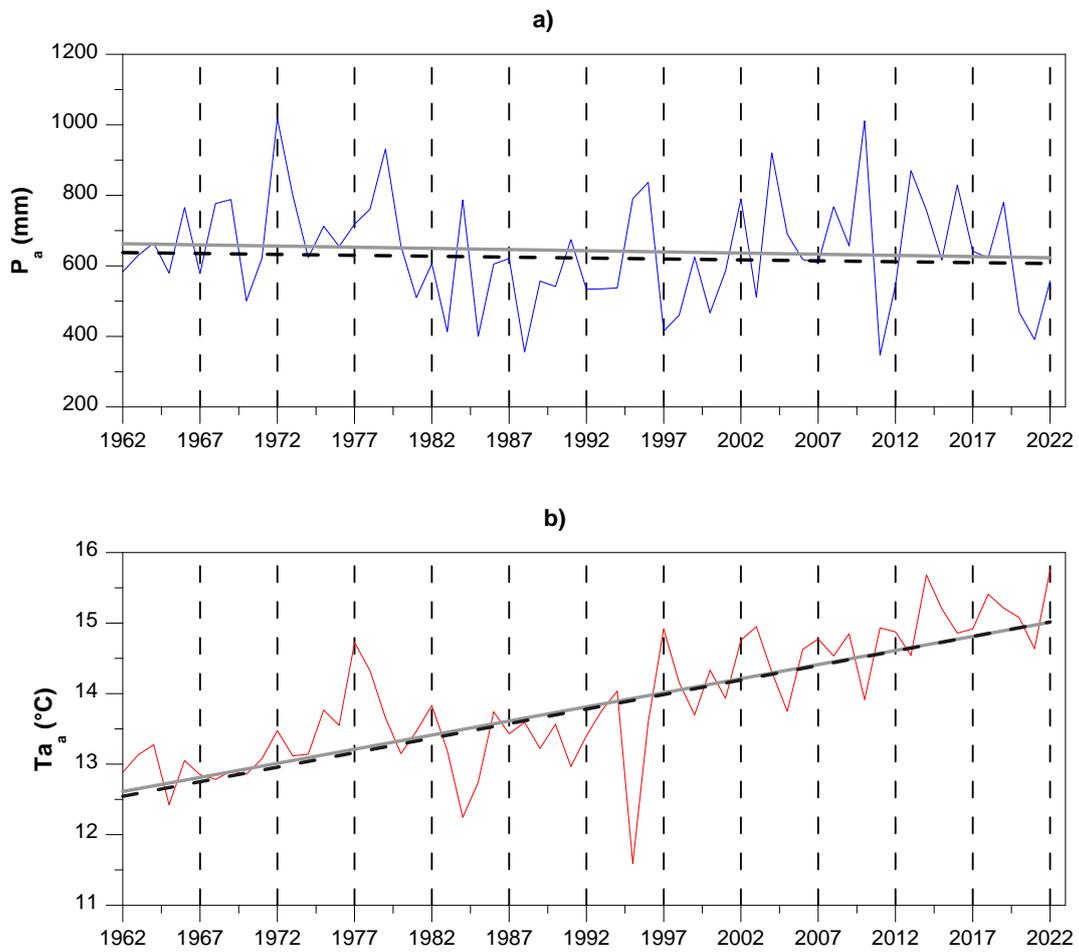


Figura 4.13. Rette di regressione individuate attraverso la regressione lineare semplice (linea grigio continua) e lo stimatore T-S (linea nera tratteggiata) per le serie annue di: a) precipitazione e b) temperatura atmosferica registrate nel periodo 1962-2022 nella stazione di Guagnino.

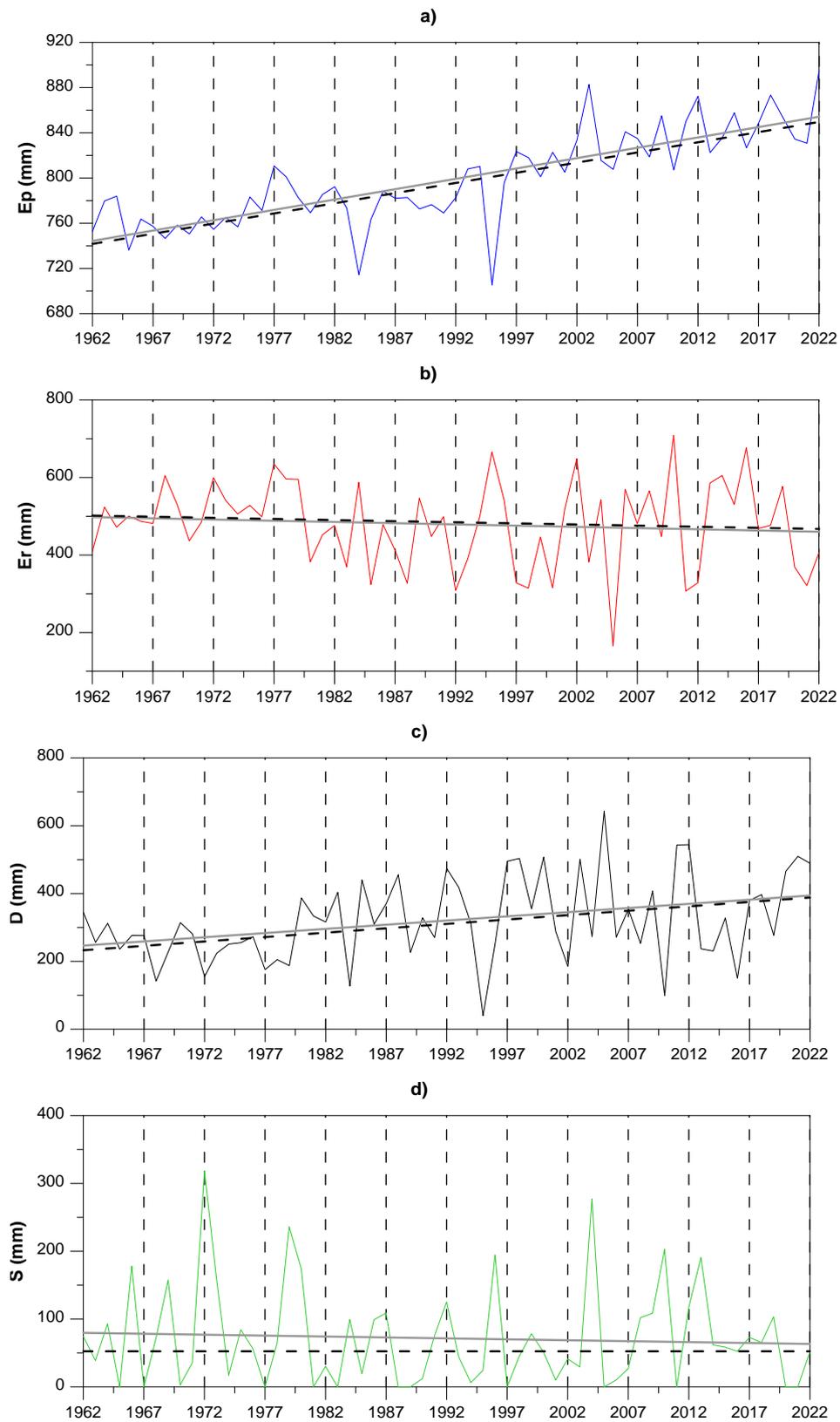


Figura 4.14. Rette di regressione individuate attraverso la regressione lineare semplice (linea grigio continua) e lo stimatore T-S (linea nera tratteggiata) per le serie annue di: a) evapotraspirazione potenziale, b) evapotraspirazione reale, c) deficit e d) surplus calcolate nel periodo 1962-2022 per la stazione di Guagnino.

4.2 Dati idrometrici

Il reticolo idrografico nei pressi dell'area di studio è completamente regimato dall'attività del Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara. I due elementi principali della rete idrografica che scorrono paralleli al lago di cava in direzione sud-ovest sono: il Canale Navigabile, parte dell'idrovia ferrarese, e il Canale Circondariale, canale di bonifica che scola le Valli del Mezzano (Figura 4.15). Ad essi si aggiunge una fitta rete di canali, fossi, scoli dedicati all'adduzione di acque per l'irrigazione nei mesi estivi e al drenaggio delle acque di ruscellamento in quelli non irrigui.

Come evidenziato negli studi precedenti (CFR per Cantoniera Cavallara, 2009), entrambi i canali svolgono una importante funzione alimentante nei confronti del sistema acquifero oggetto di escavazione e del lago e per questa ragione vengono rappresentati nelle simulazioni numeriche attraverso una condizione di 3° tipo che richiede la conoscenza delle caratteristiche geometriche dei corsi d'acqua e del loro livello idrometrico. Nel seguito sono presentati e descritti i dati disponibili sui due corsi d'acqua reperiti rispettivamente presso l'Ufficio territoriale sicurezza territoriale e protezione civile di Ferrara e il Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara.

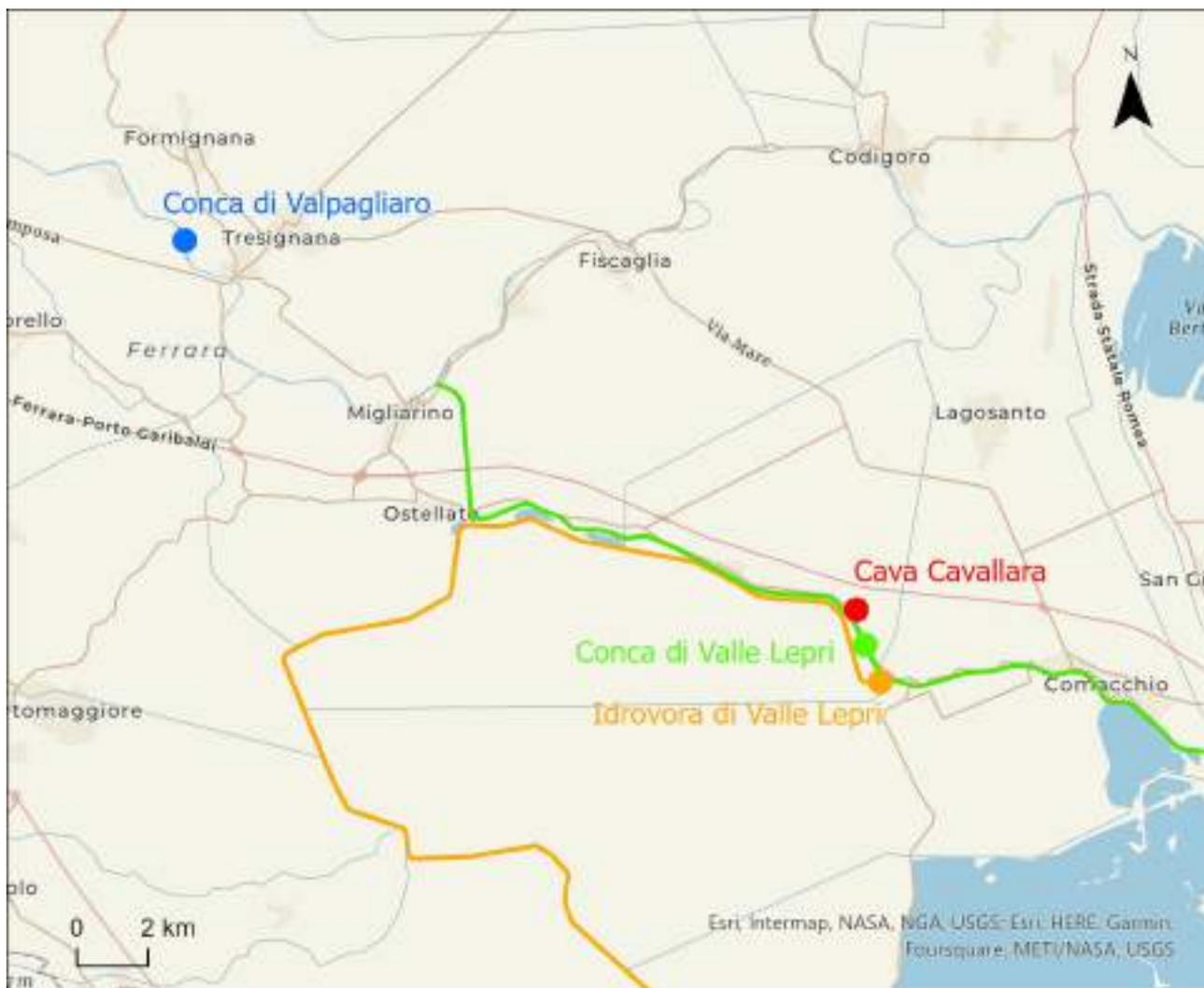


Figura 4.15. Ubicazione della conca di navigazione di Valpigliaro (in blu), della conca di navigazione di Valle Lepri (in verde), dell'impianto idrovoro di Valle Lepri (in arancione) e dei canali Navigabile (linea verde) e Circondariale (linea arancione).

4.2.1 Canale Navigabile

Il Canale Navigabile è parte dell'idrovia ferrarese, che collega il Po a Ferrara con Porto Garibaldi e costituisce l'ingresso meridionale al Sistema Idroviario Padano-Veneto dell'Adriatico. L'idrovia è lunga circa 70 km ed è divisa in 3 tratte: dalla conca di Pontelagoscuro alla conca di Valpigliaro, dalla conca di Valpigliaro a quella di Valle Lepri e da quest'ultima al mare. Nel tratto tra Ferrara e Migliarino, l'idrovia coincide con il corso del Po di Volano, mentre il suo percorso dopo Migliarino è artificiale e corrisponde al Canale Navigabile realizzato tra gli anni '50 e '60. Il canale, lungo circa 28 km, è largo 25 m ed al suo interno, per garantire la navigabilità, viene mantenuto un battente idrico di circa 3.5 m.

Per verificare il regime del Canale Navigabile nei pressi del lago di cava sono stati acquisiti, presso l'Ufficio territoriale sicurezza territoriale e protezione civile di Ferrara, i valori di livello idrometrico registrati ogni 10 min presso le conche di navigazione di Valpigliaro e Valle Lepri. I dati disponibili sono compresi tra il

10/07/2020 ed il 30/06/2023 per la conca di Valpagliaro e tra il 29/05/2020 ed il 30/06/2023 per quella di Valle Lepri. In Figura 4.16a è visualizzabile l'andamento del livello idrometrico orario a valle della Conca di Valpagliaro ed a monte e valle della conca di Valle Lepri per il periodo compreso tra il 29/05/2020 ed il 30/06/2023, mentre In Figura 4.16b è presentato un dettaglio relativo al mese di giugno 2022. Come si può vedere, sia a Vapagliaro che a Valle Lepri, il livello idrometrico è mantenuto prevalentemente tra 1.2 e 1.6 m s.l.m., per garantire il battente idrico necessario alla navigabilità. La differenza di livello tra le conche di Valpagliaro (valle) e Valle Lepri (monte) è estremamente modesta ed in media pari a circa 1 cm. Questa condizione cambia solo in relazione ad eventi piovosi significativi per permettere il drenaggio del bacino sotteso dal canale ed il transito della conseguente onda di piena. A Valle Lepri, oltre la chiusa di valle, il livello idrometrico è regolato dal mare e risente dell'effetto delle maree (Figura 4.16b). In Tabella 4.4 sono riepilogati i valori medi registrati rispettivamente a valle della conca di Valpagliaro, a monte e a valle di quella di Valle Lepri. Da notare che il livello idrometrico medio di Valpagliaro è uguale a quello di Valle Lepri, a riprova del fatto che il gradiente idrometrico lungo il canale è di norma molto basso. Questi dati confermano quelli acquisiti nel periodo 2008-2009 (CFR per Cantoniera Cavallara, 2009) e validano ulteriormente il valore del livello idrometrico associato alla condizione di 3° tipo utilizzata per riprodurre l'interazione tra le acque superficiali e sotterranee in corrispondenza del corso del Canale Navigabile (Par. 6.2.6).

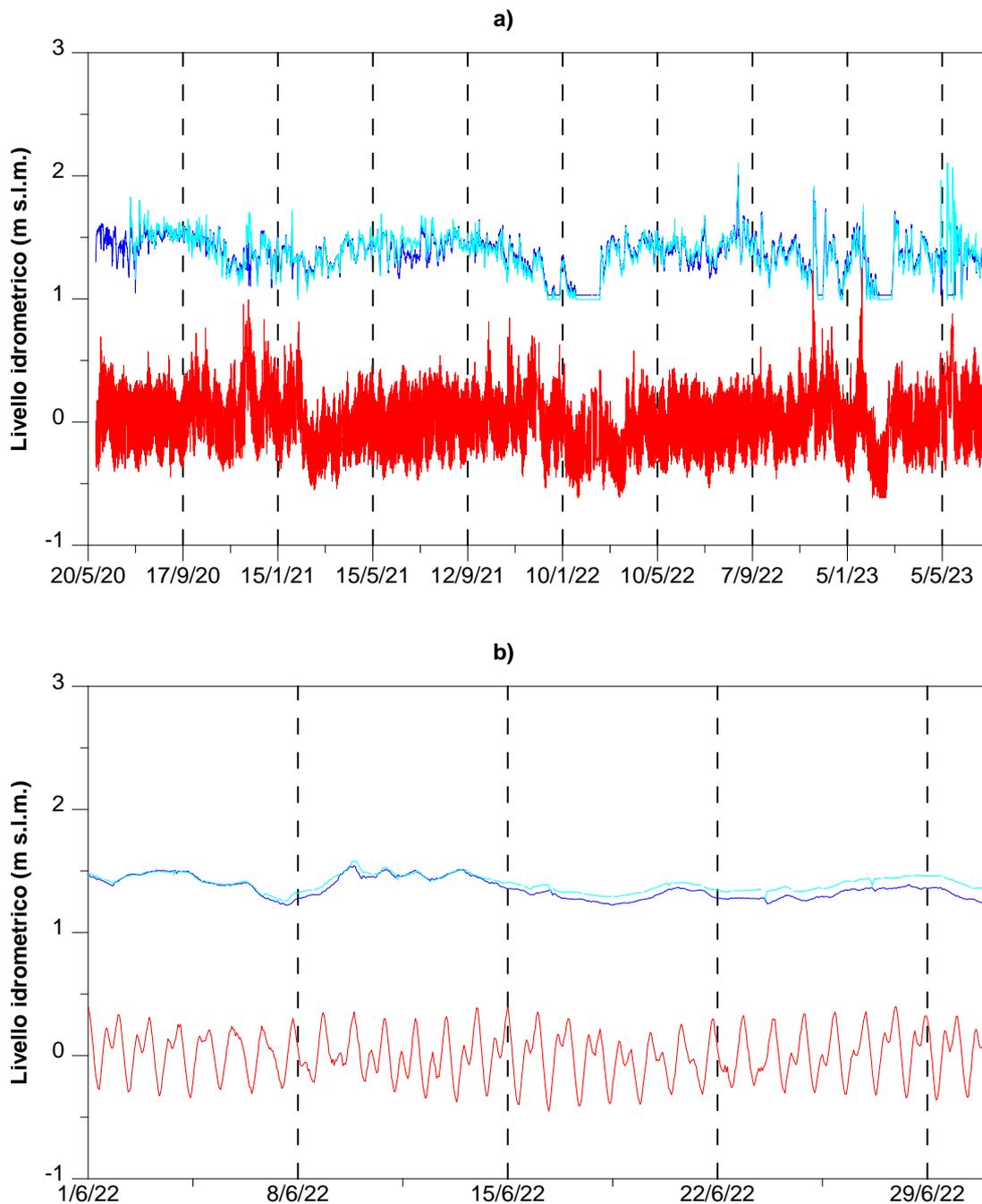


Figura 4.16. Andamento del livello idrometrico orario a valle (in rosso) e a monte (in blu) della Conca di Valle Lepri e a valle (in ciano) della conca di Valpagliaro: a) nel periodo compreso tra maggio 2020 e giugno 2023 e b) nel mese di giugno 2022; l'ubicazione dei punti di monitoraggio è in Figura 4.15.

Stazione	L _{max} (m s.l.m.)	L _{min} (m s.l.m.)	L _{med} (m s.l.m.)
Valpagliaro valle	2.10	1.00	1.36
Valle Lepri monte	2.00	1.03	1.36
Valle Lepri valle	1.25	-0.61	0.02

Tabella 4.4. Valori di livello idrometrico massimo, minimo e medio rilevati presso la conca di Valpagliaro (valle) nel periodo compreso tra il 10/07/2020 ed il 30/06/2023 e presso la conca di Valle Lepri (monte e valle) nel periodo compreso tra il 29/05/2020 ed il 30/06/2023.

4.2.2 Canale Circondariale

Il Canale Circondariale, gestito dal Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara e lungo circa 55 km, costituisce il canale di gronda realizzato durante la bonifica delle Valli di Mezzano allo scopo di raccogliere e convogliare tutte le acque di scolo delle più antiche bonifiche esterne e contermini, che in precedenza recapitavano direttamente in valle. La porzione nord occidentale del canale, quella più prossima al lago di cava, scola verso l'impianto idrovoro di Valle Lepri e da questo sul Canale Navigabile (Figura 4.15), mentre la porzione sud orientale recapita le acque all'impianto idrovoro Fosse a da questo al canale emissario Fossa-Foce che corre lungo il perimetro settentrionale delle Valli di Comacchio.

Analogamente al Canale Navigabile, per verificare il regime del Canale Circondariale sono stati acquisiti, presso il Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara, i dati di livello idrometrico a monte dell'impianto idrovoro di Valle Lepri (Figura 4.15). I dati sono registrati con cadenza variabile e sono disponibili per il periodo compreso tra il 13/08/2010 ed il 05/07/2023. In Figura 4.17a è visualizzabile l'andamento del livello medio orario nel periodo sopra menzionato, mentre in Figura 4.17b è mostrato un dettaglio relativo al mese di giugno 2022. Come si può verificare il livello idrometrico del Canale Circondariale è mantenuto prevalentemente tra -1.2 e -0.8 m s.l.m. e presenta un valore medio pari a -1.0 m s.l.m. (Tabella 4.5). Anche in questo caso i dati validano il livello idrometrico associato alla condizione di 3° tipo utilizzata per riprodurre l'interazione tra le acque superficiali e sotterranee in corrispondenza del Canale Circondariale (Par. 6.2.6)

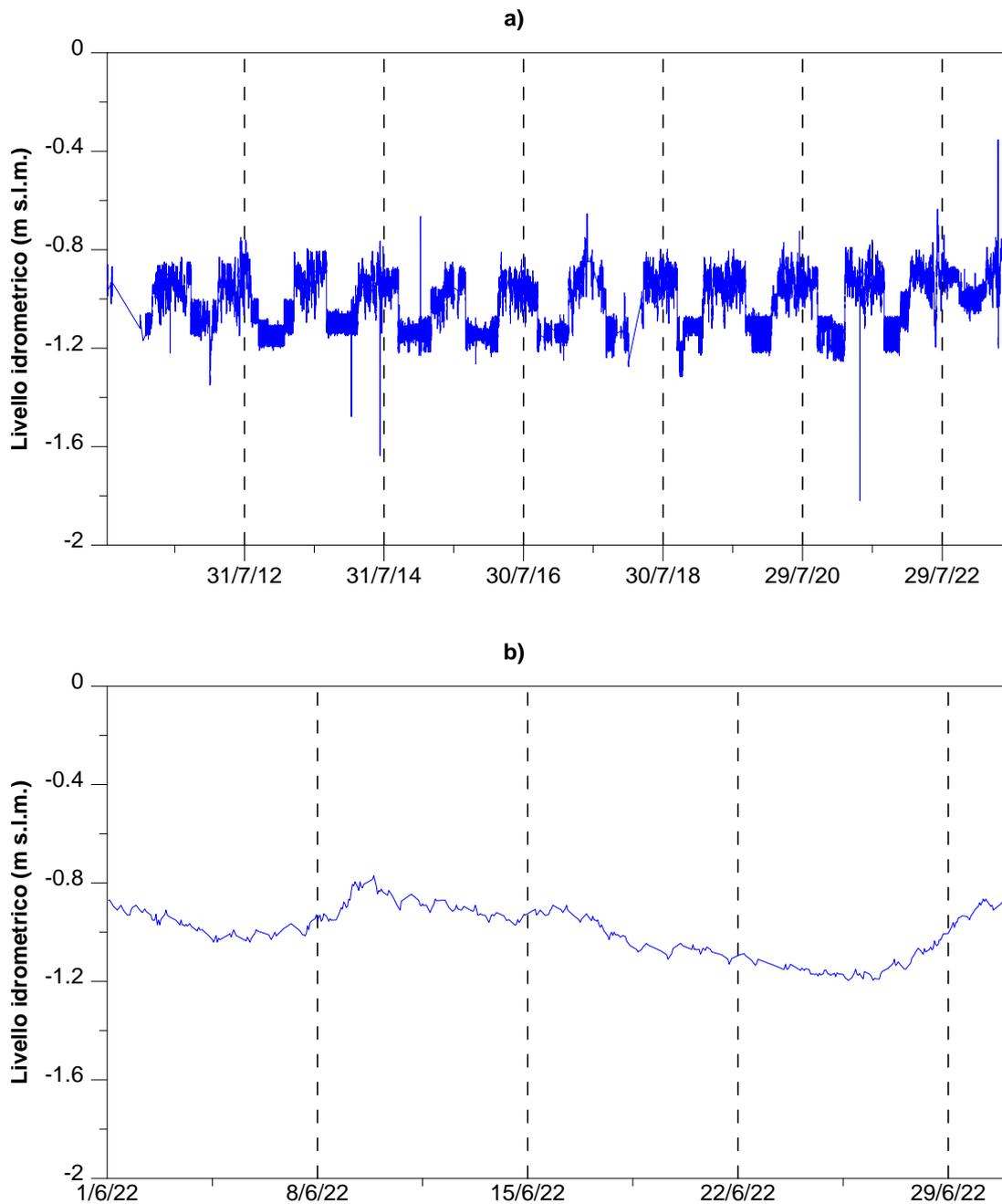


Figura 4.17. Andamento del livello idrometrico orario del Canale Circondariale a monte dell’impianto idrovoro di Valle Lepri: a) nel periodo compreso tra il 13/08/2010 ed il 05/07/2023 e b) nel mese di giugno 2022; l’ubicazione del punto di monitoraggio è in Figura 4.15.

Stazione	L_{max} (m s.l.m.)	L_{min} (m s.l.m.)	L_{med} (m s.l.m.)
Circondariale a Valle Lepri	-0.35	-3.67	-1.01

Tabella 4.5. Valori massimo, minimo e medio di livello idrometrico rilevati nel Canale Circondariale a monte dell’impianto idrovoro di Valle Lepri nel periodo compreso tra il 13/08/2010 ed il 05/07/2023.

5 Modello idrogeologico concettuale

Tutti i dati di monitoraggio acquisiti in corso d'opera sostanzialmente confermano la validità delle simulazioni numeriche, di calibrazione e previsionali, realizzate nel 2009, e quindi confermano la validità del modello idrogeologico concettuale da cui queste simulazioni sono derivate. Nel seguito vengono richiamate le principali caratteristiche del modello concettuale presentato in CFR per Cantoniera Cavalla (2009), che ad oggi può ritenersi ancora valido.

Dal punto di vista stratigrafico il sito è caratterizzato dalla presenza di un paleoalveo (1° litosoma sabbioso) di spessore compreso tra 14 e 19 m, che è il risultato della sedimentazione alluvionale legata al sistema distributore meandriforme del Padò-Eridano, un antico corso del Fiume Po, che dal VIII sec. a.C. al VII-VIII sec. d.C. divagava sulla pianura deltizia corrispondente alla porzione sud orientale della Provincia di Ferrara e progradava sugli adiacenti depositi litorali. Questo litosoma è attualmente subaffiorante in corrispondenza dei canali Circondariale e Navigabile e per oltre metà della larghezza del paleoalveo, stimata in circa 400-500 m. Oltre il sistema dei canali, in direzione N-NE, il paleoalveo è sovrastato da un livello limoso-argilloso, che congruamente all'approfondimento del tetto delle sabbie, aumenta di spessore da 1 a 5 m. La base del 1° litosoma sabbioso si trova a profondità comprese tra 16 e 21 m da p.c. ed è costituita da almeno 3 m di limi argillosi e argille limose. Questo orizzonte fine divide il 1° litosoma sabbioso da un secondo orizzonte, prevalentemente sabbioso (2° litosoma sabbioso), che dalla zona estrattiva si sviluppa in allontanamento dal paleoalveo con spessori compresi tra 1 e 2.5 m. La base del sistema è posta a circa 19-26 m da p.c. ed è rappresentata da almeno 4 m di argille grigie compatte presumibilmente di origine marina. La successione stratigrafica è definita con buon grado di dettaglio in corrispondenza della zona di cava ed in allontanamento da essa in direzione N-NE; più incerta è la situazione ortogonalmente a tale allineamento, e quindi in direzione longitudinale rispetto all'asse del paleoalveo. Si può ipotizzare, infatti, che verso S-SE la comparsa dei cordoni dunali di una delle antiche linee di costa comporti la progressiva fusione dei due litosomi sabbiosi e la scomparsa del livello di limi superficiali. Nella direzione opposta, invece, allo stato attuale si può logicamente supporre il proseguimento della successione individuata.

Dal punto di vista idrogeologico il 1° litosoma sabbioso, oggetto dell'attività estrattiva, è classificabile come un acquifero che da libero, nella zona in cui è subaffiorante, diviene progressivamente semiconfinato, in relazione alla comparsa ed all'aumento di spessore dello strato limoso-argilloso più superficiale. Le prove sperimentali evidenziano che si tratta di un acquifero con conducibilità idraulica (K) medio alta (tra 1.0E-04 a 2.0E-04 m/s) e porosità efficace (n_e) pari al 27-30%. I dati di monitoraggio del carico idraulico acquisiti nel periodo 2005-2009 mostrano come tra il 1° ed il 2° litosoma sabbioso vi sia continuità idraulica, per cui il livello fine tra essi interposto svolge una funzione idrodinamica di acquitardo, mentre la zona di comunicazione diretta tra i due litosomi sarebbe comunque al di fuori dell'area di studio. Infine, il 2° litosoma sabbioso sarebbe confinato alla base da un acquicludo costituito dalle argille grigie compatte presenti tra 19 e 26 m da p.c. Il sistema multiacquifero trae alimentazione dall'infiltrazione delle acque di precipitazione nella zona di subaffioramento del 1° litosoma sabbioso e dalla ricarica laterale esercitata dai canali Circondariale e Navigabile con cui è in comunicazione diretta. La notevole estensione del sistema oltre il paleoalveo, allo stato attuale delle conoscenze, rende complessa l'individuazione di un recapito finale del sistema stesso.

Le acque del sistema multiacquifero presentano valori medi di salinità estremamente variabili e compresi tra 1.2 g/l (1200 mg/l a cui corrisponde una SpCE di 1380 $\mu\text{S}/\text{cm}$) a 48 g/l (48000 mg/l corrispondenti a SpCE pari a 41140 $\mu\text{S}/\text{cm}$), con i valori più elevati che risultano maggiori di quelli medi solitamente associati all'acqua di mare (circa 35 g/l). Tutto ciò è presumibilmente dovuto all'evoluzione geomorfologica del territorio in oggetto a partire dal VII-VIII sec. d.C. La scomparsa del Padàa-Eridano, l'antico corso meridionale del Fiume Po, infatti, ha portato, nei secoli successivi, al progressivo smantellamento del suo delta ed all'ingressione di acque marine con la formazione di lagune e stagni costieri salmastri (valli). Questa situazione, che si è mantenuta sino al XX secolo con l'inizio delle bonifiche, ha favorito la progressiva infiltrazione dell'acqua salata/salmastra nel sottosuolo, che si è sostituita all'originaria acqua dolce della pianura deltizia.

A causa della differenza di densità, la transizione tra l'acqua dolce e quella salata non avviene in maniera graduale ma attraverso lo sviluppo di una zona di transizione molto netta e dallo spessore compreso tra 3 e 4 m. La dimensione e la forma di questa zona individuano, all'interno del 1° litosoma sabbioso e, sotto i canali, anche nell'acquitrando e nel 2° litosoma sabbioso, una lente di acqua dolce (con salinità compresa tra 1.2 e 2.0 g/l) allungata secondo la direzione del sistema paleoalveo/canali e sovrapposta ad un originario strato di acqua salata/salmastra. Al di fuori del paleoalveo tutto il sistema multiacquifero è saturo di acqua salata/salmastra. Questa lente di acqua dolce si è probabilmente evoluta nella forma attuale a partire dagli anni '50-'60 a seguito della realizzazione dei canali Circondariale, canale di gronda della bonifica delle Valli del Mezzano, e Navigabile. Questa ipotesi è supportata dai risultati della prima simulazione di calibrazione/verifica (C1) ampiamente descritta nel seguito (Par. 6.2). Tutto ciò trova conferma anche nell'idrochimica delle acque sotterranee: la facies idrochimica delle acque salate/salmastre è cloruro-sodica, quindi di origine marcatamente marina, mentre quella delle acque dolci è prevalentemente cloruro-bicarbonato-sodica, anche se in alcuni punti il contenuto di magnesio non è trascurabile, divenendo cloruro-bicarbonato-sodico-magnesiaca. La netta prevalenza di sodio e cloruro sugli altri ioni e l'elevato valore dei solidi totali disciolti (TDS; 48 g/l contro 35 g/l medi dell'acqua di mare), confermano che le acque salate/salmastre sono acque provenienti da un ambiente costiero caratterizzato dalla presenza di stagni e lagune. L'inizio dell'attività di bonifica, con la rimozione delle acque salate/salmastre dalla superficie e la regimazione della rete idrografica, avrebbe favorito, nelle porzioni di sottosuolo caratterizzate dalla presenza di sedimenti più grossolani, la progressiva sostituzione di queste acque con acque dolci di provenienza continentale, sino al raggiungimento dell'equilibrio attuale. I dati pluriennali di monitoraggio evidenziano che durante l'anno idrologico l'areale e lo spessore della zona di transizione subiscono delle fluttuazioni in relazione alla ricarica del sistema. Queste fluttuazioni rimangono all'interno di un range di variabilità regolato dai valori medi di ricarica zenitale (infiltrazione) e laterale; per cui, fin tanto che questi apporti non subiranno modifiche di rilievo (Par.4), il sistema multiacquifero può considerarsi in una condizione stazionaria, sia per quanto riguarda il carico idraulico che la salinità.

Le potenziali interferenze dell'attività estrattiva in un contesto quale quello descritto sono legate al fatto che l'asportazione delle sabbie produce una cavità che si riempie progressivamente di acqua sotterranea dal momento in cui lo scavo raggiunge la zona satura, formando un lago di cava. Il livello idrometrico del lago di cava è inferiore al livello delle acque sotterranee circostanti ed è anche inferiore al livello delle acque sotterranee presenti nell'area di cava prima della sua creazione, per cui esso svolge un'azione prevalentemente drenante nei confronti del sistema multiacquifero. Questa azione potenzialmente può influire sulla posizione e lo spessore della zona di transizione tra l'acqua dolce e quella salata/salmastra,

richiamando l'acqua salata/salmastra dal fondo e dalle porzioni laterali del sistema e riducendo l'estensione e lo spessore della lente di acqua dolce. Ad oggi però tutti i dati acquisiti in corso d'opera (CFR per Cantoniera Cavallara, 2009; CFR per Cantoniera Cavallara, 2017; Par. 3) scongiurano tale ipotesi, dimostrando che l'attività estrattiva per il momento non ha indotto modificazioni significative nei confronti del sistema multiacquifero, né in termini di carico idraulico e né di salinità. Tutto ciò è sicuramente da imputare alla costante alimentazione garantita dalla rete idrografica, completamente regimata per l'attività irrigua e la navigazione (Par. 4.2), e all'infiltrazione delle acque di precipitazione che, nonostante il cambiamento climatico in atto, non ha subito una diminuzione significativa (Par. 4.1.2).

Infine, è importanti ribadire che in un contesto quale quello in oggetto, cioè caratterizzato da valori di salinità estremamente variabili, appare irrealistico valutare gli effetti dell'attività estrattiva attraverso un limite o una soglia di concentrazione e/o salinità, che peraltro potrebbe essere superata per gran parte dell'anno dall'acqua presente nella rete idrografica. Dal punto di vista idrogeologico si ritiene più efficace e corretto valutare un'eventuale salinizzazione normalizzando le differenze di concentrazione sul range sperimentalmente rilevato, e tale è l'approccio utilizzato per valutare i risultati delle simulazioni previsionali presentate al Paragrafo 6.5.

6 Simulazioni numeriche

I dati di monitoraggio acquisiti in corso d'opera con le campagne: 2007-2008, 2016-2017 (CFR per Cantoniera Cavallara, 2017) e 2022-2023 (Par. 3) hanno confermato la validità delle simulazioni numeriche, di calibrazione e previsionali, descritte in CFR per Cantoniera Cavallara (2009). Per cui per raggiungere gli obiettivi del presente studio, cioè valutare i potenziali effetti dell'approfondimento dell'attività estrattiva a 15, 17 e 19 m da p.c., non è stato necessario apportare modifiche sostanziali al modello numerico disponibile. Prima della realizzazione di nuove simulazioni previsionali, però, si è provveduto ad una fase di ulteriore validazione attraverso i dati dei logs di salinità acquisiti in ante operam e corso d'opera e mai utilizzati finora per la verifica delle simulazioni numeriche. Nel dettaglio, la fase di validazione ha previsto:

- la re-implementazione della simulazione di calibrazione del 2009, con l'estensione del dataset di calibrazione, costituito dai dati di monitoraggio in continuo, includendo i dati dei logs realizzati in ante operam nel 2005-2006 (simulazione C1);
- l'implementazione di 3 simulazioni di verifica che riproducono i dati dei logs realizzati in corso d'opera nel 2007-2008, 2016-2017 e nel 2022-2023 e rispettivamente denominate simulazione C2, C3 e C4.

Da segnalare che per necessità pratiche legate ai progressivi aggiornamenti di software e licenze è stata cambiata l'interfaccia di implementazione passando da Visual Modflow 4.1 (©Waterloo Hydrogeologic, Inc.) a Groundwater Modeling System (GMS) ver. 10.5.6 (©Aquaveo, LLC) e che questo ha comportato l'aggiornamento del codice di calcolo: da SEAWAT-2000 a SEAWAT 4. Nel seguito, dopo una breve descrizione delle caratteristiche della nuova versione del codice, sono riportate le fasi di implementazione delle simulazioni di calibrazione e verifica, che in alcuni passaggi corrispondono a quanto descritto in CFR per Cantoniera Cavallara (2009).

6.1 Descrizione del codice numerico

SEAWAT è un codice tridimensionale alle differenze finite sviluppato dal Servizio Geologico degli Stati Uniti (United States Geological Survey; USGS) per la simulazione del flusso delle acque sotterranee a densità variabile. SEAWAT 4 (Langevin et al., 2007) è la versione più recente di SEAWAT e, come la precedente versione SEAWAT-2000 (Guo & Langevin, 2002; Langevin et al., 2003), si basa sull'abbinamento del codice di flusso MODFLOW-2000 (Harbaugh et al., 2000) e del codice di trasporto MT3DMS (Zheng & Wang, 1999). La versione 4 di SEAWAT mantiene tutte le funzionalità della precedente ed è retro-compatibile con i set di dati di SEAWAT-2000. SEAWAT 4 include le seguenti novità:

- un pacchetto viscosità (VSC) che permette di rappresentare gli effetti delle variazioni di viscosità sul flusso delle acque sotterranee;
- la possibilità di inserire coefficienti di diffusione unici per ogni componente di MT3DMS, consentendo di utilizzare la diffusività termica per la temperatura e coefficienti di diffusione molecolare per le specie in soluzione;
- la possibilità di calcolare densità e viscosità del fluido in funzione di una o più specie di soluto;

- opzioni aggiuntive per specificare il valore di densità associabile alle condizioni al contorno di carico idraulico specificato.

Il principio di funzionamento di entrambe le versioni del codice è il medesimo e prevede che l'equazione di flusso sia formulata in termini di: carico equivalente di acqua dolce (h_f), densità (ρ) e concentrazione (C). Alla base di tutto, quindi, sta il concetto di carico equivalente di acqua dolce (o *equivalent freshwater head*) che può essere brevemente esemplificato dallo schema riportato in Figura 6.1, dove sono rappresentati due piezometri (A e B) in comunicazione, attraverso un filtro di dimensioni infinitesime posizionato in N, con un acquifero saturo di acqua salata. Il piezometro A è riempito artificialmente di acqua dolce, mentre B contiene la stessa acqua presente nell'acquifero in corrispondenza di N. Il carico di pressione (h_p in L) nel piezometro A è dato da:

$$h_p = \frac{P_N}{\rho_f g}$$

dove P_N è la pressione esercitata dalla colonna di acqua dolce sul punto N (in $ML^{-1}T^{-2}$), ρ_f la sua densità (in ML^{-3}) e g l'accelerazione di gravità (in LT^{-2}). Per cui il carico equivalente di acqua dolce (h_f) in A è dato da:

$$h_f = \frac{P_N}{\rho_f g} + Z_N$$

dove Z_N è la quota del punto N (in L). Allo stesso modo il carico idraulico (h) nel piezometro B è dato da:

$$h = \frac{P_N}{\rho g} + Z_N$$

dove ρ è la densità dell'acqua salata. Il livello dell'acqua nel piezometro B è minore di quello nel piezometro A ($h < h_f$), in relazione al fatto che la densità dell'acqua salata è maggiore di quella dell'acqua dolce ($\rho > \rho_f$). Questo, in estrema sintesi, si traduce nel fatto che in un acquifero dove sono presenti variazioni di salinità, il carico idraulico varia in relazione alla densità dell'acqua e quindi alla concentrazione dei soluti in essa disciolti. La conversione da h ad h_f e viceversa da h_f ad h è possibile utilizzando le seguenti relazioni:

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

$$h = \frac{\rho_f}{\rho} h_f + \frac{\rho - \rho_f}{\rho} Z$$

In SEAWAT quindi l'equazione di flusso è riformulata in termini di h_f , secondo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\rho K_{f\alpha} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \alpha} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\rho K_{f\beta} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\rho K_{f\gamma} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \gamma} \right] \right) \\ = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \bar{\rho} q_s \end{aligned}$$

dove α , β e γ sono le direzioni degli assi del tensore di conducibilità idraulica, Z è la quota (in L), $\bar{\rho}$ e q_s sono rispettivamente la densità dell'acqua (in ML^{-3}) e la portata in ingresso ed uscita dal dominio attraverso le

condizioni al contorno (in T^{-1}) e θ la porosità. I termini $K_{f\alpha}$, $K_{f\beta}$, $K_{f\gamma}$ rappresentano la conducibilità idraulica di acqua dolce lungo le direzioni del tensore di conducibilità idraulica (in LT^{-1}) e sono dati da:

$$K_{f\alpha} = \frac{k_{\alpha}\rho_f g}{\mu_f}$$

$$K_{f\beta} = \frac{k_{\beta}\rho_f g}{\mu_f}$$

$$K_{f\gamma} = \frac{k_{\gamma}\rho_f g}{\mu_f}$$

dove: μ_f è la viscosità dell'acqua dolce in condizioni standard (in $ML^{-1}T^{-1}$) e k_{α} , k_{β} , k_{γ} i valori di conducibilità idraulica lungo i rispettivi assi (in LT^{-1}). Allo stesso modo, S_f è l'immagazzinamento specifico di acqua dolce (in L^{-1}), dato da:

$$S_f = g\rho_f[\xi(1 - \theta) + \zeta_f\theta]$$

con: ξ compressibilità della matrice solida (in $M_{-1}LT^2$) e ζ_f compressibilità dell'acqua dolce (in $M_{-1}LT^2$).

Questa equazione permette l'utilizzo del codice MODFLOW-2000 per la risoluzione del flusso, mentre la componente del trasporto, risolta attraverso MT3DMS, è data da:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \cdot \nabla C) - \nabla \cdot (\vec{v}C) - \frac{q_s}{\theta} C_s + \sum_{k=1}^N R_k$$

dove: D è il coefficiente di dispersione idrodinamica (in L^2T^{-1}), \vec{v} è la velocità del fluido (in LT^{-1}), C_s è la concentrazione in ingresso/uscita dal dominio (in ML^{-3}) e R_k è il tasso di produzione o degradazione del soluto nella reazione k-esima di N diverse reazioni (in $ML^{-3}T^{-1}$). Infine, ∇ è l'operatore gradiente dato da:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$$

Riassumendo e semplificando, il codice SEAWAT permette di simulare il flusso delle acque sotterranee a densità variabile, secondo il metodo di approssimazione alle differenze finite, in quanto:

- l'equazione del flusso utilizza il concetto di carico equivalente di acqua dolce, rendendo così confrontabili tra loro valori di carico idraulico misurati in condizioni di differente densità;
- inserisce nell'equazione di flusso la variazione di densità come funzione della variazione di concentrazione del soluto, normalmente i solidi totali disciolti o in alternativa il cloruro di sodio (NaCl);
- il bilancio del flusso è calcolato come flusso di massa d'acqua e non di volume;
- risolve contemporaneamente le equazione di flusso e trasporto in modo iterativo fin tanto che le distribuzioni di carico idraulico e concentrazione non sono coerenti con i parametri del risolutore.

Come si può intuire la simulazione numerica dei sistemi idrogeologici a densità variabile è una procedura abbastanza complessa che, per dare risultati significativi, necessita di una mole non indifferente di dati riguardanti il carico idraulico e la concentrazione del soluto. Infine, va evidenziato che il flusso a densità variabile, in via teorica può essere simulato solamente allo stato transitorio, mentre è abbastanza chiaro che un sistema quale quello in oggetto (Par. 5) possa essere considerato stazionario, in ragione della modesta variabilità dei dati sino ad oggi acquisiti. In altre parole, poiché fino ad oggi non vi sono evidenze di trend in atto, si può ipotizzare che il bilancio idrogeologico e la massa totale di soluto nell'acquifero non abbiano subito e non subiscano variazioni di rilievo da un anno all'altro.

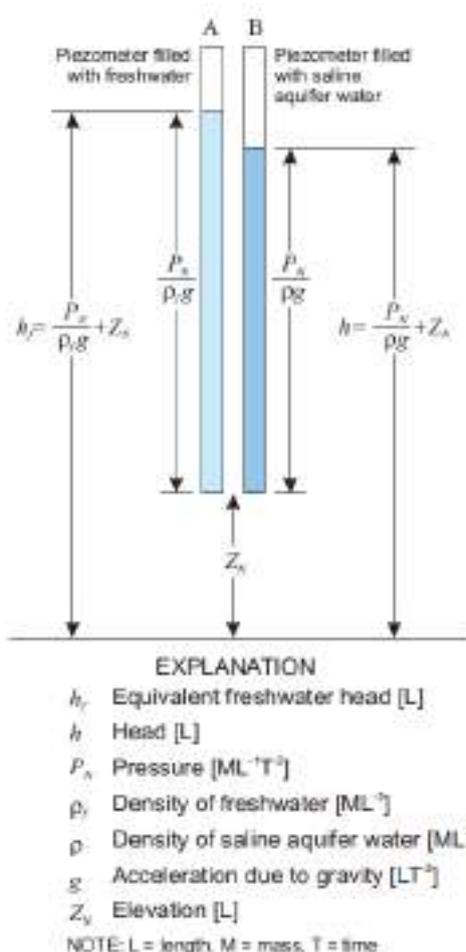


Figura 6.1. Schema esemplificativo del concetto di carico equivalente di acqua dolce (da Guo & Langevin, 2002).

6.2 Implementazione delle simulazioni di calibrazione e verifica

Le simulazioni di calibrazione e verifica implementate sono:

- simulazione C1, lunga 100 anni, riproduce le condizioni ante operam al 2006;

- simulazione C2, lunga 2 anni, riproduce le condizioni in corso d'opera tra il 2007 ed il 2008, con il perimetro e la profondità del lago rilevati in novembre 2008;
- simulazione C3, lunga 9 anni, riproduce le condizioni in corso d'opera tra il 2009 ed il 2017, con il perimetro e la profondità del lago rilevati in novembre 2017;
- simulazione C4, lunga 5 anni, riproduce le condizioni in corso d'opera tra il 2018 ed il 2022, con il perimetro e la profondità del lago rilevati in novembre 2022.

I dataset di calibrazione e verifica utilizzati sono costituiti:

- per la simulazione C1, dai valori medi di carico idraulico e concentrazione rilevati con il monitoraggio in continuo nel periodo 2005-2009 (CFR per cantoniera Cavallara, 2009) e dai valori medi dei logs di salinità realizzati nel 2005-2006 (Par. 3.6);
- per la simulazione C2, dai valori medi dei logs di salinità realizzati nel 2007-2008 (Par. 3.6) e dai dati di monitoraggio idrometrico del lago di cava acquisiti nel periodo 2008-2009 (Par. 3.7);
- per la simulazione C3, dai valori medi dei logs di salinità realizzati nel 2016-2017 (Par. 3.6) e dai dati di monitoraggio del lago di cava acquisiti nello stesso periodo (Par. 3.7);
- per la simulazione C4, dai valori medi dei logs di salinità realizzati nel 2022-2023 (Par. 3.6) e dai dati di monitoraggio del lago di cava acquisiti nello stesso periodo (Par. 3.7).

Tutte le simulazioni di calibrazione/verifica prevedono, indipendentemente dalla durata, la simulazione del flusso allo stato stazionario e quella del trasporto allo stato transitorio. Questo in ragione del fatto che il sistema idrogeologico in questione ha mostrato nel corso di questi anni variazioni di carico idraulico e salinità molto contenute, nonostante l'attività estrattiva sia in corso da settembre 2007. Tutto ciò è legato sia alla costante alimentazione garantita dalla rete idrografica, il cui livello idrometrico è regolato per l'irrigazione e la navigazione (Par. 4.2), e sia dall'apporto pressoché costante che l'infiltrazione delle acque meteoriche ha mantenuto negli anni nonostante il cambiamento climatico in atto (Par. 4.1.2).

I dati sino ad oggi acquisiti confermano che l'asportazione della sabbia ha prodotto una cavità che si è progressivamente riempita di acqua sotterranea dal momento in cui lo scavo ha raggiunto la zona satura, dando luogo ad un lago di cava. Di norma, il livello idrometrico del lago è inferiore al livello delle acque sotterranee circostanti ed è anche inferiore al livello delle acque sotterranee presenti nell'area di cava prima della sua creazione, per cui esso svolge un'azione prevalentemente drenante nei confronti del 1° litosoma sabbioso con cui è in comunicazione. Il drenaggio è regolato dall'intensità con cui l'acqua evapora dalla sua superficie, per cui è maggiore nei mesi estivi e si riduce in quelli invernali o in corrispondenza dei periodi piovosi. In quest'ultimo caso, l'alimentazione diretta da parte della precipitazione può saltuariamente invertire l'azione del lago nei confronti dell'acquifero, rendendolo alimentante anziché drenante. Poiché la posizione e lo spessore della zona di transizione tra l'acqua dolce e quella salata sono regolati dal carico idraulico di acqua dolce, per valutare gli effetti che la presenza del lago può indurre sulla distribuzione della salinità entro l'acquifero è indispensabile riprodurre il più realisticamente possibile l'abbassamento del carico idraulico dovuto all'asportazione della matrice solida. Dal punto di vista numerico le modalità di simulazione dell'abbassamento indotto dalla presenza del lago di cava possono essere di due tipi: diretta ed indiretta. Nel caso della modalità diretta, utilizzata anche in CFR per Cantoniera Cavallara (2009), si ricorre all'assegnazione di proprietà idrodinamiche tali da indurre una sicura diminuzione del carico idraulico nelle celle

corrispondenti al lago ed associando alle stesse una condizione di secondo tipo che riproduca la differenza tra gli afflussi (precipitazione) ed i deflussi (evaporazione) dalla superficie del lago. In questo modo la diminuzione del carico idraulico dovuta all'asportazione della matrice solida viene riprodotta dalla differenza di proprietà tra le celle rappresentanti il lago e l'acquifero, mentre il bilancio sulla sua superficie viene simulato attraverso un flusso in ingresso o in uscita. La seconda modalità, quella di tipo indiretto, prevede la riproduzione dell'interazione acquifero/lago attraverso una condizione di terzo tipo, che però come parametro di input richiede una stima preliminare del livello idrometrico del lago stesso. Non avendo a disposizione formule analitiche che permettano di prevedere il livello del lago al termine dello scavo e non potendo considerare esaustivi i dati di livello idrometrico acquisiti fino ad oggi (Par. 3.7; CFR per Cantoniera Cavallara, 2009; CFR per Cantoniera Cavallara, 2017), a causa delle differenze di estensione e profondità rispetto allo scavo in progetto, si ritiene che, anche in questo caso, la modalità più efficace per la riproduzione dei potenziali effetti del lago sia quella di tipo indiretto, che peraltro ha già dato riscontri positivi nelle simulazioni precedenti (CFR per Magnani, 2006; CFR per Cantoniera Cavallara, 2009).

6.2.1 Discretizzazione spaziale del dominio

In MODFLOW come in SEWAT, la porzione di spazio su cui vengono calcolati e flussi idrici sotterranei è discretizzata attraverso un numero finito di celle a forma di cubo o parallelepipedo (griglia). Per favorire la scelta delle condizioni al contorno da applicare lungo i bordi del dominio, è prassi comune quella di orientare la griglia di discretizzazione secondo la direzione principale di deflusso delle acque sotterranee.

Come nella precedente implementazione, il dominio è un rettangolo di 2000 x 1800 m, con il lato minore orientato di 45° rispetto alla direzione del nord e con il paleovalle ed il sistema dei canali Circondariale e Navigabile ubicati in posizione centrale (Figura 6.2). La griglia di discretizzazione è uniforme e costituita da celle di forma quadrata e dimensione 40 x 40 m, che sul piano XY individuano rispettivamente 50 righe e 45 colonne (Figura 6.2). La scelta di utilizzare una griglia a passo uniforme è dettata dalla necessità di evitare problemi di stabilità per flusso e di dispersione numerica per il trasporto.

Lungo la verticale la griglia è costituita da 16 strati di celle di spessore variabile (layers) in modo da riprodurre l'andamento delle unità idrostratigrafiche individuate (Par. 2.3). Nel seguito sono riportati i passaggi con cui nell'implementazione del 2009 si è ottenuta la discretizzazione verticale (CFR per Cantoniera Cavallara, 2009):

- elaborazione del Digital Elevation Model (DEM) dell'area di studio in formato Triangulated Irregular Network (TIN) a partire dal modello altimetrico della Provincia di Ferrara in formato vettoriale e sua conversione in formato raster attraverso il software ArcGis 9.0 (©ESRI);
- interpolazione delle superfici di separazione tra le unità idrostratigrafiche attraverso l'algoritmo dell'Inverse Distance Weighted (IDW; Davis, 2002) a partire dai dati geognostici disponibili; le superfici ricostruite sono:
 - letto dello strato limoso superficiale;
 - letto del 1° litosoma sabbioso;
 - letto dello strato limoso-argilloso interposto tra i due litosomi sabbiosi;
 - letto del 2° litosoma sabbioso.
- suddivisione del 1° litosoma sabbioso in 10 layers di spessore costante;

- suddivisione dello strato limoso-argilloso interposto tra i litosomi sabbiosi in 2 layers di spessore costante;
- suddivisione del 2° litosoma sabbioso in 2 layers di spessore costante;
- inserimento di un layer di spessore costante pari a 2 m sul fondo del dominio per riprodurre la porzione superiore dello strato argilloso-limoso che svolge la funzione di acquicludo alla base del sistema.

La configurazione finale prevede (Figura 6.3):

- layer 1 corrispondente allo strato limoso superficiale, delimitato al tetto dalla superficie topografica;
- layers da 2 a 11 corrispondenti al 1° litosoma sabbioso, quello interessato dall'attività estrattiva;
- layers da 12 a 13 corrispondenti allo strato limoso-argilloso interposto tra i due litosomi sabbiosi;
- layers da 14 a 15 corrispondenti al 2° litosoma sabbioso;
- layer 16 corrispondente alla porzione più superficiale dello strato argilloso-limoso ubicato alla base del sistema.

La presenza del layer 16 è legata unicamente alla necessità di inserire una condizione di concentrazione alla base del sistema oggetto di simulazione.

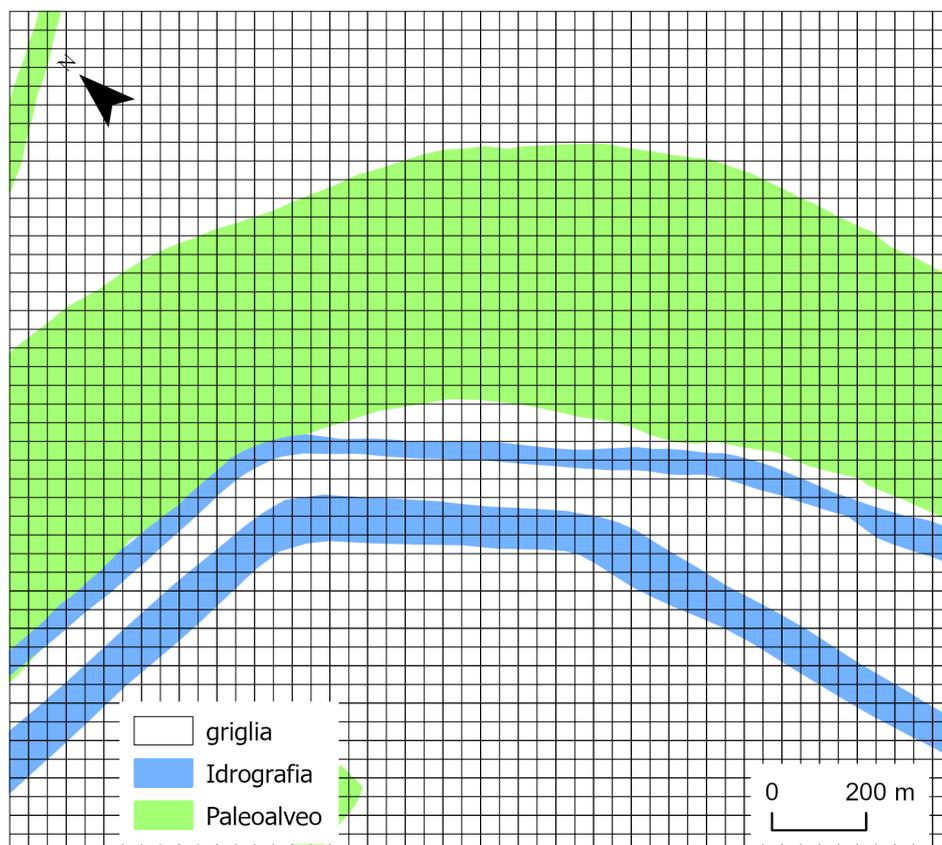
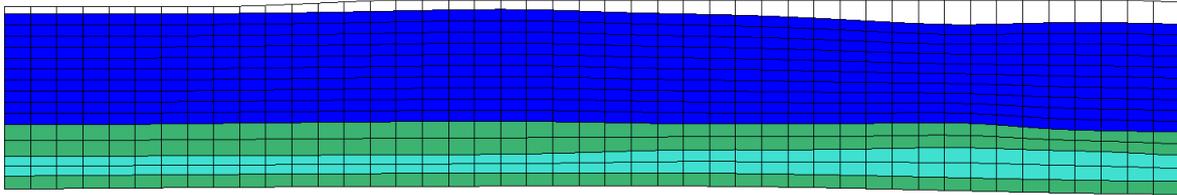


Figura 6.2. Griglia di discretizzazione del dominio nel piano XY.

a)



b)

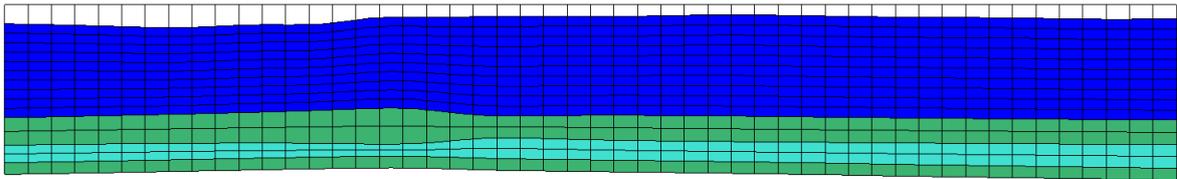


Figura 6.3. Discretizzazione verticale: a) lungo la riga 25 e b) lungo la colonna 25; fattore di esagerazione verticale 1 a 10; in bianco le celle corrispondenti all'acquitrando superficiale, in blu quelle del 1° litosoma sabbioso, in verde quelle dell'acquitrando alla base dell'acquifero e dell'acquiclude alla base di tutto il sistema ed in ciano le celle corrispondenti 2° litosoma sabbioso.

6.2.2 Discretizzazione temporale e metodi risolutivi

La variabile tempo in SEAWAT, come in MODFLOW, viene discretizzata in unità temporali chiamate stress periods (SP). All'interno di ciascun SP gli stress applicati al sistema (flussi in entra/uscita) si mantengono costanti. I metodi di risoluzione di tipo iterativo necessitano di una ulteriore suddivisione di tali unità di tempo in unità di rango inferiore chiamate time steps (TS). Al termine di ogni TS viene calcolata una soluzione. Per quanto riguarda il trasporto dei soluti, MT3D-MS richiede la definizione di unità temporali specifiche denominate transport time steps (TTS). I TTS vengono definiti all'interno dei TS e la loro ampiezza dipende dalla tecnica risolutiva utilizzata per la componente advettiva del trasporto. Quando non definita a priori, la dimensione dei TTS viene stimata a partire dalla dimensione delle celle, dai parametri idrodinamici e da quelli idrodispersivi della simulazione. In SEAWAT, quindi, la variabile tempo viene discretizzata su 3 livelli gerarchici: gli stress periods, i time steps ed i transport time steps.

Viste le caratteristiche di stazionarietà mostrate dal sistema, per ogni simulazione di calibrazione si è scelto di mantenere la strategia utilizzata nell'implementazione del 2009 (CFR per Cantoniera Cavallara, 2009), abbinando al flusso in stazionario un trasporto in transitorio. Indipendentemente dalla durata della simulazione, il tempo è stato discretizzato attraverso 1 solo SP, suddiviso in 20 TS di ampiezza variabile secondo una progressione geometrica con moltiplicatore pari a 1.1. L'ampiezza dei TTS, all'interno di ciascun TS, è variabile e regolata in automatico dai parametri del risolutore di trasporto utilizzato. La prima simulazione di calibrazione (C1) ha una durata tale da permettere al trasporto di raggiungere una condizione di equilibrio, vale a dire 100 anni (36500 giorni). Le altre simulazioni di verifica hanno una durata che è legata al tempo trascorso tra le varie campagne di monitoraggio e che risulta rispettivamente pari a 2 anni per C2 (730 giorni, dal 2006 al 2008), a 9 anni per C3 (3285 giorni, dal 2009 al 2017) e a 5 anni per C4 (1825 giorni, dal 2018 al 2022).

SEAWAT nasce dalla combinazione di due codici preesistenti: MODFLOW-2000 per il flusso e MT3D-MS per il trasporto, per cui la risoluzione del sistema di equazioni differenziali richiede la scelta di un risolutore per ciascuno dei processi simulati.

Per quanto riguarda il flusso è stato utilizzato il Preconditioned Conjugate-Gradient Package (PCG2; Hill, 1990), con il quale il sistema di equazioni algebriche viene risolto iterativamente secondo la tecnica del gradiente coniugato preconditionato. Questo risolutore è in grado di risolvere sistemi di equazioni lineari e la convergenza è stabilita attraverso due criteri che verificano rispettivamente le variazioni di carico idraulico (HCLOSE) e di bilancio di massa (RCLOSE) su tutte le celle tra un'iterazione e la successiva. Per garantire l'adeguatezza delle soluzioni numeriche e per mantenere la discrepanza percentuale del bilancio di massa entro $\pm 2\%$, sono stati utilizzati valori soglia pari a $1.0E-06$ m per HCLOSE ed a $10.0 \text{ m}^3/\text{d}$ per RCLOSE. Per il trasporto è stato utilizzato il Third-Order Total-Variation-Diminishing Scheme (TVD; Zheng & Wang, 1999). Questo schema, che è molto conservativo per il bilancio di massa, risolve la componente advettiva del trasporto basandosi sull'algoritmo Universal Limiter for Transient Interpolation Modeling of the Advective Transport Equations (ULTIMATE; Zheng & Wang, 1999). L'impiego del TVD comporta minore dispersione numerica e minori oscillazioni in quegli scenari in cui sono presenti brusche variazioni di concentrazione. Infine, per mantenere i tempi di calcolo entro limiti accettabili, ed essendo predominante la componente advettiva del trasporto, si è scelto di risolvere le equazioni di trasporto in modalità esplicita rispetto al flusso. Tale scelta comporta che i termini dell'equazione di trasporto riguardanti la dispersione ed i sink/source (prelievi/alimentazioni) sono simulati attraverso un'approssimazione alle differenze finite e stimati con i risultati del TS di flusso precedente.

6.2.3 Parametrizzazione delle unità idrogeologiche

La parametrizzazione consiste nell'assegnazione dei parametri idrodinamici ed idrodispersivi alle diverse unità idrostratigrafiche rappresentate nel dominio di modellazione.

Una simulazione di flusso allo stato stazionario necessita della definizione del solo parametro conducibilità idraulica (K , in LT^{-1}) lungo le 3 direzioni dello spazio utilizzate per la discretizzazione del dominio. Per cui i parametri da attribuire alle unità idrostratigrafiche sono: K_x , K_y e K_z . Nel caso in questione, si assume anche che il tensore di conducibilità idraulica di ciascuna unità sia allineato secondo la direzione principale di deflusso delle acque sotterranee, per cui: $\alpha//x$, $\beta//y$ e $\gamma//z$. Inoltre, trattandosi di simulazioni di flusso in stazionario non risulta necessario definire i parametri dell'immagazzinamento (potenzialità specifica e immagazzinamento specifico).

I solidi totali disciolti (TDS) delle acque a maggiore salinità sono costituiti in prevalenza da cloruro di sodio (CFR per Cantoniera Cavallara, 2009), che è una specie chimica soggetta a degradazione ed adsorbimento trascurabili. Per questa ragione si è scelto di limitare il trasporto alle sole componenti advettiva e dispersiva. Il trasporto advettivo-dispersivo richiede la definizione dei seguenti parametri:

- porosità totale (n , adimensionale) o porosità efficace (n_e , adimensionale), la prima corrispondente al rapporto fra il volume dei vuoti e il volume totale del mezzo poroso e la seconda pari al rapporto fra il volume dei vuoti comunicanti ed attraversabili dall'acqua gravifica ed il volume totale del mezzo poroso;

- dispersività (α , in L), si tratta di una proprietà intrinseca del mezzo poroso che regola il processo della dispersione lungo le 3 direzioni di trasporto: longitudinale, trasversale e verticale;
- coefficiente di diffusione molecolare (D^* in L^2T^{-1}), esprime la capacità del soluto di espandersi per effetto del gradiente di concentrazione.

La dispersione idrodinamica (D in L^2T^{-1}) è il processo fisico che provoca il progressivo allargamento della massa di soluto durante il trasporto, diminuendone la concentrazione massima ed il tempo di transito. La dispersione è causata dalla distribuzione delle velocità del fluido intraporo ed interporo, in relazione agli effetti di attrito ed alla tortuosità dei percorsi tra i pori interconnessi. La dispersione idrodinamica è data da:

$$D = \alpha_L \cdot \frac{V_L^2}{|v|} + \alpha_T \cdot \frac{V_T^2}{|v|} + \alpha_V \cdot \frac{V_V^2}{|v|} + D^*$$

dove: α_L , α_T ed α_V sono le dispersività longitudinale, trasversale e verticale (in L), V_L , V_T e V_V sono le velocità di filtrazione lungo le medesime direzioni di trasporto e $|v|$ è la magnitudo della velocità di filtrazione. Anche in questo caso si assume che la direzione di trasporto principale (quella longitudinale) sia allineata secondo la direzione di flusso prevalente delle acque sotterranee. MT3DMS, e di conseguenza SEWAT, calcolano il tensore di dispersività a partire dai valori di α_L e D^* ed utilizzano i rapporti α_T/α_L e α_V/α_L per definire i valori della dispersività nelle altre due direzioni. La scelta di limitare il trasporto alle componenti advettiva e dispersiva comporta l'uso di n_e anziché n . L'uso della porosità totale, infatti, è più appropriato quando le velocità di filtrazione risultano più basse di quelle presenti nell'acquifero oggetto di studio e la componente diffusiva del trasporto diviene predominante sulla dispersione.

In MODFLOW, MT3DMS e SEAWAT è prevista la possibilità di assegnare le proprietà per zone. Le zone sono gruppi di celle, dello stesso layer o di layers diversi, a cui vengono associati i medesimi valori di una determinata proprietà. Nel caso in questione, la zonazione coincide con le unità idrostratigrafiche individuate.

I valori delle proprietà idrodinamiche ed idrodispersive sono riportati in Tabella 6.1, mentre l'andamento lungo la verticale delle zone utilizzate per l'assegnazione di tali valori è mostrato in Figura 6.3. Si tratta degli stessi valori utilizzati per l'implementazione del 2009 (CFR per Cantoniera Cavallara, 2009) e che sono derivati dai dati di campo disponibili (slug test e prova di tracciamento) e dalla calibrazione dei dati di monitoraggio in continuo acquisiti nel periodo 2005-2009. Per quanto concerne α_L , la forma e lo spessore della zona di transizione rilevata attraverso i logs di salinità suggeriscono una differenziazione tra i layers da 1 a 11 (zone 1 e 2) ed i layers da 12 a 16 (zone 3 e 4). I rapporti α_T/α_L e α_V/α_L sono stati fissati rispettivamente pari a 0.1 e 0.001 per tutti i layer del dominio. Inoltre, congruentemente con la scelta di utilizzare la porosità efficace anziché quella totale, si è scelto di trascurare gli effetti della diffusione molecolare assegnando a D^* un valore pari a 0. Tale semplificazione è dettata ancora una volta dall'analisi dei dati di campo: la buona permeabilità dell'acquifero ed il modesto spessore dell'interfaccia tra l'acqua dolce e quella salata suggeriscono che la diffusione molecolare sia un fenomeno marginale all'interno del sistema in oggetto.

Zona	K_x (m/s)	K_y (m/s)	K_z (m/s)	n_e (-)	α_L (m)
1	5.00E-05	5.00E-05	5.00E-06	0.25	50
2	2.00E-04	2.00E-04	2.00E-05	0.30	50
3	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-07	0.10	15
4	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-04	0.30	15

Tabella 6.1. Valori di conducibilità idraulica (K), porosità efficace (n_e) e dispersività longitudinale (α_L) associati alle unità idrostratigrafiche attraverso le zone.

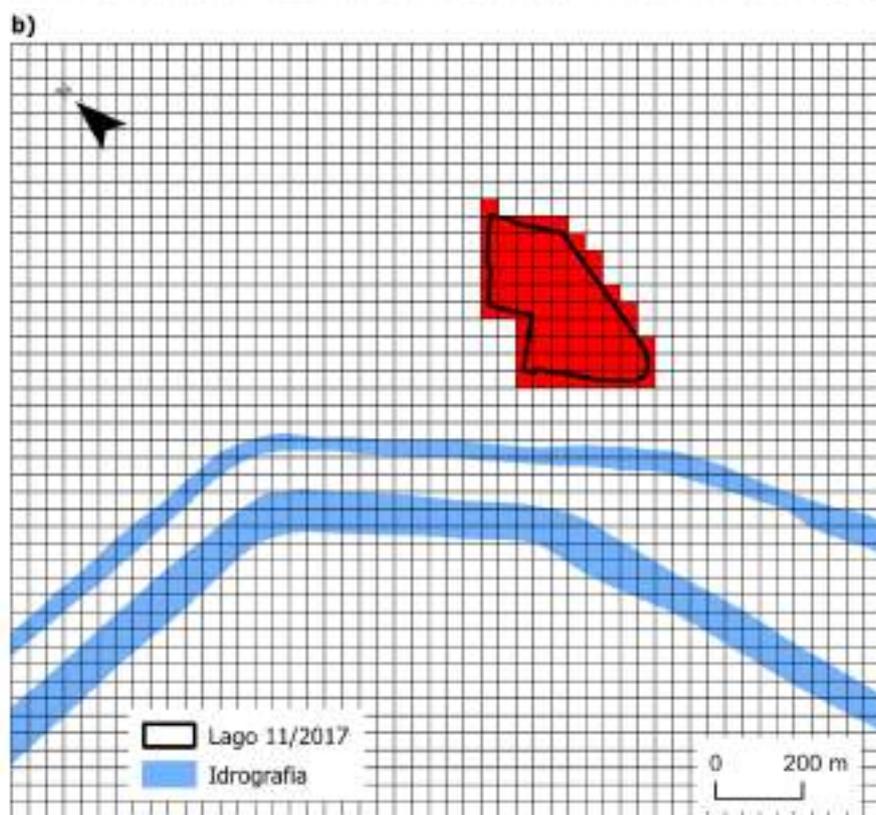
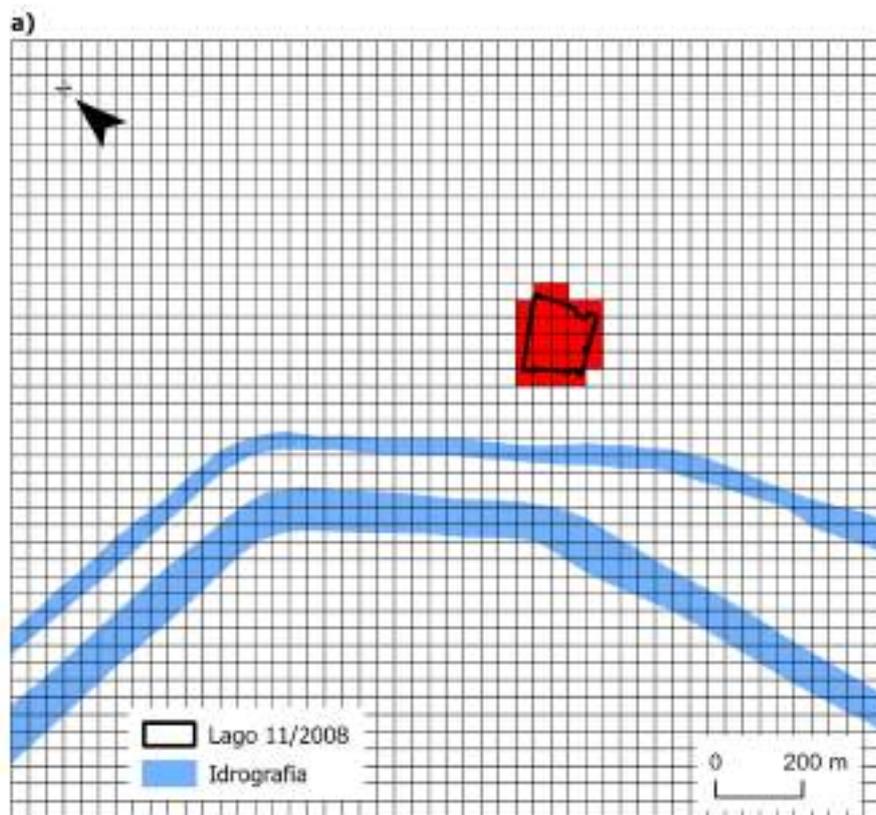
6.2.4 Parametrizzazione del lago di cava

La parametrizzazione del lago di cava nelle simulazioni di verifica C2, C3 e C4 ha previsto l'individuazione di una nuova zona e l'assegnazione delle proprietà idrodinamiche ed idrodispersive riportate in Tabella 6.2. Si tratta degli stessi valori utilizzati nell'implementazione del 2009 (CFR per Cantoniera Cavallara, 2009), che per quanto riguarda la conducibilità idraulica risultano superiori di oltre 4 ordini di grandezza rispetto a quelli della sabbia (Tabella 6.1) e per la porosità efficace riproducono un mezzo privo di matrice solida. In entrambi i casi si tratta di valori adeguati a simulare la diminuzione del carico idraulico in corrispondenza del lago di cava. I restanti parametri idrodispersivi (α_L , α_T/α_L , α_V/α_L e D^*) rimangono invariati rispetto alle unità idrostratigrafiche per non introdurre problemi di instabilità numerica. Si tratta comunque di un espediente a favore della conservatività, in quanto nel lago la dispersione idrodinamica dovrebbe essere un processo molto meno attivo rispetto all'acquifero. Nel piano XY, la parametrizzazione del lago di cava coinvolge un numero progressivamente maggiore di celle in relazione all'aumento progressivo della sua estensione (Figura 6.4), mentre lungo la verticale la parametrizzazione del lago di cava riguarda (Figura 6.5):

- le celle dei layers da 1 a 4 (7 m di profondità) per le simulazioni C2 e C3;
- le celle dei layers da 1 a 7 (12 m di profondità) per la simulazione C4.

Zona	K_x (m/s)	K_y (m/s)	K_z (m/s)	n_e (-)	α_L (m)
5	1.00	1.00	1.00	0.99	50

Tabella 6.2. Valori di conducibilità idraulica (K) e di porosità efficace (n_e) assegnati alle celle rappresentanti il lago nelle simulazioni di verifica.



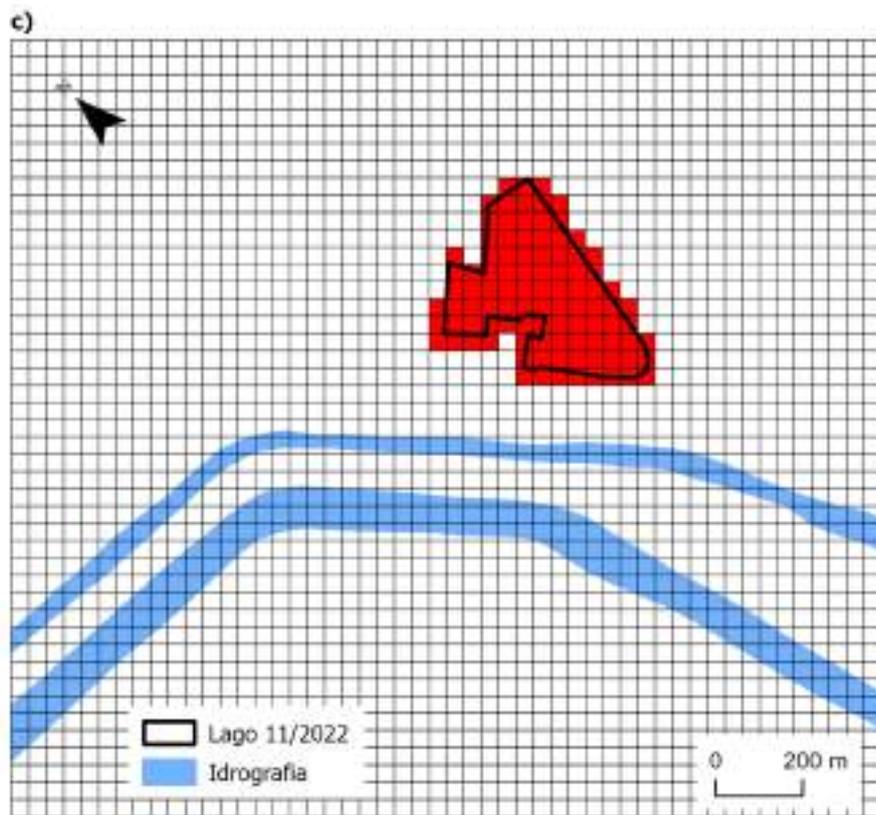


Figura 6.4. Parametrizzazione delle celle corrispondenti al lago (in rosso) per le simulazioni: a) C2, b) C3 e c) C4.

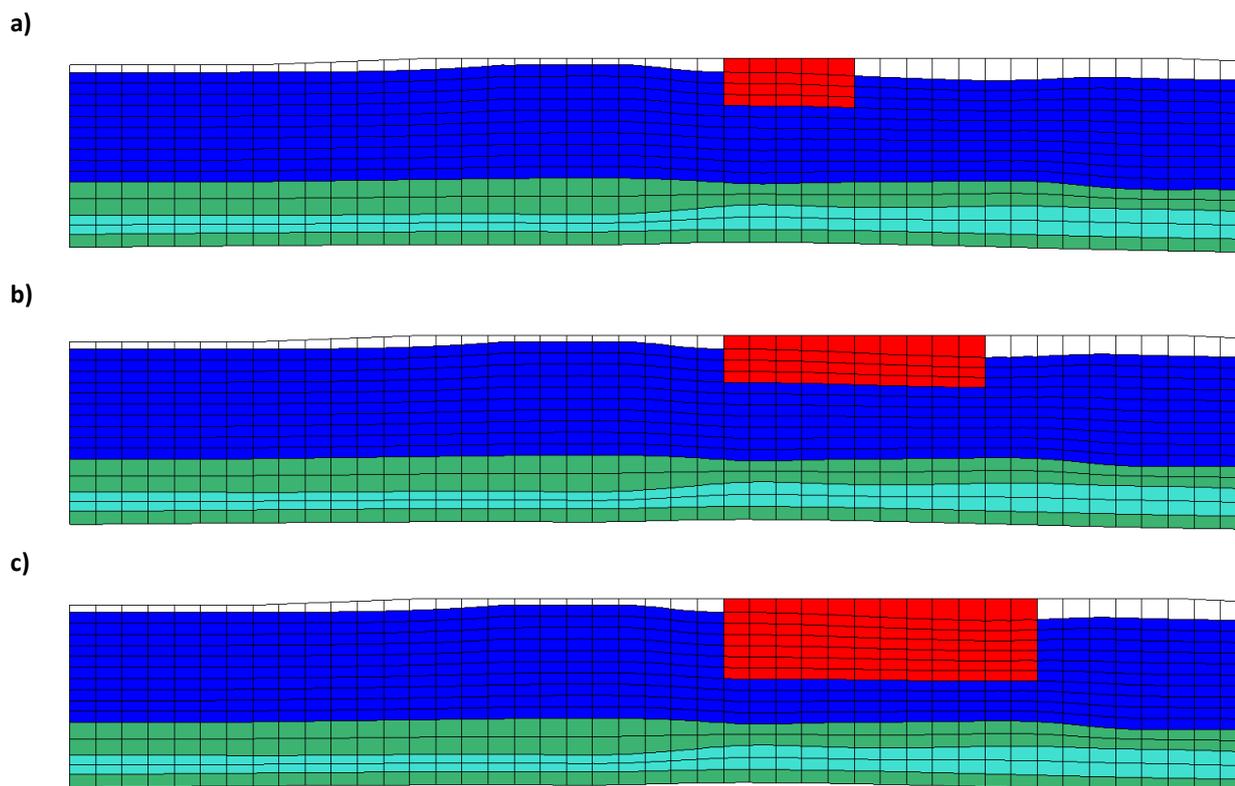


Figura 6.5. Parametrizzazione delle celle corrispondenti al lago di cava (in rosso) lungo la riga 30 della griglia di discretizzazione (vista da SO verso NE) per le simulazioni: a) C2, b) C3 e c) C4; fattore di esagerazione verticale 1 a 10; i valori dei parametri di ciascuna zona sono riportati in Tabella 6.1 ed in Tabella 6.2.

6.2.5 Conversione dei valori di conducibilità in concentrazioni di solidi totali disciolti (TDS)

Il soluto che viene simulato è espresso in termini di concentrazione totale dei solidi disciolti (TDS) e poiché gran parte dei dati di salinità sono stati acquisiti in modo indiretto, attraverso la misura della conducibilità elettrica specifica a 25°C (SpCE), è necessario utilizzare una relazione sito-specifica per la conversione della SpCE (in $\mu\text{S}/\text{cm}$) in TDS (in mg/l). La relazione è la stessa definita in CFR per Cantoniera Cavallara (2009), ed è data da:

$$TDS = 2 \cdot 10^{-5} \cdot SpCE^2 + 0.3277 \cdot SpCE + 711.86$$

Si tratta di una relazione sperimentale derivata dalla caratterizzazione idrochimica delle acque sotterranee presenti nel sito di studio, con particolare riguardo verso quelle salate.

6.2.6 Condizioni al contorno ed interne

L'unicità della soluzione di un sistema di equazioni differenziali, come quello che viene risolto da SEAWAT, richiede la definizione dei rapporti tra l'interno e l'esterno del dominio di modellazione nelle celle ubicate lungo i bordi della griglia (condizioni al contorno) ma anche nei punti in cui è prevista l'applicazione di particolare stress (condizioni interne). SEAWAT prevede la definizione di condizioni al contorno ed interne

sia per il flusso che per il trasporto, così come prevede la loro variabilità rispetto al tempo attraverso la definizione del valore per ciascuno degli stress period con cui è discretizzato il tempo.

Le condizioni al contorno ed interne utilizzate nelle simulazioni di calibrazione/verifica sono le medesime dell'implementazione del 2009 (CFR per Cantoniera Cavallara, 2009). L'unica differenza riguarda la scelta di semplificare la modalità di rappresentazione del bilancio sulla superficie del lago, non più attraverso due condizioni interne: una per la precipitazione e l'altra per l'evaporazione, ma una sola condizione di secondo tipo che riproduce il flusso risultante dalla differenza tra i valori medi annui di precipitazione ed evaporazione.

Lungo i bordi della griglia sono applicate le seguenti condizioni al contorno (Figura 6.6 e Figura 6.7):

- condizioni di flusso nullo (o di secondo tipo o di Neumann) sono applicate sui limiti nord occidentale e sud orientale del dominio attivo, così come alla base dell'ultimo layer (16). La condizione di flusso nulla implica l'assenza di scambi idrici tra l'interno e l'esterno del dominio, attraverso i bordi cui sono applicate. Nel caso della base del sistema si ipotizza che attraverso l'acquicluda argilloso-limoso ubicato alla base del 2° litosoma sabbioso non vi siano scambi idrici significativi con gli acquiferi sottostanti. Per quanto riguarda i limiti NO e SE, si tratta di un espediente modellistico giustificato dalla direzione prevalente di deflusso delle acque sotterranee, dal paleoalveo verso NNE, che comporta una minima alterazione della distribuzione del carico idraulico al di fuori dell'area di interesse.
- Condizioni di carico idraulico specificato (o di primo tipo o di Dirichlet), per garantire un adeguato gradiente idraulico tra i canali Navigabile e Circondariale ed i limiti nord orientale e sud occidentale del dominio di modellazione, a questi ultimi è assegnata una condizione di carico idraulico specificato attraverso il Constant Head package (CHD), con valore pari a -2.5 m s.l.m. su tutti i 16 layers. Nel caso del limite NE, tale valore è supportato dai dati di monitoraggio, mentre sul limite opposto (SO) è derivato per simmetria del sistema rispetto alla rete idrografica.
- Condizione di concentrazione costante, in abbinamento ai CHD sono utilizzate due condizioni di concentrazione costante (o Constant Concentration) pari a 50 g/l (50000 mg/l) sui layers da 2 a 16. Tale condizione serve a riprodurre la presenza dell'acqua salata in posizione distale rispetto al sistema costituito dalla rete idrografica e dal paleoalveo.

Internamente al dominio sono applicate le seguenti condizioni interne (Figura 6.8 e Figura 6.9):

- infiltrazione, rappresenta il quantitativo di acqua che, per azione delle piogge o altre attività antropiche quali l'irrigazione, attraversa lo spessore insaturo di sottosuolo e raggiunge la tavola d'acqua alimentando il deflusso sotterraneo. L'infiltrazione è simulata attraverso il Recharge Package (RCH), una condizione di flusso assegnato (o di secondo tipo) applicata a tutte le celle del 1° layer e differenziata tra il paleoalveo ed il resto del dominio, con valori rispettivamente pari a 100 e 10 mm/anno. Si tratta di valori che corrispondono al 15.53% ed all'1.55% della precipitazione media annua registrata presso la stazione di Guagnino nel periodo 2012-2022 (Par. 4.1). All'infiltrazione è abbinata una Recharge Concentration pari a 1.2 g/l (1200 mg/l) che riproduce il progressivo arricchimento in TDS delle acque di infiltrazione durante l'attraversamento dello spessore insaturo di sottosuolo.

- Interazione acque superficiali/sotterranee, lo scambio tra la rete idrografica e l'acquifero è simulato attraverso il River Package (RIV), vale dire una condizione di terzo tipo (o di Cauchy). La condizione è assegnata alle celle che corrispondono alla rete idrografica ed il trasferimento di portata (Q) viene calcolato cella per cella attraverso:

$$Q = (h_s - h) \cdot C = (h_s - h) \cdot L \cdot W \cdot \left(\frac{K_z}{b} \right)$$

- dove: C è la conduttanza (in L²T⁻¹), h_s è il livello idrometrico del fiume (in L), h il carico idraulico calcolato nelle celle circostanti (in L), L è la lunghezza del corso d'acqua entro la cella (in L), W la larghezza del corso d'acqua entro la cella (in L), K_z e b rispettivamente la conducibilità idraulica (in LT⁻¹) e lo spessore dello strato di subalveo che separa il corso d'acqua dall'acquifero (in L). Alle celle corrispondenti al Canale Navigabile è assegnato un livello idrometrico di 1.5 m s.l.m. (Par. 4.2.1), mentre la quota del fondo del subalveo è fissata a -3 m s.l.m. e la sua larghezza è derivata dalla Carta Tecnica Regionale (CTR) dell'Emilia-Romagna alla scala 1:5000. Alle celle corrispondenti al Canale Circondariale, invece, è assegnato un livello idrometrico di -1 m s.l.m. (Par. 4.2.2), una quota del fondo del subalveo pari a -3 m s.l.m. ed una larghezza derivata dalla CTR alla scala 1:5000. La conduttanza ha valori variabili ed è derivata dalla calibrazione delle simulazioni del 2009. I valori sono compresi tra 0.552 e 0.998 m²/giorno per il Canale Navigabile e tra 11.059 e 20.938 m²/giorno per il Circondariale. Lungo la verticale la boundary viene associata al layer la cui base è inferiore alla quota del subalveo, per cui entrambe le boundaries risultano associate ai layers da 1 a 3. Infine, per tenere conto della concentrazione salina delle acque in ingresso al dominio attraverso lo scambio con la rete idrografica, ad entrambe le condizioni è associata una concentrazione di TDS pari a 0.975 g/l (975 mg/l). Si tratta di un valore derivato dal monitoraggio in continuo della rete idrografica realizzato nel 2008-2009 (CFR per Cantoniera Cavallara, 2009).
- Condizione di concentrazione costante, è abbinata a tutte le celle del layer 16 con valore costante e pari a 50 g/l (50000 mg/l), per riprodurre la presenza delle acque salate/salmastre alla base del sistema.
 - Bilancio sulla superficie del lago, per riprodurre la differenza tra afflussi e deflussi sulla superficie del lago nelle simulazioni di verifica, alle celle del layer 1 corrispondenti al lago (Figura 6.4) è assegnata una condizione RCH con valore pari a -320 mm/anno. Si tratta della differenza tra la precipitazione e l'evaporazione utilizzate in CFR per Cantoniera Cavallara (2009). Alla condizione di flusso è abbinata una condizione di concentrazione (Recharge Concentration, RC) pari a 0.01 g/l (10 mg/l) che riproduce la salinità del flusso in uscita dal dominio di modellazione.

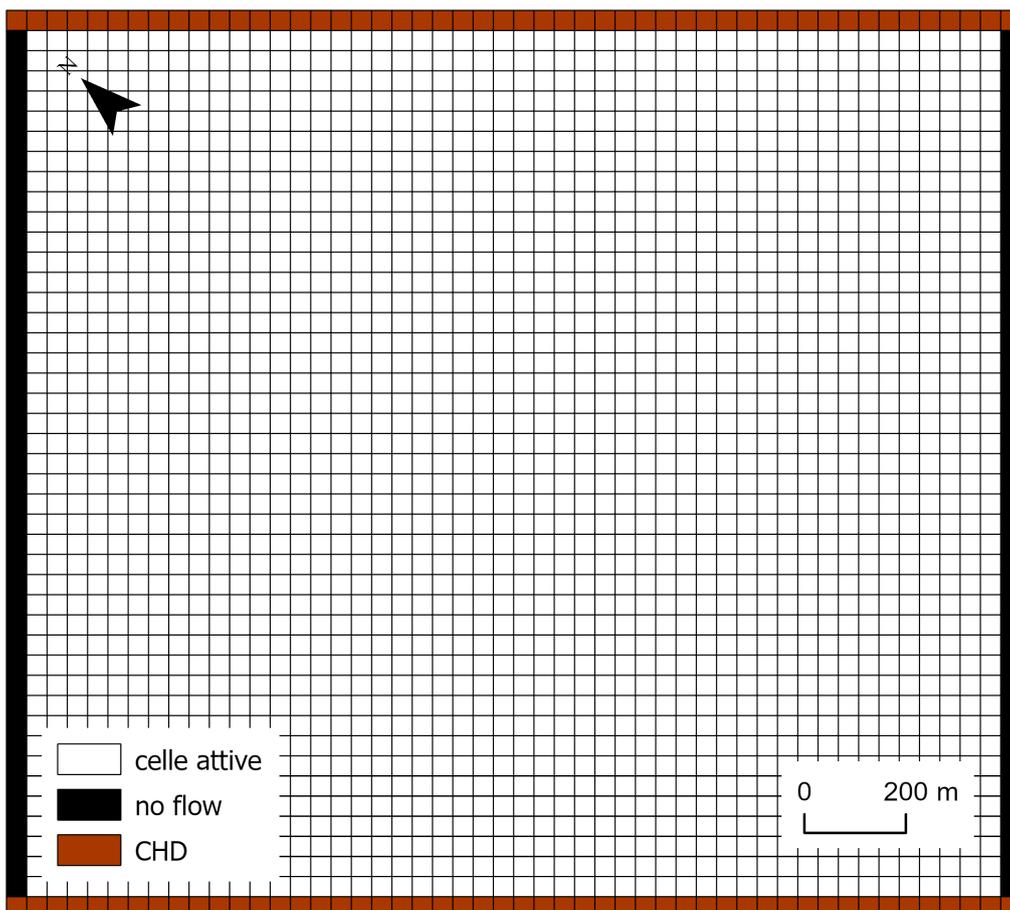
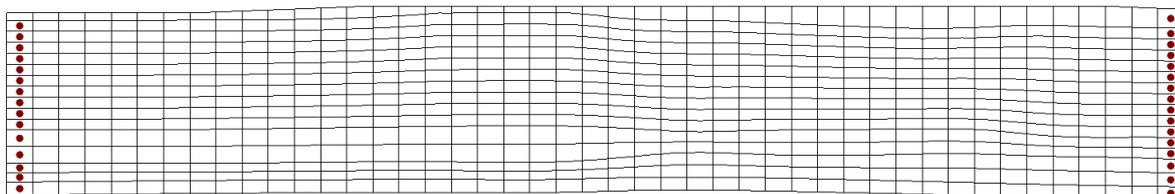


Figura 6.6. Rappresentazione delle condizioni al contorno assegnate sul piano XY: in marrone le celle con carico idraulico specificato (CHD) e concentrazione costante, in nero le celle con flusso nullo (no flow).

a)



b)

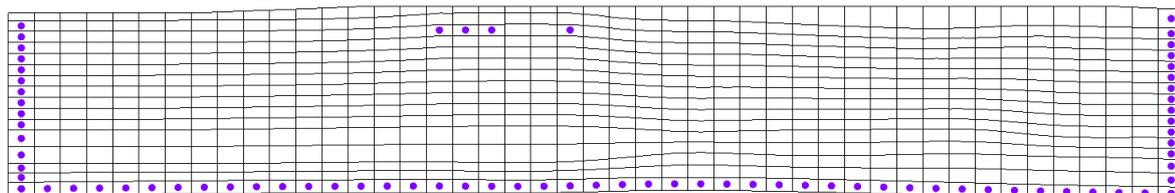


Figura 6.7. Rappresentazione delle condizioni al contorno lungo la riga 30: a) in marrone le condizioni di carico idraulico specificato (CHD) e b) in viola le condizioni di concentrazione costante associate a CHD, RIV ed al layer 16.

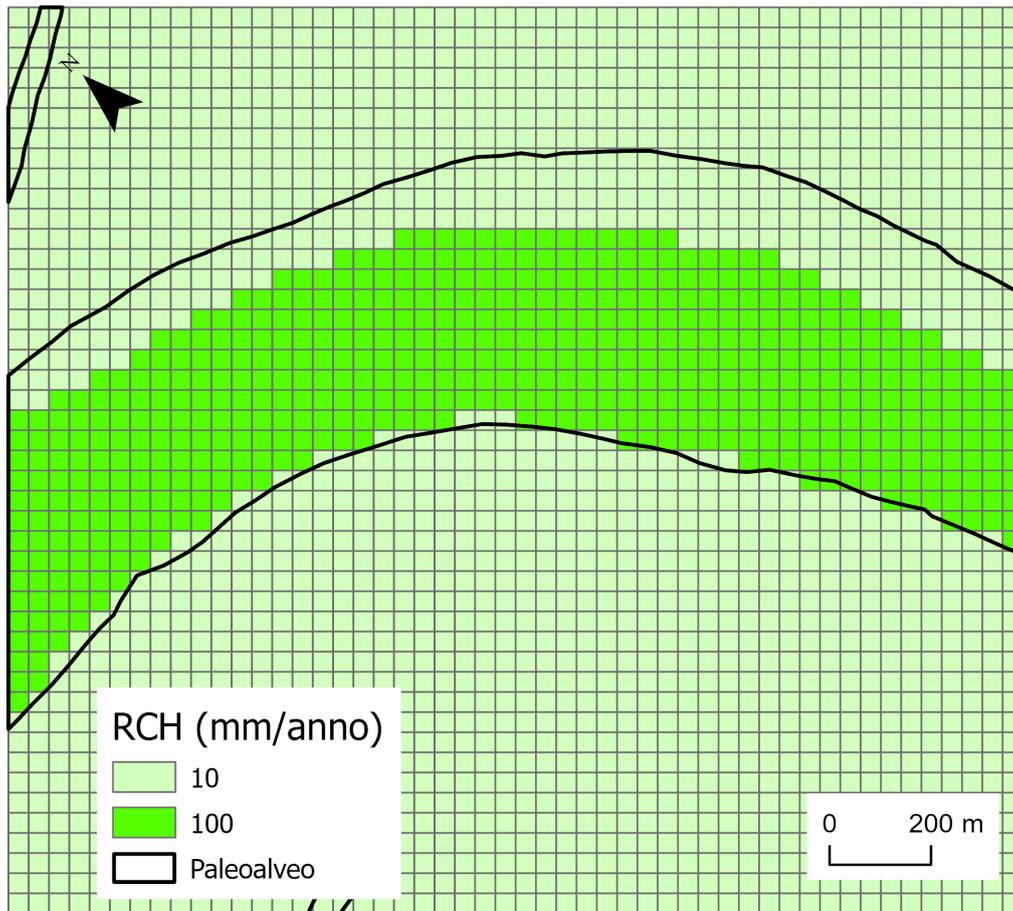


Figura 6.8. Rappresentazione delle condizioni interne per la simulazione dell'infiltrazione (RCH); in nero il limite del paleoalveo secondo la Carta Geomorfologica della Provincia di Ferrara.

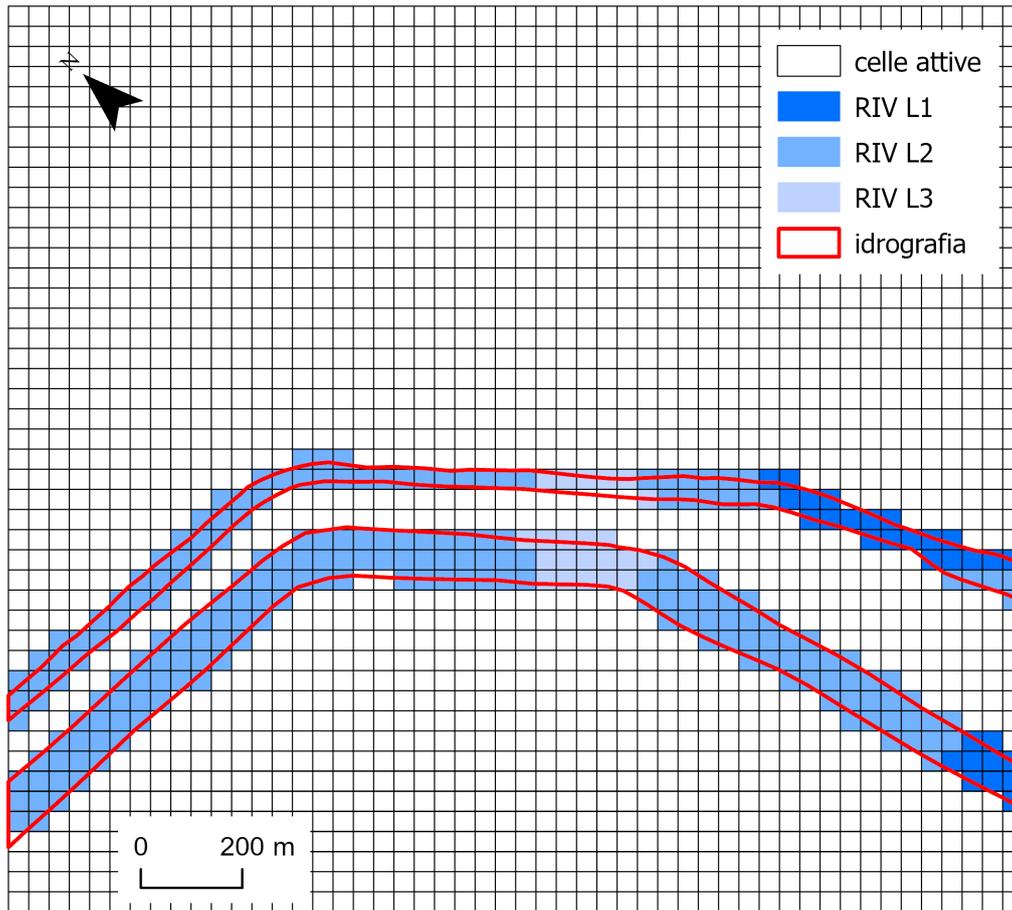


Figura 6.9. Rappresentazione delle condizioni interne per la simulazione dell'interazione acque superficiali/sotterranee sui layers 1 (RIV L1), 2 (RIV L2) e 3 (RIV L3); in rosso la rete idrografica.

6.2.7 Distribuzione iniziale del carico idraulico e della salinità

L'approssimazione alle differenze finite richiede la definizione di condizioni iniziali e quindi di una distribuzione del carico idraulico e di una distribuzione di concentrazione che forniscano i valori iniziali di h e C per tutte le celle attive del dominio. Nel transitorio questo aspetto è tanto più importante quanto più è breve il tempo di simulazione, poiché c'è il rischio che il risultato finale risenta delle distribuzioni iniziali e non sia in equilibrio con le condizioni al contorno ed interne. Per cui in questo caso è indispensabile che le distribuzioni iniziali siano il più vicine possibile alla realtà. Viceversa, allo stato stazionario il raggiungimento della convergenza garantisce che la soluzione sia in equilibrio con le boundaries, per cui in questo caso la scelta delle distribuzioni può essere meno aderente alla realtà.

La scelta di abbinare un flusso in stazionario ed un trasporto in transitorio per un tempo molto lungo (100 anni) alla simulazione C1 non pone particolari problemi nella scelta delle condizioni iniziali. Il trasporto, infatti, ha il tempo di mettersi in equilibrio con le condizioni assegnate. Per quanto riguarda la distribuzione iniziale di carico idraulico viene utilizzato un valore costante su tutte le celle del dominio pari a 1.5 m s.l.m., in accordo

con il livello idrometrico del Canale Navigabile (Par. 6.2.7), mentre per la concentrazione si utilizza un valore costante di TDS pari a 50 g/l (50000 mg/l). In questo caso l'idea è quella di riprodurre l'evoluzione della salinità nell'acquifero in questione a seguito della modifica della rete idrografica e lo scavo del sistema dei canali Circondariale e Navigabile avvenuto a partire dal dopoguerra.

Le distribuzioni iniziali delle simulazioni di verifica C2, C3 e C4 vengono sempre derivate dai risultati delle simulazioni che le precedono temporalmente, per cui:

- C2 utilizza i risultati di C1 in termini di h e C;
- C3 utilizza quelli di C2;
- C4 utilizza quelli di C3.

Questo espediente permette di riprodurre l'evoluzione temporale del sistema a partire da una condizione di equilibrio iniziale corrispondente all'ante operam.

6.3 Risultati delle simulazioni di calibrazione e verifica

6.3.1 Approccio metodologico

Una simulazione numerica di flusso a densità variabile, al fine di essere considerata affidabile, deve riprodurre con un grado di approssimazione accettabile le distribuzioni di carico idraulico e concentrazione ed i flussi sperimentalmente misurati entro il sistema naturale oggetto di simulazione. La procedura con cui, variando i parametri di input e le condizioni al contorno ed interne assegnate al dominio di modellazione, entro determinati range dettati dai dati sperimentali e/o dalle caratteristiche idrogeologiche del mezzo, fino al raggiungimento di un buon grado di approssimazione tra i risultati della simulazione e le misure sperimentali disponibili, prende il nome di calibrazione (Anderson et al., 2015). E' evidente che la quantità, la qualità e la distribuzione spaziale dei dati osservati possono condizionare questo processo ed il conseguente livello di affidabilità dei risultati (output) che ne derivano. Durante la calibrazione un set di parametri relativi alle unità idrogeologiche ed alle condizioni al contorno viene identificato come quello che meglio approssima i dati di campo disponibili e che quindi può essere considerato rappresentativo del sistema oggetto di simulazione. Una fase successiva è quella in cui il set di parametri di input derivati dalla calibrazione viene verificato attraverso la riproduzione di uno o più dataset sperimentali acquisiti in condizioni idrogeologiche diverse rispetto a quelle dei dati di calibrazione. Questa procedura prende il nome di validazione o verifica di una simulazione numerica.

La calibrazione, e di conseguenza la verifica, possono essere di tipo qualitativo, se basate sul confronto visivo e la sovrapposizione delle distribuzioni di carico idraulico e concentrazione calcolati al termine della simulazione con le misure sperimentali, oppure di tipo quantitativo se basate sul confronto puntuale tra i valori di carico idraulico (h), concentrazione (C) e/o flusso (Q) misurati e calcolati (Anderson et al., 2015). La calibrazione quantitativa si basa sull'elaborazione statistica del residuo (R_i , in L per h), determinato come differenza tra il valore calcolato (X^{calc}) e quello osservato (X^{obs}), secondo la formula:

$$R_i = X^{calc} - X^{obs}$$

In idrogeologia, l'indicatore statistico più utilizzato per valutare la qualità di una calibrazione/verifica di tipo quantitativo è sicuramente lo scarto quadratico medio normalizzato (nRMS, in %), definito come lo scarto quadratico medio (RMS in L) diviso per il range di variazione delle misure sperimentali, secondo le formule:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2}$$

$$nRMS = \frac{RMS}{(X_{max}^{obs} - X_{min}^{obs})}$$

dove n è il numero dei residui disponibili, X_{max}^{obs} il valore osservato massimo e X_{min}^{obs} il valore osservato minimo. In relazione al flusso delle acque sotterranee, la calibrazione quantitativa può riguardare sia h che Q, ma a causa delle difficoltà legate alla stima delle portate nel sottosuolo, solitamente si utilizza il carico idraulico. Nel caso di una simulazione di flusso a densità variabile, oltre ad h, la calibrazione quantitativa deve riguardare anche la concentrazione del soluto. Convenzionalmente il limite entro cui la calibrazione quantitativa può considerarsi accettabile è rappresentato da un valore di nRMS inferiore o pari al 10% (Anderson et al., 2015). In alcuni casi, però, soprattutto quando il range del parametro sperimentale è elevato e l'errore strumentale può divenire significativo nella misura dei valori più alti, oppure quando, come nel caso in questione per la concentrazione, la misura del parametro avviene in modo indiretto attraverso una relazione di conversione che può introdurre errori di stima aggiuntivi, questo limite può ragionevolmente essere aumentato. In aggiunta a nRMS ed RMS vengono solitamente valutati anche altri parametri statistici quali la media dei residui (R_m , in L) e la media dei residui in valore assoluto (R_{am} , in L), secondo:

$$R_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$$

$$R_{am} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i|$$

Un altro indicatore derivato dall'idrologia, che anziché fissare un valore soglia permette di individuare dei livelli di performance, è il Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE), dato da:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_i^{calc})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X^{mean})^2} \right]$$

dove X^{mean} è la media dei valori osservati. NSE è compreso tra $-\infty$ ed 1, con 1 come valore ottimale. In Tabella 6.3 sono riportati i livelli di performance ed accettabilità definiti in Moriasi et al. (2007). Quando NSE diventa negativo significa che la media dei valori osservati è un predittore più efficace del modello implementato.

Infine, in relazione alle modalità con cui viene eseguita, la calibrazione può essere di tipo manuale (trial and error), quando l'utente modifica i parametri di input ed eventualmente le condizioni al contorno ed interne fino a quando il dataset di calibrazione non viene riprodotto con sufficiente approssimazione, oppure di tipo

automatico, quando è realizzata attraverso l'ausilio di codici numerici che svolgono il processo in maniera automatica sulla base di algoritmi di ottimizzazione dei parametri.

Nel caso in questione, poiché la calibrazione era stata eseguita nello studio del 2009 e poiché i parametri di input sono rimasti i medesimi, si è proceduto alla loro verifica attraverso l'utilizzo dei logs di salinità per la simulazione ante operam (C1), dei logs di salinità e dei dati del monitoraggio idrometrico nel lago di cava per le simulazioni in corso d'opera (C2, C3, e C4). Il risultato di ciò è una serie di simulazioni che, a partire dalla condizione di equilibrio iniziale (ante operam), riproducono l'evoluzione progressiva del lago di cava e la sua interazione con il sistema oggetto di studio.

NSE	Livello di performance
$0.75 < NSE \leq 1.00$	molto buono
$0.65 < NSE \leq 0.75$	buono
$0.50 < NSE \leq 0.65$	soddisfacente
$NSE \leq 0.50$	insoddisfacente

Tabella 6.3. Livelli di performance di NSE definiti in Moriasi et al. (2007).

6.3.2 Punti di controllo

In SEAWAT i punti di controllo vengono utilizzati per il calcolo automatico dei residui (R_i) rispetto alle variabili di output disponibili: carico idraulico, concentrazione o flusso. La definizione di un punto di controllo richiede l'inserimento delle sue coordinate e dei valori della variabile rispetto al tempo. Il calcolo di R_i avviene al termine della simulazione a partire dal valore di output calcolato in corrispondenza della cella entro cui ricade il punto di controllo e nel momento di calcolo più prossimo a quello associato al valore. Coerentemente a questa modalità operativa, lungo la verticale, i dati di monitoraggio in continuo sono attribuiti alla quota di installazione del sensore, mentre quelli dei logs di CT/salinità alla profondità/quota di acquisizione. Per quanto riguarda il tempo, invece, in relazione alla stazionarietà mostrata dal sistema, si è scelto di associare i valori medi dei dataset disponibili ai tempi finali di ciascuna simulazione, indipendentemente dalla loro modalità di acquisizione: monitoraggio in continuo o log. Va comunque tenuto in considerazione che in un contesto di densità variabile, quale quello in oggetto, la misura del carico idraulico dovrebbe tenere conto della distribuzione della densità/salinità lungo il tratto filtrato. Sulla base di ciò i piezometri possono essere suddivisi in due tipologie: piezometri puntuali e piezometri ambientali. I piezometri puntuali sono filtrati esclusivamente in acqua dolce e hanno un filtro di lunghezza infinitesima, o comunque ridotta rispetto allo spessore dell'acquifero, per cui la misura di carico idraulico può essere considerata, in prima approssimazione, un carico idraulico equivalente di acqua dolce senza nessuna correzione per la densità. I piezometri ambientali, invece, sono filtrati su gran parte o tutto l'acquifero ed il carico idraulico rilevato al loro interno dovrebbe essere corretto per tenere conto delle variazioni di densità lungo la verticale. Mentre nell'implementazione del 2009 si è scelto di utilizzare per la calibrazione del carico idraulico solo i dati provenienti da piezometri considerati puntuali (CFR per Cantoniera Cavallara, 2009), nel presente studio si è optato per estendere la verifica a tutte le misure di carico idraulico disponibili, provenienti cioè da piezometri sia puntuali che ambientali, oltre che ai dati di livello idrometrico del lago. Questo ha richiesto di alzare la

soglia di riferimento di nRMS dal 10% al 15% e, per non perdere significatività, di affiancare a questo parametro un ulteriore criterio di valutazione dato da NSE. In tal modo il processo di verifica è risultato più flessibile, pur mantenendo i requisiti di robustezza necessari a garantire la qualità delle simulazioni.

Il dataset utilizzato per la verifica della simulazione C1 è costituito dai valori medi di carico idraulico e concentrazione derivati dai monitoraggi in continuo del periodo 2005-2009, integrati dai valori medi dei logs realizzati nel 2005-2006, cioè prima dell'inizio dell'attività estrattiva (Par. 3.6). In Tabella 6.4 e in Tabella 6.5 sono riepilogate le caratteristiche dei punti di controllo, rispettivamente del carico idraulico e della concentrazione, derivati dai dati di monitoraggio in continuo, mentre in Figura 6.10 è mostrata la loro ubicazione planimetrica. Per quanto riguarda i logs di salinità sono stati utilizzati i valori medi registrati nei piezometri: PZ1 (Figura 3.43), PZ2 (Figura 3.49), PZ3 (Figura 3.45), PZ4 (Figura 3.47), PZ4bis (Figura 3.46), PZ5 (Figura 3.48), PZM5 (Figura 3.41), PZP1 (Figura 3.40), PZP2 (Figura 3.51), PZS3 (Figura 3.50), PZS4 (Figura 3.42), PZS7 (Figura 3.54), PZS8 (Figura 3.44) e PZS9 (Figura 3.55). Non sono stati considerati i valori registrati a 26.5 e 27.5 m s.l.m. nel PZP1, quelli compresi tra 16.5 e 19.5 m s.l.m. del PZ4 e quelli tra 16.5 e 19.5 m s.l.m. del PZ5. Nel primo caso i valori dei logs sono stati scartati perché si trovano in corrispondenza del layer 16 in cui è assegnata una condizione interna di concentrazione costante pari a 50 g/l (Par. 6.2.6), che rende superflua la verifica. Nel caso dei tratti terminali dei logs realizzati in PZ4 e PZ5 si tratta di misure estremamente variabili tra una campagna e l'altra, in cui talvolta sono stati registrati valori di salinità superiori al limite di riferimento rappresentato da 50 g/l e per i quali si sospetta una situazione di intasamento della porzione di filtro alla base del piezometro. Si tratta di 10 valori esclusi su un totale di 162 disponibili.

Il dataset utilizzato per la verifica della simulazione C2 è costituito da dati di carico idraulico utilizzati per C1 (Tabella 6.4), integrati dal valore medio del livello idrometrico del lago registrato nel periodo 2008-2009 (Tabella 6.6) nel punto LC2 (Figura 6.11). Per quanto concerne i logs di salinità sono stati utilizzati i valori medi registrati nei piezometri: PZ1 (Figura 3.43), PZ2 (Figura 3.49), PZ3 (Figura 3.45), PZ4bis (Figura 3.46), PZ5 (Figura 3.48) e PZP1 (Figura 3.40). Anche in questo caso non sono stati considerati i valori registrati a 26.5 e 27.5 m s.l.m. in PZP1 e quelli compresi tra 16.5 e 19.5 m s.l.m. in PZ5. Si tratta di 6 valori esclusi su un totale di 109 disponibili.

Il dataset associato alla simulazione C3 è nuovamente costituito dai dati di carico idraulico di Tabella 6.4, integrati dal valore medio del livello idrometrico registrato nel periodo 2016-2017 (Tabella 6.6) nel punto LC3 (Figura 6.11). In questo caso sono stati utilizzati i valori medi dei logs realizzati nei piezometri: PZ1 (Figura 3.43), PZ2 (Figura 3.49), PZ3 (Figura 3.45), PZ4 (Figura 3.47), PZ4bis (Figura 3.46), PZ5 (Figura 3.48), PZM5 (Figura 3.41), PZP1 (Figura 3.40), PZP2 (Figura 3.51), PZS3 (Figura 3.50) e PZS8 (Figura 3.44). In analogia alle simulazioni C2 e C3, non sono stati considerati i valori registrati a 26.5 e 27.5 m in PZP1 e quelli compresi tra quelli tra 16.5 e 19.5 m s.l.m. in PZ4 e PZ5. Si tratta di 10 valori esclusi su un totale di 142 valori disponibili.

Infine il dataset utilizzato per la verifica della simulazione C4 è costituito dai dati di carico idraulico di Tabella 6.4, integrati dal valore medio del livello idrometrico registrato nel periodo 2022-2023 (Tabella 6.6) nel punto LC4 (Figura 6.11). Per quanto riguarda i logs di salinità sono stati utilizzati i valori medi registrati nei piezometri: PZ1 (Figura 3.43), PZ2 (Figura 3.49), PZ3 (Figura 3.45), PZ4 (Figura 3.47), PZ4bis (Figura 3.46), PZ5 (Figura 3.48), PZP1 (Figura 3.40), PZP2 (Figura 3.51), PZS3 (Figura 3.50) e PZS8 (Figura 3.44). Al solito non sono considerati i valori registrati a 26.5 e 27.5 m s.l.m. in PZP1 e quelli compresi tra quelli tra 16.5 e 19.5 m s.l.m. in PZ4 e PZ5. Si tratta di 10 valori esclusi su 120 totali disponibili.

ID	X (m)	Y (m)	Z (m m.s.l)	H (m s.l.m.)
PZ3	744736.34	4956339.51	-5.470	-1.680
PZ4	744999.51	4956294.52	-6.140	-1.870
PZP2	745104.67	4956791.57	-24.740	-2.350
PZS3	745106.56	4956784.28	-7.510	-2.100
PZS4	744802.83	4956159.41	-10.080	-1.525
PZS7	744555.93	4956152.99	-10.395	-1.360
PZS8	745039.44	4956117.95	-4.890	-1.690
PZS9	744346.19	4956896.87	-7.400	-1.650

Tabella 6.4. Punti di osservazione del carico idraulico derivati dal monitoraggio in continuo ed utilizzati per la verifica della simulazione C1 (CFR per Cantoniera Cavallara, 2009); le coordinate X e Y sono nel sistema di riferimento UTM-ED1950, fuso 32.

ID	X (m)	Y (m)	Z (m m.s.l)	C (g/l)
PZ3	744736.34	4956339.51	-5.470	1.283
PZ4	744999.51	4956294.52	-6.140	1.433
PZ4/B	744999.51	4956294.52	-5.000	1.113
PZP1/A	744805.23	4956154.89	-6.344	1.275
PZP1/B	744805.23	4956154.89	-25.344	15.936
PZP1/C	744805.23	4956154.89	-5.244	1.153
PZP1/D	744805.23	4956154.89	-7.144	1.158
PZP1/E	744805.23	4956154.89	-15.544	1.575
PZP1/F	744805.23	4956154.89	-22.364	11.141
PZP2	745104.67	4956791.57	-24.740	48.500
PZS3	745106.56	4956784.28	-7.510	2.621
PZS3/B	745106.56	4956784.28	-11.017	3.691
PZS7	744555.93	4956152.99	-10.395	1.578
PZS8	745039.44	4956117.95	-4.890	1.219
PZS9	744346.19	4956896.87	-7.400	1.234

Tabella 6.5. Punti di osservazione della concentrazione derivati dal monitoraggio in continuo ed utilizzati per la verifica della simulazione C1 (CFR per Cantoniera Cavallara, 2009); le coordinate X e Y sono nel sistema di riferimento UTM-ED1950, fuso 32.

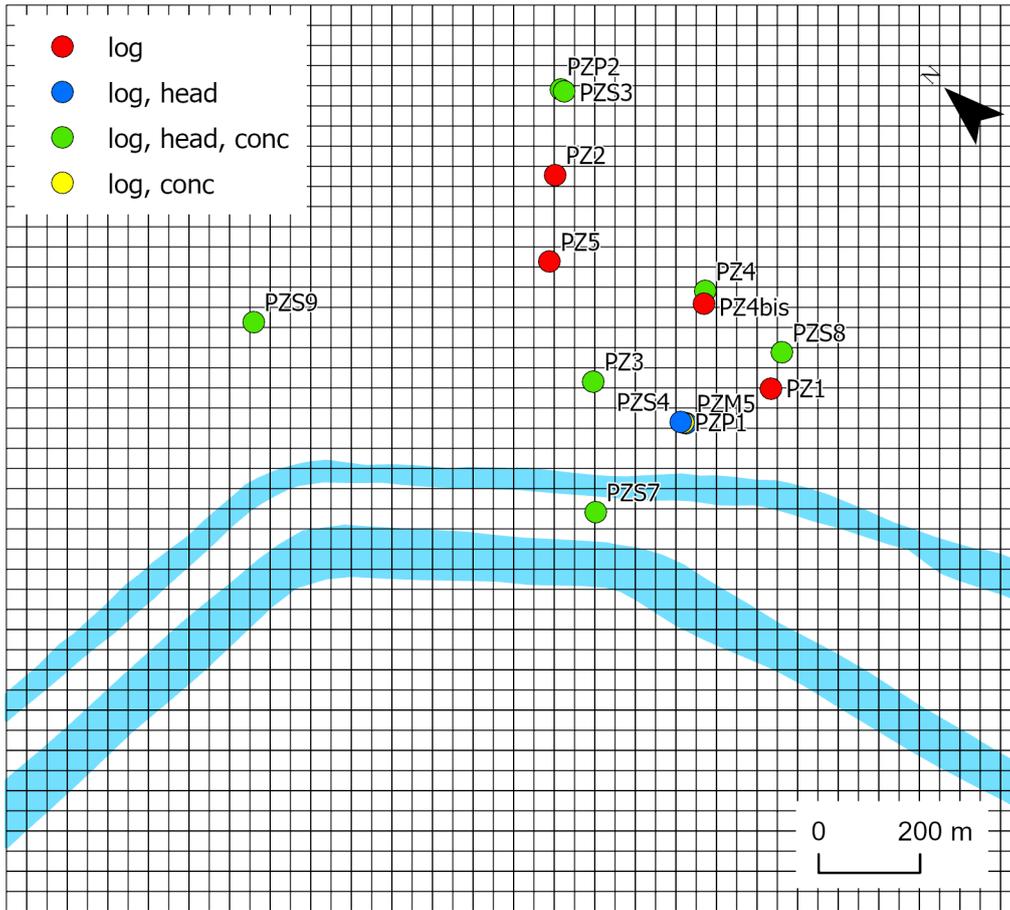


Figura 6.10. Ubicazione dei punti controllo utilizzati per le simulazioni di calibrazione/verifica, relativamente al carico idraulico (head), alla concentrazione di TDS (conc) ed alla concentrazione di TDS rilevata lungo la verticale con i logs (log).

ID	X (m)	Y (m)	Z (m m.s.l)	H (m s.l.m.)
LC2	744870.90	4956395.80	-2.440	-1.890
LC3	744908.00	4956121.00	-5.000	-1.870
LC4	744924.16	4956123.93	-3.000	-2.150

Tabella 6.6. Punti di controllo del livello idrometrico del lago utilizzati nelle simulazioni di verifica C2 (LC2), C3 (LC3) e C4 (LC4).

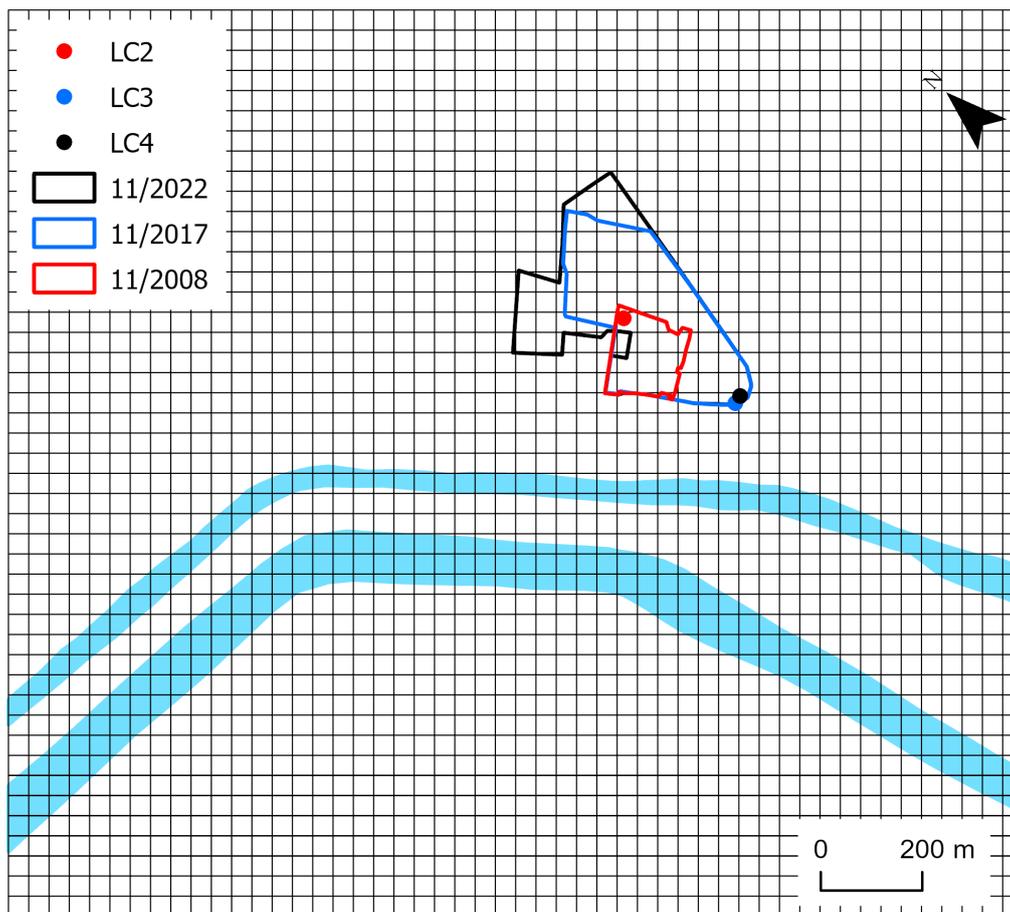


Figura 6.11. Ubicazione dei punti di controllo del livello idrometrico del lago associati alle simulazioni C2, C3 e C4.

6.3.3 Simulazione C1

La simulazione C1, lunga 100 anni, riproduce lo sviluppo del sistema e le condizioni ante operam al 2006. La simulazione C1 è stata calibrata nell'implementazione del 2009 (CFR per Cantoniera Cavallara, 2009) utilizzando due dataset, uno per il carico idraulico e l'altro per la concentrazione, entrambi derivati dal monitoraggio in continuo del periodo 2005-2009, mentre in questo studio viene verificata, oltre che con i suddetti dataset, utilizzando i valori di medi di concentrazione dei logs realizzati nel periodo 2005-2006 (Par. 6.3.2).

In Figura 6.12 sono visualizzabili gli scatter plot di confronto tra i valori osservati e calcolati rispettivamente per: il carico idraulico, la concentrazione derivata dai dati di monitoraggio in continuo e la concentrazione derivata dai logs, mentre in Tabella 6.7 sono riassunti gli indicatori statistici di calibrazione/verifica. Come si può vedere il livello di performance raggiunto dalla verifica della simulazione C1 è molto buono per il carico idraulico e la concentrazione derivata dal monitoraggio in continuo e soddisfacente per la concentrazione dei logs, con valori di nRMS compresi tra 8.5% e 11.7%, quindi al di sotto della soglia di riferimento del 15%.

In Tabella 6.8 ed in Figura 6.13 sono riportati i termini del bilancio di massa al termine della simulazione C1. Si può verificare che nella condizione ante operam l'alimentazione da parte della rete idrografica rappresenta circa il 72% degli apporti al sistema, il restante 15.70% è garantito dall'infiltrazione delle acque di precipitazione, mentre, una quota non trascurabile, circa il 12.70% entra dai limiti a carico idraulico specificato (CHD) per effetto della differenza di densità tra l'acqua dolce e quella salata lungo i bordi del dominio di modellazione. La discrepanza percentuale tra quanto entra e quanto esce è ampiamente entro il limite di accettabilità di $\pm 2\%$, ad ulteriore riprova della validità della soluzione numerica.

La distribuzione di carico idraulico calcolata al termine della simulazione sul layer 2 (Figura 6.14) evidenzia la capacità di riprodurre in modo efficace il gradiente idraulico rilevato in condizioni ante operam tra la rete idrografica ed il limite nord orientale del dominio, vale a dire dal piezometro PZS7 verso i piezometri PZS4 e PZS8 e tra questi ed il PZS3. Nella porzione sud occidentale del dominio, invece, è riprodotto un gradiente idraulico maggiore, che in assenza di punti controllo, ha come unica funzione quella di favorire l'alimentazione della rete idrografica. Infine, in Figura 6.15 ed in Figura 6.16 sono visualizzate le distribuzioni della concentrazione di TDS al termine della simulazione rispettivamente in sezione, lungo una riga ed una colonna ubicate in posizione centrale al dominio, ed attraverso una rappresentazione tridimensionale. Entrambe le visualizzazioni mostrano la condizione di equilibrio ante operam, vale a dire: una lente di acqua dolce allungata secondo la direzione del paleoalveo e dei canali, che ne avrebbero favorito la formazione ed il successivo sviluppo, sovrapposta ad un originario strato di acqua salata/salmastra, secondo quanto previsto dal modello idrogeologico concettuale delineato al Paragrafo 5. Al di sotto della rete idrografica ed in corrispondenza del paleoalveo le acque salate permeano prevalentemente i depositi fini alla base del 2° litosoma sabbioso, mentre in allontanamento da essi, anche il 1° litosoma sabbioso si satura progressivamente di acqua salata/salmastra, sino alla definitiva scomparsa dell'acqua dolce legata alla ricarica laterale ed all'infiltrazione. L'interazione tra l'acqua dolce e quella salata non avviene secondo la tipica forma convessa verso mare, come previsto dalla legge di Ghyben-Herzberg (Freeze & Cherry, 1979), ma tramite una superficie più complessa ad inclinazione variabile, da sub-orizzontale a verticale, in funzione del carico idraulico di acqua dolce e delle proprietà idrodinamiche/idrodispersive del sottosuolo.

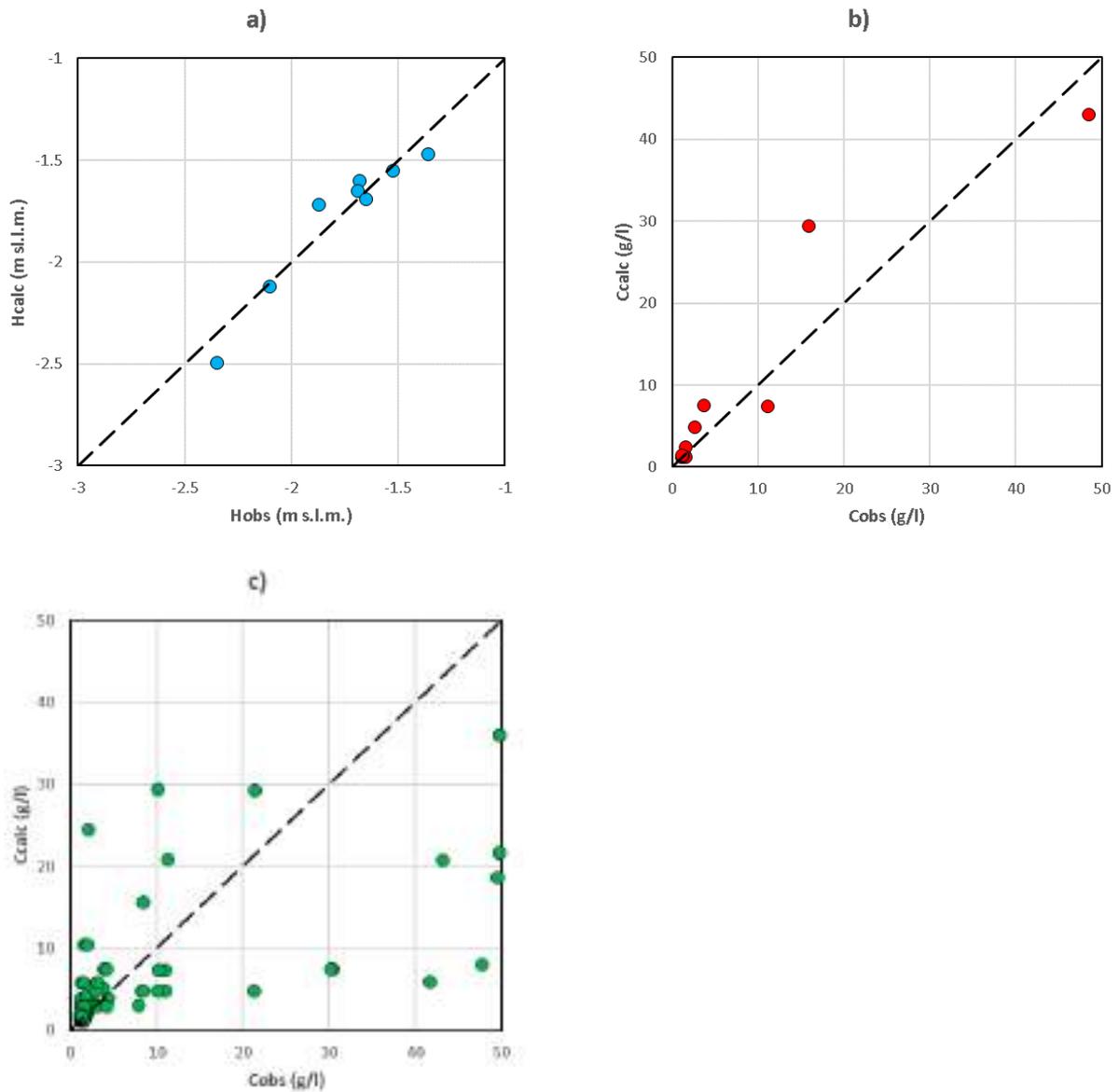


Figura 6.12. Confronto tra i valori osservati (obs) e calcolati (calc) al termine della simulazione C1: a) carico idraulico, b) concentrazione del monitoraggio in continuo e c) concentrazione dei logs.

Dataset	nRMS (%)	NSE ()	Livello performance
Carico idraulico	9.22	0.91	molto buono
Concentrazione monitoraggio in continuo	8.52	0.89	molto buono
Concentrazione logs	11.75	0.61	soddisfacente

Tabella 6.7. Indicatori statistici di calibrazione/verifica e livello di performance.

Parametro	IN (L/s)	OUT (L/s)
Carico assegnato (CHD)	2.77	21.77
Scambio acque superficiali/sotterranee (RIV)	15.67	0.00
Ricarica (RCH)	3.34	0.00
Totale	21.87	21.77

Tabella 6.8. Bilancio di massa del flusso al termine della simulazione C1; i termini IN e OUT sono i flussi rispettivamente in ingresso ed in uscita dal dominio.

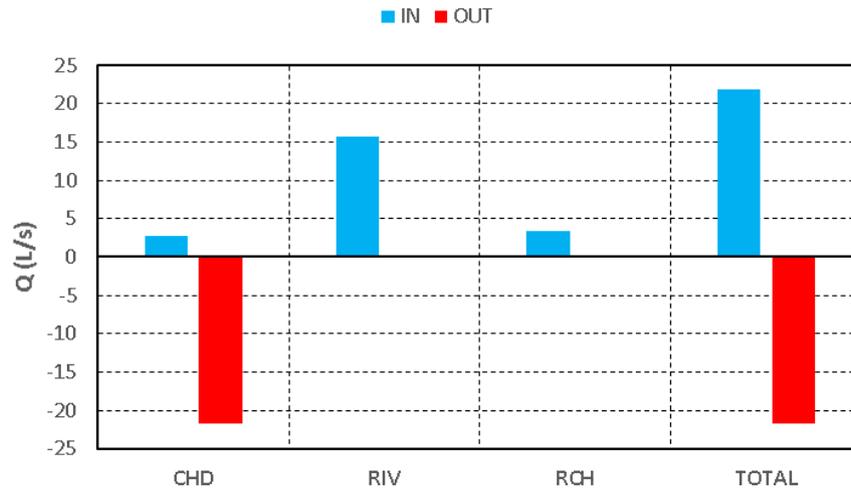


Figura 6.13. Bilancio di massa al termine della simulazione C1.

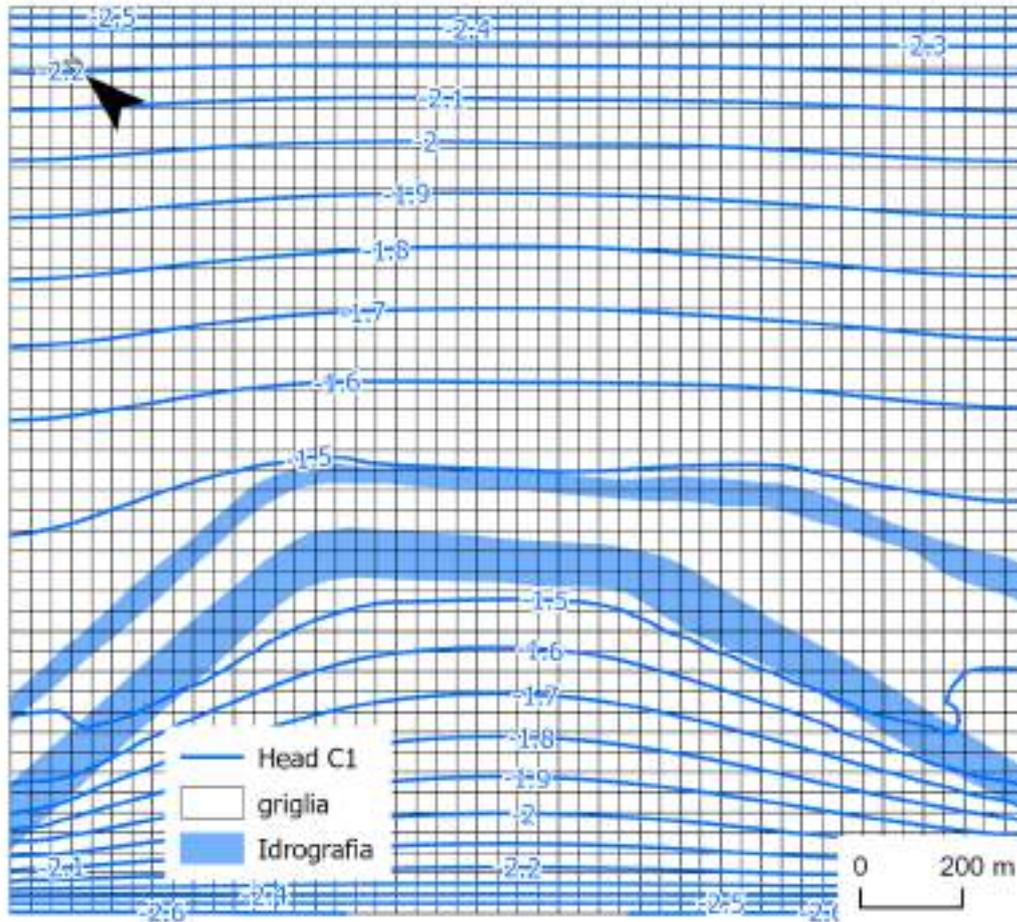
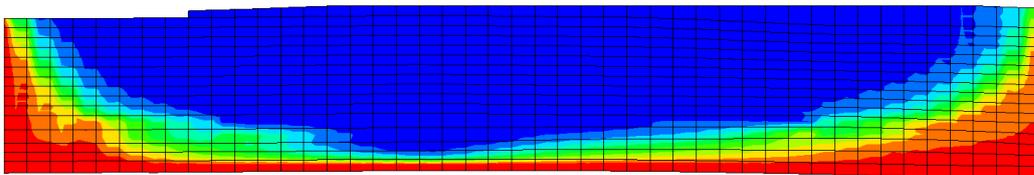


Figura 6.14. Distribuzione di carico idraulico (Head) calcolata sul layer 2 al termine della simulazione C1.

a)



b)

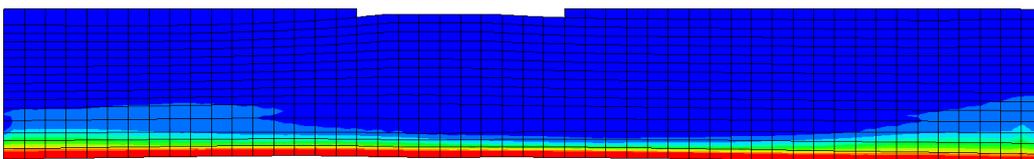


Figura 6.15. Distribuzione della concentrazione di TDS al termine della simulazione C1 (100 anni): a) lungo la riga 23 e b) lungo la colonna 20; fattore di esagerazione verticale 10:1.

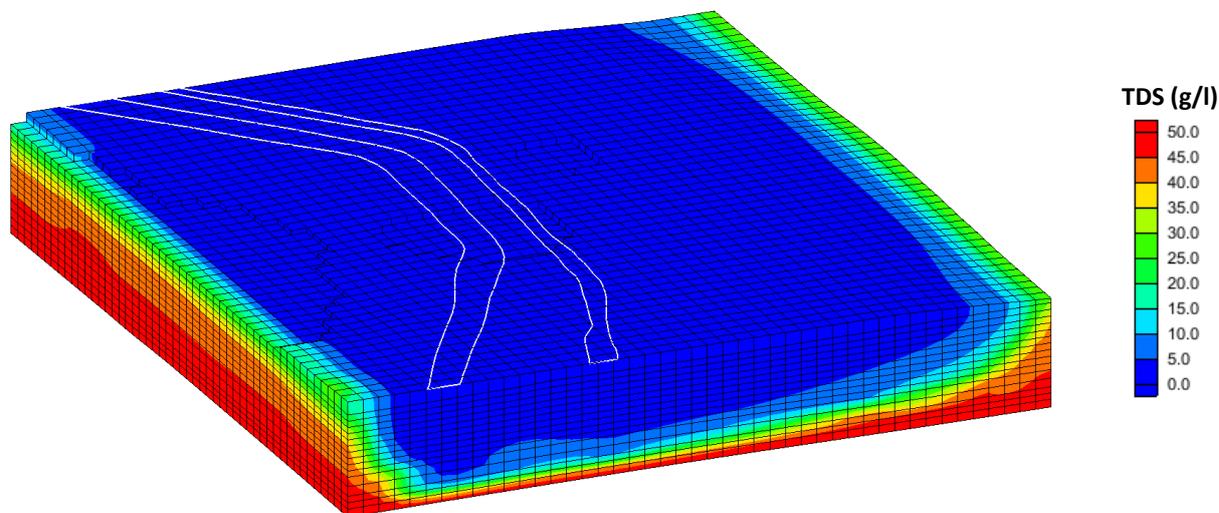


Figura 6.16. Distribuzione tridimensionale della concentrazione di TDS al termine della simulazione C1 (100 anni); in bianco le tracce planimetriche dei canali Circondariale e Navigabile; fattore di esagerazione verticale 10:1.

6.3.4 Simulazione C2

La simulazione C2, lunga 2 anni (730 giorni), riproduce le condizioni in corso d'opera tra il 2007 ed il 2008 con il perimetro e la profondità del lago rilevati in novembre 2008. La simulazione C2 viene verificata con il dataset di carico idraulico utilizzato per C1, integrato dal valore medio del livello idrometrico registrato nel periodo 2008-2009, e con i valori medi di concentrazione derivati dai logs realizzati nel 2007-2008.

In Figura 6.17 sono mostrati gli scatter plot di confronto tra i valori osservati e calcolati per il carico idraulico e la concentrazione, mentre in Tabella 6.9 sono riportati gli indicatori statistici di verifica. Il livello di performance del carico idraulico è ancora molto buono, nonostante nel dataset di verifica sia stato inserito il livello idrometrico del lago, mentre quello della concentrazione è insoddisfacente. I valori di nRMS risultano rispettivamente pari a 12% e 22.7%. Va segnalato che il dataset di concentrazione utilizzato per la verifica della simulazione C2 è quello meno numeroso: 6 piezometri a cui corrispondono 103 punti controllo e che questi dati sono stati acquisiti durante lo stadio iniziale di formazione del lago, quindi in una condizione estremamente transitoria che probabilmente viene male rappresentata dai valori medi di concentrazione dei logs.

In Tabella 6.10 ed in Figura 6.18 sono riportati i termini del bilancio di massa alla fine della simulazione C2. Il peso percentuale di ciascuna voce rimane praticamente inalterato rispetto a C1, poiché l'evaporazione dal lago incide per meno dell'1%. Anche in questo caso la discrepanza percentuale tra quanto entra e quanto esce è ampiamente entro la soglia di riferimento ($\pm 2\%$), per cui i risultati della simulazione possono essere considerati validi anche dal punto di vista numerico.

La distribuzione di carico idraulico calcolata al termine della simulazione sul layer 2 (Figura 6.19) mostra i primi effetti della presenza del lago. L'arretramento verso il Canale Navigabile della linea isopotenziometrica pari a -1.6 m s.l.m. e l'avanzamento verso il limite nord orientale del dominio da parte della linea pari a -1.7 m s.l.m. sono inequivocabilmente legati alla comparsa del lago di cava. Infine, in Figura 6.20 è mostrata la distribuzione della concentrazione di TDS al termine della simulazione C2 rispettivamente lungo una riga ed una colonna, ubicate in posizione centrale rispetto al dominio di modellazione. Come si può verificare, l'andamento della salinità lungo la verticale non subisce variazioni di rilievo rispetto alla condizione ante operam.

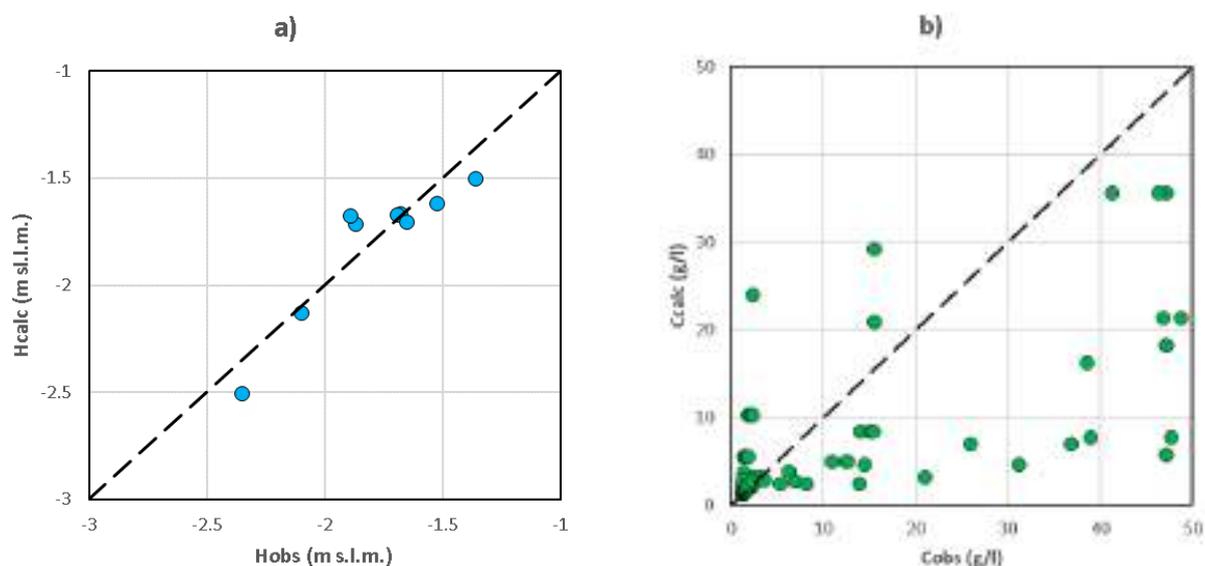


Figura 6.17. Confronto tra i valori osservati (obs) e calcolati (calc) al termine della simulazione C2: a) carico idraulico e b) concentrazione dei logs.

Dataset	nRMS (%)	NSE ()	Livello performance
Carico idraulico	11.97	0.83	molto buono
Concentrazione logs	22.68	0.42	insoddisfacente

Tabella 6.9. Indicatori statistici di calibrazione/verifica e livello di performance.

Parametro	IN (L/s)	OUT (L/s)
Carico assegnato (CHD)	2.83	21.94
Scambio acque superficiali/sotterranee (RIV)	16.03	0.00
Ricarica (RCH)	3.37	0.19
Totale	22.22	22.14

Tabella 6.10. Bilancio di massa del flusso al termine della simulazione C2; i termini IN e OUT sono i flussi rispettivamente in ingresso ed in uscita dal dominio.

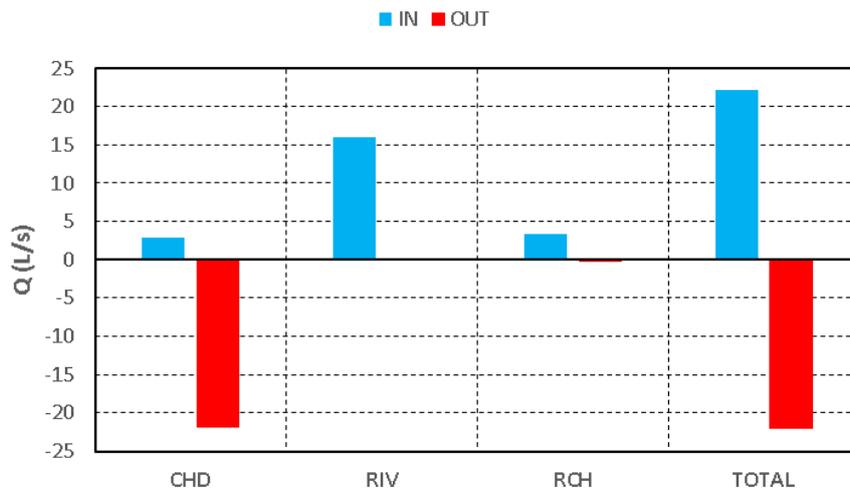


Figura 6.18. Bilancio di massa al termine della simulazione C2.

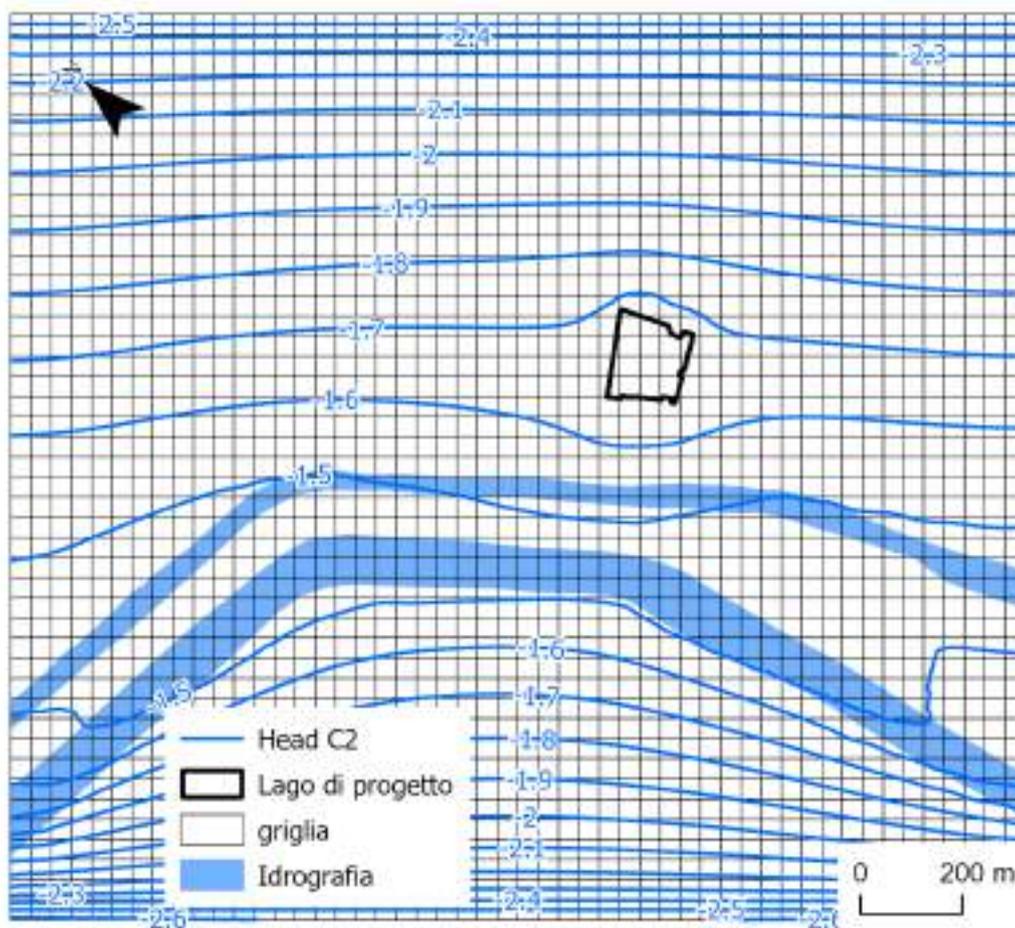


Figura 6.19. Distribuzione di carico idraulico (Head) calcolata sul layer 2 al termine della simulazione C2.

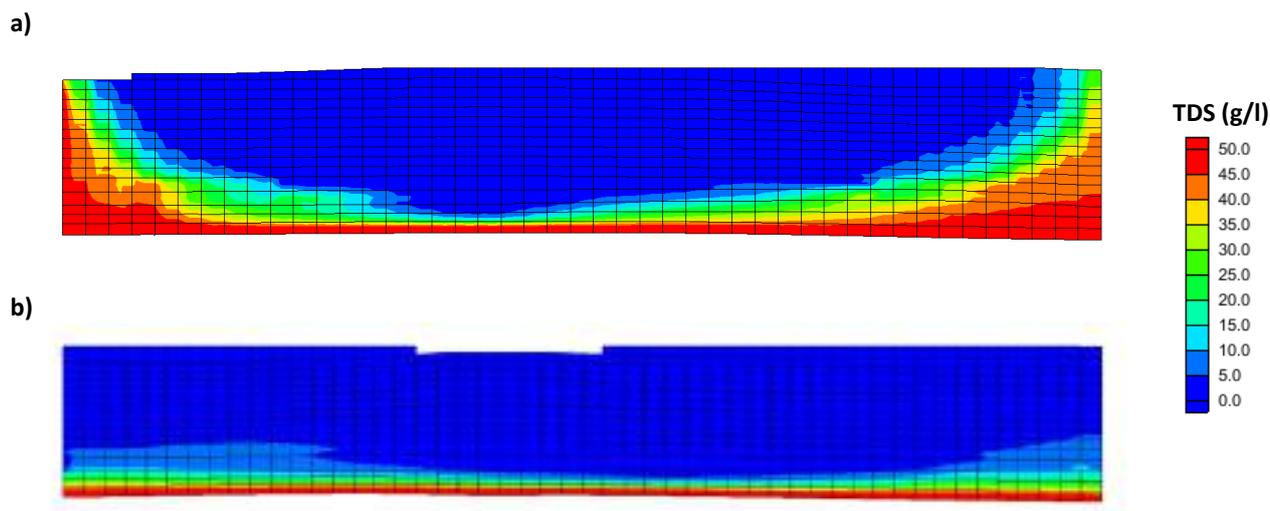


Figura 6.20. Distribuzione della concentrazione di TDS al termine della simulazione C2 (2 anni): a lungo la riga 23 e b) lungo la colonna 20; fattore di esagerazione verticale 10:1.

6.3.5 Simulazione C3

La simulazione C3, lunga 9 anni (3285 giorni), riproduce le condizioni in corso d'opera tra il 2009 ed il 2017 con il perimetro e la profondità del lago rilevati in novembre 2017. La simulazione C2 viene verificata con il dataset di carico idraulico utilizzato per C1, integrato dai dati idrometrici rilevati nel periodo 2016-2017, e con i valori medi di concentrazione derivati dai logs realizzati nello stesso periodo.

In Figura 6.21 sono mostrati gli scatter plot di confronto tra i valori osservati e calcolati per il carico idraulico e per la concentrazione derivata dai logs, mentre in Tabella 6.11 sono riportati gli indicatori statistici di verifica. In questo caso il livello di performance del carico idraulico è molto buono, mentre risulta soddisfacente per la concentrazione media di TDS derivata dai logs della campagna di misura 2016-2017. I valori di nRMS risultano rispettivamente pari a 12.5% e 14%, in entrambi i casi al di sotto della soglia di riferimento del 15%.

In Tabella 6.12 ed in Figura 6.22 sono riportati i termini del bilancio di massa al termine della simulazione C3. Rispetto a C2 il peso percentuale delle componenti si modifica in risposta alla diminuzione della ricarica (dal 15.2% al 14%) e all'incremento dell'evaporazione dal lago (dal 1% al 3.9%), con l'alimentazione dalla rete idrografica che si attesta al 72.6% e l'ingresso dal limite nord orientale del dominio che passa al 13.4%. La discrepanza percentuale tra quanto entra e quanto esce dal dominio continua ad essere ampiamente entro la soglia di riferimento, per cui i risultati della simulazione possono essere considerati validi dal punto di vista numerico.

In Figura 6.23 è visualizzabile la distribuzione di carico idraulico calcolata al termine della simulazione sul layer2. L'incremento della superficie del lago provoca l'arretramento verso il Canale Navigabile delle linee isopotenzimetriche -1.6 e -1.7 m s.l.m. e l'avanzamento delle linee -1.9 e -2.0 m s.l.m. verso il limite nord orientale del dominio. La linea -1.8 m s.l.m. circonda ora il perimetro del lago, all'interno del quale la tavola

d’acqua tende ad una geometria piana orizzontale. La distribuzione della concentrazione di TDS lungo la verticale (Figura 6.24) non mostra variazioni significative rispetto alle simulazioni C1 e C2, a conferma della stazionarietà del sistema in termini di salinità.

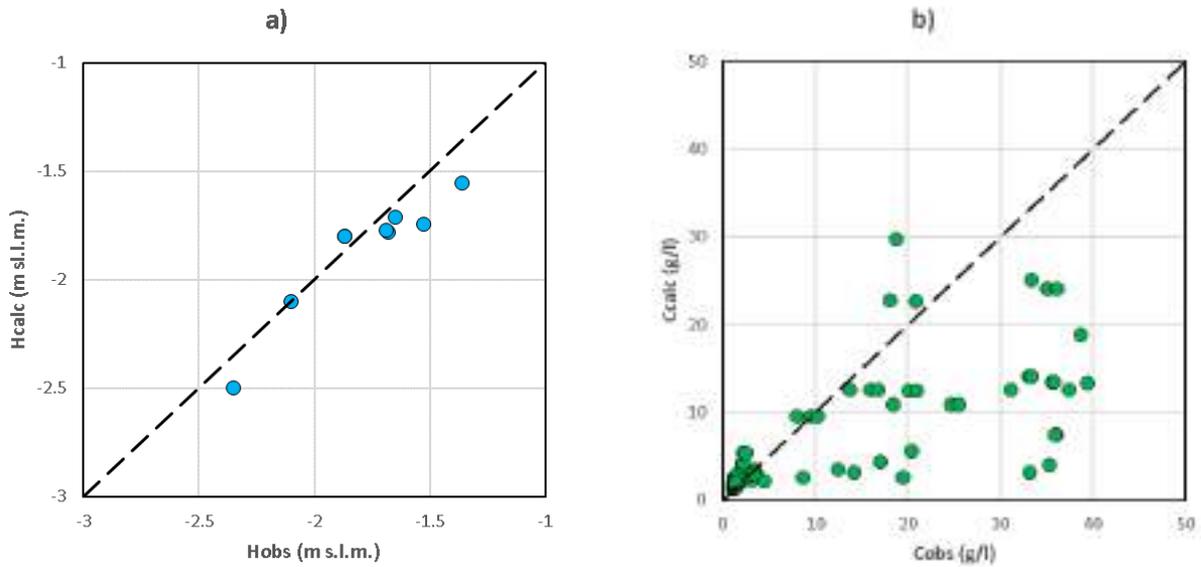


Figura 6.21. Confronto tra i valori osservati (obs) e calcolati (calc) al termine della simulazione C3: a) carico idraulico e b) concentrazione dei logs.

Dataset	nRMS (%)	NSE ()	Livello performance
Carico idraulico	12.47	0.81	molto buono
Concentrazione logs	14.01	0.58	soddisfacente

Tabella 6.11. Indicatori statistici di calibrazione/verifica e livello di performance.

Parametro	IN (L/s)	OUT (L/s)
Carico assegnato (CHD)	3.02	21.57
Scambio acque superficiali/sotterranee (RIV)	16.37	0.00
Ricarica (RCH)	3.17	0.87
Totale	22.55	22.44

Tabella 6.12. Bilancio di massa del flusso al termine della simulazione C3; i termini IN e OUT sono i flussi rispettivamente in ingresso ed in uscita dal dominio.

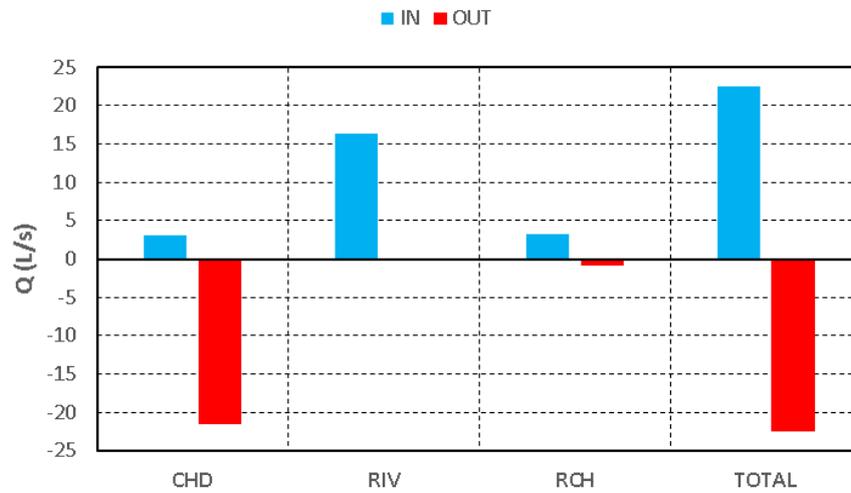


Figura 6.22. Bilancio di massa al termine della simulazione C3.

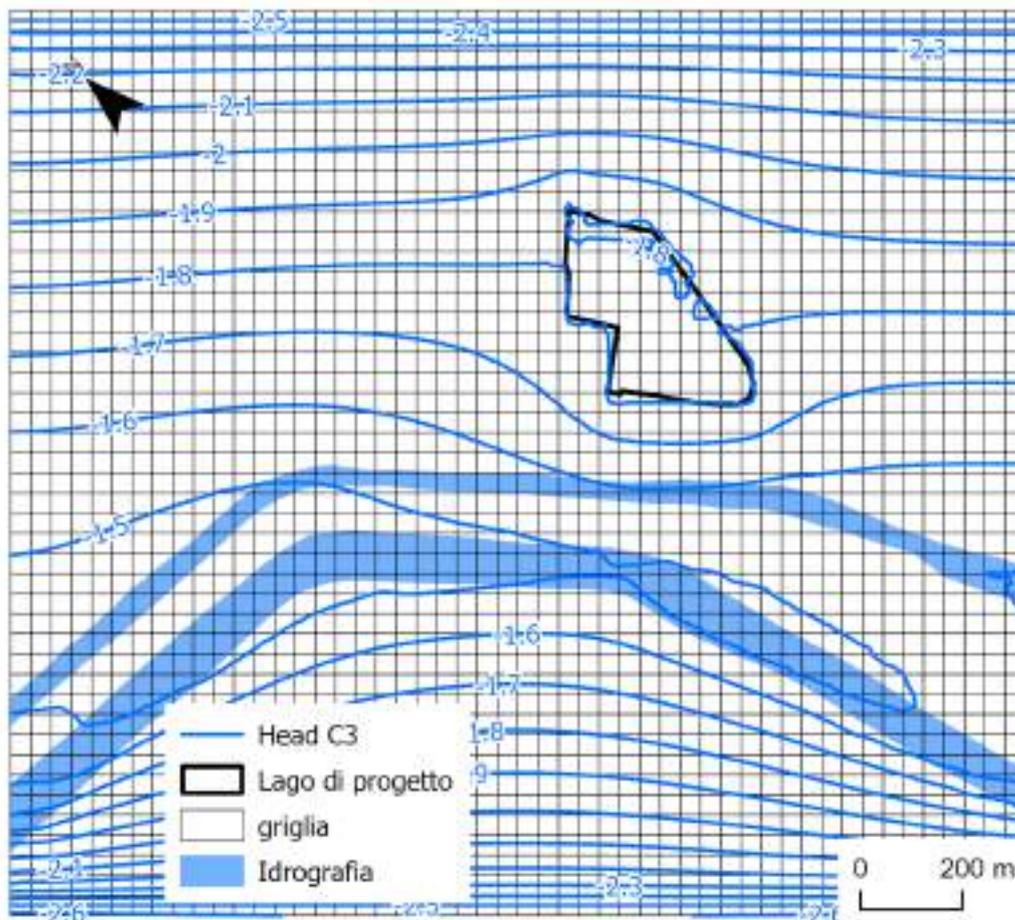


Figura 6.23. Distribuzione di carico idraulico (Head) calcolata sul layer 2 al termine della simulazione C3.

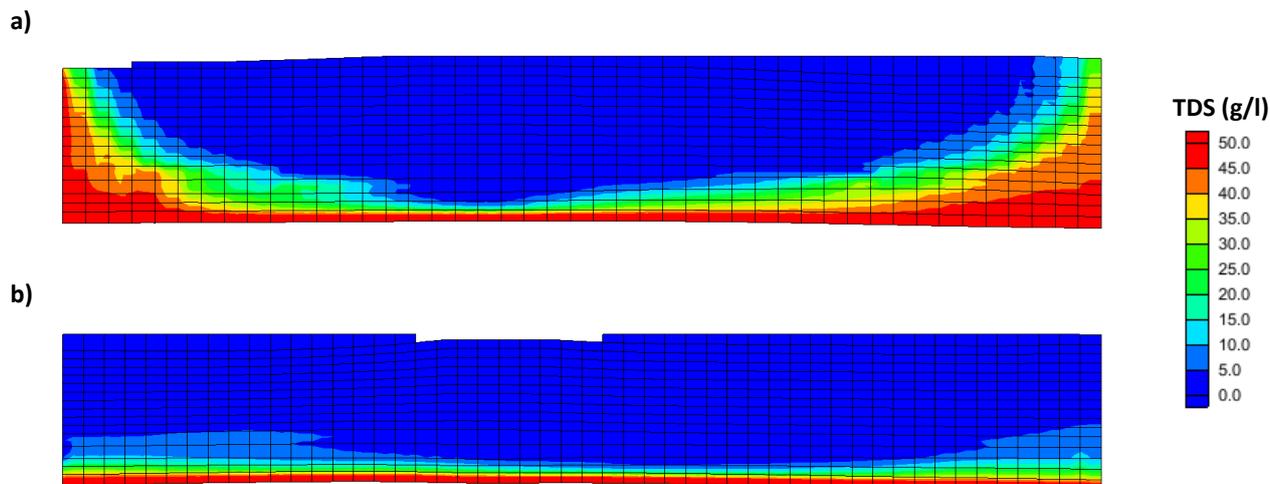


Figura 6.24. Distribuzione della concentrazione di TDS al termine della simulazione C3 (9 anni): a lungo la riga 23 e b) lungo la colonna 20; fattore di esagerazione verticale 10:1.

6.3.6 Simulazione C4

La simulazione C4, lunga 5 anni (1825 giorni), riproduce le condizioni in corso d'opera tra il 2018 ed il 2022 con il perimetro e la profondità del lago rilevati in novembre 2022. La simulazione C4 viene verificata con il dataset di carico idraulico utilizzato per C1, integrato dai dati idrometrici rilevati nel periodo 2022-2023, e con i valori medi di concentrazione derivati dai logs realizzati nello stesso periodo. Si tratta di una simulazione estremamente importante perché nel seguito viene utilizzata come riferimento per le simulazioni previsionali (Par. 6.5).

In Figura 6.25 sono mostrati gli scatter plot di confronto tra i valori osservati e calcolati per il carico idraulico e la concentrazione derivata dai logs, mentre in Tabella 6.13 sono riportati gli indicatori statistici della verifica. Il livello di performance del carico idraulico è buono, mentre quello della concentrazione è soddisfacente. I valori di nRMS risultano rispettivamente pari a 16.9% e 13.6%, con il primo valore che è comunque al di sopra del limite di riferimento fissato al 15%. La progressiva perdita di rappresentatività del dataset di verifica del carico idraulico è legata al significativo aumento delle dimensioni del lago. Nonostante ciò è importante evidenziare come questi valori, acquisiti in ante operam, siano ancora ampiamente compatibili con i risultati della simulazione che riproduce lo stato del sistema al 2022, a riprova del fatto che ad oggi non sono identificabili impatti significativi.

In Tabella 6.14 ed in Figura 6.26 sono riportati i termini del bilancio di massa al termine della simulazione C4. Il peso percentuale delle componenti continua a modificarsi in risposta alla diminuzione della ricarica (dal 14% di C3 a 13.7%) e all'incremento dell'evaporazione dal lago (da 3.9% di C3 a 4.9%), per cui l'alimentazione dalla rete idrografica si attesta ora al 72.9%, mentre l'ingresso dal limite nord orientale si mantiene al 13.4%. La discrepanza percentuale tra i flussi in ingresso ed uscita è ancora ampiamente entro la soglia di

riferimento, per cui anche i risultati di questa simulazione possono essere considerati validi dal punto di vista numerico.

La distribuzione di carico idraulico calcolata al termine della simulazione sul layer 2 (Figura 6.27) risente in modo evidente della presenza del lago. Vi è, infatti, un marcato arretramento delle linee isopotenziometriche comprese tra -1.6 e -1.8 m s.l.m. verso il Canale Navigabile e un avanzamento di quelle comprese tra -1.9 e -2.1 m s.l.m. verso il limite NE del dominio. Infine, in Figura 6.28 ed in Figura 6.29 sono presentate le distribuzioni della concentrazione di TDS al termine della simulazione rispettivamente in sezione, lungo una riga ed una colonna ubicate in posizione centrale al domino, ed attraverso una vista tridimensionale. Nonostante la presenza del lago, entrambe le visualizzazioni non mostrano variazioni significative di salinità lungo la verticale rispetto alle simulazioni precedenti, ad ulteriore riprova della stazionarietà del sistema.

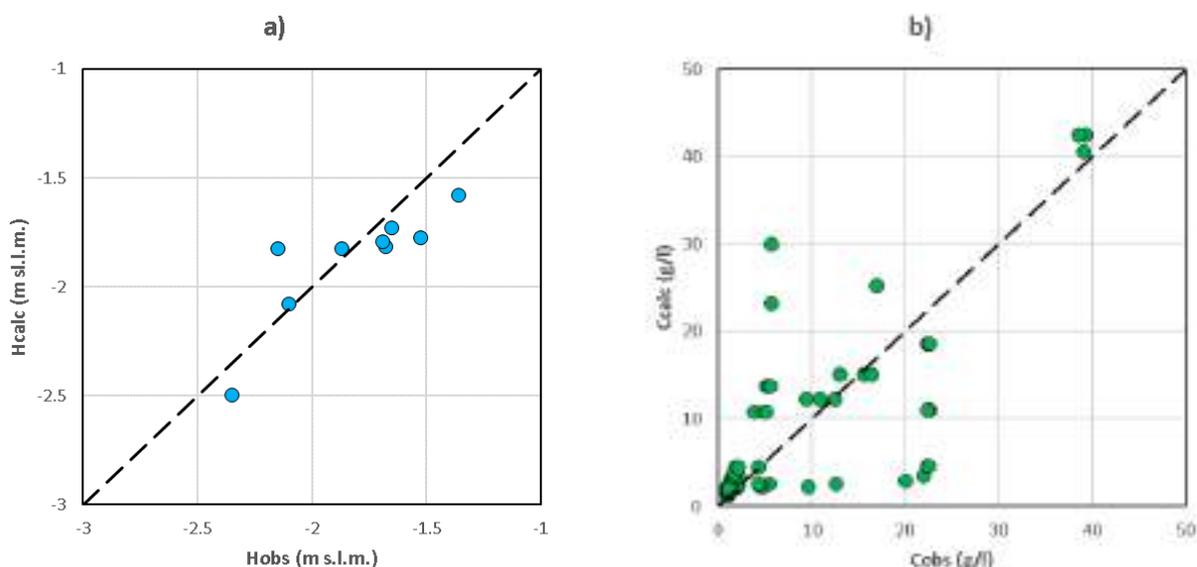


Figura 6.25. Confronto tra i valori osservati (obs) e calcolati (calc) al termine della simulazione C4: a) carico idraulico e b) concentrazione dei logs.

Dataset	nRMS (%)	NSE ()	Livello performance
Carico idraulico	16.90	0.67	buono
Concentrazione logs	13.96	0.59	soddisfacente

Tabella 6.13. Indicatori statistici di calibrazione/verifica e livello di performance.

Parametro	IN (L/s)	OUT (L/s)
Carico assegnato (CHD)	3.07	-21.64
Scambio acque superficiali/sotterranee (RIV)	16.65	0.00
Ricarica (RCH)	3.13	1.10
Totale	22.84	22.74

Tabella 6.14. Bilancio di massa del flusso al termine della simulazione C4; i termini IN e OUT sono i flussi rispettivamente in ingresso ed in uscita dal dominio.

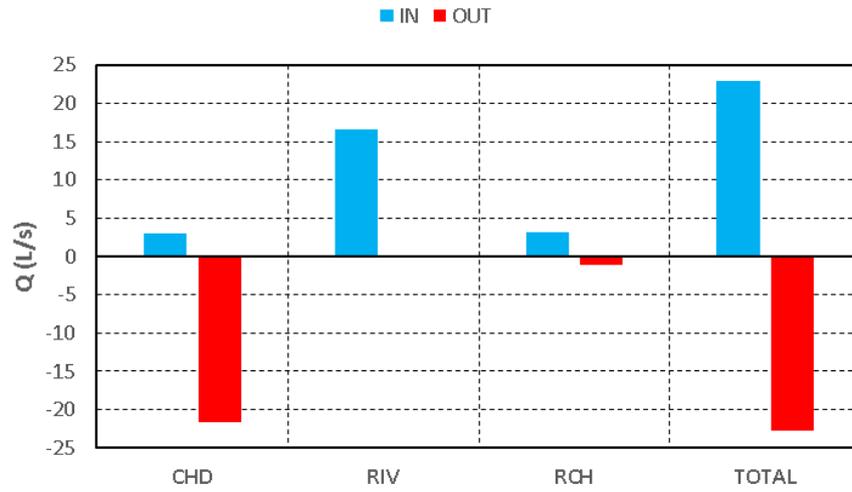


Figura 6.26. Bilancio di massa al termine della simulazione C4.

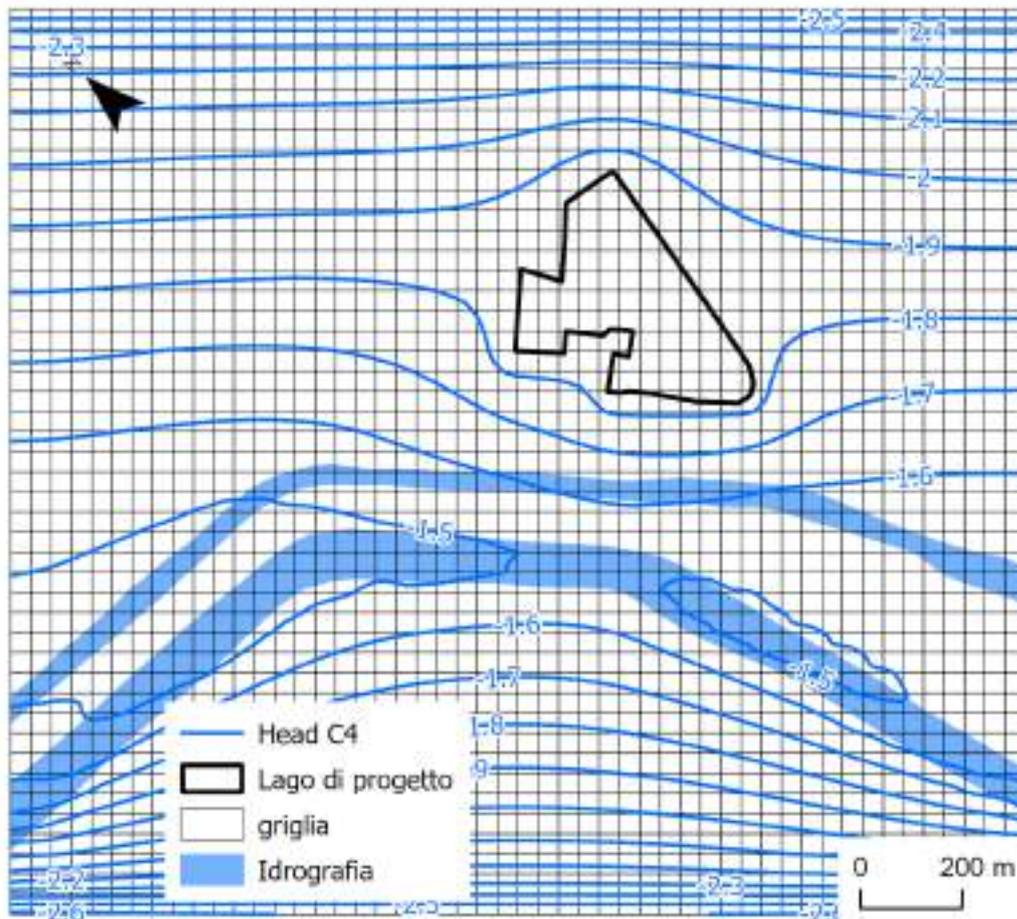


Figura 6.27. Distribuzione di carico idraulico (Head) calcolata sul layer 2 al termine della simulazione C4.

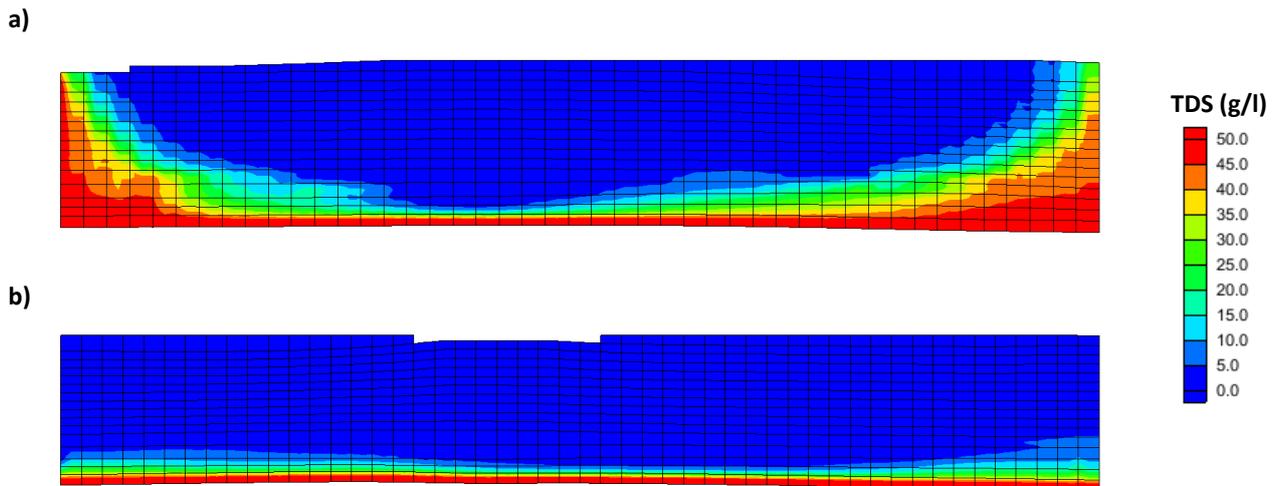


Figura 6.28. Distribuzione della concentrazione di TDS al termine della simulazione C4 (5 anni): a lungo la riga 23 e b) lungo la colonna 20; fattore di esagerazione verticale 10:1.

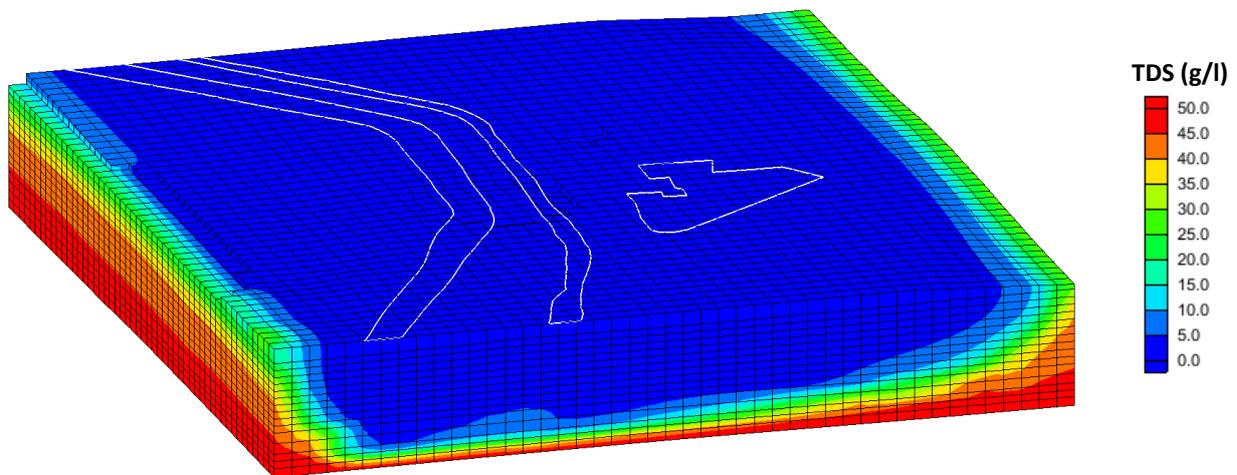


Figura 6.29. Distribuzione tridimensionale della concentrazione di TDS al termine della simulazione C4 (5 anni); in bianco il perimetro del lago di cava di novembre 2022 e le tracce planimetriche dei canali Circondariale e Navigabile; fattore di esagerazione verticale 10:1.

6.4 Implementazione delle simulazioni previsionali

Per la verifica delle potenziali conseguenze derivanti dall'ampliamento dell'attività estrattiva oltre ai volumi attualmente concessi, principale obiettivo del presente studio, sono stati ipotizzati 3 scenari previsionali che considerano l'approfondimento dell'escavazione rispettivamente a 15 (P1), 17 (P2) e 19 m da p.c. (P3). Si tratta di simulazioni conservative che, a partire dai risultati della simulazione C4 (Par. 6.3.6), riproducono,

per i successivi 50 anni, le modifiche generate da un lago, esteso quanto il limite di scavo riportato in rosso in Figura 6.30, sul regime delle acque sotterranee in termini di distribuzione di carico idraulico e salinità.

E' importante sottolineare che la verifica della profondità di 15 m da p.c. aveva già dato esiti positivi con le simulazioni riportate in CFR per Cantoniera Cavallara (2009), nonostante con quelle simulazioni fossero stati ipotizzati perimetri di scavo più estesi rispetto a quello attualmente in progetto (il confronto dei diversi perimetri è presentato in Figura 6.30).

L'approccio modellistico utilizzato per le simulazioni previsionali è il medesimo utilizzato per le simulazioni di calibrazione/verifica (Par. 6.2) e consiste nell'abbinare il flusso allo stato stazionario con un trasporto sufficientemente lungo per il raggiungimento dell'equilibrio allo stato transitorio. Come per la calibrazione/verifica, anche per le simulazioni previsionali l'obiettivo è quello di massimizzare i potenziali effetti della presenza del lago, simulando uno scavo pseudo-istantaneo, mentre nella realtà lo scavo si distribuisce su un arco temporale tale da permettere al sistema di raggiungere delle condizioni di equilibrio intermedie. A causa degli effetti del cambiamento climatico sul regime termometrico dell'area e nonostante per il momento non siano evidenti modificazioni sui regimi di precipitazione, evapotraspirazione reale e surplus (Par. 4.1.2), si è ritenuto di non estendere la durata delle simulazioni previsionali oltre a 50 anni. Di seguito sono brevemente descritti i passaggi che hanno portato alla implementazione delle suddette simulazioni.



Figura 6.30. Confronto tra il perimetro di progetto attuale e le ipotesi di futuri ampliamenti ipotizzate in CFR per Cantoniera Cavallara (2009).

6.4.1 Discretizzazione spaziale del lago di cava

Il passaggio dalla fase di calibrazione a quella previsionale, per essere significativo, richiede che la griglia di calcolo non subisca modifiche di rilievo. Per questa ragione la griglia di discretizzazione delle simulazioni previsionali è la stessa utilizzata nelle simulazioni di calibrazione (Par. 6.2.1).

6.4.2 Discretizzazione temporale e metodi risolutivi

Per quanto riguarda il flusso, in analogia con le simulazioni di calibrazione/verifica (Par. 6.2.2), il tempo è stato discretizzato in un solo stress period di 50 anni, ulteriormente suddiviso in 20 time steps di ampiezza variabile secondo una progressione geometrica con moltiplicatore pari a 1.1. L'ampiezza dei transport time steps, all'interno di ciascun time step, è variabile e regolata dai parametri del risolutore di trasporto utilizzato.

I metodi risolutivi di flusso e trasporto sono gli stessi descritti a proposito delle simulazioni di calibrazione/verifica (Par. 6.2.2).

6.4.3 Parametrizzazione del lago di cava

La parametrizzazione del lago di cava ha previsto l'assegnazione alle celle corrispondenti al lago (Figura 6.31) delle proprietà idrodinamiche ed idrodispersive riportate in Tabella 6.2; si tratta degli stessi valori utilizzati nelle simulazioni di calibrazione/verifica (Par. 6.2.4) e nell'implementazione del 2009 (CFR per Cantoniera Cavallara, 2009).

Lungo la verticale la parametrizzazione del lago di cava ha riguardato (Figura 6.32):

- le celle dei layers da 1 a 9 (circa 15 m di profondità) per la simulazione P1;
- le celle dei layers da 1 a 10 (circa 17 m di profondità) per la simulazione P2;
- le celle dei layers da 1 a 11 (circa 19 m di profondità) per la simulazione P3.

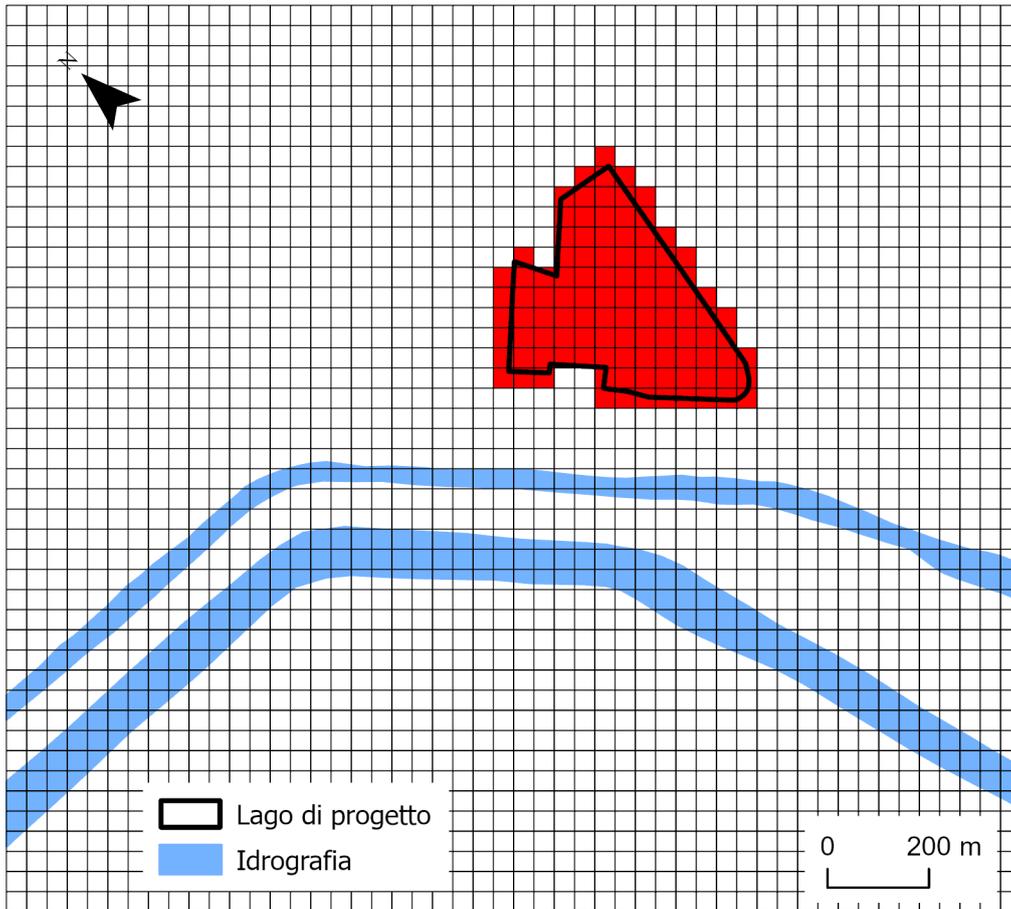
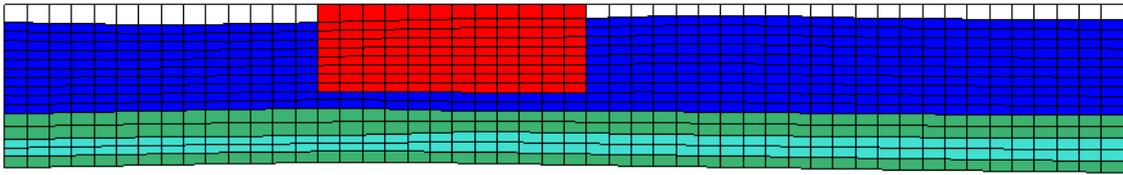
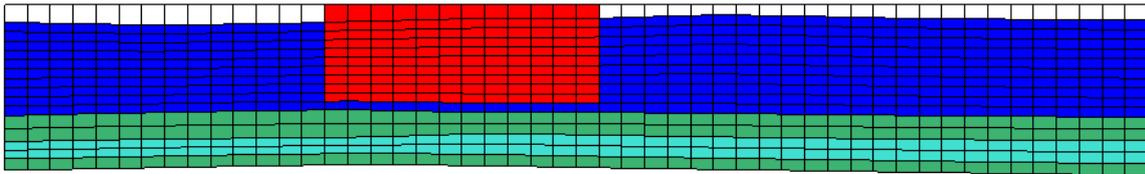


Figura 6.31. Parametrizzazione delle celle corrispondenti al lago (in rosso) per le simulazioni previsionali.

a)



b)



c)

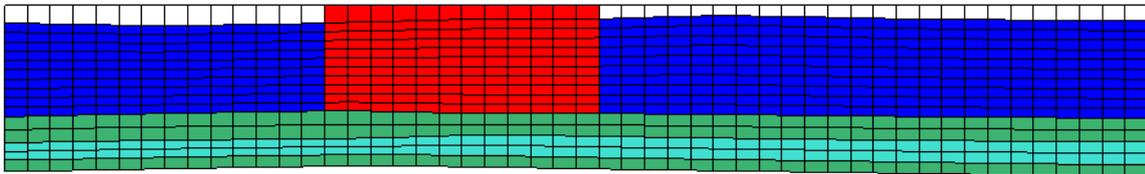


Figura 6.32. Parametrizzazione delle celle corrispondenti al lago di cava (in rosso) lungo la riga 30 della griglia di discretizzazione (vista da SO verso NE) per le simulazioni: a) P1, b) P2 e c) P3; fattore di esagerazione verticale 10:1; i valori dei parametri di ciascuna zona sono riportati in Tabella 6.1 ed in Tabella 6.2

6.4.4 Condizioni al contorno ed interne

Le condizioni al contorno ed interne utilizzate nelle simulazioni previsionali sono le medesime implementate nelle simulazioni di calibrazione/verifica (Par. 6.2.6). L'unica differenza riguarda il valore associato alla condizione interna di secondo tipo utilizzata per riprodurre il bilancio sulla superficie del lago. In questo caso, infatti, per quanto riguarda la precipitazione si è considerato il valore medio annuo della stazione di Guagnino nel periodo 2012-2022, pari a 643.84 mm/anno (Tabella 6.15). Mentre per l'evaporazione, come in CFR per Cantoniera Cavallara (2009), si è utilizzata la formula di Dragoni & Valigi (1994), a partire, però, dai dati di temperatura media mensile della stazione di Guagnino del periodo 2012-2022 (Tabella 6.15), incrementati di 2 °C (0.04 °C/anno per 50 anni) per tenere conto delle tendenze climatiche in atto (Par. 4.1.2). L'evaporazione proiettata al 2072 risulta pari a 1087.9 mm/anno, da cui deriva una differenza afflussi-deflussi sulla superficie del lago di -444 mm/anno. Questo valore è stato associato alle celle corrispondenti al lago (Figura 6.31) sul layer 1 attraverso il pacchetto RCH. Anche in questo caso la condizione di flusso è accompagnata da una condizione di RC pari a 0.01 g/l (10 mg/l) che riproduce la salinità dei flussi in uscita dal dominio di modellazione.

Parametro	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
P _m (mm)	25.69	56.89	40.04	43.80	67.31	50.24	40.91	47.27	74.59	58.16	91.56	47.38
T _{a,m} (°C)	4.38	6.72	9.89	13.96	18.27	23.47	25.73	25.33	20.95	16.20	11.04	5.32

Tabella 6.15. Valori di precipitazione media mensile (P_m) e temperatura atmosferica media mensile (T_{a,m}) registrati presso la stazione di Guagnino nel periodo 2012-2022.

6.4.5 Distribuzione iniziale del carico idraulico e della salinità

Le distribuzioni iniziali di carico idraulico e salinità utilizzate nelle simulazioni previsionali corrispondono a quelle calcolate al termine della simulazione C4 (Par. 6.3.6). Questo espediente permette di far partire le previsioni da una condizione di equilibrio prossima a quella rilevata con il monitoraggio 2022-2023.

6.5 Risultati delle simulazioni previsionali

Per valutare in modo quantitativo i risultati delle simulazioni previsionali sono utilizzati 12 punti di controllo del carico idraulico e della concentrazione (Figura 6.33). Lungo la verticale i punti di controllo sono posizionati rispettivamente -5, -10, -15, -20 e -25 m s.l.m. I punti alle quote da -5 a -15 m s.l.m. sono rappresentativi delle condizioni di carico idraulico e salinità nel 1° litosoma sabbioso, quelli a -20 m s.l.m. nell'acquitrando e quelli a -25 m s.l.m. nel 2° litosoma sabbioso. I punti di controllo B2 e C2 alle profondità da -5 a -15 m s.l.m. sono posizionati all'interno del lago.

Poiché le simulazioni previsionali partono dalle distribuzioni di carico idraulico e concentrazione calcolate al termine della simulazione C4, fine del 2022, per descrivere l'effetto del lago di cava sul sistema idrogeologico è sufficiente comparare i valori di carico/concentrazione all'inizio di ciascuna simulazione (tempo = 0) con i valori di carico/concentrazione calcolati al termine della stessa (tempo = 50 anni = 18250 giorni). Un ulteriore parametro che può essere utilizzato per valutare quantitativamente i risultati delle simulazioni previsionali è il bilancio di massa al termine di ciascuna simulazione.

Di seguito sono riportati i risultati relativi a ciascuno degli scenari di approfondimento ipotizzati. Per brevità non vengono presentati tutti i punti di controllo ma solamente quelli in cui il carico idraulico o la concentrazione di soluti presentano variazioni significative.

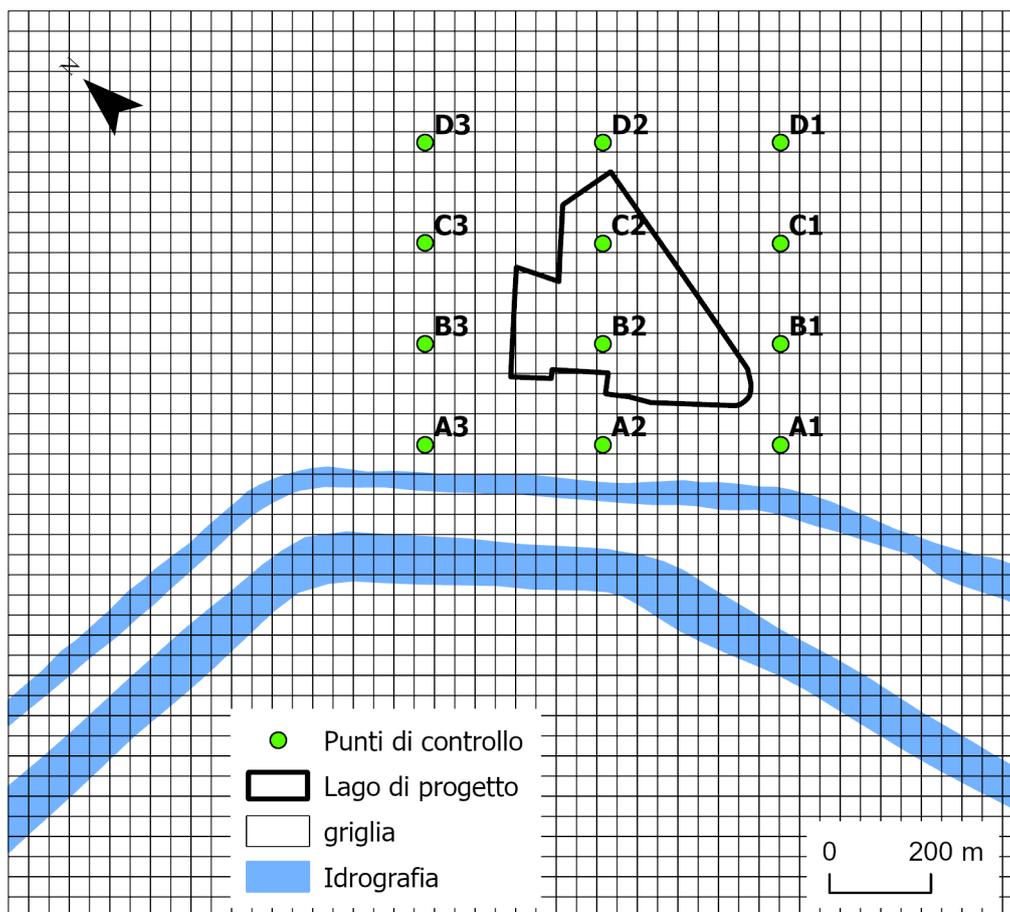


Figura 6.33. Ubicazione planimetrica dei punti di controllo del carico idraulico e della concentrazione utilizzati nelle simulazioni previsionali.

6.5.1 Simulazione P1

La simulazione P1 riproduce l'approfondimento dell'attività estrattiva a 15 m da p.c. e ne valuta i potenziali effetti al 2072 (50 anni) a partire dalla condizione attuale, registrata con il monitoraggio 2022-2023 e riprodotta con la simulazione C4.

In Figura 6.34 è visualizzabile il confronto tra le distribuzioni di carico idraulico calcolate sul layer 2 (porzione superiore del 1° litosoma sabbioso) al termine delle simulazioni C4 (2022) e P1 (2072), mentre in Tabella 6.16 sono confrontati i valori di carico idraulico delle stesse simulazioni calcolati in corrispondenza dei punti di controllo in cui si registra una diminuzione. Come si può vedere l'approfondimento del lago di cava a 15 m da p.c. provoca un arretramento della linea isopotenziometrica -1.8 m s.l.m. verso il Canale Navigabile e l'avanzamento della linea -1.9 m s.l.m. verso il lago. Nonostante ciò, in corrispondenza del lago il carico idraulico continua ad attestarsi su valori compresi tra -1.8 e -1.9 m s.l.m. La diminuzione del carico idraulico (abbassamento) coinvolge i punti di controllo: A2, B3, C1, C3, D1, D2 e D3, con valori compresi tra 1 e 22 cm. Lungo la verticale, gli orizzonti più coinvolti dall'abbassamento sono il 2° litosoma sabbioso (B3, C3, D1 e D2),

non in comunicazione diretta con la rete idrografica, ed il sovrastante acquitardo (D2). Per quanto riguarda il bilancio di massa, in Tabella 6.17 è riportato il bilancio della simulazione P1, mentre in Figura 6.35 lo stesso è confrontato con quello della simulazione C4, che costituisce il punto di partenza della previsione. Un incremento dell'evaporazione del 39%, a causa del trend climatico in atto, produce un effetto complessivamente modesto aumentando l'alimentazione da parte dei canali del 2% e diminuendo il flusso in uscita dal limite nord orientale dell'1%.

Anche l'effetto sulla salinità può ritenersi nel complesso modesto. I punti di controllo in cui si registra un aumento della concentrazione di TDS sono: B2, C2, D1 e D2 (Tabella 6.18), con incrementi compresi tra 0.040 e 0.625 g/l, che se normalizzati sul range di concentrazione sperimentalmente rilevato (da 1.2 a 48 g/l; CFR per Cantoniera Cavallara, 2009), corrispondono a variazioni comprese tra 0.09% e 1.34%. Lungo la verticale l'incremento maggiore si registra in corrispondenza della porzione superiore del 1° litosoma sabbioso, oltre il lago di cava (D2). In Figura 6.36 è mostrata la distribuzione della salinità con la profondità al termine della simulazione P1, rispettivamente lungo una riga (da SO verso NE) ed una colonna (da NO a SE) ubicate in posizione centrale al dominio.

In sintesi, si può affermare che gli effetti dell'approfondimento del lago di cava a 15 m di profondità dopo 50 anni risultano estremamente modesti rispetto alla situazione registrata con il monitoraggio 2022-2023. Nonostante l'incremento dell'evaporazione dalla superficie del lago legata alle tendenze climatiche in atto, la diminuzione del carico idraulico si mantiene su valori modesti, coinvolgendo prevalentemente il 2° litosoma sabbioso, mentre gli incrementi di salinità previsti non superano l'1.3% rispetto al range rilevato in sito.

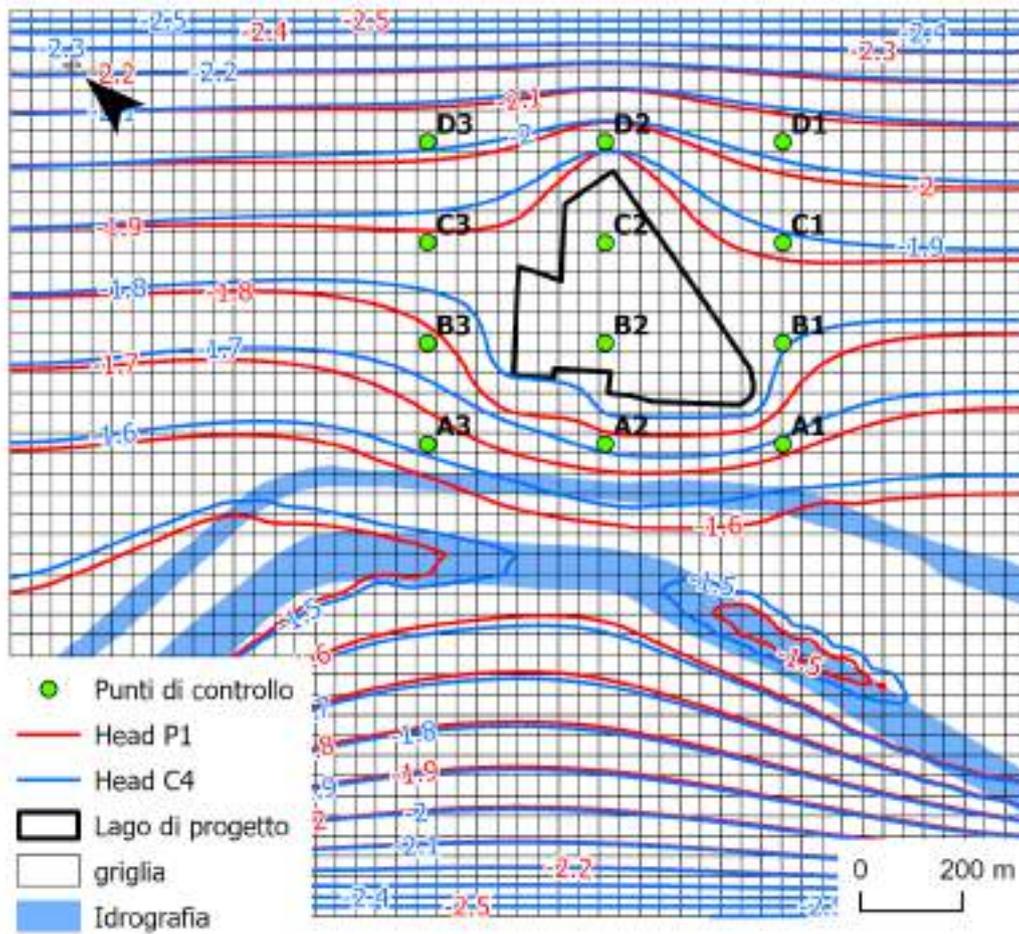


Figura 6.34. Confronto tra le distribuzioni di carico idraulico (Head) calcolate sul layer 2 al termine delle simulazioni C4 (2022) e P1 (2072).

ID	Z (m s.l.m.)	H to (m s.l.m.)	H t ₁₈₂₅₀ (m s.l.m.)	Δ (m)
D2_10	10	-1.94	-1.93	0.01
D2_15	15	-1.95	-1.94	0.01
D2_20	20	-2.11	-2.01	0.10
A2_25	25	-2.07	-2.05	0.02
B3_25	25	-2.00	-1.97	0.03
C1_25	25	-2.33	-2.33	0.01
C3_25	25	-2.24	-2.19	0.05
D1_25	25	-2.50	-2.46	0.04
D2_25	25	-2.31	-2.09	0.22
D3_25	25	-2.47	-2.47	0.01

Tabella 6.16. Confronto tra i valori di carico idraulico calcolati al termine delle simulazioni C4 (2022) e P1 (2072), nei punti di controllo A2, B3, C1, C3, D1, D2 e D3 (Figura 6.34).

Parametro	IN (L/s)	OUT (L/s)
Carico assegnato (CHD)	3.27	21.43
Scambio acque superficiali/sotterranee (RIV)	17.00	0.00
Ricarica (RCH)	3.06	1.81
Totale	23.33	23.24

Tabella 6.17. Bilancio di massa del flusso al termine della simulazione P1; i termini IN e OUT sono i flussi rispettivamente in ingresso ed in uscita dal dominio.

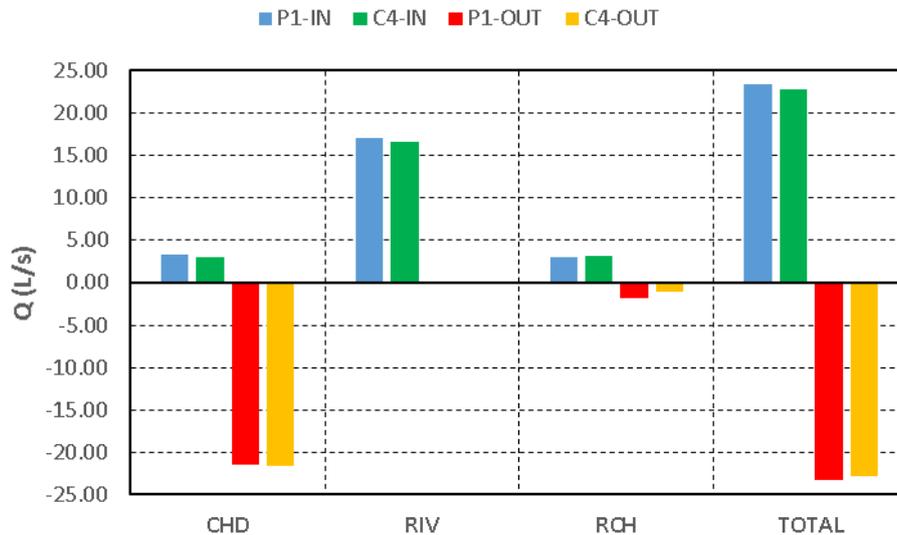
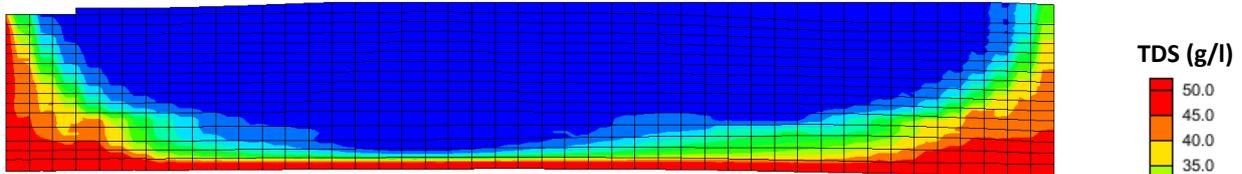


Figura 6.35. Confronto tra i bilanci di massa delle simulazioni C4 (2022) e P1 (2072).

ID	Z (m s.l.m.)	C _{t0} (g/l)	C _{t18250} (g/l)	Δ (g/l)	Δ (%)
B2_5	5	1.79	1.903	0.116	0.002
C2_5	5	1.87	1.926	0.054	0.001
D2_5	5	2.06	2.686	0.625	0.013
B2_10	10	1.87	1.947	0.076	0.002
C2_10	10	1.95	1.994	0.04	0.001
D1_20	20	32.826	33.103	0.277	0.006

Tabella 6.18. Confronto tra i valori di concentrazione calcolati al termine delle simulazioni C4 (2022) e P1 (2072), nei punti di controllo B2, C2, D1 e D2 (Figura 6.34).

a)



b)

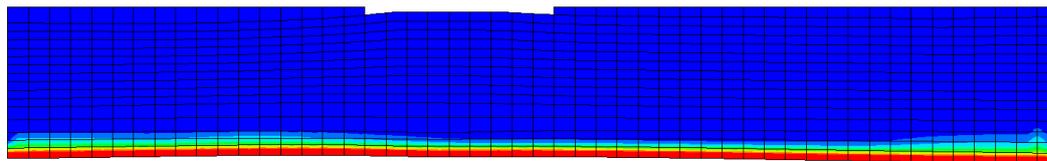


Figura 6.36. Distribuzione della concentrazione di TDS al termine della simulazione P1 (50 anni): a lungo al riga 23 e b) lungo la colonna 20; fattore di esagerazione verticale 10:1.

6.5.2 Simulazione P2

La simulazione P2 riproduce l'approfondimento dell'attività estrattiva a 17 m da p.c. e ne valuta i potenziali effetti al 2072 (50 anni) a partire dalla condizione attuale, registrata con il monitoraggio 2022-2023 e riprodotta con la simulazione C4.

In Figura 6.37 è visualizzabile il confronto tra le distribuzioni di carico idraulico calcolate sul layer 2 (porzione superiore del 1° litosoma sabbioso) al termine delle simulazioni C4 (2022) e P2 (2072), mentre in Tabella 6.19 sono confrontati i valori di carico idraulico delle stesse simulazioni calcolati in corrispondenza dei punti di controllo in cui si registra una diminuzione. Anche in questo caso l'approfondimento dell'attività estrattiva provoca l'arretramento della linea isopotenziometrica -1.8 m s.l.m. verso il Canale Navigabile e l'avanzamento della linea -1.9 m s.l.m. verso il lago. Il carico idraulico in corrispondenza del lago continua comunque ad attestarsi su valori compresi tra -1.8 e -1.9 m s.l.m. L'abbassamento coinvolge i punti di controllo: A2, B3, C1, C3, D1, D2 e D3, con valori compresi tra 1 e 24 cm. Lungo la verticale, gli orizzonti più coinvolti dalla diminuzione di carico sono ancora il 2° litosoma sabbioso (B3, C1, C3, D1, D2 e D3) ed il sovrastante acquitaro (D2) che lo separa dal 1° litosoma sabbioso. Il bilancio di massa al termine della simulazione P2 è riportato in Tabella 6.20, mentre in Figura 6.38 lo stesso è confrontato con quello della simulazione C4, che costituisce il punto di partenza della previsione. Anche in questo caso l'incremento dell'evaporazione produce effetti modesti e paragonabili a quelli della simulazione P1 (Par. 6.5.1), quantificabili nell'aumento del 2% dell'alimentazione da parte dei canali e nella diminuzione del flusso in uscita dal limite nord orientale dell'1%.

In questo scenario, i punti di controllo che registrano un aumento della concentrazione di TDS sono: B2, C2 e D2 (Tabella 6.21), con incrementi compresi tra 0.017 e 0.709 g/l, che corrispondono a variazioni, rispetto al range di salinità sperimentale, comprese tra 0.04% e 1.51%. Lungo la verticale, l'incremento maggiore si registra nella parte più superficiale del 1° litosoma sabbioso, a valle del lago di cava (D2). La distribuzione

della salinità con la profondità è presentata in Figura 6.39, rispettivamente lungo una riga (da SO verso NE) ed una colonna (da NO a SE) ubicate in posizione centrale al dominio di modellazione.

Nonostante l'ulteriore approfondimento dell'attività estrattiva, da 15 a 17 m da p.c., gli effetti sul sistema in termini di variazione del carico idraulico e salinità si mantengono estremamente contenuti rispetto alla condizione attuale. La diminuzione del carico idraulico coinvolge prevalentemente il 2° litosoma sabbioso con valori di poco superiori a 20 cm, mentre gli incrementi di salinità previsti si attestano attorno al 1.5% rispetto al range rilevato in sito.

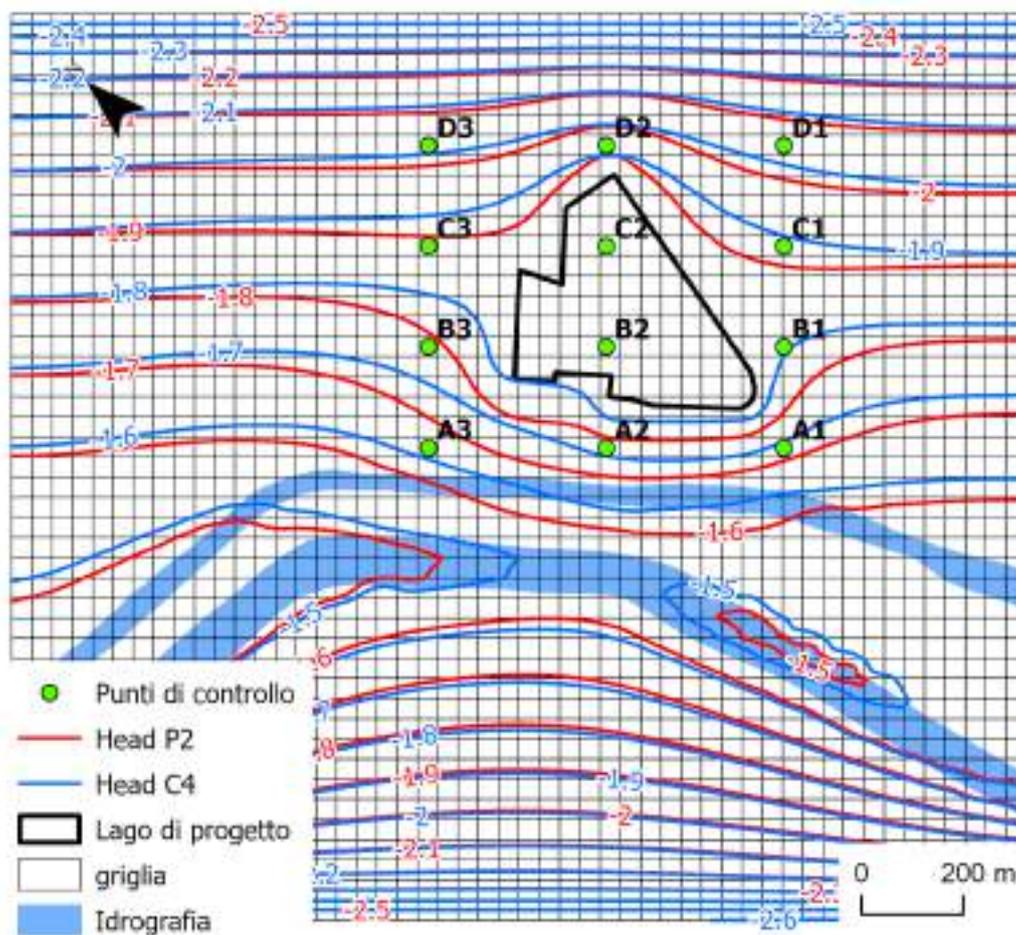


Figura 6.37. Confronto tra le distribuzioni di carico idraulico (Head) calcolate sul layer 2 al termine delle simulazioni C4 (2022) e P2 (2072).

ID	Z (m s.l.m.)	H to (m s.l.m.)	H t ₁₈₂₅₀ (m s.l.m.)	Δ (m)
D2_10	10	-1.94	-1.93	0.01
D2_15	15	-1.95	-1.93	0.01
D2_20	20	-2.11	-1.99	0.12
A2_25	25	-2.07	-2.05	0.01
B3_25	25	-2.00	-1.97	0.03
C1_25	25	-2.33	-2.32	0.01
C3_25	25	-2.24	-2.19	0.05
D1_25	25	-2.50	-2.46	0.04
D2_25	25	-2.31	-2.07	0.24
D3_25	25	-2.47	-2.47	0.01

Tabella 6.19. Confronto tra i valori di carico idraulico calcolati al termine delle simulazioni C4 (2022) e P2 (2072), nei punti di controllo A2, B3, C1, C3, D1, D2 e D3 (Figura 6.34).

Parametro	IN (L/s)	OUT (L/s)
Carico assegnato (CHD)	3.31	21.52
Scambio acque superficiali/sotterranee (RIV)	17.04	0.00
Ricarica (RCH)	3.06	1.18
Totale	23.41	23.32

Tabella 6.20. Bilancio di massa del flusso al termine della simulazione P2; i termini IN e OUT sono i flussi rispettivamente in ingresso ed in uscita dal dominio.

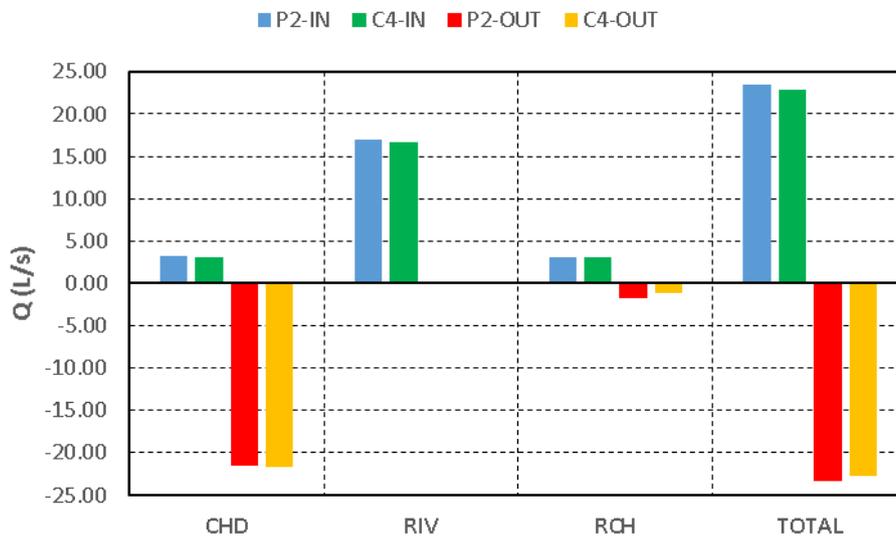


Figura 6.38. Confronto tra i bilanci di massa delle simulazioni C4 (2022) e P2 (2072).

ID	Z (m s.l.m.)	C _{t0} (g/l)	C _{t18250} (g/l)	Δ (g/l)	Δ (%)
B2_5	5	1.787	1.962	0.175	0.004
C2_5	5	1.872	1.984	0.112	0.002
D2_5	5	2.061	2.77	0.709	0.015
B2_10	10	1.871	1.963	0.092	0.002
C2_10	10	1.954	2.016	0.062	0.001

Tabella 6.21. Confronto tra i valori di concentrazione calcolati al termine delle simulazioni C4 (2022) e P2 (2072), nei punti di controllo B2, C2, D1 e D2 (Figura 6.34).

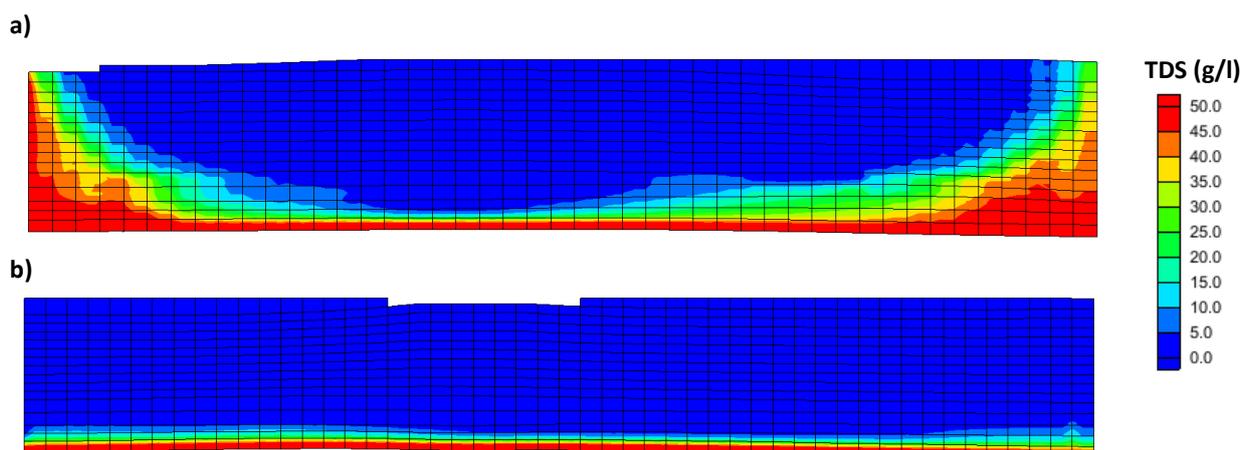


Figura 6.39. Distribuzione della concentrazione di TDS al termine della simulazione P2 (50 anni): a) lungo la riga 23 e b) lungo la colonna 20; fattore di esagerazione verticale 10:1.

6.5.3 Simulazione P3

La simulazione P3 riproduce l'approfondimento dell'attività estrattiva a 19 m da p.c. e ne valuta i potenziali effetti al 2072 (50 anni) a partire dalla condizione attuale, registrata con il monitoraggio 2022-2023 e riprodotta con la simulazione C4.

In Figura 6.40 è mostrato il confronto tra le distribuzioni di carico idraulico calcolate sul layer 2 (porzione superiore del 1° litosoma sabbioso) al termine delle simulazioni C4 (2022) e P3 (2072), mentre in Tabella 6.22 sono confrontati i valori di carico idraulico delle stesse simulazioni calcolati in corrispondenza dei punti di controllo in cui si registra una diminuzione. La differenza con gli altri due scenari è minima, anche in questo caso l'approfondimento dell'attività estrattiva induce l'arretramento della linea isopotenziometrica -1.8 m s.l.m. verso il Canale Navigabile e l'avanzamento della linea -1.9 m s.l.m. verso il lago. Il carico idraulico in corrispondenza lago continua ad essere compreso tra -1.8 e -1.9 m s.l.m. L'abbassamento coinvolge i punti di controllo: A2, B1, B2, B3, C1, C3, D1, D2 e D3, con valori compresi tra 1 e 25 cm. Lungo la verticale, il 2° litosoma sabbioso (A2, B1, B3, C1, C3, D1, D2 e D3) ed il sovrastante acquitardo (B2 e D2) si confermano gli orizzonti più coinvolti dalla diminuzione di carico idraulico. Il bilancio di massa al termine della simulazione P3 è riportato in Tabella 6.23, mentre in Figura 6.41 lo stesso è confrontato con quello della simulazione C4, che costituisce il punto di partenza della previsione. Nonostante l'ulteriore approfondimento, si confermano gli effetti riportati a proposito degli altri due scenari previsionali (Par. 6.5.1 e Par. 6.5.2), vale a dire: un

incremento del 2% dell'alimentazione da parte del sistema dei canali ed una diminuzione pari a circa l'1% del flusso in uscita dal limite nord orientale. L'escavazione della parte più profonda del 1° litosoma sabbioso non produce ulteriori modifiche al bilancio di massa del sistema.

Nell'ultimo scenario previsionale, i punti di controllo che registrano un aumento della concentrazione di TDS sono: B1, B2, C2, D1, D2 e D3 (Tabella 6.24), con incrementi compresi tra 0.036 e 0.947 g/l, che corrispondono a variazioni comprese tra lo 0.08% ed il 2.02% rispetto al range sperimentale. Lungo la verticale, l'incremento maggiore di registra ancora una volta nella parte più superficiale del 1° litosoma sabbioso, immediatamente a valle del lago di cava (D2). La distribuzione della salinità con la profondità è visualizzabile in Figura 6.42, rispettivamente lungo una riga (da SO verso NE) ed una colonna (da NO a SE) ubicate in posizione centrale al dominio di modellazione.

Anche l'ultimo scenario previsionale, quello che prevede l'ulteriore approfondimento a 19 m da p.c., non mette in luce elementi di preoccupazione, in quanto gli effetti sulle distribuzioni di carico idraulico e salinità rimangono estremamente contenuti. La diminuzione del carico idraulico coinvolge prevalentemente il 2° litosoma sabbioso con valori massimi pari a 25 cm, mentre per la salinità, nella porzione superficiale del 1° litosoma sabbioso, a valle del lago, si prevedono incrementi di poco superiori al 2% in 50 anni.

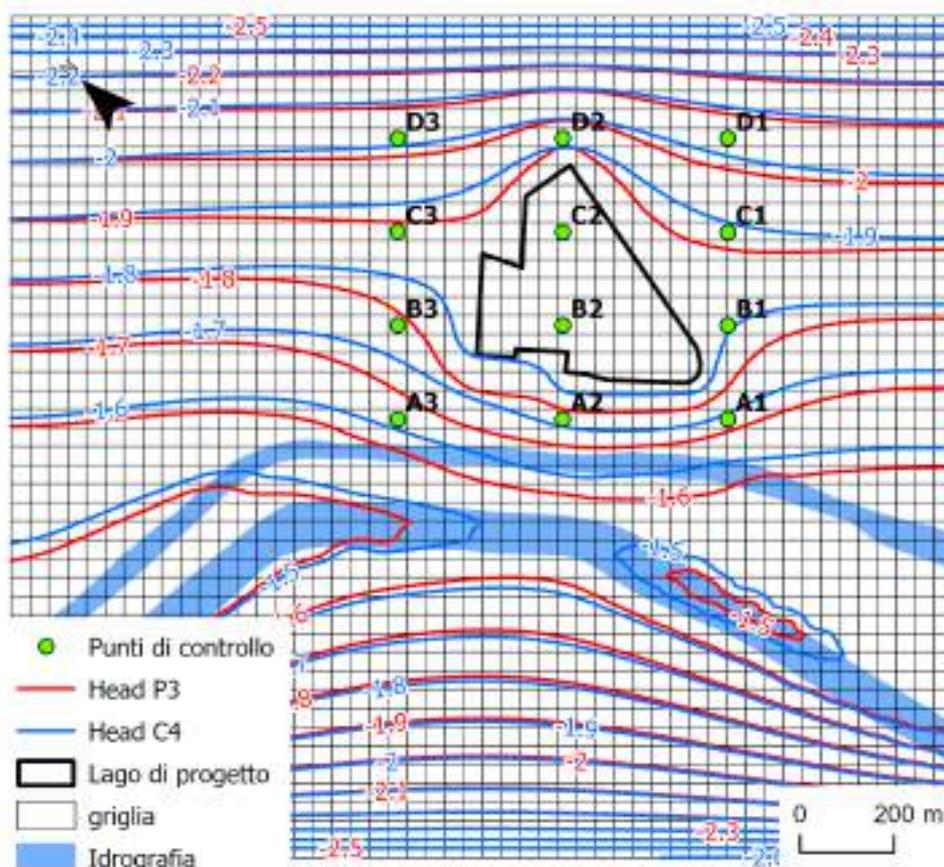


Figura 6.40. Confronto tra le distribuzioni di carico idraulico (Head) calcolate sul layer 2 al termine delle simulazioni C4 (2022) e P3 (2072).

ID	Z (m s.l.m.)	H to (m s.l.m.)	H t ₁₈₂₅₀ (m s.l.m.)	Δ (m)
D2_5	5	-1.94	-1.93	0.01
D2_10	10	-1.94	-1.93	0.01
D2_15	15	-1.95	-1.93	0.02
B2_20	20	-1.93	-1.87	0.06
D2_20	20	-2.11	-1.97	0.14
A2_25	25	-2.07	-2.05	0.02
B1_25	25	-2.17	-2.16	0.01
B3_25	25	-2.00	-1.96	0.04
C1_25	25	-2.33	-2.31	0.02
C3_25	25	-2.24	-2.19	0.05
D1_25	25	-2.50	-2.45	0.05
D2_25	25	-2.31	-2.06	0.25
D3_25	25	-2.47	-2.45	0.02

Tabella 6.22. Confronto tra i valori di carico idraulico calcolati al termine delle simulazioni C4 (2022) e P3 (2072), nei punti di controllo A2, B1, B2, B3, C1, C3, D1, D2 e D3 (Figura 6.34).

Parametro	IN (L/s)	OUT (L/s)
Carico assegnato (CHD)	3.29	21.49
Scambio acque superficiali/sotterranee (RIV)	17.04	0.00
Ricarica (RCH)	3.06	1.81
Totale	23.39	23.30

Tabella 6.23. Bilancio di massa del flusso al termine della simulazione P3; i termini IN e OUT sono i flussi rispettivamente in ingresso ed in uscita dal dominio.

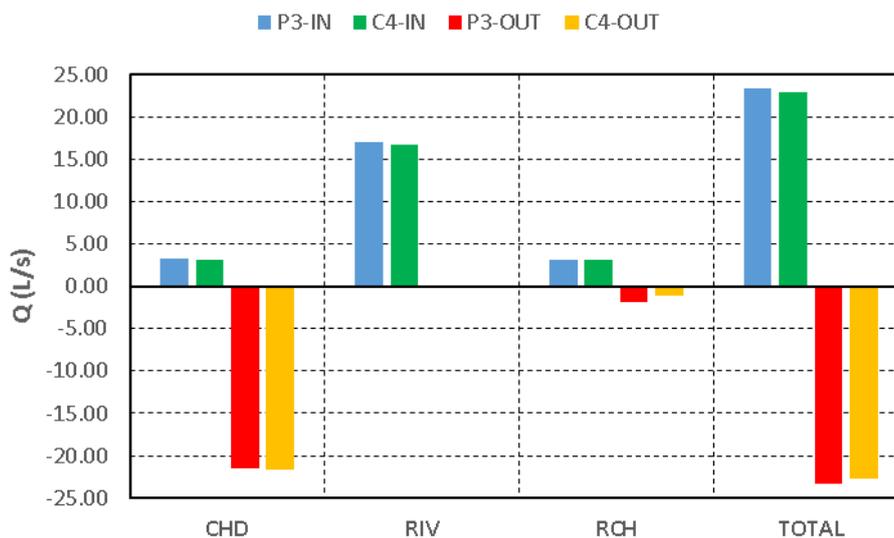


Figura 6.41. Confronto tra i bilanci di massa delle simulazioni C4 (2022) e P3 (2072).

ID	Z (m s.l.m.)	C t ₀ (g/l)	C t ₁₈₂₅₀ (g/l)	Δ (g/l)	Δ (%)
B1_5	5	1.31	1.346	0.036	0.001
B2_5	5	1.787	2.162	0.375	0.008
C2_5	5	1.872	2.207	0.335	0.007
D2_5	5	2.061	3.008	0.947	0.020
B2_10	10	1.871	2.225	0.354	0.008
C2_10	10	1.954	2.272	0.318	0.007
D2_10	10	2.209	2.434	0.225	0.005
D1_20	20	32.826	32.982	0.156	0.003
D3_20	20	31.708	31.846	0.138	0.003

Tabella 6.24. Confronto tra i valori di concentrazione calcolati al termine delle simulazioni C4 (2022) e P3 (2072), nei punti di controllo B1, B2, C2, D1 D2 e D3 (Figura 6.34).

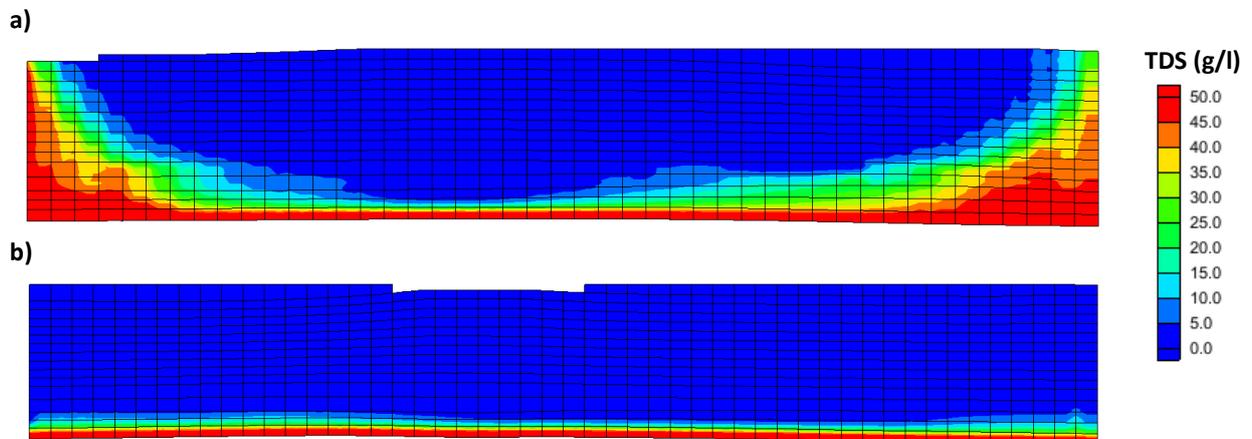


Figura 6.42. Distribuzione della concentrazione di TDS al termine della simulazione P3 (50 anni): a) lungo la riga 23 e b) lungo la colonna 20; fattore di esagerazione verticale 10:1.

7 Conclusioni

Lo studio qui descritto aveva due obiettivi: (1) verificare lo stato di interazione tra l'attività estrattiva presso la Cava Cavallara ed il sistema idrogeologico e (2) prevedere gli effetti dell'approfondimento dell'escavazione fino alla profondità massima di 19 m da p.c. attraverso modellazione numerica a densità variabile. Rispetto alle precedenti valutazioni di ampliamento dell'attività estrattiva si ritiene che, a parità di volumi estratti, la scelta di approfondire il lago esistente, anziché estenderlo, sia da considerarsi la strategia meno impattante dal punto di vista idrogeologico, in quanto non incrementa l'estensione della superficie di acqua libera sottoposta al fenomeno dell'evaporazione.

E' fondamentale inquadrare l'attività estrattiva e la sue ipotesi di ampliamento all'interno dello specifico contesto ambientale. Come illustrato nel modello idrogeologico concettuale (Par. 5), la distribuzione della salinità nel sottosuolo sull'area di studio è il risultato di processi naturali geologici e antropici storici (bonifica di aree vallive), ma certamente non conseguenza di problematiche di salinizzazione o intrusione marina in atto o del recente passato. La presenza di acque dolci rappresenta l'eccezione rispetto ad una regola secondo cui il sottosuolo, nelle aree circostanti la cava, è per la gran parte saturo di acque salate o salmastre. Tutto ciò è dovuto a peculiari condizioni geologiche, idrologiche e idrogeologiche locali: all'interno del 1° litosoma sabbioso e, sotto i canali, anche nell'acquitrando e nel 2° litosoma sabbioso, si è sviluppata una lente di acqua dolce (con salinità compresa tra 1.2 e 2.0 g/l) allungata secondo la direzione del sistema paleoalveo/canali e sovrapposta ad un originario strato di acqua salata/salmastra. Al di fuori del paleoalveo tutto il sistema multiacquifero è naturalmente saturo di acqua salata/salmastra. La lente di acqua dolce si è probabilmente evoluta nella forma attuale a partire dagli anni '50-'60 a seguito della realizzazione del Canale Circondariale, canale di gronda della bonifica delle Valli del Mezzano, e del Canale Navigabile.

In tale contesto è opportuno distinguere tra processo di salinizzazione (processo per il quale porzioni di sottosuolo vedono aumentare in modo significativo la salinità delle acque sotterranee in conseguenza di variazioni delle condizioni al contorno) e stato di salinizzazione naturale (distribuzione spaziale della salinità delle acque sotterranee). Nel caso specifico lo stato di salinizzazione è stato rilevato in condizioni ante operam e poi in diverse fasi di monitoraggio in corso d'opera, rilevando allo stato attuale una complessiva stazionarietà del sistema e quindi permettendo di escludere un processo di salinizzazione in atto, conseguente all'intervento antropico di escavazione delle sabbie.

Con lo stesso approccio, il presente studio ha cercato di confrontare quantitativamente tra le diverse condizioni (ante operam, corso d'opera e post operam) due parametri idrogeologici: il carico idraulico all'interno del sistema multiacquifero e la salinità delle acque sotterranee e del lago, valutando in tal modo gli effetti dell'intervento rispettivamente sulla quantità e qualità delle acque sotterranee.

Questa valutazione quantitativa e oggettiva sui due parametri idrogeologici cerca di ovviare all'ambiguità del concetto di impatto sulla risorsa idrica sotterranea in questo specifico contesto, dove la qualità della risorsa è già fortemente limitata per condizioni naturali (a prescindere dall'intervento) e, soprattutto, dove tale qualità di fatto già impedisce l'utilizzo antropico della risorsa per i potenziali usi locali. Infatti, il fabbisogno irriguo-agricolo su queste aree è soddisfatto integralmente con le acque del consorzio irriguo e l'acquifero freatico costiero non è un acquifero sfruttato né potenzialmente sfruttabile a scopo idropotabile.

Riassumendo i risultati dello studio, il monitoraggio idrogeologico realizzato sul periodo 2022-2023, a valle del confronto con i dati della fase ante operam, del monitoraggio 2008-2009 in corso d'opera, e del più recente monitoraggio 2016-2017, mostra un sistema idrogeologico piuttosto stazionario sul lungo termine, al netto delle oscillazioni stagionali legate alle precipitazioni meteoriche, già evidenziate con i monitoraggi precedenti e confermate dagli studi regionali sull'acquifero freatico costiero. Per quanto riguarda lo stato di salinizzazione del sistema, i profili verticali di conducibilità rilevati durante le campagne di misura distribuite sull'arco di un intero anno (da aprile 2022 a marzo 2023) non hanno evidenziato variazioni significative rispetto ai monitoraggi precedenti. Anche la conducibilità elettrica delle acque del lago risulta in linea con quanto è stato rilevato negli anni 2008-2009 e 2016-2017: nell'ultimo monitoraggio risulta sempre inferiore o pari a 2.20 mS/cm a 25 °C. Inoltre, i diversi logs realizzati nel lago evidenziano una distribuzione della salinità omogenea sia in pianta che lungo la verticale, oltre che soggetta a variazioni molto limitate nel tempo.

I dati di monitoraggio hanno sostanzialmente confermato la validità delle simulazioni numeriche sviluppate precedentemente e descritte in CFR per Cantoniera Cavallara (2009). Quindi, per valutare i potenziali effetti dell'approfondimento dell'attività estrattiva a 15, 17 e 19 m da p.c., non è stato necessario apportare modifiche rilevanti al modello numerico disponibile, ma si è ritenuto opportuno sviluppare una fase di ulteriore validazione attraverso i dati dei logs di salinità acquisiti in ante operam e corso d'opera e mai utilizzati finora per la verifica delle simulazioni numeriche. Nel dettaglio, la fase di validazione ha previsto:

- la re-implementazione della simulazione di calibrazione del 2009, con l'estensione del dataset di calibrazione, costituito dai dati di monitoraggio in continuo, includendo i dati dei logs realizzati in ante operam nel 2005-2006 (simulazione C1);
- l'implementazione di 3 simulazioni di verifica che riproducono i dati dei logs realizzati in corso d'opera nel 2007-2008, 2016-2017 e nel 2022-2023 e rispettivamente denominate simulazione C2, C3 e C4.

Per la verifica delle potenziali conseguenze derivanti dall'ampliamento dell'attività estrattiva oltre ai volumi attualmente concessi, obiettivo del presente studio, sono stati ipotizzati 3 scenari previsionali con 3 diverse ipotesi di approfondimento dell'escavazione:

- P1, fino a 15 m da p.c.
- P2, fino a 17 m da p.c.
- P3, fino a 19 m da p.c.

Si tratta di simulazioni conservative che, a partire dai risultati della simulazione C4 (Par. 6.3.6), riproducono, per i successivi 50 anni, le modifiche generate da un lago, esteso quanto il limite di scavo previsto, sul regime delle acque sotterranee in termini di distribuzione di carico idraulico e salinità. È importante ricordare che la verifica della profondità di 15 m da p.c. aveva già dato esiti positivi con le simulazioni riportate in CFR per Cantoniera Cavallara (2009), che ipotizzavano perimetri di scavo più estesi rispetto a quello attualmente in progetto.

I risultati delle simulazioni previsionali sono illustrati con dettaglio al paragrafo 6.5, attraverso l'analisi quantitativa delle variazioni di carico idraulico e salinità indotte su 12 punti di controllo distribuiti sul dominio di modellazione e sul confronto quantitativo dei bilanci di massa. In sintesi, gli effetti dell'approfondimento

del lago di cava dopo 50 anni risultano estremamente modesti rispetto alla situazione registrata con il monitoraggio 2022-2023. Nonostante l'incremento dell'evaporazione dalla superficie del lago legata alle tendenze climatiche in atto, la diminuzione del carico idraulico coinvolge prevalentemente il 2° litosoma sabbioso a valle flusso rispetto alla direttrice sud-nord di alimentazione dai canali al lago. Gli abbassamenti rispetto alla condizione attuale (simulazione C4) sono per lo più irrilevanti, con valori di pochi centimetri e mostrano il valore massimo a valle del lago in posizione centrale: 22 cm nella simulazione P1, 24 cm nella simulazione P2, 25 cm nella P3. Gli incrementi di salinità previsti sono anch'essi modesti e non superano l'1.3% rispetto al range rilevato in sito nell'ipotesi di approfondimento a 15 m di profondità (P1), l'1.5% nella simulazione a 17 m (P2) e il 2% nella simulazione a 19 m (P3).

I risultati delle simulazioni numeriche, per le ipotesi di progetto considerate, non prevedono effetti significativi sulle distribuzioni di carico idraulico e salinità per i prossimi 50 anni rispetto alla situazione attuale, che a sua volta non evidenzia significative variazioni rispetto all'ante operam, dopo circa 15 anni di attività estrattiva, con profondità massima di escavazione a 12 m da p.c. I risultati delle simulazioni sono da ritenersi altresì significativi in merito al tema dei cambiamenti climatici, in quanto includono i potenziali effetti dell'incremento delle temperature atmosferiche al 2072. L'analisi delle serie temporali di precipitazione e temperatura di oltre 60 anni per la stazione di Guagnino, infatti, ha permesso di individuare e quantificare i trend localmente in atto sui parametri del bilancio idrologico.

I punti di controllo ubicati in corrispondenza del lago non evidenziano incrementi significativi della salinità, per cui, nel lungo periodo (post operam), all'interno del lago le acque si stratificheranno secondo una configurazione molto simile a quella rilevata nel sistema multiacquifero con il monitoraggio 2022-2023, vale a dire: acque marcatamente dolci nella porzione superficiale ed acque più salate, probabilmente salmastre negli ultimi metri di profondità. La stratificazione naturale delle acque a differente salinità e lo sviluppo di una zona di transizione tra esse, infatti, è un processo noto che non coinvolge solamente le acque sotterranee ma anche quelle superficiali, come testimoniato dallo sviluppo del cuneo salino nelle acque del Fiume Po durante la stagione estiva.

In conclusione, i monitoraggi evidenziano una stazionarietà del sistema idrogeologico per tutti gli anni di attività estrattiva dal 2008 ad oggi, senza effetti idrogeologici significativi rispetto alle condizioni di ante operam e la modellazione numerica, prendendo a riferimento i parametri idrogeologici carico idraulico e salinità delle acque, calcola per le condizioni di post operam effetti idrogeologici molto modesti per le tre ipotesi di approfondimento considerate.

Ferrara, 13/10/2023

Dott. Geol. Valentina Vincenzi



Prof. Leonardo Piccinini
(Responsabile Scientifico)

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Leonardo Piccinini".

Riferimenti bibliografici

Anderson M.P., Woessner W.W., Hunt, R.J. (2015) *Applied groundwater modeling - Simulation of flow and advective transport*. Elsevier, 564 p.

Anderson M.P., Woessner W.W. (1992). *Applied Groundwater Modeling— Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press, Inc., San Diego, CA, 381 p.

Barazzuoli P., Salleolini M. (1993). *L'acqua: risorsa, rischio e pianificazione*. In: “La storia naturale della Toscana meridionale”, a cura di: Giusti F., Amilcare Pizzi Editore, Cinisello Balsamo (MI). ISBN: 978-88-366-0440-1.

Bonzi L., Calabrese L., Severi P., Vincenzi V. (2010). *L'acquifero freatico costiero della regione Emilia-Romagna: modello geologico e stato di salinizzazione*. Il geologo dell'Emilia-Romagna, Anno X/2010 n.39, pp. 21-36.

Celico P. (1988). *Prospezioni idrogeologiche. Vol. I e II*. Liguori Editore, Napoli.

Consorzio Futuro in Ricerca per Società Cantoniera Cavallara (2017). *Studio idrogeologico di aggiornamento sull'area della Cava Cantoniera Cavallara (San Giovanni di Ostellato, FE), in risposta alle prescrizioni di cui al punto H.22 dell'Autorizzazione Convenzionata all'Attività Estrattiva prot. N° 4563 del 25/03/2013*. Report inedito, autori: Valentina Vincenzi e Leonardo Piccinini, 07/08/2017.

Consorzio Ferrara Ricerche per Società Cantoniera Cavallara (2009). *Monitoraggio idrogeologico e modellazione numerica del flusso a differente salinità nel sito di San Giovanni di Ostellato (FE) in relazione ad un progetto di attività estrattiva di inerti, Fase II – In corso d'opera, Relazione Finale*. Report inedito, autori: Alessandro Gargini, Leonardo Piccinini e Valentina Vincenzi, 27/07/2009.

Consorzio Ferrara Ricerche per Magnani Sas (2006). *Monitoraggio idrogeologico e modellazione numerica del flusso a differente salinità nel sito di San Giovanni di Ostellato (FE) in relazione ad un progetto di attività estrattiva di inerti, Relazione finale*. Report inedito, autori: Alessandro Gargini, Leonardo Piccinini, Valentina Vincenzi, Igor Maccanti, 11/12/2006.

Davis J.C. (2002). *Statistics and data analysis in geology (Third Edition)*. John Wiley & Sons.

Dragoni W., Valigi D. (1994). *Contributo alla stima dell'evaporazione dalle superfici liquide nell'Italia Centrale*. Geologica Romana, 20, 151-158 pp.

Freeze R.A., Cherry J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, Vol. 7632, 604.

Giambastiani B. M. S., Colombani N., Mastrocicco M., Fidelibus M.D. (2013). *Characterization of the lowland coastal aquifer of Comacchio (Ferrara, Italy): Hydrology, hydrochemistry and evolution of the system*. Journal of Hydrology 501 (2013) 35–44.

Guo W., Langevin C.D. (2002). *User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow*. Techniques of Water-Resources Investigations Book 6, Chapter A7, 77 p.

- Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. (2001). *PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis*. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 9.
- Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C., McDonald M.G. (2000). *MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model: User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process*. Open-File Report 00-92, U.S. Geological Survey, doi: 10.3133/ofr200092.
- Hill M.C. (1990). *Preconditioned Conjugate-Gradient 2 (PCG2), a computer program for solving ground-water flow equations*. Water-Resources Investigations Report, 90-4048, U.S. Geological Survey, doi: 10.3133/wri904048.
- Kendall M.G. (1975). *Rank Correlation Methods*. Griffin: London.
- Langevin C.D., Thorne D.T. Jr., Dausman A.M., Sukop M.C., Guo W. (2007). *SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods Book 6, Chapter A22, 39 p., <https://doi.org/10.3133/tm6A22>
- Langevin C.D., Shoemaker W.B., Guo W. (2003). *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—Documentation of the SEAWAT-2000 Version with the Variable-Density Flow Process (VDF) and the Integrated MT3DMS Transport Process (IMT)*. U.S. Geological Survey Open-File Report 03-426, 43 p.
- Mann H.B. (1945). *Nonparametric tests against trend*. *Econometrica*, 13: 245–259.
- Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. (2007). *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*. *Transactions of the ASABE*, 50: 885–900, doi:10.13031/2013.23153.
- Sen P.K. (1968). *Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau*. *Journal of American Statistical Association*, 63: 1379–1389.
- Thornthwaite C.W. & Mather J.R. (1957). *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. 10(3), C.W. Thornthwaite Associates, Laboratory of Climatology, Elmer, NJ, USA.
- Toreti A., Desiato F. (2008). *Temperature trend over Italy from 1961 to 2004*. *Theoretical and Applied Climatology*, 91: 51–58, <https://doi.org/10.1007/s00704-006-0289-6>.
- US-EPA (2020). *ProUCL Version 5.2.0 - User Guide. Statistical Software for Environmental Applications for Data Sets with and without Nondetect Observations*. United States Environmental Protection Agency.
- Zheng C., Wang P.P. (1999). *MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems, Documentation and User's Guide*. Contract Report SERDP-99-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg (USA).