

Aeroporto di Milano Malpensa

Masterplan aeroportuale 2035

Risposta alle richieste di integrazioni e approfondimenti

ALLEGATO 42
Analisi del comportamento idrodinamico delle
acque sotterranee nell'area di Malpensa



POLITECNICO DI MILANO



**ANALISI DEL COMPORTAMENTO
IDRODINAMICO DELLE ACQUE SOTTERRANEE
NELL'AREA DI MALPENSA**

RAPPORTO FINALE

Committente: SEA S.p.A. – Aeroporto di Milano Malpensa

Responsabile Scientifico: Prof. Ing. Monica Riva

Collaboratore: Ing. Matteo Valsecchi

Febbraio 2017



Indice

1. PREMESSE E GENERALITA'	2
2. CARATTERISTICHE DEL TERRITORIO	3
2.2 Inquadramento geologico e litologico.....	5
2.3 Inquadramento idrografico sotterraneo	6
3. ANALISI DATI PLUVIOMETRICI.....	8
4. ANALISI LIVELLI IDROMETRICI DEL FIUME TICINO	13
5. ANALISI FALDA ACQUIFERA	18
5.1 Portate emunte.....	18
5.2 Piezometria.....	26
6. DIREZIONE PRINCIPALE DEL FLUSSO IDRICO SOTTERRANEO E SUPERFICI ISOPIEZOMETRICHE	31
7. CARATTERISTICHE LITOLOGICHE	35
Riferimenti bibliografici	46
APPENDICE A: Stazioni di monitoraggio piezometrico	47
APPENDICE B: Andamenti piezometrici	51
APPENDICE C: Correlazione tra piezometrie, pluviometria e portate emunte	56



1. PREMESSE E GENERALITA'

La SEA ha incaricato il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano per l'esecuzione del programma di ricerca "Analisi comportamento idrodinamico delle acque sotterranee nell'area di Malpensa". La ricerca è intesa a supporto della fase di caratterizzazione dell'ambiente idrico sotterraneo nella zona aeroportuale di Malpensa ed in un suo intorno significativo.

Si è valutato lo stato della falda sulla base di dati e risultati desunti da studi precedenti e da informazioni e dati forniti da: SEA, ARPA Lombardia, ARPA Piemonte, Provincia di Varese, SIA Milano, Regione Lombardia, Regione Piemonte.

Sono state analizzate le informazioni disponibili e ritenute utili alla comprensione dei meccanismi idrodinamici che si sviluppano nel sito in esame ed in un suo intorno significativo. Nello specifico, per potere individuare le caratteristiche salienti della falda idrica oggetto del presente studio, si sono analizzati: (a) gli afflussi meteorici che, depurati dai contributi di evapotraspirazione e di ruscellamento superficiale, costituiscono l'apporto idrico principale che ricarica la falda; (b) caratteristiche geologiche (litologiche e stratigrafiche) della zona di interesse; (c) emungimenti e livelli piezometrici dei pozzi presenti nell'area analizzata; (d) livelli idrici sull'asta del fiume Ticino ricadenti nella zona di indagine. Gli studi condotti hanno permesso di eseguire significative valutazioni sullo scenario storico ed attuale della falda.

2. CARATTERISTICHE DEL TERRITORIO

2.1 Inquadramento territoriale

L'aeroporto di Malpensa è situato nel settore Sud-Ovest della Provincia di Varese interessando i territori comunali di Somma Lombardo, Casorate Sempione, Cardano al Campo, Samarate, Ferno, Lonate Pozzolo e Vizzola Ticino come evidenziato in Figura 2.1.



Figura 2.1 Aeroporto di Malpensa e inquadramento territoriale.

La zona è attraversata da importanti vie di comunicazione: la Strada Statale n° 33 del Sempione, la Strada Statale n° 336 della Malpensa, la Strada Statale n° 527 del Barbarossa, l'autostrada A8 Milano - Varese, con il raccordo A8/26 dell'autostrada Alessandria - Gravellona Toce e numerose tratte ferroviarie.

L'aeroporto è suddiviso in macro-aree evidenziate in Figura 2.2: Terminal 1 (T1, composto da tre parti: Satellite A, Satellite B, Satellite C), Terminal 2 (T2), Cargo City, Depositi carburanti e Infrastrutture di volo (due piste parallele collegate, con interasse di 808 m, lunghe 3,920 m e larghe 60 m). È inoltre in fase di realizzazione una nuova area Cargo (new Cargo City) la cui estensione (come riportato in Figura 2) è in fase di pianificazione. La superficie occupata da ciascuna macro-area è riportata in Tabella 2.1. Nell'assetto attuale, l'aeroporto si sviluppa su una superficie complessiva di circa 13 km² di cui circa il 37% è formato da aree impermeabili come evidenziato in Figura 2.3 ed in Tabella 2.2.

Le portate di pioggia, in accordo con le vigenti disposizioni legislative, sono disperse nel terreno ad eccezione delle cosiddette “prime piogge”, definite dai Regolamenti Regionali n. 3 e n. 4 del 24 marzo 2006, (pubblicati sul S.O. n. 1 al Bollettino Ufficiale Regionale 27 marzo 2006, n. 13). Le acque meteoriche (di prima pioggia) ricadenti sulle aree impermeabili di T1 e di Cargo City vengono raccolte in vasche di prima pioggia, trattate ed inviate in fognatura. Le acque meteoriche ricadenti sulle aree impermeabili di T2 sono in parte soggette al medesimo trattamento delle acque relative a T1, e in parte vengono drenate in pozzetti e lasciate percolare in falda, previo trattamento. Questa procedura verrà utilizzata anche per la nuova area Cargo riducendo l’effetto delle aree impermeabili sull’alimentazione del sistema idrico sotterraneo. In Tabella 2.2 vengono riportate le superfici permeabili ed impermeabili dell’aeroporto. In particolare per le superfici impermeabili viene dettagliata la differente gestione delle acque meteoriche di prima pioggia (i.e., immissione in falda o in fognatura).

Il sistema di approvvigionamento idrico dell’aeroporto si basa attualmente su 12 stazioni di pompaggio emungenti complessivamente circa 60 l/s. L’analisi dei livelli piezometrici di ogni stazione di pompaggio e delle relative portate emunte è presentata nel Capitolo 5.

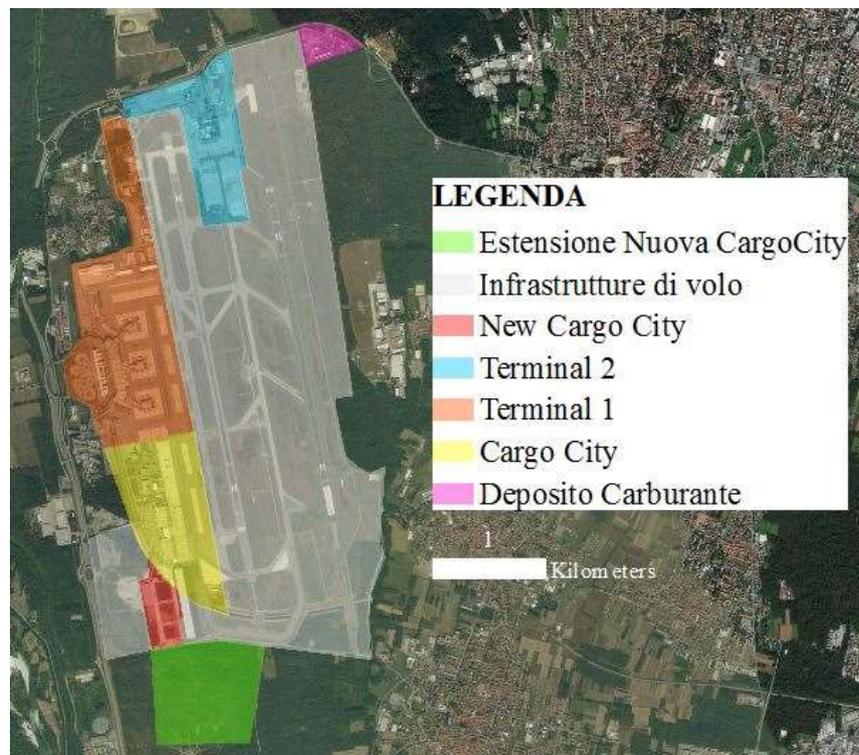


Figura 2.2 Aeroporto di Malpensa e relative macro aree.

Tabella 2.1 Macro aree aeroportuali.

	Terminal 1 (T1)	Terminal 2 (T2)	Cargo City	Depositi carburanti	New Cargo City	Estensione New Cargo City	Infrastrutture di volo
Area [m ²]	1,837,991	747,452	1,115,443	128,945	202,362	854,111	8,188,108
Percentuale	14.1 %	5.7%	8.5%	1.0 %	1.6%	6.5%	62.6%

Tabella 2.2 Superfici permeabili e impermeabili dell'aeroporto. Vengono inoltre riportate le superfici impermeabili in cui l'acqua meteorica di prima pioggia viene inviata in fognatura e quelle in cui viene lasciata percolare in falda previo trattamento.

	Impermeabile	Permeabile
Area [m ²]	4,886,304	8,188,107
	Falda: 1,433,184	
	Fognatura: 3,453,120	

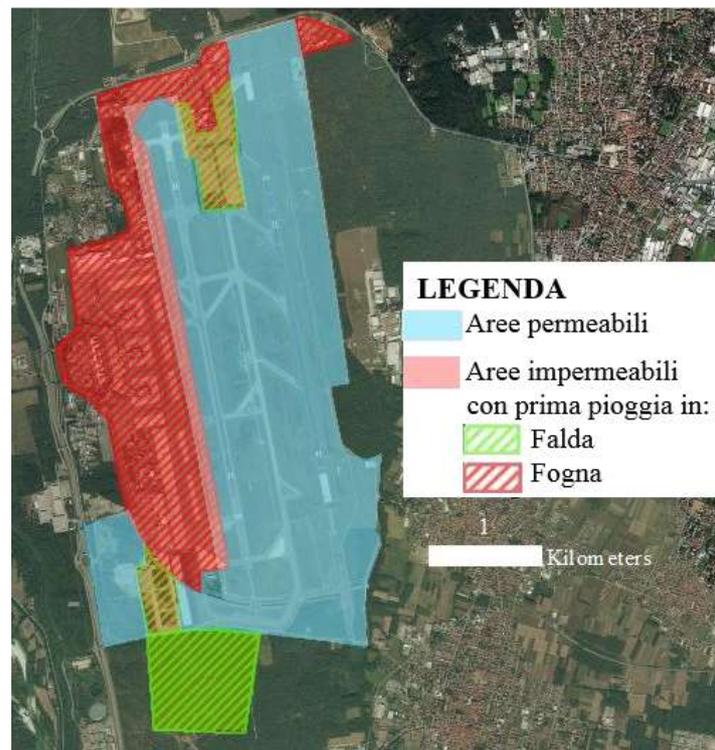


Figura 2.3 Aree permeabili e impermeabili aeroportuali.

2.2 Inquadramento geologico e litologico

L'aeroporto di Malpensa si sviluppa ad una quota pari a circa 200-230 m s.l.m. ed occupa la superficie di un terrazzo morfologico fluvio-glaciale (di età pleistocenica superiore) del fiume Ticino. Dal punto di vista litologico, i depositi che caratterizzano l'area in esame sono prevalentemente costituiti da alluvioni ciottolose e ghiaioso-sabbiose. Si tratta di una formazione litologicamente



omogenea, pur con variazioni locali, poco alterata in superficie (nei primi 2 m) che mostra una certa continuità sia planimetrica che nello spessore (per circa 100-120 m).

L'area di interesse è principalmente formata da ghiaie e sabbie del Diluvium Recente, alla cui base si trovano i conglomerati del ceppo e/o i depositi fluvioglaciali antichi del Ferretto. Lo spessore del deposito ghiaioso del Diluvium viene valutato da studi precedenti (Carcano & Piccin, 2001) in circa 90-100 m. Al di sotto di questo deposito permeabile vi è uno strato impermeabile omogeneo di spessore variabile tra i 20 e 100 m che limita la comunicazione tra la falda freatica superficiale e gli acquiferi più profondi. La porzione più superficiale del deposito ghiaioso è formata da ghiaie sabbiose contenenti pochi ciottoli che raramente superano i 150 mm di diametro caratteristico. La frazione sabbiosa rappresenta circa un terzo dell'intero volume. Entro la compagine alluvionale si rinvencono, con disposizione casuale, lenti sabbiose di limitato spessore e di limitato sviluppo areale. I fenomeni di cementazione sono rari.

L'analisi di dettaglio dei geomateriali presenti nell'area di interesse è riportata nel Capitolo 7.

2.3 Inquadramento idrografico sotterraneo

Dal punto di vista idrogeologico l'area aeroportuale si inserisce nel Settore di Pianura dei settori idrografici della provincia di Varese. I caratteri idrogeologici di questo settore sono riconducibili ad acquiferi diversamente sviluppati nei depositi fluvioglaciali Plio-leistoceni, con alimentazione principalmente per infiltrazione delle acque meteoriche. Il sistema idrogeologico è caratterizzato da una successione di quattro gruppi di acquiferi sedimentari così distinti (Carcano & Piccin, 2001):

- Gruppo acquifero A (Olocene-Pleistocene medio). È formato da depositi in facies sedimentaria continentale, caratterizzati in prevalenza da ghiaie eterometriche, sabbie e ciottoli, con subordinate intercalazioni di conglomerati (nel settore orientale), argille e limi sabbiosi privi di continuità laterale. Negli strati più superficiali si riscontrano localmente livelli di argille rossastre con ghiaie e ghiaie limoso-argillose con spessori estremamente variabili (0÷20 m) in funzione del grado di erosione complessivo dell'area. L'unità presenta uno spessore complessivo di 80÷100 m ed è sede dell'acquifero superiore di tipo libero o localmente semi confinato con soggiacenza media di circa 30 ÷ 35 m dal p.c. Si presenta discretamente omogeneo su tutta la zona meridionale del territorio provinciale con direzione del flusso idrico verso N-S ed un grado di protezione da basso a molto basso in funzione dello spessore dello strato di argilla superficiale.

- Gruppo acquifero B (Pleistocene medio). È formato da depositi in facies sedimentaria continentale e transizionale caratterizzati da ghiaie e sabbie con livelli arealmente continui di argille e limi argillosi; sono presenti in profondità intercalazioni con arenarie, conglomerati e livelli con torba e fossili. Il limite superiore dell'unità, posto a quote medie variabili tra 50 e 120 m s.l.m., si mantiene generalmente parallelo alla superficie topografica. L'unità è sede di falde idriche intermedie e profonde di tipo confinato e semi confinato, generalmente riservate all'uso potabile e captate dai pozzi profondi. Gli acquiferi dell'unità presentano un basso grado di vulnerabilità intrinseca, essendo



confinati da geomateriali caratterizzati da bassa permeabilità. Presenta uno spessore complessivo medio di circa 40 m.

- Gruppo acquifero C (Pleistocene inferiore). E' formato da depositi in facies transizionale e marina caratterizzati da argille fossilifere, limi sabbiosi e torbe, omogeneamente riscontrate in tutta l'area ad una profondità di circa 170 -180 m da p.c. con spessori variabili tra i 50 - 100 m. L'unità, delimitata a tetto da superfici erosionali irregolari, può essere sede di rari acquiferi profondi di tipo confinato contenuti in livelli ghiaioso-sabbiosi di limitato spessore; le caratteristiche idrodinamiche sono buone per quanto concerne porosità e permeabilità.

- Gruppo Acquifero D. È composto da una sequenza di argilla siltosa e limo con intercalazioni di sabbia fine e finissima in strati sottili alla base, sabbia grigia fine e media bioturbata nella parte intermedia e ghiaia poligenica grigia alternata a sabbia nella parte alta.

3. ANALISI DATI PLUVIOMETRICI

Si sono analizzate le precipitazioni giornaliere registrate nelle stazioni pluviometriche del bacino idrografico in esame e in quelle ad esso limitrofe nel periodo 2005-2015 (fonte: ARPA Lombardia). Nel complesso si sono considerati i dati rilevati da 10 stazioni pluviometriche. Si sono inoltre analizzati i dati di una stazione pluviometria ubicata nell'aeroporto di Milano Malpensa (Fonte: SEA). L'ubicazione planimetrica delle stazioni di monitoraggio e le loro caratteristiche sono riportate rispettivamente in Figura 3.1 e in Tabella 3.1.

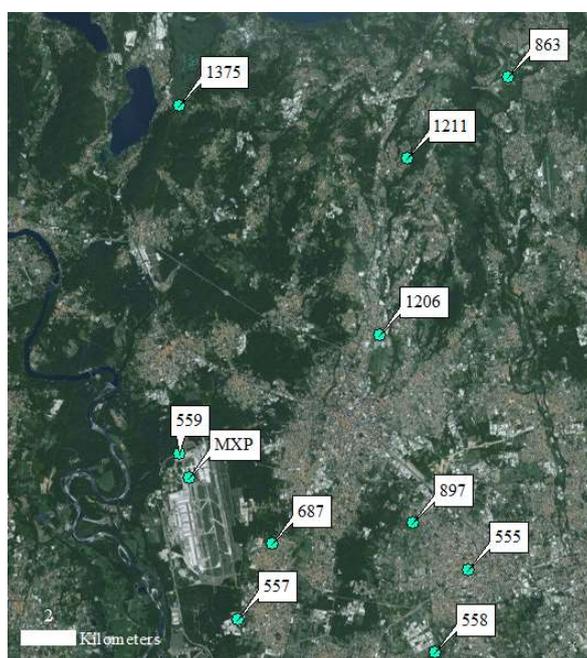


Figura 3.1 Localizzazione stazioni pluviometriche analizzate.

Tabella 3.1 Dati caratteristici delle stazioni pluviometriche analizzate.

Codice Stazione	Quota [m s.l.m.]	Comune	Inizio monitoraggio	Fine monitoraggio	Utm X	Utm Y
555	222	Busto Arsizio	25/05/1991	ad oggi	5050810	488313
557	204	Lonate Pozzolo	05/12/1996	ad oggi	5048975	479783
558	206	Busto Arsizio	05/12/1998	ad oggi	5047718	487088
559	210	Somma Lombardo	20/03/2000	ad oggi	5055150	477613
687	215	Ferno	13/08/2007	ad oggi	5051773	481053
863	276	Lozza	24/07/1998	26/03/2013	5069163	489791
897	242	Busto Arsizio	26/03/2003	ad oggi	5052553	486271
1206	274	Cavaria con Premezzo	01/01/2004	ad oggi	5059567	485026
1211	379	Castronno	01/01/2004	ad oggi	5066146	486058
1375	241	Varano Borghi	27/03/2013	ad oggi	5068133	477631
MXP	226	Somma Lombardo	01/01/2001	ad oggi	5054255	477978



Data la lentezza della risposta della falda, non risulta significativa l'analisi delle piogge giornaliere, ma piuttosto i totali annui registrati. In tabella 3.2 sono riportate per ogni stazione le piogge cumulate annue nel periodo considerato ed il relativo coefficiente di variazione (CV1). Si riporta inoltre la pioggia cumulata annua calcolata come media per tutte le stazioni (media annua) ed il relativo coefficiente di variazione (CV2). In Figura 3.2 sono diagrammati i valori medi di pioggia cumulata annuale registrati in ogni stazione pluviometrica ed in Figura 3.3 si riportano le precipitazioni medie annue ottenute considerando tutte le stazioni analizzate.

Si evidenzia che la variabilità temporale e spaziale delle precipitazioni sono comparabili. In particolare, le quattro stazioni posizionate in prossimità della zona aeroportuale (557, 559, 687 e MXP) non solo registrano una precipitazione media annua molto simile (che oscilla attorno a 1,000 – 1,100 mm/anno con differenza percentuale inferiore al 10%) ma mostrano anche un'analogia variabilità temporale, con un coefficiente di variazione pari a circa 30%.

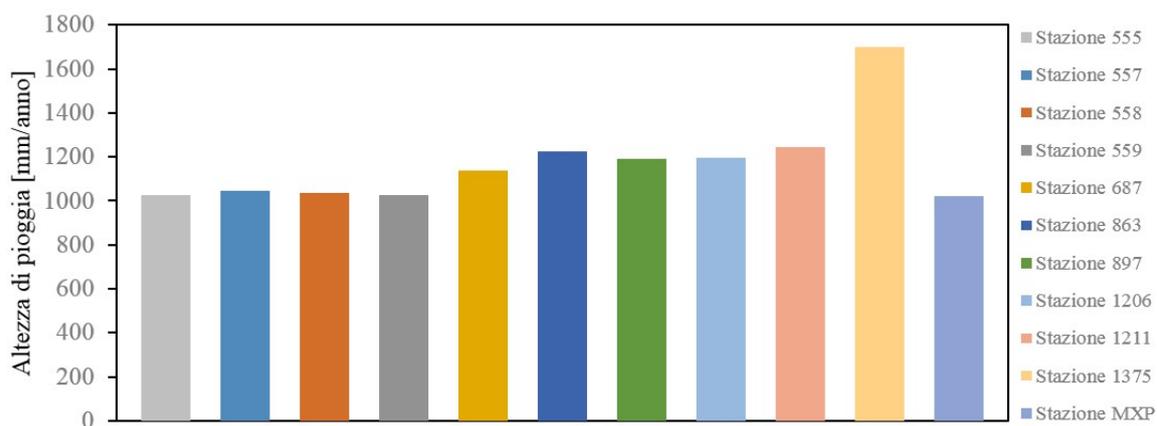


Figura 3.2 Media della precipitazione cumulata annua in ogni stazione pluviometrica esaminata (periodo 2005-2015).

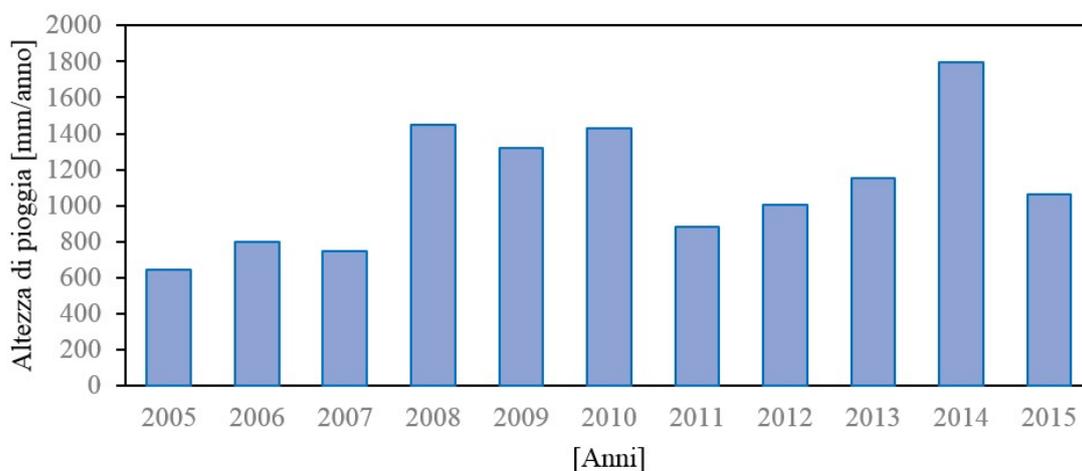


Figura 3.3 Precipitazione cumulata annua media tra le stazioni pluviometriche analizzate.



Tabella 3.2 Precipitazioni cumulate annue [mm/anno] delle stazioni pluviometriche analizzate, periodo 2005-2015.

Codice stazione/anno	555	557	558	559	687	863	897	1206	1211	1375	MPX	Media annua	CV2
2005	636	685	627	864	-	744	646	355	-	-	598	644	22%
2006	847	761	869	517	-	992	943	891	542	-	845	800	22%
2007	677	827	899	490	483	1,045	835	730	716	-	790	749	23%
2008	1,280	1,544	1,373	1,279	1,501	1,936	1,616	1,254	1,134	-	1,557	1,447	17%
2009	945	1,218	1,261	1,242	1,275	1,532	1,438	1,504	1,448	-	1,302	1,316	14%
2010	1,441	1,324	1,168	1,529	1,606	1,094	1,511	1,625	1,360	-	1,608	1,427	13%
2011	744	783	932	930	859	-	934	990	923	-	853	883	10%
2012	909	1,068	554	1,034	1,060	-	1,091	1,186	1,272	-	876	1,005	21%
2013	952	1,087	1,141	1,077	1,185	-	1,157	1,292	1,492	1,395	773	1,155	14%
2014	1,886	1,266	1,584	1,459	1,230	-	1,868	2,064	2,402	2,397	-	644	25%
2015	991	936	993	849	1,029	-	1,049	1,249	1,174	1,311	-	1,065	14%
Media stazione	1,028	1,045	1,036	1,025	1,136	1,224	1,190	1,195	1,246	1,701	1,022	1,012	
CV1	36%	26%	30%	33%	30%	35%	31%	38%	41%	36%	36%		

In Figura 3.4 si riporta il diagramma degli estremi e dei quartili (box and whiskers plot) delle precipitazioni cumulate annue per ogni stazione pluviometrica. Il diagramma permette di analizzare la variabilità complessiva dei dati considerati evidenziando l'evento associato ad una probabilità di accadimento del 50% insieme al primo (25%) ed al terzo (75%) quartile. Non essendo presenti outliers significativi in nessuna distribuzione i whiskers riportati in Figura 3.4 corrispondono ai minimi ed ai massimi di pioggia cumulate registrati.

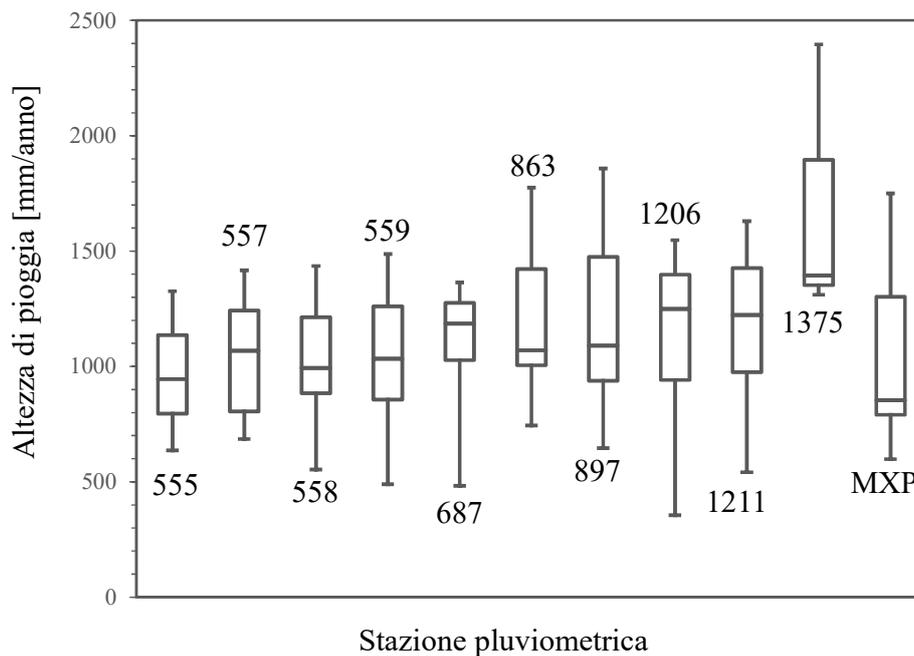


Figura 3.4 Diagramma degli estremi e dei quartili (box and whiskers plot) delle precipitazioni cumulate annue.

Si è infine effettuata un'analisi statistica dei dati pluviometrici cumulati mensili, considerando questi ultimi come variabili aleatorie. Questo approccio permette di considerare nell'analisi pluviometrica sia la non deterministica (spaziale e temporale) conoscenza delle variabili in esame sia l'errore di misura associato. L'approccio stocastico consente pertanto di prevedere il valore futuro di una data variabile con assegnata probabilità o tempo di ritorno. Si sono analizzati i dati cumulati mensili ipotizzando una distribuzione Gaussiana. Il test di Pearson effettuato sui dati disponibili ha evidenziato che si può accettare l'ipotesi di distribuzione normale del campione con un livello di significatività pari al 5% per tutte le stazioni pluviometriche limitrofe alla zona aeroportuale ad eccezione della stazione MXP. Questo risultato è coerente con quanto osservato nella Figura 3.4, dove si nota che la stazione MXP evidenzia delle code positive nella sua distribuzione. Si riportano in Figura 3.5 le funzioni di probabilità cumulate campionarie e teoriche dell'altezza di precipitazione mensile per le stazioni 557, 559, 687 e MXP. In Tabella 3.3 si riportano le precipitazioni mensili medie e le relative deviazioni standard per tutte le stazioni analizzate.

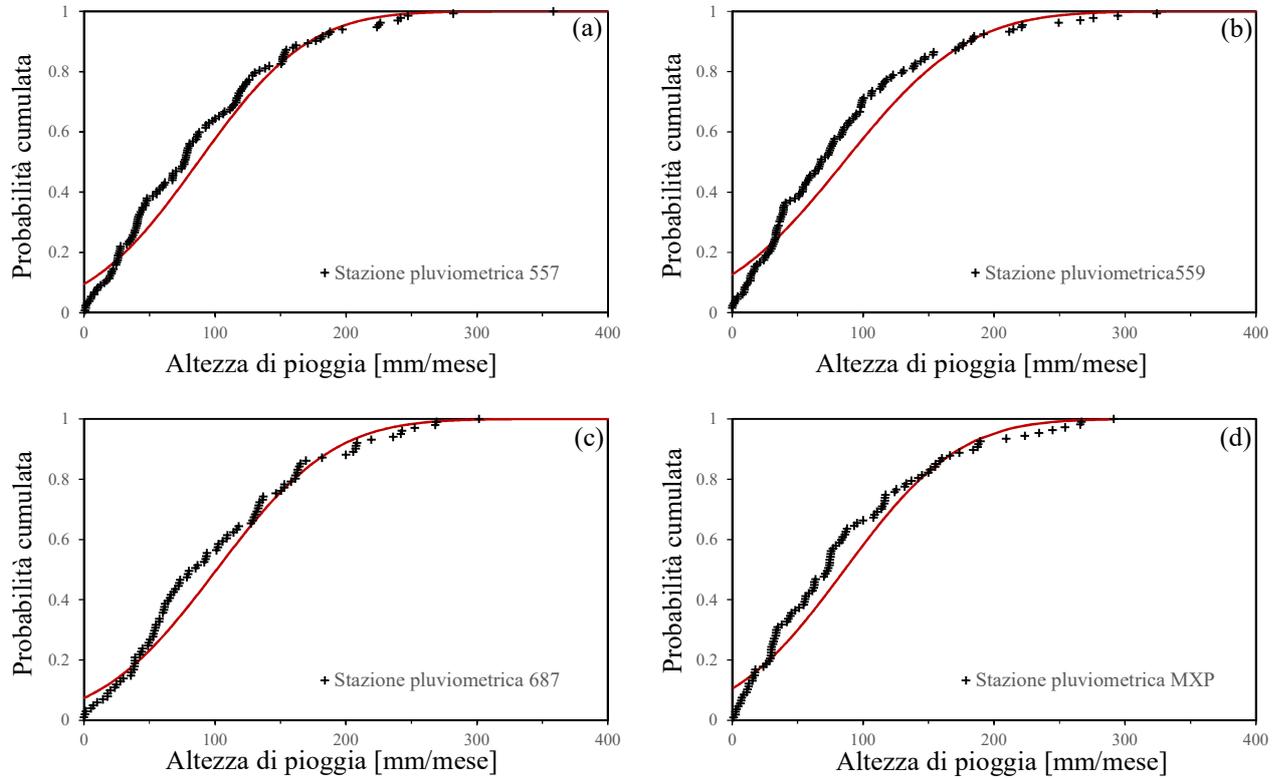


Figura 3.5 Funzione di probabilità cumulata delle precipitazioni mensili registrate nelle stazioni pluviometriche 557 (a), 559 (b), 687 (c) e MXP (d).

Tabella 3.3 Precipitazioni medie mensili e deviazioni standard di ogni stazione pluviometrica.

Stazione	Media [mm/mese]	Dev. St. [mm/mese]
555	85.69	68.25
557	87.11	66.46
558	89.75	76.95
559	85.38	74.60
687	101.24	70.01
863	106.42	76.39
897	99.90	76.65
1206	101.87	81.74
1211	107.43	91.48
1375	150.07	113.22
MXP	67.80	58.65

4. ANALISI LIVELLI IDROMETRICI DEL FIUME TICINO

Data la prossimità del fiume Ticino all'aeroporto e la sua possibile influenza sulla falda acquifera nella zona aeroportuale si sono analizzate le caratteristiche idrauliche del fiume sulla base dei dati disponibili. Questi ultimi includono:

- 4 stazioni di monitoraggio del livello idrometrico giornaliero (fonte ARPA Lombardia); la localizzazione di queste stazioni e le loro caratteristiche sono riportate rispettivamente in Figura 4.1 ed in Tabella 4.1;
- 2 stazioni di monitoraggio di portata media giornaliera (fonte ARPA Lombardia); la localizzazione di queste stazioni e le loro caratteristiche sono riportate rispettivamente in Figura 4.1 ed in Tabella 4.2;
- sezioni rilevate del fiume Ticino (fonte AIPo - Agenzia Interregionale per il fiume Po e Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico, PAI); la localizzazione di queste sezioni è riportata in Figura 4.2.
- profilo di piena relativo al tempo di ritorno di 200 anni (fonte Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico, PAI).

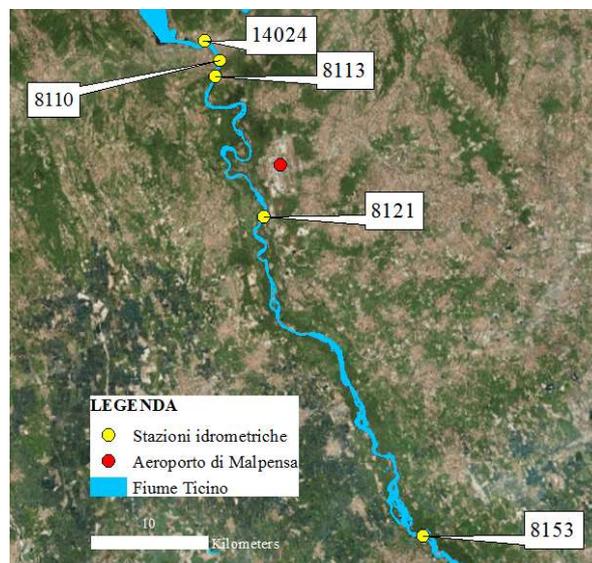


Figura 4.1 Stazioni di misura idrometrica e di portata lungo il fiume Ticino.



Tabella 4.1 Caratteristiche delle Stazioni idrometriche.

Codice Stazione	Comune	Tipologia stazione	Utm X	Utm Y	Inizio Monitoraggio	Zero idrometrico [m s.l.m.]
14024	Sesto Calende (VA)	IdroNivoMeteo	471899	5063669	23/01/2012	192.92
8113	Golasecca (VA)	IdroNivoMeteo	472750	5060606	27/07/1998	189.92
8121	Oleggio (NO)	Idrometrica	476930	5048476	01/01/2001	n.d
8153	Vigevano (PV)	IdroNivoMeteo	490615	5020795	25/05/2000	84.69

Tabella 4.2 Caratteristiche delle stazioni di misura della portata giornaliera.

Codice Stazione	Comune	Tipologia Stazione	Utm X	Utm Y	Inizio Monitoraggio	Fine rilevamento
8110	Verbano (VA)	IdroNivoMeteo	473195.32	5062060.48	16/07/2013	01/10/2015
8153	Vigevano (PV)	IdroNivoMeteo	490615.16	5020794.93	01/01/2010	07/03/2015



Nella parte sublacuale, tra lo sbarramento Villorosi e il ponte (SS527) nel Comune di Oleggio, il Ticino è caratterizzata per lunga parte da un alveo di tipo golenale e a tratti inciso. Le sezioni hanno una larghezza media variabile tra i 50 e i 120 m. Il fondo del fiume è ghiaioso con sponde poco ripide. La regolarizzazione della portata, esercitata dagli sbarramenti di monte, consente di limitare le escursioni dei livelli idrometrici nel tratto costeggiante l'aeroporto ad esclusione di eventi eccezionali e/o manovre di manutenzione dei canali artificiali. Le statistiche di base dei livelli idrometrici monitorati nelle quattro stazioni descritte in Tabella 4.1 sono riportate in Tabella 4.3.

Tabella 4.3 Livelli idrometrici [m] monitorati riferiti allo zero idrometrico.

Codice	Media	Massimo	Minimo	Deviazione standard
14024	0.97	3.52	-0.179	0.47
8113	2.48	4.02	1.38	0.33
8121	-0.11	1.95	-0.78	0.46
8153	-0.87	1.71	-1.39	0.33

Si è inoltre analizzato il profilo di piena relativo al tempo di ritorno di 200 anni (cui corrisponde una portata al colmo $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$, fonte: PAI). Con riferimento alla numerazione delle sezioni PAI, si sono considerate le sezioni comprese tra la No. 42 (Sbarramento di Miorina) e la No. 30 (ponte stradale di Oleggio) come rappresentato in Figura 4.2. I risultati delle elaborazioni relative al calcolo della quota idrica, h , valutata nella generica sezione di calcolo in condizioni di piena sono riportati nel succitato PAI. Per completezza, tali quote sono indicate in Tabella 4.4, insieme alle coordinate delle relative sezioni di calcolo.

Tabella 4.4 Profilo di piena (fonte: PAI).

Sez. No.	Utm X	Utm Y	h (Tr=200 anni) [m s.l.m.]
42	473153.00	5061865.00	201.7
41	472122.58	5058431.17	192.62
40	474271.07	5058227.98	190.36
39	474463.42	5058336.35	190.15
38	475243.71	5057932.67	186.8
37	475257.26	5057797.21	184.82
36	474642.25	5056534.66	180.19
35	475159.73	5056009.06	178.99
34	475725.98	5054865.73	176.81
33	474579.94	5053909.34	173.96
32	474089.56	5053264.52	166.6
31	476010.47	5051313.84	156.77
30	477007.50	5048604.53	151.63

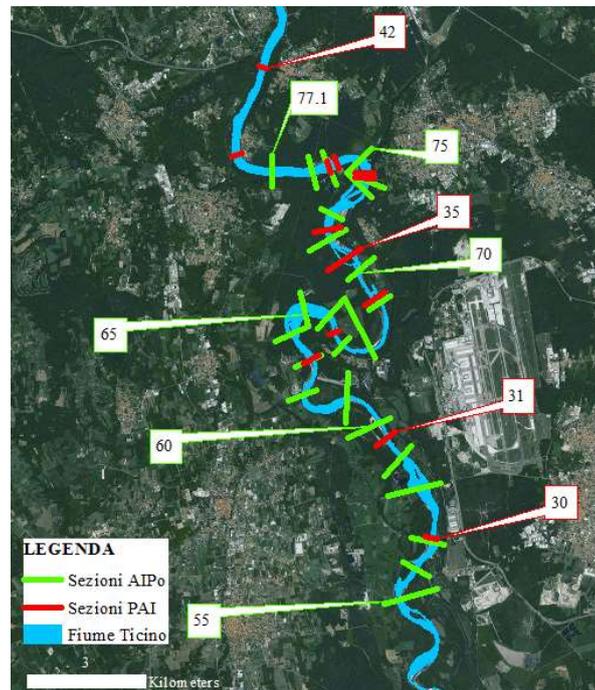


Figura 4.2 Localizzazione Sezioni PAI e AIPo.

Nota la geometria di numerose sezioni del fiume Ticino (fonte AIPo) si è valutato il carico idraulico di moto permanente in due condizioni di flusso: Profilo A, con portata di piena costante pari a $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Profilo A in Figura 4.3), e in condizioni di flusso medio (Profilo B in Figura 4.3) con portata variabile tra $300 \text{ m}^3/\text{s}$ (sez. 42-41) e $27 \text{ m}^3/\text{s}$ (sez. 37-30). Il profilo di moto permanente è tracciato in Figura 4.3.

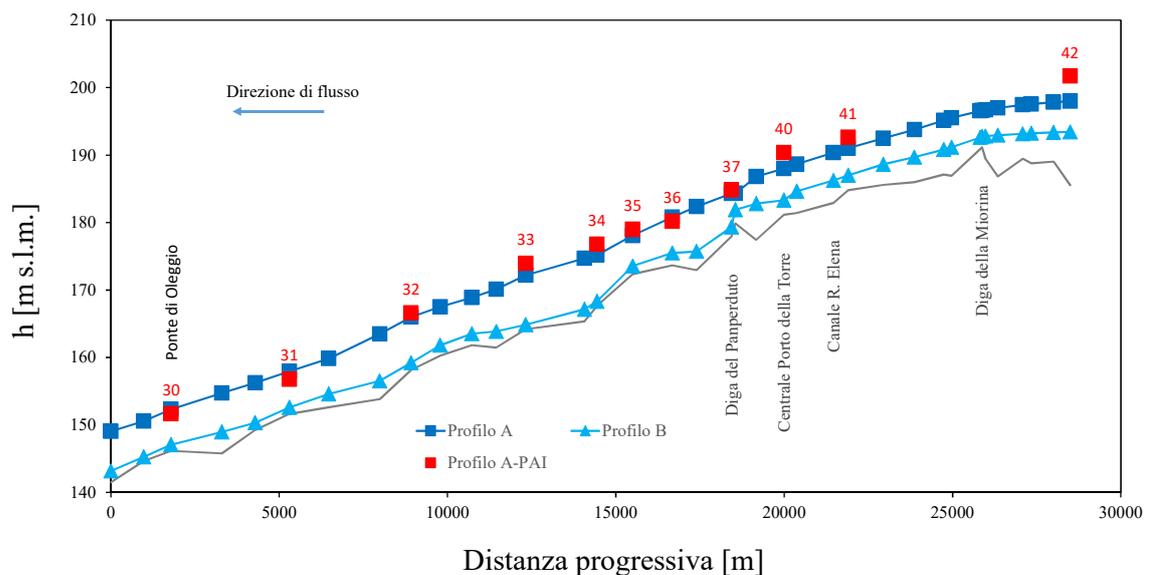


Figura 4.3 Profili di moto permanente lungo il fiume Ticino in due condizioni di portata.



Si osserva che l'andamento del profilo A ottenuto in questo elaborato è praticamente coincidente con il profilo fornito dal PAI (Profilo A-PAI), seppur valutato in sezioni diverse. Si specifica che nel tracciamento dei profili A e B non si è tenuto conto della variazione locale di carico idraulico dovuta alla presenza degli sbarramenti in quanto non rilevante ai fini del presente studio.



5. ANALISI FALDA ACQUIFERA

In questo Capitolo si analizzano i dati di emungimento ed i livelli piezometrici monitorati in un'ampia zona che si estende per un'area quadrata (di circa 784 km²) centrata nell'aeroporto di lato pari a 28 km. L'ampia zona indagata permetterà di ricavare l'andamento generale del sistema idrico sotterraneo nella zona di interesse e di ricercare le condizioni al contorno adeguate da utilizzare all'interno del modello concettuale e di un successivo eventuale modello numerico dell'acquifero. La grande complessità associata ai bacini idrici richiede un'attenta analisi in merito alle variazioni freatiche e ai regimi di emungimento locali, tale da poter chiarire i meccanismi e le forzanti che intervengono in maniera preponderante nei cambiamenti di stato del sistema. I dati qui analizzati includono: dati di emungimento (fonte: provincia di Varese e SEA) e dati di freaticità superficiale e profonda (fonte: Arpa Lombardia; Arpa Piemonte; SEA; provincia di Varese).

Nel paragrafo 5.1 si analizzano i regimi di emungimento dell'aeroporto e dei comuni circostanti. Il paragrafo 5.2 riporta l'analisi dei dati freatiche disponibili, evidenziando gli andamenti e le escursioni stagionali della falda in relazione ai regimi pluviometrici e di prelievo. Le analisi presentate in questo Capitolo verranno utilizzate nel Capitolo 6 per ricostruire le direzioni principali di flusso sotterraneo e l'evoluzione temporale degli andamenti isopiezometrici della falda acquifera.

5.1 Portate emunte

Nella provincia di Varese sono presenti 2,404 pozzi, di cui attualmente 1,824 attivi. Di ciascun pozzo sono disponibili ubicazione, profondità, quota, tipo ed uso. In questo paragrafo si sono analizzati i dati relativi a sette comuni (Lonate Pozzolo, Vizzola Ticino, Somma Lombardo, Casorate Sempione, Cardano al Campo, Samarate, Ferno) limitrofi all'area aeroportuale evidenziati in Figura 5.1. In Tabella 5.1 sono riassunti i pozzi (totali ed attivi) ubicati nei sette comuni considerati.

In Figura 5.2 sono riassunti i volumi totali emunti nel periodo 2005-2015 per ogni comune analizzato. Si nota che il volume annuale emunto dalla totalità dei comuni non è variato significativamente negli ultimi dieci anni (media pari a 1.45×10^7 m³/anno e coefficiente di variazione 6.7%).

In Figura 5.3 si riportano i consumi annui di ogni comune suddivisi tra: potabile, industriale e altro. Quest'ultima categoria include: scambio termico, antincendio, autolavaggio, sanitario, attrezzature sportive, verde pubblico, irrigazione aree verdi, allevamento, piscicoltura. Come è ben visibile dagli andamenti dei diversi comuni considerati, gli usi irrigui o di altra natura sono in generale trascurabili. La portata emunta dal bacino idrico sotterraneo è, in generale, prevalentemente ad uso potabile.



Figura 5.1 Ubicazione dei pozzi di emungimento nei comuni limitrofi all'area aeroportuale.

Tabella 5.1 Pozzi di emungimento ubicati nei sette comuni limitrofi all'area aeroportuale.

Comune	N° tot. pozzi	N° pozzi attivi
Cardano al Campo	28	12
Casorate Sempione	11	5
Ferno	8	3
Lonate Pozzolo	63	35
Samarate	42	23
Somma Lombardo	62	35
Vizzola Ticino	21	10

Le portate emunte diagrammate in Figura 5.2 – 5.3 comprendono le portate estratte all'interno del sedime aeroportuale. L'aeroporto di Malpensa è dotato di un impianto di approvvigionamento idrico autonomo che soddisfa l'intero fabbisogno dell'aeroporto prelevando l'acqua dalla falda sotterranea mediante 12 pozzi la cui ubicazione è riportata in Figura 5.4. I pozzi sono così suddivisi:

- n. 4 pozzi (B, C, D, E) che alimentano prevalentemente le utenze della rete di distribuzione idrica del Terminal 2;
- n. 4 pozzi (F, G, H, L) che alimentano prevalentemente le utenze della rete di distribuzione del Terminal 1;
- n. 1 pozzo (A) dedicato all'alimentazione idrica dell'area Deposito Carburante;
- n. 1 pozzo (I) dedicato prevalentemente all'alimentazione della vasca di riserva idrica di 1,600 m³ predisposta per necessità antincendio;
- n. 2 pozzi (1EX C.P., 2EX C.P.) che alimentano prevalentemente le utenze remote (comprese le aree di cantiere) e l'area cargo.

Attualmente sono in attività i pozzi A, C, D, F, G, H, L, 1EX C.P. I pozzi 2EX C.P. e E risultano dismessi (vd tabella 5.3).

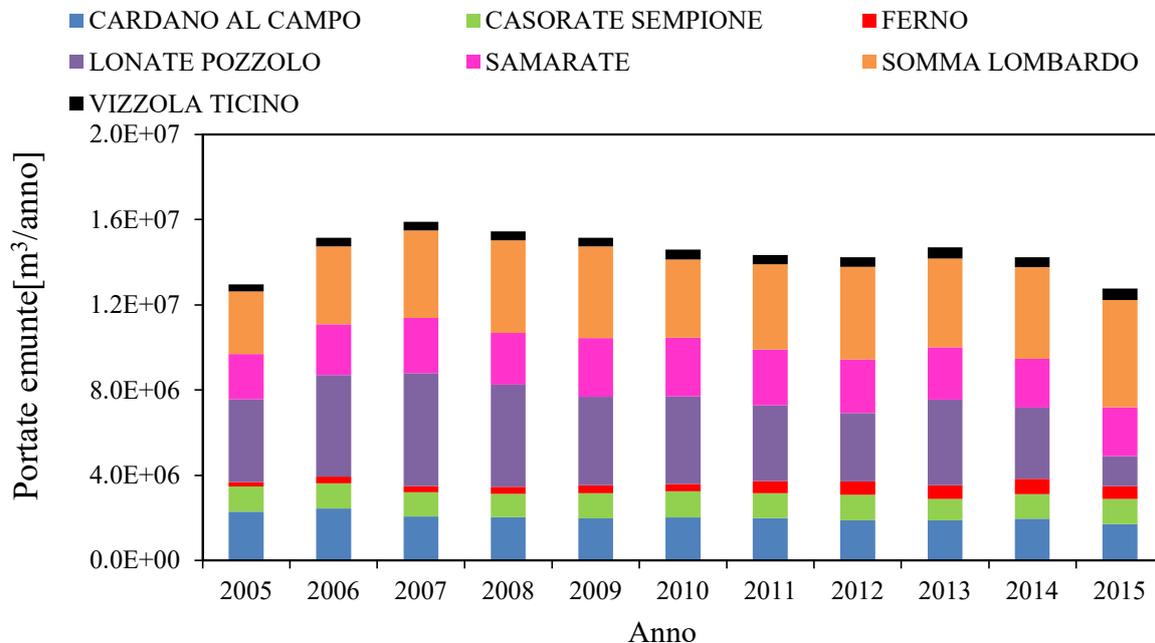


Figura 5.2 Volumi totali emunti nei comuni limitrofi all'area aeroportuale.

In Tabella 5.2 sono riassunte le caratteristiche di ogni pozzo (codice, uso, ubicazione, quota p.c., quota testa pozzo, profondità del pozzo dal p.c., profondità dei filtri dal p.c., diametro del pozzo). Si nota che il diametro del pozzo B non è costante ma varia con la profondità, tra 305 mm (fino a 68.12 m dal piano campagna) e 159 mm.

La portata totale emunta dai pozzi aeroportuali è pari in media a circa 64.36 l/s con picchi massimi di 87.97 l/s. In Figura 5.5 e in Tabella 5.3 sono riassunte le portate emunte in tutti i pozzi aeroportuali nel periodo 2005-2015. La maggior parte della portata (mediamente il 54%) deriva dalle stazioni G, H ed L e in misura variabile con il periodo considerato dai restanti pozzi. L'evoluzione temporale delle portate emunte presenta una certa variabilità, con un andamento relativamente stabile negli ultimi cinque anni (media = 2.4×10^6 m³/anno, coefficiente di variazione 12%).

In Figura 5.6 viene analizzata l'incidenza dei prelievi aeroportuali relativamente ai prelievi comunali in cui ricade ogni singola stazione di pompaggio. L'incidenza dell'aeroporto sulle portate emunte complessive è variabile a seconda del comune considerato. Il comune di Ferno avendo una popolazione afferente esigua (e quindi una portata complessiva emunta limitata, vd. Figure 5.2 e 5.3) ed il comune di Somma Lombardo in cui ricadono la maggior parte dei pozzi aeroportuali, risultano i comuni in cui la portata emunta dai pozzi aeroportuali incide maggiormente rispetto alle portate emunte complessivamente nell'area comunale. In questi due comuni le portate emunte nell'area aeroportuale sono pari (in media) a circa 30-40% della portata emunta totale. Nel comune di Lonate

Pozzolo le portate emunte dai pozzi aeroportuali sono mediamente pari al 15% delle portate totali. Per quanto riguarda il comune di Casorate Sempione le portate emunte dal pozzo A sono trascurabili.

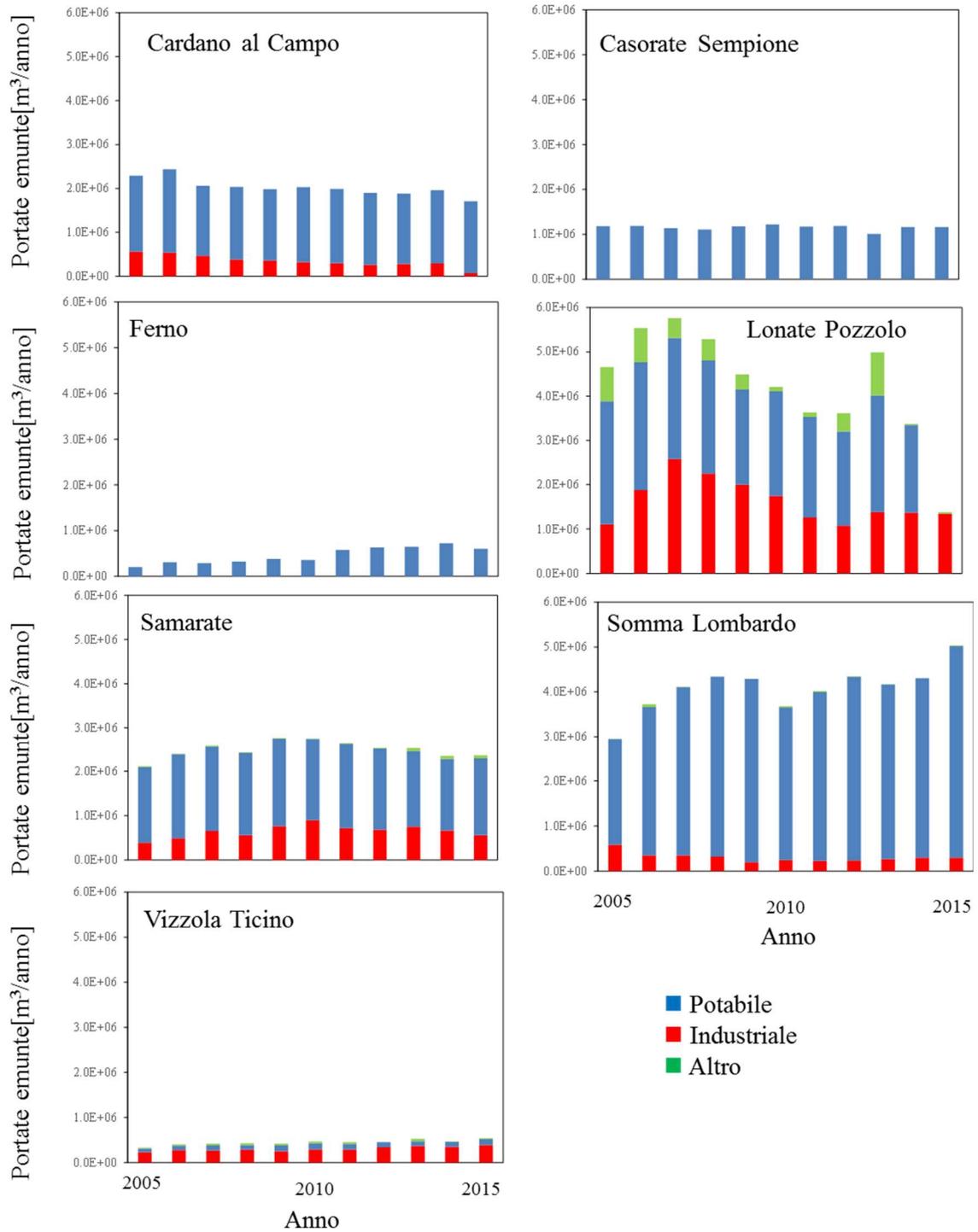


Figura 5.3 Portate emunte nel periodo 2005-2015 nei sette comuni limitrofi all'aeroporto.

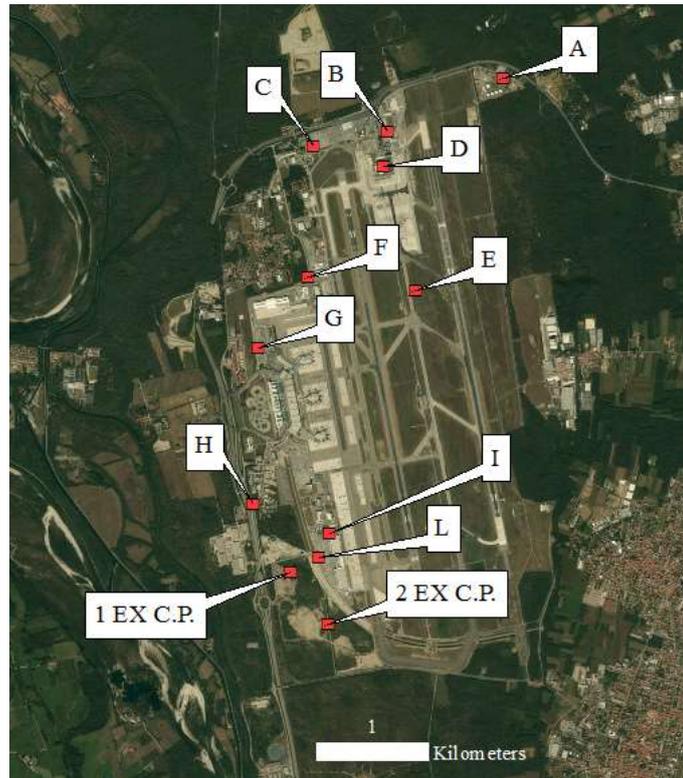


Figura 5.4 Ubicazione dei 12 pozzi aeroportuali.

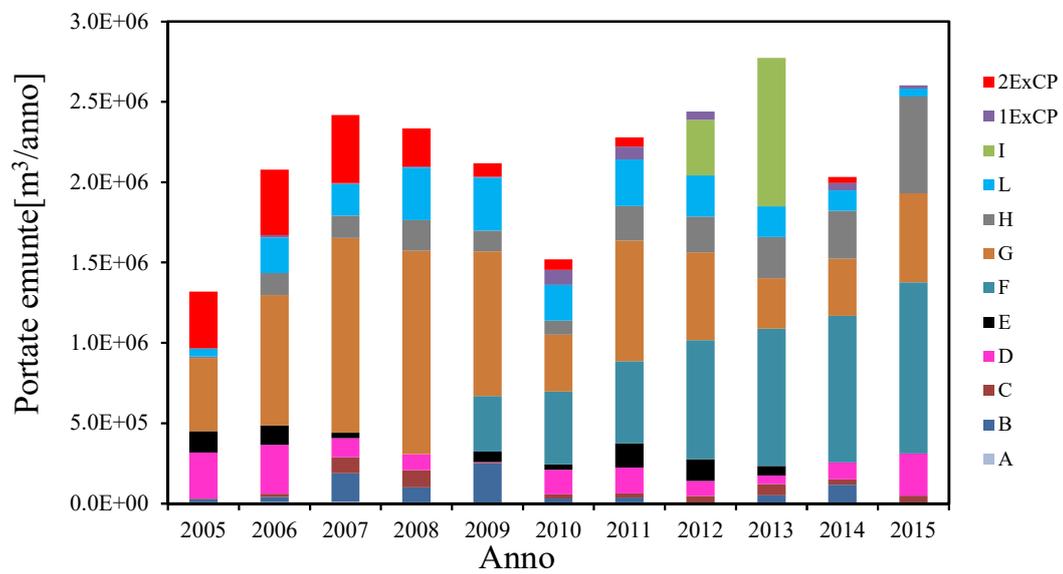


Figura 5.5 Portate emunte dai pozzi aeroportuali nel periodo 2005-2015.

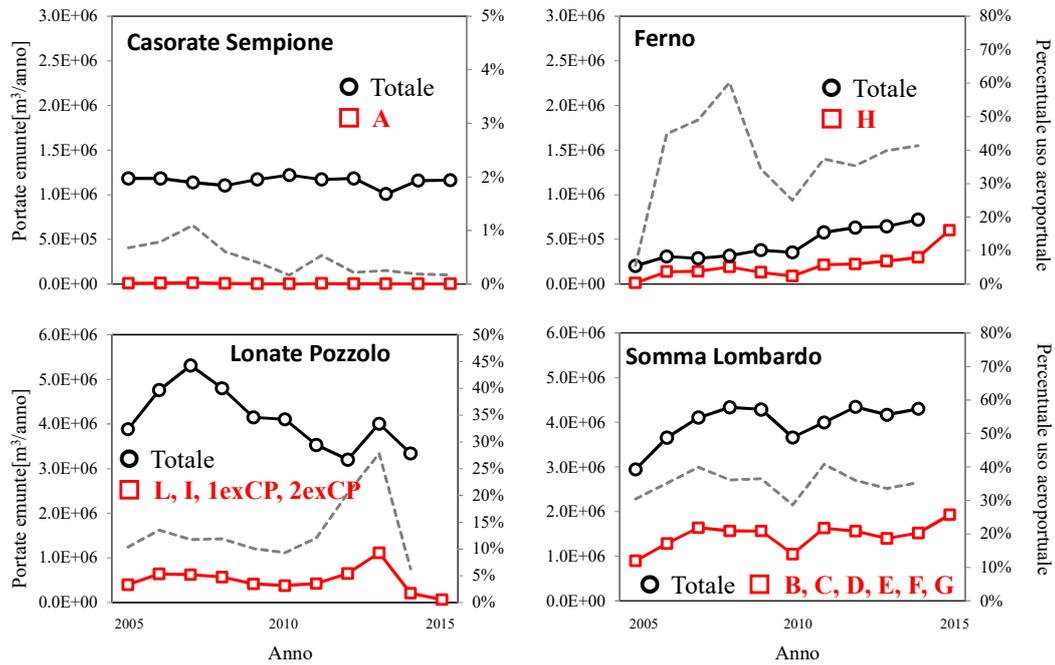


Figura 5.6 Confronto tra le portate emunte dai pozzi aeroportuali e gli emungimenti complessivi dei comuni in cui ricadono le stazioni di pompaggio. Le percentuali relative agli emungimenti dei pozzi aeroportuali sono riportate con curve tratteggiate.



Tabella 5.2 Caratteristiche pozzi aeroportuali.

Codice Pozzo	Comune	Area	Uso	Utm X	Utm Y	Quota p.c. [m s.l.m.]	Quota pozzo [m s.l.m.]	Profondità Pozzo dal p.c. [m]	Profondità Filtri dal p.c. [m]	Diametro [mm]
A	Casorate Sempione	T2	Potabile	479535	5055632	24	234	72	60-72	244
B	Somma Lombardo	T2	Potabile	478495	5055147	235	235	90	64-67, 76-86	244
C	Somma Lombardo	T2	Potabile	477825	5055020	236	236	80	60-70	305 - 159
D	Somma Lombardo	T2	Potabile	478461	5054830	230.8	230.8	100	67-93	300
E	Somma Lombardo	T2	Potabile	478744	5053710	225.24	223.84	72.6	58.4-68.4	300
F	Somma Lombardo	T1	Potabile	477776	5053828	230	227	99.2	64.38-88.38	650
G	Somma Lombardo	T1	Potabile	477330	5053181	222.2	219.2	103.2	74.6-91.2	600
H	Ferno	T1	Potabile	477286	5051768	217	214	104	64-82	600
I	Lonate Pozzolo	T1	Antincendio	477975	5051496	215	212.5	99	66-78, 84-90	600
L	Lonate Pozzolo	T1	Potabile	477875	5051273	215	213.8	101.5	69-75, 81-93	600
1EXCP	Lonate Pozzolo	Cargo City	Industriale	477615	5051150	213	213	61.9	50-67	250
2EXCP	Lonate Pozzolo	Cargo City	Industriale	477962	5050674	213	211	66.5	45-65	273



Tabella 5.3 Portate emunte dai pozzi aeroportuali nel periodo 2005-2015 [m³/anno].

Codice	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
A	8,010	9,373	12,448	6,709	4,780	2,050	6,270	2,543	2,559	2,180	2,030
B	19,362	32,780	175,205	93,620	245,869	29,315	31,043	37	49,294	114,989	0
C	4,573	18,360	101,142	108,055	2,266	26,351	25,115	42,831	67,249	33,292	46,590
D	284,359	304,198	119,451	99,725	4,307	152,764	161,671	93,587	54,702	105,940	262,911
E	134,284	120,899	31,960	0	66,392	32,482	150,413	137,193	59,264	0	0
F	0	0	0	0	345,210	453,820	511,970	740,490	855,870	913,070	1,065,980
G	454,814	810,466	1,211,681	1,264,596	899,947	353,869	749,672	547,486	313,495	353,589	554,081
H	11,206	138,020	140,929	191,102	130,101	88,709	216,060	223,105	256,726	297,598	601,950
L	49,911	221,460	195,059	326,725	328,443	220,506	288,666	256,516	191,209	127,673	49,049
I	0	0	0	0	0	0	0	343,900	923,800	0	0
1EXCP	0	15,174	7,178	7,713	7,172	93,310	81,540	52,530	0	46,933	19,181
2EXCP	353,023	406,884	423,318	237,482	84,248	67,695	55,893	0	0	36,361	0
Totale	1,319,542	2,077,614	2,418,371	2,335,727	2,118,735	1,520,871	2,278,313	2,440,218	2,774,168	2,031,625	2,601,772

5.2 Piezometria

L'andamento temporale del livello della falda acquifera è stato ricostruito sulla base di dati piezometrici forniti da (i) ARPA Lombardia per la provincia di Varese (18 piezometri in falda superficiale e 6 in falda profonda); (ii) provincia di Varese (Piano Cave, 14 piezometri in falda superficiale); (iii) ARPA Piemonte per la provincia di Novara in un intorno significativo dell'area di interesse (5 piezometri in falda superficiale); (iv) ARPA Lombardia per la provincia di Milano (36 piezometri in falda superficiale localizzati nell'area a Sud dell'aeroporto); tre pozzi SEA (L, I, G) costantemente monitorati nel periodo di interesse. In Figura 5.7 è riportata una mappa di tutte le stazioni piezometriche utilizzate. I dati freaticometrici sono stati elaborati identificando, ove non indicato dall'ente proprietario del dato, la tipologia di falda captata sulla base della profondità dei sondaggi e dei relativi filtri. Le caratteristiche di ogni stazione di monitoraggio sono riportate in Appendice A.

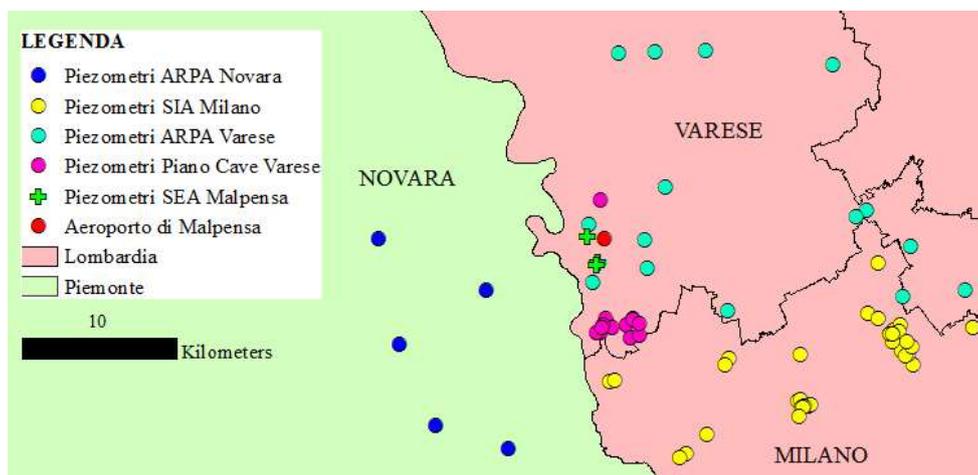


Figura 5.7 Localizzazione delle stazioni di monitoraggio della falda sotterranea.

In Figura 5.8 si riporta l'evoluzione temporale dei livelli piezometrici monitorati mensilmente nella falda superficiale all'interno e nell'intorno della zona aeroportuale. Si nota una chiara uniformità negli andamenti della falda superficiale. Le registrazioni piezometriche sono tra loro in fase (i.e., massimi e minimi si presentano negli stessi periodi). Non si sono riscontrati andamenti anomali in nessuna stazione. La falda si presenta relativamente stabile con un leggero aumento del livello piezometrico negli ultimi dieci anni. Questi andamenti si sono osservati in tutti i piezometri analizzati come dettagliato in Appendice B.

Le informazioni relative alla falda profonda sono di entità più modeste. Il livello piezometrico monitorato in quattro stazioni è riportato in Figura 5.9. In base ai dati disponibili, non si evidenziano anomali andamenti del livello piezometrico della falda profonda.

La distanza media tra il carico piezometrico della falda superficiale e profonda è stato stimato sulla base di rilievi storici di dati piezometrici di due stazioni PO012090NU2009 e PO012090NU3009,

captanti rispettivamente la falda superficiale e la falda profonda nella medesima posizione planimetrica.

Il confronto tra i livelli piezometri registrati nelle due stazioni viene effettuato in Figura 5.10. Nella stessa figura viene anche riportato il diagramma degli estremi e dei quartili per entrambi i piezometri. La distanza media tra le due falde è di 4.6 m. In termini probabilistici, la distanza tra la quota delle due falde associate alla probabilità del 50% è di 5.2 m.

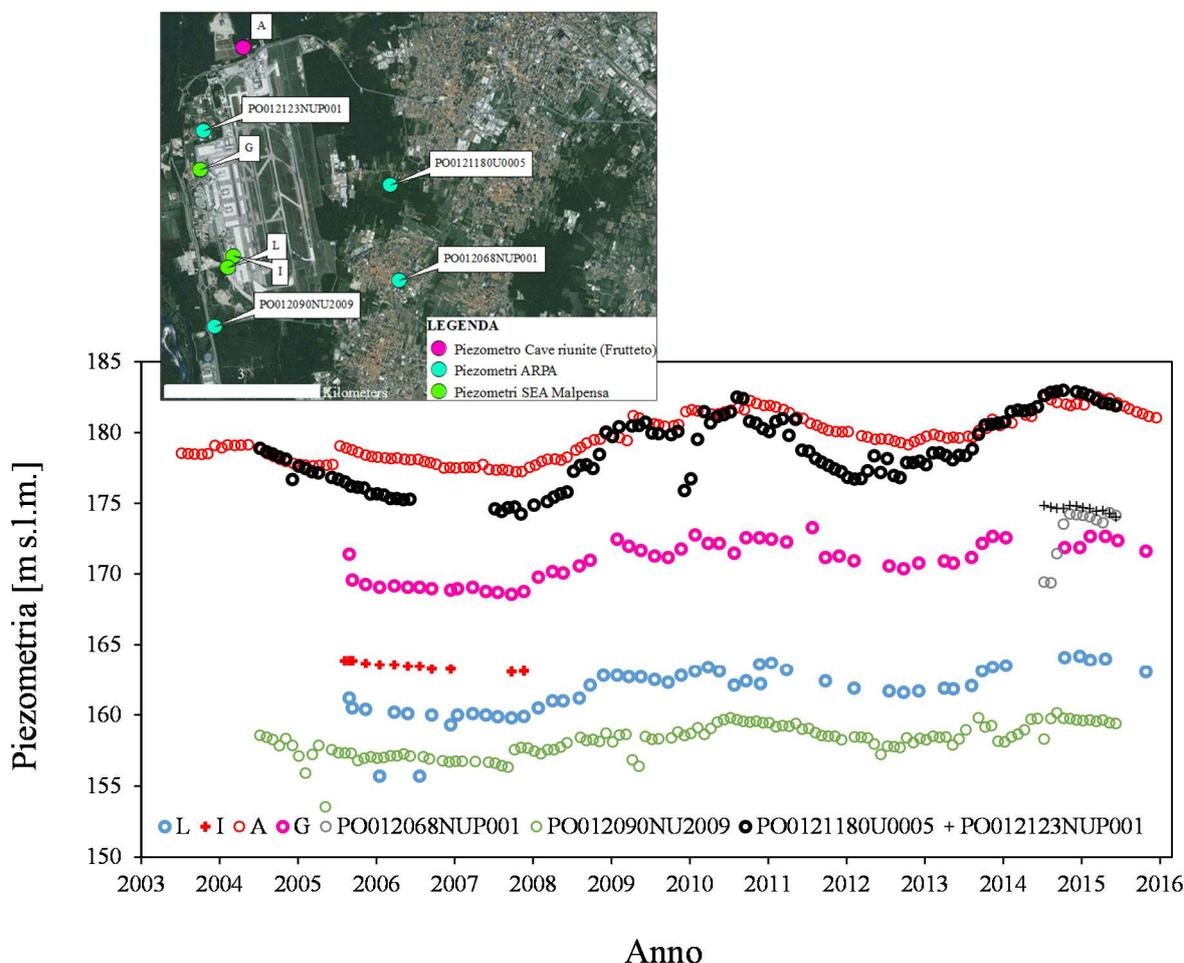


Figura 5.8 Andamento freaticometrico della falda superficiale all'interno e nell'intorno della zona aeroportuale.

Successivamente si è indagata l'eventuale correlazione tra gli andamenti freaticometrici, i termini di ricarica e le portate emunte. A titolo di esempio si riportano in Figura 5.11 i livelli piezometrici monitorati nel piezometro ARPA (PO0121180U0005) situato a ad una distanza di 1.4 km ad Est dell'aeroporto (vd. Figura 5.8) unitamente alla pioggia cumulata mensile registrata nella vicina stazione pluviometrica 557 (vd. Figura 3.1). Si nota una buona corrispondenza tra il regime pluviometrico e l'escursione piezometrica della falda. Il livello piezometrico diminuisce monotonamente tra il 2005 ed il 2007. Questo periodo è caratterizzato da piogge particolarmente

scarse (pari a circa 750 mm/anno). Negli anni 2008-2010 si assiste ad un incremento significativo del regime pluviometrico (pari a circa 1,400 mm/anno) associato ad un costante aumento del livello piezometrico. Durante il 2011 si registra nuovamente una significativa diminuzione della pioggia (circa 800 mm/anno) seguita da una riduzione del livello piezometrico. Successivamente la piezometria superficiale aumenta in concomitanza ad un aumento delle precipitazioni. Andamenti analoghi vengono mostrati dai rimanenti piezometri come dettagliato in Appendice C.

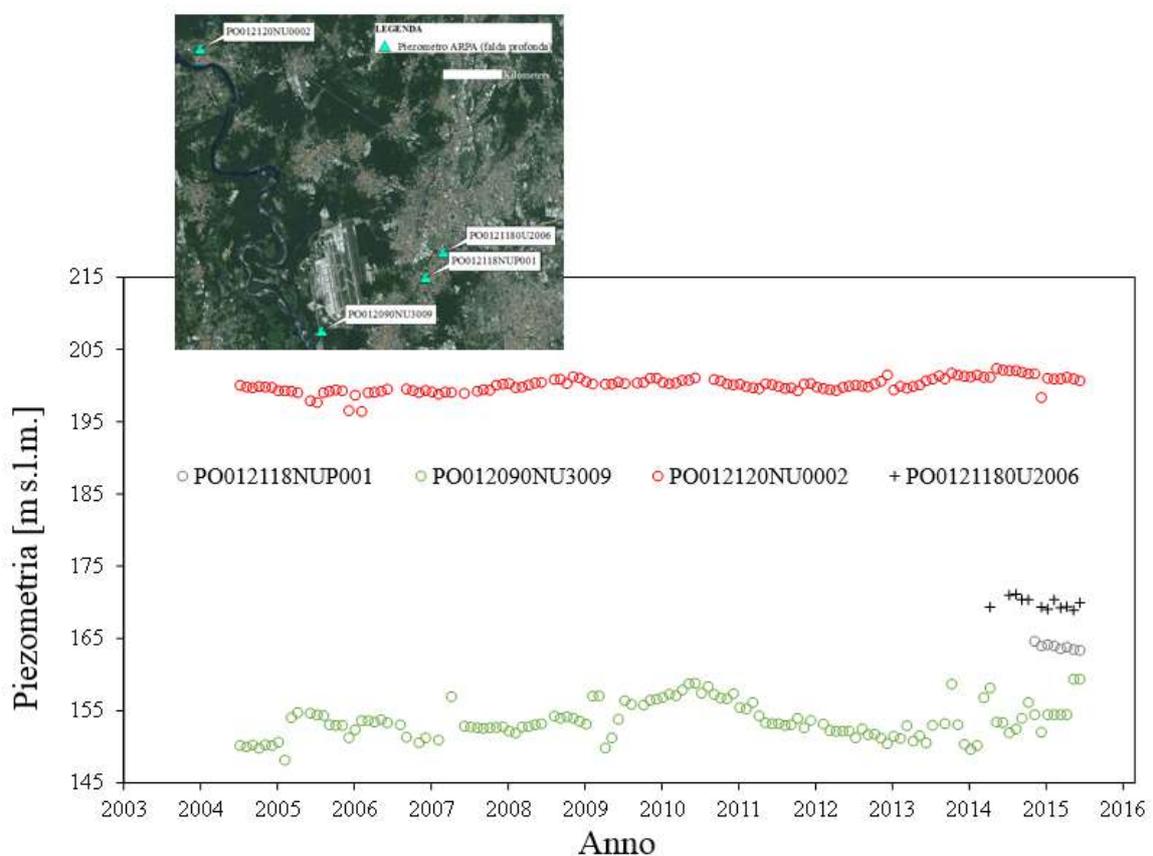


Figura 5.9 Andamento freaticometrico della falda profonda nell'intorno della zona aeroportuale.

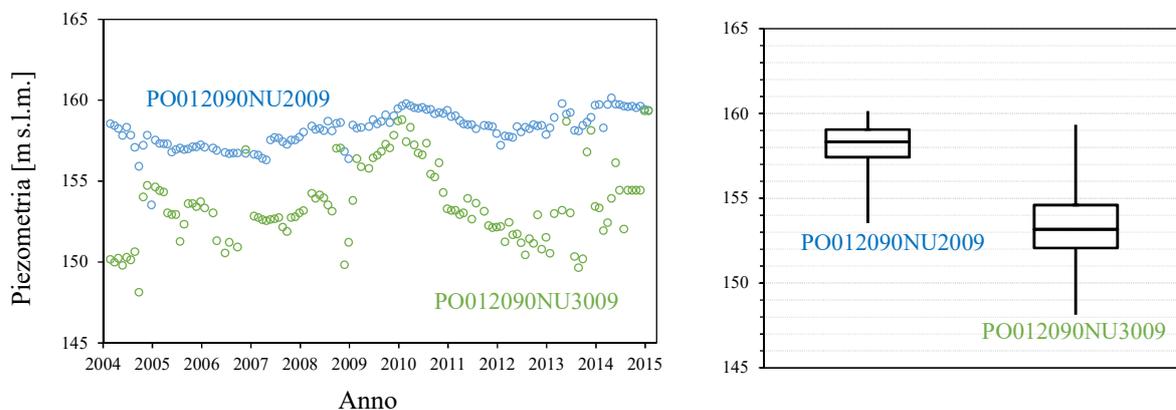


Figura 5.10 Confronto tra i livelli piezometrici falda superficiale e profonda.

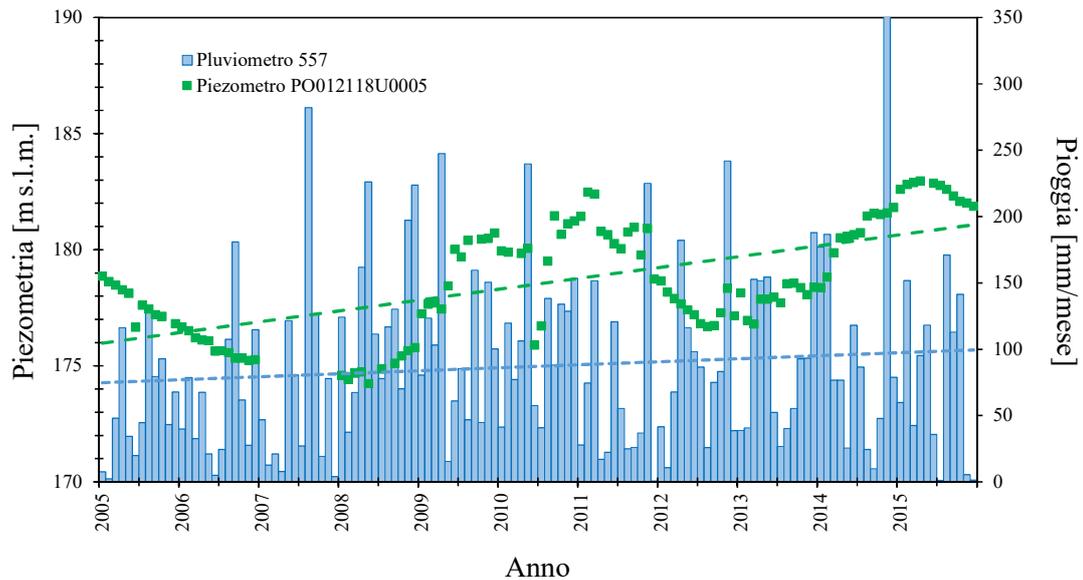


Figura 5.11 Freatimetria piezometro PO012118U0005 e precipitazione cumulata mensile.

Si è inoltre analizzata l'influenza dell'impatto antropico esercitato dalle stazioni di pompaggio. A titolo di esempio in Figura 5.12 si riporta il livello piezometrico monitorato nel piezometro PO0121180U0005 unitamente alla evoluzione temporale delle portate emunte all'interno del comune di Samarate dove il piezometro è situato. Simili analisi effettuate per tutti i pozzi di monitoraggio ed i comuni interessati sono riportate in Appendice C. I piezometri analizzati si trovano in un contesto urbanizzato in cui la richiesta idrica non è sostanzialmente cambiata nell'ultimo decennio (vd. anche paragrafo 5.1). Si nota come le modeste variazioni di emungimento registrate nel periodo analizzato non sembrano essere significativamente correlate ai livelli di falda monitorati.

Si è infine analizzata la possibile interazione tra la falda superficiale ed il fiume Ticino. A questo scopo in Figura 5.13 sono riportati i livelli idrici del fiume Ticino monitorati nella stazione di Oleggio (vd. Capitolo 4) e in due piezometri: PO012090NU2009 (VA) e PII29 (NO), rispettivamente localizzati ad Est ed ad Ovest del fiume Ticino. Si rivela un simile comportamento del livello freaticometrico per i due sistemi idraulici sotterranei. Le escursioni dei piezometri risultano tra loro in fase riflettendo simili regimi pluviometrici e tempi di risposta delle falde sotterranee. Per contro, il livello idrometrico medio mensile registrato nella stazione di Oleggio non varia sensibilmente nel tempo (fonte Consorzio del Ticino) e presenta oscillazioni massime attorno allo zero idrometrico inferiori a 2 m. La quota dello zero idrometrico della stazione di Oleggio, pur non essendo ad oggi verificata, è comunque inferiore alla quota di piano stradale del ponte SS494 (154 m.s.l.m). I dati riportati in Figura 5.13 supportano pertanto l'ipotesi di azione sostanzialmente drenante del fiume Ticino sulla falda.

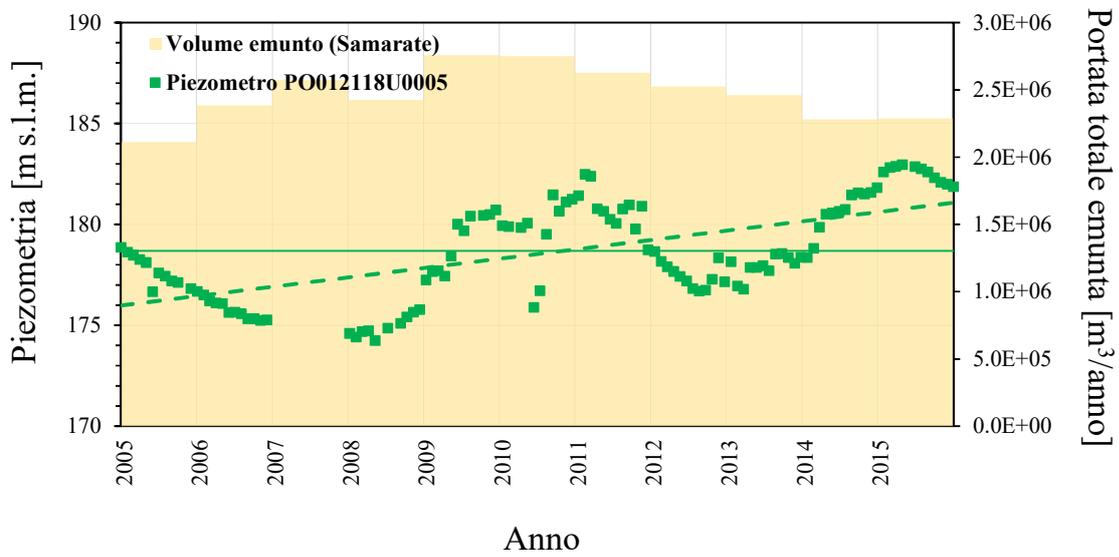


Figura 5.12 Freatimetria piezometro PO012118U005 e portata totale emunta nel comune di Samarate [m³/anno].

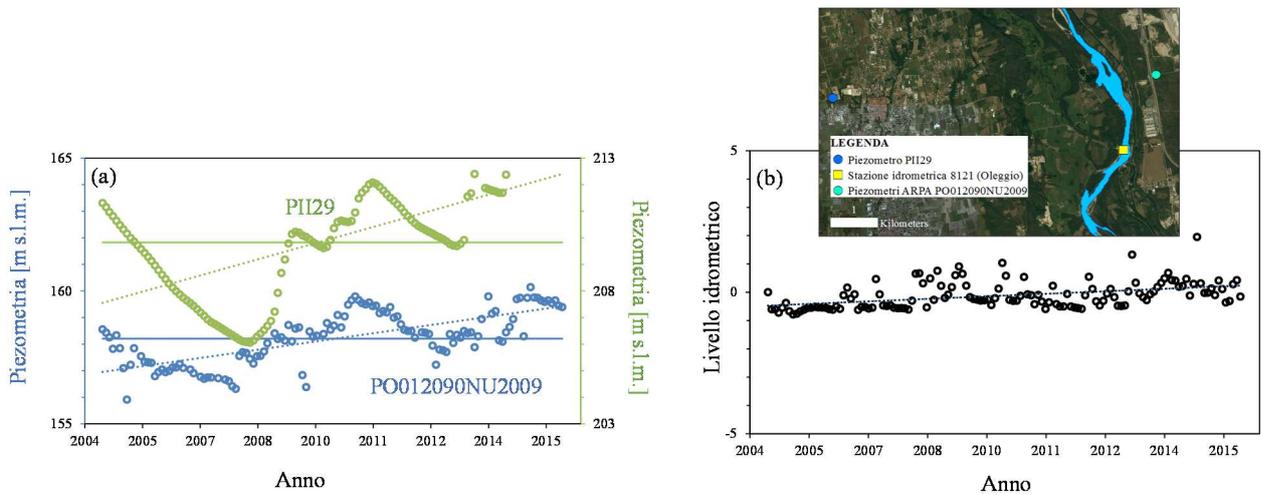


Figura 5.13 Andamento freaticometrico piezometri PO012090NU2009 (VA) e PII29 (NO) e variazione livello idrometrico del fiume Ticino nella stazione 8121 di Oleggio.

6. DIREZIONE PRINCIPALE DEL FLUSSO IDRICO SOTTERRANEO E SUPERFICI ISOPIEZOMETRICHE

Nel presente Capitolo vengono analizzati i dati riportati nel Capitolo 5 per determinare le direzioni preferenziali di flusso idrico sotterraneo e ricostruire la distribuzione spaziale delle superfici isopiezometriche nella zona di interesse.

Si sono definiti 5 gruppi di piezometri riportati in Figura 6.1 per la determinazione del flusso idrico in direzione Est-Ovest (gruppi n° 1, 2, 3), e Nord-Sud (gruppi n° 4 e 5). I livelli piezometrici mensili dei diversi gruppi sono riportati in Figura 6.2-6.6 unitamente ai rispettivi box and whiskers plots. Questi ultimi sono stati diagrammati rispetto al livello minimo registrato, al fine di evidenziare la variabilità del livello della falda. Si notano due principali direzioni di flusso della falda superficiale: un gradiente in direzione Nord-Sud pari a circa 8.4‰ e legato probabilmente alla superficie topografica che presenta (a partire dalla zona del lago di Varese fino alle prime aree pianeggianti dell'Ovest milanese) una pendenza media di circa 5.3‰ e un gradiente in direzione Est-Ovest causato probabilmente dall'azione drenante del fiume Ticino.

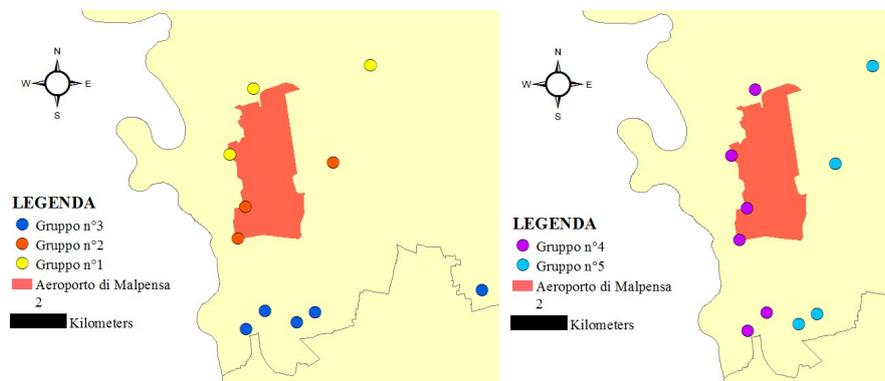


Figura 6.1 Gruppi di stazioni piezometriche analizzate.

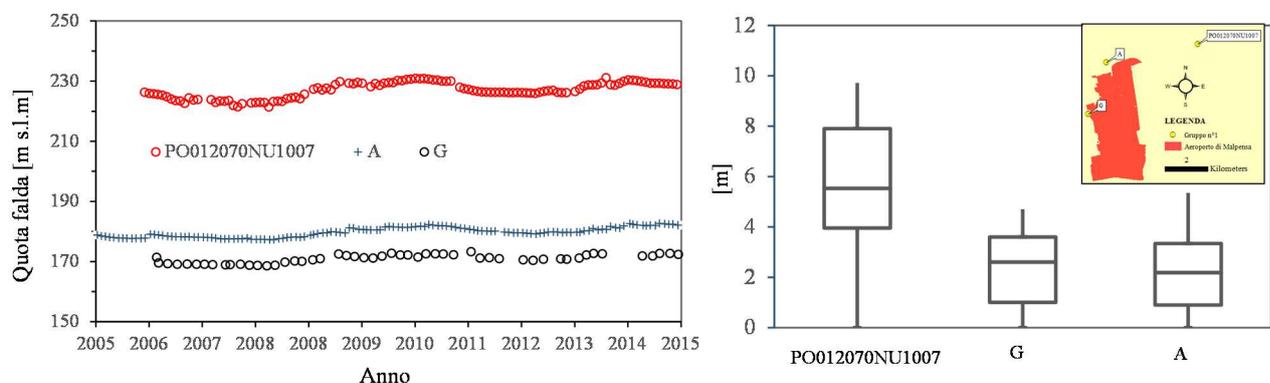


Figura 6.2 Andamento del livello piezometrico mensile - gruppo n°1.

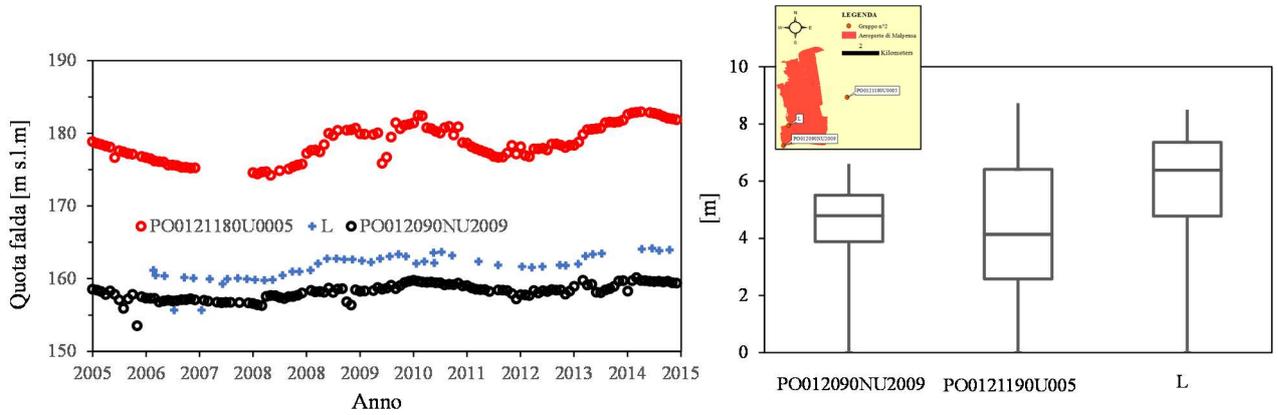


Figura 6.3 Andamento del livello piezometrico mensile - gruppo n°2.

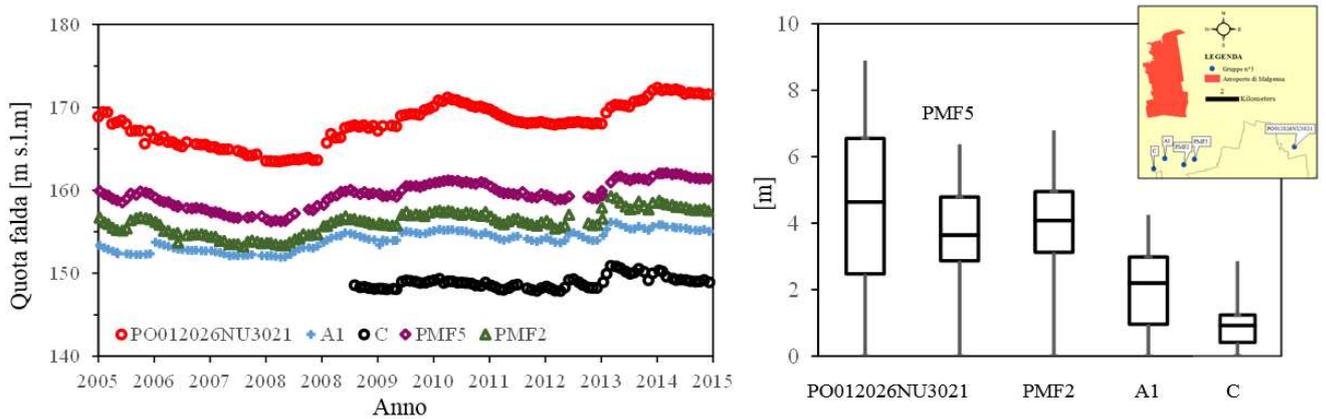


Figura 6.4 Andamento del livello piezometrico mensile - gruppo n°3.

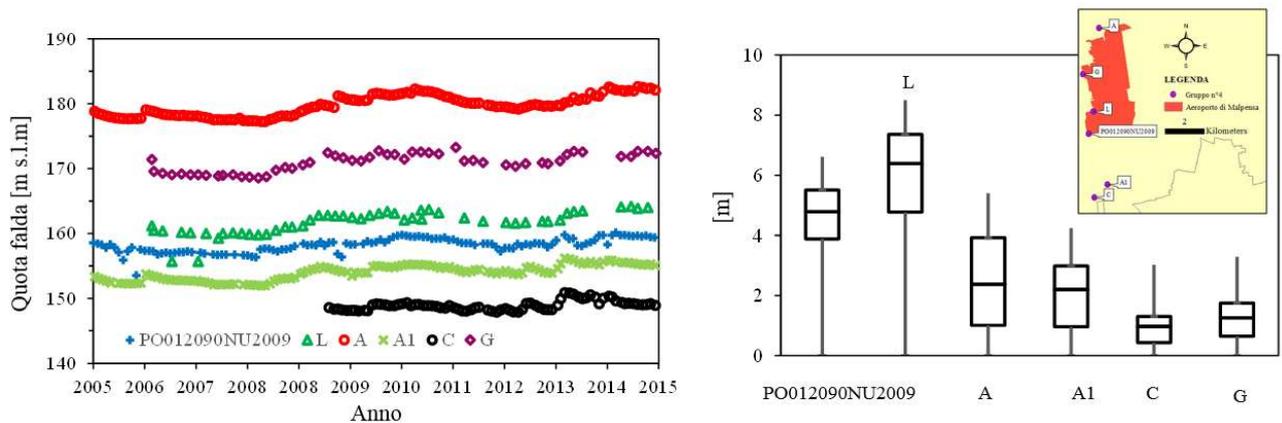


Figura 6.5 Andamento del livello piezometrico mensile - gruppo n°4.

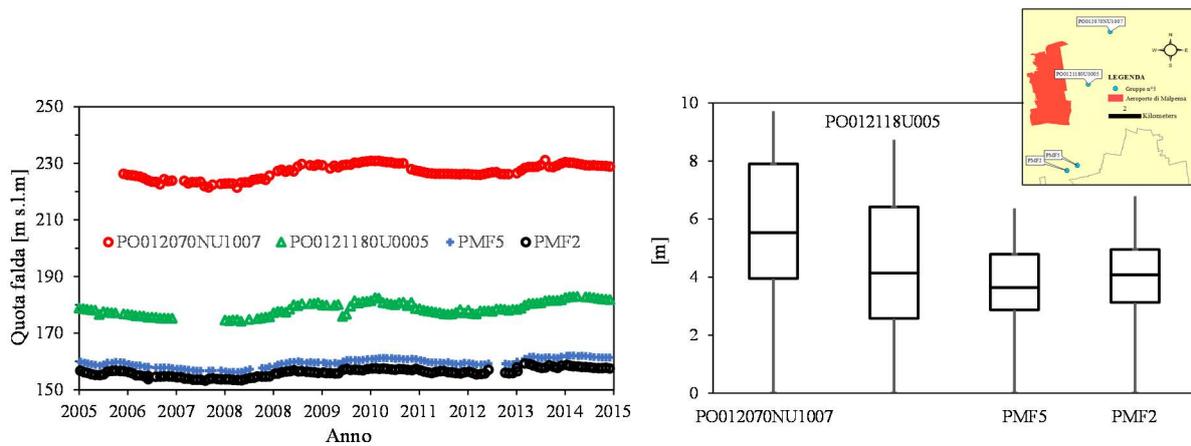


Figura 6.6 Andamento del livello piezometrico mensile - gruppo n°5.

Si sono quindi calcolati i livelli piezometrici medi annui di ogni stazione di monitoraggio e si sono ricostruite le superfici isopiezometriche della falda superficiale utilizzando un metodo di interpolazione stocastico (Empirical Bayesian Kriging). Il metodo adottato permette di considerare l'incertezza nella stima dei parametri del semivariogramma della grandezza in esame simulando una molteplicità di semivariogrammi dai dati di input a disposizione. In Figura 6.7 vengono riportate le ricostruzioni ottenute per le superfici piezometriche medie annue nel periodo 2005-2015. Quando possibile, le ricostruzioni effettuate in questo studio sono state raccordate con le interpolazioni presentate da SIA società Milano (per la provincia di Milano, vd. curve in rosso in Figura 6.7). Queste ultime, sebbene basate su un database e su procedure presumibilmente diverse, appaiono del tutto consistenti con le ricostruzioni effettuate nel presente studio. Le ricostruzioni piezometriche offrono una visione quali-quantitativa basata sui dati (data driven approach) della direzione media annua dei flussi sotterranei. L'andamento delle superfici isofreatimetriche appare relativamente costante negli anni. Il gradiente piezometrico in direzione NE - SO (inclinato di circa 30° in senso orario rispetto all'asse Nord-Sud) risulta essere maggiore nella zona NE (pari a circa 1.2%) per poi diminuire nell'area SO in prossimità dell'area aeroportuale (pari a circa 0.5%). Risulta confermato il generale effetto drenante del fiume Ticino. La superficie piezometrica dell'acquifero superficiale nella zona aeroportuale varia tra 200 e 160 m.s.l.m (con soggiacenza statica compresa tra 50 e 30 m).

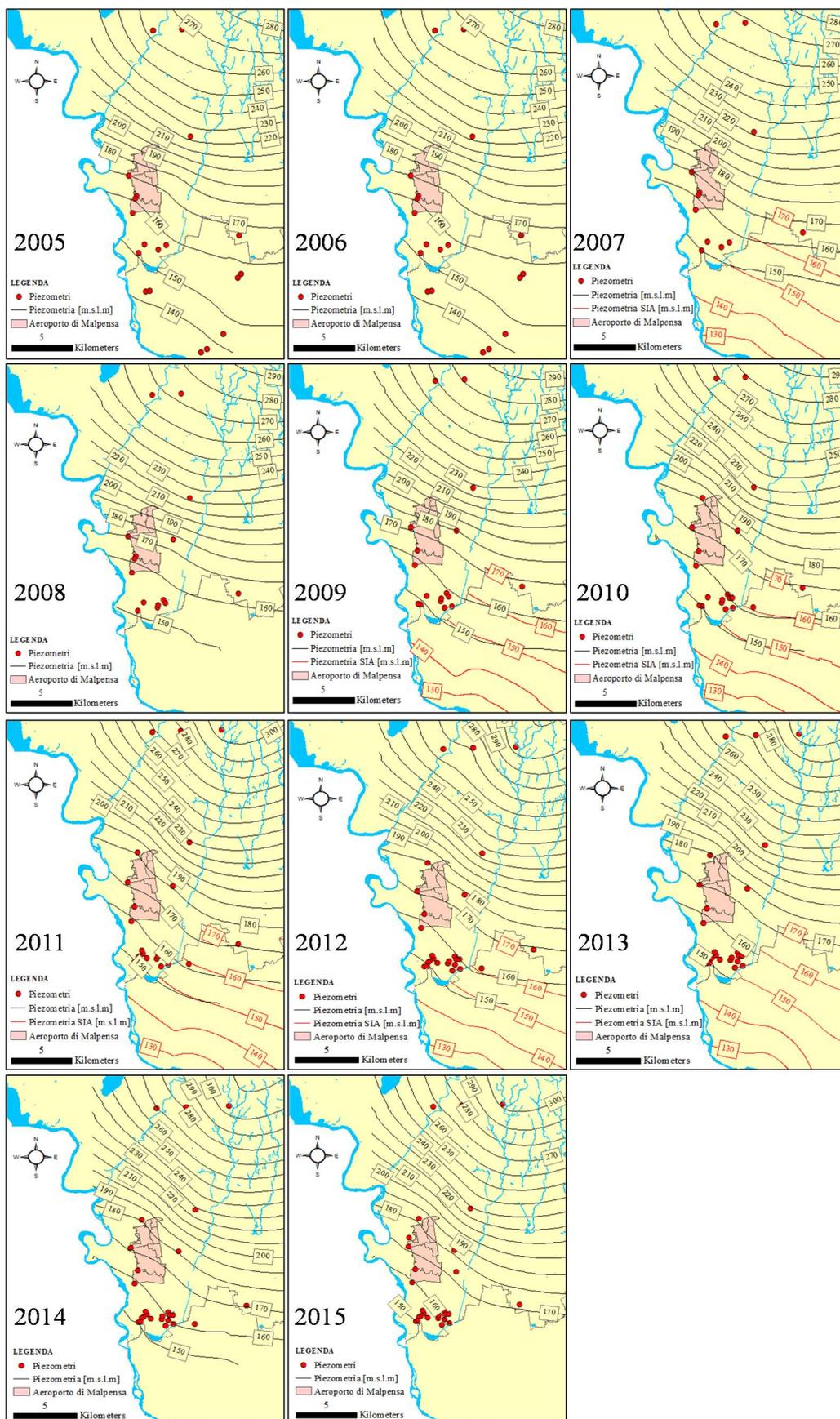


Figura 6.7 Carte piezometriche medie annue nel periodo 2005-2015.



7. CARATTERISTICHE LITOLOGICHE

Nell'ambito della porzione di territorio in esame le informazioni desumibili dalle stratigrafie consentono di schematizzare le caratteristiche litostratigrafiche del sottosuolo tramite la successione delle seguenti unità litostratigrafiche: (i) deposito ghiaioso del Diluvium Recente formata da ghiaie e sabbie con uno spessore di 90-100 m, alla cui base si trovano i conglomerati del ceppo e/o i depositi fluvioglaciali antichi del Ferretto; (ii) strato impermeabile omogeneo di spessore variabile tra i 20 e 100 m che limita la comunicazione tra la falda superficiale e gli acquiferi più profondi.

Sono stati analizzati 518,192 dati litostratigrafici/sedimentologici (fonte: database Tangram, Arpa Lombardia, SEA) in 246 stazioni la cui disposizione spaziale nell'area di indagine è mostrata in Figura 7.1. La profondità massima raggiunta dai sondaggi è pari a 228.5 m dal p.c.. I litotipi presenti sono stati raggruppati nelle quattro classi di geomateriali le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 7.1.

Tabella 7.1 Percentuali volumetriche delle 4 categorie di litotipi considerati.

	Descrizione	Percentuale volumetrica
1	Depositi argillosi e limosi	26.8%
2	Ghiaia, ghiaietto, ciottoli, conglomerato e trovanti	50.8%
3	Sabbia e arenaria	16.7%
4	Terreno	5.7%

Le informazioni litostratigrafiche disponibili sono state analizzate per ottenere una ricostruzione tridimensionale della distribuzione dei litotipi tramite metodi di interpolazione geostatistici a variabili indicizzate. Si sono pertanto ricavati i semivariogrammi sperimentali di ogni litotipo come riportato nelle Figure 7.2-7.5. I dati sperimentali hanno permesso di escludere la presenza di significative anisotropie orizzontali, mentre è presente una chiara anisotropia verticale del sistema.

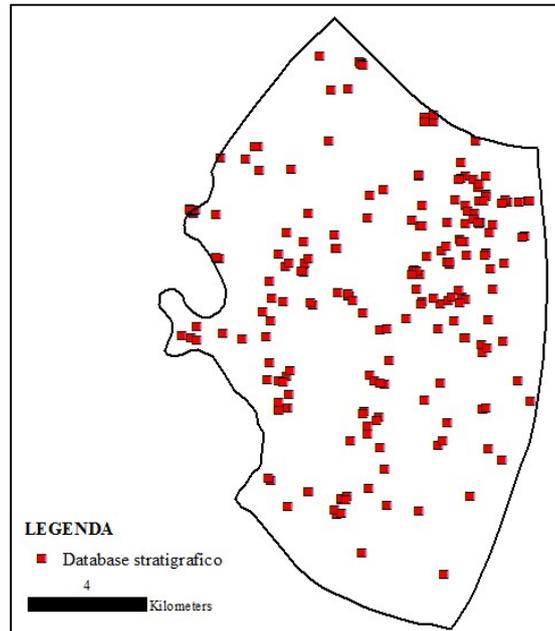


Figura 7.1 Localizzazione delle informazioni litostratigrafiche.

I variogrammi sperimentali sono stati interpretati utilizzando tre modelli: sferico, esponenziale e gaussiano definiti come dettagliato in seguito.

1) Modello Sferico, SPH

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c_1 \left[1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{se } h \leq a \\ c_0 + c_1 & \text{se } h > a \end{cases} \quad (7.1)$$

2) Modello Esponenziale, EXP

$$\gamma(h) = c_0 + c_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right] \quad (7.2)$$

3) Modello Gaussiano, GAUS

$$\gamma(h) = c_0 + c_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2}\right) \right] \quad (7.3)$$

dove h è il lag direzionale (o distanza di separazione), c_0 è il nugget, c_1 è la varianza dell'indicatore e a è il range. Per ciascun modello si sono considerati due casi: (i) modello senza effetto di un nugget, i.e. nugget pari a zero (2par) e (ii) modello con nugget (3par). I parametri del modello sono stati calibrati utilizzando il metodo della Massima Verosimiglianza (ML, *Carrera & Neuman, 1986*). In



Nelle Figure 7.2 – 7.5 vengono riportati per ciascuna categoria i variogrammi sperimentali e teorici ottenuti in direzione orizzontale e verticale per ciascuna categoria.

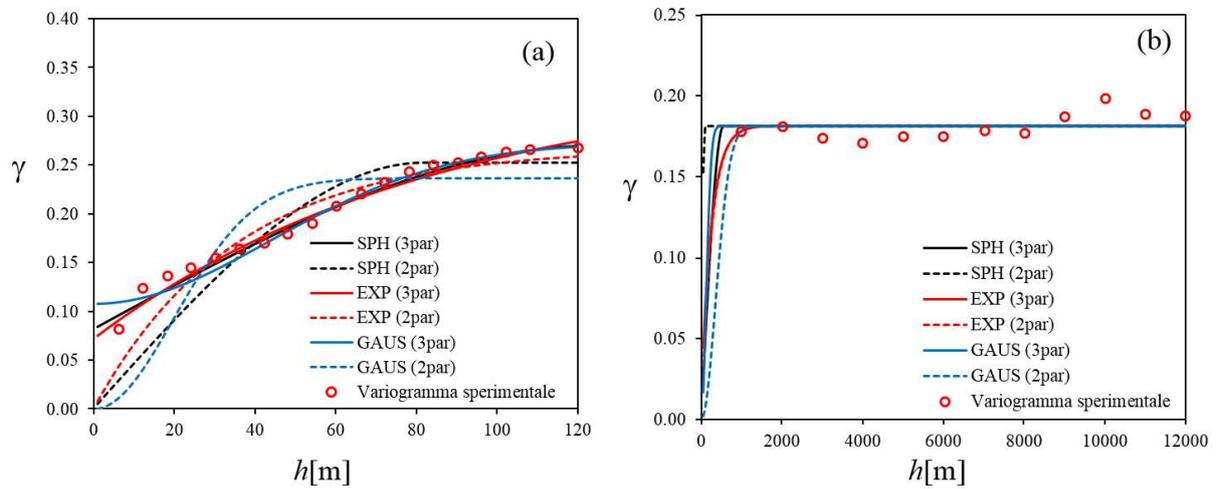


Figura 7.2 Variogramma verticale (a) e orizzontale (b) della Categoria 1.

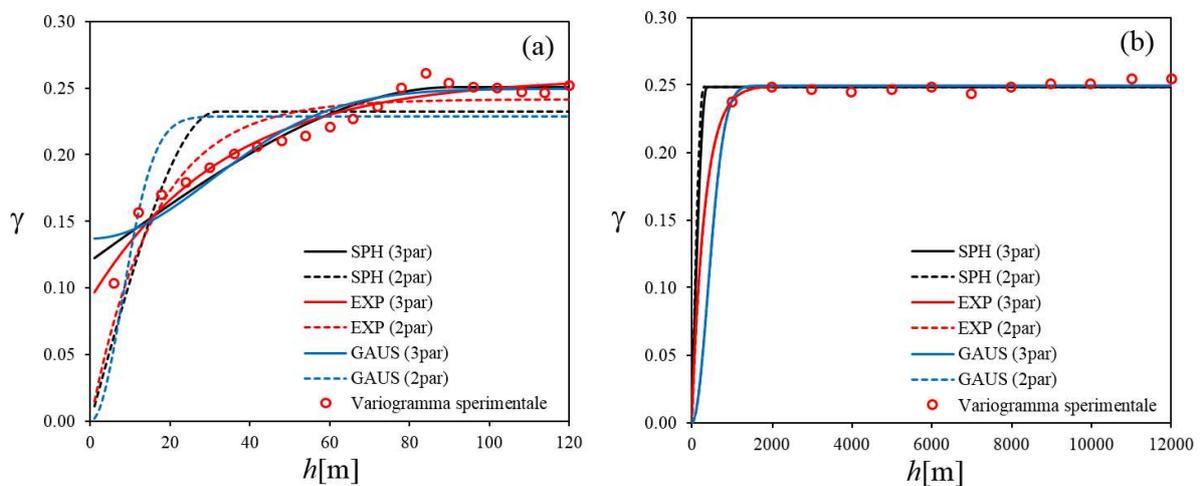


Figura 7.3 Variogramma verticale (a) e orizzontale (b) della Categoria 2.

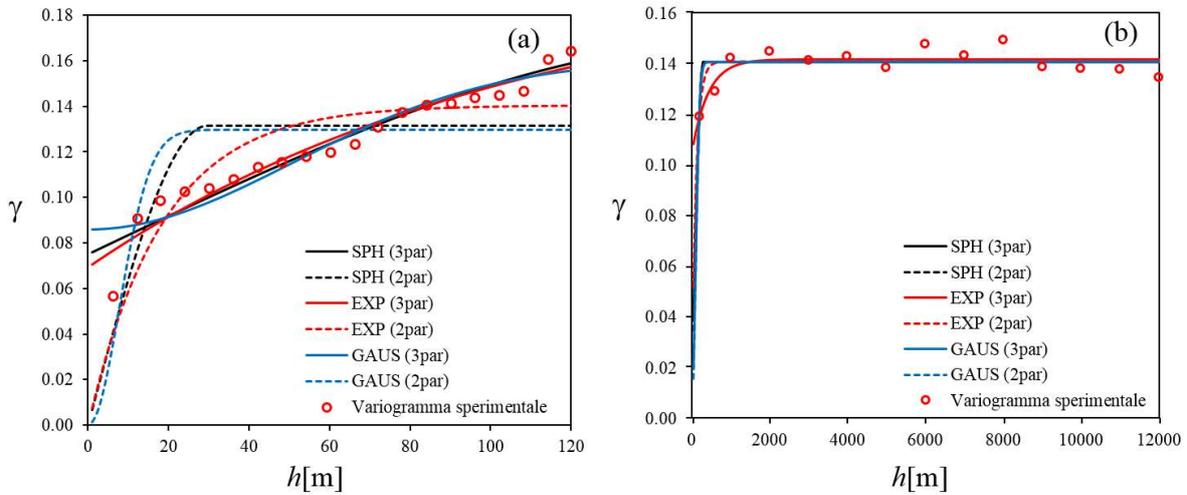


Figura 7.4 Variogramma verticale (a) e orizzontale (b) della Categoria 3.

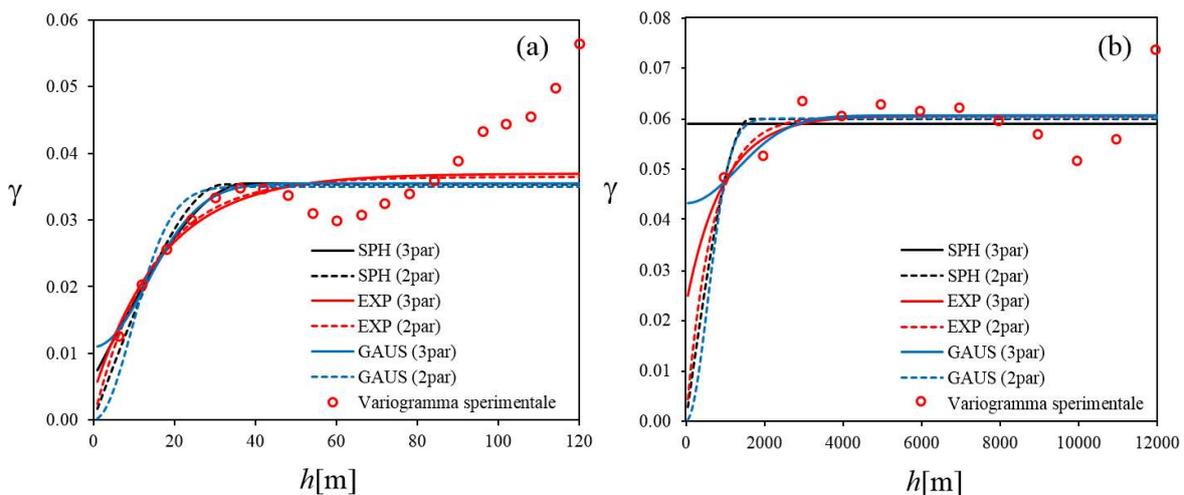


Figura 7.5 Variogramma verticale (a) e orizzontale (b) della Categoria 4.

La scelta del modello di variogramma da utilizzare per ciascuna categoria è stata effettuata considerando i seguenti criteri di discriminazione dei modelli: AIC (*Akaike, 1974*), AICc (*Hurvich & Tsai, 1989*), BIC (*Schwartz, 1978*), KIC (*Kashyap, 1982*). Tali criteri discriminano tra i diversi modelli sulla base della loro capacità di riprodurre i dati sperimentali e sul numero di parametri e di osservazioni disponibili. KIC considera come ulteriore fattore discriminante il determinante della matrice di covarianza di stima (*Riva et al., 2011*). I risultati ottenuti sono riassunti in Yabella 7.2.



Tabella 7.2 Metriche per la selezione dei modelli.

CATEGORIA 1												
Modello	ORIZZONTALE						VERTICALE					
	Sph3	Sph2	Exp3	Exp2	Gaus3	Gaus2	Sph3	Sph2	Exp3	Exp2	Gaus3	Gaus2
NLL	-165.40	-166.67	-165.57	-166.84	-165.40	-165.71	-157.61	-99.39	-153.70	-116.33	-144.59	-86.91
AIC	-109.63	-112.89	-109.80	-113.06	-109.63	-111.44	-197.08	-140.86	-193.17	-157.80	-184.06	-128.38
AICc	-106.63	-111.56	-106.80	-111.73	-106.63	-110.87	-195.58	-140.15	-191.67	-157.09	-182.56	-127.68
BIC	-108.66	-112.41	-108.83	-112.58	-108.66	-112.23	-195.09	-139.86	-191.18	-156.80	-182.07	-127.39
KIC	-90.60	-88.19	-90.77	-88.36	-90.60	-88.41	-155.35	-93.45	-151.44	-110.39	-142.33	-80.98

CATEGORIA 2												
Modello	ORIZZONTALE						VERTICALE					
	Sph3	Sph2	Exp3	Exp2	Gaus3	Gaus2	Sph3	Sph2	Exp3	Exp2	Gaus3	Gaus2
NLL	-178.25	-179.51	-185.89	-187.15	-185.87	-187.13	-139.81	-105.28	-146.10	-122.78	-131.84	-100.84
AIC	-121.49	-124.75	-129.13	-132.39	-129.11	-132.37	-178.68	-146.15	-184.97	-163.64	-170.71	-141.70
AICc	-118.49	-123.42	-126.13	-131.06	-126.11	-131.04	-177.18	-145.44	-183.47	-162.94	-169.21	-141.00
BIC	-120.52	-124.27	-128.16	-131.91	-128.14	-131.88	-176.69	-145.15	-182.98	-162.65	-168.71	-140.71
KIC	-102.46	-100.05	-110.10	-107.69	-110.08	-107.67	-136.95	-98.74	-143.24	-116.24	-128.97	-94.30



CATEGORIA 3

Modello	ORIZZONTALE						VERTICALE					
	Sph3	Sph2	Exp3	Exp2	Gaus3	Gaus2	Sph3	Sph2	Exp3	Exp2	Gaus3	Gaus2
NLL	-126.00	-127.22	-131.29	-127.71	-126.00	-127.22	-155.36	-118.74	-157.70	-130.41	-147.02	-116.49
AIC	-140.90	-144.12	-146.19	-144.61	-140.90	-144.12	-192.52	-157.90	-194.86	-169.57	-184.18	-155.65
AICc	-138.50	-143.03	-143.79	-143.52	-138.50	-143.03	-191.02	-157.19	-193.36	-168.86	-182.68	-154.95
BIC	-139.62	-143.48	-144.91	-143.97	-139.62	-143.48	-190.53	-156.90	-192.87	-168.57	-182.19	-154.66
KIC	-116.20	-113.74	-121.49	-114.23	-116.20	-113.74	-150.79	-110.49	-153.13	-122.16	-142.45	-108.25

CATEGORIA 4

Modello	ORIZZONTALE						VERTICALE					
	Sph3	Sph2	Exp3	Exp2	Gaus3	Gaus2	Sph3	Sph2	Exp3	Exp2	Gaus3	Gaus2
NLL	-105.43	-110.22	-110.15	-111.22	-110.49	-110.27	-159.09	-159.06	-160.26	-161.28	-159.02	-156.00
AIC	-113.79	-120.58	-118.51	-121.58	-118.84	-120.63	-182.42	-184.39	-183.59	-186.62	-182.36	-181.34
AICc	-110.79	-119.25	-115.51	-120.25	-115.84	-119.29	-180.58	-183.54	-181.74	-185.76	-180.51	-180.48
BIC	-112.82	-120.10	-117.54	-121.10	-117.87	-120.14	-180.76	-183.56	-181.92	-185.78	-180.69	-180.50
KIC	-94.77	-95.88	-99.48	-96.88	-99.82	-95.92	-149.21	-145.50	-150.37	-147.73	-149.14	-142.44



Sulla base dei risultati in Tabella 7.2 è stato possibile selezionare il modello interpretativo per la distribuzione di ciascuna categoria. I modelli interpretativi utilizzati sono riportati in Tabella 7.3 unitamente ai parametri stimati via ML.

Tabella 7.3 Modelli e relativi parametri stimati (ML) per interpretare i semivariogrammi sperimentali associati a ciascuna categoria.

Modello	Categoria 1		Categoria 2		Categoria 3		Categoria 4	
	Orizz.	Vert.	Orizz.	Vert.	Orizz.	Vert.	Orizz.	Vert.
Modello	Exp3	Shp3	Exp3	Exp3	Exp3	Exp3	Gaus3	Exp3
Nugget	0.00	0.08	0.01	0.09	0.10	0.07	0.00	0.00
Sill	0.18	0.25	0.24	0.17	0.04	0.13	0.06	0.04
Range [m]	551.6	81.8	984.1	101.0	1241.9	323.9	2022.7	23.4

Attraverso una tecnica di interpolazione geostatistica (*Deutsch & Journel, 1998*) si è quindi calcolato, nello spazio tridimensionale, la probabilità di accadimento di ogni categoria. Il dominio di calcolo dell'estensione di $270 \text{ km}^2 \times 330 \text{ m}$ (in direzione verticale, z) è stato discretizzato con una griglia regolare formata da circa 3 milioni di celle di dimensione $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 3 \text{ m}$.

A titolo di esempio nelle Figure 7.7 – 7.10 si riporta la probabilità di accadimento rispettivamente delle categorie 1, 2, 3, 4 lungo due sezioni verticali A-A' e B-B' evidenziate in Figura 7.6. In Figura 7.11 viene riportata la probabilità di accadimento delle categorie caratterizzate da maggior permeabilità (i.e., 2+3+4) lungo le medesime sezioni. Nelle Figure 7.12 - 7.15 vengono evidenziate le probabilità di accadimento dell'argilla-limo (categoria 1) e delle categorie più permeabili (2+3+4) ricostruite a profondità di 25, 50, 100 e 125 m dal p.c. Si osserva che la probabilità di accadimento della categoria 1 raggiunge valori elevati (prossimi ad 1) nella zona aeroportuale a profondità pari a circa 100 m dal p.c.. Le categorie 2-4 sono predominanti nella parte superficiale del sistema.

Nella loro globalità le elaborazioni effettuate in questo Capitolo sono coerenti con l'inquadramento geologico e litologico della zona (vd. Capitolo 2). La bassa eterogeneità dell'acquifero superficiale costituito per la maggior parte da uno strato consistente di ghiaie e sabbie del Diluvium Recente è in definitiva ben rappresentato dalla somma delle Categoria 2, 3 e 4.

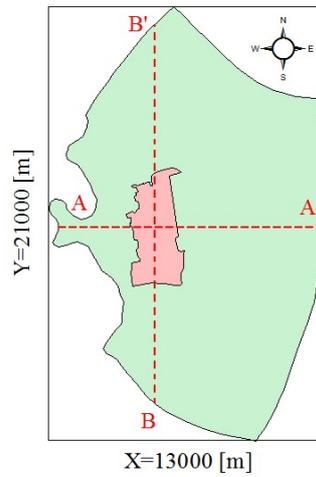


Figura 7.6 Sezioni verticali riportate nelle Figure 7.7-7.11.

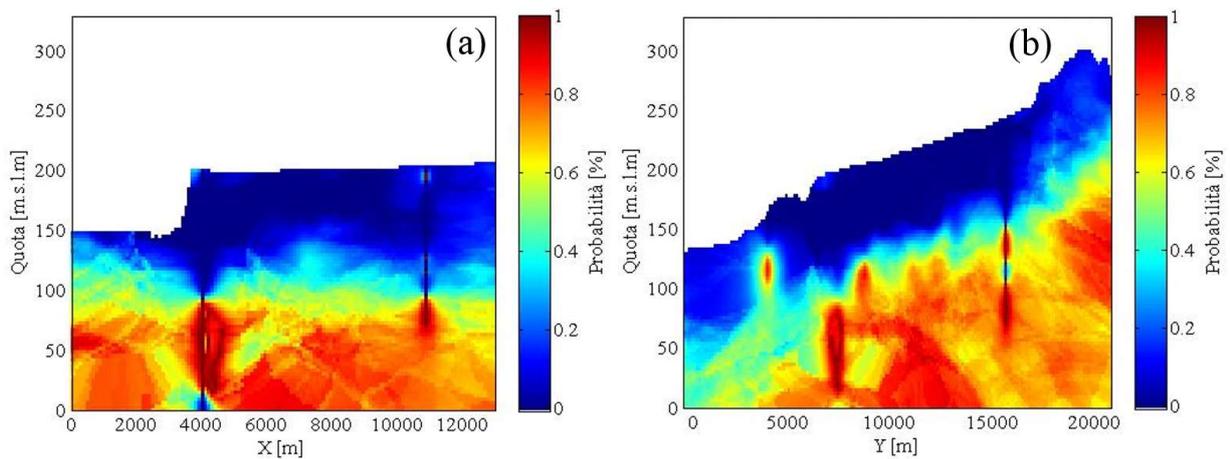


Figura 7.7 Probabilità di accadimento della categoria 1 (argilla-limo) lungo le sezioni A-A' (a) e B-B' (b).

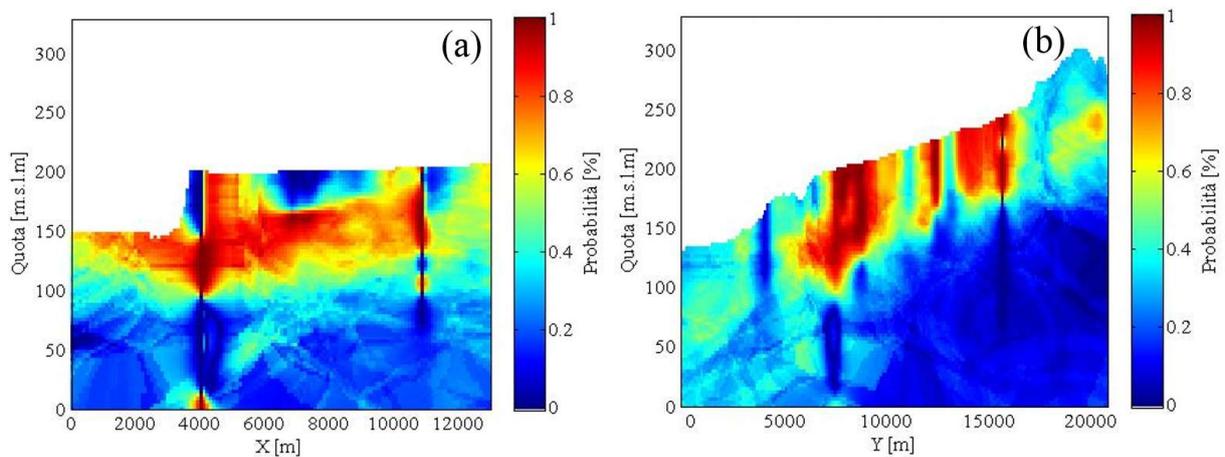


Figura 7.8 Probabilità di accadimento della categoria 2 (ghiaia) lungo le sezioni A-A' (a) e B-B' (b).

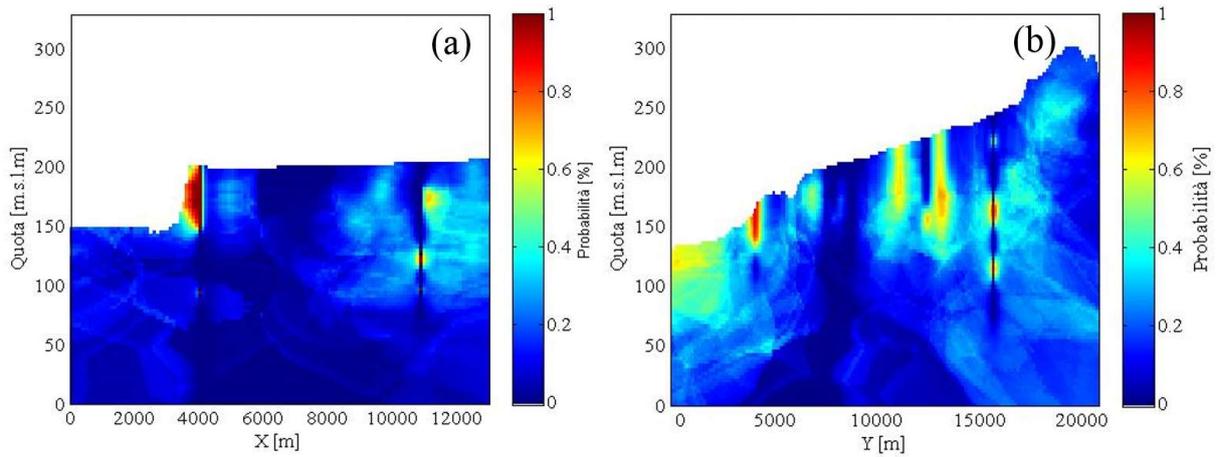


Figura 7.9 Probabilità di accadimento della categoria 3 (sabbia) lungo le sezioni A-A' (a) e B-B' (b).

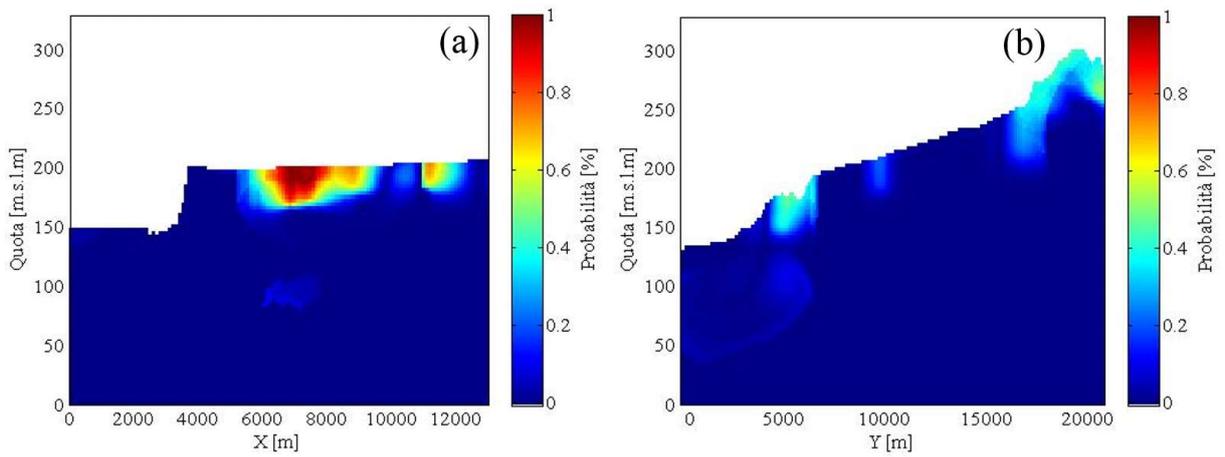


Figura 7.10 Probabilità di accadimento della categoria 4 (terreno) lungo le sezioni A-A' (a) e B-B' (b).

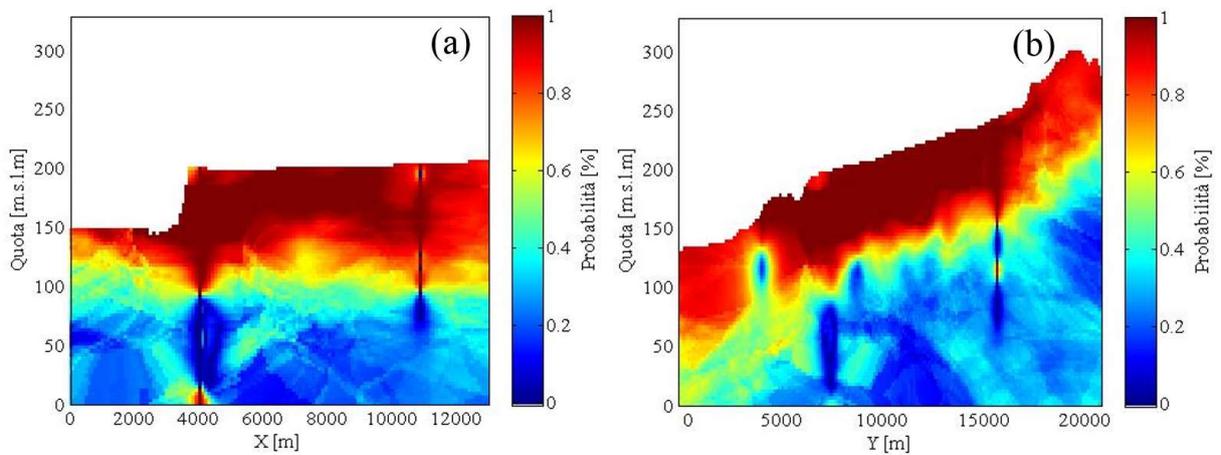


Figura 7.11 Probabilità di accadimento delle categorie 2+3+4 (ghiaia, sabbia e terreno) sezione A-A' (a) e B-B' (b).

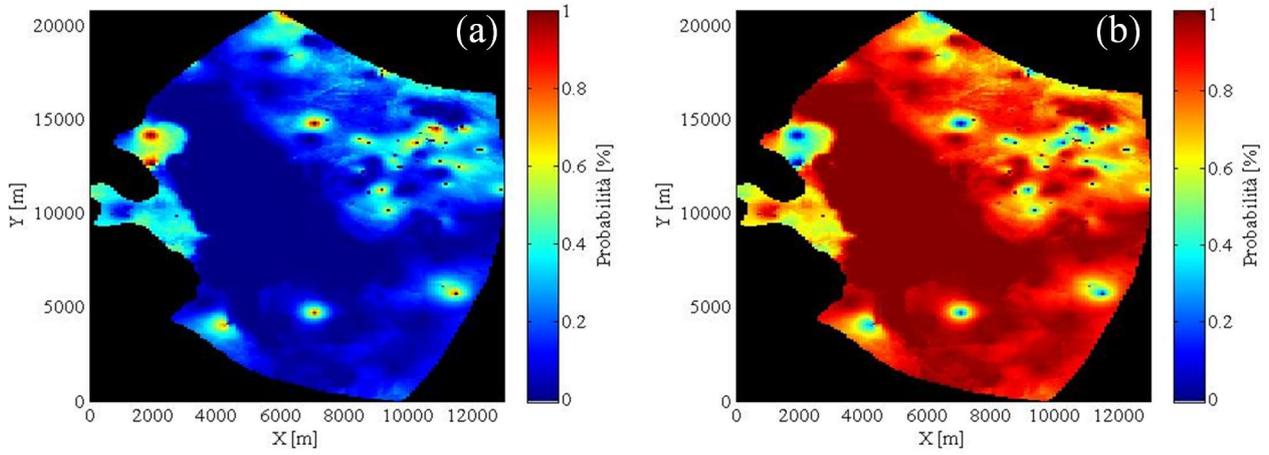


Figura 7.12 Probabilità di accadimento della categoria 1 (a) e delle rimanenti categorie 2+3+4 (b) a 25 m dal p.c.

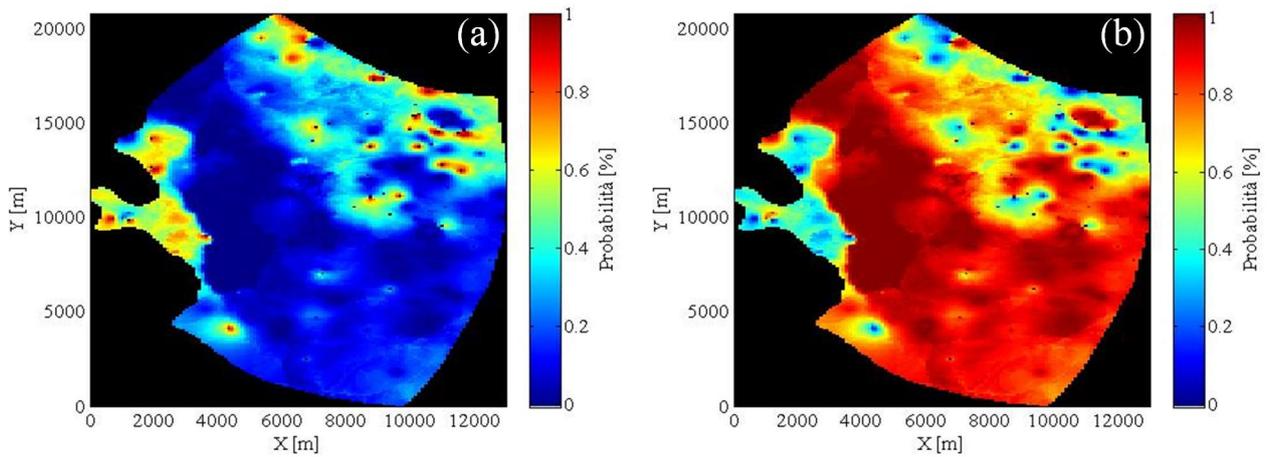


Figura 7.13 Probabilità di accadimento della categoria 1 (a) e delle rimanenti categorie 2+3+4 (b) a 50 m dal p.c.

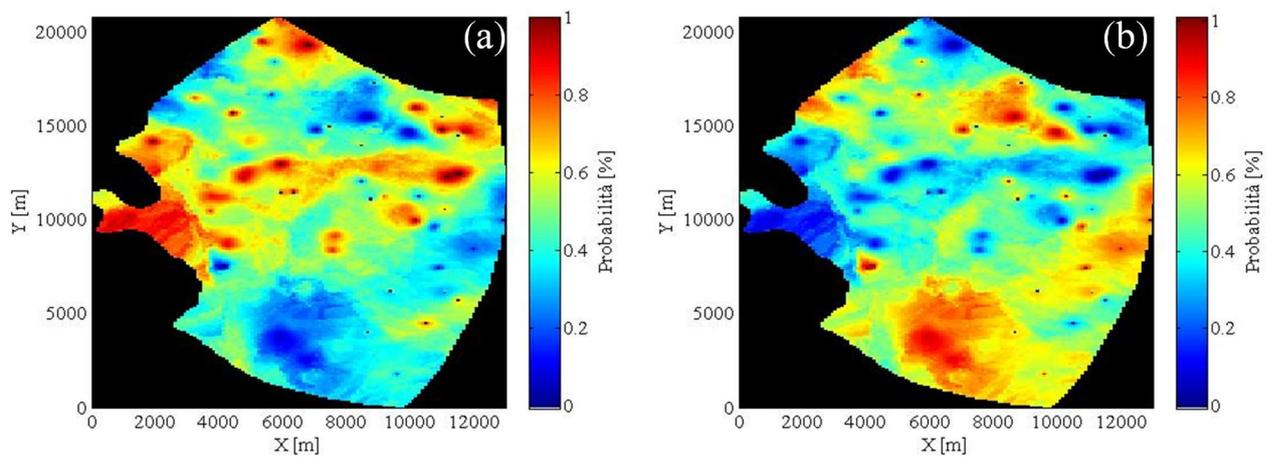


Figura 7.14 Probabilità di accadimento della categoria 1 (a) e delle rimanenti categorie 2+3+4 (b) a 100 m dal p.c.

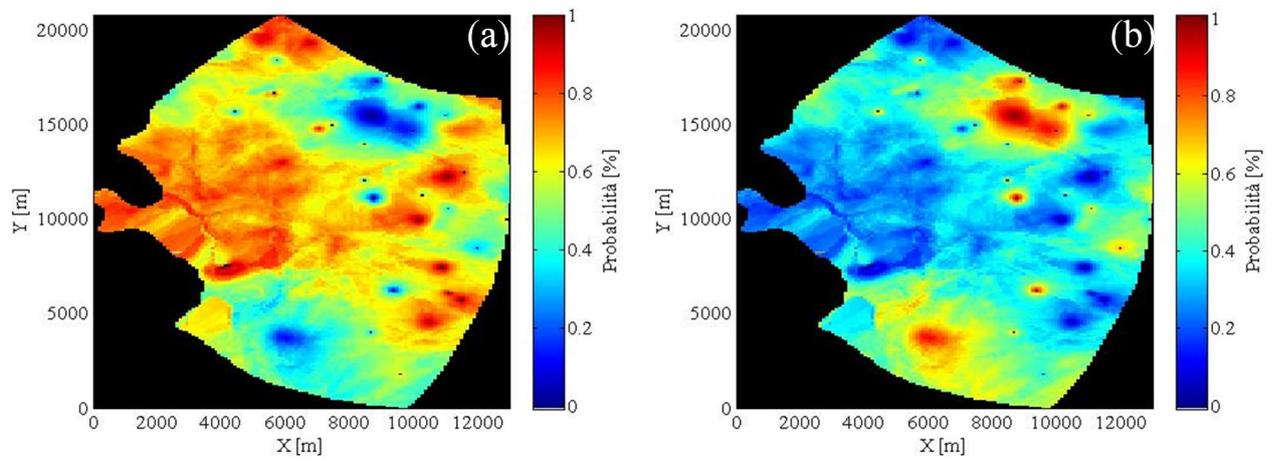


Figura 7.15 Probabilità di accadimento della categoria 1 (a) e delle rimanenti categorie 2+3+4 (b) a 125 m dal p.c.



Riferimenti bibliografici

- Akaike H. (1974). A new look at statistical model identification, *IEEE Trans. Autom. Control*, AC19, 716–723.
- Carcano C., A. Piccin (2001). Geologia degli acquiferi Padani della Regione Lombardia. Regione Lombardia, Eni Divisione Agip. S.EL.CA. (Firenze).
- Carrera J., S.P. Neuman (1986), Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 1. Maximum likelihood method incorporating prior information, *Water Resour. Res.*, 22(2), 199-210.
- Deutsch C.V., A.G. Journel (1998). *GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide*, 2nd ed., Oxford Univ. Press, New York.
- Hurvich C.M., C.L. Tsai (1989). Regression and time series model selection in small samples, *Biometrika*, 76, 297-307.
- Kashyap, R.L. (1982). Optimal choice of AR and MA parts in autoregressive moving average models, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 4, 99-104.
- Riva M., M. Panzeri, A. Guadagnini, S.P. Neuman (2011). Role of model selection criteria in geostatistical inverse estimation of statistical data- and model-parameters, *Water Resour. Res.*, 47, W07502.
- Schwarz G.E. (1978). Estimating the dimension of a model, *Annals of Statistics*, 6, 461-464.
- Ye M., P.D. Meyer, S.P. Neuman (2008). On model selection criteria in multimodel analysis, *Water Resour. Res.*, 44, W03428.



APPENDICE A: Stazioni di monitoraggio piezometrico

In questa appendice sono riassunte le caratteristiche dei piezometri utilizzati nel presente lavoro (fonte: Provincia di Varese, SEA, ARPA Lombardia, ARPA Piemonte e SIA Società metropolitana di Milano). Vengono forniti, ove disponibile, il codice identificativo, il comune dove è pozzo è localizzato, le coordinate geografiche WGS84, la quota del p.c., la quota testa pozzo, la profondità di perforazione dal p.c., la profondità dei filtri dal p.c. e il diametro del piezometro.

Tabella A1 Piezometri ARPA Lombardia (VA).

Codice Identificativo	Comune	Utm X	Utm Y	Quota p.c. [m s.l.m.]	Testa pozzo [m s.l.m.]	Profondità dal p.c. [m]	Profondità filtri da p.c. [m]	Diametro [mm]
PO012002NU0008	Albizzate	485002	5065315	315.12	315.12	48.5	18-28.5	500
PO012026NU3021	Busto Arsizio	486383	5048270	204.68	205.23	102	42-48, 83-95	--
PO012030NR0026	Cantello	491633	5076307	332.91	332.91	66	21-27	300
PO012036NU0003	Casale Litta	479344	5065126	279.52	279.52	65	21-29.5	400
PO0120500RZ001	Cislago	495380	5054832	207.75	207.75	15	--	--
PO012051NU0001	Cittiglio	474280	5082403	241.55	241.55	55.5	17-55.5	300
PO012068NUP001	Ferno	481210	5051028	209.40	209.40	101.5	65-74, 82-85	300
PO012070NU1007	Gallarate	482391	5056403	254.86	254.86	65	32-35, 46-48, 49-51, 53-55	300
PO0120750R2020	Gerenzano	498243	5052530	220.63	220.63	62	33.5-59	450
PO0120790RZ001	Gorla Minore	494757	5054445	241.52	241.52	50	--	--
PO012090NU2009	Lonate Pozzolo	477623	5050127	207.95	207.95	82.6	55-74	508
PO012092NR0021	Luino	480391	5093597	216.97	211.17	70	30-50	350
PO012106NU0015	Mornago	481694	5065224	290.80	290.80	36	17-26	400
PO012109NUB005	Origgio	501795	5049660	194.00	194.40	100	71.2-77.5, 82.5-88	405
PO0121180U0005	Samarate	481042	5052887	226.07	226.07	80	50-62, 64-72	500
PO012123NUP001	Somma Lombardo	477395	5053945	231.74	231.74	100	58-88	310
PO0121300RZ001	Uboldo	497814	5049212	204.20	204.20	45	--	--
PO012136NUZ001	Venegono Inferiore	493230	5064390	316.01	316.01	67	28-40, 49-55	220



Tabella A2 Piezometri ARPA Piemonte (NO).

Codice Identificativo	Comune	Utm X	Utm Y	Quota p.c. [m s.l.m.]	Testa pozzo [m s.l.m.]	Profondità dal p.c. [m]	Profondità filtri da p.c. [m]	Diametro [mm]
PII31	Caltignaga	467455	5040803	179.00	179.00	15	5.78-15	130
PII32	Cameri	472182	5039240	164.00	164	15	6.22-15	130
PII28	Momo	465047	5046124	205.56	205.56	--	--	--
PII29	Oleggio	470722	5049647	231.59	231.59	40	5-6, 22.55-40	150
PII51	Suno	463732	5053030	251.00	251	--	--	--

Tabella A3 Piezometri SIA (MI).

Codice Identificativo	Comune	Utm X	Utm Y	Quota p.c. [m s.l.m.]	Testa pozzo [m s.l.m.]	Profondità dal p.c. [m]	Profondità filtri da p.c. [m]	Diametro [mm]
150620058	Castano Primo	478750	5043640	148.26	148.26	20	16-20	--
150620059	Castano Primo	479039	5043710	148.92	148.92	20	16-20	--
152490020	Vanzaghello	482338	5046696	191.89	--	-	--	--
151540066	Nerviano	498293	5043035	166.00	166.00	50	40.50-50	106
150960047	Cuggiono	483733	5038940	156.67	156.67	15	6-12	--
150960048	Cuggiono	483255	5038631	134.14	134.14	33	21-30	--
150380034	Buscate	486514	5045128	187.71	184.71	40	15-40	--
150380035	Buscate	486256	5044772	171.37	168.37	40	15-41	--
150960014	Cuggiono	485050	5040163	161.36	159.36	55.3	31-39, 41-51.50	290
151810001	Rescaldina	496173	5051430	221.01	186.01	81.7	51.70-57.70, 65.70-73.70	150
151540003	Nerviano	498483	5044720	175.93	174.93	75	--	350



Tabella A4 Piezometri Cava Ticino (S. Anna) (VA).

Codice Identificativo	Comune	Utm X	Utm Y	Quota p.c. [m s.l.m.]	Testa pozzo [m s.l.m.]	Profondità dal p.c. [m]	Profondità filtri da p.c. [m]
A	Lonate Pozzolo	478593	5047512	193.40	--	--	--
B	Lonate Pozzolo	478123	5046813	154.56	--	--	--
C	Lonate Pozzolo	477908	5046854	190.74	--	--	--
D	Lonate Pozzolo	478474	5047757	194.72	--	--	--
E	Lonate Pozzolo	478916	5047161	178.44	--	--	--
F	Lonate Pozzolo	478315	5047315	158.54	--	--	--
G	Lonate Pozzolo	478178	5047222	158.10	--	--	--

Tabella A5 Piezometri Cave Riunite (Frutteto) (VA).

Codice Identificativo	Comune	Utm X	Utm Y	Quota p.c. [m s.l.m.]	Testa pozzo [m s.l.m.]	Profondità dal p.c. [m]	Profondità filtri da p.c. [m]
C	Lonate Pozzolo	478166	5055562	234.90	--	--	--

Tabella A6 Piezometri Cava Calderona (VA).

Codice Identificativo	Comune	Utm X	Utm Y	Quota p.c. [m s.l.m.]	Testa pozzo [m s.l.m.]	Profondità dal p.c. [m]	Profondità filtri da p.c. [m]
PF1	Lonate Pozzolo	480051	5046538	190.17	--	--	--
PF2	Lonate Pozzolo	479730	5047098	190.50	188.80	--	--
PF3	Lonate Pozzolo	479792	5047332	194.57	--	--	--
PF4	Lonate Pozzolo	480246	5047726	196.55	--	--	--
PF5	Lonate Pozzolo	480382	5047464	162.97	--	--	--
PF6	Lonate Pozzolo	480622	5047463	195.36	--	--	--
PF7	Lonate Pozzolo	480682	5046687	191.69	--	--	--
PF8	Lonate Pozzolo	480265	5047012	164.26	--	--	--



Tabella A7 Piezometri SEA (T1).

Codice Identificativo	Comune	Utm X	Utm Y	Quota p.c. [m s.l.m.]	Testa pozzo [m s.l.m.]	Profondità dal p.c. [m]	Profondità filtri da p.c. [m]	Diametro [mm]
G	Somma Lombardo	477329	5053181	222.2	219.2	103.2	74.6-91.2	600
I	Lonate Pozzolo	477974	5051496	215	212.5	99	66-78, 84-90	600
L	Lonate Pozzolo	477874	5051273	215	213.8	101.5	69-75, 81-93	600



APPENDICE B: Andamenti piezometrici

In questa appendice si riporta l'evoluzione temporale dei livelli piezometrici monitorati mensilmente nella falda superficiale all'interno e nell'intorno della zona aeroportuale.

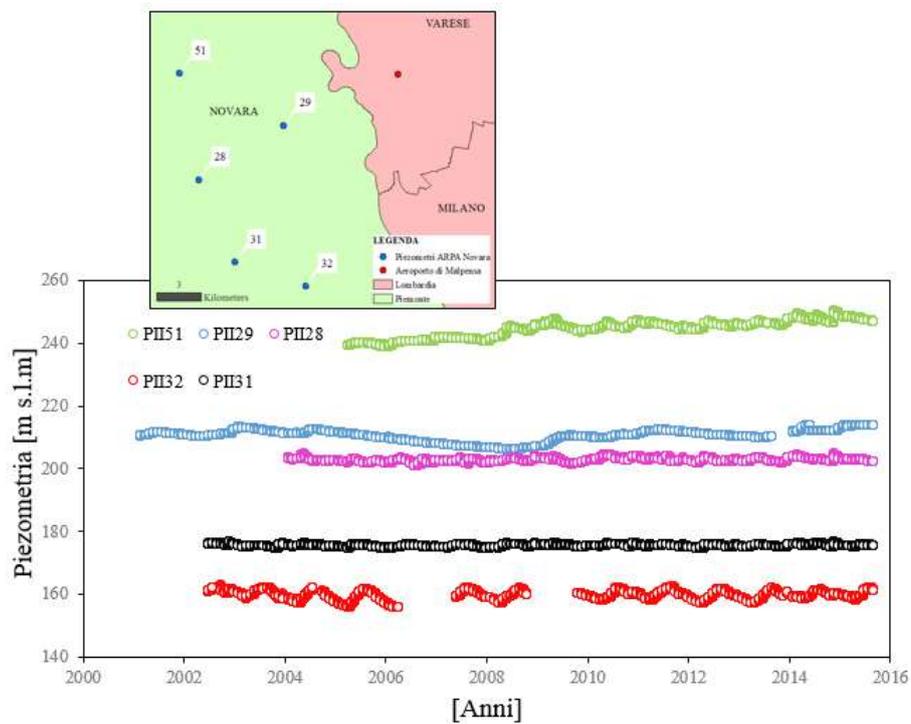


Figura B1 Andamento freaticometrico falda superficiale nell'intorno della zona aeroportuale, stazioni ARPA Piemonte (NO).

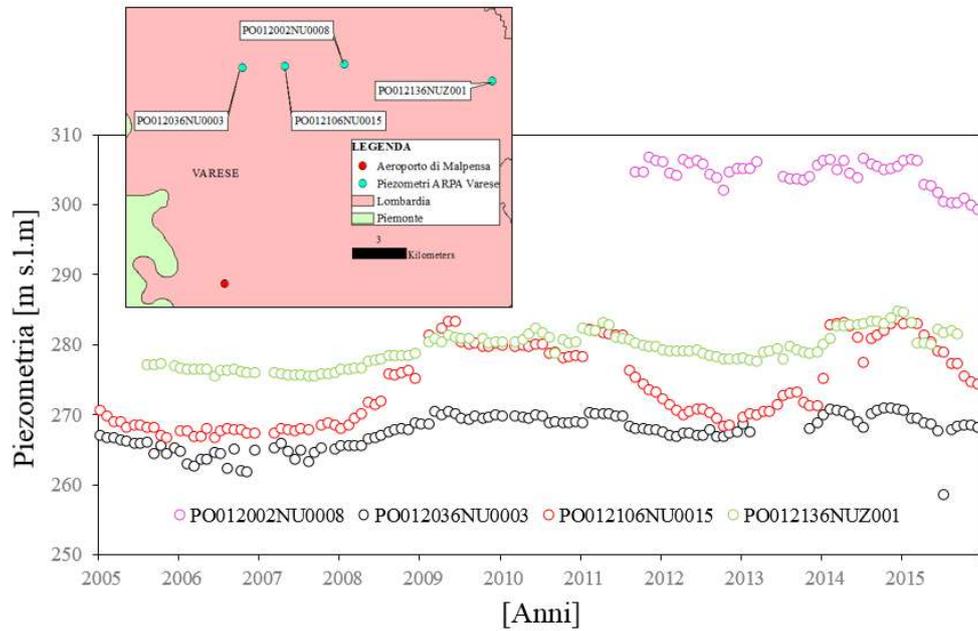


Figura B2 Andamento freaticometrico falda superficiale nell'intorno della zona aeroportuale, stazioni ARPA Lombardia (VA).

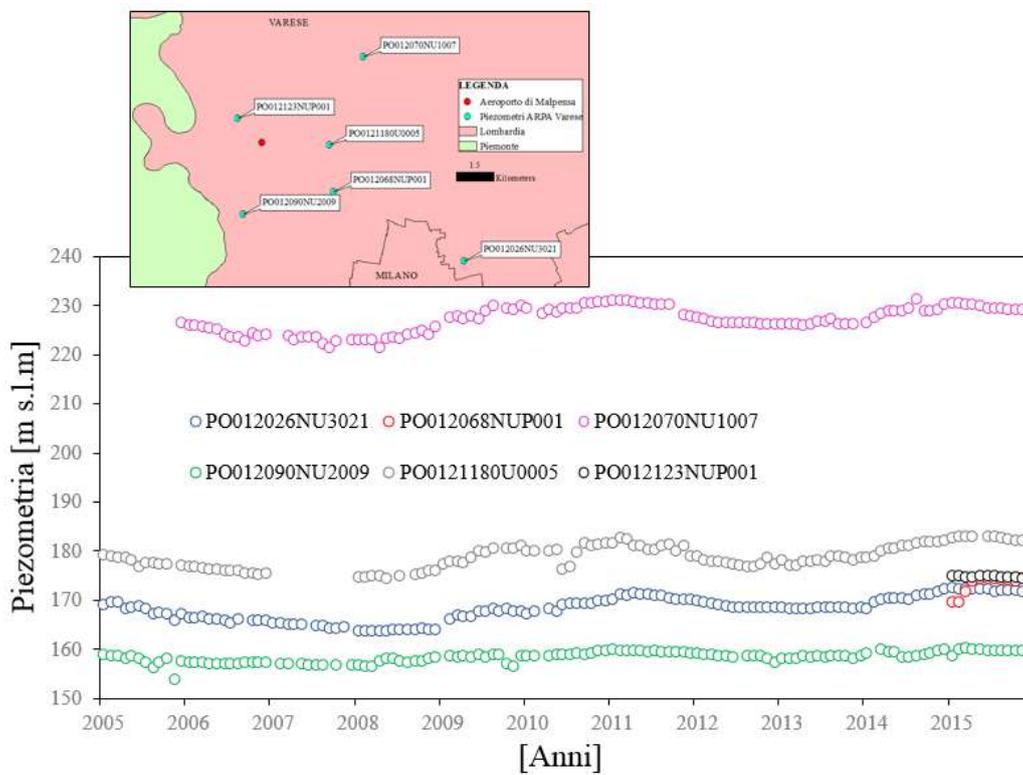


Figura B3 Andamento freaticometrico falda superficiale nell'intorno della zona aeroportuale, stazioni ARPA Lombardia (VA).

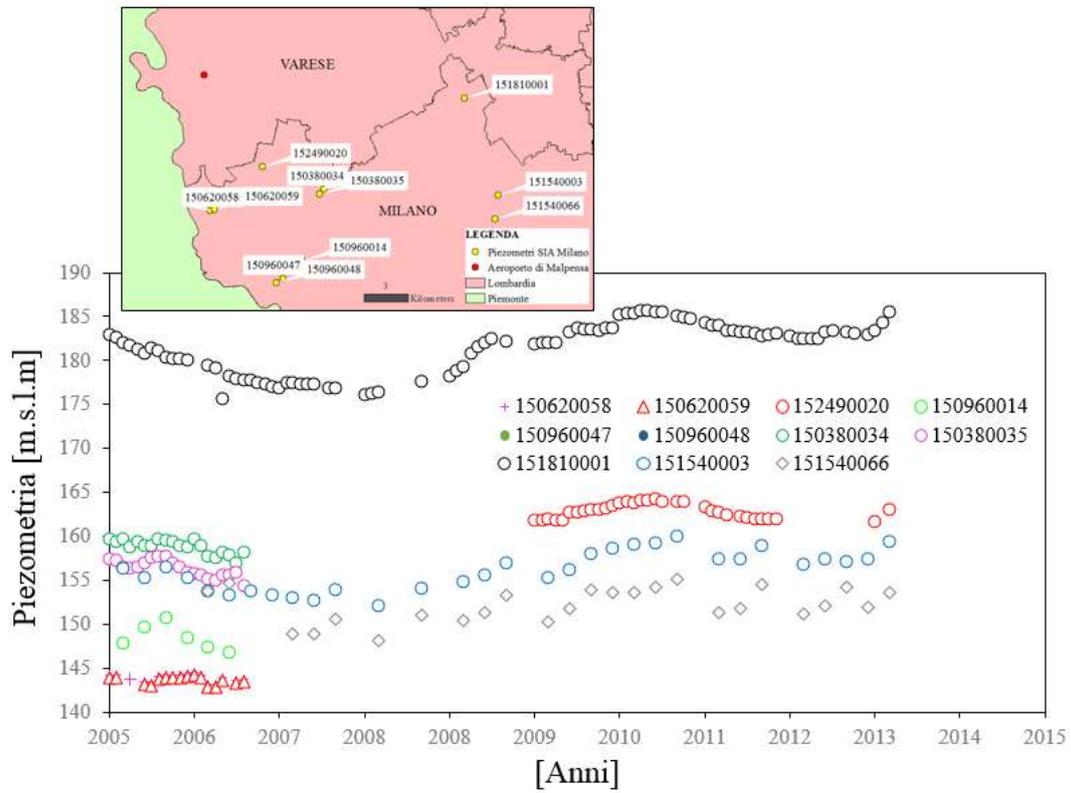


Figura B4 Andamento freaticometrico falda superficiale nell'intorno della zona aeroportuale, stazioni SIA Città metropolitana milanese.

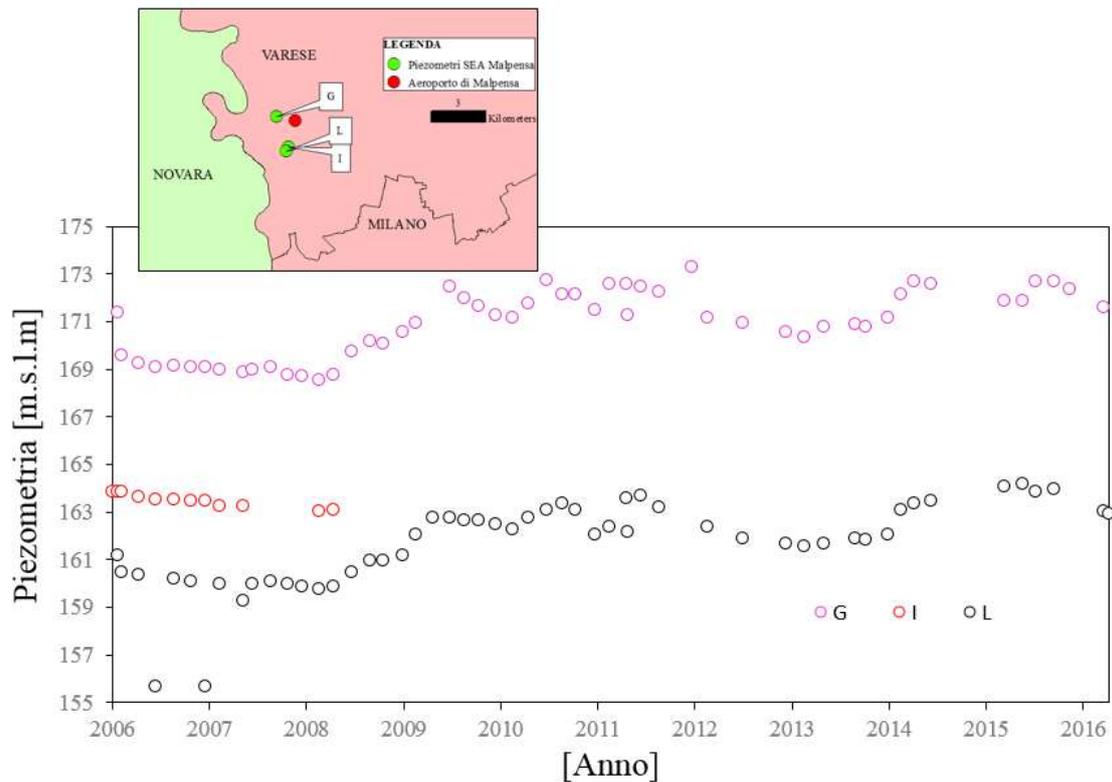


Figura B5 Andamento freaticometrico falda superficiale all'interno della zona aeroportuale, stazioni SEA.

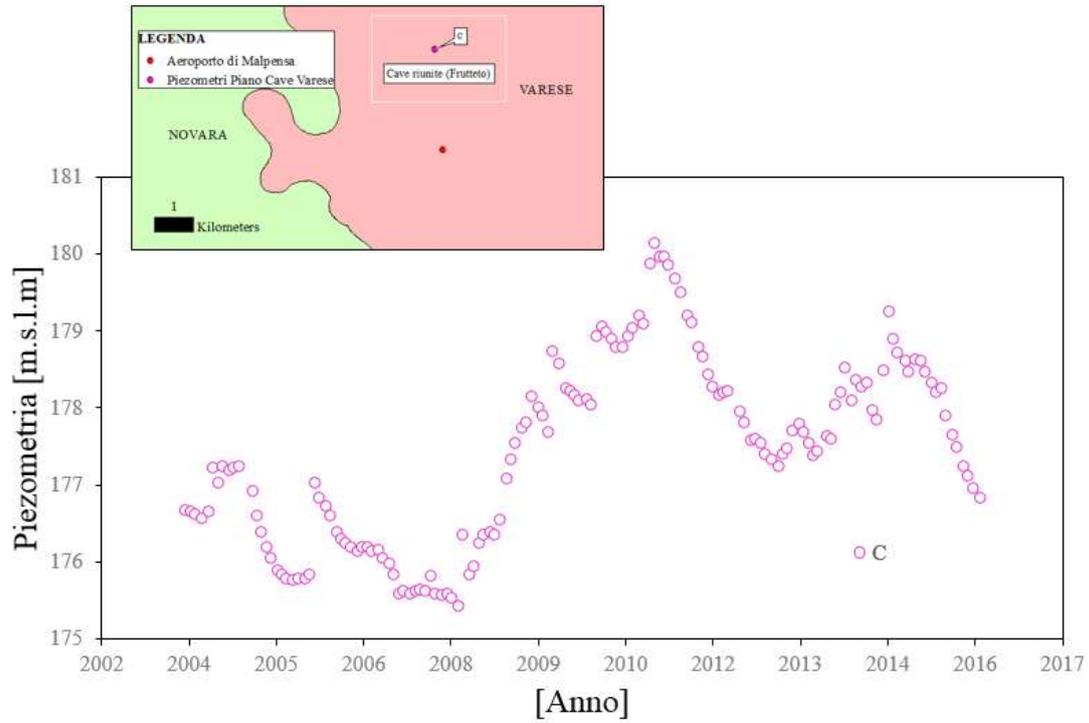


Figura B6 Andamento freaticometrico falda superficiale nell'intorno della zona aeroportuale, Cave riunite (Frutteto).

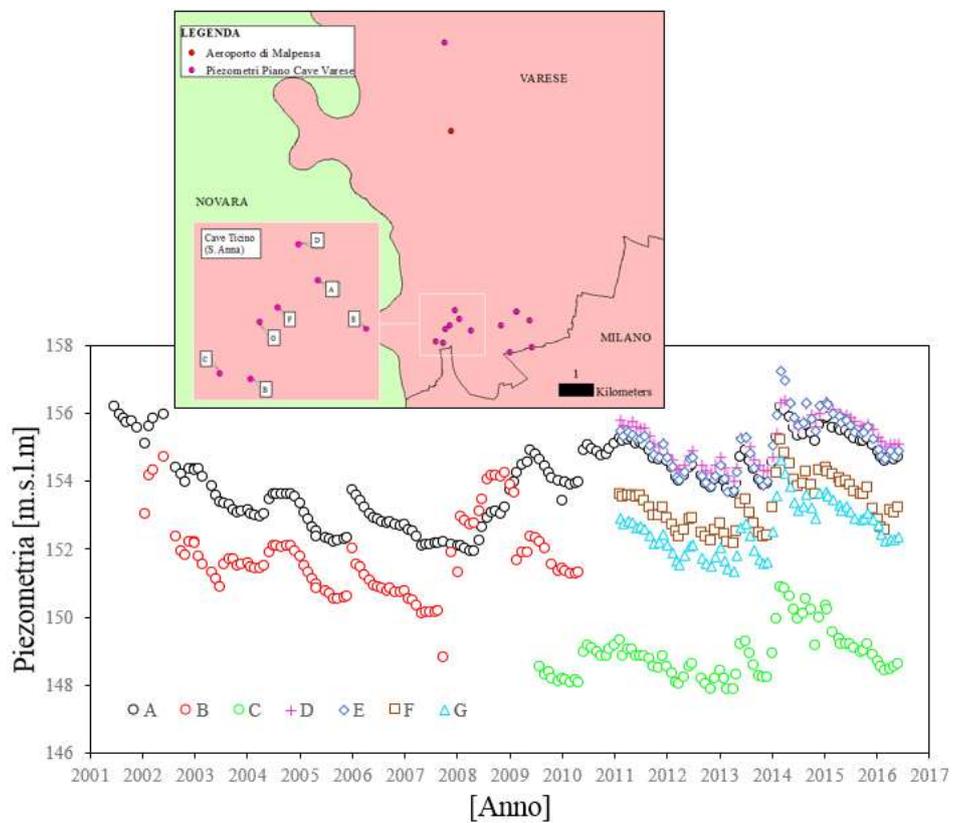


Figura B7 Andamento freaticometrico falda superficiale nell'intorno della zona aeroportuale, Cave Ticino (S. Anna).

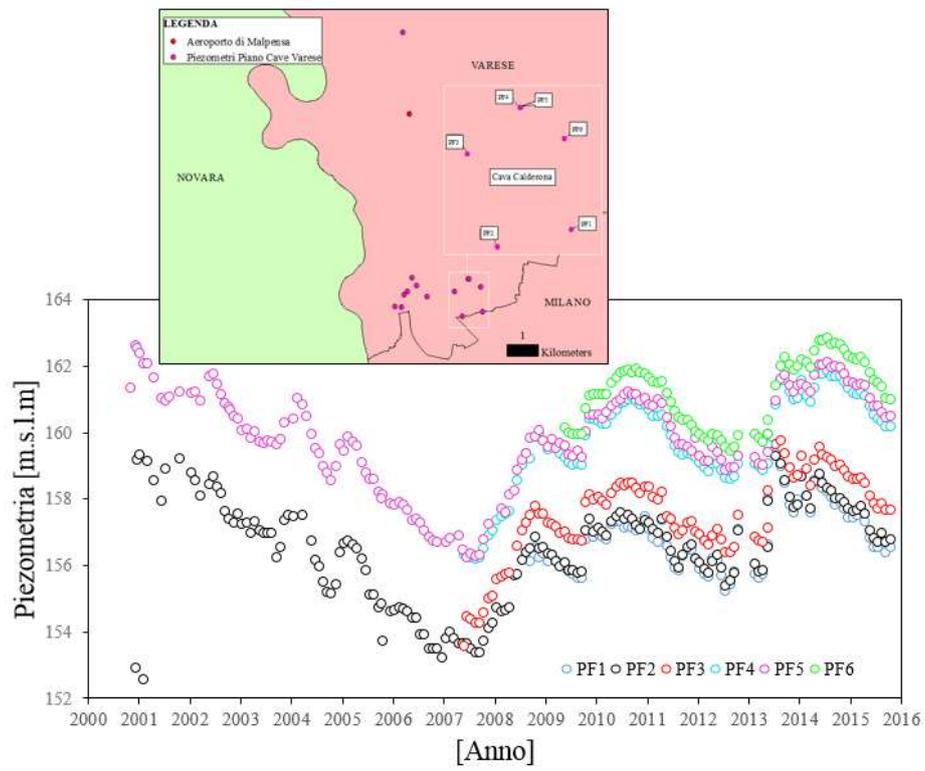


Figura B8 Andamento freaticometrico falda superficiale nell'intorno della zona aeroportuale, Cava Calderona.

APPENDICE C: Correlazione tra piezometrie, pluviometria e portate emunte

In questa Appendice viene analizzata l'eventuale correlazione tra gli andamenti freaticometrici, i termini di ricarica e di prelievo nel periodo 2005-2015 ricadenti nell'area di indagine come illustrato al paragrafo 5.2. Nell'analisi non sono inclusi i piezometri PO012123NUP001 e PO012068NUP001 in cui le registrazioni temporali dei livelli piezometrici sono disponibili solo a partire dall'anno 2015.

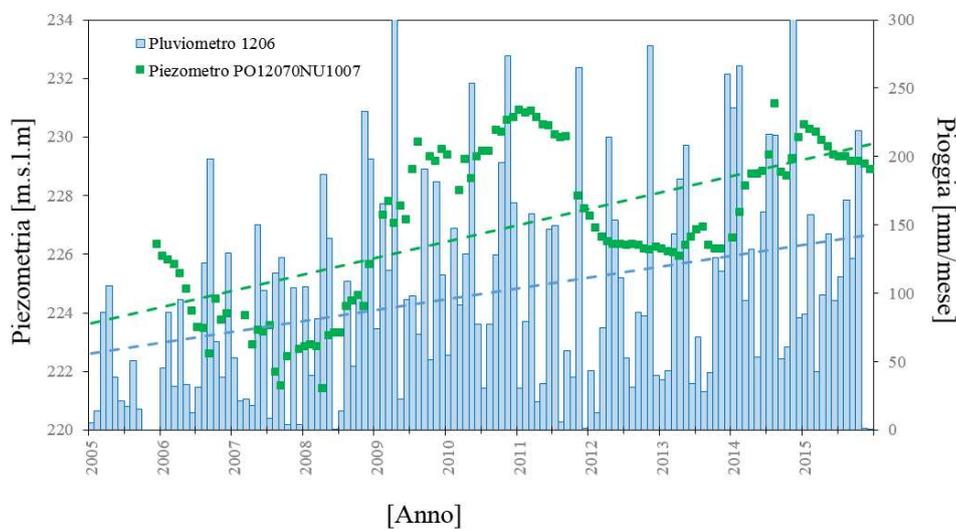


Figura C1 Andamento freaticometrico piezometro PO012070NU1007 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 1206).

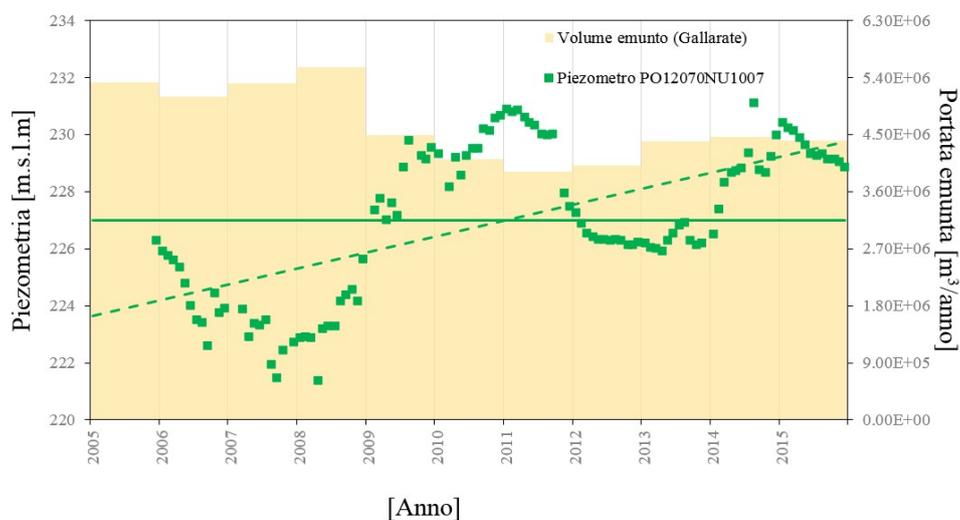


Figura C2 Andamento freaticometrico piezometro PO012070NU1007 e portata totale emunta nel comune di Gallarate [m³/anno].

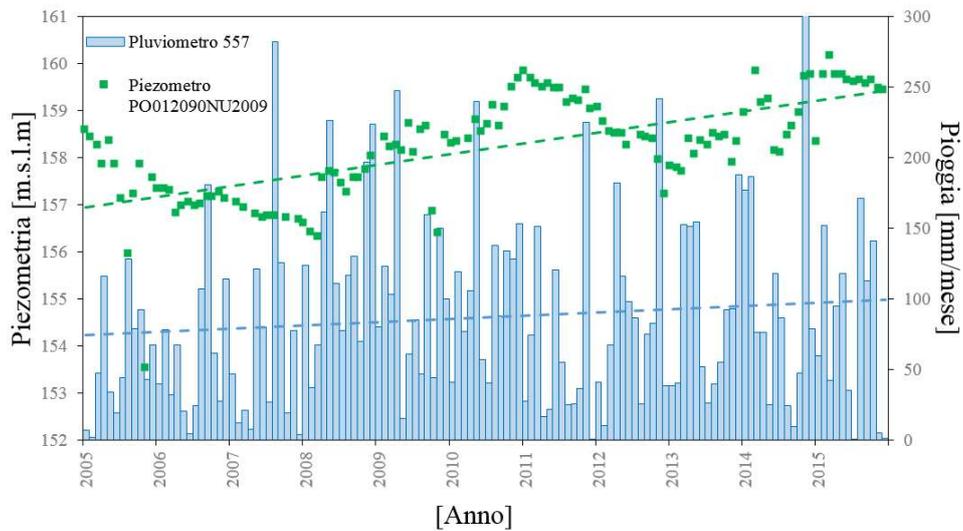


Figura C3 Andamento freaticometrico piezometro PO12090NU2009 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 557).

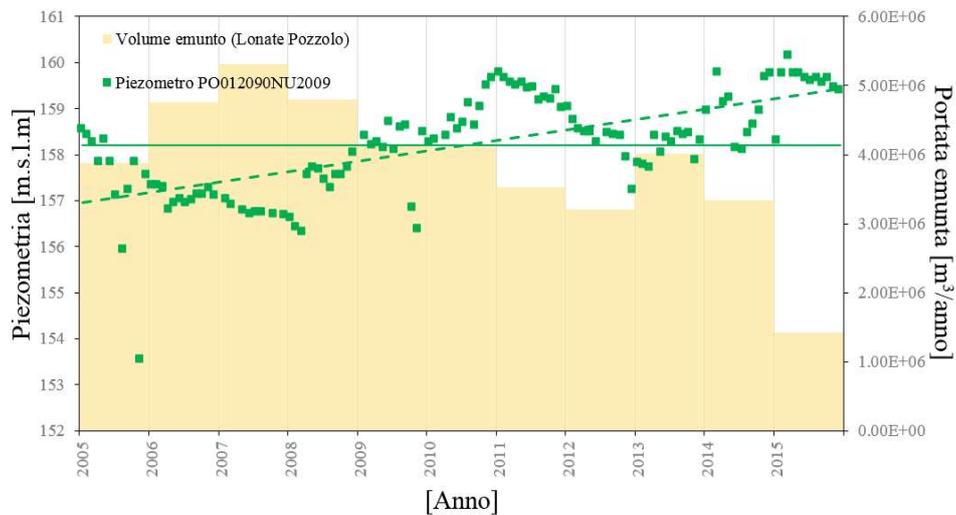


Figura C4 Andamento freaticometrico piezometro PO12090NU2009 e portata totale emunta nel comune di Lonate Pozzolo [m³/anno].

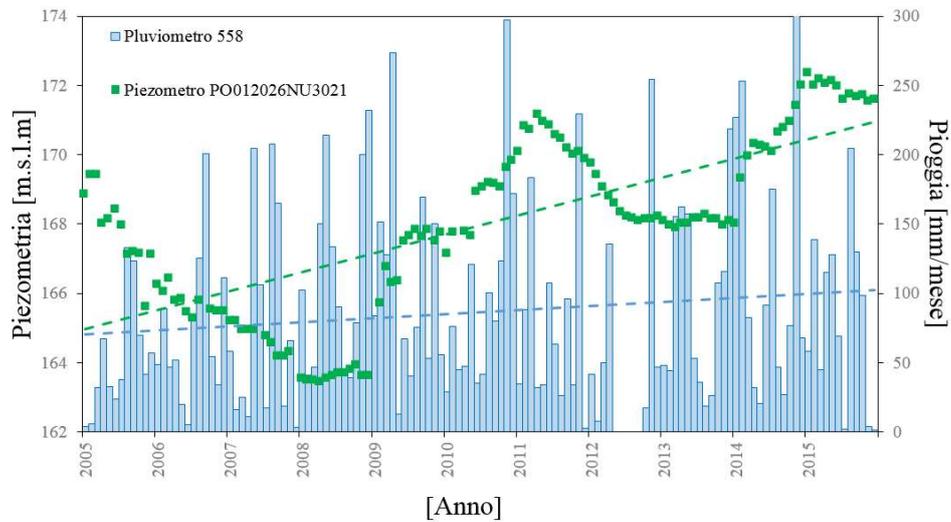


Figura C5 Andamento freaticometrico piezometro PO012026NU3021 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 558).

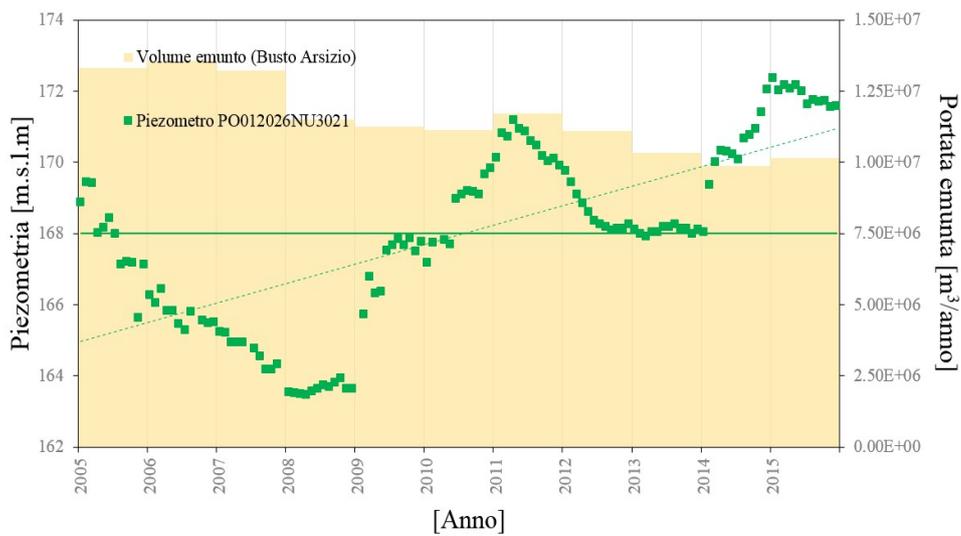


Figura C6 Andamento freaticometrico piezometro PO012026NU3021 e portata totale emunta nel comune di Busto Arsizio [m³/anno].

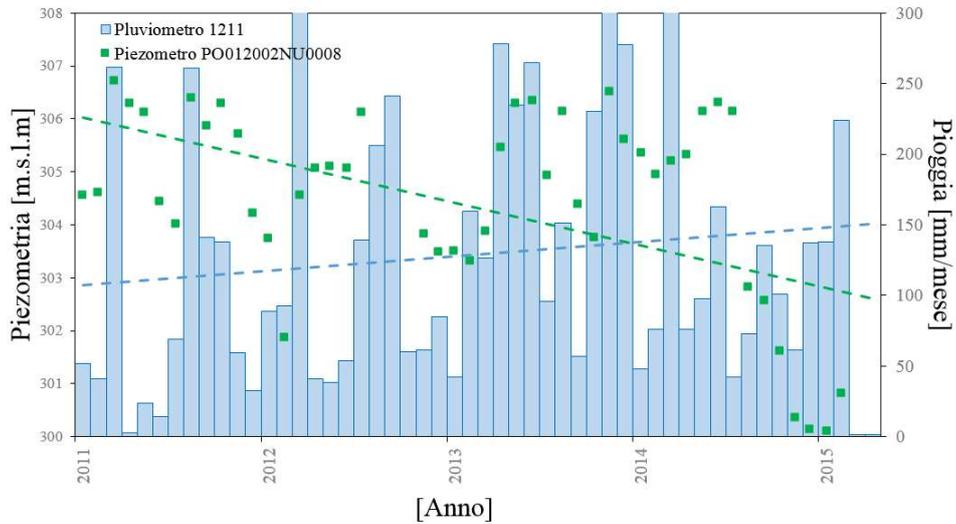


Figura C7 Andamento freaticometrico piezometro PO012002NU0008 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 1211).

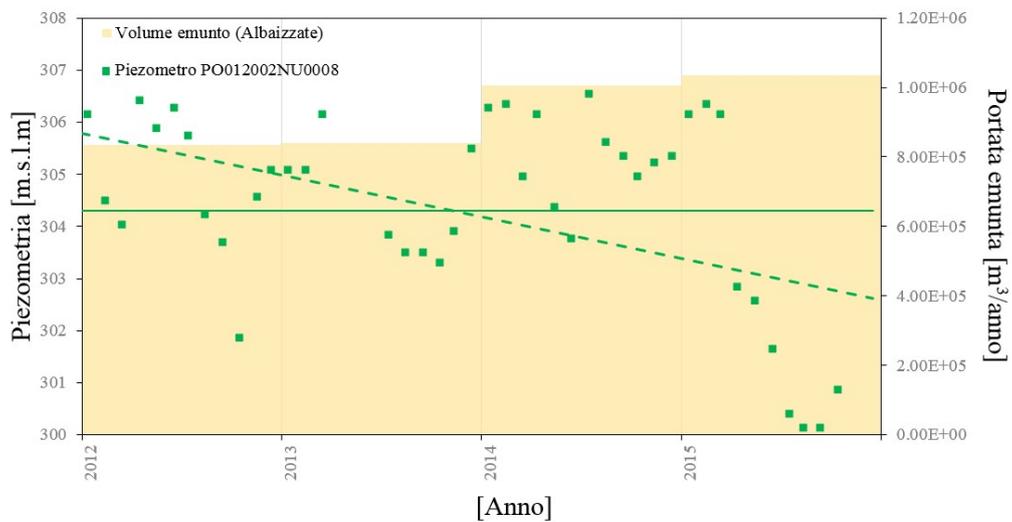


Figura C8 Andamento freaticometrico piezometro PO012002NU0008 e portata totale emunta nel comune di Albaizzate [m³/anno].

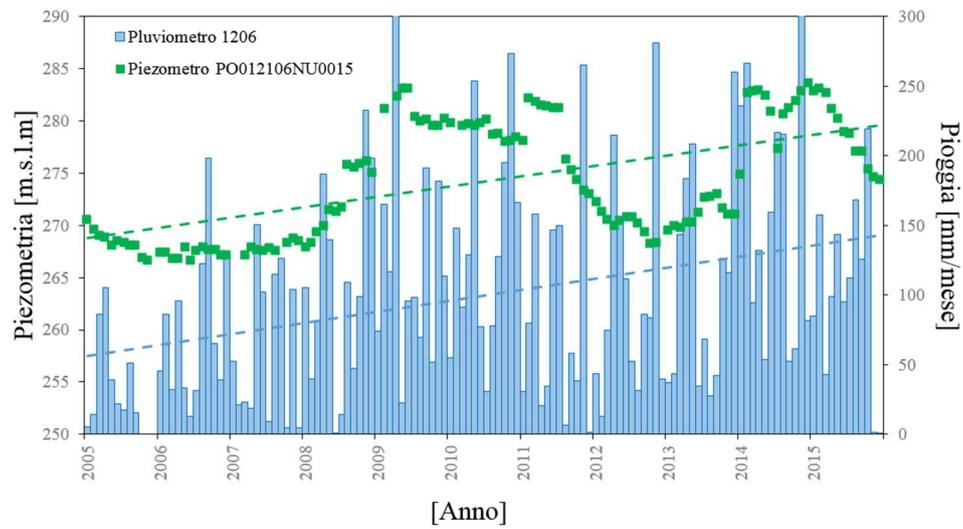


Figura C9 Andamento freaticometrico piezometro PO012106NU005 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 1206).

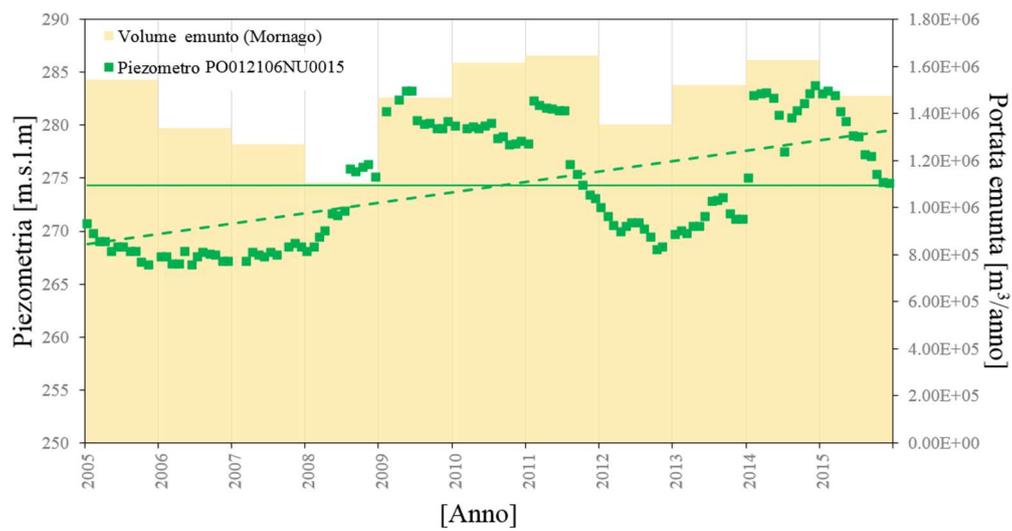


Figura C10 Andamento freaticometrico piezometro PO012106NU005 e portata totale emunta nel comune di Mornago [m³/anno].

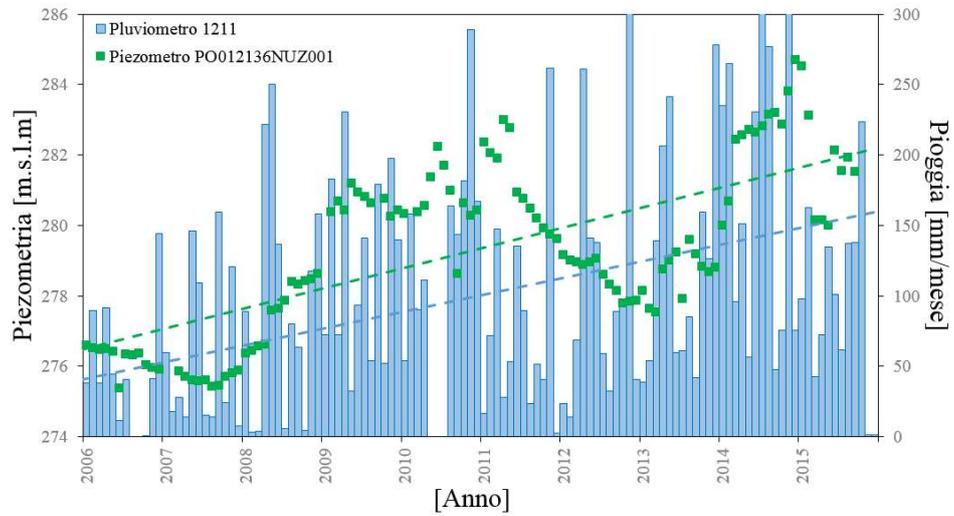


Figura C11 Andamento freaticometrico piezometro PO012136NUZ0011 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 1211).

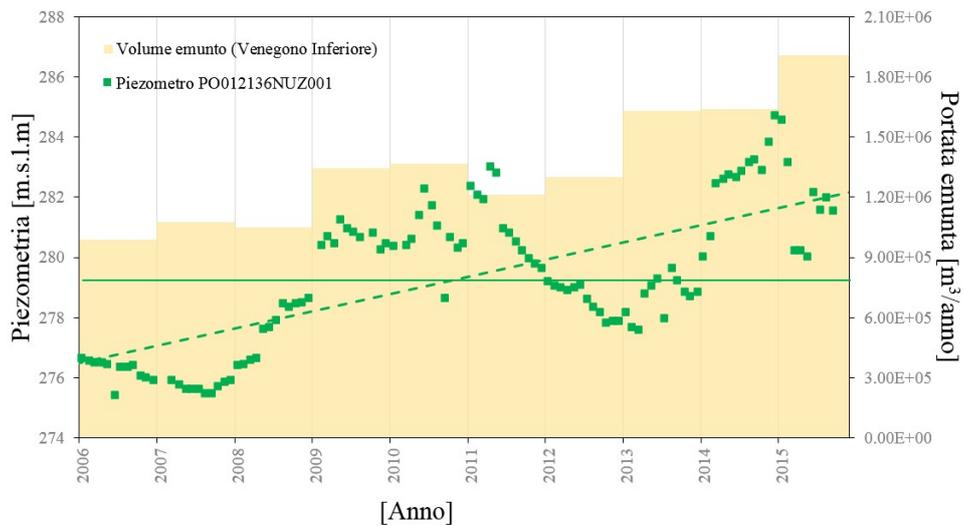


Figura C12 Andamento freaticometrico piezometro PO012136NUZ0011 e portata totale emunta nel comune di Venegono Inferiore [m³/anno].

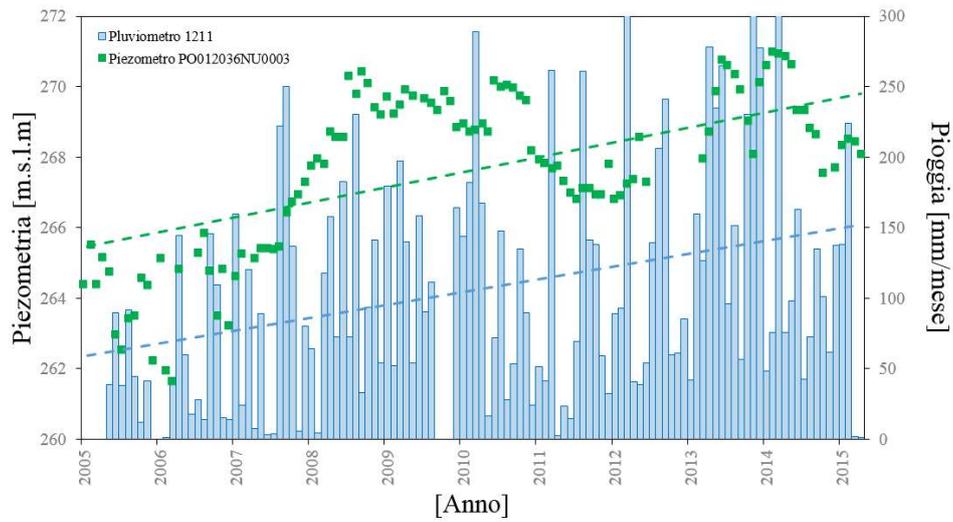


Figura C13 Andamento freaticometrico piezometro PO012036NU0003 e precipitazione cumulata mensile (pluviometro 1211).

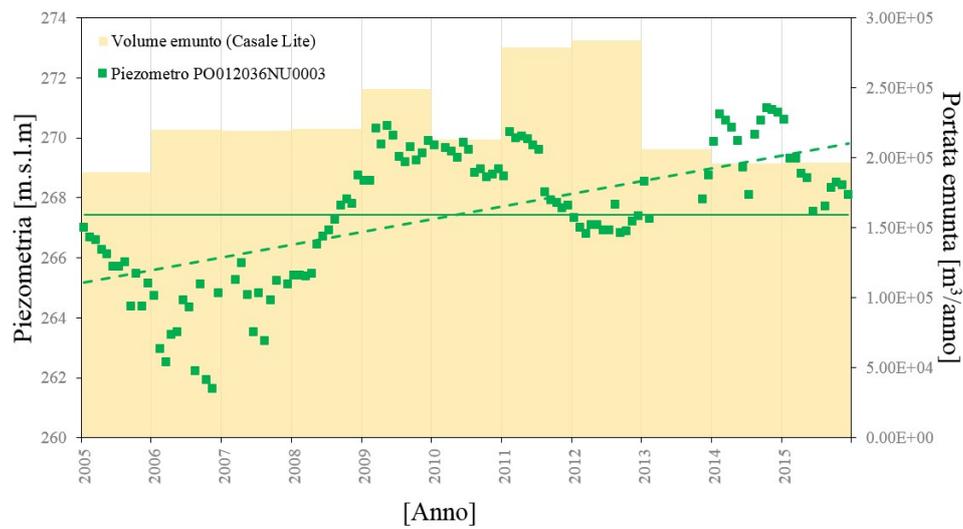


Figura C14 Andamento freaticometrico piezometro PO012036NU0003 e portata totale emunta nel comune di Casale Lite [m³/anno].