

Aeroporto di Milano Linate
Masterplan 2015-2030



Studio di Impatto Ambientale
Quadro di Riferimento Ambientale
ALLEGATOQAMB.A02
Studio specialistico a supporto delle
Componente Suolo e sottosuolo
Componente Ambiente idrico



Università di Pavia
Dipartimento di Scienze
della Terra e dell'Ambiente

Indice

1. Premessa	pag. 5
2. Metodologia di indagine	pag. 6
2.1 <i>Fase A: Raccolta dei dati</i>	pag. 6
2.2 <i>Fase B: Inquadramenti dell'area</i>	pag. 13
2.3 <i>Fase C: Elaborazione e analisi dei dati</i>	pag. 13
2.4 <i>Fase D: Analisi delle interazioni tra l'area aeroportuale e il sistema geologico, geomorfologico e idrogeologico</i>	pag. 15
3. Inquadramento geografico	pag. 16
4. Inquadramento climatico	pag. 17
5. Inquadramento geologico	pag. 21
6. Inquadramento geomorfologico e dell'idrografia superficiale	pag. 25
7. Inquadramento pedologico	pag. 29
8. Inquadramento idrogeologico	pag. 36
9. Inquadramento sismico	pag. 38
10. Modello geo-litologico 3D del sottosuolo	pag. 42
10.1 <i>Metodologia di ricostruzione</i>	pag. 42
10.2 <i>Andamento delle principali litologie individuate</i>	pag. 45
10.3 <i>Sezioni litologiche rappresentative</i>	pag. 52
11. Caratteristiche geotecniche e di permeabilità dei terreni	pag. 57
11.1 <i>Caratteristiche geotecniche dei depositi superficiali</i>	pag. 57
11.2 <i>Permeabilità del primo acquifero</i>	pag. 61
12. Aree caratterizzate da pericolosità idraulica e interventi previsti per ridurla	pag. 67
13. Ricostruzione dell'andamento piezometrico della prima falda	pag. 71
13.1 <i>Analisi di dati storici</i>	pag. 71

13.2	<i>Soggiacenza e livelli piezometrici dell'anno 2016</i>	pag. 80
14.	Considerazioni sulle possibili oscillazioni temporali della prima falda	pag. 90
14.1	<i>Ricostruzione probabilistica delle oscillazioni piezometriche</i>	pag. 90
14.2	<i>Scenario di massimo innalzamento della prima falda con tempo di ritorno di 25 anni</i>	pag. 96
15.	Effetto dei prelievi idrici sui livelli piezometrici della prima falda nell'area del sedime aeroportuale	pag. 98
15.1	<i>Andamento dei prelievi idrici dai pozzi del sedime</i>	pag. 98
15.2	<i>Valutazione dell'effetto dei prelievi idrici sulla piezometria della prima falda</i>	pag. 101
16.	Valutazione della vulnerabilità del primo acquifero	pag. 106
16.1	<i>Metodologia di ricostruzione della vulnerabilità</i>	pag. 106
16.2	<i>Andamento della vulnerabilità</i>	pag. 110
17.	Caratteristiche qualitative delle acque superficiali e sotterranee	pag. 114
17.1	<i>Acque superficiali</i>	pag. 114
17.2	<i>Acque sotterranee</i>	pag. 114
18.	Analisi dei movimenti del terreno mediante dati interferometrici	pag. 128
19.	Analisi delle interazioni tra l'area aeroportuale e il sistema geologico, geomorfologico e idrogeologico	pag. 133
	Bibliografia	pag. 137

1. Premessa

Il Gruppo SEA (Società per azioni Esercizi Aeroportuali S.E.A. S.p.A.) ha dato mandato al Dipartimento di Scienza della Terra e dell'Ambiente dell'Università degli Studi di Pavia di redigere uno studio geologico e idrogeologico dell'area aeroportuale e di un suo adeguato contorno, a supporto del Masterplan 2015-2030 dell'aeroporto di Milano Linate. Questo studio, oltre a fornire un inquadramento delle principali caratteristiche fisiche dell'area indagata, ha lo scopo di valutare le eventuali influenze che l'aeroporto e le attività ad esso connesso possono esercitare sull'ambiente geologico ed idrogeologico e, viceversa, le influenze di questo ambiente sull'area aeroportuale stessa.

La presente relazione illustra i risultati di questo studio, riguardanti in particolare:

- 1) gli inquadramenti geografico, climatico, geologico, geomorfologico e dell'idrografia superficiale, pedologico, idrogeologico e sismico generali dell'area indagata;
- 2) l'analisi e la valutazione dei fattori che possono potenzialmente favorire reciproche influenze e interazioni tra l'area aeroportuale e l'ambiente geologico ed idrogeologico dell'area circostante;
- 3) il piano di monitoraggio proposto.

2. Metodologia di indagine

La metodologia di indagine si articola nelle seguenti fasi:

- a) raccolta dei dati necessari alla sua realizzazione;
- b) inquadramenti dell'area di studio (geografico, climatico, geologico, geomorfologico, pedologico, idrogeologico e sismico);
- c) elaborazione ed analisi dei dati raccolti;
- d) analisi e valutazione delle interazioni tra l'area aeroportuale e il sistema geologico, geomorfologico e idrogeologico circostante, con opere di monitoraggio proposte.

2.1 Fase A: Raccolta dei dati

Per il presente studio, sono stati reperiti i dati necessari per poter realizzare, in maniera esaustiva, le elaborazioni finalizzate al raggiungimento degli obiettivi.

La fase di raccolta dei dati si è articolata in due stadi differenti:

- a) **Raccolta dei dati da letteratura e presso enti pubblici:**
 - i. Dati climatici
 - ii. Dati geologici e geomorfologici
 - iii. Dati pedologici
 - iv. Dati relativi alle acque superficiali e sotterranee (piezometria, soggiacenza, chimismo delle acque, livelli idrometrici)
 - v. Dati geotecnici
 - vi. Dati interferometrici da satellite
 - vii. Dati sismici

Per il reperimento di questi dati, sono state consultate diverse fonti bibliografiche e sono stati contattati enti amministrativi di diverso livello. Gli enti che hanno fornito dati sono stati:

- SEA (studi precedenti condotti nell'area aeroportuale di Linate; Tab. 1)
- MM (Direzione Acquedotto)
- Enti Pubblici (Tab. 2)
 - Comune di San Giuliano Milanese
 - Comune di San Donato Milanese
 - Comune di Mediglia
 - Area Tutela e Valorizzazione Ambientale - Settori Risorse idriche e Cave della Città Metropolitana di Milano
 - Settore Idroscalo della Città Metropolitana di Milano
 - Regione Lombardia (DG Territorio, Urbanistica, Difesa del Suolo e Città Metropolitana; Geoportale regionale)
 - Arpa Lombardia (Database SIRE Acque; Database idro-meteorologico; Settore Monitoraggi Ambientali Centro Regionale Qualità delle Acque)
 - Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (Geoportale nazionale)

- Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (DISS versione 3; Catalogo CPTI15, Catalogo DMI15).

Inoltre, sono stati contattati i seguenti enti, che tuttavia non hanno fornito dati utili al lavoro:

- CAP Holding spa
- Comune di Peschiera Borromeo
- Comune di Milano
- Comune di Segrate
- Consorzio di Bonifica Est Ticino Villoresi
- Parco Agricolo Sud Milano

b) **Esecuzione di rilievi ed indagini sul terreno:**

- i. Rilievi piezometrici della prima falda (misura della soggiacenza), raccolti in alcuni pozzi e piezometri ubicati nel sedime aeroportuale di Milano Linate e nelle sue aree circostanti, in occasione di due campagne di misura: la prima, tra il 21 ed il 29 Giugno 2016; la seconda, il 20 Settembre 2016
- ii. dati del livello idrometrico del fiume Lambro, raccolti in data 12 Luglio 2016 e 20 Settembre 2016
- iii. esecuzione di *slug test* su alcuni piezometri dell'area del sedime aeroportuale, eseguiti in data 12 Ottobre 2016.

Tipo di dato
Presentazione SIA del 9 Giugno 2016
Relazione tecnica degli interventi di sistemazione del fiume Lambro
Planimetria opere di realizzazione - Relazione tecnica degli interventi di sistemazione del fiume Lambro - Luglio 2015
Planimetria generale dell'aeroporto di Linate - Gennaio 2016
Planimetria generale dell'aeroporto di Linate georeferenziata - Dicembre 2015
Relazione descrittiva della realizzazione del pozzo antincendio 3bis
Relazione descrittiva delle analisi idrauliche svolte dal Politecnico di Milano per i possibili allagamenti del Lambro nell'aeroporto di Linate - Dicembre 2007
Allegato con le mappe di scenario delle analisi idrauliche svolte dal Politecnico di Milano per i possibili allagamenti del Lambro nell'aeroporto di Linate - Dicembre 2007
Mappe di scenario delle analisi idrauliche svolte dal Politecnico di Milano per i possibili allagamenti del Lambro nell'aeroporto di Linate - Dicembre 2007
Relazione piezometria dinamica dei pozzi di Linate 2008
Coordinate dei pozzi di Linate e relativi prelievi annui tra 1984 e 2007
Relazione di collaudo di alcuni pozzi di Linate
Relazione sullo studio della falda nel sedime aeroportuale di Linate - Politecnico 2006
Sondaggi dei piezometri messi in posa - Relazione sullo studio della falda nel sedime aeroportuale di Linate - Politecnico 2006
Archivio storico delle analisi chimiche sulle acque di pozzo e superficiali di Linate

Concessioni dei pozzi di Linate
Valori raccolta dei rifiuti di Linate
Tavola con la posizione dei pozzi e relative fasce di rispetto di Linate ad aprile 2016-raster
Tavola con la posizione dei pozzi e relative fasce di rispetto di Linate ad aprile 2016-dwg
Misure della piezometria del pozzo G-elettricisti di Linate effettuate tra il 2014 ed il 2016
Tavola posizione dei pozzi e fasce di rispetto dell'area di Milano vicino a Linate
Valori dei prelievi idrici dai pozzi (1981-2015) e scarichi fognari di Linate (2000-2015)
Stratigrafie dei pozzi del sedime di Linate
Studio su un modello statistico di previsione delle piogge intense e di media durata del Politecnico di Milano
Relazione di esecuzione delle prove geognostiche e posa di piezometri a Linate per due nuovi hangar 2007
Stratigrafie e prove geotecniche-Relazione di esecuzione delle prove geognostiche e posa di piezometri a Linate per due nuovi hangar 2007
Relazione per la realizzazione della nuova area di de-icing piazzale nord di Linate gennaio 2012
Relazione delle indagini per nuovo hangar aviazione generale aeroporto Linate marzo 2016
Prove geotecniche-Relazione delle indagini per nuovo hangar aviazione generale aeroporto Linate marzo 2016
Prove penetrometriche-Relazione delle indagini per nuovo hangar aviazione generale aeroporto Linate marzo 2016
Sondaggi-Relazione delle indagini per nuovo hangar aviazione generale aeroporto Linate marzo 2016
Relazione geologico-tecnica - Richiesta al servizio provinciale del Genio Civile di Milano di concessione in sanatoria di derivazione acque pubbliche sotterranee
Studio di compatibilità idraulica Cogenerazione e Teleriscaldamento Linate-Milano Est
Installazione ed analisi chimiche del Pozzo C-CRAL
Tavole delle opere previste nel Masterplan 2015-2030
Relazione generale del Masterplan e relative Schede degli interventi previsti - Aggiornamento a Novembre 2016
Relazione relativa alla bonifica effettuata in corrispondenza del vecchio deposito di carburanti
Posizione delle costruzioni interrato nell'area del sedime di Milano Linate

Tabella 1. Elenco dei dati messi a disposizione da SEA per l'area aeroportuale di Milano Linate.

Ente	Dati raccolti
Comune di San Giuliano Milanese	<ul style="list-style-type: none"> - Documenti originali della componente geologica del Piano di Governo del Territorio - Database topografico comunale
Comune di San Donato Milanese	<ul style="list-style-type: none"> - Documenti originali della componente geologica del Piano di Governo del Territorio

	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Database</i> topografico comunale
Comune di Mediglia	<ul style="list-style-type: none"> - Documenti originali della componente geologica del Piano di Governo del Territorio - <i>Database</i> topografico comunale
<p>Area Tutela e Valorizzazione Ambientale - Settori Risorse idriche e Cave della Città Metropolitana di Milano</p> <p>(http://ambiente.provincia.milano.it/sia/ot/acqsot/contenutisot.asp?rif1=H2Oosot&rif2=H2Oosot&idrf=0)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Catasto bonifiche e siti contaminati - Catasto pozzi/piezometri - Dati di piezometria e soggiacenza di singoli pozzi inseriti nel catasto della Città Metropolitana - Isopieze della I falda: elaborazione Marzo 2013 - Isopieze della I falda: elaborazione Settembre 2013 - Isopieze della I falda: elaborazione Marzo 2012 - Isopieze della I falda: elaborazione Settembre 2012 - Isopieze della I falda: elaborazione Marzo 2011 - Isopieze della I falda: elaborazione Settembre 2011 - Isopieze della I falda: elaborazione Marzo 2010 - Isopieze della I falda: elaborazione Settembre 2010 - Isopieze della I falda: elaborazione Marzo 2009

	<ul style="list-style-type: none"> - Isopieze della I falda: elaborazione Settembre 2009 - Isopieze della I falda: elaborazione Marzo 2007 - Isopieze della I falda: elaborazione Settembre 2007 - Reticolo idrico superficiale - Analisi biochimiche sui corsi acqua (1987-2000)
Settore Idroscalo della Città Metropolitana di Milano	<ul style="list-style-type: none"> - Dati giornalieri del livello idrometrico dell'Idroscalo per il periodo 2010-2016
<p>Regione Lombardia (Geoportale)</p> <p>(http://www.geoportale.regione.lombardia.it/download-dati)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Aree a vincolo idrogeologico aggiornate al 2013 - Banca dati geologica del sottosuolo (<i>database</i> CASPITA) - Base informativa della cartografia Geoambientale - Carta geomorfologica - Base informativa della cartografia Geoambientale - Carta litologica - Basi Ambientali della Pianura - Attività di Sfruttamento del Suolo - Basi Ambientali della Pianura – Geomorfologia - Basi Ambientali della Pianura – Idrologia - Basi Ambientali della Pianura – Litologia - Basi informative dei suoli - Carta Tecnica Regionale 1:10000 aggiornata dai <i>Database</i> Topografici

	<ul style="list-style-type: none"> - Catasto cave - Classificazione sismica dei Comuni - DTM5x5 Modello Digitale del Terreno 2015 - DUSAF 4.0 Uso del suolo 2012 - Fontanili della Lombardia - Geologia acquiferi - Gruppi A - Geologia acquiferi - Gruppi B - Geologia acquiferi - Gruppi C - Geologia acquiferi - Gruppi D - Limiti amministrativi 2016 con aggiornamenti DbT/PGT - PGT - Tavola delle Previsioni di Piano - Siti bonificati e siti contaminati - Tavole piani territoriali coordinamento provinciali (PTCP) Città Metropolitana di Milano - Studi geologici comunali
<p>Regione Lombardia (DG Territorio, Urbanistica, Difesa del Suolo e Città Metropolitana)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Carta geologica alla scala 1:50000 Foglio 118 Milano - DEM derivato da dati LIDAR 1 m di risoluzione
<p>ARPA Lombardia (<i>Database</i> idro-meteorologico) http://www2.arpalombardia.it/siti/arpalombardia/meteo/richiesta-dati-misurati/Pagine/RichiestaDatiMisurati.aspx</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dati meteorologici (pioggia e temperatura dell'aria) per il periodo Gennaio 2004- Novembre 2016 della

	<p>stazione di Milano Lambrate</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dati del livello idrometrico del fiume Lambro della stazione di Milano Via Feltre per il periodo Gennaio 1999-Novembre 2016
<p>ARPA Lombardia (SIRE Acque) (http://sireacque.arpalombardia.it/)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Database</i> delle analisi chimiche svolte sulle acque sotterranee nel periodo 2009-2014 - <i>Database</i> delle analisi chimiche svolte sulle acque superficiali nel periodo 2009-2015
<p>ARPA Lombardia (Settore Monitoraggi Ambientali Centro Regionale Qualità delle Acque)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Database</i> delle misure piezometriche effettuate su alcuni pozzi nell'area circostante il sedime di Milano Linate, nel periodo 2002-2016 - <i>Database</i> delle analisi chimiche svolte sulle acque sotterranee in alcuni pozzi nell'area circostante il sedime di Milano Linate, nel periodo 2009-2014 - <i>Database</i> delle analisi chimiche svolte sulle acque superficiali nel periodo 2009-2015
<p>Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (Geoportale nazionale) (http://www.pcn.minambiente.it/viewer/)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Prodotti interferometrici ERS ascendenti - Prodotti interferometrici ERS discendenti - Prodotti interferometrici ENVISAT ascendenti - Prodotti interferometrici ENVISAT discendenti - Prodotti interferometrici COSMO-SKYMED

	<p>ascendenti</p> <ul style="list-style-type: none"> - Prodotti interferometrici COSMO-SKYMED discendenti
MM (Direzione Acquedotto)	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Database</i> delle misure piezometriche effettuate nella città di Milano, nel periodo 2015-2016
<p>Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia http://diss.rm.ingv.it/dissmap/dissmap.phtml http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/download_CPTI15.htm http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query_eq/</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Zonazione sismogenetica che individua aree omogenee caratterizzate dalle potenziali sorgenti sismiche in grado di generare terremoti superiori a 5.5 Mw (DISS version 3) - Catalogo CPTI15 dei terremoti storici significativi (1000-2014) - Catalogo DBMI15 delle intensità macrosismiche per terremoti storici del periodo 1000-2014

Tabella 2. Elenco dei dati reperiti presso enti amministrativi di diverso livello e società private.

2.2 Fase B: Inquadramenti dell'area

A partire dai dati raccolti, sono stati realizzati diversi inquadramenti generali dell'area aeroportuale e del suo contorno significativo. In particolare, si tratta di:

- inquadramento geografico (capitolo 3);
- inquadramento climatico (capitolo 4);
- inquadramento geologico (capitolo 5);
- inquadramento geomorfologico e dell'idrografia superficiale (capitolo 6);
- inquadramento pedologico (capitolo 7);
- inquadramento idrogeologico (capitolo 8);
- inquadramento sismico (capitolo 9).

2.3 Fase C: Elaborazione e analisi dei dati

La fase C della metodologia di analisi comprende tutte le metodologie e gli strumenti che verranno utilizzati per raggiungere gli obiettivi prefissati.

In Tab. 3 si schematizzano, per ciascun obiettivo, i metodi utilizzati.

Obiettivo	Strumenti e metodi
-----------	--------------------

Modello geo-litologico 3D del sottosuolo (capitolo 10)	<ul style="list-style-type: none"> - Ricostruzione 3D di un modello geologico del sottosuolo dell'area studiata, mediante l'utilizzo del software GMS a partire dai dati stratigrafici raccolti - Definizione dei principali litotipi presenti
Caratteristiche geotecniche e di permeabilità dei terreni (capitolo 11)	<ul style="list-style-type: none"> - Caratterizzazione geotecnica dei depositi più superficiali, potenzialmente interessati da future infrastrutture, mediante analisi di prove geotecniche di laboratorio e <i>in situ</i> - Valutazione della permeabilità dei materiali costituenti il primo acquifero mediante prove slug test su alcuni piezometri nel sedime aeroportuale
Aree caratterizzate da pericolosità idraulica e interventi previsti per ridurla (capitolo 12)	<ul style="list-style-type: none"> - Verrà fatto riferimento agli studi, commissionati da SEA al Politecnico di Milano nel 2007 e da ATA allo Studio Franzetti nel 2009, riguardo le possibili esondazioni del Lambro che possono interessare l'area aeroportuale di Linate - Verrà inoltre fatto riferimento alle opere (già in progetto e in fase di realizzazione) di sistemazione del fiume Lambro, volte a contenere il problema degli allagamenti nell'area del sedime aeroportuale
Ricostruzione dell'andamento piezometrico della prima falda (capitolo 13)	<ul style="list-style-type: none"> - Analisi di dati storici di soggiacenza e piezometria della prima falda raccolti a livello locale e provinciale - Ricostruzione della carta di soggiacenza e del livello piezometrico della falda per l'area del sedime aeroportuale e per l'area circostante relativa all'anno 2016 (periodo Marzo-Settembre 2016) a partire da dati raccolti in piezometri dell'area di indagine, con comparazione di questa con dati storici
Considerazioni sulle possibili oscillazioni temporali della prima falda (capitolo 14)	<ul style="list-style-type: none"> - Analisi di serie storiche dei livelli piezometrici di diversi pozzi o piezometri dell'area di indagine per una valutazione delle massime oscillazioni della falda registrate nel periodo 1990-2015 - Ricostruzione dello scenario di massimo innalzamento della prima falda con tempo di ritorno di 25 anni, nell'area aeroportuale
Effetto dei prelievi idrici sui livelli piezometrici della prima falda nell'area del sedime aeroportuale (capitolo 15)	<ul style="list-style-type: none"> - Analisi dei consumi idrici dei pozzi del sedime aeroportuale, periodo 1985-2015 - Effetto dei prelievi idrici sulla piezometria della prima falda nell'area del sedime aeroportuale e in quella ad esso prospiciente
Valutazione della vulnerabilità del primo acquifero (capitolo 16)	<ul style="list-style-type: none"> - Applicazione della metodologia SINTACS per la valutazione della vulnerabilità intrinseca della prima falda, secondo diversi scenari

Caratteristiche qualitative delle acque superficiali e sotterranee (capitolo 17)	<ul style="list-style-type: none"> - Per la caratterizzazione qualitativa delle acque superficiali, si rimanda ai risultati presentati nella relazione del Gruppo di Ricerca del Prof. A. Meriggi (Università di Pavia) - Caratterizzazione qualitativa delle acque sotterranee, a monte e a valle del sedime aeroportuale
Analisi dei movimenti del terreno mediante dati interferometrici (capitolo 18)	- Utilizzo di dati satellitari interferometrici differenziali (DInSAR) per l'individuazione di aree del sedime aeroportuale soggette a fenomeni di movimento del terreno (e.g. cedimenti differenziali, subsidenze)

Tabella 3. Metodi e strumenti utilizzati durante la fase di elaborazione dei dati.

2.4 Fase D: Analisi delle interazioni tra l'area aeroportuale e il sistema geologico, geomorfologico e idrogeologico

A partire dai risultati raggiunti nelle fasi precedenti, verranno quindi valutati i principali elementi attraverso i quali l'aeroporto e le attività ad esso connesse possono interagire con l'ambiente circostante e viceversa (capitolo 20).

In particolare, verranno valutate le reciproche interazioni considerando sia la situazione attuale che la situazione futura, in funzione delle opere previste nel masterplan.

3. Inquadramento geografico

L'area oggetto dello studio (Fig. 1) ha una estensione di 50.9 km² e ricade all'interno di sei comuni, tutti della Città Metropolitana di Milano: Milano, Peschiera Borromeo, Segrate, San Donato Milanese, San Giuliano Milanese, Mediglia.

Il sedime aeroportuale di Milano Linate è ubicato al centro dell'area di studio. Questo occupa un'area di 4 km² ed è diviso all'interno del territorio di tre comuni: Milano, Peschiera Borromeo, Segrate.

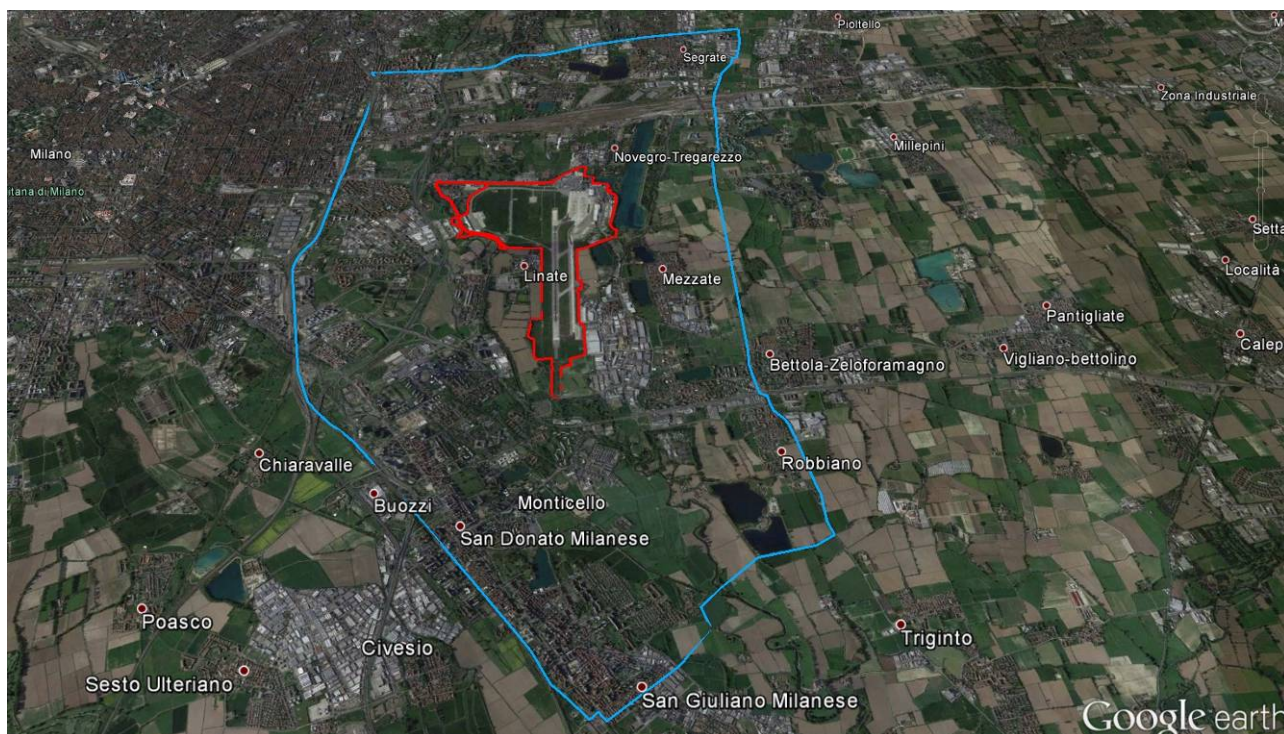


Figura 1. Inquadramento geografico dell'area di studio. Il poligono azzurro rappresenta l'area di indagine, il poligono rosso il sedime di Milano Linate. L'ortofoto di sfondo appartiene all'archivio di Google Earth (<http://www.google.it/intl/it/earth/>).

4. Inquadramento climatico

Il clima del territorio indagato è di tipo temperato sub-continentale, secondo la classificazione climatica di Koppen (1936). Le sue principali caratteristiche sono: i) inverni piuttosto rigidi ed estati calde; ii) precipitazioni relativamente frequenti, con una maggiore concentrazione in primavera ed autunno; iii) ventilazione scarsa durante tutti i mesi dell'anno; iv) umidità relativa alta, spesso accompagnata dalla presenza della nebbia nei mesi più freddi.

Per inquadrare al meglio la distribuzione delle piogge e l'andamento della temperatura durante l'anno, si sono considerati i parametri misurati nella stazione meteorologica di Milano Lambrate, ubicata in prossimità del limite occidentale dell'area di studio a circa 3 km in linea d'aria dal sedime aeroportuale. I dati relativi a questa stazione sono presenti nella banca dati idrometeorologica di ARPA Lombardia. E' stato analizzato il periodo compreso tra il 2004 ed il 2015, per la continuità delle misure acquisite.

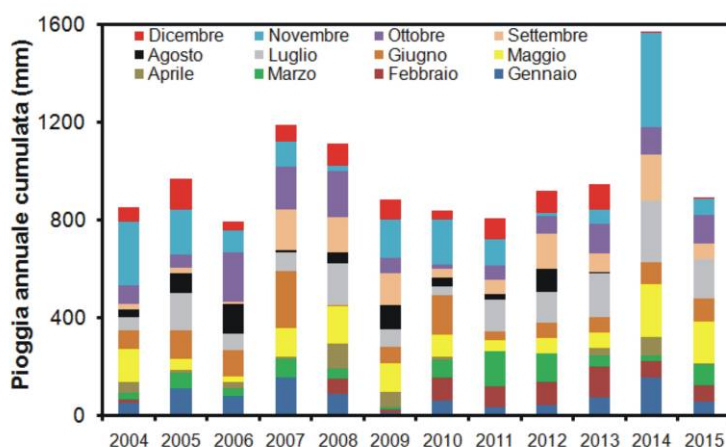


Figura 2. Piogge cumulate mensili per la stazione di Milano Lambrate, per il periodo 2004-2015.

L'andamento della temperatura dell'aria mostra i tipici andamenti stagionali dell'area padana, con una marcata escursione termica stagionale (Figg. 3 e 4). Il mese più caldo dell'anno è Luglio (media di 23.3 °C), mentre quello più freddo è Gennaio (media di 1.6 °C). In generale, nella stagione estiva la temperatura media è 22.6 °C, mentre in quella invernale è di 2.6 °C. Primavera ed autunno hanno valori medi di temperatura abbastanza simili, intorno ai 12 °C.

Per quanto riguarda il regime pluviometrico, le precipitazioni sono relativamente abbondanti, con precipitazioni totali mediamente pari a circa 996.3 mm/anno. Nel periodo monitorato, l'anno più secco è risultato il 2006, con 730 mm di pioggia caduta, mentre il più umido è stato il 2014, con 1639 mm di precipitazione.

Le precipitazioni sono abbastanza distribuite, in termini di cumulata mensile, durante tutto l'anno, anche se con una maggiore abbondanza di cumulata nei mesi primaverili ed autunnali (Figg. 2 e 4). Il valore medio minimo di precipitazione mensile si registra in Marzo (65.1 mm). Il massimo assoluto si ha in Novembre (media di 136.6 mm), mentre il massimo relativo si registra in primavera, nel mese di Maggio (media di 98 mm).

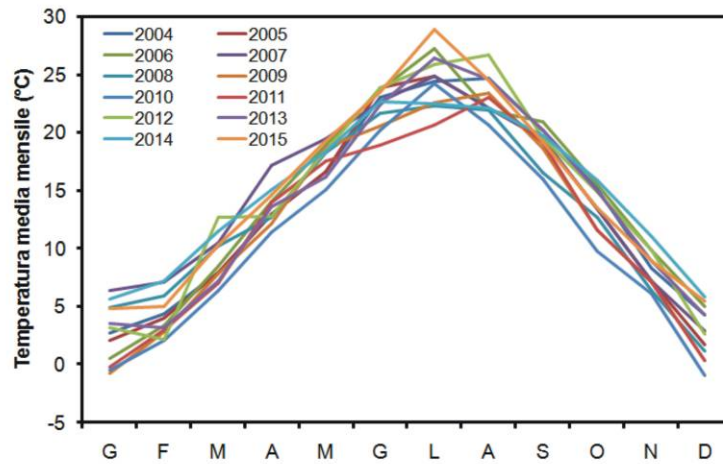


Figura 3. Temperatura dell'aria media mensile per la stazione di Milano Lambrate, per il periodo 2004-2015.

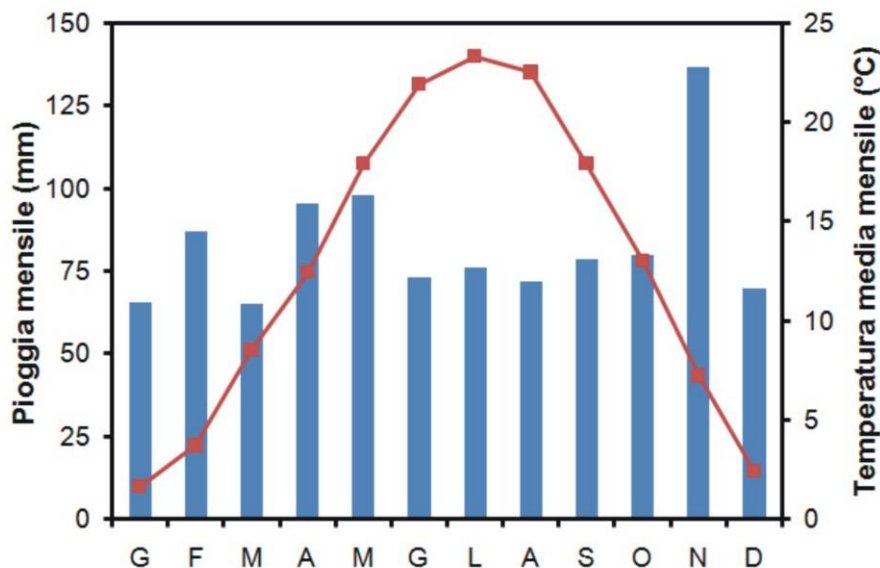


Figura 4. Piogge cumulate e temperatura dell'aria medie mensili per la stazione di Milano Lambrate, durante il periodo 2004-2015.

Per determinare l'intensità delle piogge intense, si è fatto riferimento a quanto indicato dal Piano Stralcio per l'Assetto idrogeologico (PAI) dell'Autorità di Bacino del fiume Po (AdBPo), che allega le analisi sulla distribuzione spaziale delle precipitazioni intense nella "Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica" (AdBPo, 2001). Attraverso l'elaborazione statistica delle misure di precipitazione registrate per varie durate degli eventi dalle stazioni di misura esistenti, è possibile stimare le linee segnalatrici di probabilità pluviometrica che danno il valore dell'altezza di pioggia prevista in un dato punto per una data durata, ad un assegnato tempo di ritorno T_R .

Tali curve sono espresse come (eq. 1):

$$h_{TR}(d) = a_{TR} \left(d^{n_{TR}} \right) \quad \text{eq. 1}$$

, dove h_{TR} è l'altezza di pioggia (in mm) intesa come l'altezza della colonna d'acqua che si formerebbe su una superficie orizzontale e impermeabile in un certo intervallo di tempo d (durata della precipitazione intensa). a e n sono i parametri caratteristici delle linee segnalatrici e dipendono da T_R .

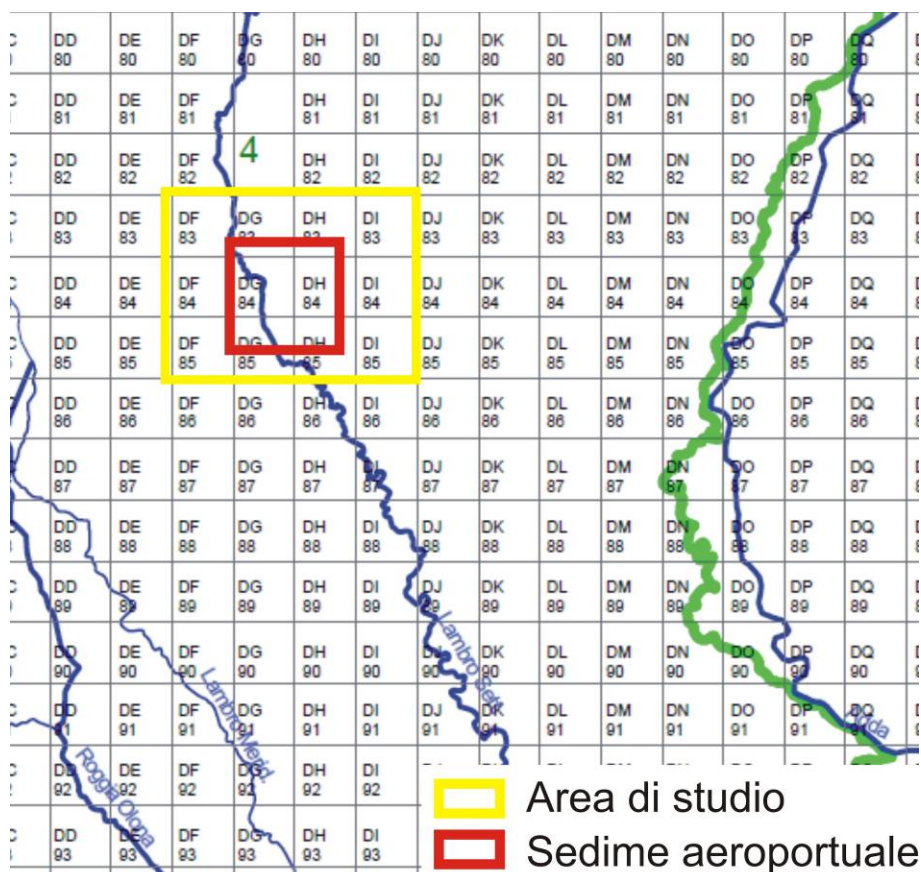


Figura 5. Celle PAI a cui appartiene il territorio studiato.

Per l'analisi di frequenza delle piogge intense nei punti privi di misure dirette, AdbPo ha condotto un'interpretazione spaziale dei parametri a e n delle linee segnalatrici, suddividendo l'intero bacino del Po in celle di 2 km di lato e individuando un valore dei suddetti parametri per ogni cella.

In questo modo è possibile calcolare, per ciascun punto del bacino, le linee segnalatrici di probabilità pluviometrica per tempi di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni. Come visibile in Fig. 5, l'area di studio ricade all'interno delle celle DF83, DF84, DF85, DG83, DG84, DG85, DH83, DH84, DH85, DI83, DI84, DI85.

In Tab. 4, si riportano i valori di a e n relativi a queste celle. Data l'uniformità morfologica dell'area (area pianeggiante senza grosse variazioni altimetriche) e i simili valori di a e n nelle diverse celle in cui ricade l'area (bassi valori di deviazione standard sd ; Tab. 4), si sono considerati, come rappresentativi dell'area, i valori medi di a e n , per diversi T_R , calcolati per le 12 celle considerate.

I valori così indicati possono essere di riferimento per le esigenze connesse a studi e progettazioni idrauliche ed idrologiche che per dimensioni e importanza non possano svolgere direttamente valutazioni più approfondite a scala locale.

In Tab. 5, si riportano le altezze di pioggia di particolari eventi intensi della durata di 24, 48 e 72 h, calcolate proprio con i valori di a e n rappresentativi per l'area studiata.

Cella PAI	$T_R=20$ anni		$T_R=100$ anni		$T_R=200$ anni		$T_R=500$ anni	
	a	n	a	n	a	n	a	n
DF83	53.72	0.236	70.26	0.224	76.95	0.220	86.09	0.216
DF84	53.09	0.236	69.50	0.223	76.14	0.219	85.20	0.215
DF85	52.51	0.234	68.76	0.221	75.32	0.217	84.30	0.213
DG83	53.80	0.235	70.58	0.222	77.33	0.218	86.58	0.214
DG84	53.43	0.235	70.01	0.222	76.67	0.218	85.82	0.214
DG85	52.86	0.234	69.27	0.220	75.87	0.216	84.92	0.212
DH83	54.09	0.234	70.99	0.221	77.76	0.216	87.09	0.212
DH84	53.06	0.233	69.64	0.220	76.26	0.215	85.39	0.211
DH85	52.56	0.231	68.99	0.218	75.56	0.214	84.62	0.210
DI83	53.84	0.231	70.77	0.218	77.50	0.213	86.82	0.210
DI84	53.17	0.230	69.90	0.217	76.55	0.212	85.76	0.208
DI85	52.68	0.230	69.27	0.217	75.87	0.212	85.00	0.208
Media	53.23	0.233	69.83	0.220	76.48	0.216	85.63	0.212
sd	0.54	0.002	0.72	0.002	0.78	0.003	0.89	0.003

Tabella 4. Parametri delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica delle precipitazioni intense per T_R di 20, 100, 200 e 500 anni (da: Allegato 3 della "Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica").

			24 h	48 h	72 h
$T_R=20$ anni	a	53.23	111.6	131.2	144.2
	n	0.233			
$T_R=100$ anni	a	69.83	140.5	163.6	178.9
	n	0.220			
$T_R=200$ anni	a	76.48	151.9	176.5	192.6
	n	0.216			
$T_R=500$ anni	a	85.63	167.7	194.2	211.6
	n	0.212			

Tabella 5. Altezze di pioggia (in mm) di particolari eventi intensi della durata di 24, 48 e 72 h, calcolate proprio con i valori di a e n rappresentativi per l'area studiata.

5. Inquadramento geologico

Il territorio oggetto dello studio si colloca nel settore settentrionale della Pianura Padana ed è geologicamente caratterizzato dalla presenza di depositi alluvionali legati all'attività degli affluenti in sinistra idrografica del fiume Po, compresi tra il ramo comasco e lecchese del Lago di Como (Fig. 6).

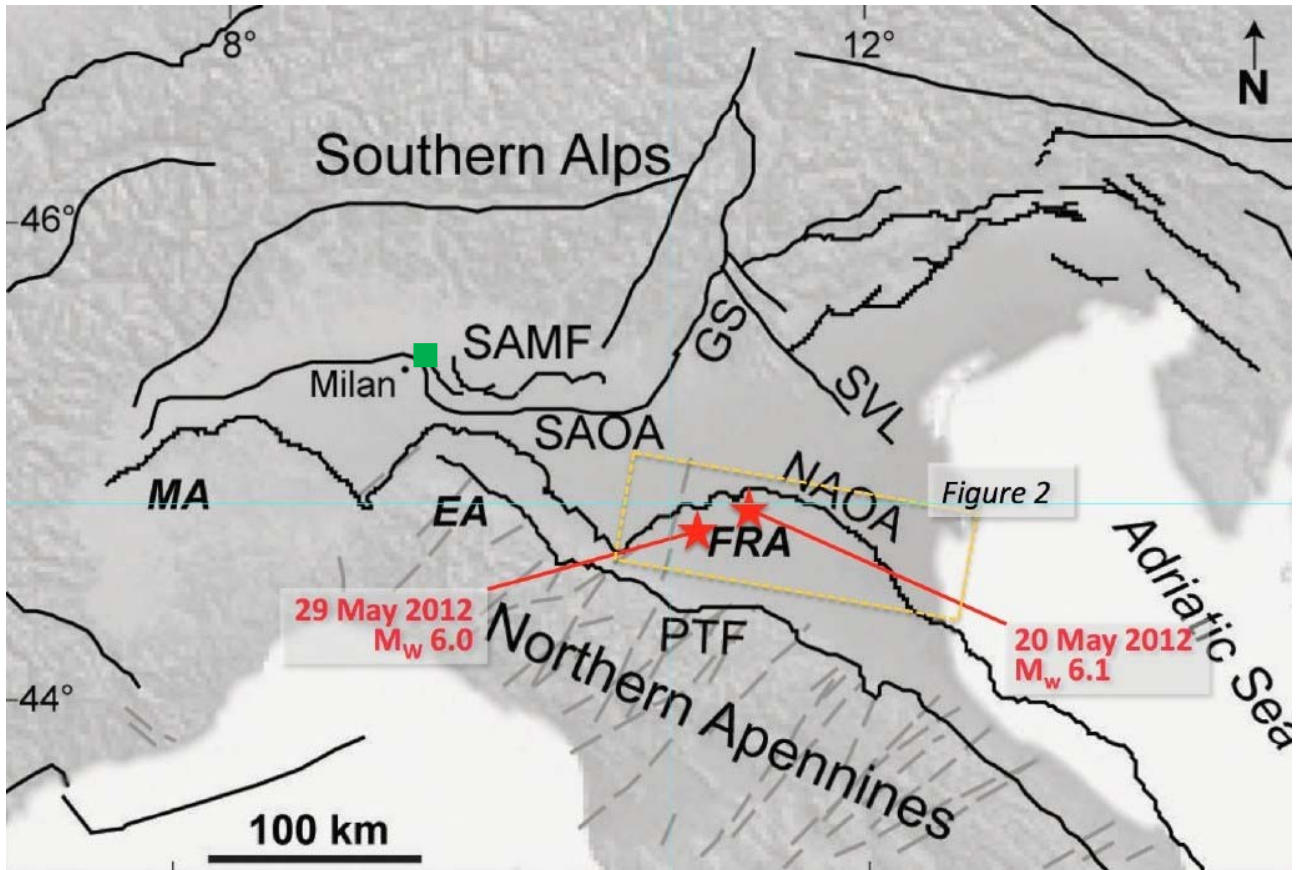


Figura 6. Schema strutturale semplificato dell'Italia Settentrionale. La zona oggetto dell'indagine è indicata dal quadrato verde. Nella figura, sono anche riportati gli epicentri della sequenza sismica avvenuta nel Maggio 2012 in Emilia Romagna (stelle rosse nel riquadro giallo). SAMF: fronte alpino meridionale; SAOA: arco sud-alpino sepolto; GS: sistema delle Giudicarie; SVL: linea Schio-Vicenza; NAOA: arco appenninico settentrionale sepolto; PTF: thrust frontale pedemontano; MA: arco del Monferrato; EA: arco emiliano; FRA: arco ferrarese-romagnolo. Modificata da Mucciarelli et al. (2015).

I depositi alluvionali affioranti in quest'area rappresentano la porzione superiore della successione sedimentaria plio-pleistocenica che caratterizza proprio il bacino padano (Regione Lombardia & ENI, 2002; Muttoni et al., 2003). Alla base di questa, sono presenti depositi torbiditici di mare profondo, ricoperti da un prisma sedimentario progradante sia assialmente, in quanto legato all'azione del paleo Po, che trasversalmente, originato dai depositi di disfacimento dei sistemi alpini ed appenninici (Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 Foglio 118 Milano; Francani et al., in stampa). Questi depositi continentali ricoprono in discordanza il substrato più antico. La loro geometria deposizionale è stata interessata da tettonica compressiva, fino al Miocene superiore, lungo il bordo pedemontano e collinare delle Alpi Meridionali lombarde, prospiciente la pianura

padana. A partire dal Messiniano, le geometrie deposizionali del bacino Padano sono più strettamente legate ai repentini sollevamenti e movimenti in avanti delle falde dell'Appennino Settentrionale e dai lunghi periodi di relativa calma e subsidenza isostatica dei bacini.

Nel contesto dell'area di indagine, i depositi alluvionali hanno spessore notevole, che supera l'ordine delle centinaia di metri. Seppur simili come origine, questi materiali possono essere distinti, da un punto di vista geologico, in diverse tipologie (Fig. 7).

I depositi alluvionali padani assumono caratteristiche diverse a seconda del sistema morfologico in cui affiorano. I sistemi morfologici che caratterizzano l'area indagata sono:

- 1) livello modale della pianura;
- 2) sistema delle valli fluviali.

Essi verranno descritti in maniera più dettagliata nel capitolo successivo. In questo capitolo, si riportano le loro principali caratteristiche per le quali è possibile suddividere geologicamente i depositi alluvionali dell'area di studio. La classificazione geologica si basa sulle formazioni definite nella Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 - Foglio 118 Milano (in stampa).

Il livello modale della pianura caratterizza fortemente l'area studiata. Esso rappresenta una superficie pianeggiante di significativa estensione, apparentemente omogenea e priva di importanti discontinuità morfologiche.

In corrispondenza del settore indagato, i depositi alluvionali che compongono questo sistema morfologico hanno età riferibile al Pleistocene Medio-Pleistocene Superiore, per le unità del Supersistema di Besnate (Unità di Bulgarograsso, Unità di Minoprio, Unità di Guanzate) ed un'età del Pleistocene superiore, per il Sistema di Cantù (Fig. 7; Francani et al., in stampa).

Tra queste diverse formazioni, le differenze litologiche sono minime. Sia le unità del Supersistema di Besnate che quelle del Sistema di Cantù sono costituite da depositi alluvionali a prevalente matrice ghiaiosa, con una maggiore presenza di orizzonti sabbiosi e limosi per il Sistema di Cantù. All'interno del Supersistema di Besnate, l'Unità di Minoprio è caratterizzata da una maggiore presenza di orizzonti superficiali a prevalente componente ghiaioso-sabbiosa. Le Unità di Bulgarograsso e di Guanzate presentano, invece, una maggiore predominanza della componente ghiaiosa, e differiscono tra di loro quasi esclusivamente per lo spessore dei suoli di alterazione che si rinvengono a contatto con la superficie (prevalentemente, 1 m per Unità di Bulgarograsso, 1.5-2 m per Unità di Guanzate; Francani et al., in stampa).

Soprattutto nella porzione meridionale dell'area di indagine, tutte queste formazioni possono presentare una predominanza, nei primi 2-10 m dal piano campagna, di orizzonti fini, a prevalente componente limoso-argillosa.

Il Sistema di Cantù è il più diffuso all'interno del sedime aeroportuale. Nella zona più orientale affiorano, invece, i depositi dell'Unità di Minoprio.

Nell'area di studio, il livello modale della pianura è solcato dall'incisione ("valle fluviale") che si trova in corrispondenza del corso del fiume Lambro. Altre depressioni di minore entità si rinvengono in corrispondenza di vie di drenaggio minori, generalmente fontanili.

I depositi alluvionali associati a questo sistema morfologico sono riconducibili al tardo Pleistocene Superiore e all'Olocene e sono cartografati nel Sistema del Po (Fig. 7; Francani et al., in stampa). Questo sistema è presente anche all'interno del sedime aeroportuale in due settori (confine occidentale ed area prossima all'aerostazione), separati dai depositi del Sistema di Cantù. Nell'area di indagine, i depositi di questa formazione sono anche essi di prevalente natura ghiaiosa e ghiaioso-sabbiosa, con spessori limitati a circa 10 m.

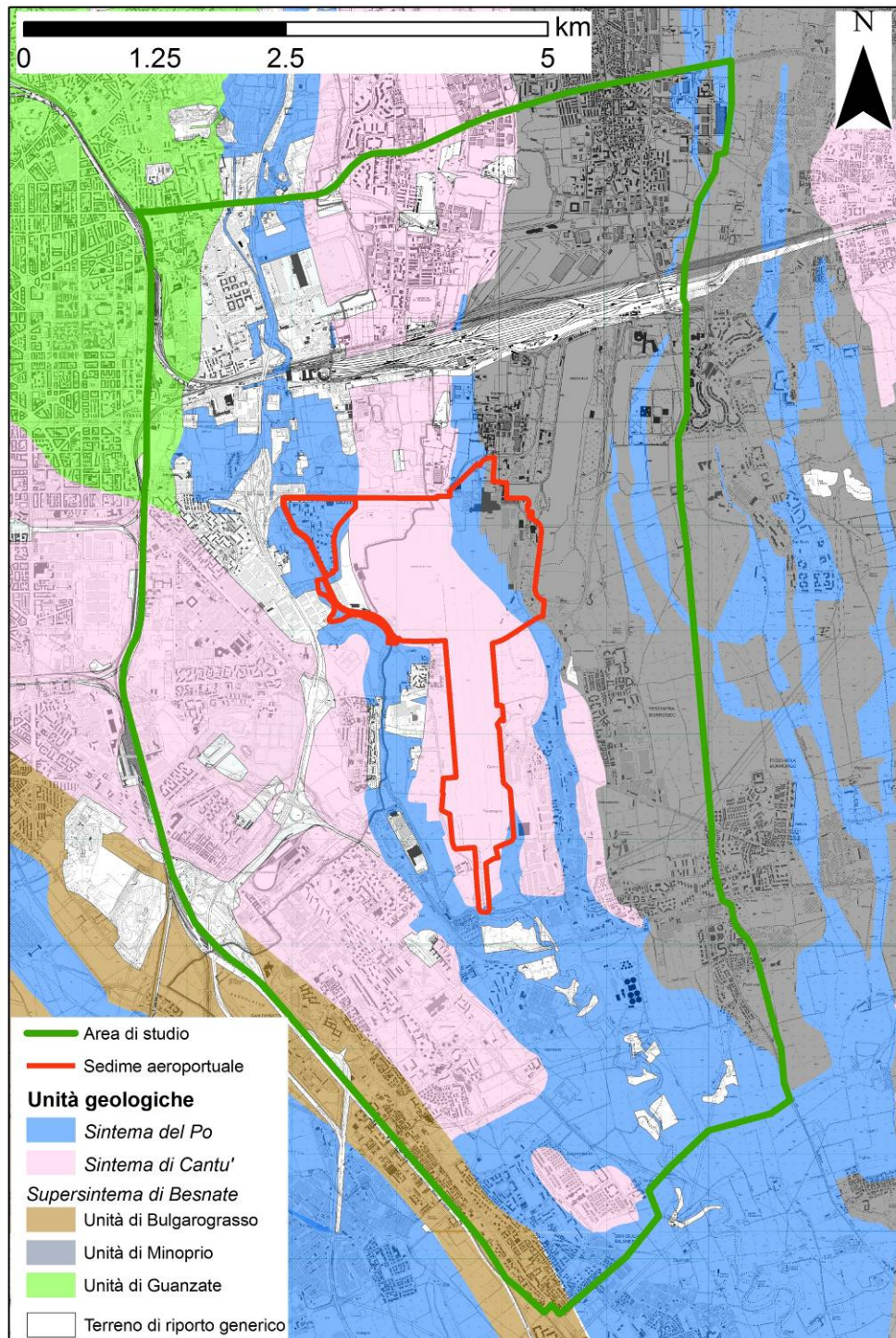


Figura 7. Carta geologica dell'area studiata.

Come anche per le altre formazioni dell'area indagata, anche i depositi del Sintema del Po possono presentare livelli più superficiali a prevalente componente limoso-argillosa, di spessore compreso tra 1 e 5 m, diffusi in particolare in sponda sinistra del Lambro, tra Peschiera Borromeo e Mediglia. Il Sintema del Po si trova stratigraficamente al di sopra dei depositi alluvionali più antichi, corrispondenti al Sintema di Cantù o al Supersintema di Besnate. Le simili caratteristiche granulometriche delle diverse formazioni riconosciute permettono, tuttavia, il riconoscimento di un

sistema deposizionale relativamente uniforme, che ha influenzato quindi anche la struttura idrogeologica dell'area.

Va, inoltre, sottolineata la presenza di numerose zone dove lo spessore dei terreni eterogenei di riporto (per rilevati di infrastrutture ed urbanizzazioni) è molto considerevole (3-5 m), per cui non è stato possibile definire in dettaglio le litologie affioranti (Fig. 7).

6. Inquadramento geomorfologico e dell'idrografia superficiale

L'area di studio si trova nel contesto della media pianura padana e presenta un'altitudine compresa tra 122 e 90 m sul livello del mare (s.l.m.), con una pendenza molto debole verso SSE, secondo il tipico schema di questa zona di pianura.

In questo settore di pianura, i principali elementi geomorfologici naturali presenti sono connessi alle fasi deposizionali ed erosive pleistoceniche ed oloceniche tipiche di ambiente fluviale.

Come già accennato nel capitolo precedente, la maggior parte della zona è situata in corrispondenza del livello modale della pianura (detto anche Livello Fondamentale della Pianura), una superficie pianeggiante di significativa estensione, apparentemente omogenea e priva di importanti discontinuità morfologiche.

Tuttavia, il livello modale della pianura è solcato dall'incisione ("valle fluviale") che si trova in corrispondenza del corso del fiume Lambro e che è possibile rinvenire lungo tutta l'area indagata, anche se in alcuni casi leggermente mascherata o modificata da opere antropiche (Figg. 8 e 10).

L'incisione provocata dall'azione erosiva del Lambro nelle più recenti fasi della sua storia è in generale evidenziata da una scarpata di terrazzo, che raccorda il corso attuale del fiume al più elevato livello modale della pianura. Tali scarpate hanno una altezza generalmente inferiore ai 5 m.

Altre depressioni di minore entità si rinvengono all'interno del livello modale della pianura (Fig. 8).

Esse sono delimitate da scarpate e da orli di terrazzo di modesta altezza (poche decine di centimetri). Queste scarpate rappresentano antichi percorsi fluviali (paleoalvei), probabilmente connessi sia a vecchie divagazioni del Lambro sia alle numerosissime vie di drenaggio minori che solcano questa zona della pianura (Ghiselli & Merazzi, 2012). Molte di queste incisioni sono state rimodellate dall'azione antropica, per cui risultano essere attualmente non più visibili. Proprio per l'intensa urbanizzazione dell'area, risulta molto difficile poter distinguere con certezza alcune di queste scarpate naturali minori da quelle di origine antropica.

In generale, le scarpate e gli orli che si individuano in questa zona hanno un tipico andamento NO-SE o N-S, parallelo alla direzione caratteristica dei corsi d'acqua della zona.

A partire dal XIII secolo, ma soprattutto durante l'ultimo secolo, l'attività antropica ha apportato modifiche sostanziali alla morfologia del territorio. Queste modifiche si sono tradotte, in particolare, in: i) riporti antropici di significativo spessore (3-5 m), per rilevati di infrastrutture ed altre opere di urbanizzazione dell'area; ii) cave, per lo più cessate, dedicate all'estrazione di terreni sciolti (ghiaia e sabbia). La maggior parte delle cave presenti nell'area studiata sono sede di affioramento della falda acquifera più superficiale, la cui risorgenza genera la formazione di laghi di cava.

Altro esempio di bacino artificiale dell'area di studio è l'Idroscalo, situato proprio in corrispondenza del confine orientale del sedime aeroportuale. Si tratta di un bacino artificiale costruito negli anni trenta con finalità dapprima esclusivamente aeroportuali poi divenute di tipo ricreativo.

Va sottolineata inoltre la presenza, all'interno del sedime aeroportuale, di una serie di canali artificiali realizzati per lo scolo delle acque di precipitazione al di fuori dell'area aeroportuale.

Questi canali convogliano le acque all'interno del cavo Lirone, che attraversa l'area aeroportuale prima di sfociare nel Lambro poco a S del sedime aeroportuale (Figg. 9, 10).

Come le altre cave in falda presenti nell'area, l'Idroscalo risulta in prevalenza alimentato da acque sorgive proprie, rappresentando anch'esso un importante punto di affioramento della falda superficiale.

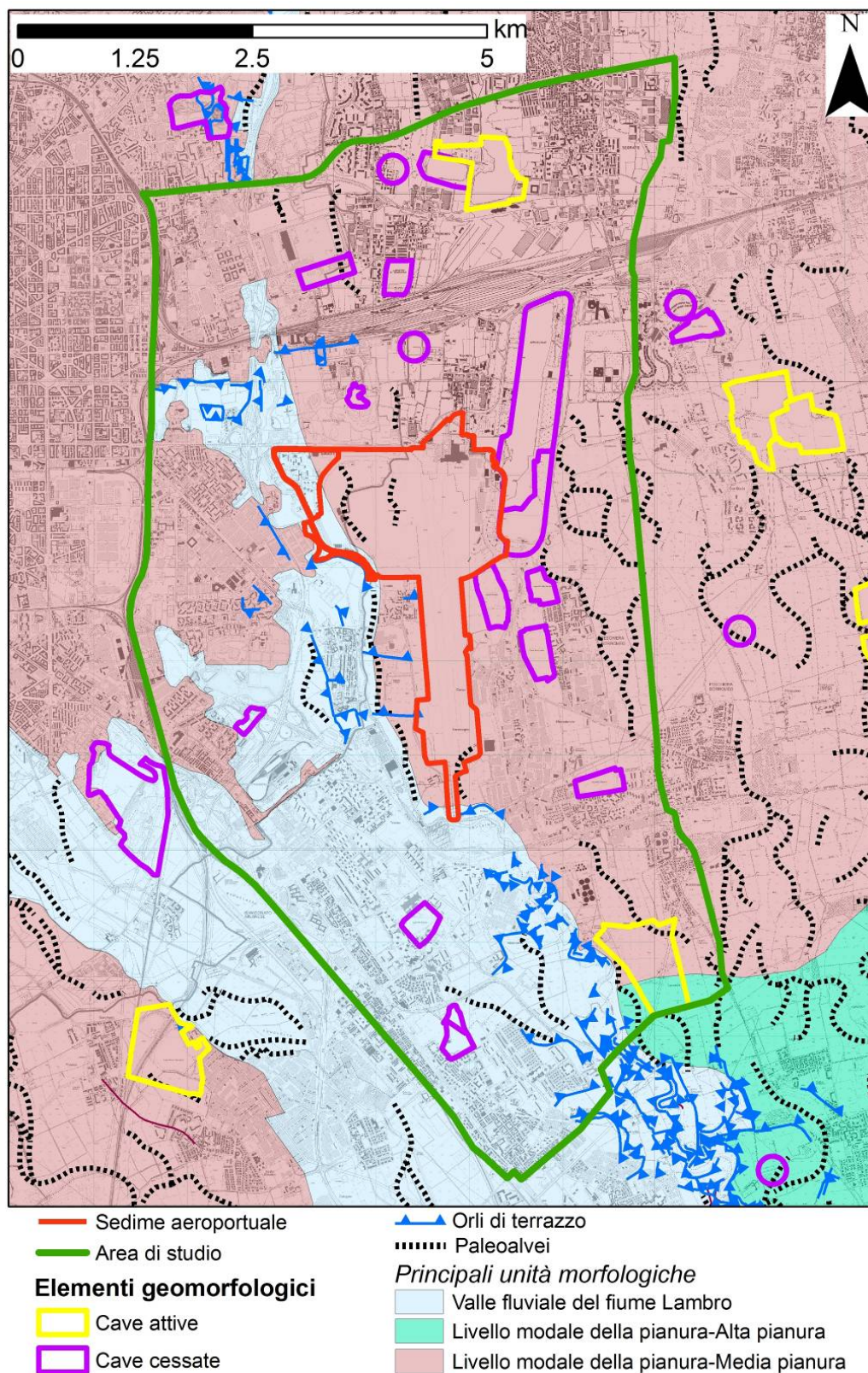


Figura 8. Carta geomorfologica dell'area studiata.

Come già indicato, il territorio oggetto dello studio è estremamente ricco in corsi d'acqua naturali o artificiali (Fig. 9). Oltre al fiume Lambro, che rappresenta il principale corso d'acqua nell'area, sono numerosissimi i cavi, i canali e le rogge presenti. A questi vanno aggiunti anche numerosi corsi

d'acqua minori (sia cavi che rogge) che hanno origini da fontanili presenti nell'area circostante il sedime aeroportuale, i quali rappresentano corsi d'acqua originati ed alimentati da affioramenti in superficie della prima falda, in corrispondenza di piccole incisioni o di depositi alluvionali a differente permeabilità.

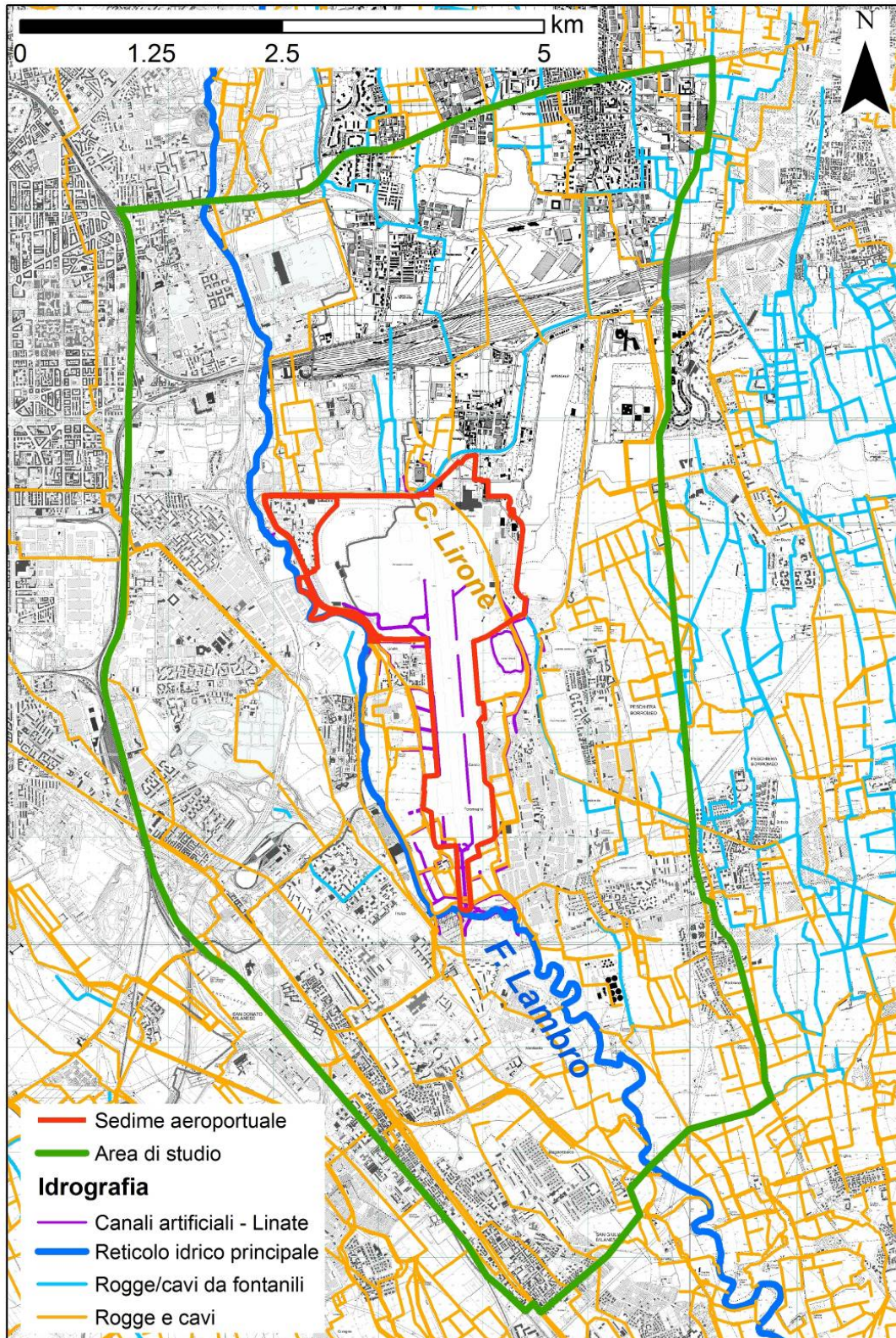


Figura 9. Idrografia superficiale dell'area studiata.

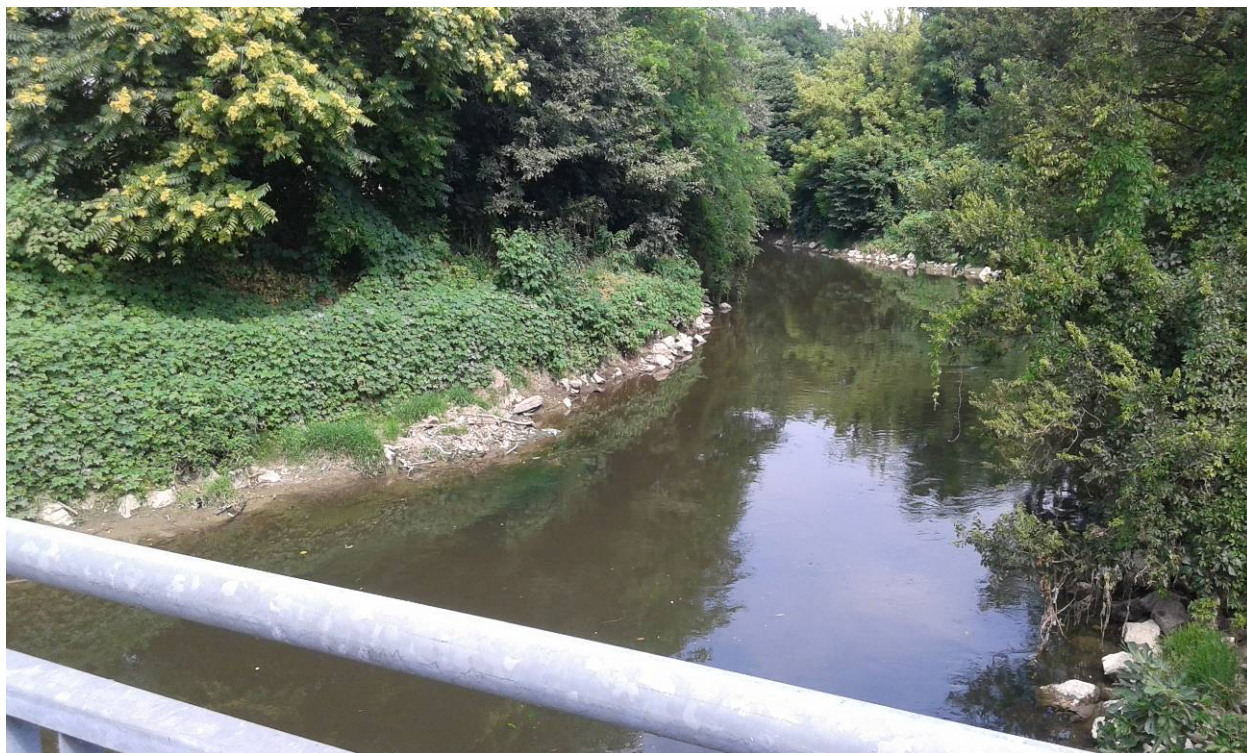


Figura 10. Il fiume Lambro, nei pressi del ponte di Via Fantoli a Milano. Seppur parzialmente coperta dalla fitta vegetazione, si nota la scarpata, con altezza inferiore a 2 m, che separa l'alveo del fiume dal sovrastante livello modale della pianura.

7. Inquadramento pedologico

I dati pedologici (Fig. 11) sono stati desunti a partire dal *database* Basi informative dei suoli, della Regione Lombardia. Questi sono stati realizzati da ERSAF, che provvede anche ad un loro periodico aggiornamento. I dati pedologici sono stati integrati con anche altri dati bibliografici (ERSAL, 1993; ERSAF, 2004).

In Tab. 6, vengono riportate le classi di appartenenza delle unità pedologiche e le loro caratteristiche principali, in termini di:

- 1) Unità di paesaggio a cui appartiene il suolo (UC)
- 2) Uso del suolo prevalente (UDS)
- 3) Classificazione tassonomica del suolo, secondo la classificazione USDA (1994), e sue principali caratteristiche granulometriche (TAX)
- 4) Attitudine del suolo all'utilizzo dei reflui in ambito agricolo (LIQ)
- 5) Attitudine del suolo all'utilizzo dei fanghi di depurazione urbana in ambito agricolo (FAN)
- 6) Capacità protettiva del suolo nei confronti delle acque sotterranee (ACQ)
- 7) Capacità protettiva del suolo nei confronti delle acque superficiali (SUP)
- 8) Valore naturalistico del suolo (VAL).

UP	UC	UDS	TAX	LIQ	FAN	ACQ	SUP	VAL
CAS1/ FNM4	Piane fluviali a dinamica prevalentemente deposizionale, in parte inondabili, costituite da sedimenti recenti o attuali	coltura foraggera permanente / seminativo avvicendato	Fluventic Hapludolls. ghiaioso, Mixed, Superactive, Mesic	Suoli adatti con lievi limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare alcuni ostacoli nella gestione dei liquami zootecnici		Moderata		Basso
CIC1/ ZIT1	Settore intermedio della piana proglaciale, caratterizzato da idromorfia più o meno accentuata, dovuta all'emergenza delle risorgive e/o alla presenza di una falda sottosuperficiale.	seminativo avvicendato	Dystric Eutrudepts. ghiaioso con sabbia, Mixed, Superactive,	Suoli adatti con lievi limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare alcuni ostacoli nella gestione dei liquami zootecnici	Suoli adatti con moderate limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare ostacoli nella gestione dei fanghi di depurazione		Elevata	Basso
CNS1	Piane fluviali a dinamica prevalentemente deposizionale, in parte inondabili, costituite da sedimenti recenti o attuali	coltura foraggera permanente	Typic Haplustepts. sabbioso-limoso, Mixed, Superactive, Mesic	Suoli adatti con lievi limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare alcuni ostacoli nella gestione dei liquami zootecnici	Suoli adatti con moderate limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare ostacoli nella gestione dei fanghi di depurazione	Bassa	Elevata	Basso

CNV1 /BRV 1	Settore intermedio della piana proglaciale, caratterizzato da idromorfia più o meno accentuata, dovuta all'emergenza delle risorgive e/o alla presenza di una falda sottosuperficiale.	coltura foraggera permanente / seminativo avvicendato	Aquic Hapludalfs. sabbioso-limoso a grana fine, Mixed, Superactive, Mesic			Moderata		Basso
DRM 1	Superfici terrazzate delimitate da scarpate d'erosione e variamente rilevate sulle piane fluviali attuali. Testimoniano antiche piane fluviali riconducibili a precedenti cicli di erosione e sedimentazione.	seminativo avvicendato	Humic Eutrudepts. ghiaioso con sabbia, Mixed, Superactive, N	Suoli adatti con lievi limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare alcuni ostacoli nella gestione dei liquami zootecnici	Suoli adatti con moderate limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare ostacoli nella gestione dei fanghi di depurazione	Moderata	Elevata	Moderato
GAI1/ GRD1	Settore intermedio della piana proglaciale, caratterizzato da idromorfia più o meno accentuata, dovuta all'emergenza delle risorgive e/o alla presenza di una falda sottosuperficiale.	seminativo avvicendato	Aeric-mollic Endoaquepts. ghiaioso, Mixed, Superactive, Nonacid, Mesic		Suoli adatti con moderate limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare ostacoli nella gestione dei fanghi di depurazione		Moderata	Basso
LGO1	Superfici terrazzate delimitate da scarpate d'erosione e variamente rilevate sulle piane fluviali attuali. Testimoniano antiche piane fluviali riconducibili a precedenti cicli di erosione e sedimentazione.	seminativo avvicendato	Typic Haplustepts. ghiaioso con sabbia, Mixed, Superactive,	Suoli adatti con lievi limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare alcuni ostacoli nella gestione dei liquami zootecnici	Suoli adatti con moderate limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare ostacoli nella gestione dei fanghi di depurazione	Moderata	Elevata	Basso
MTT1	Settore intermedio della piana proglaciale, caratterizzato da idromorfia più o meno accentuata, dovuta all'emergenza delle risorgive e/o alla presenza di una falda sottosuperficiale.	seminativo avvicendato	Typic Endoaquepts. ghiaioso, Mixed, Superactive, Nonacid, Mesic	Suoli adatti con lievi limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare alcuni ostacoli nella gestione dei liquami zootecnici	Suoli adatti con moderate limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare ostacoli nella gestione dei fanghi di depurazione	Bassa	Moderata	Moderato

NUO1	Settore intermedio della piana proglaciale, caratterizzato da idromorfia più o meno accentuata, dovuta all'emergenza delle risorgive e/o alla presenza di una falda sottosuperficiale.	coltura foraggera permanente / coltura foraggera permanente	Inceptic Hapludalfs, ghiaioso con sabbia, Mixed, Active, Mesic	Suoli adatti con lievi limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare alcuni ostacoli nella gestione dei liquami zootecnici	Suoli non adatti: presentano caratteristiche e qualità tali da sconsigliare l'uso di fanghi e da rendere delicate le pratiche di fertilizzazione in genere	Bassa	Elevata	Basso
OLG1	Settore apicale della piana proglaciale o "piana pedemontana", addossata ai rilievi (montagna, apparati morenici e terrazzi antichi), chiamata anche alta pianura ghiaiosa. È formata dalla coalescenza dei conoidi alluvionali, a morfologia subpianeggiante	seminativo avvicendato	Fluventic Hapludolls, sabbioso-limoso, skeletal, Mixed, Superactive, Mesic	Suoli adatti con lievi limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare alcuni ostacoli nella gestione dei liquami zootecnici	Suoli adatti con moderate limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare ostacoli nella gestione dei fanghi di depurazione	Bassa	Elevata	Basso
PGN1	Settore apicale della piana proglaciale o "piana pedemontana", addossata ai rilievi (montagna, apparati morenici e terrazzi antichi), chiamata anche alta pianura ghiaiosa. È formata dalla coalescenza dei conoidi alluvionali, a morfologia subpianeggiante	coltura foraggera permanente	Mollic Hapludalfs, sabbioso-limoso, skeletal, Mixed, Superactive, Mesic	Suoli adatti con lievi limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare alcuni ostacoli nella gestione dei liquami zootecnici	Suoli adatti con moderate limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare ostacoli nella gestione dei fanghi di depurazione	Moderata	Elevata	Basso
ROZ1	Settore intermedio della piana proglaciale, caratterizzato da idromorfia più o meno accentuata, dovuta all'emergenza delle risorgive e/o alla presenza di una falda sottosuperficiale.	seminativo avvicendato	Aquic Hapludolls, sabbioso-limoso, skeletal, Mixed, Superactive, Mesic	Suoli adatti con moderate limitazioni	Suoli adatti con moderate limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare ostacoli nella gestione dei fanghi di depurazione	Bassa	Moderata	Basso
SAM1	Settore apicale della piana proglaciale o "piana pedemontana", addossata ai rilievi (montagna, apparati morenici e terrazzi antichi), chiamata anche alta pianura ghiaiosa. È formata dalla coalescenza dei conoidi alluvionali, a morfologia subpianeggiante	seminativo avvicendato	Typic Hapludalfs, ghiaioso con sabbia, Mixed, Active, Mesic	Suoli adatti con lievi limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare alcuni ostacoli nella gestione dei liquami zootecnici	Suoli adatti con moderate limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare ostacoli nella gestione dei fanghi di depurazione	Moderata	Elevata	Basso

VET1	Superfici terrazzate delimitate da scarpate d'erosione e variamente rilevate sulle piane fluviali attuali. Testimoniano antiche piane fluviali riconducibili a precedenti cicli di erosione e sedimentazione.	seminativo avvicendato	Fluvaquentic Hapludolls, ghiaioso con sabbia, Mixed, Active, Mesic	Suoli adatti con moderate limitazioni	Suoli adatti con moderate limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare ostacoli nella gestione dei fanghi di depurazione	Moderata	Bassa	Basso
VIN1	Settore intermedio della piana proglaciale, caratterizzato da idromorfia più o meno accentuata, dovuta all'emergenza delle risorgive e/o alla presenza di una falda sottosuperficiale.	seminativo avvicendato	Typic Hapludalfs, ghiaioso con sabbia, Mixed, Superactive, Mesic	Suoli adatti con lievi limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare alcuni ostacoli nella gestione dei liquami zootecnici	Suoli adatti con moderate limitazioni: richiedono attenzioni specifiche e possono presentare ostacoli nella gestione dei fanghi di depurazione	Moderata	Elevata	Basso
VLE1	Superfici terrazzate delimitate da scarpate d'erosione e variamente rilevate sulle piane fluviali attuali. Testimoniano antiche piane fluviali riconducibili a precedenti cicli di erosione e sedimentazione.	seminativo avvicendato	Typic Endoaquepts, ghiaioso con sabbia, Superactive,	Suoli non adatti: presentano caratteristiche e qualità tali da sconsigliare l'uso di reflui non strutturati e da rendere di norma delicate le pratiche di fertilizzazione in genere	Suoli non adatti: presentano caratteristiche e qualità tali da sconsigliare l'uso di fanghi e da rendere delicate le pratiche di fertilizzazione in genere	Bassa	Bassa	Moderato
ZIV1	Settore distale della piana proglaciale, inciso da un reticolo idrografico permanente di tipo meandriforme. Presenta superfici stabili, costituite da sedimenti di origine fluviale a granulometria medio-fine.	seminativo avvicendato	Typic Haplustalfs, ghiaioso con limo, Mixed, Active, Mesic	Suoli adatti senza limitazioni: la gestione dei liquami zootecnici può generalmente avvenire senza particolari ostacoli	Suoli non adatti: presentano caratteristiche e qualità tali da sconsigliare l'uso di fanghi e da rendere delicate le pratiche di fertilizzazione in genere	Moderata	Elevata	Basso

Tabella 6. Caratteristiche principali delle unità pedologiche individuate nell'area studiata. U) unità pedologica; UC) Unità di paesaggio a cui appartiene il suolo; UDS) Uso del suolo prevalente; TAX) Classificazione tassonomica del suolo; LIQ) Attitudine del suolo all'utilizzo dei reflui in ambito agricolo; FAN) Attitudine del suolo all'utilizzo dei fanghi di depurazione urbana in ambito agricolo; ACQ) Capacità protettiva del suolo nei confronti delle acque sotterranee; SUP) Capacità protettiva del suolo nei confronti delle acque superficiali; VAL) Valore naturalistico del suolo.

I suoli appartengono ad unità morfologiche riconducibili al livello modale della pianura o alla valle fluviale del Lambro. Pur non esistendo una carta dettagliata dell'andamento spaziale dello spessore dei suoli, va sottolineato che lo spessore dei suoli dell'area è in genere compreso, anche all'interno di una particolare unità, tra 0.5 e 2 m (ERSAL, 1993; ERSAL, 2004).

La maggior parte dei suoli sono a tessitura grossolana (ghiaiosa o sabbiosa), seppur presentando localmente una tessitura a grana più fine (limosa, limoso-sabbiosa).

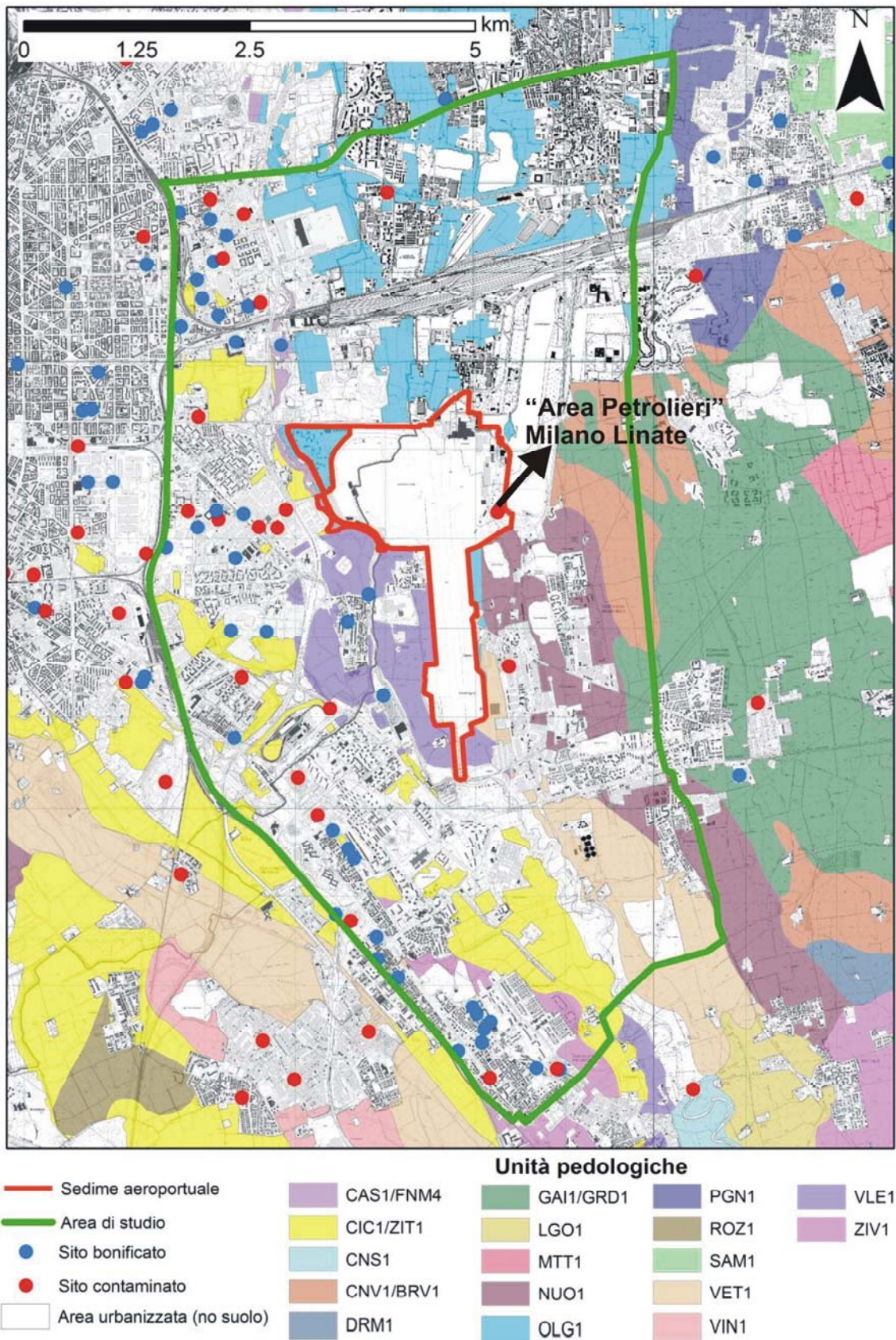


Figura 11. Carta pedologica dell'area studiata. E' messa in evidenza la posizione dell'Area Petrolieri di Milano Linate, attualmente oggetto di bonifica.

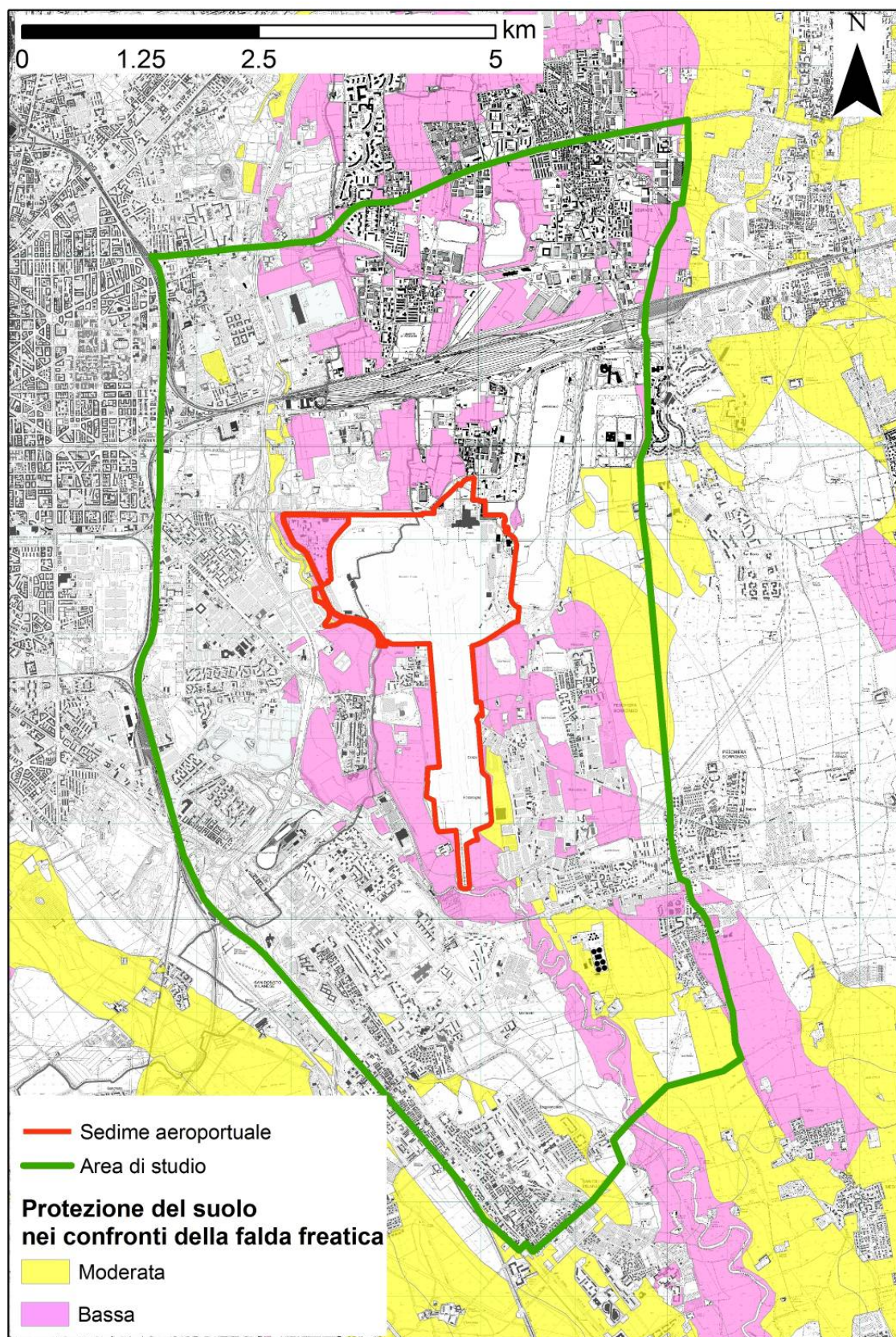


Figura 12. Grado di protezione garantito dal suolo nei confronti della falda freatica per l'area studiata.

Ai fini di una valutazione della vulnerabilità della prima falda nell'area di indagine, assume particolarmente importante la capacità di protezione dei suoli dalla propagazione di inquinanti superficiali verso le acque sotterranee. Questa azione dei suoli è strettamente connessa alla loro tessitura, al loro spessore e alla profondità a cui si posiziona la superficie piezometrica della prima falda. Per quanto riguarda l'area investigata emerge che la protezione della falda da parte del suolo sia per lo più bassa o localmente moderata (settore meridionale ed occidentale) (Fig. 12).

Integrando i dati relativi alle proprietà pedologiche della zona con i dati granulometrici anche dei materiali immediatamente sottostanti i suoli stessi, sarà possibile valutare con maggiore precisione la vulnerabilità intrinseca della prima falda nell'area di studio, in particolare nel sedime aeroportuale.

Per completezza di informazione, nella carta pedologica di Fig. 11 sono state riportate le zone urbanizzate dove il suolo non è più rilevabile. In queste aree, è possibile rinvenire comunque depositi superficiali di terreni sciolti, i quali tuttavia si presentano molto disturbati o ricoperti da riporti eterogenei, perdendo così le caratteristiche pedogenetiche che permettono di distinguere un suolo.

Inoltre, sono stati anche riportati i siti che sono stati oggetto di bonifica o che sono tuttora contaminati, per cui le caratteristiche originali del suolo risultano essere alterate. Tra questi, è presente, all'interno del sedime aeroportuale, il sito dell'Area Petrolieri di Milano Linate, attualmente oggetto di bonifica a seguito di un fenomeno di contaminazione per sversamento di idrocarburi.

8. Inquadramento idrogeologico

La distribuzione degli acquiferi presenti nell'area studiata è quella tipica del settore medio della Pianura Padana. Regione Lombardia & ENI (2002) individuano, in senso verticale, una serie di gruppi acquiferi, separati da superfici di discontinuità, spesso rappresentate da acquicludi o acquitardi.

In Tab. 7, sono state riassunte le principali caratteristiche dei gruppi acquiferi presenti nell'area studiata.

Gruppo acquifero (Regione Lombardia & ENI, 2002)	Litologia	Profondità della base in m s.l.m.	Spessore dell'acquifero in m	Tipo di falda
A	Ghiaie a matrice sabbiosa con subordinate sabbie, da medie a grossolane, e limi sabbiosi	50/100	30-60	Libera-semiconfinata
B	Sabbie e ghiaie a matrice sabbiosa con argille limose e limi nella parte basale	-100/-50	50-100	Semiconfinata- confinata
C	Argille limoso- sabbiose e sabbie fini	-200/-150	100	Confinata
D	Peliti, sabbie e ghiaie	-750/-550	400-600	Confinato

Tabella 7. Principali caratteristiche dei gruppi acquiferi presenti nell'area studiata.

L'acquifero più superficiale viene indicato con il nome di Gruppo Acquifero A. Esso è sede di una falda generalmente libera, attualmente sfruttata in modo intensivo. Da questo, derivano i numerosi fenomeni di inquinamento che la interessano (Regione Lombardia & ENI, 2002). In questo gruppo acquifero, ghiaie e ghiaie grossolane, spesso a matrice sabbiosa da media a molto grossolana, sono le litologie prevalenti. Tuttavia, è possibile rinvenire orizzonti superficiali a grana più fine, sia di tipo sabbioso che di tipo limo-argilloso. La base del Gruppo Acquifero A presenta nell'area di studio una debole immersione verso S-SE, con quote comprese tra circa 100 e 50 m s.l.m. Di conseguenza, lo spessore di esso aumenta nella stessa direzione dell'immersione, fino a raggiungere valori di circa 60 m.

Sottostante al Gruppo Acquifero A, è presente un secondo acquifero, denominato Gruppo Acquifero B. Nel settore di pianura posto a settentrione rispetto all'area di studio, la separazione tra questi due acquiferi è discontinua o assente, determinando perciò l'amalgamazione tra questi due acquiferi in un unico sistema (Provincia di Milano, 1995).

Il Gruppo Acquifero B è rappresentato da una successione costituita da sedimenti litologicamente simili al sovrastante Gruppo A, in cui, tuttavia, predominano sabbie medio-grossolane con subordinate ghiaie a matrice sabbiosa. I sedimenti fini sono subordinati ai depositi granulari. Tuttavia, lenti limoso-argillose sono presenti lungo tutta la successione di questo acquifero, con

spessore da decimetrico a metrico. Dove tali orizzonti sono più spessi, è possibile la formazione di falde diverse, che si riuniscono laddove si chiudono lateralmente gli orizzonti limoso-argillosi di separazione. La densità dei livelli fini a minor permeabilità aumenta lungo la profondità, fino a formare un orizzonte continuo di separazione con l'acquifero più profondo. Date le caratteristiche del Gruppo Acquifero B, le falde presenti assumono un carattere da semi-confinato a confinato. La base del Gruppo Acquifero B presenta anche essa, nell'area di studio, un'immersione verso S-SE, con quote comprese tra circa -50 e -100 m s.l.m. Lo spessore di questo acquifero varia tra 50 e 100 m.

Il terzo acquifero, indicato come Gruppo Acquifero C, è sede di importanti falde idriche confinate. Tale acquifero è costituito da prevalenti argille limoso-sabbiose e sabbie fini, con subordinati livelli sabbioso-ghiaiosi. L'andamento della base presenta sempre la stessa immersione verso S-SE, con quote che nell'area di studio sono comprese tra circa -150 e -200 m s.l.m. Lo spessore del Gruppo Acquifero C è in genere di 100 m.

Il quarto acquifero individuato, anche esso di tipo confinato, corrisponde al Gruppo Acquifero D. Esso è contraddistinto da depositi marini transizionali e profondi, che corrispondono in prevalenza ad alternanze discontinue di peliti e sabbie e ghiaie ed alternanze discontinue di sabbie e ghiaie prevalenti con peliti, passanti ad alternanze continue di peliti prevalenti e sabbie. L'andamento della base presenta un'immersione più marcata verso S, con quote della base che nell'area di studio sono comprese tra circa -550 e -750 m s.l.m. Lo spessore del Gruppo Acquifero D varia tra 400 e 600 m. L'analisi preliminare della struttura idrogeologica del sottosuolo mette già in luce l'importanza di una analisi dettagliata sulle falde presenti all'interno dei primi due acquiferi. In particolare, verranno indagate, in maniera più dettagliata, la prima falda, presente all'interno dell'acquifero più superficiale (Gruppo Acquifero A), che può essere interessata più direttamente da eventuali problematiche a livello ambientale e che può avere interazioni più dirette con il sedime aeroportuale stesso. Il secondo gruppo acquifero della zona (Gruppo Acquifero B) verrà analizzato per un eventuale suo sfruttamento a fine idro-potabile e/o sanitario.

9. Inquadramento sismico

L'analisi della sismicità di un territorio, intesa come distribuzione spazio-temporale dei terremoti avvenuti nel tempo in quella determinata area, costituisce il primo elemento di futuri studi di valutazione della pericolosità sismica locale.

La sismicità del territorio dell'area di studio, in cui ricade il sedime aeroportuale di Milano Linate, è legata alla sola presenza di attività neotettonica, dovuta a movimenti alterni di sollevamento ed abbassamento con tendenza al sollevamento negli ultimi 5 milioni di anni (Ambrosetti et al., 1987). Secondo la zonazione sismogenetica che individua aree omogenee caratterizzate dalle potenziali sorgenti sismiche in grado di generare terremoti superiori a 5.5 Mw, aggiornata al 2015 dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV; Database of Individual Seismogenic Sources, DISS version 3; DISS Working Group, 2015), il territorio indagato è prospiciente alla zona sismogenetica ITCS115, denominata "Western S-Alps external thrust shallow-west" (Fig. 13). Altre zone sismogenetiche vicine risultano essere: ad est, la zona ITCS002, denominata "Western S-Alps external thrust deep"; a sud, la zona ITCS044, denominata "Portalbera-Cremona", e la zona ITCS018, denominata "Rivanazzano-Stradella".

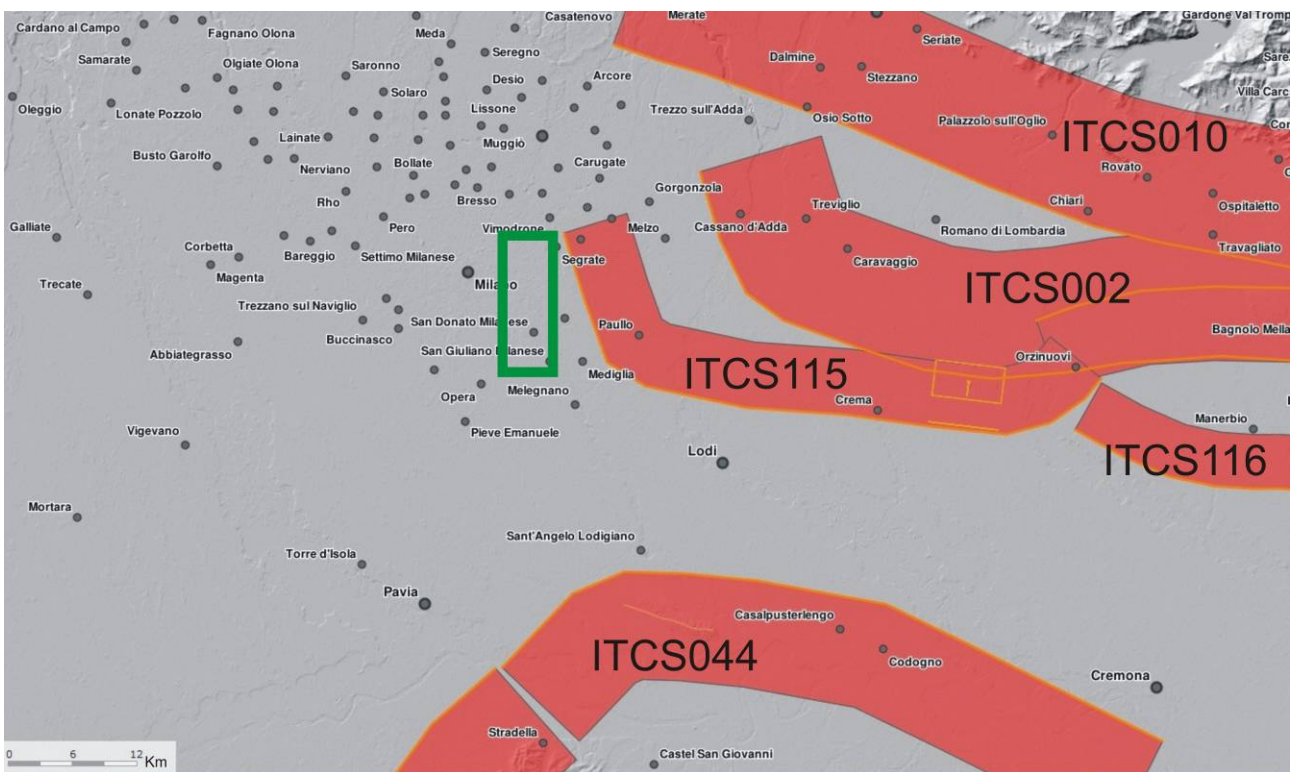


Figura 13. Zone sismogenetiche in cui è suddiviso il territorio nazionale, secondo la zonazione sismogenetica del database DISS version 3 (DISS Working Group, 2015). L'area di studio è indicata dal rettangolo verde.

Consultando CPTI15, il catalogo parametrico, redatto dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), dei terremoti storici, con magnitudo momento M_w superiore a 2, avvenuti in Italia dal 1000 al 2014 (Rovida et al., 2016), si nota come il territorio di indagine non è stato interessato da eventi sismici significativi, come testimoniato dall'assenza di epicentri di terremoti (Fig. 14).

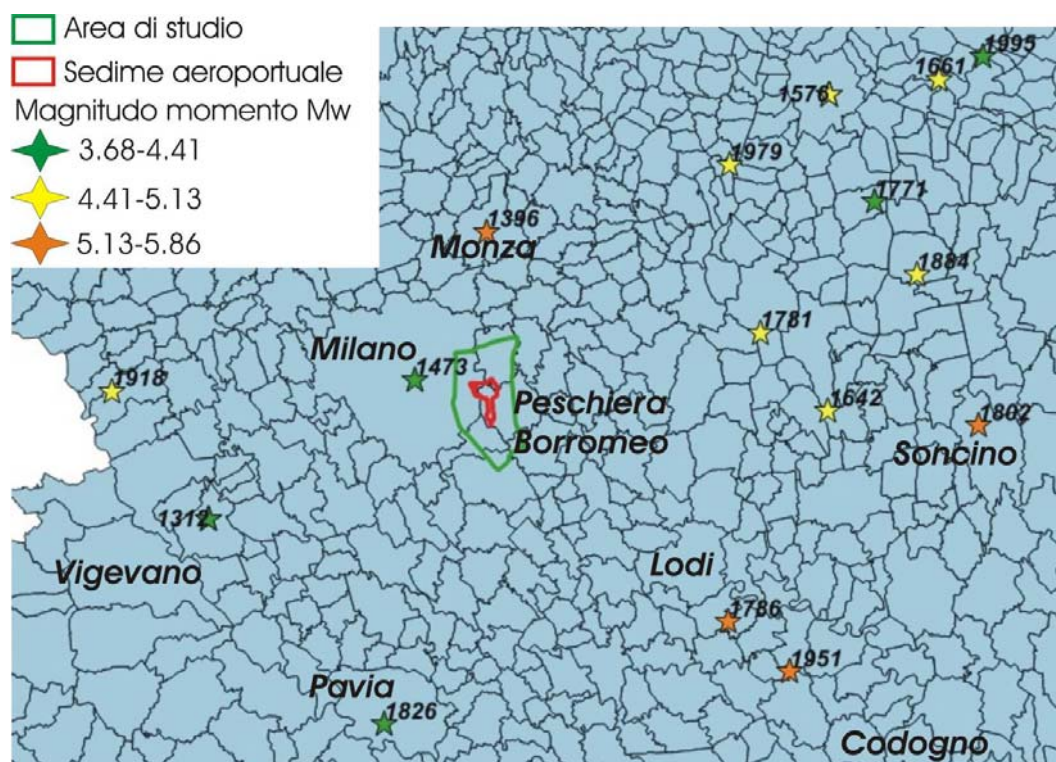


Figura 14. Terremoti significativi contenuti nel database CPTI15, per l'area di studio e un suo significativo contorno. Di fianco alle stelle dell'epicentro di ciascun sisma, è indicato l'anno in cui è accaduto.

Nelle aree prospicienti, che ricadono nelle zone sismogenetiche indicate in Fig. 13, i sismi importanti sono stati sporadici, con una M_w epicentrale sempre inferiore a 6 (Fig. 14).

I sismi che avvengono in queste zone e in altre aree poste a distanze maggiori possono comunque provocare un effetto macrosismico superficiale anche nell'area di indagine. Il Database Macrosismico Italiano 2015 (DBMI15; Locati et al., 2016) fornisce, per tutto il territorio italiano, un set di dati di intensità macrosismica relativa ai terremoti italiani avvenuti nel periodo 1000-2014. Nell'area di indagine, l'intensità massima superficiale (I_{max}), dei sismi che possono interessare quest'area, è variabile (Fig. 15).

La località più vicina al sedime è la frazione Linate di Peschiera Borromeo. Per questa località, I_{max} è stata definita solo qualitativamente, con indicazione di "F" ("sisma percepito"). Tale valore è stato assegnato, nel DBMI15, a partire da 1 solo sisma che ha prodotto effetti macrosismici su questa zona. Per le altre località che ricadono nell'area di indagine, I_{max} sono le seguenti:

1. Milano: I_{max} 7 (dedotta da 109 eventi sismici)
2. Peschiera Borromeo (Bettola): I_{max} "NF" ("sisma non percepito") (dedotta da 4 eventi sismici)
3. Milano: I_{max} 7 (dedotta da 109 eventi sismici)
4. Mediglia: I_{max} 4-5 (dedotta da 1 evento sismico)
5. Segrate: I_{max} "F" ("sisma percepito") (dedotta da 1 evento sismico)
6. San Giuliano Milanese: I_{max} 6 (dedotta da 3 eventi sismici)
7. San Donato Milanese: I_{max} 6 (dedotta da 3 eventi sismici).

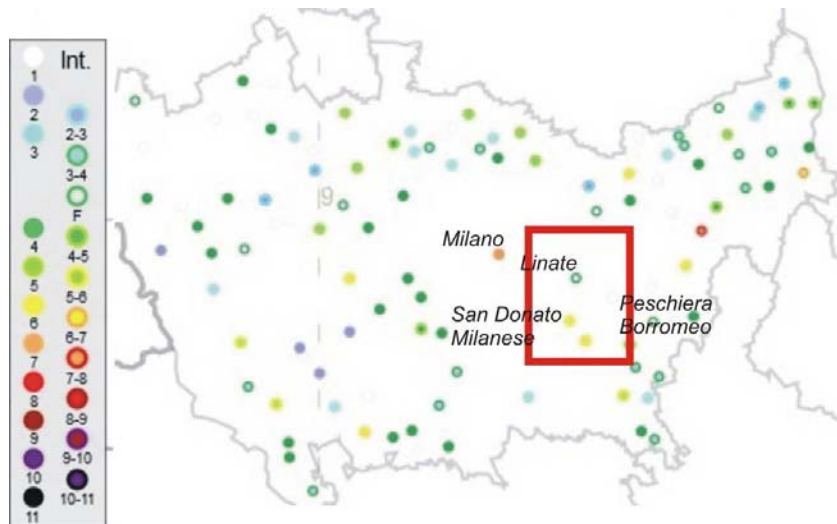


Figura 15. Carta della massima intensità macrosismica I_{max} , per la zona della Città Metropolitana di Milano, dedotta dal database DBMI15 (Locati et al., 2016). L'area di studio è indicata dal rettangolo rosso.

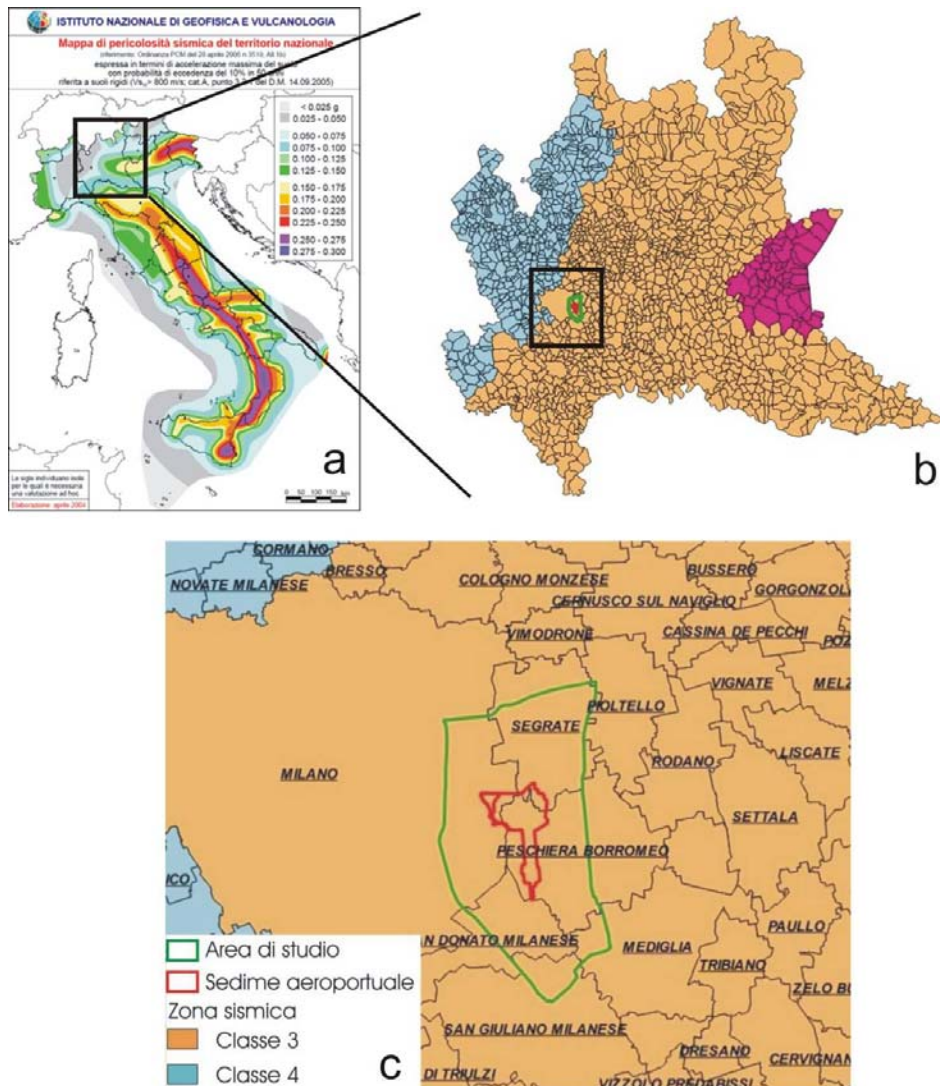


Figura 16. Mappa della pericolosità sismica italiana (INGV, 2009; a); classificazione sismica dei comuni lombardi (b); classificazione sismica dei comuni posti nell'area di indagine (c).

Come per il resto della regione Lombardia, analizzando le zone sismogenetiche, i parametri dei terremoti storici e gli effetti macrosismici, è stata assegnata una classe sismica ai comuni in cui ricade l'area di studio (Milano, Peschiera Borromeo, Segrate, Mediglia, San Donato Milanese, San Giuliano Milanese).

Tutti questi comuni sono classificati in zona sismica 3 (bassa sismicità), secondo la classificazione sismica del territorio lombardo entrata in vigore il 10 Aprile 2016, recependo il D.G.R. 2129/2014 (Figura 16).

Secondo tale classificazione vigente, i comuni di questa area risultano identificati da un valore di accelerazione massima orizzontale (a_g) su suolo di riferimento con la probabilità del 10% di essere superato nei prossimi 50 compreso tra 0.05 e 0.15 g. In Tab. 8 sono riportati i valori di a_g dei comuni dell'area studiata, secondo la classificazione sismica del territorio lombardo entrata in vigore il 10 Aprile 2016.

Comune	a_g (g)
Mediglia	0.0623
Milano	0.0547
Peschiera Borromeo	0.0592
San Donato Milanese	0.057
San Giuliano Milanese	0.059
Segrate	0.057

Tabella 8. Valori di a_g dei comuni dell'area studiata.

10. Modello geo-litologico 3D del sottosuolo

10.1 Metodologia di ricostruzione

Le stratigrafie, recuperate presso diversi enti (Tab. 1 e 2, capitolo 2), sono state utilizzate per la ricostruzione tridimensionale del sottosuolo dell'area indagata. Le stratigrafie considerate sono 161: 136 sono relative ad indagini per la realizzazione di pozzi, 20 sono state realizzate con sondaggi geognostici, 5 riguardano sondaggi adibiti a piezometri. Le stratigrafie utilizzate sono state raccolte all'interno della Banca dati geologica del sottosuolo di Regione Lombardia (*database* CASPITA; 123 stratigrafie) e dalle indagini geognostiche eseguite nel tempo all'interno del sedime aeroportuale di Milano Linate (13 stratigrafie).

Le stratigrafie sono distribuite in maniera abbastanza uniforme, anche se alcune zone dell'area studiata (in particolare, l'area delle piste dell'aeroporto ed il settore sud-orientale dell'area di indagine) risultano avere una densità minore di punti con stratigrafie (Fig. 17).

Le stratigrafie considerate sono state interpretate prima della ricostruzione tridimensionale, per poter individuare le principali litofacies presenti nell'area studiata, accorpendo singoli orizzonti di limitata estensione verticale ed orizzontale per una migliore comprensione dei depositi principali alla scala dell'area di indagine (Fig. 19). In particolare, gli orizzonti con spessore verticale minore di 2 m, compresi tra due orizzonti più spessi con simili caratteristiche litologiche, sono stati accorpati agli orizzonti in mezzo ai quali erano compresi. Inoltre, due o più orizzonti con caratteristiche litologiche simili, posti di seguito lungo la verticale indagata, sono stati accorpati in un unico livello.

Dalla fase di semplificazione delle stratigrafie iniziali, sono stati individuati 3 litotipi fondamentali che caratterizzano, sia arealmente che verticalmente, l'area studiata: 1) depositi prevalentemente ghiaiosi con sabbia; 2) depositi prevalentemente sabbiosi con ghiaia; 3) depositi limoso-argillosi.

Per la ricostruzione del modello geo-litologico, è stato utilizzato il software GMS (Groundwater Modeling System, Aquaveo), versione 9.2. Questo programma permette di ricostruire la geometria tridimensionale delle diverse litologie presenti in una certa area, interpolando i dati stratigrafici di dei diversi punti di indagine (Fig. 18).

Le stratigrafie interpretate sono state inserite all'interno del software, ubicandole secondo la loro reale posizione. Questi dati sono stati quindi utilizzati per l'interpolazione tridimensionale, che ha consentito di ricostruire la geometria dei depositi presenti in tutta l'area indagata.

Per poter in seguito valutare la bontà del modello ottenuto, solo il 75% delle stratigrafie analizzate sono state utilizzate per la ricostruzione (*train* del modello). In questo modo, il restante 25% dei punti è stato utilizzato come punto di verifica della bontà del modello ottenuto (*test* del modello). La scelta delle stratigrafie di *train* e di *test* è stata fatta in maniera casuale, tuttavia in modo che tutte le zone dell'area di indagine fossero coperte da dati di *train* e di *test*. Tale approccio permette quindi di avere una stima di quanto il modello creato si avvicini alla situazione reale, senza creare ricostruzioni che non siano del tutto corrispondenti alle condizioni di fatto (Lark et al., 2013).

Il limite superiore del modello tridimensionale coincide con la morfologia dell'area, che è stata mappata tramite un modello digitale del terreno (DTM), con celle quadrate di 5 m di lato. Questo è stato ricostruito utilizzando il modello digitale del terreno della Città Metropolitana di Milano, disponibile sul Geoportale della Lombardia, integrato con misure topografiche realizzate a sostegno dei PGT dei comuni su cui ricade l'area studiata, misure topografiche presenti nei *database* topografici regionale e della Città Metropolitana di Milano e misure derivate da dati LIDAR resi

disponibili da DG Territorio Urbanistica Difesa del Suolo e Città Metropolitana della Regione Lombardia.

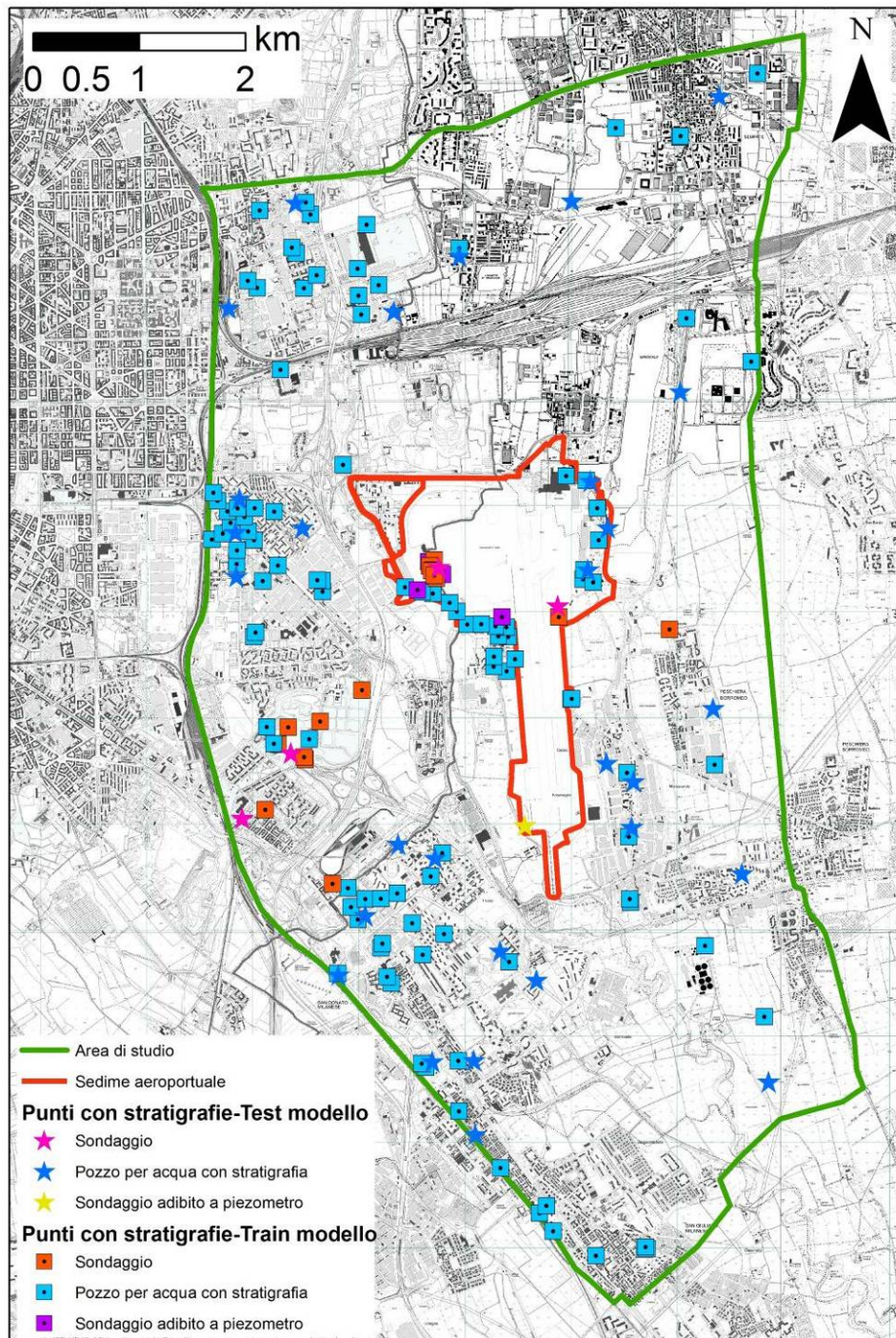


Figura 17. Ubicazione delle stratigrafie utilizzate per la ricostruzione del modello geo-litologico 3D.

Come limite inferiore, è stata scelta la profondità di 80 m dal piano campagna per due motivi: 1) la possibilità di indagare sia il primo che il secondo acquifero dell'area; 2) la disponibilità di un numero limitato di stratigrafie (15% del numero totale), che si spingessero a profondità maggiore di 80 m.

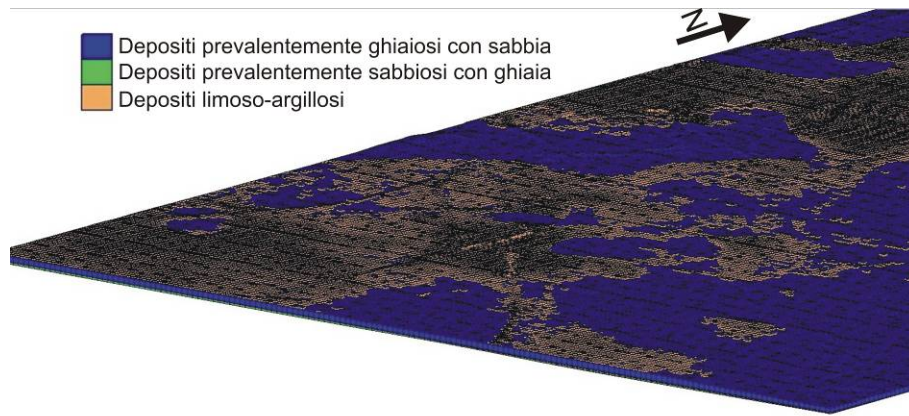


Figura 18. Esempio di modello geo-litologico 3D ricostruito tramite il software GMS.

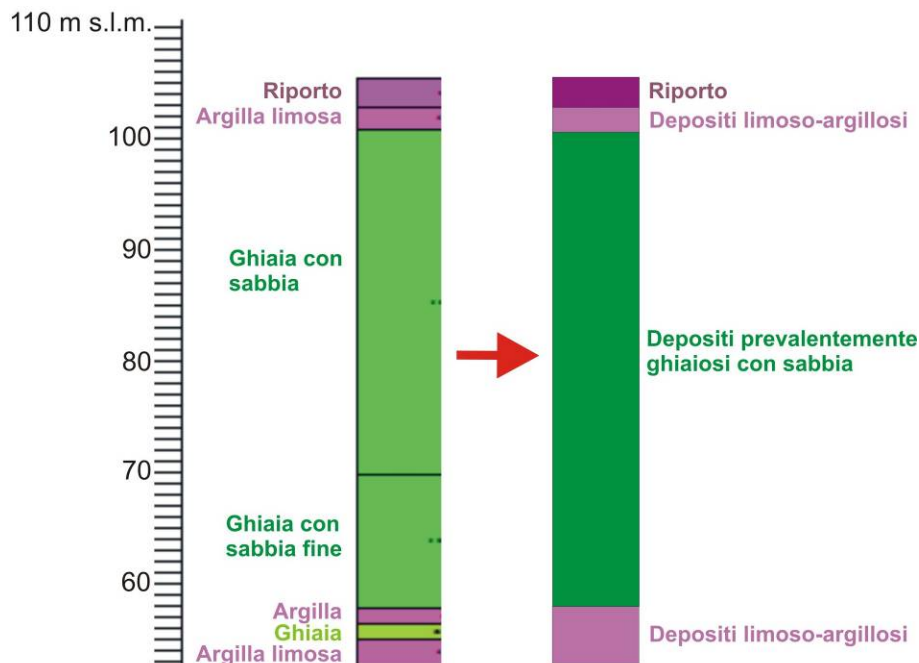


Figura 19. Esempio di interpretazione delle stratigrafie analizzate: stratigrafia del pozzo B6C313412787, comune di Peschiera Borromeo.

Le stratigrafie di *train* sono state interpolate utilizzando due tecniche deterministiche normalmente utilizzate per la ricostruzione di modelli tridimensionali, disponibili in GMS: tecnica di *Inverse Distance Weighting* (IDW) e tecnica *Nearest-neighbor* (NN). La differenza tra le due tecniche consiste nella modalità con cui avviene l'interpolazione. IDW assegna il valore a ciascun punto non noto sulla base della differenza di valori dei due punti, ad esso prospicienti, conosciuti. NN, invece, assegna ad un punto non noto un valore che è funzione della distanza tra due punti di cui si conosce il valore. Per una spiegazione più dettagliata di queste tecniche e della loro applicazione, si fa riferimento a Burrough (1986).

L'interpolazione spaziale è avvenuta, per entrambe le tecniche, secondo delle celle quadrato di 5x5 m, aventi stessa risoluzione spaziale del DTM usato per la topografia superficiale.

Entrambi i modelli, ottenuti con IDW o NN, hanno riconosciuto la presenza della stessa serie di livelli, con diverse caratteristiche litologiche e con peculiari geometrie. La differenza di tra i due modelli si è riscontrata nella geometria 3D dei livelli, nella profondità dei loro tetti e base e nei loro spessori.

10.2 Andamento delle principali litologie individuate

E' stata innanzitutto valutata l'incertezza associata ai modelli 3D ricostruiti, per poter capire la capacità di rappresentazione della situazione reale di ciascun modello. Seguendo l'approccio proposto da Lark et al. (2013), per la valutazione dell'incertezza associata al modello si è tenuto conto di alcuni indici statistici (errore medio assoluto MAE, radice dell'errore quadratico medio RMSE) di confronto tra dati modellati e dati reali, facendo riferimento alle stratigrafie di *test* considerate, relativi a particolari orizzonti: 1) lo spessore dei depositi limoso-argillosi superficiali; 2) lo spessore dei depositi prevalentemente ghiaiosi con sabbia sottostanti.

	Modello	Errore minimo m	Errore massimo m	MAE m	RMSE m
Spessore dei depositi limoso-argillosi superficiali	IDW	0.0	3.5	0.7	1.3
	NN	0.0	5.4	0.9	1.5
Spessore dei depositi prevalentemente ghiaiosi con sabbia	IDW	0.0	6.5	2.3	3.3
	NN	0.0	7.5	3.3	4.4

Tabella 9. Indici statistici associati all'incertezza dei modelli 3D del sottosuolo ricostruiti.

Dall'analisi di questi indici (Tab. 9), si nota come entrambi i modelli abbiano un basso grado di incertezza, dati i bassi valori degli indici MAE e RMSE. Il grado di incertezza cresce per i depositi prevalentemente ghiaiosi con sabbia, ma si mantiene comunque basso se consideriamo che questi depositi hanno un spessore misurato di almeno 24 m.

Tuttavia, il modello IDW ha una maggiore capacità di rappresentare la situazione reale, in quanto i valori di MAE e RMSE risultano essere anche oltre 1 m inferiori rispetto a quelli del modello NN. Per questa ragione, si è deciso di considerare come modello 3D rappresentativo dell'andamento litologico dell'area studiata quello IDW.

Da questo modello, è stato possibile ricostruire l'andamento geometrico delle litologie presenti. Le carte di distribuzione spaziale, ricostruite a partire dalla modellazione con GMS, hanno tutte risoluzione di 5x5 m, come il DEM usato per la morfologia di superficie.

E' opportuno sottolineare che, ad eccezione delle aree con presenza di riporti di notevole spessore e delle aree a maggiore urbanizzazione (carta pedologica di Fig. 11, capitolo 7), i depositi più superficiali risultano essere fortemente pedogenizzati nei primi 0.5-2 m dal piano campagna (ERSAL, 1993). Di conseguenza, in questi settori, sono presenti dei suoli, che tuttavia conservano le caratteristiche granulometriche dei materiali immediatamente sottostanti.

Partendo dalla superficie immediatamente al di sotto dei suoli (Fig. 20), si nota come in buona parte del settore centro-meridionale dell'area sono presenti dei depositi fini, a prevalente componente limoso-argillosa. Laddove presenti, questi depositi hanno uno spessore superiore ai 2 m, che può raggiungere valori fino a 8 m (Fig. 21). Questi livelli fini ricoprono localmente depositi a prevalente componente ghiaiosa con sabbie subordinate, i quali costituiscono i depositi dell'acquifero più superficiale (primo acquifero) presente nell'area studiata. Nelle zone dove non sono presenti i livelli limoso-argillosi superficiali, i materiali ghiaiosi, con livelli sabbiosi di spessore metrico subordinati, del primo acquifero affiorano direttamente al di sotto del sottile strato di suolo superficiale (Fig. 21). E' opportuno sottolineare anche la presenza di alcuni settori dell'area di indagine in cui i

materiali superficiali sono costituiti da terreni eterogenei di riporto (per rilevati di infrastrutture ed urbanizzazioni), il cui spessore è molto considerevole (3-5 m) (Fig. 20).

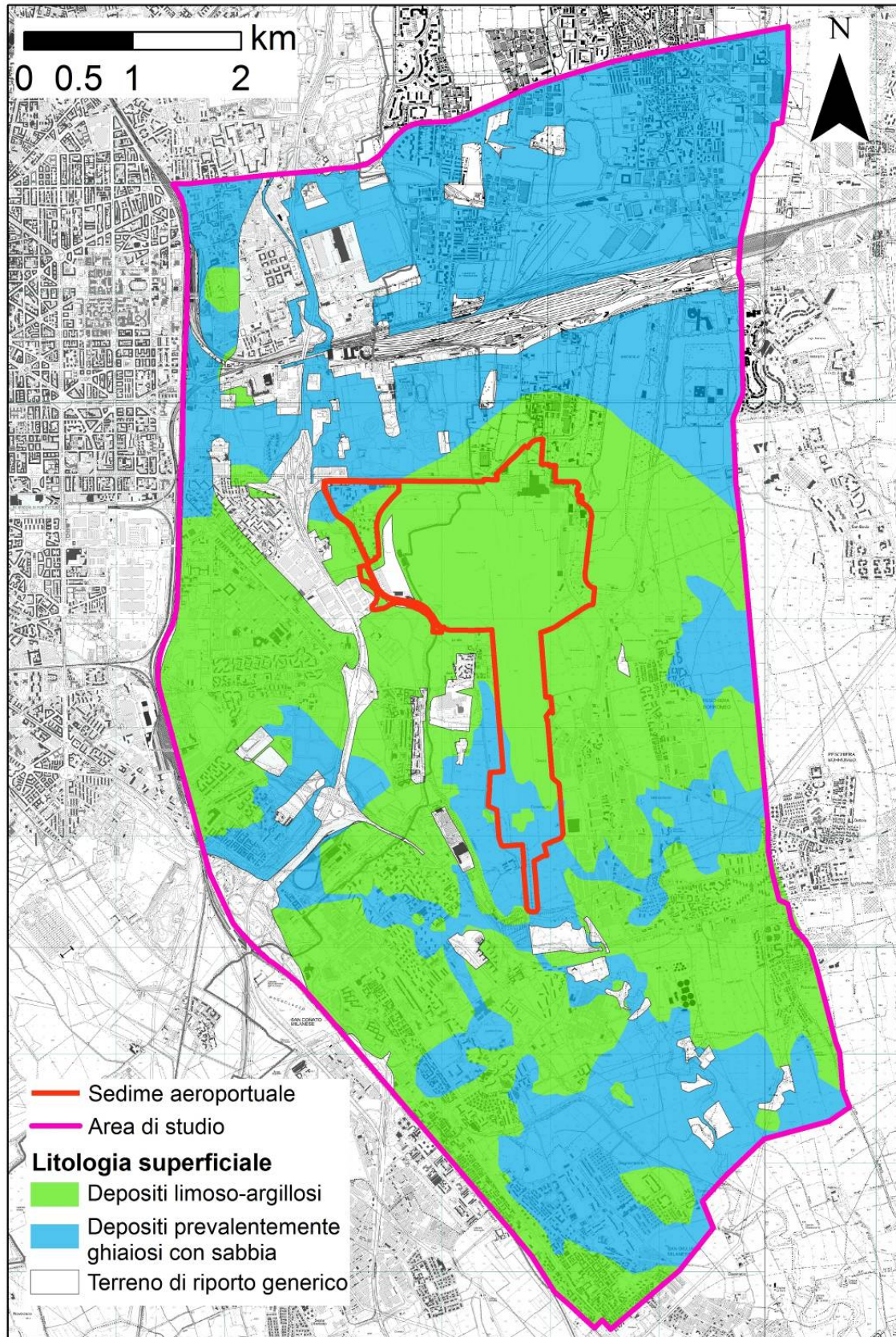


Figura 20. Litologie superficiali (immediatamente sotto il suolo) dell'area studiata.

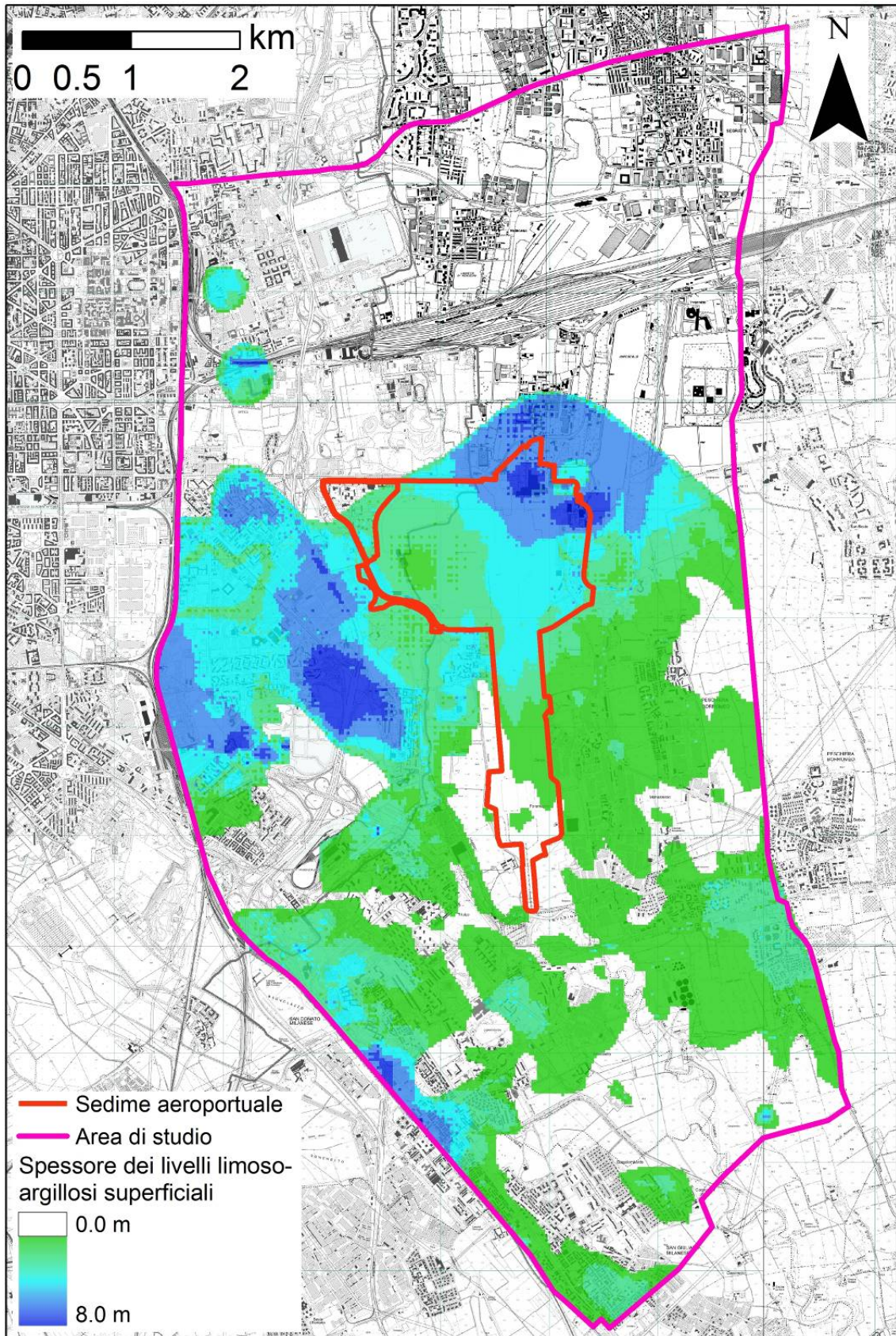


Figura 21. Spessore dei depositi limoso-argillosi superficiali.

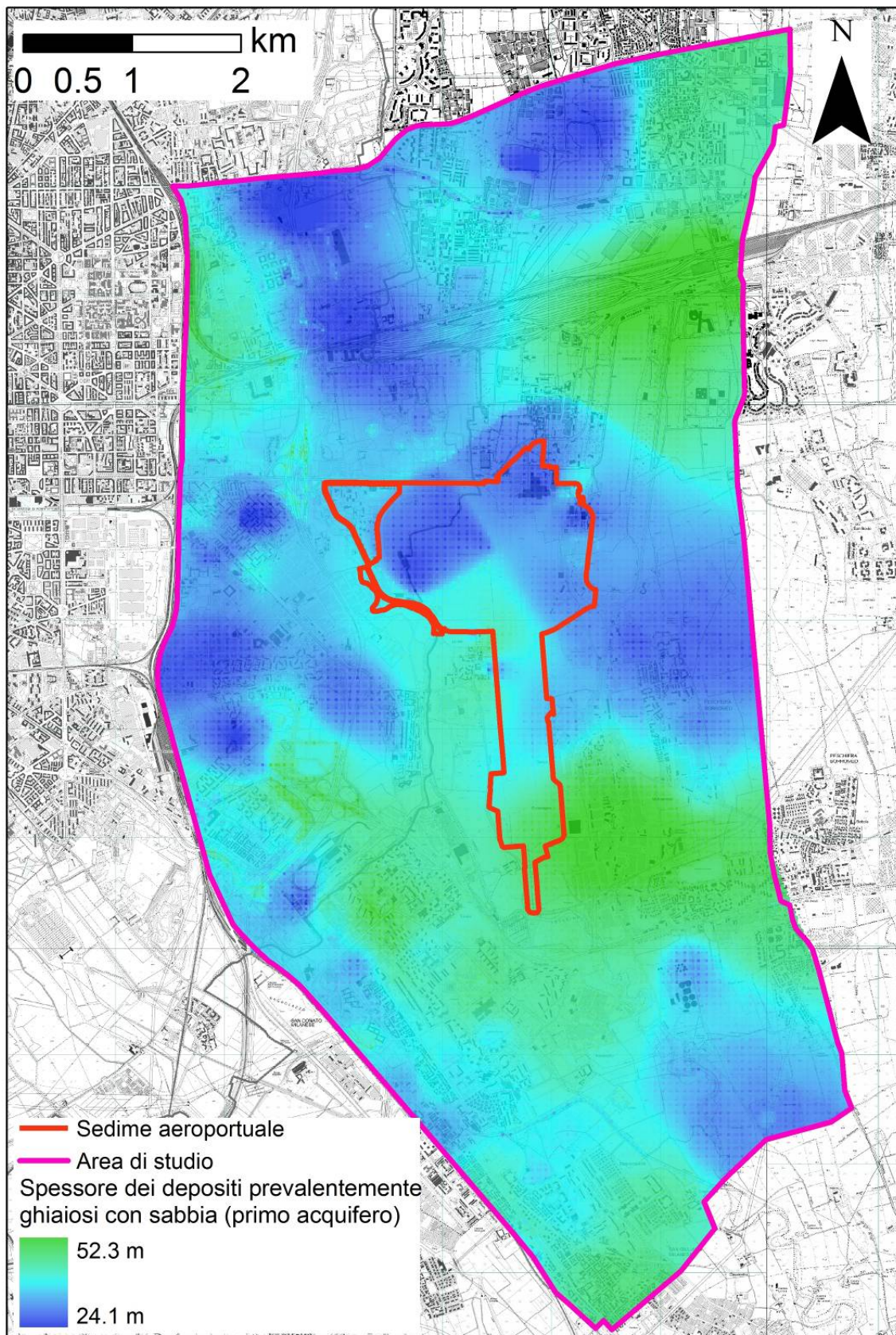


Figura 22. Spessore dei depositi prevalentemente ghiaiosi con sabbia (primo acquifero).

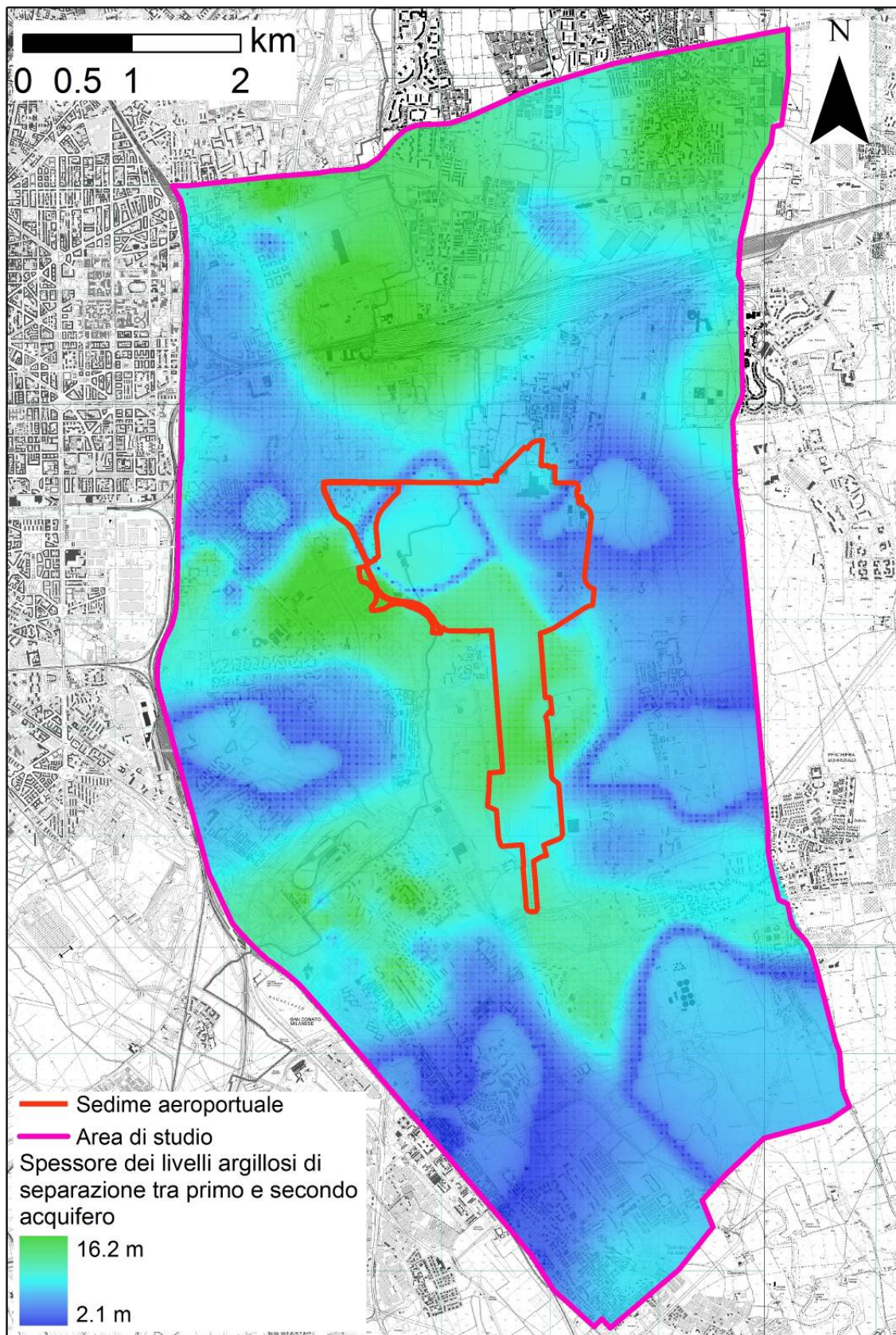


Figura 23. Spessore dei livelli argillosi di separazione tra primo e secondo acquifero.

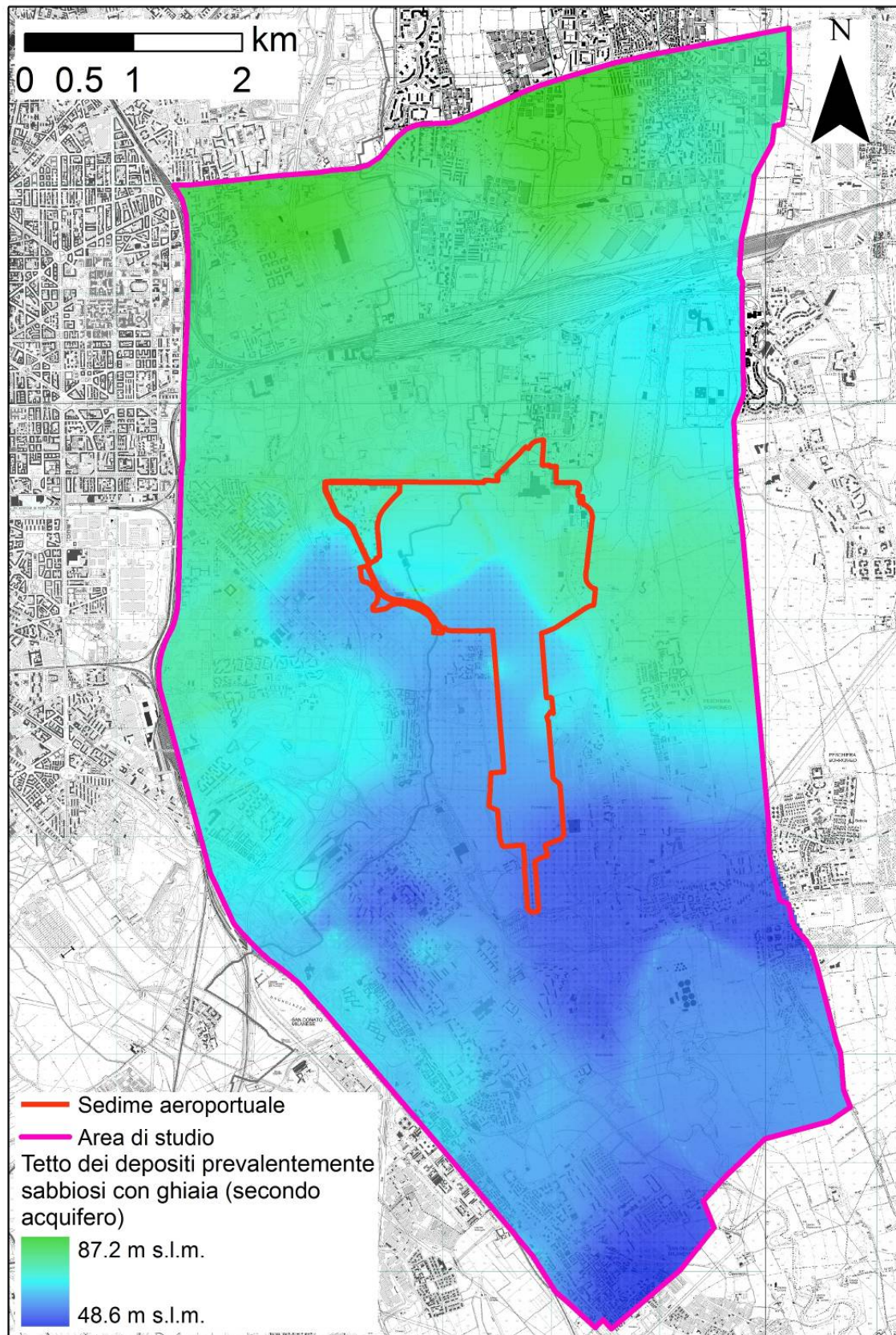


Figura 24. Profondità del tetto dei depositi prevalentemente sabbiosi con ghiaia (secondo acquifero).

In corrispondenza del sedime di Milano Linate, la litologia superficiale è prevalentemente limoso-argillosa, con la presenza di materiali ghiaiosi con sabbie subordinate soltanto nel settore più

meridionale del sedime. E' inoltre presente, nell'estremità occidentale del sedime, un settore con prevalenti terreni eterogenei di riporto.

Il tetto dei depositi a prevalente componente ghiaiosa con sabbie subordinate, costituenti il primo acquifero dell'area studiata, è localizzato a quote comprese tra 91.8 e 121.5 m s.l.m. Sia il tetto che la base di questo acquifero tendono a immergere debolmente verso S-SE. Lo spessore di questi depositi è sempre superiore a 24 m, raggiungendo in alcuni settori valori oltre i 50 m (Fig. 22). In corrispondenza del sedime aeroportuale, lo spessore dei livelli del primo acquifero varia significativamente.

Esso è generalmente inferiore a 35 m nell'area settentrionale del sedime e cresce intorno a 40-50 m nei settori centro-meridionali di questo. Il primo acquifero individuato nell'area studiata corrisponde al Gruppo Acquifero A individuato a scala regionale da Regione Lombardia & ENI (2002). Nell'area studiata, esso è costituito da depositi ghiaiosi grossolani, all'interno dei quali sono presenti subordinati corpi sabbiosi, localmente costituenti livelli di spessore inferiore ai 2 m.

Sottostanti ai depositi a prevalente componente ghiaiosa con sabbie subordinate, costituenti il primo acquifero, sono presenti, in maniera continua in tutta l'area studiata, dei livelli fini a prevalente componente argillosa, il cui spessore varia da circa 2 m ad oltre 16 m sia all'interno che all'esterno del sedime aeroportuale (Fig. 23). Questi livelli, la cui presenza e continuità verticale e laterale era già stata sottolineata in Provincia di Milano (1995), costituiscono gli orizzonti di separazione tra il primo ed il secondo acquifero dell'area (Fig. 25).

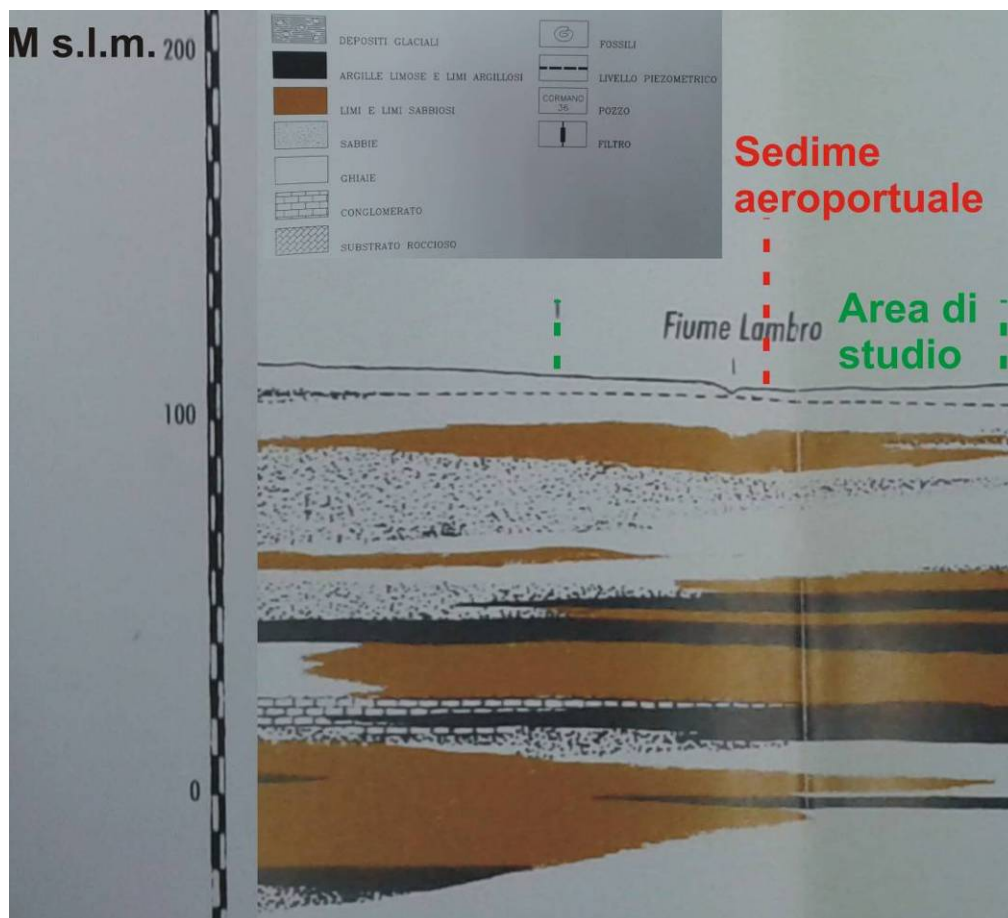


Figura 25. Sezione litostratigrafica in corrispondenza dell'area studiata, modificata da Provincia di Milano (1995). Si nota la continuità degli orizzonti fini di separazione tra primo e secondo acquifero, a profondità comprese tra 85 e 100 m s.l.m.

Il secondo acquifero dell'area è formato da depositi, sottostanti questi livelli argillosi di separazione, a prevalente componente sabbiosa, con subordinati livelli ghiaiosi.

Data la presenza continua degli orizzonti argillosi di separazione al tetto del secondo acquifero, esso presenta nell'area di indagine delle caratteristiche di tipo confinato. Il tetto del secondo acquifero si incontra a quote comprese tra 48.6 e 87.2 m s.l.m. (Fig. 24). Rispetto al piano campagna, la profondità di questo è compresa tra -40 e -70 m dalla superficie. In corrispondenza del sedime aeroportuale, la profondità del tetto del secondo acquifero è compresa tra -45 e -60 m dal piano campagna.

Dato il limitato numero di stratigrafie (15% del totale) che hanno investigato l'intero sviluppo verticale del secondo acquifero, non è stato possibile ricostruire, in maniera continua, la geometria dei depositi che lo formano. Laddove sono presenti informazioni sufficientemente dettagliate, si nota come, sia all'interno che all'esterno del sedime aeroportuale, lo spessore di questo acquifero sia dell'ordine di 16-25 m, delimitato alla base da livelli a prevalente componente argillosa simili a quelli di separazione tra il primo ed il secondo acquifero.

Il secondo acquifero individuato nell'area studiata corrisponde ad uno dei corpi che fanno parte del più esteso Gruppo Acquifero B, individuato a livello regionale da Regione Lombardia ed ENI (2002). Nell'area studiata, esso è formato da prevalenti depositi sabbiosi, con intercalati livelli di ghiaie generalmente di spessore inferiore ai 5 m. E' inoltre opportuno sottolineare la presenza di livelli a litologia fine (limoso-argillosa), che localmente, laddove sono più spessi, possono suddividere il secondo acquifero in più corpi.

10.3 Sezioni litologiche rappresentative

A partire dal modello del sottosuolo ottenuto, sono state ricostruite 8 sezioni litologiche, in modo da rappresentare la geometria verticale e laterale dei principali depositi individuati.

3 di queste sezioni hanno andamento nord-sud, mentre le restanti 5 hanno andamento ovest-est (Fig. 26). Ad eccezione della sezione DD' e HH', le sezioni passano per diversi settori del sedime aeroportuale, al fine di rappresentare l'andamento litologico in corrispondenza di quest'area (Fig. 26).

Le diverse sezioni ricostruite (da Fig. 27 a Fig. 34) permettono di integrare la visione d'insieme dei depositi presenti nell'area indagata, descritta nel capitolo 10.2.

Da queste sezioni, si conferma la presenza di discontinui livelli limoso-argillosi superficiali di spessore generalmente inferiore a 8 m. Questi depositi sembrano caratterizzare in maniera estesa i depositi più superficiali del sedime aeroportuale.

I depositi a ghiaie prevalenti con subordinate sabbie, che costituiscono il primo acquifero, sono incontrati fin dalla superficie in numerose zone dell'area, in particolare a N del sedime (sezione DD'; Fig. 30).

Nelle altre zone, essi si incontrano immediatamente al di sotto dei livelli limoso-argillosi superficiali. Come si evince dalle sezioni a direzione nord-sud (da Fig. 27 a Fig. 29) il loro spessore tende leggermente ad aumentare verso S-SE.

I depositi limoso-argillosi che si trovano alla base del primo acquifero ghiaioso sono continui lateralmente, seppure con spessori diversi nell'area indagata.

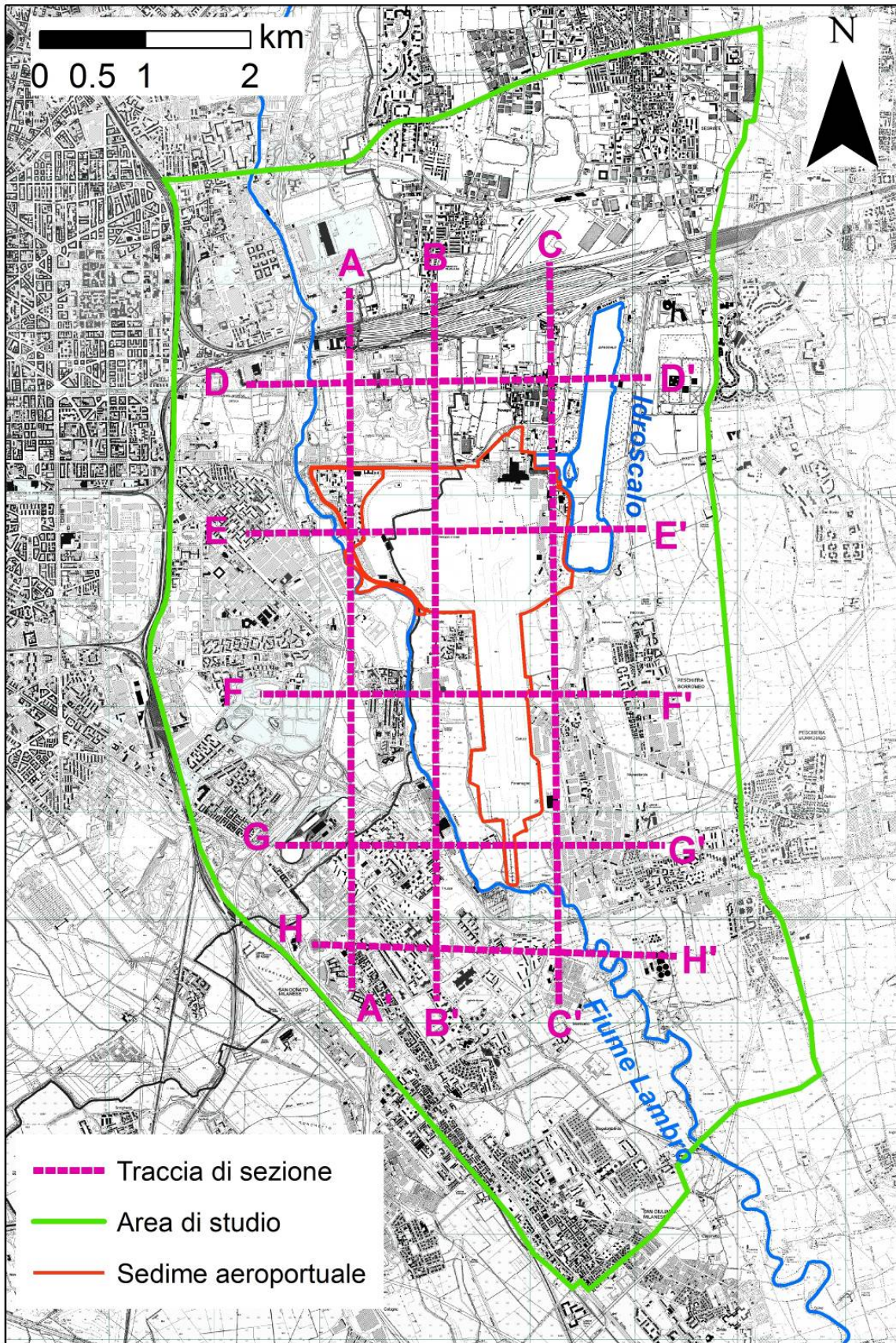


Figura 26. Traccia delle sezioni litologiche ricostruite.

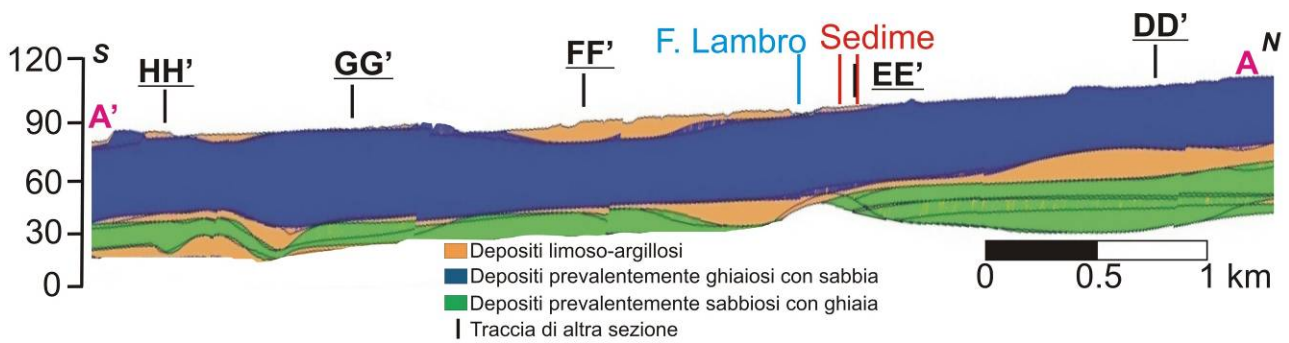


Figura 27. Sezione AA'.

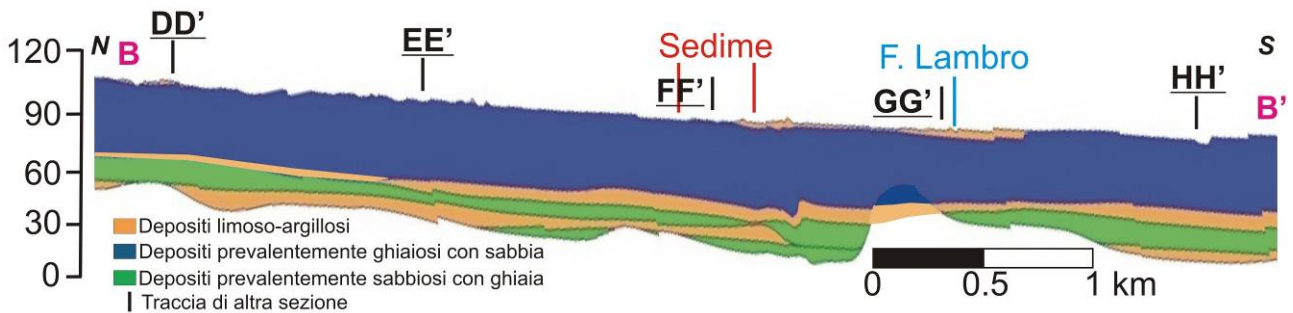


Figura 28. Sezione BB'.

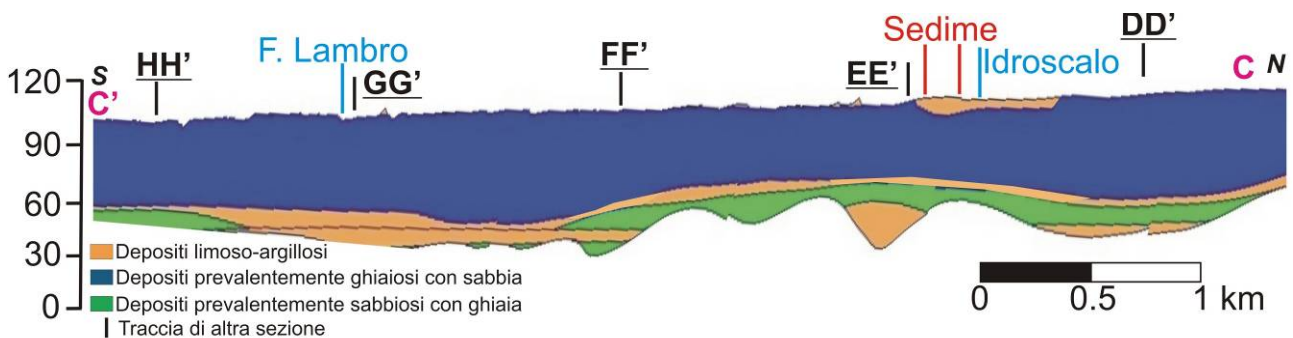


Figura 29. Sezione CC'.

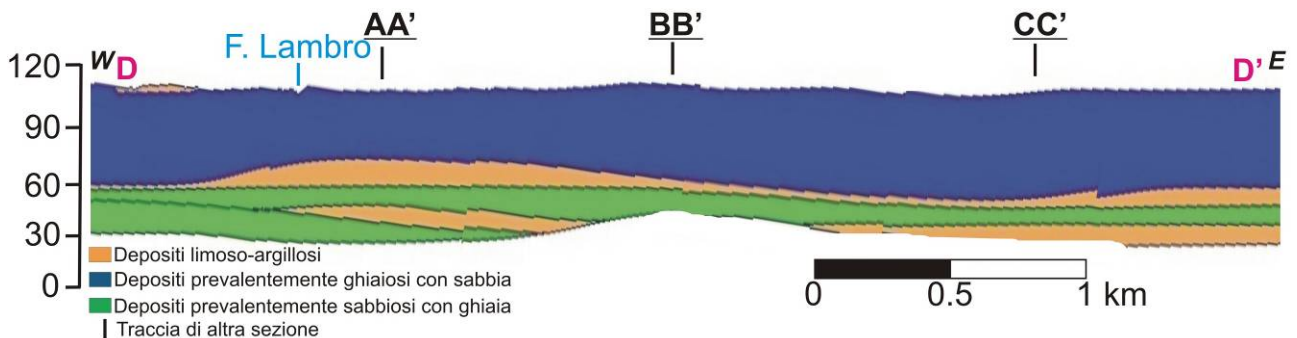


Figura 30. Sezione DD'.

Al di sotto di questi materiali, sono presenti i depositi del secondo acquifero dell'area, costituito da sabbie prevalenti con subordinate ghiaie. Anche se non è stato possibile ricostruire l'andamento verticale completo di questi depositi fino alla loro base, dalle sezioni ricostruite si nota la presenza di una facies diversa.

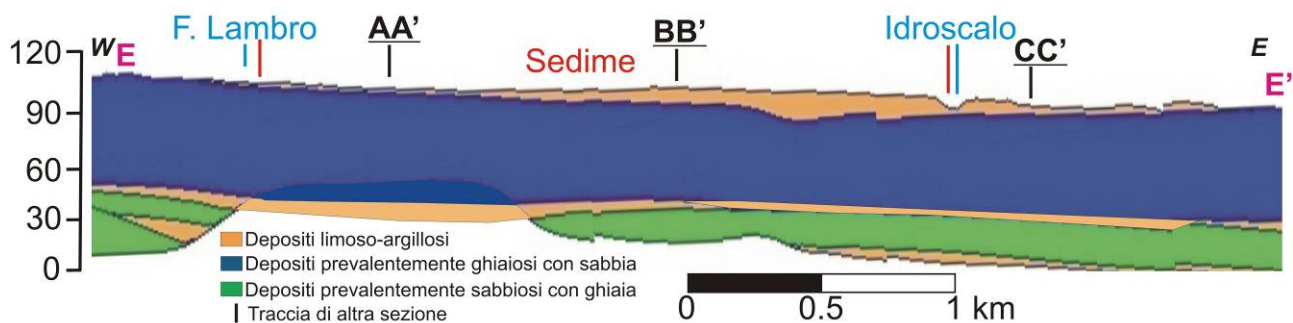


Figura 31. Sezione EE'.

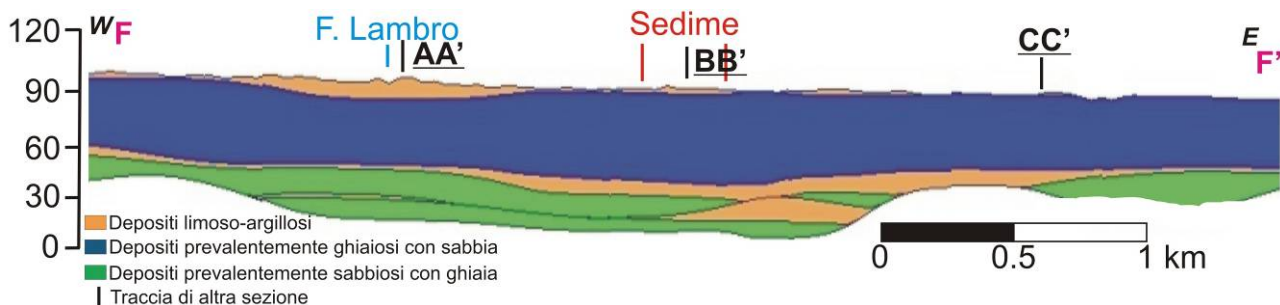


Figura 32. Sezione FF'.

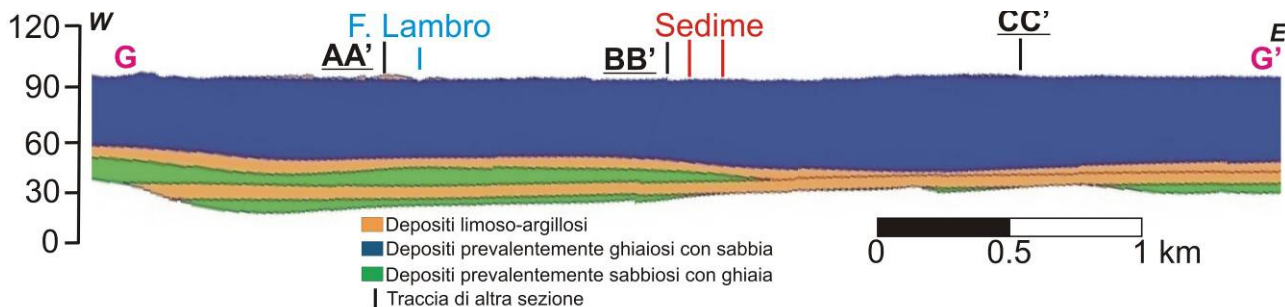


Figura 33. Sezione GG'.

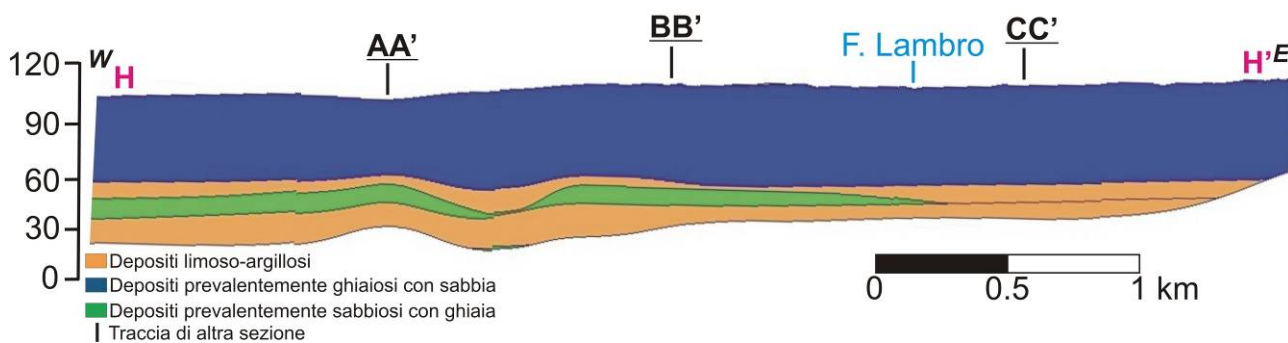


Figura 34. Sezione HH'.

Infatti, a differenza dei depositi a ghiaie prevalenti del primo acquifero e degli orizzonti limoso-argillosi di separazione tra primo e secondo acquifero, che sono continui in tutta l'area studiata, si nota come i depositi a sabbie prevalenti del secondo acquifero si chiudono lateralmente in alcune zone dell'area indagata contro lenti di materiale più fine, prevalentemente limoso-argilloso (es. sezione CC', Fig. 29; sezione GG', Fig. 33; sezione HH', Fig. 34).

Questa particolare facies dei depositi del secondo acquifero era già stata messa in luce in Provincia di Milano (1995), e viene confermata da una delle sezioni litologiche presenti in questa pubblicazione, di cui è presente uno stralcio in Fig. 25.

In conclusione, il modello litologico 3D del sottosuolo realizzato ha permesso di ricostruire le geometrie delle principali litologie presenti nel sedime aeroportuale e nel resto dell'area di indagine. Questi dati sono particolarmente utili per la caratterizzazione del sottosuolo dell'area studiata, fondamentale base per la realizzazione di nuove opere all'interno del sedime.

11. Caratteristiche geotecniche e di permeabilità dei terreni

11.1 Caratteristiche geotecniche dei depositi superficiali

La caratterizzazione geotecnica dei litotipi presenti nel livello più superficiale del sottosuolo al di sotto del sedime permette di ottenere importanti indicazioni circa le caratteristiche dei materiali sui quali verranno fondate e realizzate le nuove opere in programma nel Masterplan di Milano Linate. I parametri geotecnici caratteristici sono stati assegnati a partire da prove *in situ* ed in laboratorio, che hanno indagato i materiali fino ad una profondità di 20 m dal piano campagna.

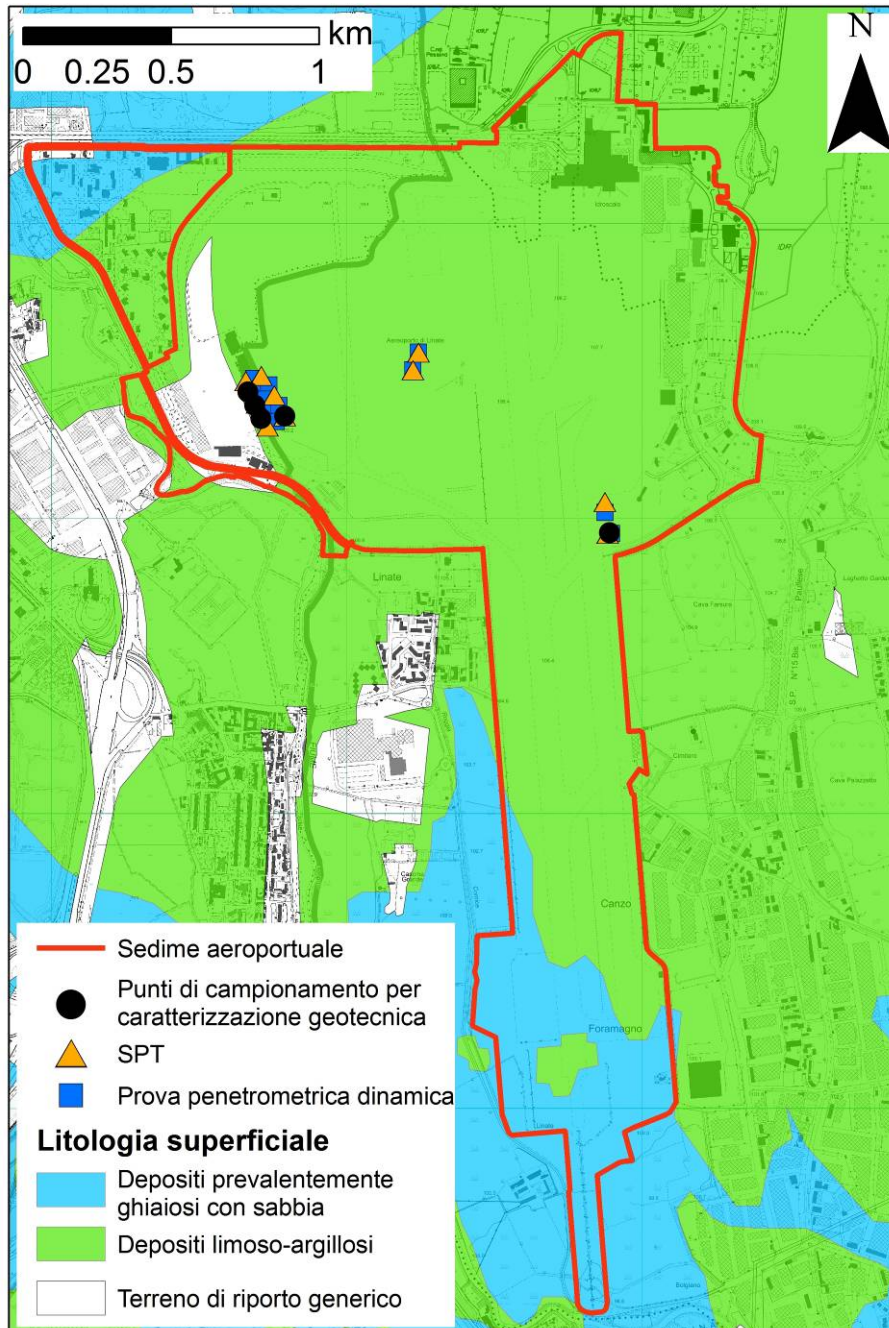


Figura 35. Indagini considerate per la caratterizzazione geotecnica dei terreni nell'area di Linate e litologie superficiali presenti immediatamente al di sotto del suolo o delle opere antropiche di superficie.

I dati di queste prove sono stati raccolti da vari studi realizzati in passato nell'area aeroportuale (Technital, 2007; SAB, 2012; Archeogeos, 2014; Elletipi, 2016).

Come si evince dalla distribuzione delle indagini considerate (Fig. 35), tutte queste sono state eseguite in corrispondenza di settori del sedime per cui il modello geologico 3D del sottosuolo (capitolo 10) ha individuato la presenza, immediatamente al di sotto del suolo o delle opere antropiche di superficie, di livelli limoso-argillosi di spessore compreso tra 2 e 8 m. Al di sotto di questi orizzonti, lo stesso modello ha ricostruito la presenza di depositi a prevalente componente ghiaiosa con subordinati livelli sabbiosi, costituenti il primo acquifero dell'area studiata. Questa situazione stratigrafica è la più diffusa nell'area aeroportuale. Non sono presenti punti di indagine nelle aree del sedime dove, mancando i livelli limoso-argillosi superficiali, i depositi grossolani del primo acquifero sono presenti fin al di sotto della superficie, per tutti i primi 20-25 m di profondità. Alla luce di questa situazione, sono stati assegnati i valori caratteristici dei principali parametri geotecnici ai due litotipi che si possono incontrare nei primi 20 m dal piano campagna (depositi limoso-argillosi; depositi a ghiaia prevalente con sabbia) nell'area del sedime.

Le analisi geotecniche di laboratorio considerate sono state eseguite seguendo la normativa American Standard Test and Methods (ASTM, 1988)

E' stato assegnato, come valore tipico di un certo parametro, il valore medio tra i risultati dei diversi campioni. E' stata anche calcolata la deviazione standard (sd), come stima della omogeneità dei diversi campioni analizzati. E', tuttavia, opportuno sottolineare il numero limitato di campioni analizzati per ciascuna litologia (15 per i depositi a ghiaia prevalente con sabbia, 2 per i depositi limoso-argillosi) ed il fatto che i punti di campionamento dei terreni siano concentrati in pochi punti del sedime, senza essere distribuiti in maniera omogenea al suo interno (Fig. 35).

In Tab. 10 vengono riassunti i valori caratteristici dei principali parametri geotecnici misurati.

I due litotipi analizzati si distinguono immediatamente per la composizione granulometrica. Per entrambe le litologie, la deviazione standard di ciascuna classe granulometrica è relativamente bassa rispetto al valore medio, indicando una omogeneità tra i diversi campioni analizzati.

Altro carattere distintivo è rappresentato dai valori dei limiti di Atterberg. Pur essendo entrambi classificabili, come classificazione Unified Soil Classification System (USCS), come terreni a bassa plasticità (CL), i terreni a prevalente componente limoso-argillosa hanno valori di limite liquido (w_L), limite plastico (w_P) ed indice plastico (I_P) significativamente più alti rispetto ai terreni a ghiaia prevalente.

Questo è legato alla maggiore percentuale di materiali fini presente nei terreni con limo e argille prevalenti. Come già visto per le caratteristiche granulometriche, la deviazione standard di questi parametri è relativamente bassa rispetto al valore medio.

Per il litotipo a ghiaie prevalenti, sono stati anche misurati i parametri di densità, tramite campioni di terreno indisturbati, e di resistenza al taglio di picco del terreno, attraverso prove di taglio diretto eseguite in condizioni drenate in un range di pressione verticale tra 100 e 300 kPa.

Il peso di volume (γ) ed il peso di volume secco (γ_d) hanno un valore medio rispettivamente di 16 e 14.5 kN/m³. Il valore medio dell'angolo di attrito di picco (ϕ') è di 33°, mentre quello della coesione efficace (c') è di 2.8 kPa. Il valore medio di c' sembra non essere del tutto rappresentativo, data anche l'alta deviazione standard rispetto al valore medio.

Per la litologia a prevalente componente limoso-argillosa, i parametri di densità e di resistenza al taglio del terreno non sono stati misurati. Tuttavia, a partire dalle caratteristiche granulometriche di

questi materiali, è possibile assegnare, da letteratura (Waltham, 1994; Sarsby, 2000), i seguenti valori caratteristici: γ di 18 kN/m^3 ; γ_d di 16 kN/m^3 ; φ' di 25° ; c' di 3 kPa .

		Ghiaia (%)	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	w_L (%)	w_P (%)	I_P (%)	γ (kN/m^3)	γ_d (kN/m^3)	φ' ($^\circ$)	c' (kPa)
1	campioni	15	15	15	15	3	3	3	2	2	2	2
	media	57	35	7	1	57.9	27.7	7.6	16.0	14.5	33	2.8
	sd	12	16	6	1	0.5	0.8	1.3	0.3	0.6	1	2.3
2	campioni	2	2	2	2	2	2	2	-	-	-	-
	media	0	12	59	29	57.9	27.7	30.6	18.0*	16.0*	25*	3.0*
	sd	0	2	5	3	0.5	0.7	0.5	-	-	-	-

Tabella 10. Valori caratteristici dei parametri geotecnici per le litologie analizzate: 1) depositi a prevalente componente ghiaiosa con sabbie; 2) depositi a prevalente componente limoso-argillosa. *Dati da letteratura

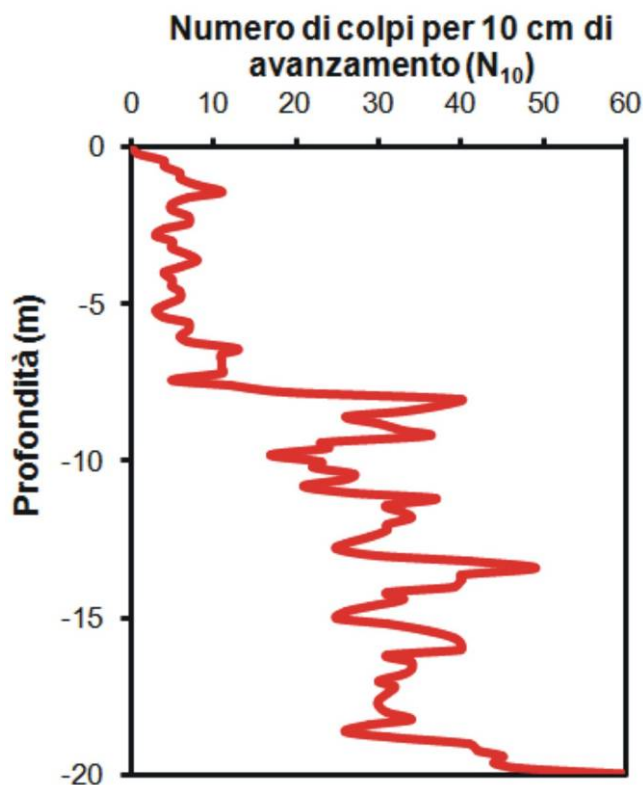


Figura 36. Andamento, lungo i primi 20 m di profondità, del numero di colpi misurato ogni 10 cm di avanzamento della punta nel terreno (N_{10}) per prove penetrometriche dinamiche, per i terreni del sedime aeroportuale.

Sono state anche analizzate 13 prove penetrometriche dinamiche realizzate nell'area del sedime aeroportuale (Fig. 35). Queste prove si sono spinte a profondità comprese tra 10 e 20 m, permettendo di integrare la caratterizzazione geotecnica mediante le prove di laboratorio. In Fig. 36, si riporta il profilo medio di andamento del numero di colpi misurato ogni 10 cm di avanzamento della punta nel terreno (N_{10}), ottenuto integrando i dati relativi alle varie prove analizzate.

Bassi valori di N_{10} (< 20) sono presenti fino a circa 8 m di profondità, indicando terreni poco addensati. A profondità maggiori di 8 m, il grado di addensamento dei depositi materiali tende a crescere, testimoniato da un significativo aumento di N_{10} ben oltre i 20. La relativa omogeneità dei materiali, dal punto di vista del comportamento alla penetrazione dinamica, è anche confermato da valori di deviazione standard, riferiti a ciascuna profondità di misura (ogni 0.2 m), bassi, inferiori a N_{10} pari a 4.

In corrispondenza di 10 dei sondaggi realizzati all'interno del sedime aeroportuale (Fig. 35), sono state eseguite delle prove Standard Penetration Test (SPT), secondo intervalli regolari di circa 1-1.5 m. La prova SPT consente di determinare la resistenza che un terreno offre alla penetrazione dinamica di un campionatore o di una punta infissa nel terreno, a partire dal fondo del foro di sondaggio che si sta effettuando. Per le modalità e le attrezzature di prova, si fa riferimento alla normativa standard ASTM (ASTM, 1988).

Le prova SPT sono importanti anche perchè i loro dati possono essere usati per ottenere altre proprietà dei terreni molto utili a fine applicativo, attraverso alcune correlazioni empiriche. Le più utilizzate di queste correlazioni consentono di ricavare il potenziale di liquefazione, la densità relativa, l'angolo di attrito (Colombo e Colleselli, 2004).

Data l'importanza che queste prove possono assumere, si riportano, in Fig. 37, gli andamenti lungo la verticale del numero di colpi della prova SPT, mediato sui 30 cm di avanzamento della punta nel terreno (N_{SPT}), misurato per tutte le prove considerate, e il suo trend medio.

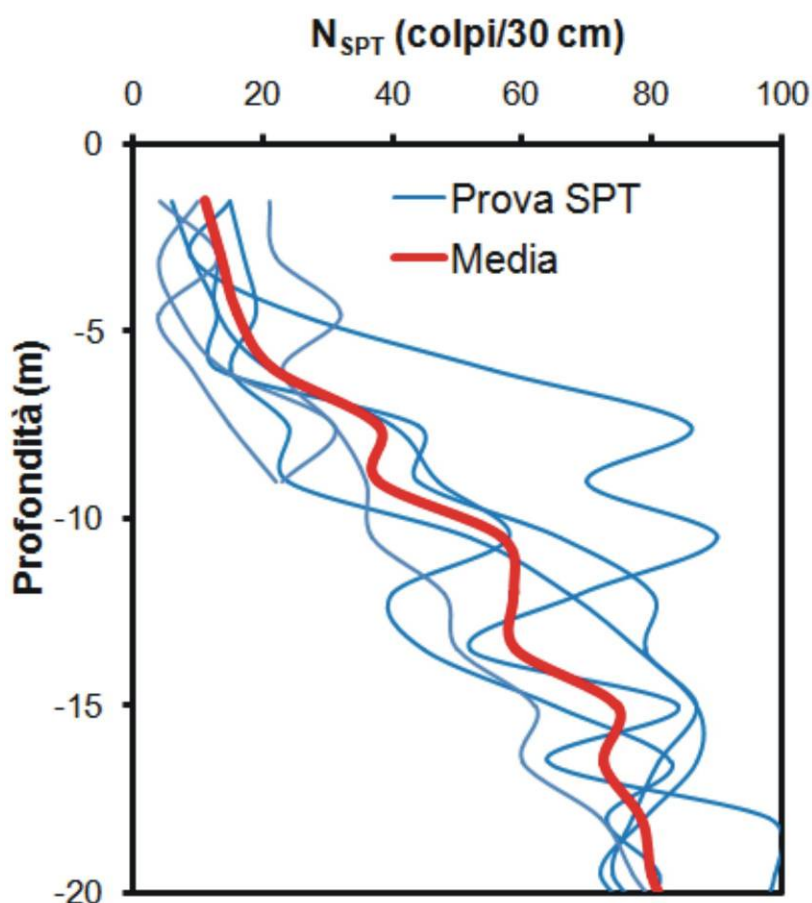


Figura 37. Andamento lungo i primi 20 m di profondità di N_{SPT} per le prove effettuate nel sedime aeroportuale.

L'andamento di N_{SPT} nei primi 20 m dal piano campagna mostra come tale parametro cresca in maniera significativa al di sotto dei 5-6 m dal piano campagna, passando da valori mediamente minori di 30 a valori superiori a 30, fino a più di 80 a circa 20 m dal piano campagna (Fig. 37).

I valori di N_{SPT} misurati nei primi 5-6 m dal piano campagna indicano la presenza di materiali a grana fine. Tutte le prove analizzate, infatti, sono state realizzate in corrispondenza di settori del sedime dove sono presenti depositi superficiali limoso-argillosi.

Gli elevati valori di N_{SPT} (generalmente maggiore di 50) negli orizzonti più profondi confermano, invece, la presenza di materiali più grossolani, a predominante componente ghiaiosa. A profondità tra 5 e 20 m dal piano campagna, locali valori dell'ordine dei 35-40 indicano probabilmente la presenza di sottili livelli a maggiore componente sabbiosa, intercalati alla predominante matrice ghiaiosa.

I valori dei parametri di laboratorio e di campo ottenuti da questa caratterizzazione sono mediamente caratteristici per le due litofacies presenti nei primi 20 m dell'area studiata (depositi a ghiaie prevalenti; depositi superficiali a prevalente componente limoso-argillosa). Tuttavia, per una migliore caratterizzazione sito-specifica, è opportuno che altre indagini geognostiche e geotecniche siano realizzate in corrispondenza di eventuali opere in programma, durante la fase di progetto e realizzazione.

11.2 Permeabilità del primo acquifero

In data 12 Ottobre 2016 sono stati realizzate, su alcuni piezometri nell'area del sedime aeroportuale di Linate (Fig. 38), alcune prove per la determinazione della permeabilità dei terreni ospitanti la prima falda del locale sottosuolo.

Le prove, realizzate tramite la tecnica degli *slug test*, sono state eseguite in alcuni piezometri (Pz1A e Pz3A) presso un costruendo hangar nell'area nord-occidentale dell'aeroporto e presso l'area ecologica localizzata nel settore nord-orientale della medesima area aeroportuale (piezometri S1d, S2d e S3d).

Le caratteristiche tecniche dei piezometri utilizzati per questa tipologia di test sono riportati in Tab. 11.

Piezometro	Diametro mm	Profondità m	Prof. inizio filtri m	Prof. fine filtri m	Spessore filtrato m
Pz1a	50.8	15.0	3.0	15.0	12.0
Pz3a	50.8	15.0	3.0	15.0	12.0
S1d	101.6	7.1	3.0	7.1	4.1
S2d	101.6	7.1	3.0	7.1	4.1
S3d	101.6	7.1	3.0	7.1	4.1

Tabella 11. Caratteristiche tecniche dei piezometri utilizzati per le prove di permeabilità.

Uno *slug test* consiste nel provocare una variazione istantanea (perturbazione) del livello piezometrico, normalmente in un foro di sondaggio, o comunque in un foro di non grande diametro (per esempio un piezometro) e nella misura del tempo necessario per il successivo ripristino delle condizioni iniziali. Il metodo operativamente più semplice consiste nell'introduzione o estrazione di un volume noto di acqua nel foro di prova. A parità di volume la velocità di ripristino sarà

direttamente correlata alla permeabilità del deposito testato. Le prove possono essere effettuate sia a carico crescente che a carico decrescente.

Per creare la variazione istantanea del livello piezometrico è stato scelto il metodo dell'inserimento istantaneo di un solido (*bailer*). In relazione ai differenti diametri dei piezometri (50.8 mm e 101.6) per le prove di permeabilità sono stati utilizzati due *bailer* con dimensioni differenti.

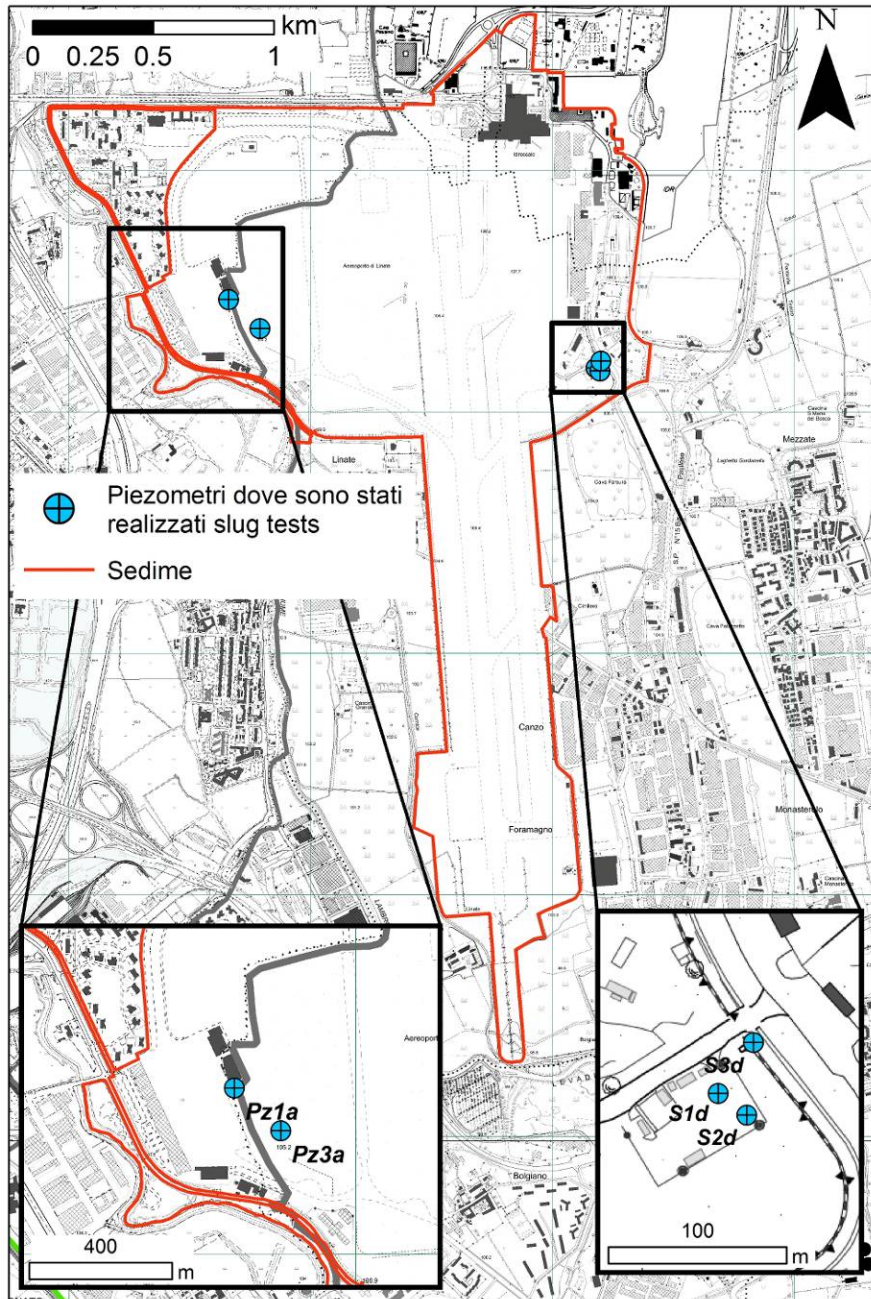


Figura 38. Ubicazione dei piezometri nei quali sono stati realizzati gli slug tests.

Per i piezometri Pz1a e Pz3a il *bailer* utilizzato possiede un diametro di 34 mm mentre per le prove realizzate nei piezometri S1D, S2D e S3D il *bailer* utilizzato possiede un diametro di 70 mm. Entrambi i *bailer* utilizzati possiedono una lunghezza di 3 m (Fig. 39).



Figura 39. Bailer utilizzati per le prove. A sinistra quello utilizzato per i piezometri Pz1a e Pz3a, a destra quello utilizzato per i piezometri S1d, S2d e S3d.

Per la determinazione delle variazioni del livello piezometrico è stato utilizzato un Mini Diver dataloggers della olandese Van Essen (Gruppo Schlumberger) (Fig. 40).

La scansione di acquisizione dei dati di pressione della colonna d'acqua (cm H₂O), dopo aver calato il dataloggers alla base del piezometro, è stata di 0.5-1.0 s. I driver utilizzati sono Office della Schlumberger 2014 e Aquifer Test Pro 4.1 della Waterloo Hydrogeologic software.

Le metodologie utilizzate per la determinazione della permeabilità del primo acquifero si riferiscono a quelle messe a punto da Bouwer e Rice (1976) e Hvorslev (1951).

La prima è praticamente applicabile a qualsiasi situazione (acquifero libero o confinato, penetrazione totale o parziale, carico crescente o decrescente, pozzi di piccolo o grande diametro).

La conducibilità idraulica K è determinata dalla seguente relazione (eq. 2):

$$K = \frac{r_c^2 \ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)}{2L_{fil}} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{H_0}{H_t}\right) \quad \text{eq. 2}$$

dove r_c , r_w , L_{fil} , H_0 e H_t sono le misure riportate in Fig. 41 sotto e R_e è il raggio d'influenza della prova.

Mentre per il metodo di Hvorslev (Fig. 42), la relazione da utilizzare per la determinazione della permeabilità è la seguente (eq. 3):

$$K = \frac{A}{F * T_{BR}} \quad \text{eq. 3}$$

dove A è la sezione del foro (piezometro), F è il coefficiente di forma (da tabelle), T_{BR} è tempo letto sull'asse dell'ascissa al valore di 0.37.



Figura 40. Inserimento del datalogger all'interno di un piezometro.

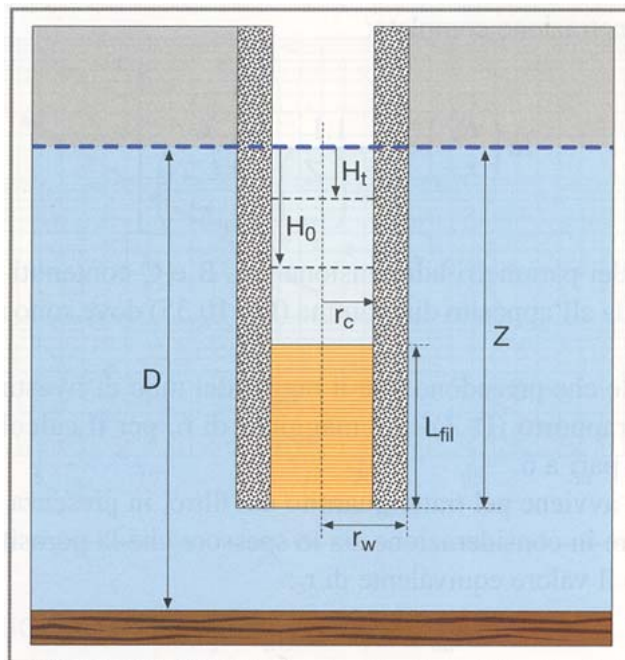


Figura 41. Metodo di Bouwer e Rice. Parametri da utilizzare per l'interpretazione della prova (da Civita, 2005).

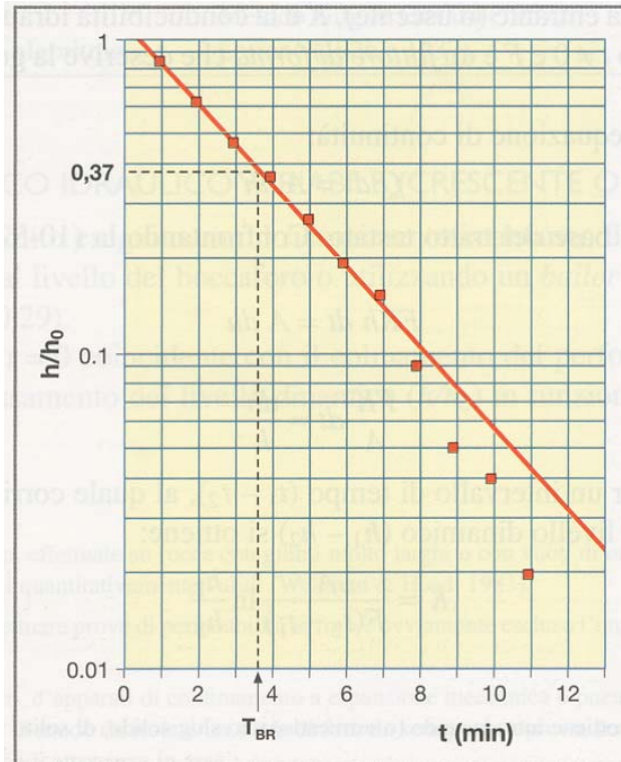


Figura 42. Esempio di diagramma abbassamenti normalizzati- tempo per l'interpretazione con il metodo di Hvorslev (da Civita, 2005).

I risultati delle prove, ottenuti mediante interpolazione dei dati tramite il software *Aquifer Test Pro 4.1* della *Waterloo Hydrogeologic software*, sono riportati in Tab. 11.

Piezometro	Bouwer & Rice m/s	Hvorslev m/s
Pz1a	1.74E-02	2.53E-02
Pz3a	4.06E-03	5.92E-03
S1d	7.00E-02	1.12E-01
S2d	2.59E-02	4.13E-02
S3d	4.41E-02	7.02E-02

Tabella 11. Valori di permeabilità in m/s calcolati tramite i due metodi di analisi considerati (Bouwer e Rice, 1976; Hvorslev, 1951).

Tra i due metodi utilizzati, quello che fornisce valori che maggiormente si avvicinano a quelli propri dell'acquifero, in condizioni di elevate permeabilità, è sicuramente quello di Bouwer e Rice (Butler Jr, 1997), anche se i valori determinati con il metodo di Hvorslev, come si evince dall'analisi della Tab. 11 non si discostano eccessivamente troppo dai precedenti. Ovviamente viste le condizioni di prova (prove molto rapide in terreni ad elevata permeabilità) e la non perfetta conoscenza delle tecniche operative adottate durante la realizzazione dei piezometri (specialmente incertezze relative alle operazioni di sviluppo dei medesimi piezometri), i dati ottenuti non possono che essere considerati come valori indicativi (non assoluti) della permeabilità dei terreni investigati.

In ogni caso, i valori di permeabilità calcolati sono dell'ordine di 10^{-3} - 10^{-2} m/s, comunque, perfettamente in linea con quelli valutabili per la tipologia dell'acquifero superficiale investigato (depositi a ghiaie prevalenti con livelli sabbiosi subordinati).

12. Aree caratterizzate da pericolosità idraulica e interventi previsti per ridurla

Il sedime aeroportuale di Milano Linate è lambito, a ovest (sponda sinistra), dal fiume Lambro. Questo fiume rappresenta il principale corso d'acqua della zona di studio. I corsi d'acqua del reticolo idrico artificiale, che scorrono all'interno del sedime e che sono il principale veicolo di allontanamento delle acque di prima pioggia che cadono sulle piste e sulle aree asfaltate del sedime, si immettono tutti nel Lambro, soprattutto in prossimità dell'area meridionale del sedime.

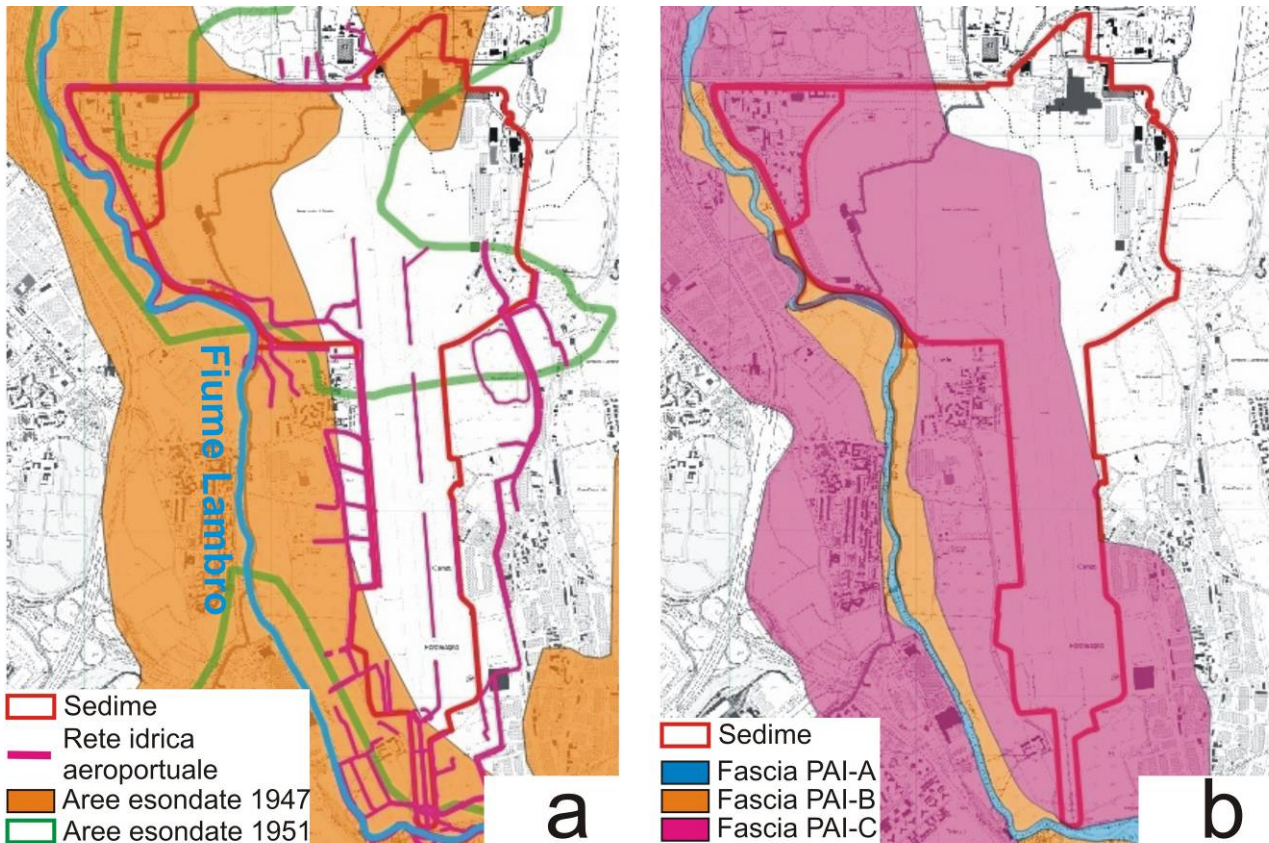


Figura 43. Esondazioni storiche del fiume Lambro nell'area del sedime di Milano Linate (fonte: Geoportale della Regione Lombardia) (a). Fasce PAI nell'area del sedime di Milano Linate (b).

Questo corso d'acqua è in grado di generare eventi di piena potenzialmente pericolosi per il prospiciente sedime, come testimoniato dalle esondazioni accadute nel 1947 e nel 1951 (Fig. 43a). Le fasce di possibile esondazione fluviale, definite secondo le direttive Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) a livello comunale nei PGT dei comuni della zona e disponibili sul Geoportale regionale lombardo, mostrano come il bordo occidentale del sedime ricade in prossimità di una fascia B, ovvero in aree di esondazione diretta e indiretta delle piene con tempo di ritorno T_R di 200 anni (Fig. 42b) del Fiume Lambro (sponda sinistra). Spostandosi verso est, la maggior parte dell'area aeroportuale è situata all'interno di una fascia C, ovvero in aree inondabili da eventi di piena catastrofici con T_R di 500 anni; Fig. 43b.

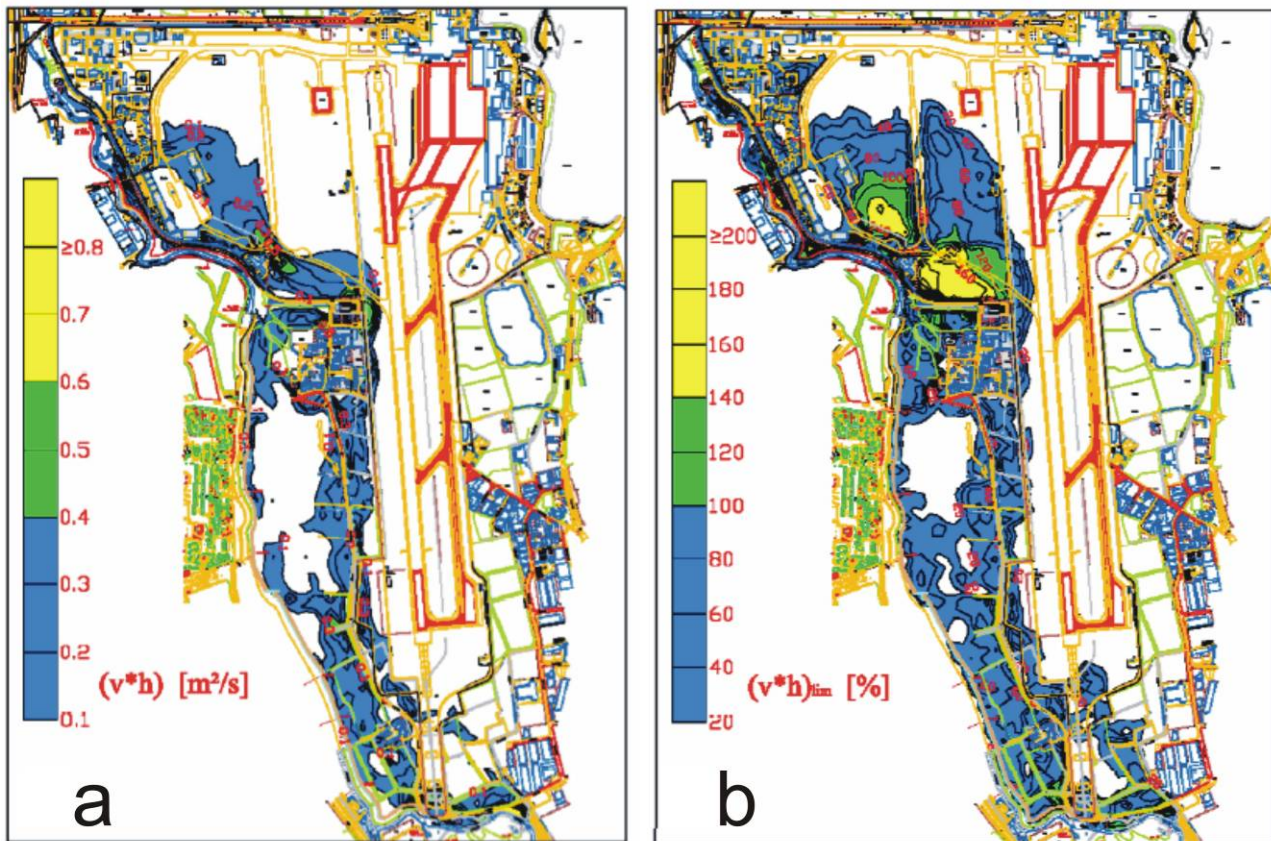


Figura 44. Allagamenti nell'area del sedime aeroportuale di Linate, per tempo di ritorno T_R di 200 anni (modificato da Politecnico di Milano, 2007). a) criterio AdBPo: le aree in verde e in giallo ($v \cdot h \geq 0.4$) indicano zone con possibili allagamenti; b) criterio Regione Lombardia: le aree in verde e in giallo ($h/h_{limite} > 100\%$) indicano zone con possibili allagamenti.

Lo studio commissionato da SEA al Politecnico di Milano nel 2007 (Politecnico di Milano, 2007), realizzato in conformità con le indicazioni del PAI, ha analizzato le condizioni di pericolosità idraulica dovute alle piene del fiume Lambro nel tratto in corrispondenza del sedime aeroportuale. L'analisi conferma le indicazioni a livello sovracomunale mostrate in Fig. 42b, mostrando come, per uno scenario di idrogramma di piena con tempo di ritorno T_R di 200 anni (portata fluviale pari a 205 m^3/s), il settore occidentale dell'area aeroportuale può essere effettivamente interessato da esondazione, in un'area più vasta rispetto alla fascia B definita a scala sovracomunale (Fig. 44). Questo risultato è stato ottenuto:

1. considerando il criterio di valutazione adottato dall'Autorità di Bacino del fiume Po-AdBPo: le aree potenzialmente allagabili sono quelle per cui il prodotto tra la velocità del flusso v e il tirante idraulico h è maggiore o uguale di 0.4 ($v \cdot h \geq 0.4$);
2. considerando il criterio adottato da Regione Lombardia: le aree potenzialmente allagabili sono quelle per cui il rapporto h modellato o misurato e h limite ad una certa v è maggiore del 100% ($h/h_{limite} > 100\%$).

Uno studio simile, realizzato da Franzetti (2009) per conto di ATA (ora PAS), ha evidenziato simili problematiche in corrispondenza anche della sponda destra del fiume Lambro, in corrispondenza del medesimo tratto analizzato nello studio del Politecnico di Milano (2007).

A partire dai risultati ottenuti da questi due studi e dalle loro proposte per ridurre la pericolosità idraulica di questo tratto di Lambro, sono stati progettati una serie di interventi volti a ridurre le possibili esondazioni dovute a piene di T_R i 200 anni che potrebbero interessare l'area del sedime aeroportuale di Milano Linate.

Il progetto definitivo di queste opere è stato definito nello studio di Franzetti et al. (2015), per conto di SEA Prime S.p.A. Le opere previste hanno lo scopo di ridurre la pericolosità idraulica, anche per T_R di 200 anni.



Figura 45. Differenza percentuale tra h/h_{limite} dopo le opere di miglioramento in progetto e h/h_{limite} della situazione attuale, per T_R di 200 anni. Si notano valori negativi che corrisponderebbero a una minore estensione delle aree inondabili.

Di seguito, si riportano gli interventi proposti:

- rimozione della traversa di Linate, che induce un artificiale innalzamento del pelo libero del Lambro;
- eliminazione di alberi ed arbusti, in alveo, sulle sue sponde e sui rilevati arginali;
- recupero di massi di riprap e di scogliera esistenti con pulizia dei rifiuti trasportati dalla corrente

- risezionamenti d'alveo, consistenti nell'abbassamento del fondo tra la traversa di Linate e il ponte Monluè e nell'allargamento delle sezioni di deflusso con adeguamento delle sommità arginali, così da ottenere un generalizzato abbassamento del pelo libero del Lambro;
- innalzamento del rilevato arginale in sponda destra a valle della traversa di Linate;
- ampliamento del bypass a pelo libero esistente in sponda destra al ponte di Monluè, così da abbassare il livello idrico a monte del ponte;
- protezioni spondali e di fondo con scogliere rinverdite e riprap, con particolare attenzione alle aree dove è più sensibile l'azione idrodinamica del fiume;
- sistemazione ambientale delle aree in sponda sinistra Lambro.

L'insieme di questi interventi è in fase di progettazione esecutiva.

Il progetto di realizzazione di queste sistemazioni è suddiviso in due fasi. La prima fase, della durata non superiore ad un anno, prevede la realizzazione degli interventi volti a ridurre l'altezza del pelo libero del Lambro e ad evitare esondazioni nell'area aeroportuale. La seconda fase, della durata non superiore a due anni, prevede il completamento delle opere previste.

Come si evince dalla carta di Fig. 45, le opere di sistemazione idraulica indurrebbero un netto miglioramento rispetto allo stato di fatto in termini di pericolosità per tutta l'area del sedime più prospiciente al fiume Lambro e, anche, per le zone inurbate in sponda destra del Lambro. In particolare, tali interventi hanno lo scopo di declassare le zone in fascia B del PAI, che ricadono all'interno del sedime, quanto meno in zone di fascia C, da concordare in seguito con l'Autorità competente.

Dalla carta di Fig. 45 si evince anche che gli interventi permettono di ridurre la pericolosità idraulica del Lambro lungo tutta la sua asta che è prospiciente al sedime aeroportuale, anche nell'area meridionale dove si immette il reticolato idrico che raccoglie le acque nelle zone asfaltate del sedime. Questo aspetto è importante e consente di evitare che un aumento delle aree impermeabili per pavimentazione, dovuto alle opere in progetto nel masterplan, possa provocare un aumento della pericolosità idraulica in queste zone.

13. Ricostruzione dell'andamento piezometrico della prima falda

13.1 Analisi di dati storici

Tra i pozzi ed i piezometri presenti nell'area di indagine, l'archivio dati più completo, tramite il quale poter analizzare il trend storico delle oscillazioni del livello piezometrico della prima falda, è relativo al piezometro 151461354, ubicato a circa 2 km a ovest del sedime aeroportuale (Fig. 57). L'intervallo temporale considerato copre il periodo Gennaio 1960-Ottobre 2016. I dati, misurati mensilmente, sono abbastanza discontinui fino ai primi anni 70 del secolo scorso, per poi diventare pressoché continui.

La serie storica delle misure del livello piezometrico misurato in corrispondenza di questo piezometro (Fig. 46) mostra una significativa diminuzione del livello della falda tra il 1960 ed il 1975 circa. Tale andamento è stato caratteristico per tutta l'area prospiciente a Milano in quegli anni, quando le risorse idriche sotterranee erano intensamente utilizzate anche per scopi industriali. Il livello della falda aumenta verso gli anni 80 del secolo scorso, crescendo di oltre 5 m in media in poco più di un decennio (da 91-92 m s.l.m. a 97-100 m s.l.m.). A partire dagli anni 90 dello scorso secolo, l'innalzamento della falda tende a rallentare, fino all'incirca ad arrestarsi. Attualmente, i livelli piezometrici si mantengono relativamente costanti con valori compresi tra 99 e 103 m s.l.m., con limitate oscillazioni stagionali che seguono l'andamento dei periodi umidi e secchi.

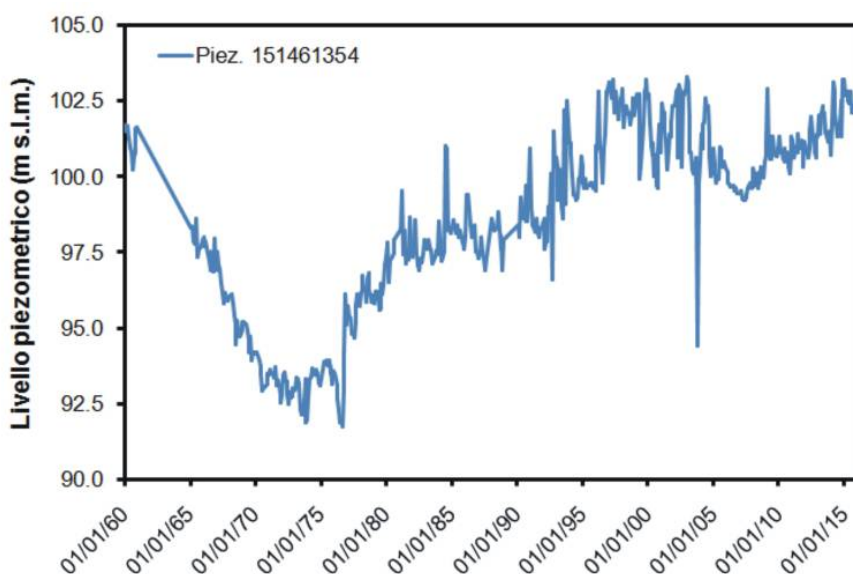


Figura 46. Serie storica dei livelli piezometrici monitorati per il periodo Gennaio 1960 - Marzo 2016 nel piezometro 151461354.

Per poter meglio analizzare le oscillazioni stagionali del livello piezometrico della falda nell'area di indagine, è stata analizzata la serie storica delle misure piezometriche mensili (2004-2016), misurate in due piezometri, situati all'incirca alla stessa quota (105-107 m), uno in riva idrografica sinistra (piezometro 151710197) ed uno in riva idrografica destra (piezometro 151461354) del fiume Lambro (Figg. 47 e 48).

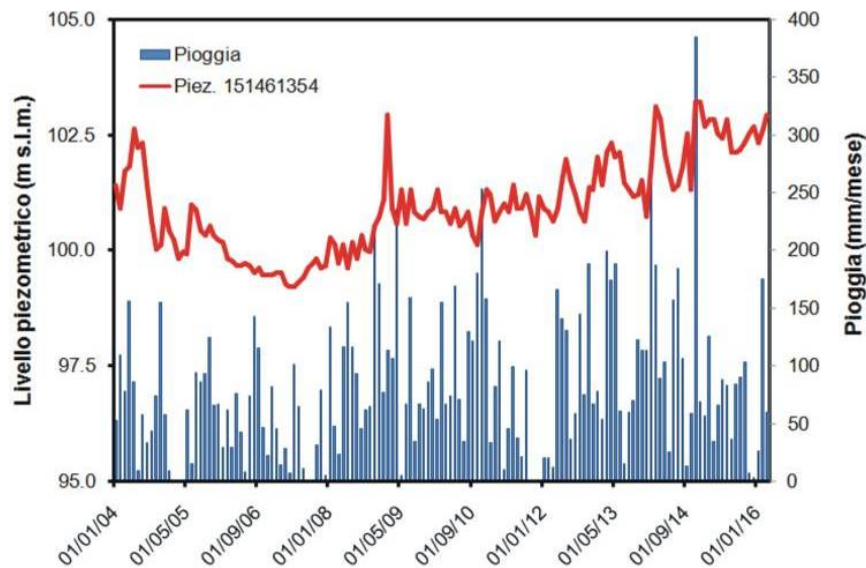


Figura 47. Precipitazioni mensili (stazione meteorologica di Milano Lambrate) e andamento dei livelli piezometrici misurati nel periodo Gennaio 2004 - Marzo 2016 nel piezometro 151461354.

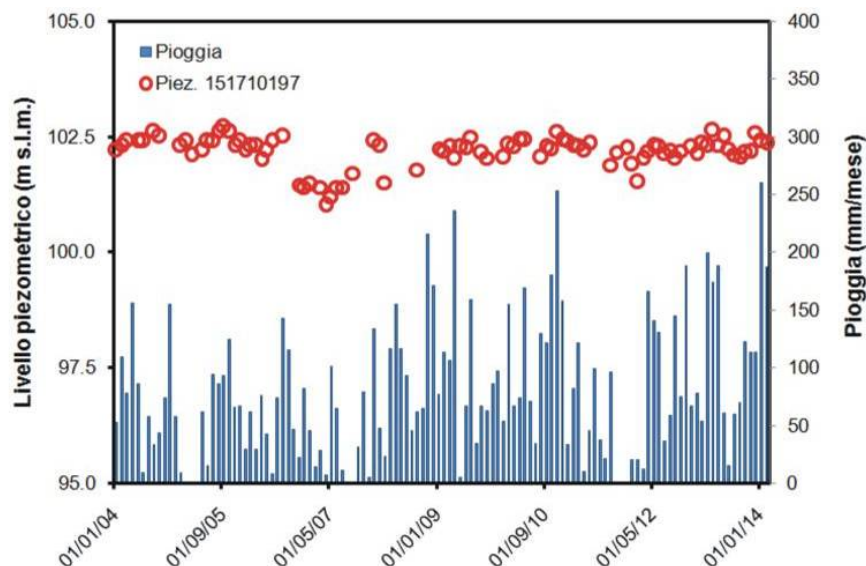


Figura 48. Precipitazioni mensili (stazione meteorologica di Milano Lambrate) e andamento dei livelli piezometrici misurati nel periodo Gennaio 2004 - Marzo 2014 nel piezometro 151710197 e dei livelli.

Per il primo piezometro i dati acquisiti sono più discontinui e arrivano fino a Febbraio 2014, mentre per il secondo i livelli sono stati misurati con continuità fino a Ottobre 2016. L'andamento dei livelli piezometrici è stato confrontato con l'andamento delle piogge mensili misurate nella stazione meteorologica più vicina all'area studiata (stazione ARPA di Milano Lambrate, capitolo 4).

E' importante sottolineare che le oscillazioni annuali della piezometria registrate nei due piezometri sono racchiuse in un ambito relativamente ristretto. I livelli piezometrici variano, per gli anni considerati, tra 99 e 103 m s.l.m. per il piezometro 151461354 e tra 101 e 103 m s.l.m. per il piezometro 151710197.

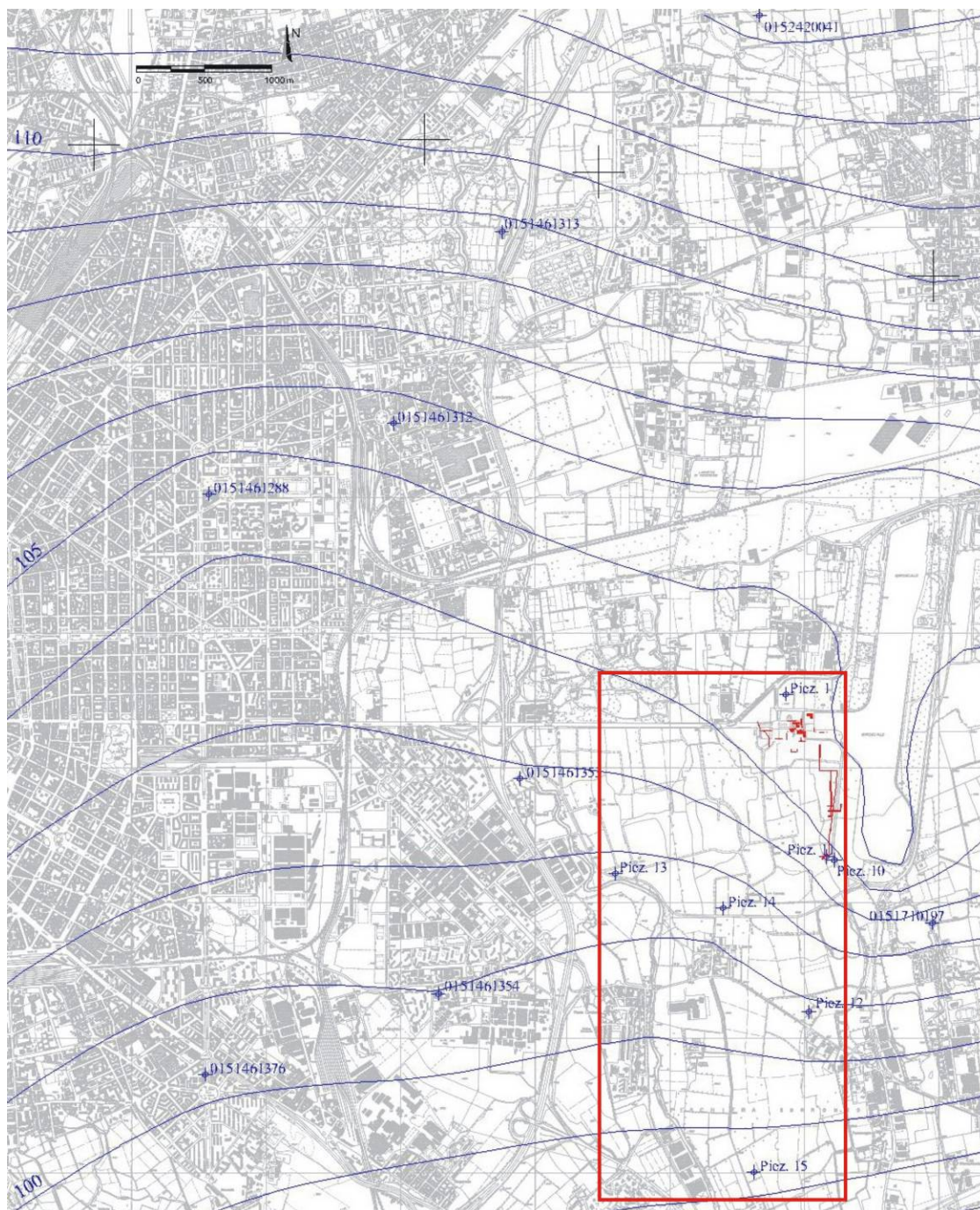


Figura 49. Livelli piezometrici della prima falda nell'area del sedime di Milano Linate (rettangolo rosso) e del suo intorno (modificata da Politecnico di Milano, 2005).

Nonostante le limitate oscillazioni mensili che si misurano, nelle Figg. 47 e 48 si deduce che le oscillazioni del livello piezometrico nel tempo siano legate alle precipitazioni. Tale fenomeno è legato essenzialmente al fatto che la ricarica della falda freatica in questa zona avviene, oltre che da apporti da monte, specialmente per infiltrazione verticale delle acque di precipitazione. Per queste ragioni, i valori minimi dei livelli piezometrici si misurano nei mesi più secchi, tipicamente quelli estivi tra Giugno e Settembre, mentre i livelli piezometrici più alti si registrano nei mesi più piovosi, corrispondenti sia ai mesi autunnali e invernali tra Novembre e Marzo.

Dalle medesime figure si evidenzia anche l'influenza sulla falda di anni caratterizzati da piogge frequenti o da scarsità di precipitazioni sull'andamento medio annuale dei livelli piezometrici. Gli

anni tra il 2005 ed il 2008, caratterizzati da quantitativi di precipitazione più bassi, sono caratterizzati da livelli piezometrici mediamente più bassi (99-100 m s.l.m.). Al contrario, tra il 2013 ed il 2015 si registrano i livelli piezometrici più alti (fino ad oltre 103 m s.l.m.), proprio in corrispondenza di due anni con precipitazioni molto abbondanti (1250 mm nel 2013, 1638 mm nel 2014).

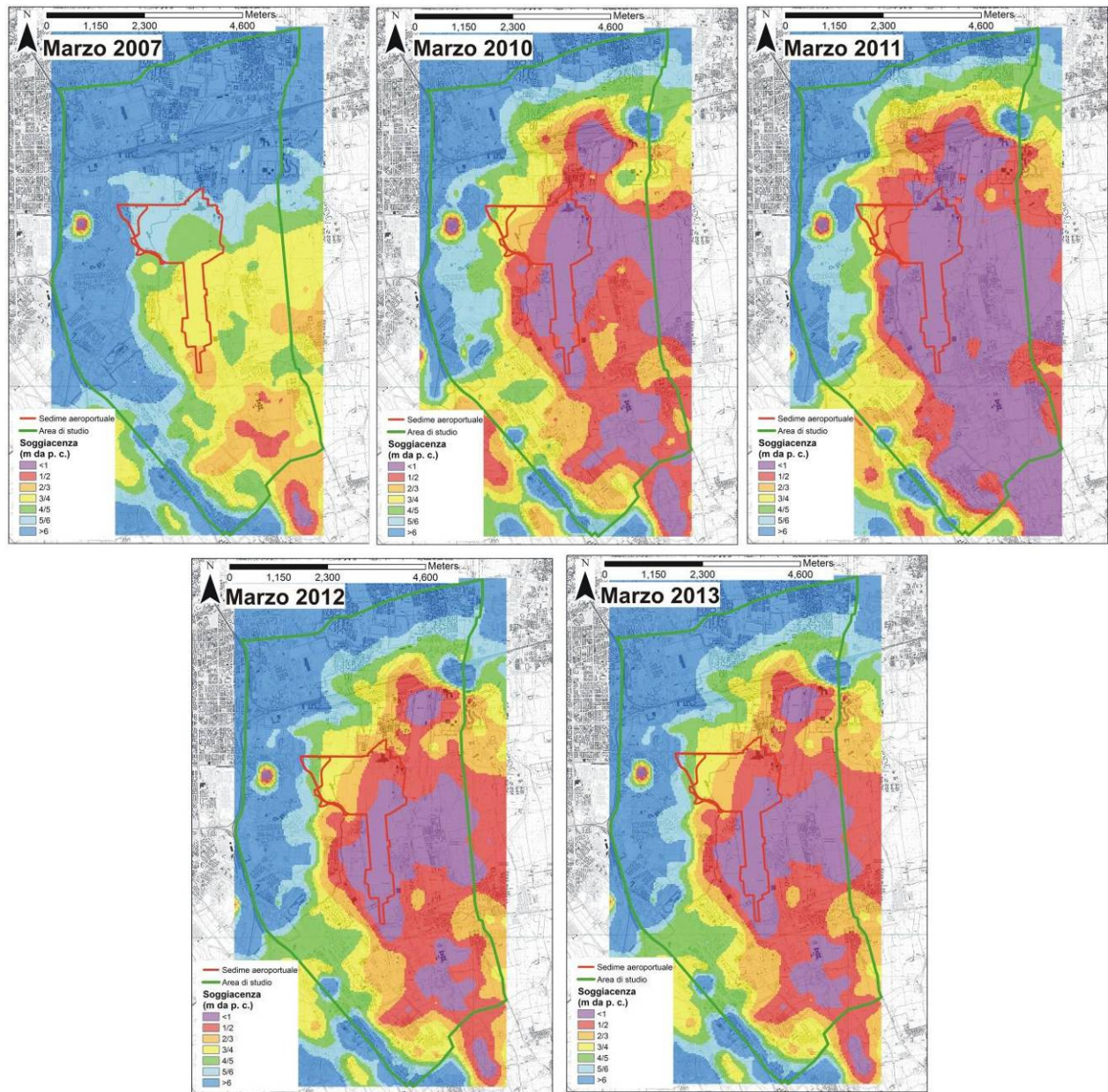


Figura 50. Soggiacenza della prima falda dell'area studiata, relativa ai mesi di Marzo del periodo 2007-2013 (elaborazione del Settore Risorse idriche e attività estrattive della Città Metropolitana di Milano).

Le limitate oscillazioni stagionali che interessano, durante l'anno, il livello piezometrico della falda freatica considerata sono evidenti anche estendendo la zona d'indagine all'intera area di studio.

La ricostruzione dell'andamento della falda, nell'area del sedime aeroportuale e del suo intorno, per l'anno 2005 (Politecnico di Milano, 2006; Ummarino et al., 2008) mostra come la soggiacenza nel

sedime varia, passando da valori minimi mediamente intorno a 2-3 m nell'area meridionale e occidentale a valori massimi intorno a 4-5 m nell'area orientale e settentrionale.

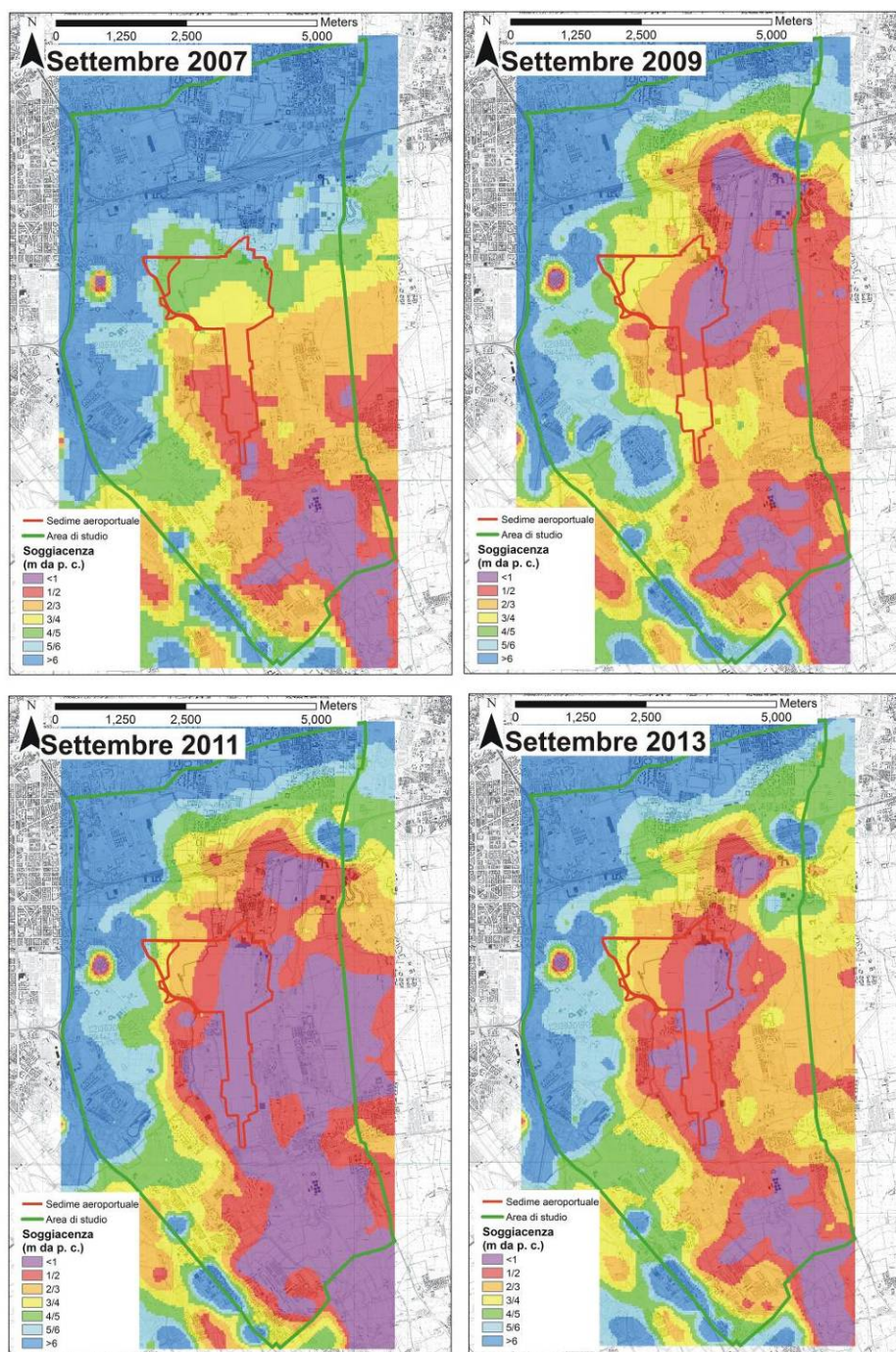


Figura 51. Soggiacenza della prima falda dell'area studiata, relativa ai mesi di Settembre del periodo 2007-2013 (elaborazione del Settore Risorse idriche e attività estrattive della Città Metropolitana di Milano).

Anche queste analisi hanno confermato come le oscillazioni mensili dei livelli piezometrici della falda freatica sono limitate. Infatti, per il periodo Novembre 2005-Maggio 2006, esse sono state inferiori ad 1 m nell'area del sedime, con innalzamenti maggiori in corrispondenza dei mesi più piovosi (mesi autunnali ed invernali; Politecnico di Milano 2006. Per l'anno 2005, il livello

piezometrico medio della falda è stato compreso tra 105 e 101 m s.l.m. nell'area del sedime aeroportuale, con un gradiente verso S-SE di circa 0.15% (Fig. 49).

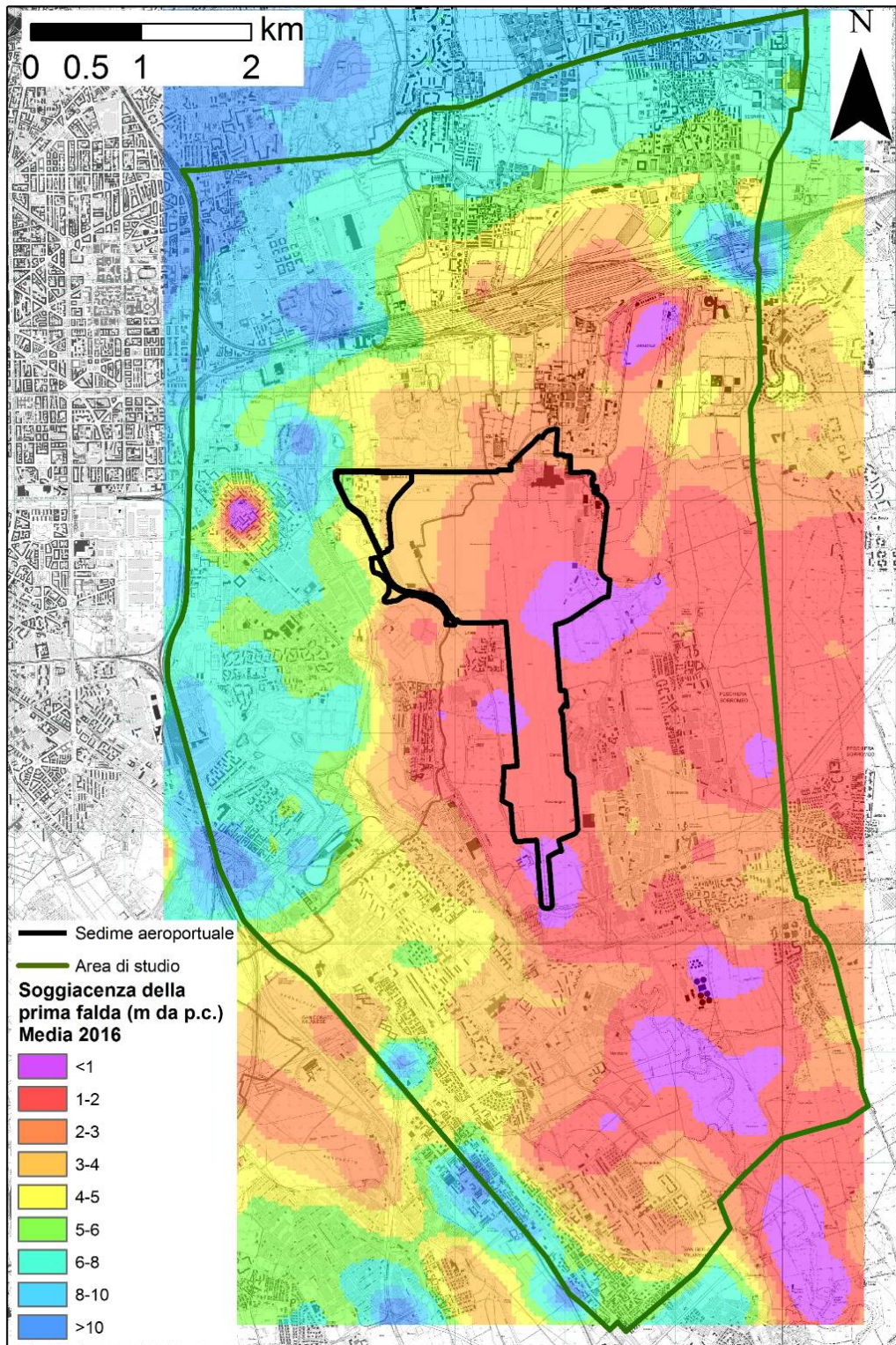


Figura 52. Carta della soggiacenza media della prima falda dell'area studiata, calcolata per i mesi di Marzo del periodo 2007-2013 dalle elaborazioni del Settore Risorse idriche e attività estrattive della Città Metropolitana di Milano.

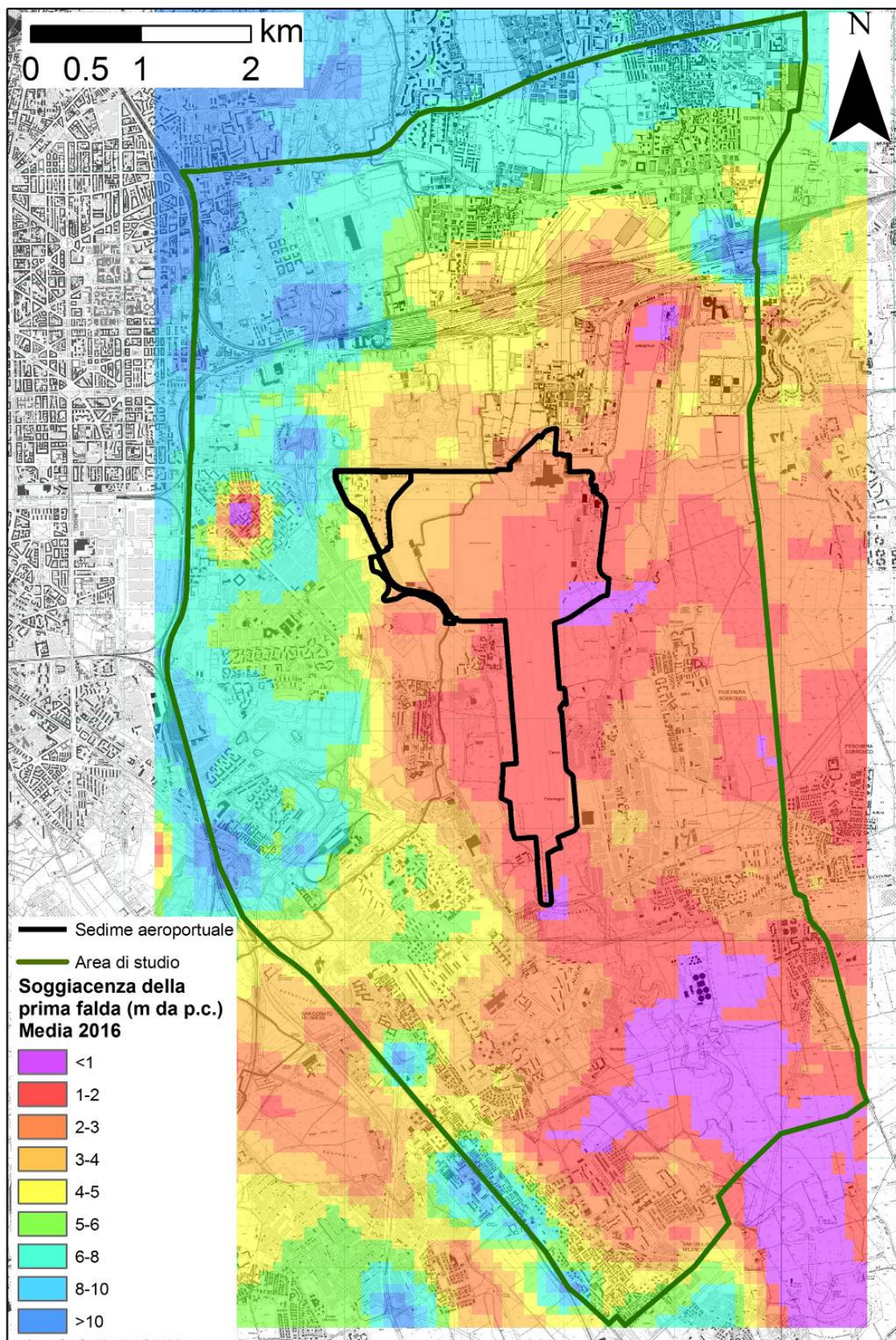


Figura 53. Carta della soggiacenza media della prima falda dell'area studiata, calcolata per i mesi di Settembre del periodo 2007-2013 dalle elaborazioni del Settore Risorse idriche e attività estrattive della Città Metropolitana di Milano.

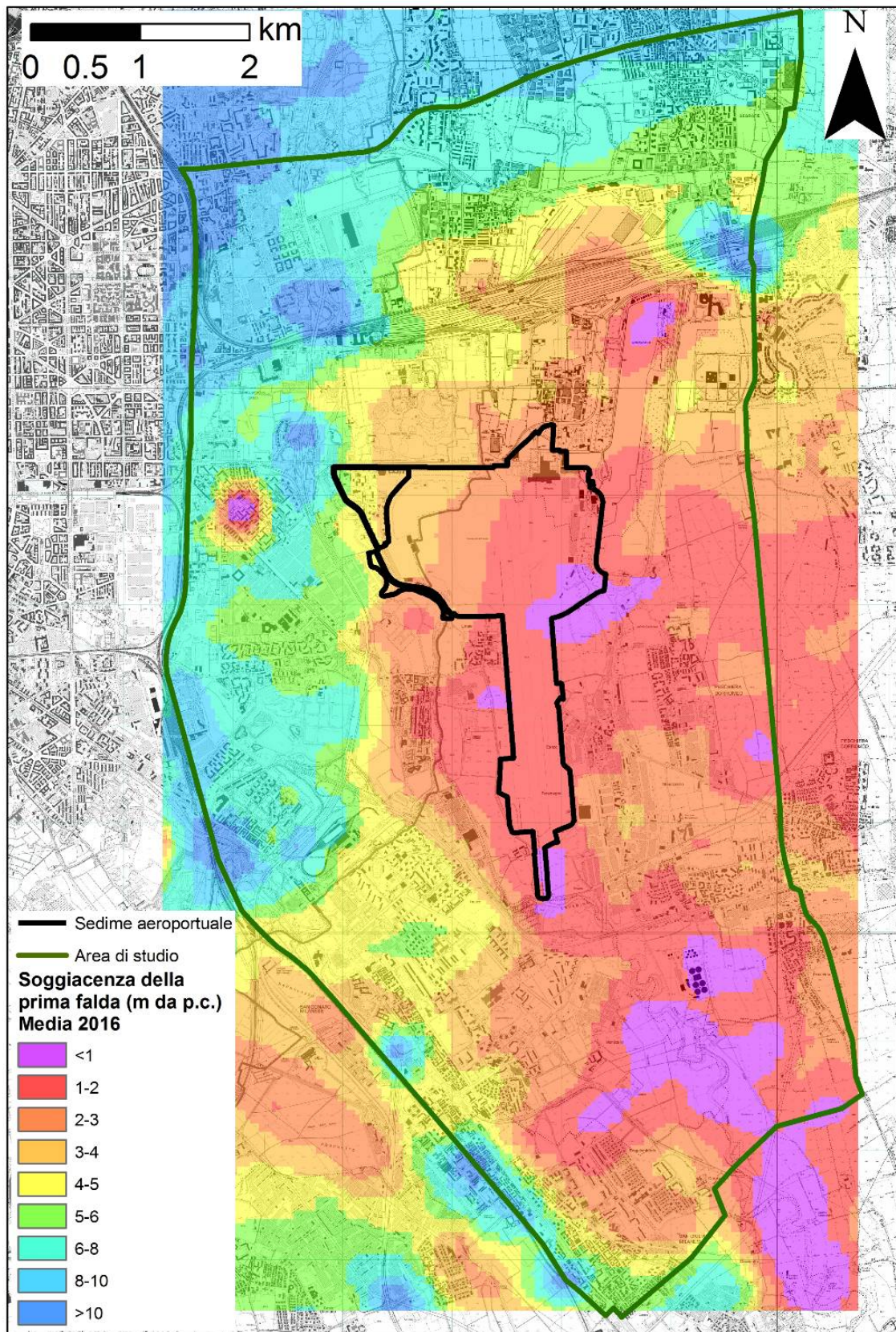


Figura 54. Carta della soggiacenza media della prima falda dell'area studiata, calcolata per il periodo 2007-2013 dalle elaborazioni del Settore Risorse idriche e attività estrattive della Città Metropolitana di Milano.

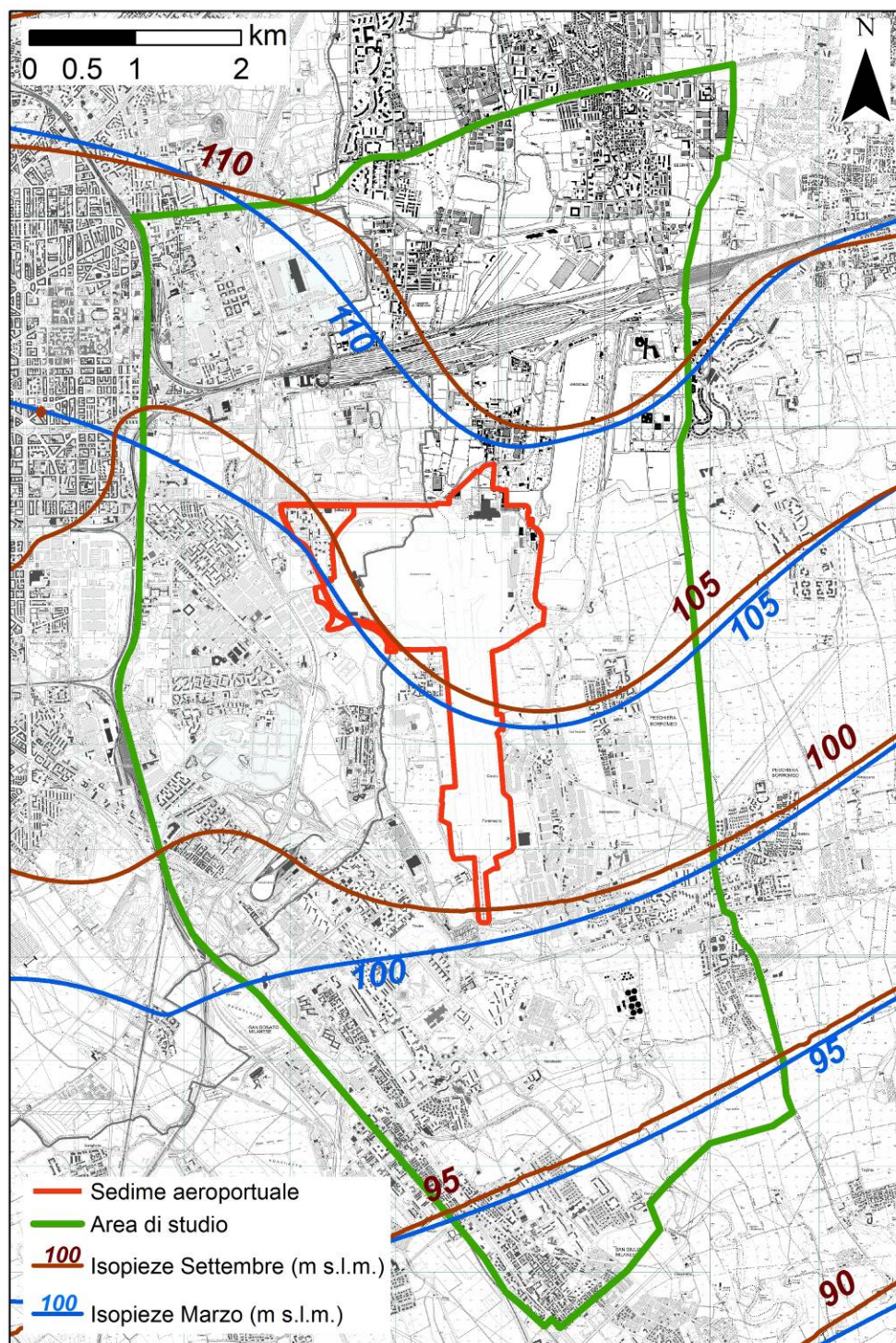


Figura 55. Carta della isopieze medie della prima falda dell'area studiata, calcolata per i mesi di Marzo e Settembre del periodo 2007-2013 dalle elaborazioni del Settore Risorse idriche e attività estrattive della Città Metropolitana di Milano.

La piezometria non sembrerebbe essere influenzata dai principali corsi d'acqua presenti, in particolare dal F. Lambro.

Per il periodo 2007-2013, il Settore Risorse idriche e attività estrattive della Città Metropolitana di Milano ha realizzato negli anni delle mappe della soggiacenza e della piezometria della prima falda misurata mensilmente in diversi pozzi e piezometri per l'intero territorio di competenza.

Come già messo in luce dalle precedenti analisi, confrontando le carte della soggiacenza alla fine del periodo più umido dell'anno (mese di Marzo) e alla fine del periodo più secco dell'anno (mese di Settembre) si evince che la falda è caratterizzata da una modesta variabilità annuale della sua soggiacenza e dei suoi livelli piezometrici (Figg. 50 e 51).

Vista la bassa variabilità della soggiacenza della prima falda (deviazione standard delle misure rispetto alla media sia inferiore ad 1 m in tutta l'area indagata), è stato elaborato, dalle carte ricostruite dalla Città Metropolitana di Milano, il valore medio di questa relativo ai mesi di Marzo e di Settembre, per il periodo temporale compreso tra il 2007 e il 2013 (Figg. 52 e 53).

In questo modo, si può evidenziare l'andamento piezometrico della prima falda in corrispondenza del periodo di minimo (Settembre, alla fine del periodo estivo) e di massimo (Marzo, alla fine del periodo invernale).

Dalle elaborazioni realizzate si confermano le limitate variazioni della soggiacenza nei due momenti dell'anno considerati per l'intera area di indagine. Per il mese di Settembre, la soggiacenza è risultata maggiore rispetto ai valori misurati a Marzo per quasi tutta l'area indagata, con una variazione massima dell'ordine di 1-1.5 m. Per questo motivo, è stato anche ricostruito il valore medio di soggiacenza, a partire dai dati del periodo 2007-2013 analizzato dalla Città Metropolitana di Milano (Fig. 54).

Nell'area del sedime aeroportuale di Linate, i valori di soggiacenza ricostruiti per il periodo 2007-2013 oscillano, mediamente durante l'anno, tra 2-4 m nel settore occidentale e meno di 1 m-2 m nel settore orientale e meridionale (Fig. 54). Tali valori sono in linea con i risultati ottenuti per il 2005 da Politecnico di Milano (2006) soltanto nel settore occidentale del sedime, mentre sono più alti di circa 1-2 m nei restanti settori.

I valori di soggiacenza ricostruiti dalle elaborazioni del periodo 2007-2013 derivano dal fatto che le linee isopiezometriche della falda freatica fossero comprese tra 110 e 100 m s.l.m., quindi in un range più alto rispetto a quanto valutato per il 2005 (Fig. 55). Nonostante le differenze di quota, si conferma un flusso idrico sotterraneo generale diretto grossomodo da N verso S o da NW verso SE.

13.2 Soggiacenza e livelli piezometrici dell'anno 2016

La ricostruzione della soggiacenza e dei livelli piezometrici dell'anno 2016 è stata possibile grazie all'acquisizione di una serie di misure del livello di falda, in piezometri e pozzi intercettanti la prima falda ubicati sia all'interno del sedime che nel suo intorno (Figg. 56 e 57).

All'interno del sedime, sono attualmente presenti 13 piezometri, con profondità variabile tra 3.1 e 15.0 m. Tali piezometri si distribuiscono nell'area settentrionale del sedime (Fig. 56). A questi, si aggiungono 4 pozzi, utilizzati ad uso industriale, con profondità tra 35 e 40 m, anche essi presenti nel settore settentrionale del sedime, ad eccezione del pozzo H-V.V.F.F. (Fig. 56).

Il livelli di falda in corrispondenza del sedime sono stati misurati attraverso due campagne di misura: la prima, tra il 21 ed il 29 Giugno 2016; la seconda, il 20 Settembre 2016.

In data 20 Settembre 2016, sono stati misurati i livelli piezometrici anche in corrispondenza di un piezometro, profondo 15 m, ubicato nel territorio di Segrate, in prossimità del limite settentrionale dell'area di studio (Fig. 57)

I dati acquisiti nel sedime aeroportuale sono stati integrati da misure piezometriche realizzate da altri Enti, negli stessi mesi di Giugno e Settembre, su alcuni piezometri e pozzi intercettanti la prima falda ubicati all'esterno dell'area del sedime (Fig. 57). Si tratta di una serie di punti di misura appartenenti alla rete di monitoraggio delle acque sotterranee di ARPA Lombardia ed alla rete di

monitoraggio del Comune di Milano, gestita da MM, a cui appartengono pozzi e piezometri presenti all'interno del catasto del Settore Risorse idriche e Cave della Città Metropolitana di Milano.

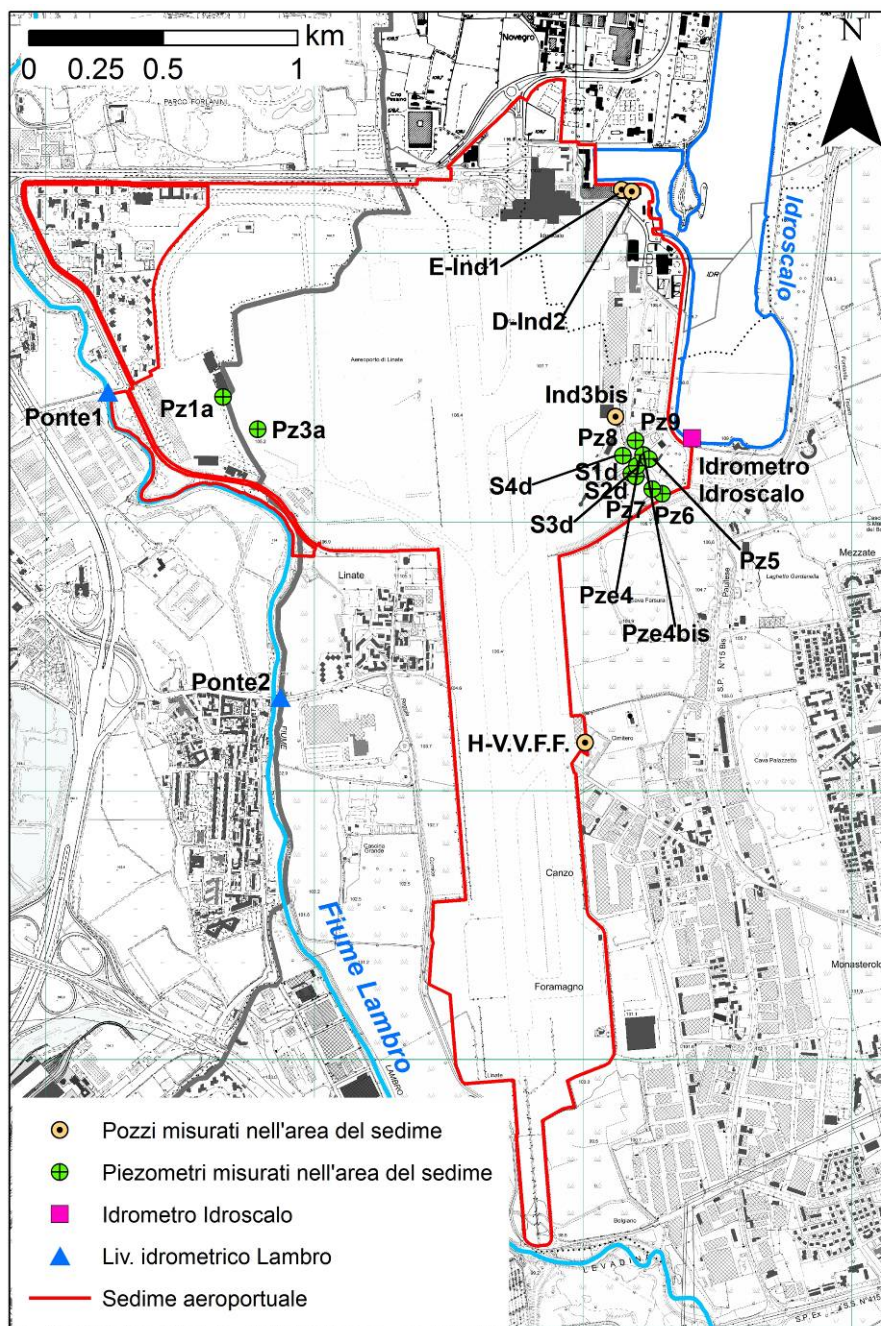


Figura 56. Ubicazione dei punti di misura dei livelli piezometrici della prima falda all'interno del sedime aeroportuale.

Al fine di cogliere in maniera più efficace la piezometria locale della prima falda, sono stati considerati punti di misura anche esterni all'area di studio considerata. In particolare, si è estesa l'area rispettivamente di circa 5 km verso N e S e di circa 2.5 km verso E e W, dato il generale deflusso della prima falda in direzione N-S.

Oltre ai dati del livello piezometrico in pozzi e piezometri, è stato anche utilizzato il livello idrico dell'Idroscalo, misurato nella stazione di misura del Settore Idroscalo della Città Metropolitana di Milano (Fig. 57). Il livello idrometrico dell'Idroscalo, infatti, rappresenta un valore di livello

piezometrico della falda, in quanto l'acqua che riempie questo bacino appartiene proprio a questa. Per uniformità con le misure piezometriche acquisite nel sedime, i livelli idrometrici dell'Idroscalo considerati nelle ricostruzioni corrispondono ai valori medi giornalieri misurati negli stessi giorni di misura nell'area del sedime (21-29 Giugno 2016, 20 Settembre 2016).

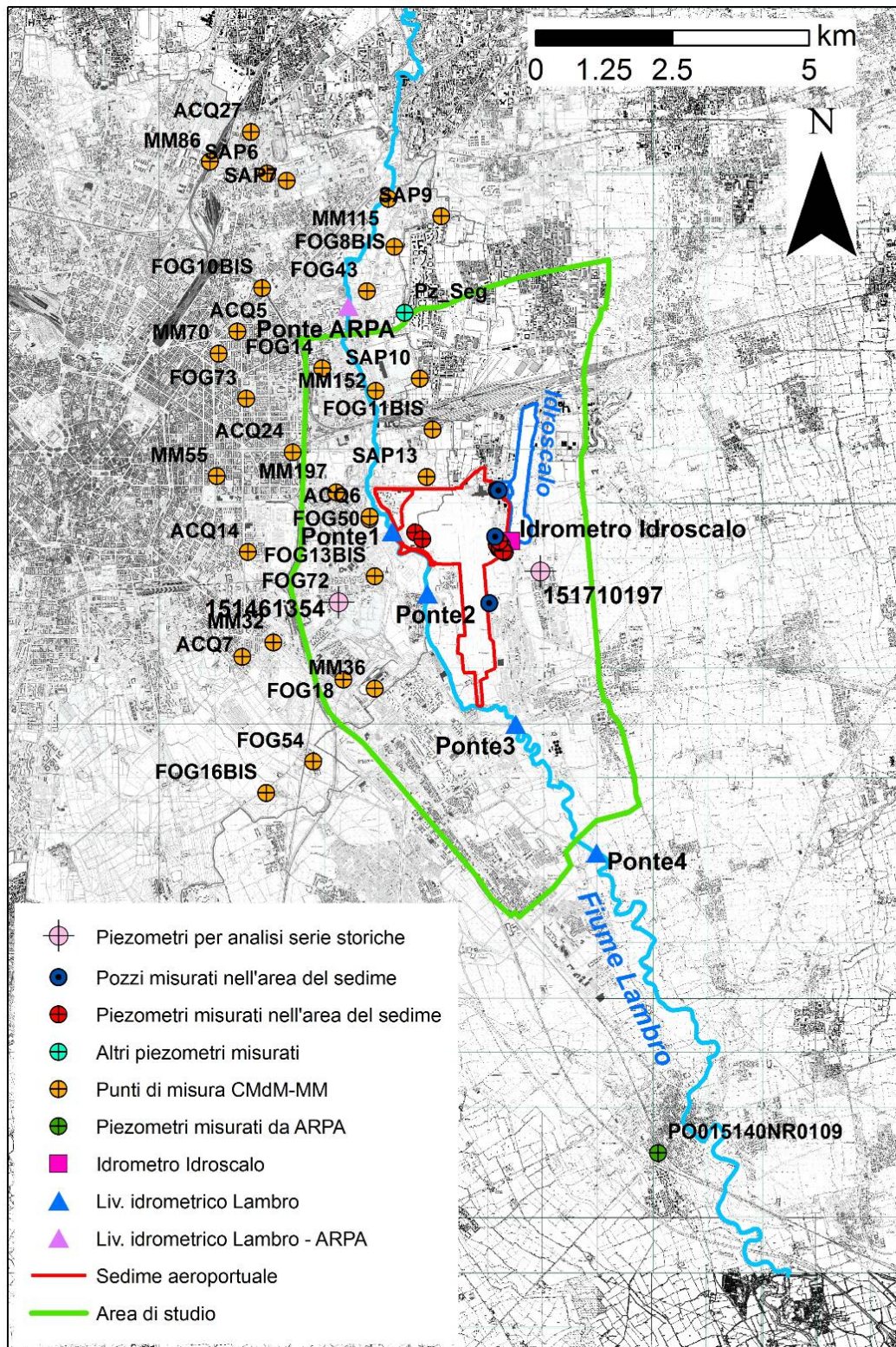


Figura 57. Ubicazione dei punti di misura dei livelli piezometrici della prima falda all'esterno del sedime aeroportuale.

Punto di misura	Tipo	Quota di riferimento m s.l.m.	Profondità m	Filtri	Soggiacenza 21 Giugno 2016 m	Soggiacenza 20 Settembre 2016 m	Livello piezometrico 21 Giugno 2016 m s.l.m.	Livello piezometrico 20 Settembre 2016 m s.l.m.
S1d	piezometro	107.45	7.1	Da 3.0 a 7.1 m	3.71	3.75	103.74	103.7
S2d	piezometro	107.55	7.1	Da 3.0 a 7.1 m	3.59	3.69	103.96	103.86
S3d	piezometro	107.26	7.1	Da 3.0 a 7.1 m	2.65	2.74	104.76	104.67
S4d	piezometro	106.64	16.3	-	2.73	2.81	104.41	104.33
Pze4	piezometro	107.02	9.6	-	2.83	2.88	104.59	104.54
Pze4bis	piezometro	107.02	3.1	-	2.8	2.88	104.62	104.54
Pz5	piezometro	107.4	-	-	2.39	-	105.01	-
Pz6	piezometro	107.86	11.2	-	3.54	3.57	103.57	103.54
Pz1a*	piezometro	106.14	15.0	Da 3.0 a 15.0 m	1.8	2.07	104.34	104.07
Pz3a*	piezometro	105.32	15.0	Da 3.0 a 15.0 m	1.58	1.79	103.74	103.53
Pz7	piezometro	105.15	11.7	-	-	3.36	-	102.29
Pz8	piezometro	107.23	9.6	-	-	2.98	-	104.5
Pz9	piezometro	107.23	9.6	-	-	2.65	-	104.83
Ind3-bis	pozzo	106.66	35	Da 7.0 a 33.1 m	3.17	3.06	103.79	-
H-V.V.F.F.	pozzo	104.1	40	Da 25.0 a 31.0 m	3.18	3.30	101.00	101.12
D-Ind2	pozzo	111.04	36	Da 8.3 a 34.0 m	3.11	-	106.59	-

E-Ind1	pozzo	110.84	36	Da 6.0 a 35.4 m	3.56	-	106.12	-
--------	-------	--------	----	-----------------------	------	---	--------	---

Tabella 12. Soggiacenze e livelli piezometrici della prima falda misurati a Giugno e Settembre 2016 in alcuni piezometri e pozzi del sedime aeroportuale. * Misura il 29 Giugno 2016 anzichè il 21 Giugno 2016

Punto di misura	Quota di riferimento m s.l.m.	Livello idrico 21 Giugno 2016 m s.l.m.	Livello idrico 12 Luglio 2016 m s.l.m.	Livello idrico 20 Settembre 2016 m s.l.m.
Ponte ARPA (Milano - Via Feltre)	120.16	114.79	115.27	114.49
Ponte1 (Milano - Via Fantoli)	106.93	-	102.98	104.23
Ponte2 (Milano - Via Vittorini)	105.33	-	-	103.15
Ponte3 (Peschiera Borromeo - SP ex SS415)	103.06	-	96.88	97.91
Ponte4 (Mediglia - SP157)	91.49	-	85.44	-
Idrometro Idroscalo	105.95	106.12	106.15	106.17

Tabella 13. Livelli della superficie idrica dell'Idroscalo e del fiume Lambro misurati tra Giugno e Settembre 2016.

Dall'analisi delle misure piezometriche nell'area del sedime effettuate a Giugno e Settembre 2016, si confermano le limitate oscillazioni temporali della soggiacenza e della corrispondente piezometria (Tab. 12). I livelli piezometrici decrescono da Giugno a Settembre in maniera limitata tra 0.04 e 0.27 m. Soltanto il pozzo H-V.V.F.F. mostra un debole innalzamento dei livelli piezometrici da Giugno a Settembre di 0.12 m. I valori minimi di soggiacenza sono stati misurati nei piezometri più occidentali del sedime (Pz1a-Pz3a), con valori intorno a 1.5-2 m. Nei restanti settori dell'aeroporto, i piezometri ed i pozzi misurati hanno valori di soggiacenza nel range 2.5-4 m. Alla luce di questo, i livelli piezometrici diminuiscono da N verso S, mantenendosi compresi tra circa 105 m s.l.m. e 103 m s.l.m.

Per i punti di misura esterni all'area del sedime, si confermano le limitate oscillazioni mostrate nell'area aeroportuale, con scostamenti massimi dell'ordine di 0.7 m per i piezometri ubicati più vicini a Milano. Soltanto 8 piezometri dei 53 considerati mostrano una leggera diminuzione della soggiacenza da Giugno a Settembre, seppur contenuta a meno di 0.4 m.

Anche il livello idrometrico dell'Idroscalo conferma le limitate oscillazioni mensili (0.05 m in 3 mesi) della prima falda e il debole abbassamento dei livelli piezometrici da Giugno a Settembre (Tab. 13).

In data 12 Luglio 2016 e 20 Settembre 2016, sono state effettuate anche misure del livello idrico del fiume Lambro in corrispondenza dei ponti di Via Fantoli e di Via Vittorini a Milano, del ponte sulla

SP ex SS415 a Peschiera Borromeo, del ponte sulla SP157 a Mediglia. Questi dati sono stati integrati con le misure, sempre in corrispondenza di questi giorni, del livello idrometrico del fiume Lambro misurato alla stazione ARPA Lombardia di Milano Via Feltre (Fig. 57).

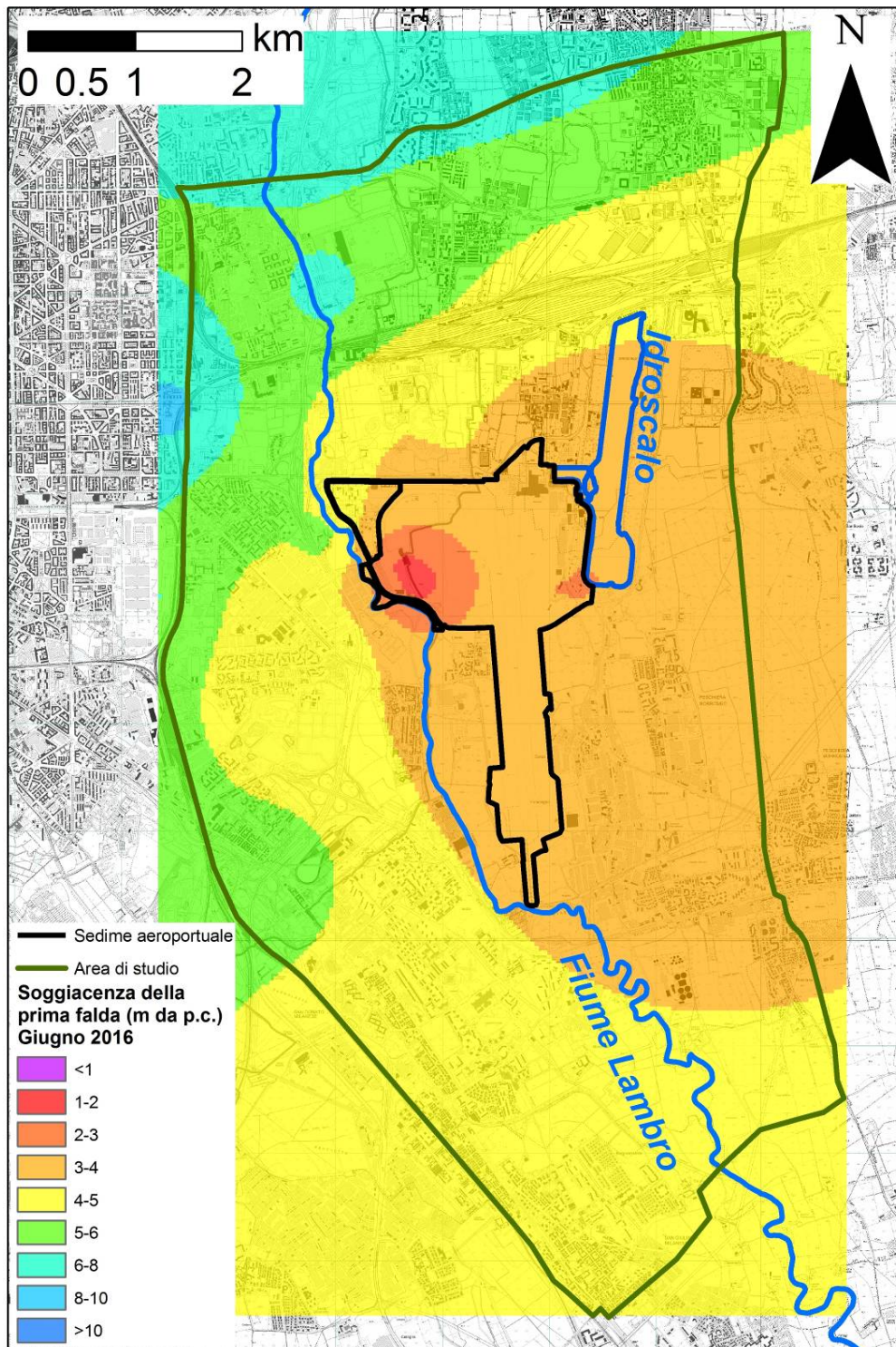


Figura 58. Andamento della soggiacenza della prima falda a Giugno 2016.

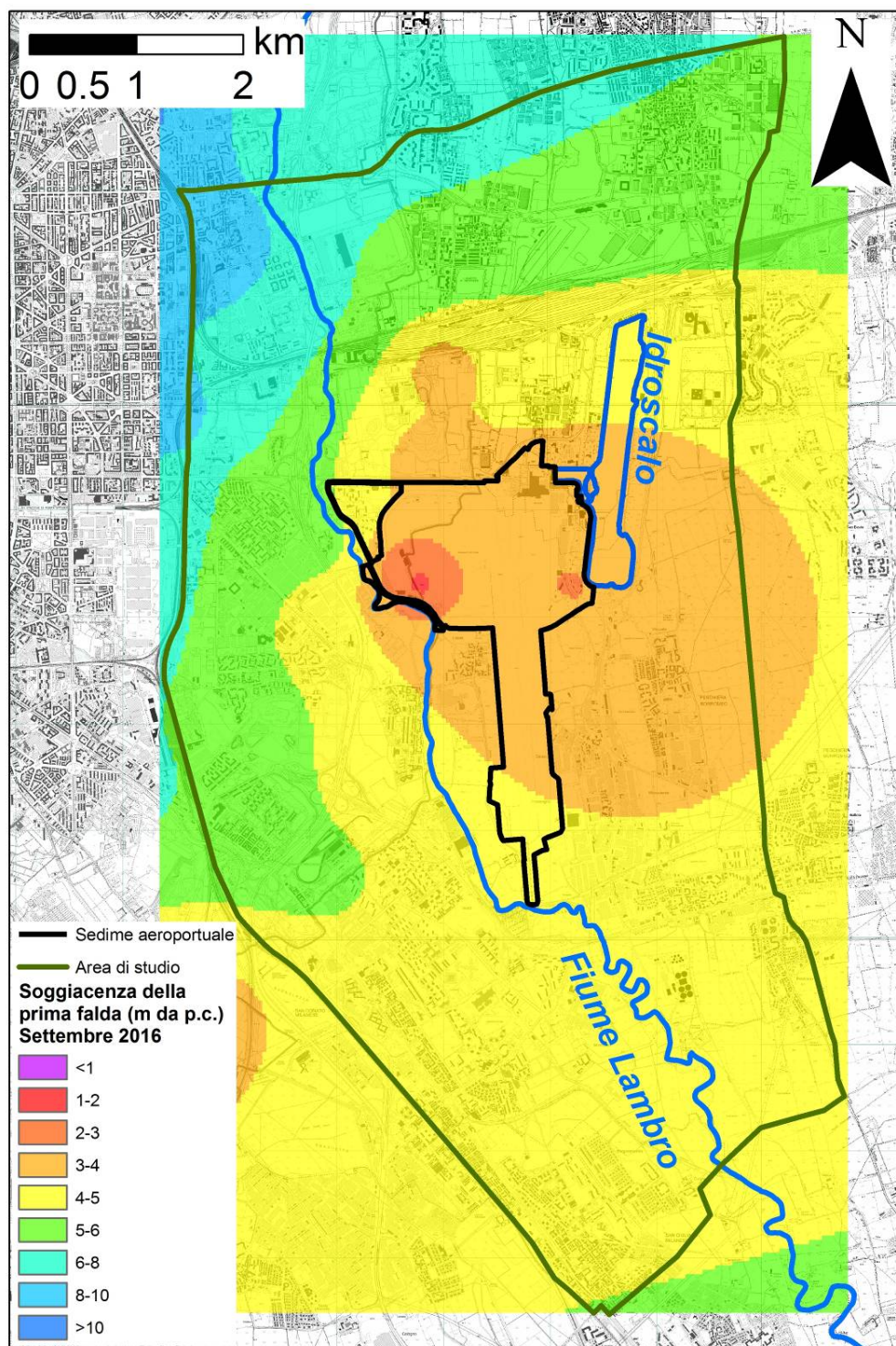


Figura 59. Andamento della soggiacenza della prima falda a Settembre 2016.

Confrontando i livelli idrici dell'idroscalo (che in pratica evidenzia il livello locale della falda), i livelli idrici del fiume Lambro e le misure effettuate negli stessi momenti in corrispondenza dei piezometri dell'aeroporto, il fiume sembrerebbe essere pensile rispetto alla falda, senza condizionarne sensibilmente il comportamento. Ciò era già stato appurato anche da Provincia di Milano (1995) e Politecnico di Milano (2006).

Alla luce di queste considerazioni, soltanto i dati di soggiacenza e di piezometria misurati nei piezometri e pozzi analizzati ed il livello idrico dell'Idroscalo sono stati considerati nelle interpolazioni dell'andamento della prima falda nell'area di indagine.

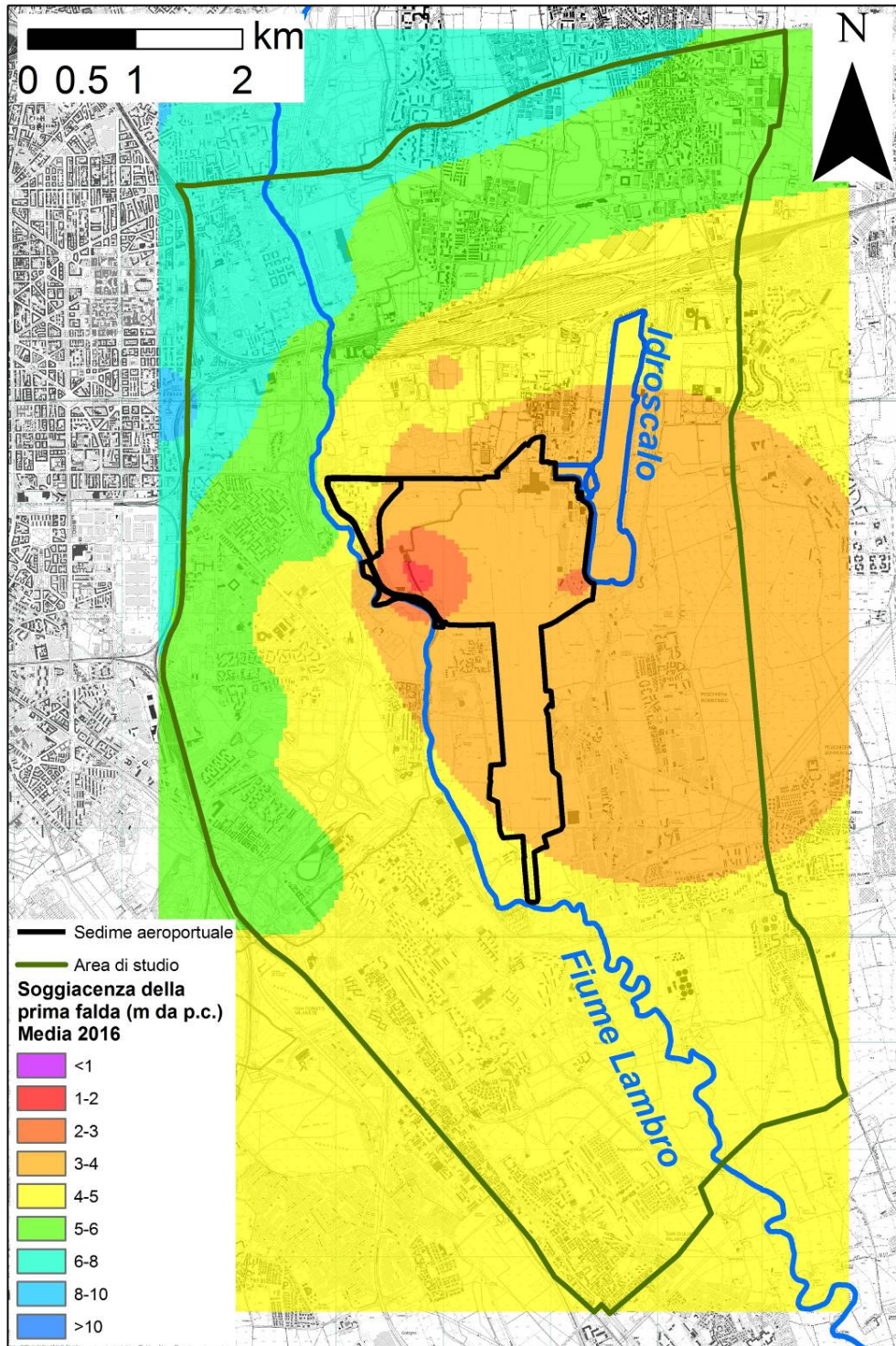


Figura 60. Andamento medio della soggiacenza della prima falda tra Giugno e Settembre 2016.

Le carte di soggiacenza e di livello piezometrico della prima falda sono stati ricostruiti mediante la tecnica di *kriging* ordinario, una tecnica di interpolazione di dati puntuali che consente valori in punti non noti a partire dai valori di punti noti, di cui se ne conosce la distanza relativa. Per maggior informazioni su questa tecnica si rimanda a Wackernagel (1998).

L'interpolazione spaziale mediante *kriging* ordinario è stata realizzata mediante il software R versione 3.1.3. Confrontando i valori stimati e quelli misurati mediante gli indici statistici MAE e RMSE, si evince che la ricostruzione spaziale è buona, nonostante la non omogenea distribuzione

spaziale dei dati di partenza (Fig. 57). Gli errori associati alla modellazione sono dell'ordine di meno di 0.5 m sia per la soggiacenza che per il livello piezometrico (Tab. 14).

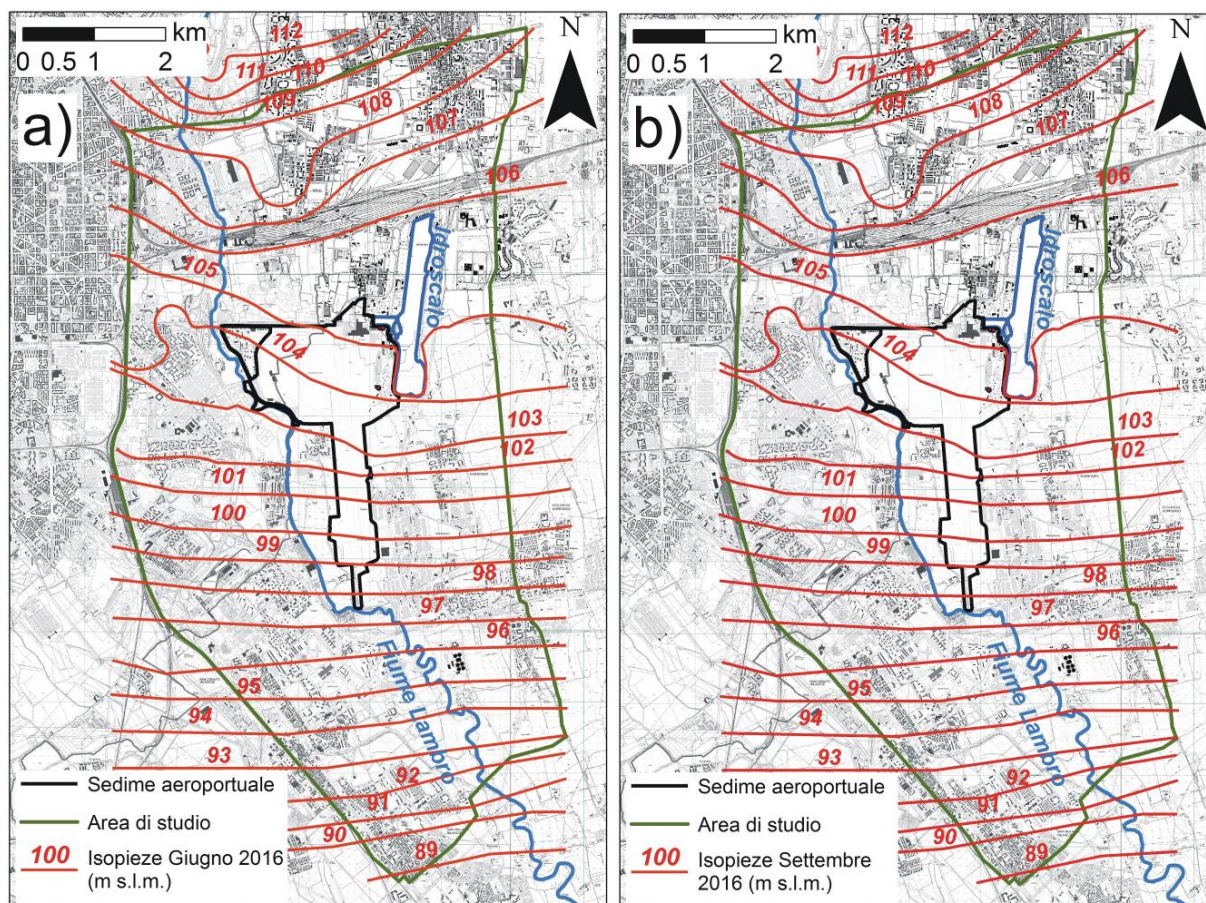


Figura 61. Livelli piezometrici della prima falda a Giugno (a) e Settembre (b) 2016.

Le carte così ricostruite mostrano valori simili di soggiacenza e livello piezometrico tra Giugno e Settembre 2016. Questo è in accordo con i valori misurati sia nel sedime che all'esterno. Nell'area del sedime, la soggiacenza della prima falda è mediamente di 3-4 m dal piano campagna (Fig. 60). Il settore più occidentale e quello più meridionale hanno valori leggermente maggiori (4-5 m), mentre sono presente due aree in cui la soggiacenza è inferiore a 2 m. Tali aree si localizzano in prossimità dei piezometri Pz1a, Pz3a e Pz5, dove sono stati misurati valori di soggiacenza più bassi. I livelli piezometrici della prima falda mostrano un generale andamento N-S, con un gradiente di circa 0.1%. Nell'area del sedime, il livello piezometrico della prima falda varia mediamente tra 105 e 98 m s.l.m.

Le ricostruzioni fatte per il 2016 mostrano valori simili a quelli dei precedenti studi di Politecnico di Milano (2006) e Ummano et al. (2008) per l'anno 2005. Viceversa, le ricostruzioni effettuate dalla Città Metropolitana di Milano per il periodo 2007-2013 mostrano valori di soggiacenza mediamente più bassi (falda più vicina al piano campagna) per la zona del sedime.

Va sottolineato come le ricostruzioni dell'anno 2016, seppur permettendo di cogliere l'intensità delle oscillazioni piezometriche della prima falda, rappresentano solo un periodo limitato dell'anno (Giugno-Settembre). Di conseguenza, è opportuno considerare sia lo scenario medio di piezometria della prima falda del 2016 sia lo scenario di questo medio per il periodo 2007-2013 nelle successive elaborazioni in cui rientreranno i valori dei livelli piezometrici (capitoli 14, 15, 16).

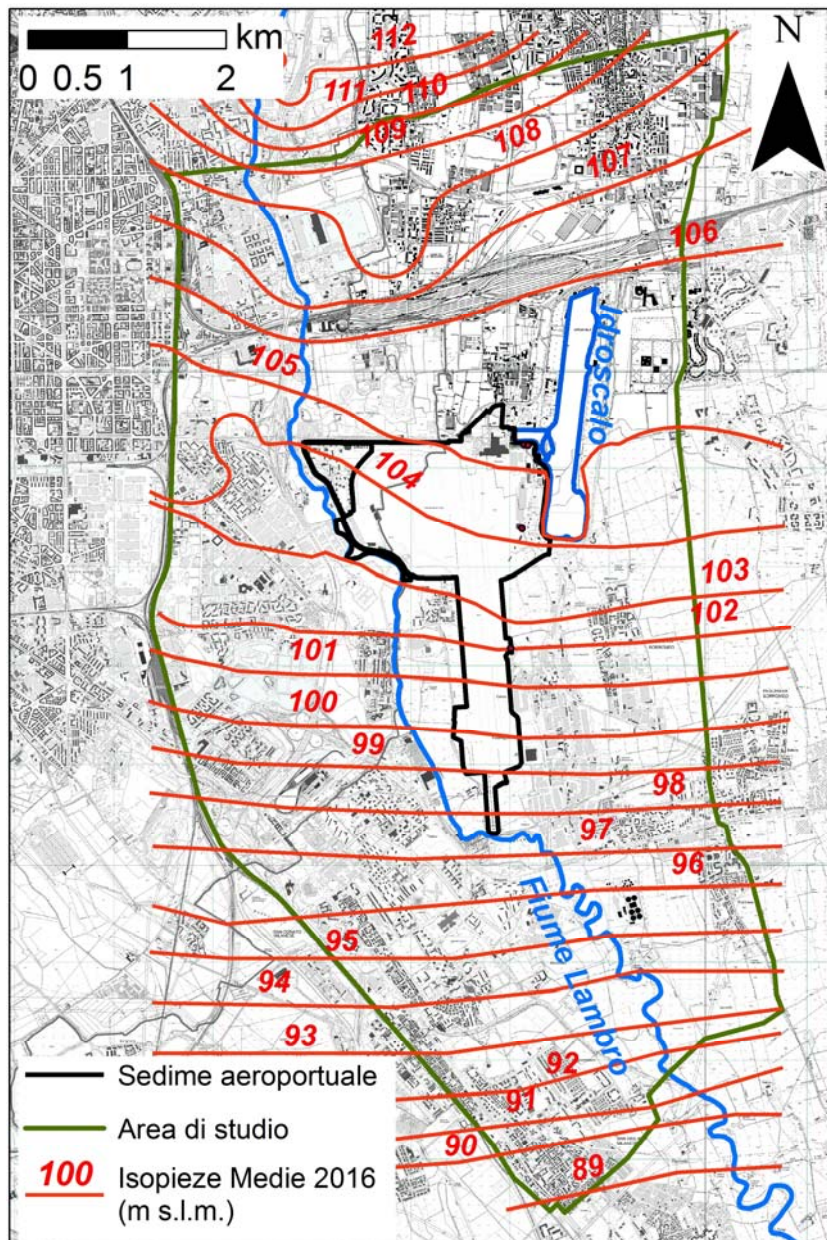


Figura 62. Livelli piezometrici medi della prima falda tra Giugno e Settembre 2016.

Elaborazione	MAE (m)	RMSE (m)
Soggiacenza – Giugno 2016	0.25	0.31
Soggiacenza – Settembre 2016	0.25	0.31
Livello piezometrico – Giugno 2016	0.34	0.38
Livello piezometrico – Settembre 2016	0.34	0.38

Tabella 14. Indici di valutazione della bontà dei modelli di soggiacenza e di livelli piezometrici ricostruiti per Giugno e Settembre 2016.

14. Considerazioni sulle possibili oscillazioni temporali della prima falda

14.1 Ricostruzione probabilistica delle oscillazioni piezometriche

L'analisi delle escursioni temporali della prima falda risulta importante al fine di individuare eventuali fondazioni e fabbricati del sedime aeroportuale e dell'area circostante che possono essere soggetti al rischio di allagamenti e danneggiamenti per risalite della prima falda.

Sono state innanzitutto valutate, per via probabilistica, le oscillazioni temporali che la falda freatica può subire.

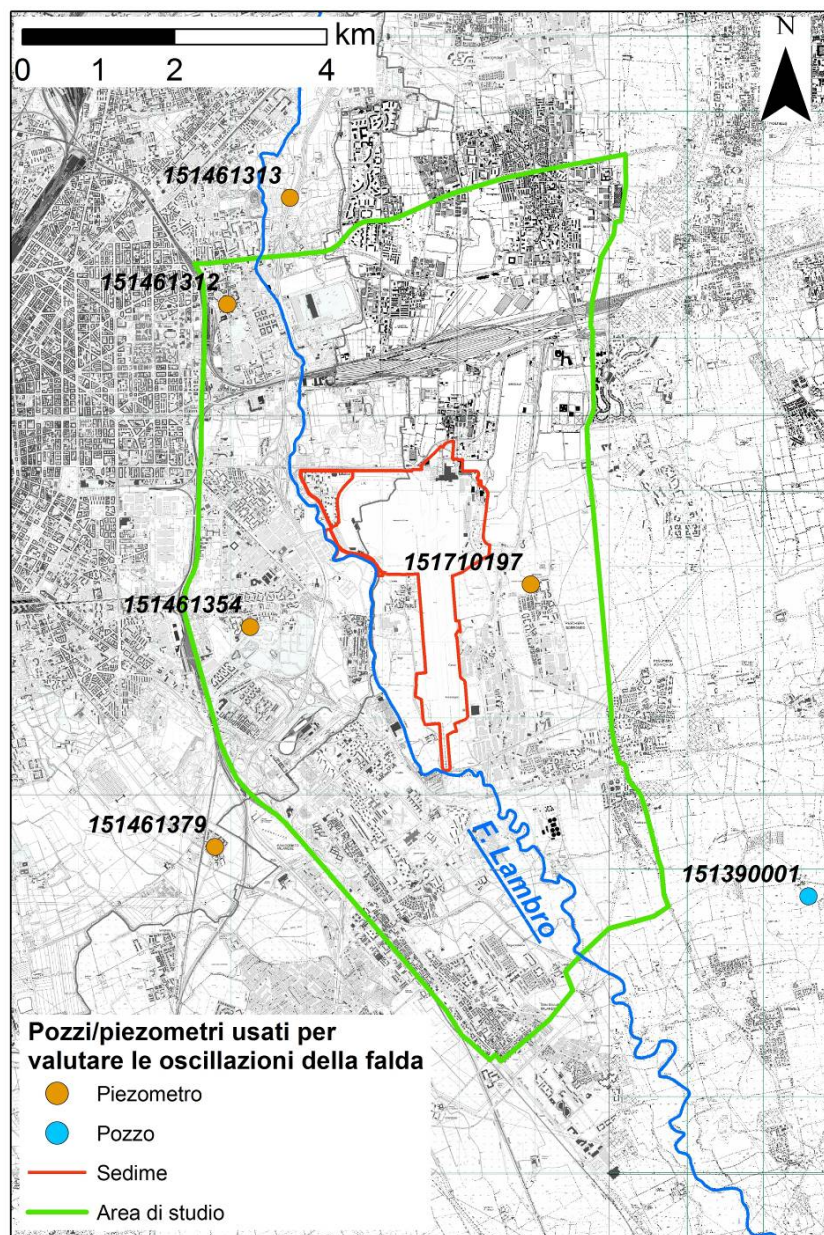


Figura 62. Ubicazione delle stazioni di misura (pozzi/piezometri) considerate per l'analisi delle oscillazioni piezometriche della prima falda.

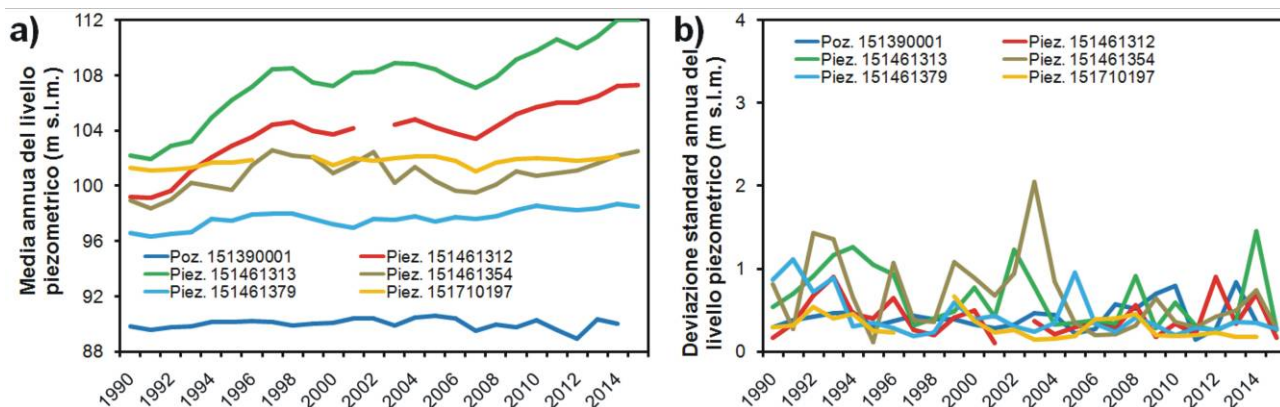


Figura 63. Livello piezometrico medio annuale, monitorato nel periodo 1990-2015, delle stazioni di misura considerate per l'analisi delle oscillazioni piezometriche della prima falda (a); deviazione standard annuale dei livelli piezometrici delle stazioni nel periodo 1990-2015 (b).

Questa analisi è stata condotta utilizzando i dati di soggiacenza e di livello piezometrico, misurati in corrispondenza di 6 punti, corrispondenti a piezometri o pozzi, ubicati in prossimità del sedime aeroportuale, ad una distanza massima da questo inferiore ai 5 km (Fig. 63). Sono stati selezionati punti, appartenenti al Catasto pozzi e piezometri della Città Metropolitana di Milano, che avessero una serie storica di misure piezometriche sufficientemente lunga (almeno 25 anni). Per valutare eventuali differenze nelle oscillazioni piezometriche in aree diverse, sono stati scelti pozzi/piezometri che si trovassero in destra e sinistra idrografica del fiume Lambro, rispettivamente a nord del sedime, a circa metà del sedime ed a sud di questo (Fig. 63). Sono state considerate misure piezometriche a cadenza mensile, del periodo 1990-2015, in modo da avere una serie storica di anni sufficientemente lunga e che non risentisse degli innalzamenti piezometrici avvenuti negli anni 80 del secolo scorso per diminuzione delle attività di estrazione di acqua dalla prima falda per uso industriale (capitolo 13.1).

Come già messo in luce dall'analisi dei dati storici nel capitolo 13.1, il livello annuale medio della prima falda mostra trend simili in ogni stazione monitorata, seppure con dei valori diversi in funzione dell'ubicazione della stazione lungo le direzioni di flusso della falda (Fig. a). E' importante sottolineare che questi trend sono simili in posizioni diverse rispetto al sedime, sia in destra che in sinistra idrografica del Lambro.

Come già evidenziato nelle analisi dei dati piezometrici dell'area nel capitolo 13, le oscillazioni della piezometria attorno al valore medio annuo sono molto limitate, risultando essere generalmente inferiore a 3 m (Fig. 63b). Tali differenze sono dell'ordine delle variazioni delle diverse carte di soggiacenza ricostruite, a partire da dati degli anni 2007-2013 e 2016 (capitolo 13). Inoltre, come già visto in Politecnico di Milano (2006), le oscillazioni di piezometria non evidenziano particolari tendenze e sono tali da poter essere considerate elementi di un unico campione.

Sulla base di queste considerazioni, l'analisi statistica si è concentrata sullo studio dell'oscillazione tra i livelli piezometrici (misurati mensilmente) e la media annua nel periodo 1990-2015 per le 6 stazioni di misura considerate. Lo scopo ultimo di questa analisi è determinare, con un opportuno livello di probabilità, lo scostamento massimo del livello della prima falda dal valore medio di questa lungo il periodo monitorato. L'analisi statistica viene svolta sulla base dei dati mensili e non sui livelli medi annuali in quanto questi ultimi (essendo mediati su un lungo periodo) presentano fluttuazioni di minore entità e non sono quindi indicativi di possibili scenari di rischio reali.

E' stata quindi calcolata, per ciascun punto di misura, la distribuzione di probabilità cumulata (CDF) dello scostamento mensile della falda (x) rispetto alla sua media, definito come (eq. 4):

$$x = h - h' \quad \text{eq. 4}$$

, dove h è la piezometria misurata su base mensile e h' è la piezometria media annuale.

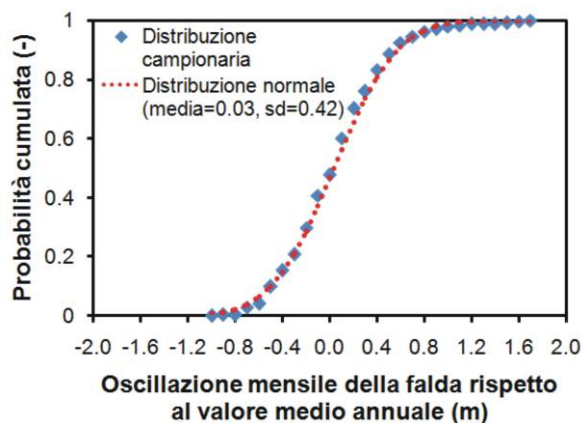


Figura 64. Esempio di CDF campionaria e CDF normale associata delle oscillazioni piezometriche mensili della falda in una delle stazioni considerate (piezometro 151390001).

Stazione	Campione (-)	Media delle oscillazioni piezometriche mensili (m)	Deviazione standard delle oscillazioni piezometriche mensili (m)	Varianza delle oscillazioni piezometriche mensili (m)	Valore critico del test di Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors (p-value) (-)	Risultato del test
151390001	241	0.03	0.42	0.17	<0.01	CDF Normale
151461312	299	0.00	0.78	0.61	<0.01	CDF Normale
151461313	309	0.00	0.71	0.50	0.05	CDF Normale
151461354	312	0.00	0.77	0.59	0.05	CDF Normale
151461379	303	0.00	0.46	0.21	0.05	CDF Normale
151710197	197	0.00	0.31	0.10	0.05	CDF Normale

Tabella 15. Analisi statistiche sui dati di oscillazioni mensile del livello piezometrico nelle stazioni di misura analizzate.

Per ciascuno dei punti di misura analizzato, la CDF campionaria, ottenuta dai dati di oscillazione della falda misurati, è paragonabile ad una CDF normale media, varianza e deviazione standard (sd) coincidenti con quelle delle oscillazioni piezometriche misurate in una certa stazione (Fig. 64). Il test statistico di Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors, su ciascuna delle stazioni analizzate, ha confermato questa ipotesi. Alla luce di questi risultati, le oscillazioni piezometriche su scala mensile

di distribuiscono secondo una CDF normale, di media, varianza e deviazione standard (sd) pari a quelle ottenute dai dati misurati in ciascuna stazione.

Stazione	P = 80%		P = 97.5%		P = 99%	
	CDF campionaria	CDF normale	CDF campionaria	CDF normale	CDF campionaria	CDF normale
151390001	0.4	0.4	0.9	0.8	1.5	1.4
151461312	0.5	0.7	1.7	1.5	2	1.8
151461313	0.7	1.3	1.2	1.5	2.6	2.9
151461354	0.5	0.9	1.6	2	2.2	2.5
151461379	0.5	0.7	1.1	1.2	1.5	1.6
151710197	0.2	0.4	0.7	0.8	1.1	1.2
Medio	0.5	0.7	1.2	1.3	1.8	1.9
Massimo	0.7	1.3	1.7	2	2.6	2.9

Tabella 16. Innalzamenti massimi (m) rispetto al livello piezometrico medio annuale determinati, per ciascuna stazione di misura, con P di 80, 97.5 e 99%, da CDF campionaria e normale.

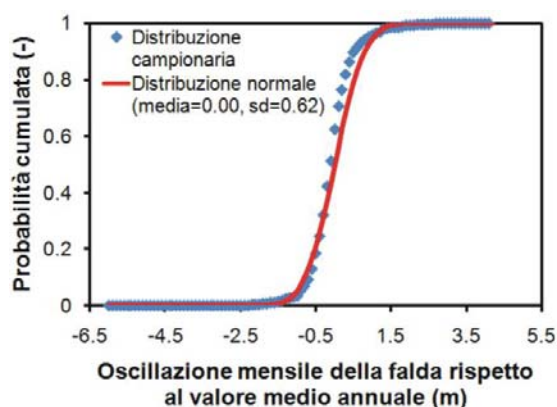


Figura 65. CDF campionaria e CDF normale associata delle oscillazioni piezometriche mensili della falda valutata considerando tutti i punti di misura analizzati.

Costruite le CDF campionarie e normale, sono stati valutati, per ciascun punto di misura, gli innalzamenti massimi in m della prima falda rispetto al livello medio ottenuti con probabilità (P) di 80, 97.5 e 99%, ricavati utilizzando sia la CDF campionaria sia la CDF normale associata. In media, la CDF normale fornisce le condizioni più sfavorevoli, ovvero innalzamenti della falda rispetto al valor medio maggiori con lo stesso livello di probabilità (Tab. 16). Le differenze tra le due CDF sono comunque di entità limitata, ad eccezione dello scenario P = 99%, risultando compresi tra 0.1 e 0.6 m.

Come già messo in evidenza in Politecnico di Milano (2006), data la similitudine tra la CDF campionaria e quella normale e data la dimensione dei campioni, che pur essendo sufficientemente ampia può non essere del tutto adeguata per l'identificazione delle code della CDF, le previsioni probabilistiche delle massime oscillazioni piezometriche basate sulla CDF normale appaiono più attendibili e saranno utilizzate in seguito.

Dati i simili trend di livello piezometrico ed i simili valori di oscillazioni piezometriche misurate alle diverse stazioni considerate, sono state ricostruite la CDF campionaria e la normale associata

considerando tutti i campioni delle stazioni come elementi di un'unica popolazione. In questo modo si ottiene un campione totale di dimensione totale pari a 1661, con i seguenti indici statistici: media di 0.002 m, deviazione standard di 0.62 m, varianza di 0.39 m. Anche in questo caso, il test statistico di Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors ha confermato che la CDF campionaria è paragonabile alla CDF normale (Fig. 65) di media, varianza e deviazione standard pari a quelle ottenute dai dati, con valore critico p-value di 0.05.

In Tab. 17 sono riportati i massimi innalzamenti in m ottenuti con i 3 livelli di P (80, 97.5 e 99%) e le due CDF associate ai dati delle diverse stazioni unite, presenti in Fig. 65. Le differenze tra i risultati ottenuti con la CDF campionaria e la CDF normale risultano sostanzialmente simili, ad eccezione di P = 80%, per cui CDF normale va a favore di sicurezza avendo valori di innalzamento 0.3 m più alti della CDF campionaria.

Come già sottolineato per i dati relativi alle singole stazioni, anche per i dati uniti le previsioni probabilistiche delle massime oscillazioni piezometriche basate sulla CDF normale appaiono più attendibili. E' inoltre importante sottolineare come i valori di innalzamento massimo ottenuti con la CDF normale dei dati uniti sono sostanzialmente uguali ai valori medi delle 6 stazioni di misura analizzate singolarmente (0.4 m per P = 80%, 1.3 m per P = 97.5%, 1.8 m per P = 99%). Questo conferma come il comportamento della prima falda, a livello di oscillazione piezometrica mensile rispetto ai valori medi annuali, sia relativamente omogeneo in tutta l'area indagata. A partire da queste considerazioni, si è deciso di utilizzare le previsioni probabilistiche delle massime oscillazioni piezometriche basate sulla CDF normale ottenuta dai dati di tutte le stazioni uniti per le successive analisi.

Stazione	P = 80%		P = 97.5%		P = 99%	
	CDF campionaria	CDF normale	CDF campionaria	CDF normale	CDF campionaria	CDF normale
Totale	0.4	0.7	1.2	1.3	1.8	1.9

Tabella 17. Innalzamenti massimi (m) rispetto al livello piezometrico medio annuale determinati, per i dati delle diverse stazioni uniti, con P di 80, 97.5 e 99%, da CDF campionaria e normale.

Una ulteriore analisi statistica, di particolare interesse applicativo, è stata effettuata allo scopo di associare un certo tempo di ritorno T_R a possibili valori di innalzamento mensile della falda rispetto al suo valore medio.

Considerando i soli dati uniti, che sono stati precedentemente ritenuti validi per caratterizzare le oscillazioni della prima falda nell'area studiata, le massime oscillazioni della falda, su scala di ogni singolo anno, sono state integrate per poter ottenere la CDF degli innalzamenti massimi mensili a scala di singolo anno, da cui definire la distribuzione dei massimi di Gumbel.

Essa viene definita come una funzione di interpolazione dei dati sperimentali, che presenta le seguenti equazioni caratteristiche (eq. 5 e 6):

$$P = \exp[-\exp(-y)] \quad \text{eq. 5}$$

$$y = a(x - u) \quad \text{eq. 6}$$

, dove P è la probabilità associata a certi valori di innalzamenti mensili x, a e u sono i parametri caratteristici della distribuzione di Gumbel.

La distribuzione di Gumbel ottenuta interpola bene i dati sperimentali (Fig. 66), e quindi può essere utilizzata nella determinazione degli innalzamenti della falda x , associati a certi T_R . L'innalzamento associato ad un certo T_R (x_{TR}) è infatti funzione dei parametri caratteristici della distribuzione di Gumbel a e u , secondo le seguenti equazioni (eq. 7 e 8):

$$x_{TR} = u + aW_{TR} \quad \text{eq. 7}$$

$$W_{TR} = -\ln \left[\ln \left(\frac{T_R}{T_R - 1} \right) \right] \quad \text{eq. 8}$$

Grazie a questo, sono stati quindi calcolati gli innalzamenti della prima falda previsti nell'area indagata, relativi a diversi T_R tra 2 e 200 anni (Tab. 18).

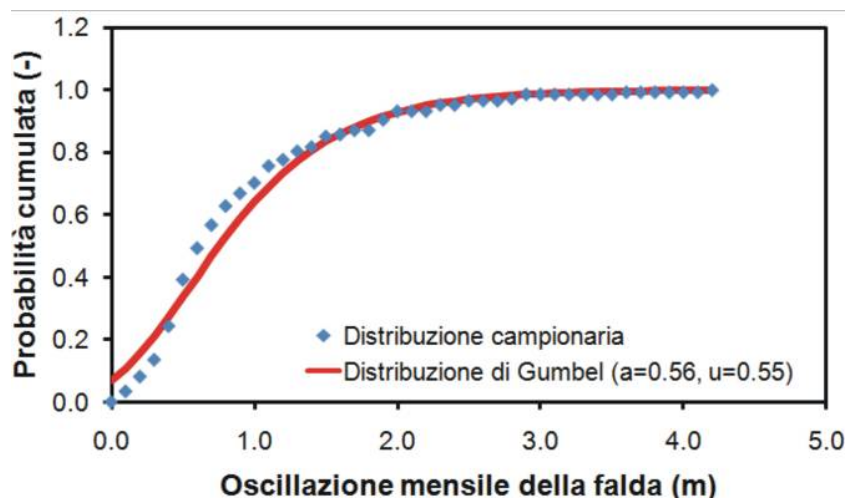


Figura 66. Distribuzione di Gumbel degli innalzamenti mensili della prima falda rispetto al valore medio, considerando tutti i dati delle stazioni di misura considerate.

Tempi di ritorno T_R (anni)	Innalzamento massimo ad un certo T_R (m)
2	0.8
5	1.4
10	1.8
15	2.0
20	2.2
25	2.3
30	2.4
50	2.7
75	2.9
100	3.1
150	3.3
200	3.5

Tabella 18. Innalzamenti massimi della prima falda nell'area studiata valutati per diversi T_R .

14.2 Scenario di massimo innalzamento della prima falda con tempo di ritorno di 25 anni

I massimi innalzamenti della prima falda valutati per via probabilistica possono essere utilizzati, a fini pratici, per valutare le soggiacenze ipotetiche in un'area in funzione delle oscillazioni dei livelli piezometrici previste.

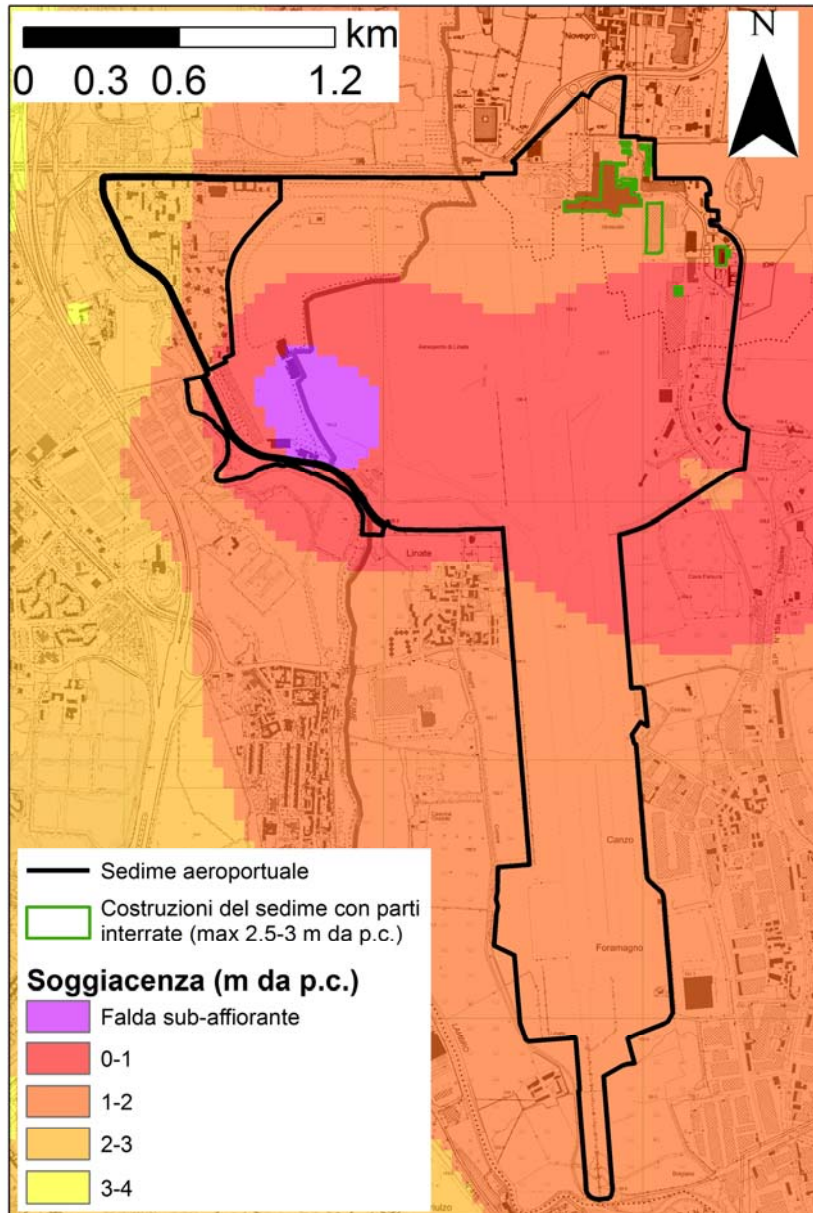


Figura 67. Soggiacenze previste considerando una risalita della prima falda con T_R di 25 anni.

Partendo dai dati medi di soggiacenza della prima falda misurati per il 2016, che quindi contengono informazioni più dettagliate sull'andamento dei livelli piezometrici nell'area aeroportuale (capitolo 13.2), sono stati ricostruiti i valori di soggiacenza dell'area del sedime, su base mensile, considerando un innalzamento della falda con tempo di ritorno T_R di 25 anni (2.3 m; Tab. 18). Questo scenario fornisce indicazioni sui massimi livelli della falda raggiungibili a medio termine, coprendo quindi l'intero periodo di interesse del previsto masterplan aeroportuale (2015-2030, 15 anni).

Secondo questo scenario, si nota come la soggiacenza della prima falda può raggiungere valori inferiori a 2 m in tutta l'area aeroportuale. Nella fascia centrale dell'aeroporto, la soggiacenza si abbassa a valori inferiori a 1 m, con anche la presenza di un'area nel settore occidentale del sedime dove la falda può essere sub-affiorante (Fig. 67).

Nella carta di Fig. 67, sono state anche segnate le costruzioni del sedime che presentano porzioni interrate, che si possono spingere fino ad un massimo di 2.5-3 m dal piano campagna. Nell'area dove sono presenti questi manufatti, localizzata nel settore nord-orientale dello scalo, secondo lo scenario considerato, la falda potrebbe risalire fino ad avere soggiacenze dell'ordine di 1-2 m dal piano campagna, lambendo o parzialmente interessando le porzioni interrate di questi edifici (Fig. 67).

Lo scenario di $T_R = 25$ anni mostra quanto la prima falda potrebbe risalire, a medio termine, nell'area aeroportuale. E' tuttavia opportuno analizzare i risultati di questa ricostruzione considerando i seguenti fattori, che non sono stati considerati nell'analisi svolta ma che possono avere un effetto sull'innalzamento dei livelli piezometrici:

- lo scenario ipotizza che la falda sia interessata da risalite uniformi in tutta l'area. Questo, seppur verificato con le analisi sui livelli piezometrici analizzati nel periodo 1990-2015, potrebbe presentare locali anomalie, in corrispondenza di particolari situazioni a scala ridotta. Questo va unito al fatto che il vicino Idroscalo mostra livelli di falda che subiscono minori oscillazioni temporali, mantenendosi mediamente intorno ai 105 m s.l.m. (Politecnico di Milano, 2006; confermato dalle ricostruzioni piezometriche per il 2016 all'interno di questo lavoro);
- gli innalzamenti massimi sono stati valutati per via probabilistica, a partire da punti di misura tutti ubicati all'esterno del sedime, in quanto non si dispone di una serie storica sufficientemente lunga dei punti di controllo della prima falda al suo interno;
- non si segnalano eventi di esondazione delle acque dell'Idroscalo dal momento della sua realizzazione (1928). Questo rappresenta come difficilmente la falda potrebbe risalire del tutto in superficie;
- l'estesa rete idrografica superficiale presente nell'area (capitolo 6) potrebbe avere un'azione di drenaggio delle acque di falda nei momenti di maggiore risalita, impedendo minimi valori di soggiacenza;
- la presenza di depositi superficiali limoso-argillosi a minore permeabilità, spessi almeno 2 m, in quasi tutta l'area del sedime (capitolo 10), potrebbe rallentare o impedire la risalita dei livelli della prima falda fino in prossimità del piano campagna.

15. Effetto dei prelievi idrici sui livelli piezometrici della prima falda nell'area del sedime aeroportuale

15.1 Andamento dei prelievi idrici dai pozzi del sedime

Il fabbisogno idrico dell'aeroporto di Milano Linate è stato assicurato, fin dalla sua entrata in esercizio, da prelievi in falde sotterranee tramite pozzi di proprietà SEA realizzati nel tempo all'interno del sedime aeroportuale.

Pozzo	Uso	Diametro	Profondità	Filtri	Portata di esercizio	Portata di esercizio
		mm	m da p.c.	m da p.c.	m ³ /s	m ³ /giorno
C - CRAL*	Potabile	500	121.0	da 72.0 a 90.0; da 109.0 a 115.0	0.02	1,935.36
F - Merci	Potabile	450	80.0	da 36.0 a 44.0; da 56.0 a 70.0	0.03	2,661.12
B - DeMontis	Potabile	500	120.0	da 59.0 a 77.0; da 109.0 a 113.0	0.03	2,661.12
RCT	Potabile	500	112.0	da 57.0 a 69.0; da 76.0 a 88.0; da 102.5 a 107.0	0.03	2,661.12
G - Ind3bis	Industriale	600	35.0	da 6.9 a 33.1	0.06	5,241.60
D - Ind2	Industriale	600	36.0	da 8.3 a 34.0	0.06	5,241.60
E - Ind1	Industriale	600	36.0	da 6.0 a 35.4	0.06	5,241.60
H - V.V.F.F.	Antincendio	450	40.0	da 25.0 a 31.0	0.06	5,241.60
I - Industriale Petrolieri	Antincendio	300	35.5	da 7.0 a 26.0	0.06	5,241.60

Tabella 19. Caratteristiche principali dei pozzi presenti nel sedime aeroportuale di Milano Linate.

*Il pozzo C-CRAL è attualmente non in esercizio.

Allo stato attuale, all'interno dell'aeroporto sono presenti 9 pozzi (Fig. 68). Questi pozzi servono le due reti principali di distribuzione indipendenti per alimentazione idrica, una per gli usi industriali (soprattutto, condizionamento degli edifici e pulizia dei mezzi) e antincendio e una per gli usi potabili (potabile-igienico/sanitario), che consentono la distribuzione dell'acqua a tutte le utenze SEA Spa e a tutti i "concessionari" (operatori aeroportuali). 4 pozzi servono per gli usi potabili, pescando le acque all'interno di falde profonde appartenenti ad almeno il secondo gruppo acquifero dell'area di studio. 5 pozzi, invece, servono agli usi industriali, con i loro filtri all'interno del primo acquifero più superficiale dell'area. Il pozzo H-V.V.F.F. non è in rete con gli altri pozzi potabili in quanto è dedicato esclusivamente all'alimentazione del locale presidio dei Vigili del fuoco e della relativa vasca di accumulo antincendio, mentre il pozzo I-Industriale Petrolieri non è in rete ed è dedicato all'antincendio dell'area di deposito carburanti.

In Tab. 19, sono elencate le principali caratteristiche di questi pozzi.

Tra i pozzi ad uso potabile, il pozzo C-CRAL è attualmente non in esercizio. Come previsto dal Masterplan, esso verrà chiuso, con successiva perforazione di un nuovo pozzo, sempre per uso

potabile, in sostituzione di questo. Esso verrà probabilmente ubicato nell'area settentrionale del sedime e avrà caratteristiche simili a quelle degli altri pozzi ad uso potabile a oggi esistenti (Tab.).

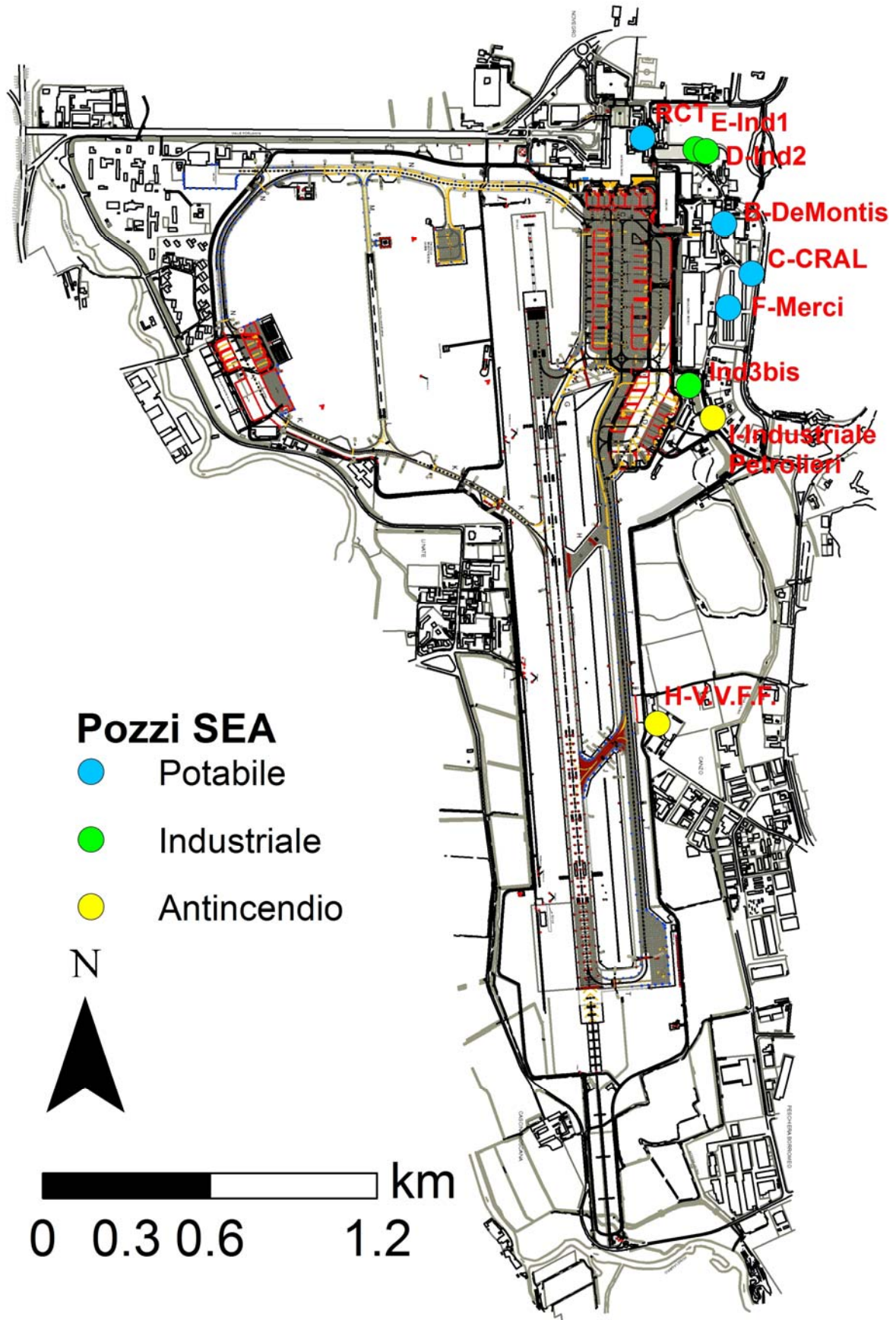


Figura 68. Ubicazione dei pozzi SEA nel sedime aeroportuale di Milano Linate.

L'andamento, nell'ultimo trentennio circa (periodo 1985-2015) dei prelievi idrici dai pozzi presenti nello scalo, evidenzia come i prelievi idrici, legati quindi al fabbisogno dell'aeroporto, siano diminuiti rispetto ai valori, mediamente superiori a 2,500,000 m³/anno, registrati negli anni '80 e '90 del secolo scorso (Fig. 69). A partire dai primi anni 2000, i prelievi idrici totali si sono stabilizzati intorno a valori mediamente inferiori a 2,000,000 di m³/anno. Questo è dovuto all'ampliamento dello scalo aeroportuale di Malpensa, 2000 ove sono state trasferite varie attività prima gravanti su Linate (Ummarino et al., 2008). A partire dal 2011, i valori dei prelievi idrici hanno subito una ulteriore diminuzione, scendendo al di sotto di 1,500,000 m³/anno.

Se i valori dei prelievi dai pozzi ad uso potabile si sono mantenuti circa stabili nel corso del periodo analizzato (Fig. 69), con un valore medio di circa 800,000 m³/anno, una maggiore flessione hanno subito i prelievi dai pozzi a uso industriale (Fig. 70a).

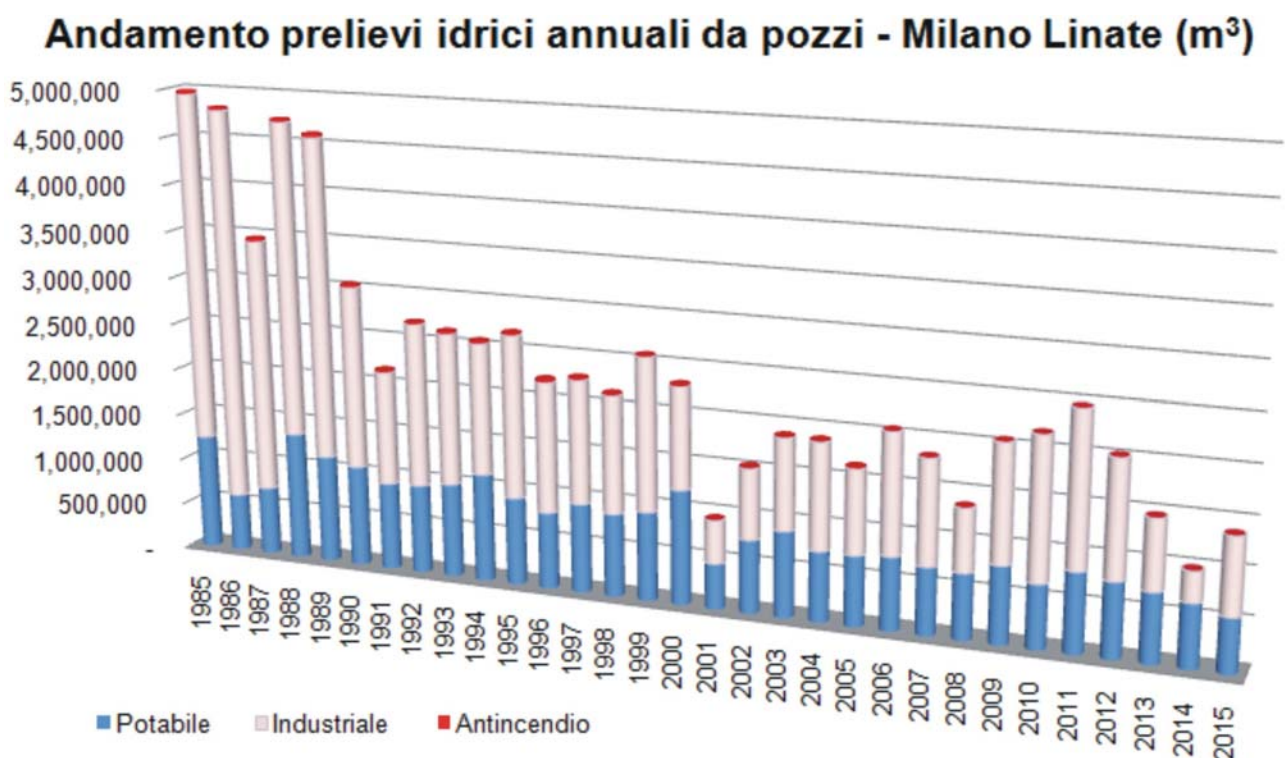


Figura 69. Prelievi idrici totali annui dai pozzi del sedime di Milano Linate.

Per questi, si è passati da valori medi di 2,170,000 m³/anno prima del 2000 a valori di 1,045,000 dopo il 2000, con una diminuzione percentuale del 52%. Per i pozzi a uso antincendio, i valori totali di prelievo si sono mantenuti normalmente bassi, inferiori a 40,000 m³/anno, con valori costantemente al di sotto di 10,000 m³/anno dal 2006 al 2015 (Fig. 70b).

I pozzi che maggiormente hanno subito una diminuzione nel loro utilizzo a partire dai primi anni 2000 sono stati il pozzo D-Ind2, G-Ind3bis e I-Industriale Petrolieri.

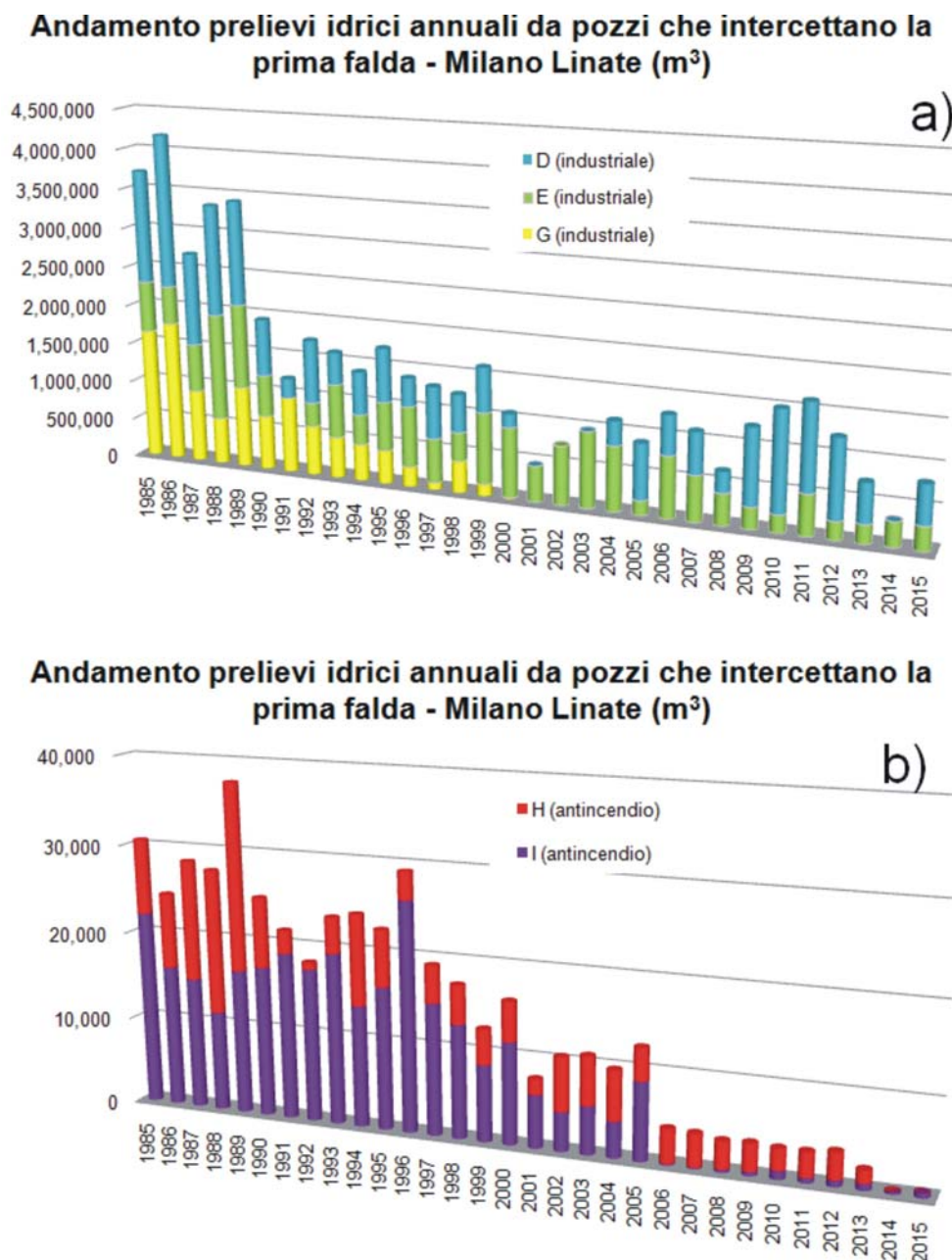


Figura 70. Prelievi idrici totali annui dai pozzi a uso industriale del sedime di Milano Linate (a); prelievi idrici totali annui dai pozzi a uso antincendio del sedime di Milano Linate.

15.2 Valutazione dell'effetto dei prelievi idrici sulla piezometria della prima falda

Il prelievo idrico dalle falde sotterranee determina in molti casi degli effetti dinamici sui livelli piezometrici che si possono ripercuotere nelle aree prospicienti un pozzo. Il pompaggio provoca una perturbazione nell'acquifero che è massima in prossimità dell'opera di drenaggio e si attenua con la distanza, fino ad annullarsi oltre ad una certa circonferenza di un certo raggio che prende il nome di raggio di influenza del pozzo.

L'abbassamento piezometrico indotto quindi dal pompaggio delle acque sotterranee del primo acquifero può avere conseguenze sui livelli della prima falda. Per questo motivo, è opportuno valutare l'effetto che i prelievi idrici dai pozzi che pescano dalla prima falda possono avere sulla piezometria di questa. Nonostante i prelievi idrici non si mantengano costanti nel tempo e non

raggiungano attualmente, per ciascun pozzo, i massimi valori di portata di esercizio di questo, è necessario valutare l'assetto piezometrico dinamico dovuto ad una messa in produzione, contemporanea secondo ciascuna portata di esercizio, di tutti i pozzi ad uso industriale e antincendio presenti nell'area aeroportuale di Linate.

Questa condizione è stata simulata da Ummarino et al. (2008). Tale simulazione rappresenta le condizioni potenzialmente peggiori sulle perturbazioni della prima falda. Essa è stata condotta considerando le seguenti condizioni al contorno:

- regime di flusso delle acque di falda di tipo stazionario (teoria di Dupuit);
- acquifero costituito da materiale omogeneo e isotropo;
- falda libera con un limite basale impermeabile;
- direzione di flusso e gradienti idraulici osservati nelle elaborazioni delle misure freatiche condotte nell'anno 2005;
- un livello piezometrico costante in corrispondenza dell'idroscalo, pari a 105 m s.l.m.;
- un valore di ricarica pari a un apporto meteorico medio di 1000 mm/anno.

Queste condizioni sono rappresentative dell'area di studio, risultando in linea anche con i dati elaborati all'interno del presente studio.

Da questa modellazione, si nota come i pozzi D-Ind2 ed E-Ind1 entrino in interferenza tra di loro, data la limitata distanza che li separa (70 m). A causa di questo fenomeno, l'abbassamento dinamico operato da ciascun pozzo si somma a quello dell'altro, portando in tal modo ad aumentare il raggio di influenza della coppia di pozzi e gli abbassamenti che causano sui livelli piezometrici (Civita, 2005). Risulta quindi un raggio di influenza complessivo di 132 m verso S-SW, mentre verso E e N l'effetto dinamico del pompaggio viene bloccato dalla presenza del vicino Idroscalo, che annulla sostanzialmente la perturbazione nella falda freatica indotta dal pompaggio (Figg. 71, 72). Gli abbassamenti dinamici della falda freatica sono massimi in corrispondenza dei due pozzi, raggiungendo valori di 3 m rispetto al valore piezometrico statico presente in quella zona nel periodo analizzato (104.7 m s.l.m.).

Lo stesso fenomeno di interferenza interessa anche i pozzi G-Ind3bis e I-Industriale Petrolieri (distanza tra i due pozzi di 120 m). Questo era già stato messo in luce in precedenti studi condotti in quest'area a partire dai medesimi pozzi (Ummarino, 2005a, b).

In questo settore dell'aeroporto, il raggio di influenza complessivo è pari a 300 m in direzione W e S, mentre, anche in questo caso, l'effetto dinamico del pompaggio viene bloccato verso N e verso E dalla presenza del vicino Idroscalo, che funge da barriera (Fig. 73). Anche in questa zona, gli abbassamenti dinamici della falda freatica sono massimi in corrispondenza dei due pozzi, raggiungendo valori di 3 m rispetto al valore piezometrico statico presente in quella zona nel periodo analizzato (103.0 m s.l.m.).

E' importante sottolineare che gli abbassamenti indotti dal pompaggio di questi pozzi, anche nelle condizioni peggiori ipotizzate in questa modellazione, interessano soltanto aree interne all'aeroporto. Grazie alla presenza dell'Idroscalo, che funge come una barriera, gli effetti non si propagano all'esterno del sedime aeroportuale.

L'ultimo pozzo che può provocare un abbassamento dei livelli della falda freatica è il pozzo H-V.V.F.F. Esso è ubicato lontano dagli altri pozzi industriali/antincendio, e quindi non risente di fenomeni di interferenza. Il raggio di influenza di questo pozzo è limitato a 46 m in tutte le direzioni, mentre l'abbassamento dinamico è molto esiguo, essendo al massimo di 0.3 m in corrispondenza del pozzo (Fig. 74).

Nel caso del pozzo H-V.V.F.F, il raggio di influenza e gli abbassamenti dinamici sono veramente molto limitati in tutte le direzioni, non in grado quindi di produrre perturbazioni che possono avere effetti negativi nelle aree del sedime o in quelle immediatamente esterne.

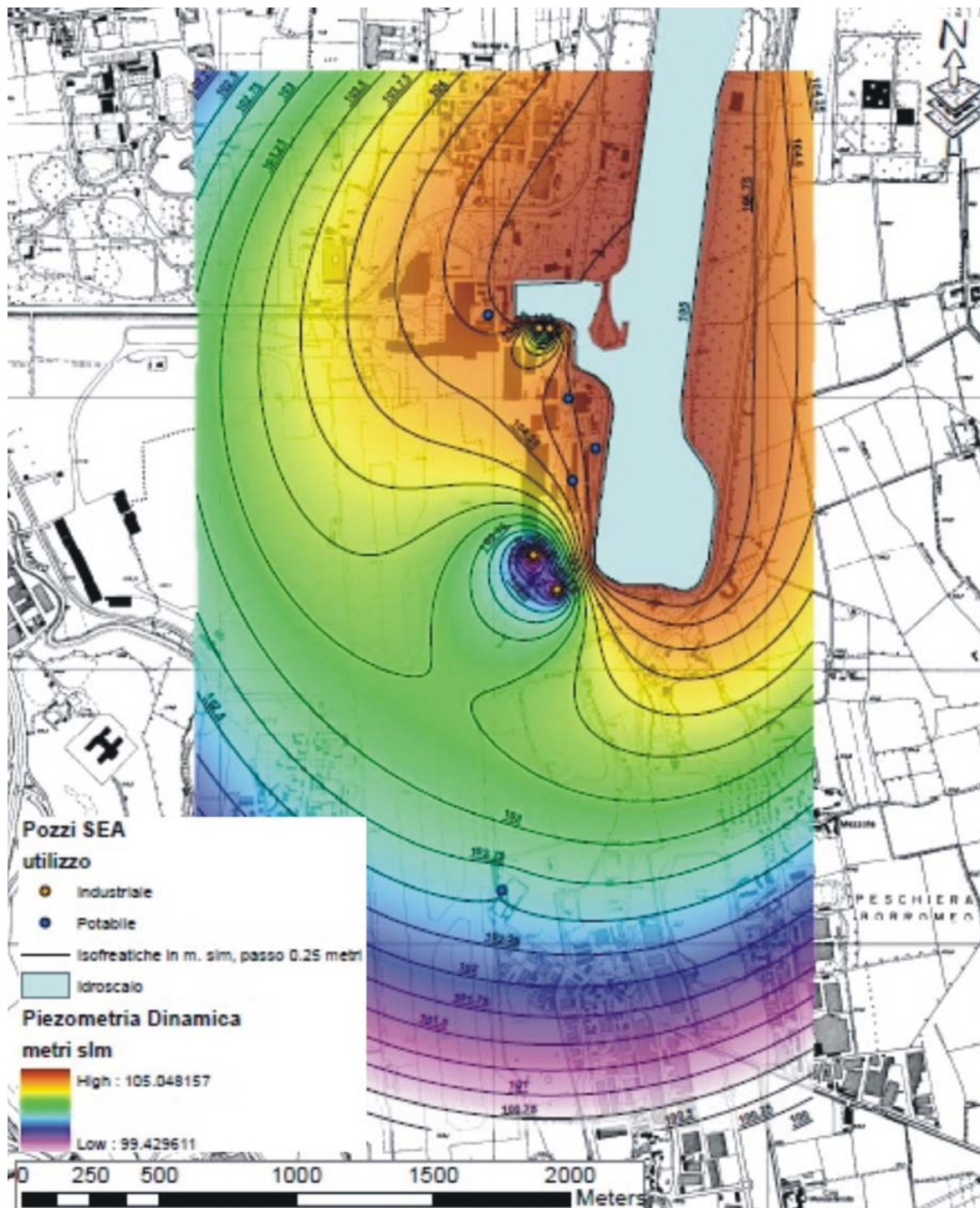


Figura 71. Piezometri dinamica della falda superficiale secondo la modellazione di Ummarino et al. (2008). Si nota come l'Idroscalo funga da barriera per la propagazione degli abbassamenti dinamici all'esterno del sedime, in direzione E e N (da Ummarino et al. 2008 - Tavola 4a, modificata).



Figura 72. Piezometri dinamica della falda superficiale secondo la modellazione di Ummarino et al. (2008), nei pressi dei pozzi E-Ind1 e D-Ind2 (da Ummarino et al. 2008 - Tavola 4b, modificata).

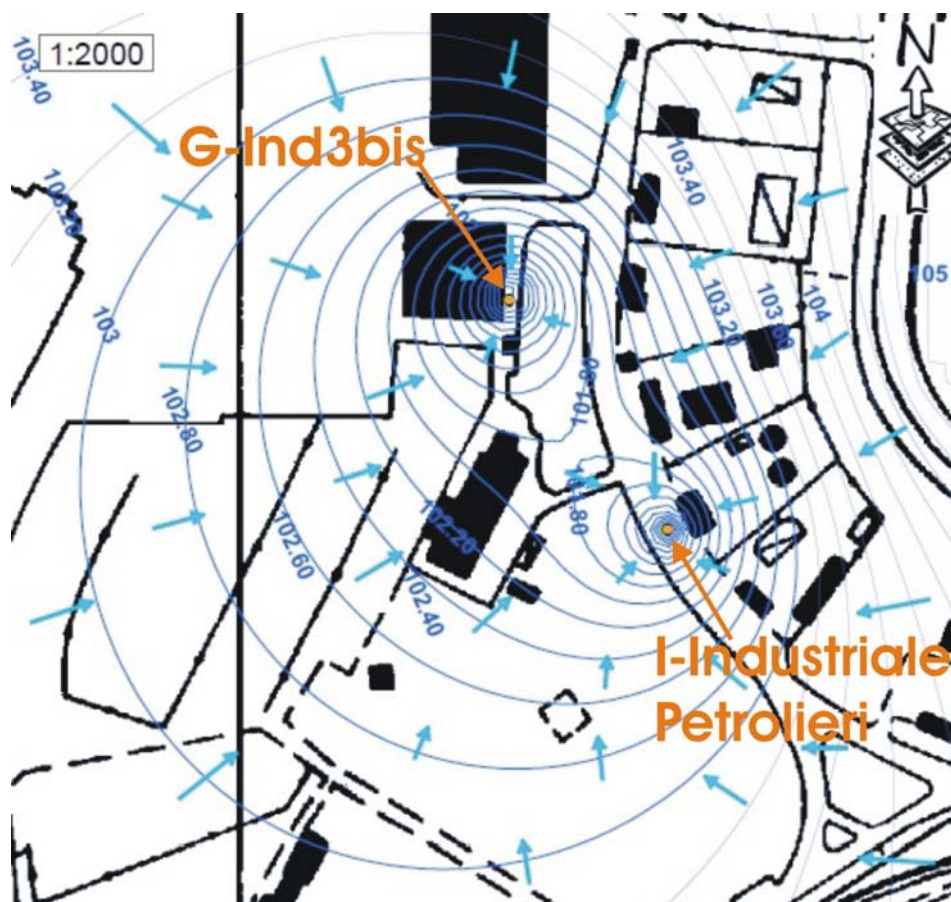


Figura 73. Piezometri dinamica della falda superficiale secondo la modellazione di Ummarino et al. (2008), nei pressi dei pozzi G-Ind3bis e I-Industriale Petrolieri (da Ummarino et al. 2008 - Tavola 4b, modificata).

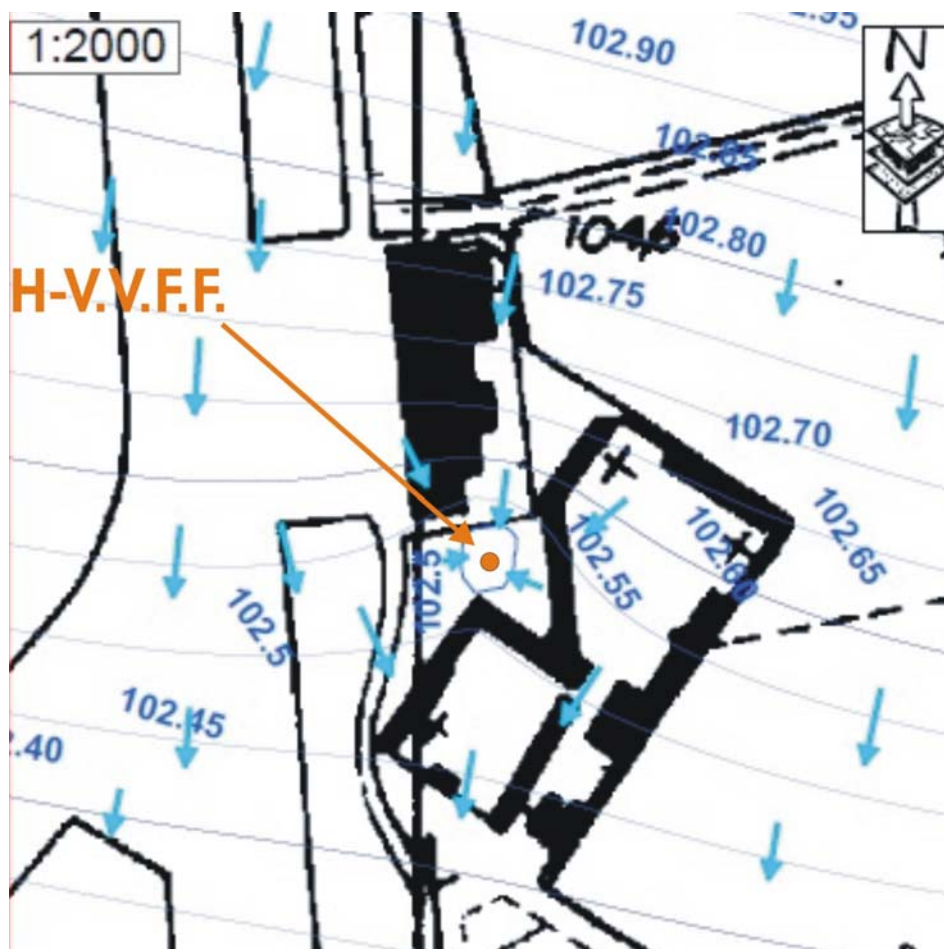


Figura 74. Piezometri dinamica della falda superficiale secondo la modellazione di Ummarino et al. (2008), nei pressi del pozzo H-V.V.F.F. (da Ummarino et al. 2008 - Tavola 4b, modificata).

In conclusione, la simulazione considerata per valutare gli effetti dei prelievi idrici dai pozzi nel sedime che interessano la prima falda è rappresentativa della situazione potenzialmente peggiore. Anche in queste condizioni, gli abbassamenti provocati dai massimi prelievi possibili raggiungono massimi valori di 3 m rispetto alla piezometria statica, che tuttavia si annullano a piccole distanze (< 300 m) dai punti di prelievo. Questi prelievi non sembrano quindi avere un effetto significativo sulla piezometria locale. Va inoltre sottolineato che gli abbassamenti provocati dal pompaggio dei pozzi non interessano aree esterne al sedime aeroportuale, anche grazie alla presenza dell'Idroscalo, che funge da barriera rispetto alla propagazione di tali perturbazioni in direzione N ed E.

16. Valutazione della vulnerabilità del primo acquifero

16.1 Metodologia di ricostruzione della vulnerabilità

La valutazione della vulnerabilità del primo acquifero nell'area del sedime aeroportuale di Milano Linate è importante ai fini di valutare gli impatti che l'aeroporto potrebbe avere sulla prima falda, a seguito delle loro inter-relazioni.

Per l'area di studio, è stata valutata la vulnerabilità intrinseca dell'area, ovvero la vulnerabilità dell'acquifero a un qualsiasi ipotetico inquinante prodotto dalle attività umane. Essa tiene conto delle caratteristiche geologiche, idrologiche e idrogeologiche dell'area, ma è indipendente dal tipo di sostanza contaminante. Nel resto del capitolo, la vulnerabilità intrinseca sarà più semplicemente indicata con il termine di vulnerabilità.

Tra i metodi di valutazione della vulnerabilità, uno dei più diffusamente utilizzati è il metodo SINTACS (Civita, 1994; Civita e De Maio, 2000; Civita, 2005). Si tratta di una metodologia parametrica, per cui a ciascun parametro del modello, suddiviso per intervalli di valore e/o tipologie, viene attribuito un punteggio crescente in funzione dell'importanza che esso assume nella valutazione complessiva finale. I punteggi ottenuti per ciascun parametro sono moltiplicati per stringhe di pesi che descrivano la situazione idrogeologica e/o d'impatto, enfatizzando in varia misura l'azione e l'importanza dei vari parametri.

L'acronimo SINTACS deriva dalle denominazioni dei parametri che vengono presi in considerazione:

- Soggiacenza della falda;
- Infiltrazione efficace;
- Non - saturo (effetto di autodepurazione del);
- Tipologia della copertura;
- Acquifero (caratteristiche idrogeologiche dell');
- Conducibilità idraulica dell'acquifero;
- Superficie topografica (acclività della).

L'effetto dei diversi parametri del modello SINTACS sulla vulnerabilità è stato descritto da Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (2001).

La soggiacenza della falda, lo spessore del non saturo e la tipologia della copertura (tipo di suolo) hanno notevole influenza sulla vulnerabilità degli acquiferi; da essi, dipendono il tempo di transito di un qualsiasi inquinante idro-portato e la durata delle azioni autodepurative dell'insaturo, in particolare dell'azione ossidante dell'ossigeno atmosferico.

L'infiltrazione efficace assume notevole importanza poiché regola il trascinamento in profondità degli inquinanti, ma anche la loro diluizione.

La tipologia dell'acquifero descrive i processi che avvengono al di sotto della superficie piezometrica, regolando i possibili processi di dispersione, diluizione ed assorbimento che possono limitare la diffusione di un inquinante idro-veicolato.

La conducibilità idraulica dell'acquifero influenza la velocità con cui l'inquinante può spostarsi nello spazio.

L'acclività della superficie topografica influisce sulla valutazione della vulnerabilità intrinseca soprattutto perché da essa dipende la quantità di ruscellamento che si produce a parità di

precipitazione e la velocità di spostamento dell'acqua (e, dunque, di un inquinante fluido o idroveicolato) sulla superficie.

Di seguito si elencano i procedimenti utilizzati per pervenire alla definizione dei vari parametri previsti dal metodo SINTACS per valutare la vulnerabilità dell'area studiata.

La vulnerabilità è stata valutata arealmente, partendo da un reticolo di maglie quadrate 5x5 m in cui l'area di studio è stata suddivisa. Questa suddivisione corrisponde alla medesima utilizzata per la realizzazione delle carte di distribuzione delle litologie (capitolo 10) e dei livelli piezometrici della prima falda relativi all'anno 2016 (capitolo 13). Per ciascuna cella, è stato quindi calcolato l'indice SINTACS, permettendo così di avere un valore di vulnerabilità caratteristico di ciascuna cella dell'area di studio.

Di seguito, vengono riportate le modalità con cui sono stati calcolati i punteggi relativi ai diversi parametri del modello.

Soggiacenza della falda

Sono stati considerati diversi scenari di soggiacenza della prima falda, in modo da valutare la variazione della vulnerabilità in funzione di diverse oscillazioni del livello della prima falda determinati da dati precedenti e da dati del 2016 (capitolo 13):

- Scenario 1: soggiacenza media dei mesi di Marzo degli anni compresi tra 2007 e 2013 (dati desunti dalle elaborazioni del Settore Risorse idriche e attività estrattive della Città Metropolitana di Milano)
- Scenario 2: soggiacenza media dei mesi di Settembre degli anni compresi tra 2007 e 2013 (dati desunti dalle elaborazioni del Settore Risorse idriche e attività estrattive della Città Metropolitana di Milano)
- Scenario 3: soggiacenza media (tra i mesi di Marzo e Settembre) degli anni compresi tra 2007 e 2013 (dati desunti dalle elaborazioni del Settore Risorse idriche e attività estrattive della Città Metropolitana di Milano)
- Scenario 4: soggiacenza del mese di Giugno 2016
- Scenario 5: soggiacenza del mese di Settembre 2016
- Scenario 6: soggiacenza media del 2016 (tra i mesi di Giugno e Settembre).

Infiltrazione efficace

Il punteggio dell'infiltrazione efficace è stato calcolato mediante i seguenti passaggi:

1) è stato calcolato il deflusso idrico annuo medio dell'area (D), come differenza tra le precipitazioni medie annue (P) misurate nell'area (996.3 mm; capitolo 4) e l'evapotraspirazione media annua (E), valutata tramite la formula di Turc a partire dalle temperature medie mensili (capitolo 4) (T_{mens}) (eq. 9 e 10):

$$E = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{\left(300 + 25T_P + 0.05T_P^3\right)^2}}} \quad \text{eq. 9}$$

$$T_P = \frac{\sum P_{mens} T_{mens}}{P} \quad \text{eq. 10}$$

- 2) i valori di D sono moltiplicati per un coefficiente di infiltrazione efficace, χ , che dipende dal tipo di litologia di superficie (carta della litologia superficiale; capitolo 10), ottenendo l'infiltrazione efficace;
- 3) in funzione del valore di infiltrazione efficace, si assegna quindi un certo punteggio a questo parametro.

Non - saturo (effetto di autodepurazione del)

Il punteggio del non saturo dipende dalla tipologia di materiale presente nell'area priva di falda e dal suo spessore (distribuzione delle litologie; capitolo 10). In funzione del tipo di materiale che forma la zona non satura, si assegna quindi un certo punteggio a questo parametro, che viene moltiplicato per lo spessore della zona non satura. Lo spessore del non saturo dipende dalla soggiacenza dell'area. Per questo motivo, ai diversi scenari di soggiacenza considerati (soggiacenza media da dati storici, soggiacenza media dell'anno 2016) corrispondono diversi scenari di distribuzione del punteggio del non saturo.

Tipologia della copertura

Il metodo SINTACS considera la tessitura del tipo di suolo eventualmente presente e la presenza di aree urbanizzate nella definizione del punteggio da assegnare a questo parametro. Per la distribuzione del tipo di suolo, è stata considerata la carta pedologica dell'area con la carta del grado di protezione garantito dal suolo nei confronti della falda freatica (capitolo 7), integrata con la distribuzione delle aree urbanizzate, desunta dal database DUSAF 4.0 (anno 2012), disponibile dal Geoportale della Regione Lombardia.

Acquifero (caratteristiche idrogeologiche dell')

Per l'assegnazione del punteggio relativo alle caratteristiche dell'acquifero, si è fatto riferimento alla litologia del primo acquifero dell'area (capitolo 10).

Conducibilità idraulica dell'acquifero

Per l'assegnazione del punteggio relativo alla conducibilità idraulica dell'acquifero, si è fatto riferimento ai valori medi di conducibilità idraulica desunti dagli slug test effettuati in piezometri del sedime (capitolo 11.2).

Superficie topografica (acclività della)

L'acclività della superficie topografica, espressa come sua pendenza in %, è stata calcolata mediante il software ArcGIS 9.3, a partire dal modello digitale del terreno (DEM), con celle quadrate di 5x5 m, utilizzato come base topografica del modello 3D del sottosuolo dell'area (capitolo 10).

Dato il fatto che sono stati considerati diversi scenari di soggiacenza della prima falda e di corrispondente spessore di terreno non saturo, sono stati ricostruiti 6 scenari di vulnerabilità del primo acquifero, dipendenti proprio dallo scenario di soggiacenza della prima falda. In tutti questi scenari, gli altri parametri del modello (infiltrazione efficace, copertura, acquifero, conducibilità idraulica, acclività) sono stati mantenuti costanti.

In Tab. 20, sono elencati i punteggi relativi alle diverse classi di ciascuno dei parametri utilizzati dal metodo SINTACS per valutare la vulnerabilità.

Per ciascuna cella in cui è stata suddivisa l'area di indagine, l'indice SINTACS (IS) è stato calcolato, attraverso il software ArcGIS 9.3, come somma dei prodotti del punteggio di ciascun parametro (Punt) per il relativo peso (Weight) (eq. 11):

$$IS = \sum_{i=1}^7 Punt_i * Weight_i \quad \text{eq. 11}$$

Come classe di pesi da assegnare ai parametri, si è scelto la classe relativa ad uno scenario di impatto rilevante. Questa scelta è legata al fatto che si tratta di un'area fortemente urbanizzata, con numerosi insediamenti industriali, nella quale il livello piezometrico della prima falda è vicino al piano campagna (pochi metri di soggiacenza, capitolo 13).

L'indice risulta avere un valore compreso tra 26 e 260. Questo viene quindi normalizzato (IS_{norm}) e riportato in percentuale tramite eq. 12:

$$IS_{norm} = \left(\frac{IS - 26}{260 - 26} \right) * 100 \quad \text{eq. 12}$$

IS_{norm} è quindi suddiviso in 6 classi che definiscono le diverse classi di vulnerabilità:

- Molto bassa: $0 < IS_{norm} < 24\%$
- Bassa: $24 < IS_{norm} < 35\%$
- Media: $35 < IS_{norm} < 49\%$
- Alta: $49 < IS_{norm} < 69\%$
- Elevata: $69 < IS_{norm} < 79\%$
- Estremamente elevata: $79 < IS_{norm} < 100\%$.

In questo modo, è stato possibile ricostruire la distribuzione delle classi di vulnerabilità del primo acquifero dell'area indagata.

Parametro	Peso del parametro (Impatto rilevante)	Classe	Punteggio SINTACS
Soggiacenza della falda	5	15-20 m	3
		10-15 m	4
		8-10 m	5
		6-8 m	6
		4-6 m	7
		2-4 m	8
		1-2 m	9
		0-1 m	10
Infiltrazione efficace	5	Aree urbanizzate - 129 mm; Terreno di riporto eterogeneo - 129 mm; Depositi a ghiaia prevalente con sabbie - 484 mm	4
		Depositi limoso-argillosi - 193 mm	8
Non - saturo (effetto di autodepurazione del)	4	Aree urbanizzate	1
		Terreno di riporto eterogeneo	1

		Depositi limoso-argillosi	2
		Depositi a ghiaia prevalente con sabbie	7
Tipologia della copertura	5	Suoli a tessitura limoso-argillosa (grado di protezione nei confronti della falda freatica moderato)	2
		Suoli a tessitura franca sabbiosa (grado di protezione nei confronti della falda freatica basso)	4
		Suoli a tessitura franca grossolana (grado di protezione nei confronti della falda freatica basso)	5
		Suolo assente (aree urbane)	10
Acquifero (caratteristiche idrogeologiche dell')	3	Depositi a ghiaia prevalente con sabbie	8
Conducibilità idraulica dell'acquifero	2	Conducibilità idraulica di $10^{-2}/10^{-3}$ m/s	9
Superficie topografica (acclività della)	2	26-30%	1
		22-25%	2
		19-21%	3
		16-18%	4
		13-15%	5
		10-12%	6
		7-9%	7
		5-6%	8
		3-4%	9
		0-2%	10

Tabella 20. Punteggi assegnati alle diverse classi di ciascun parametro utilizzato nel calcolo dell'indice SINTACS. I valori dei punteggi sono stati desunti da Civita e De Maio (2000).

16.2 Andamento della vulnerabilità

In Fig. 75 sono riportate le carte di distribuzione delle classi di vulnerabilità, secondo i 6 diversi scenari considerati.

Per tutti gli scenari considerati, le due classi più diffuse sono quelle identificate rispettivamente come alta ed elevata. La significativa vulnerabilità dell'area è legata alle caratteristiche intrinseche dell'acquifero (elevata permeabilità, elevata infiltrazione efficace, suoli superficiali di spessore limitato con poca capacità di protezione nei confronti della falda) ed alle caratteristiche piezometriche della falda in esso presente. La bassa soggiacenza della falda, che, come visto nel capitolo 13 ha valori generalmente compresi tra circa 1 e 10 m dal piano campagna, comporta un limitato spessore di terreno insaturo, facendo così crescere la sua vulnerabilità nei confronti di potenziali contaminanti.

Nonostante gli scenari relativi all'anno 2016 (Fig. 75d, e, f) siano stati ricostruiti partendo da valori di soggiacenza mediamente inferiori di 2-3 m rispetto a quelli del periodo 2007-2013, la vulnerabilità dell'area non cambia significativamente nell'area. Ciò comporta che, anche considerando le massime oscillazioni tipiche dei livelli piezometrici della prima falda, che sono state quantificate in circa 2-3 m rispetto al valore medio (capitolo 14), la vulnerabilità dell'area non ne risente significativamente, mantenendosi sempre molto elevata.

Nelle carte di Fig. , sono anche state riportate le zone in cui la prima falda affiora in superficie (identificate in carta con il termine di "falda affiorante"). Tali zone corrispondono a cave in falda, la cui attività è tuttora attiva o cessata. Queste aree sono zone in cui la vulnerabilità è estremamente elevata, poichè un qualsiasi contaminante immesso in una di queste aree può essere idroveicolato

nella falda direttamente senza alcun ostacolo, data la presenza in superficie della superficie piezometrica.

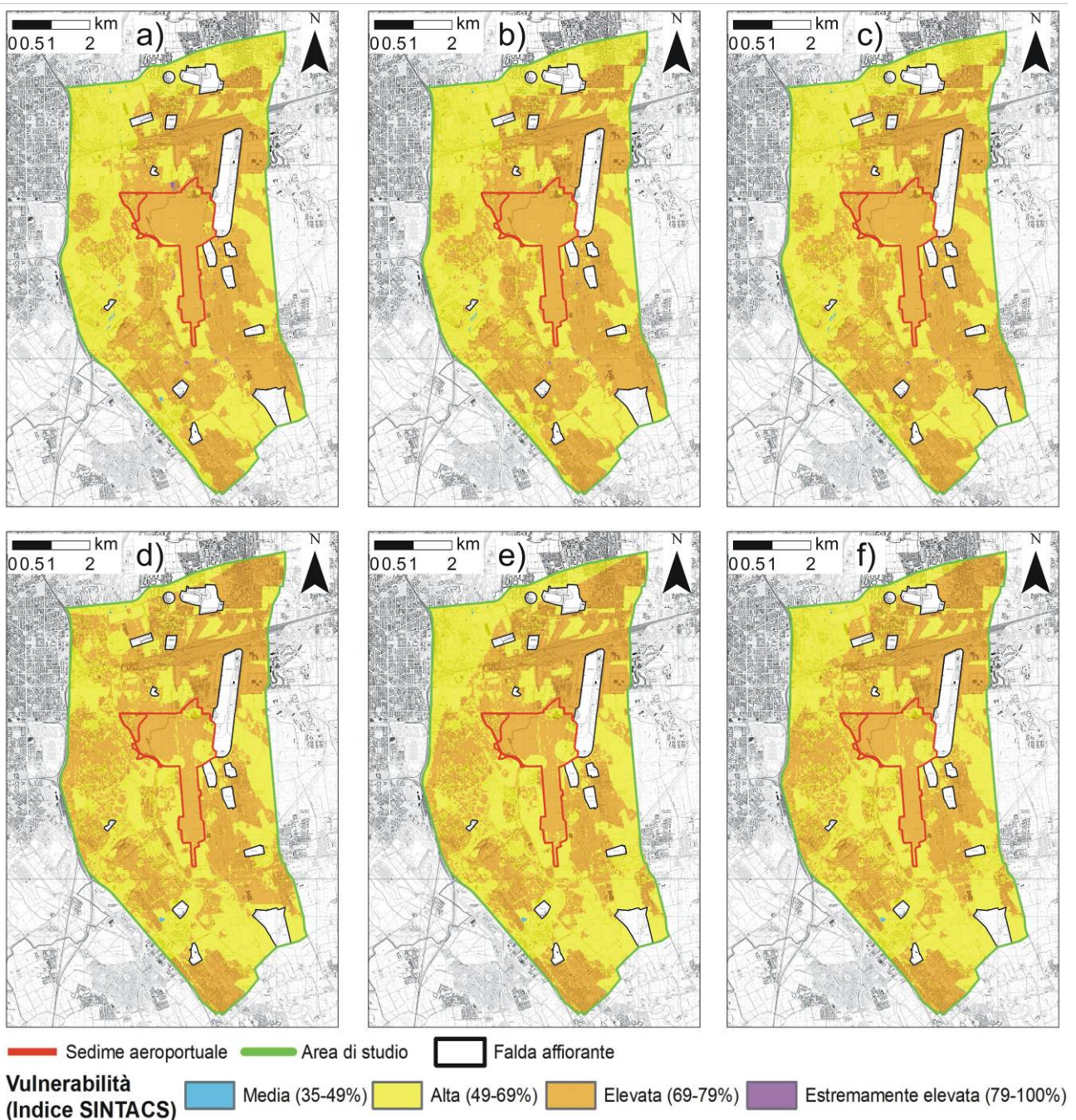


Figura 75. Vulnerabilità del primo acquifero, calcolata mediante l'indice SINTACS: a) scenario corrispondente all'andamento medio della soggiacenza dei mesi di Marzo degli anni 2007-2013; b) scenario corrispondente all'andamento medio della soggiacenza dei mesi di Settembre degli anni 2007-2013; c) scenario corrispondente all'andamento medio della soggiacenza (tra i mesi di Marzo e Settembre) degli anni 2007-2013; d) scenario corrispondente all'andamento della soggiacenza di Giugno 2016; e) scenario corrispondente all'andamento della soggiacenza di Settembre 2016; f) scenario corrispondente all'andamento media della soggiacenza del 2016 (tra i mesi di Giugno e Settembre).

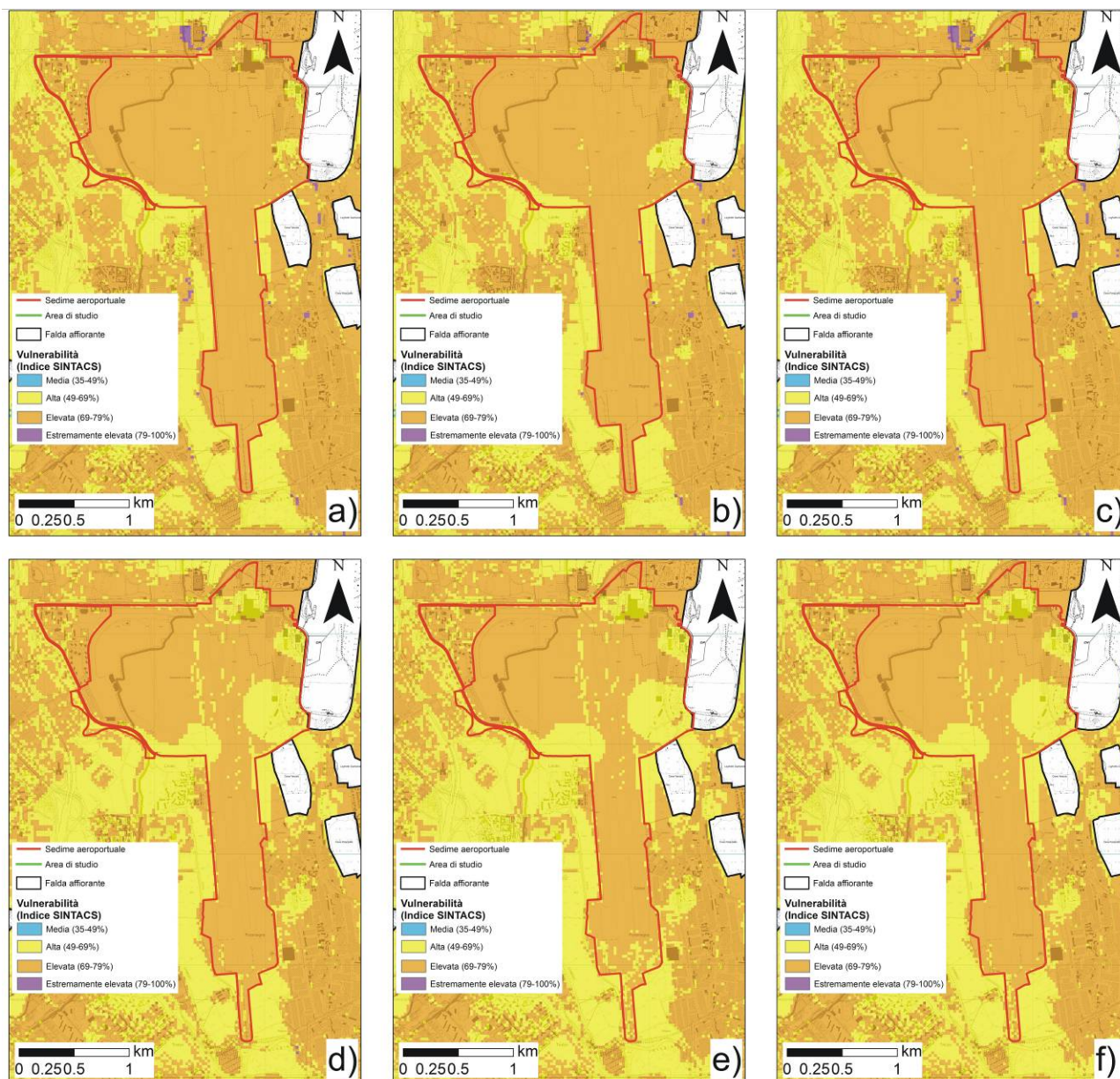


Figura 76. Particolare, nell'area del sedime di Milano Linate, della vulnerabilità del primo acquifero, calcolata mediante l'indice SINTACS: a) scenario corrispondente all'andamento medio della soggiacenza dei mesi di Marzo degli anni 2007-2013; b) scenario corrispondente all'andamento medio della soggiacenza dei mesi di Settembre degli anni 2007-2013; c) scenario corrispondente all'andamento medio della soggiacenza (tra i mesi di Marzo e Settembre) degli anni 2007-2013; d) scenario corrispondente all'andamento della soggiacenza di Giugno 2016; e) scenario corrispondente all'andamento della soggiacenza di Settembre 2016; f) scenario corrispondente all'andamento media della soggiacenza del 2016 (tra i mesi di Giugno e Settembre).

Analizzando in particolare la vulnerabilità nell'area del sedime aeroportuale (Fig. 76), si conferma come essa sia molto significativa in tutta quest'area e nelle aree prospicienti. In tutti gli scenari ricostruiti, soltanto limitate porzioni presentano una vulnerabilità classificata come alta. Tali porzioni corrispondono all'area settentrionale dell'aerostazione, al bordo nord-occidentale del sedime e alla zona più orientale del sedime.

Per tutti gli scenari relativi alla situazione di soggiacenza ricostruita per gli anni 2007-2013, in cui mediamente i livelli piezometrici erano più elevati, c'è anche un'area immediatamente a N del sedime in cui la vulnerabilità è addirittura estremamente elevata (Fig. 76)

Anche per l'area del sedime, si conferma che la vulnerabilità del primo acquifero rimane molto significativa senza grosse variazioni, considerando scenari diversi di soggiacenza che rappresentano le oscillazioni che mediamente possono interessare la falda freatica in questa zona.

E' opportuno sottolineare la presenza di alcune aree di falda affiorante in prossimità del bordo orientale del sedime (Fig. 76), che identificano quindi zone ad elevatissima vulnerabilità.

In conclusione, gli scenari di vulnerabilità ricostruiti, mediante l'utilizzo del metodo SINTACS, mostrano come la vulnerabilità del primo acquifero risulti essere sempre molto significativa (alta/elevata) in tutta l'area di studio, compreso quindi anche il sedime. Questo accade anche considerando le tipiche oscillazioni del parametro soggiacenza della prima falda (da cui dipende anche lo spessore del non saturo).

Sarà quindi opportuno tenere conto degli elevati valori di vulnerabilità dell'area del sedime, in modo da realizzare e dimensionare le opere previste nel masterplan al fine di evitare eventuali sversamenti di contaminanti in falda.

17. Caratteristiche qualitative delle acque superficiali e sotterranee

17.1 Acque superficiali

Per quanto riguarda le caratteristiche qualitative delle acque superficiali, si rimanda alla relazione sugli aspetti naturalistici dell'area aeroportuale prodotta dal gruppo di ricerca del Prof. A. Meriggi (Università di Pavia) (Allegato QAMB03). In questa, le caratteristiche qualitative delle acque superficiali sono state valutate tramite le tecniche prescritte nel D.Lgs. 152/2006, con le sue successive modifiche ed integrazioni (D.M. 131/2008, D.M. 56/2009, D.M. 260/2010 e D.L. 10.12.2010), e con altri indici biologico-naturalistici dei corsi d'acqua dell'area di studio.

17.2 Acque sotterranee

I criteri per valutare lo stato quantitativo e lo stato chimico delle acque sotterranee, in relazione alla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento, sono regolamentati dal D.Lgs. 30/09, che ha dato attuazione alla direttiva 2006/118/CE.

Tali direttive impongono che i corpi idrici sotterranei dovevano raggiungere, sia per gli aspetti chimici sia per quelli quantitativi, entro il 22 dicembre 2015 uno stato ambientale definito "buono".

I criteri per la definizione dei corpi idrici sotterranei, le modalità di monitoraggio chimico e quantitativo della risorsa sono tra gli aspetti modificati rispetto alle norme precedenti. Le pressioni antropiche sulle acque sotterranee e gli eventuali impatti sono alla base dei criteri assunti per la definizione dei corpi idrici, insieme alle caratteristiche geologiche e idrogeologiche.

Per quanto riguarda la qualità delle acque sotterranee, i parametri di base presi in considerazione sono riportati in Tab. 21. Tra i parametri di base, alcuni indicati nella sottostante tabella (Tab. 21) con l'asterisco sono quelli utilizzati per la classificazione.

Per quanto riguarda invece gli inquinanti organici ed inorganici, i valori soglia (espressi in µg/L) definiti dal D.Lgs. 30/09 sono riportati nella Tab. 22.

Per il presente studio, al fine della valutazione di eventuali impatti prodotti dalla gestione dell'aeroporto di Milano-Linate sulla qualità delle acque sotterranee, sono stati analizzati ed elaborati i dati relativi a sei pozzi appartenenti alla rete di monitoraggio qualitativo delle acque sotterranee di ARPA Lombardia, per il periodo 2009-2014 (campagne di campionamento primaverili ed autunnali).

Temperatura (°C)	Potassio (mg/L)
Durezza totale (mg/L CaCO ₃)	Sodio (mg/L)
Conducibilità elettrica (µS/cm (20°C))*	Solfati (mg/L) come SO ₄ *
Bicarbonati (mg/L)	Ione ammonio (mg/L) come NH ₄ *
Calcio (mg/L)	Ferro (mg/L)*
Cloruri (mg/L)*	Manganese (mg/L)*
Magnesio (mg/L)	Nitrati (mg/L) come NO ₃ *

Tabella 21. Parametri di base. *Parametri utilizzati per la classificazione.

Inoltre, sono stati analizzati i dati di monitoraggio chimico commissionati direttamente da SEA per i pozzi presenti all'interno del sedime aeroportuale (Fig. 68, capitolo 15), realizzati per scopi idropotabili e industriali/antincendio (analisi relative al periodo 1987-2016).

INQUINANTI	VALORI SOGLIA	INQUINANTI	VALORI SOGLIA
METALLI		Cloruro di Vinile	0.5
Antimonio	5	1.2 Dicloroetano	3
Arsenico	10	Tricloroetilene	1.5
Cadmio**	5	Tetracloroetilene	1.1
Cromo Totale	50	Esaclorobutadiene	0.15
Cromo VI	5	Sommatoria organoalogenati	10
Mercurio	1	ALIFATICI CLORURATI NON CANCEROGENI	
Nichel	20	1.2 Dicloroetilene	60
Piombo	10	ALIFATICI ALOGENATI CANCEROGENI	
Selenio	10	Dibromoclorometano	0.13
Vanadio	50	Bromodiclorometano	0.17
INQUINANTI INORGANICI		NITROBENZENI	
Boro	1000	Nitrobenzene	3.5
Cianuri liberi	50	CLOROBENZENI	
Fluoruri	1500	Monoclorobenzene	40
Nitriti	500	1.4 Diclorobenzene	0.5
Solfati	250 (mg/L)	1.2.4 Triclorobenzene	190
Cloruri	250 (mg/L)	Triclorobenzene (12002-48-1)	0.4
Ammoniaca (ione ammonio)	500	Pentaclorobenzene	5
COMPOSTI ORGANICI AROMATICI		Esaclorobenzene	0.01
Benzene	1	PESTICIDI	
Etilbenzene	50	Aldrin	0.03
Toluene	15	Beta-esaclorocicloesano	0.1
Para-xilene	10	DDT, DDD, DDE	0.1
POLICLICI AROMATICI		Dieldrin 0.03	
Benzo (a) pirene	0.01	Sommatoria -	
Benzo (b) fluorantene	0.1	(aldrin, dieldrin, endrin, isodrin)	0.01
Benzo (k) fluorantene	0.05	DIOSSINE E FURANI	
Benzo (g,h,i) perilene	0.01	Sommatoria PCDD, PCDF	4x10 ⁻⁶
Indeno(1,2,3- -c,d) pirene	0.1	ALTRE SOSTANZE	
Dibenzo (a, h) antracene	0.01	PCB	0.01
Indeno (1,2,3-c,d) pirene	0.1	Idrocarburi totali (espressi come n-esano)	350
ALIFATICI CLORURATI CANCEROGENI		Conduttività (µScm -1 a 20°C) –	
Triclorometano	0.15	acqua non aggressiva	2500

Tabella 22. Valori soglia, espressi in µg/L, per la concentrazione degli inquinanti inorganici e organici (D.Lgs. 30/09, all'Allegato 3, Parte A, Tabella 3).

I pozzi utilizzati della rete di monitoraggio ARPA si localizzano idraulicamente sia a monte che a valle del sedime aeroportuale (Fig. 77).

I medesimi pozzi presentano sistemi di filtraggio sviluppati sia all'interno dell'acquifero superficiale (pozzi PO015146NR2600, PO0152050R0052 e PO0151950U0012) sia all'interno dell'acquifero profondo (pozzi PO0151460U0412, PO0151460U0340 e PO0151920U0005).

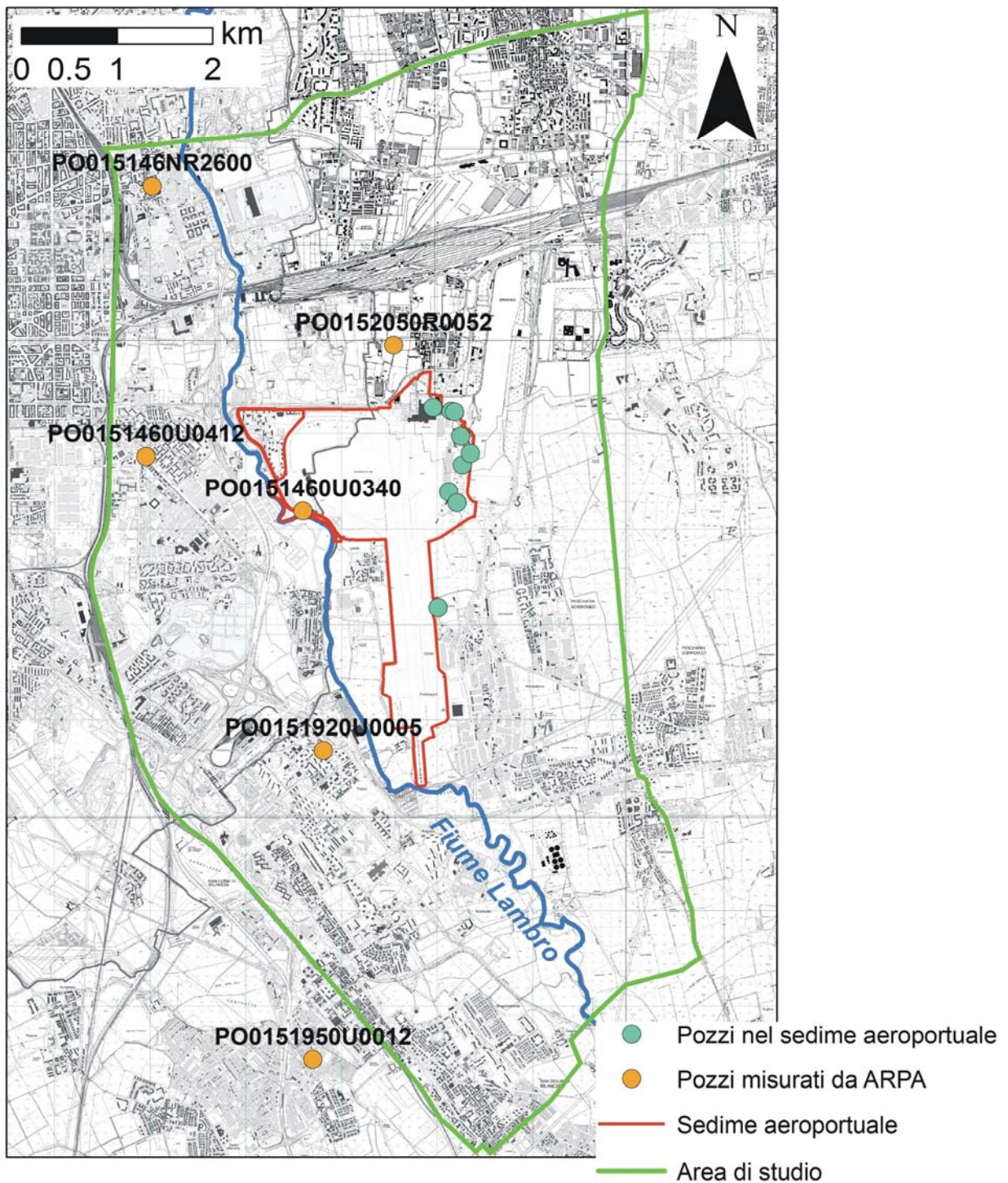


Figura 77. Rete di monitoraggio della qualità delle acque di ARPA Lombardia, con i pozzi considerati nell'analisi delle caratteristiche qualitative delle acque sotterranee.

I pozzi a servizio delle attività aeroportuali, le cui caratteristiche e posizione sono elencate nel capitolo 15, sono, invece, ubicati prevalentemente nel settore nord-occidentale del sedime e possiedono sistemi di filtraggio all'interno dell'acquifero superficiale (pozzi industriali/antincendio D, E, G, H e I) o dell'acquifero profondo (pozzi potabili A, B e F, attualmente attivi e C, dismesso). Da un punto di vista chimico, le acque dell'acquifero superficiale e dell'acquifero profondo evidenziano una idrofacies di tipo bicarbonato-calcaica con un grado di mineralizzazione sostanzialmente medio (conducibilità elettriche normalmente comprese tra 400 e 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$), come

gran parte delle acque della Pianura Padana. Allo ione calcio si associano, con concentrazioni relativamente costanti, lo ione magnesio (10-30 mg/L) e gli ioni sodio e potassio con concentrazioni rispettivamente di circa 5-30 mg/L e 1-4 mg/L.

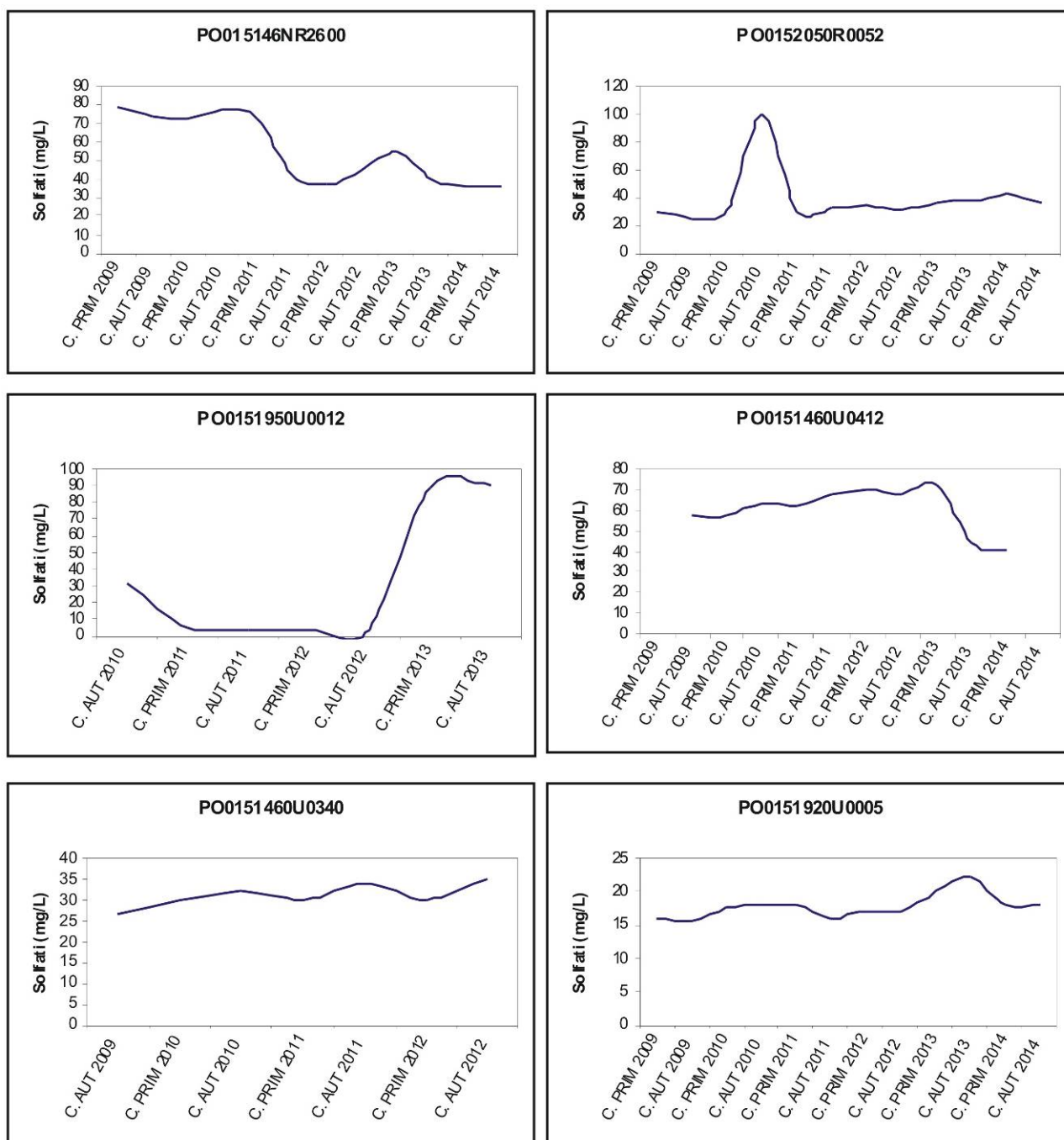


Figura 78. Variazione della concentrazione in solfati nei pozzi della rete di monitoraggio ARPA Lombardia determinati nelle campagne di analisi autunnali e primaverili.

Dall'analisi dei dati non si osservano variazioni sostanziali di chimismo tra le acque sotterranee dell'acquifero superficiale e le acque dell'acquifero profondo.

Gli anioni che in gran parte possono derivare da apporti superficiali di origine antropica (solfati, cloruri e, specialmente, nitrati) mostrano concentrazioni molto differenziate indipendentemente dalla profondità di provenienza delle acque.

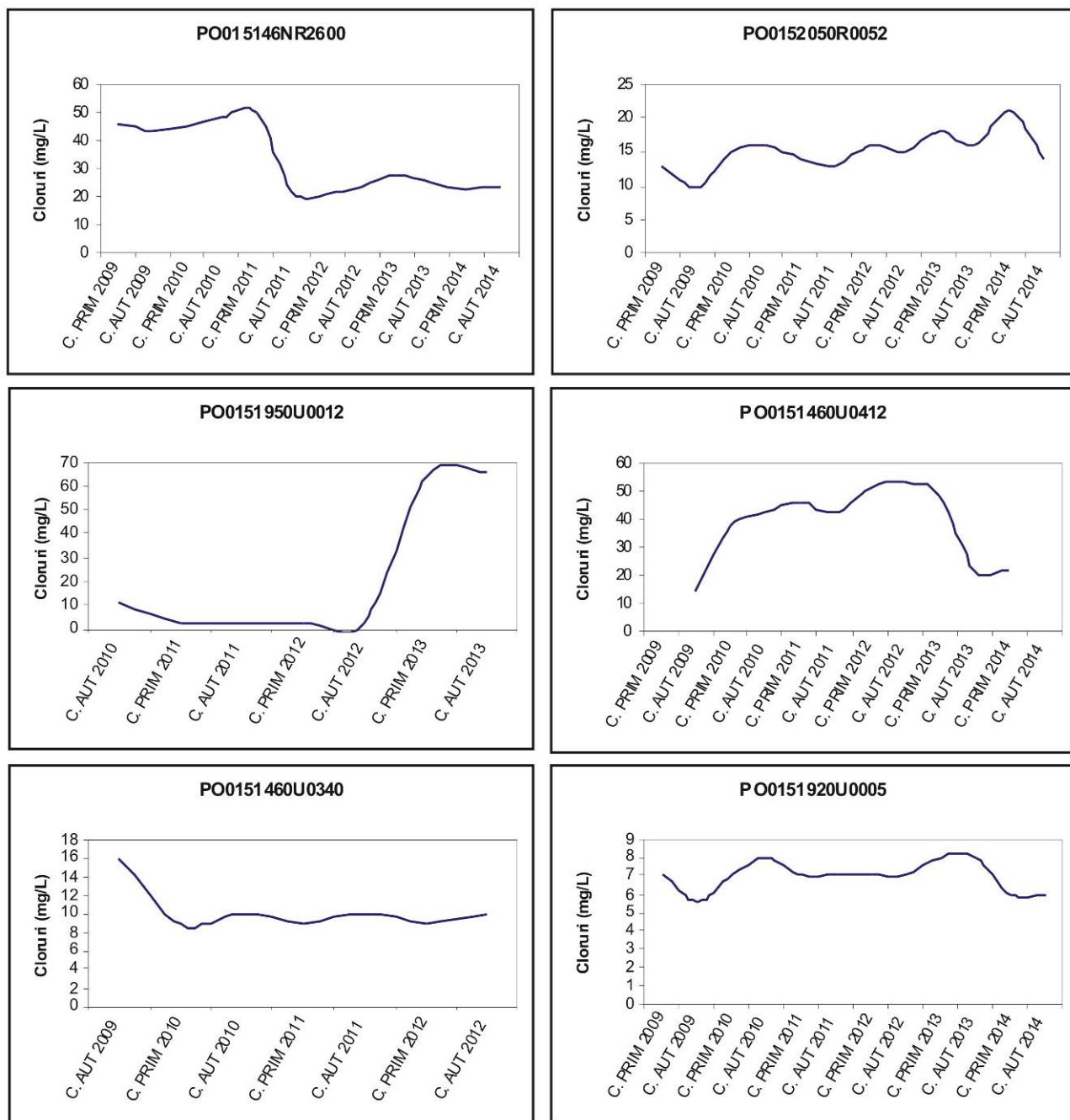


Figura 79. Variazione della concentrazione in cloruri nei pozzi della rete di monitoraggio ARPA Lombardia determinati nelle campagne di analisi autunnali e primaverili.

I solfati mostrano concentrazioni variabili tra circa 5 e 90 mg/L, mentre per i cloruri sono state riscontrate concentrazioni variabili tra 3 e 66 mg/L.

I nitrati, la cui origine è legata essenzialmente ad apporti dalla superficie, mostrano concentrazioni comprese, grossomodo, tra 5 e 35 mg/L, rimanendo comunque sempre al di sotto dei limiti di legge per la potabilità delle acque (50 mg/L).

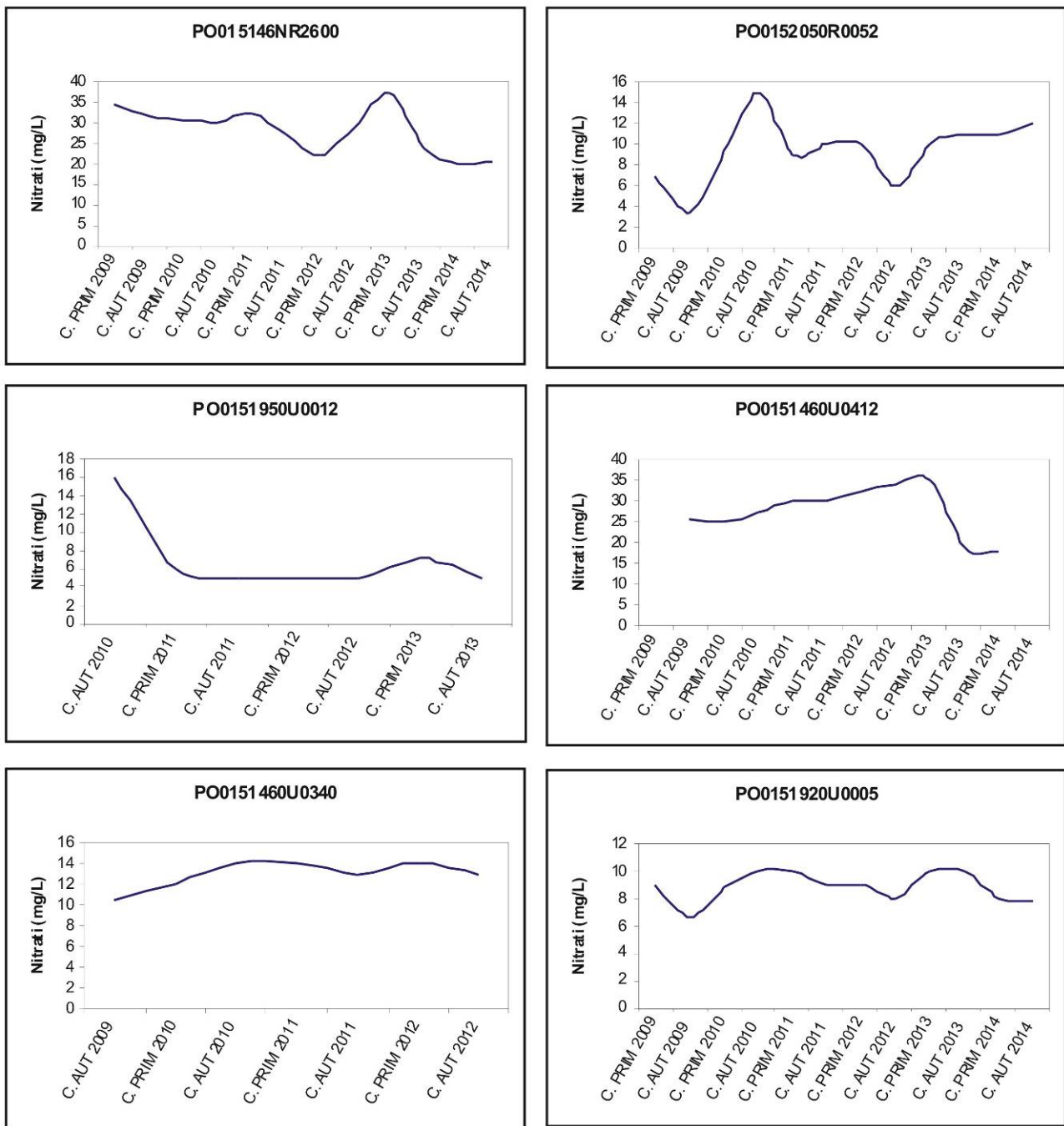


Figura 80. Variazione della concentrazione in nitrati nei pozzi della rete di monitoraggio ARPA Lombardia determinati nelle campagne di analisi autunnali e primaverili.

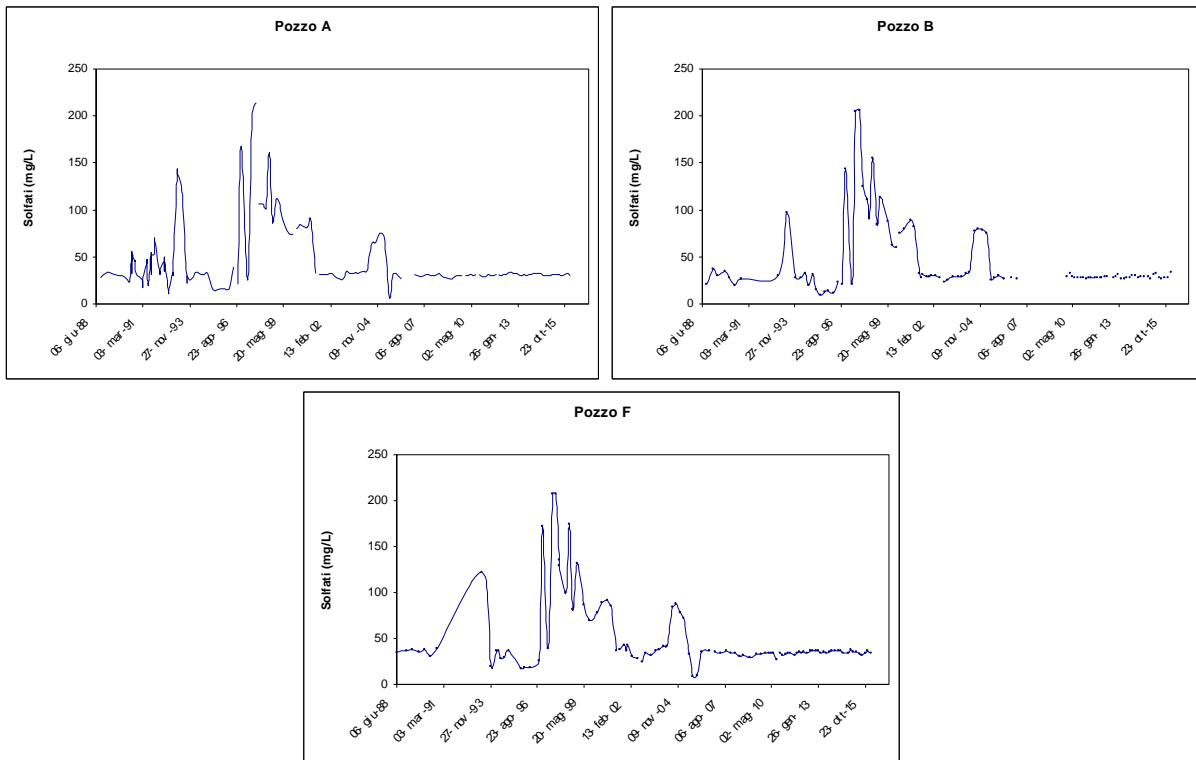


Figura 81. Variazione della concentrazione in solfati nei pozzi SEA dell'area del sedime ad uso idropotabile per gli anni 1988-2016.

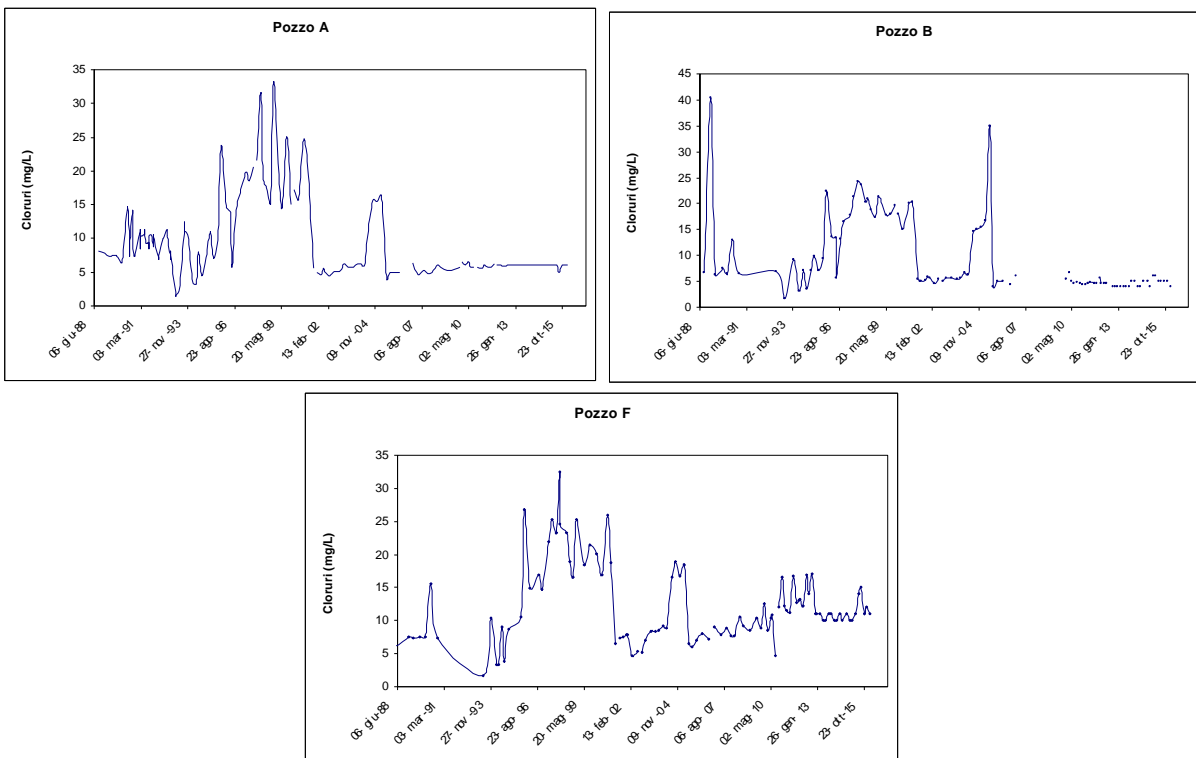


Figura 82. Variazione della concentrazione in cloruri nei pozzi SEA dell'area del sedime ad uso idropotabile per gli anni 1988-2016.

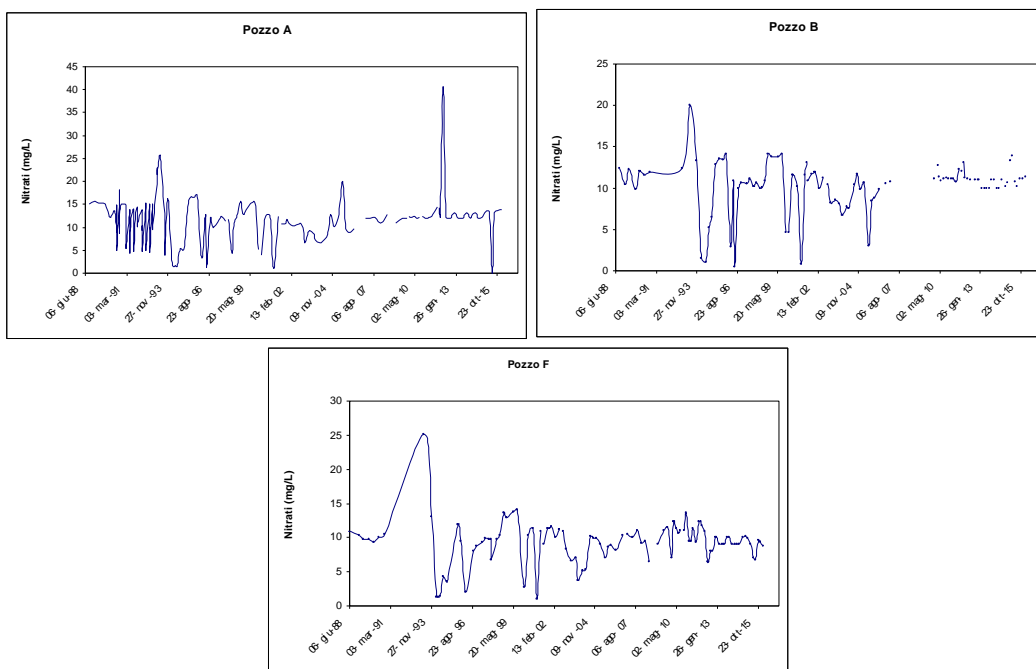


Figura 83. Variazione della concentrazione in nitrati nei pozzi SEA dell'area del sedime ad uso idropotabile, per gli anni 1988-2016.

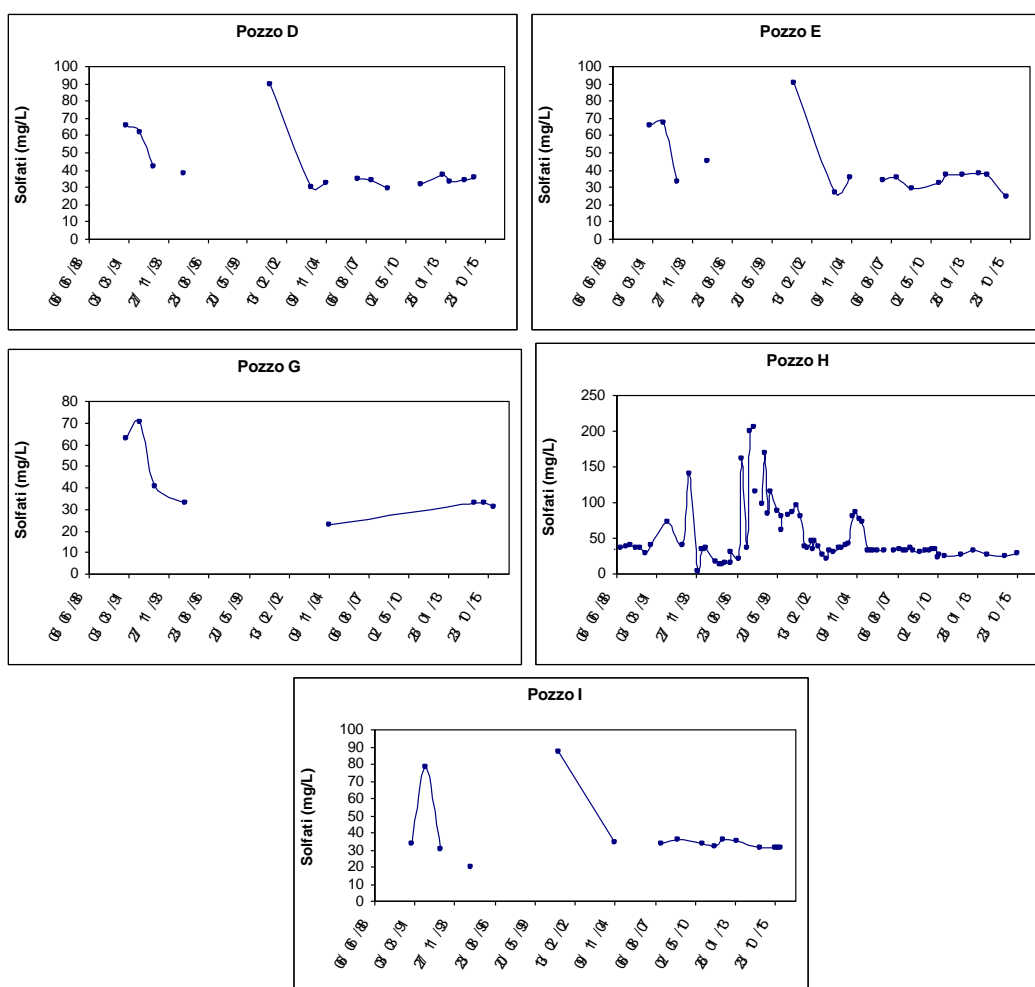


Figura 84. Variazione della concentrazione in solfati nei pozzi industriali SEA dell'area del sedime, per gli anni 1988-2016.

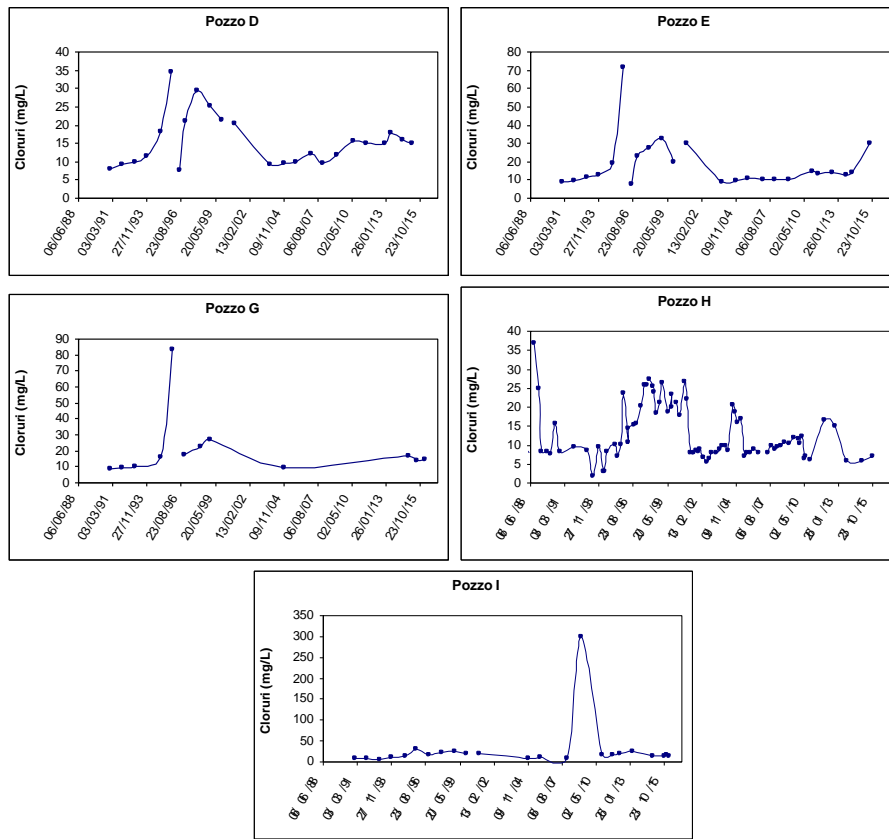


Figura 85. Variazione della concentrazione in cloruri nei pozzi industriali SEA dell'area del sedime, per gli anni 1988-2016.

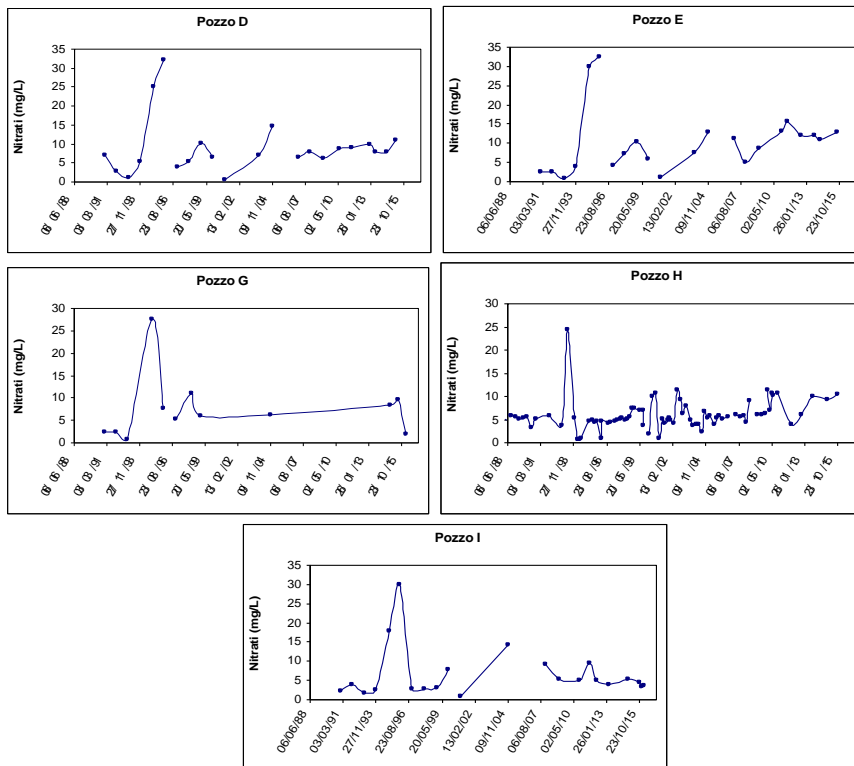


Figura 86. Variazione della concentrazione in nitrati nei pozzi industriali SEA dell'area del sedime, per gli anni 1988-2016.

Per quanto riguarda, invece la presenza di contaminanti di origine organica (Figg. 87, 88, 89, 90, 91), dall'analisi dei dati ARPA Lombardia e SEA Linate, si evidenziano locali contaminazioni legate prevalentemente alle seguenti sostanze: Tetracloroetilene, Tricloroetilene e Triclorometano. In particolare dal Pozzo PO015146NR2600, che si spinge nella falda superficiale (sistema di filtraggio localizzato tra 13 e 20 m di profondità), sono state campionate acque nella primavera 2010 che evidenziavano concentrazioni in Tetracloroetilene dell'ordine di 10 $\mu\text{g/L}$. Recentemente, nell'autunno 2014, le concentrazioni sono scese a valori di 4.7 $\mu\text{g/L}$. Contaminazioni non trascurabili in Tetracloroetilene sono state individuate anche ad Ovest del sedime aeroportuale di Linate nel pozzo PO0151460U0412 che emunge le proprie acque dalla falda profonda (filtri tra 45 e 100 m circa di profondità).

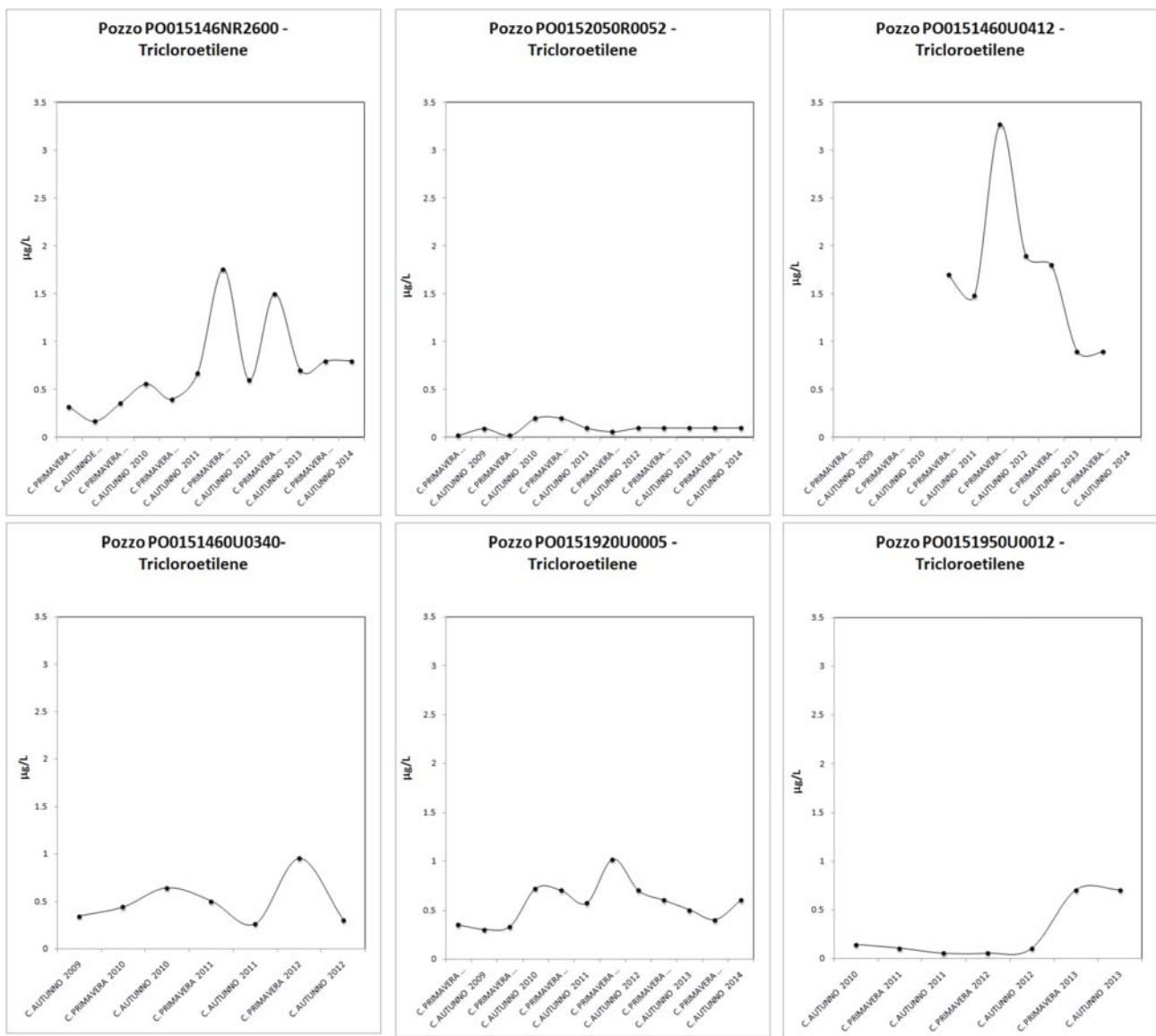


Figura 87. Variazione della concentrazione in Tricloroetilene nei pozzi della rete di monitoraggio ARPA Lombardia determinati nelle campagne di analisi autunnali e primaverili.

Le analisi chimiche realizzate nella primavera 2012 evidenziavano concentrazioni in Tetracloroetilene di circa 17 $\mu\text{g/L}$. Nello stesso pozzo sono state campionate nella primavera 2014

acque sotterranee con concentrazioni in Tetracloroetilene decisamente inferiori (valori intorno a 2 $\mu\text{g/L}$).

Nei rimanenti pozzi della rete di monitoraggio dell'ARPA Lombardia (pozzi intestati sia nell'acquifero superficiale che profondo) le concentrazioni in Tetracloroetilene si sono mantenute, dal 2009 al 2014, con valori relativamente modesti (0.1-3.7 $\mu\text{g/L}$).

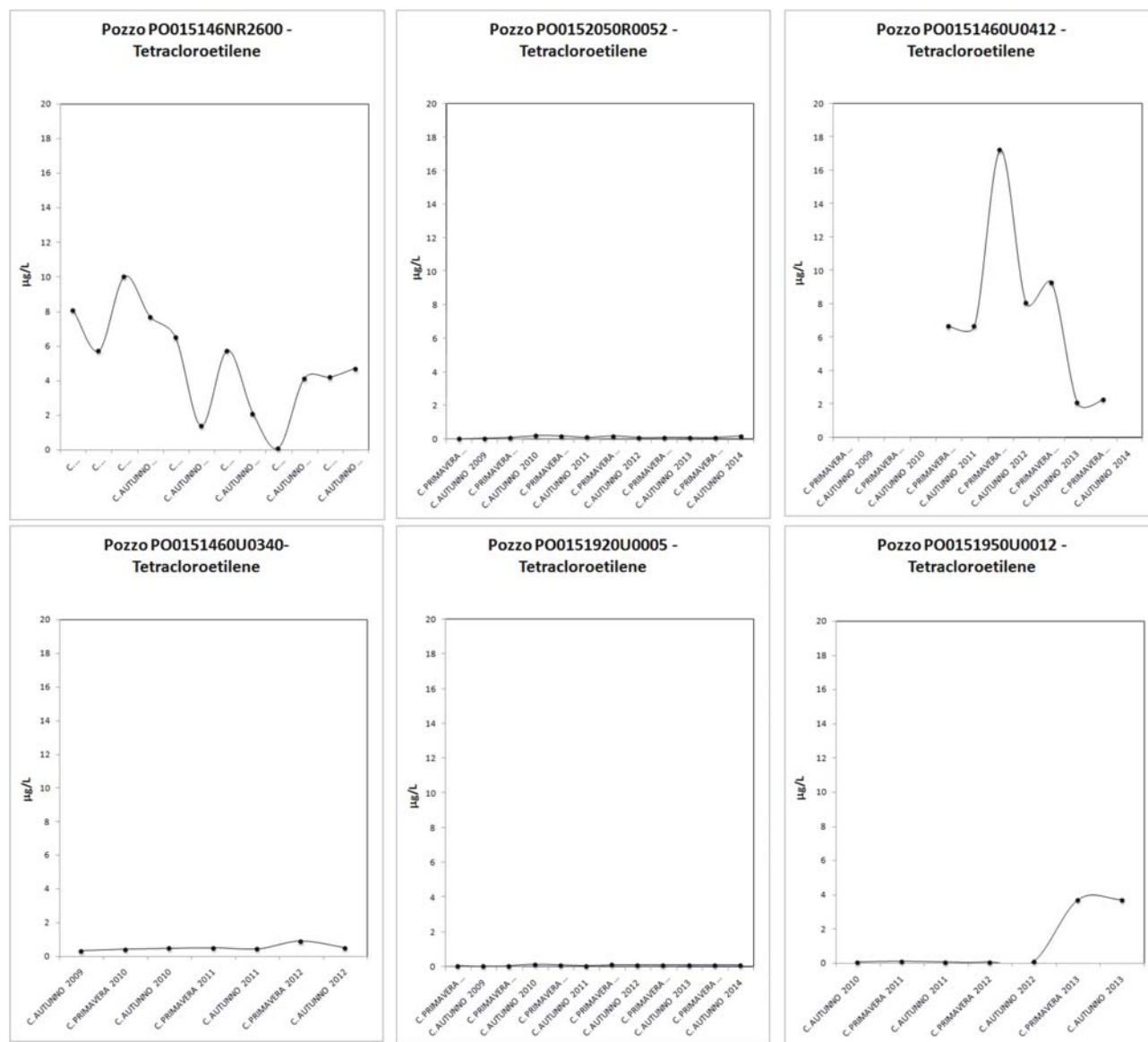


Figura 88. Variazione della concentrazione in Tetracloroetilene nei pozzi della rete di monitoraggio ARPA Lombardia determinati nelle campagne di analisi autunnali e primaverili.

Per quanto riguarda, invece, i pozzi a servizio dell'aeroporto di Milano-Linate, le concentrazioni riscontrate in Tetracloroetilene dal 2012 fino ad oggi hanno evidenziato valori complessivamente bassi, in generale, mai superiori a 1 $\mu\text{g/L}$. Tali concentrazioni sono state misurate nelle acque prelevate sia dai pozzi ad uso idropotabile (acquifero profondo) che da quelli ad uso industriale (acquifero superficiale).

Per quanto riguarda il Tricloroetilene, i dati acquisiti da ARPA Lombardia evidenziano, come per il Tetracloroetilene, una contaminazione in falda superficiale.

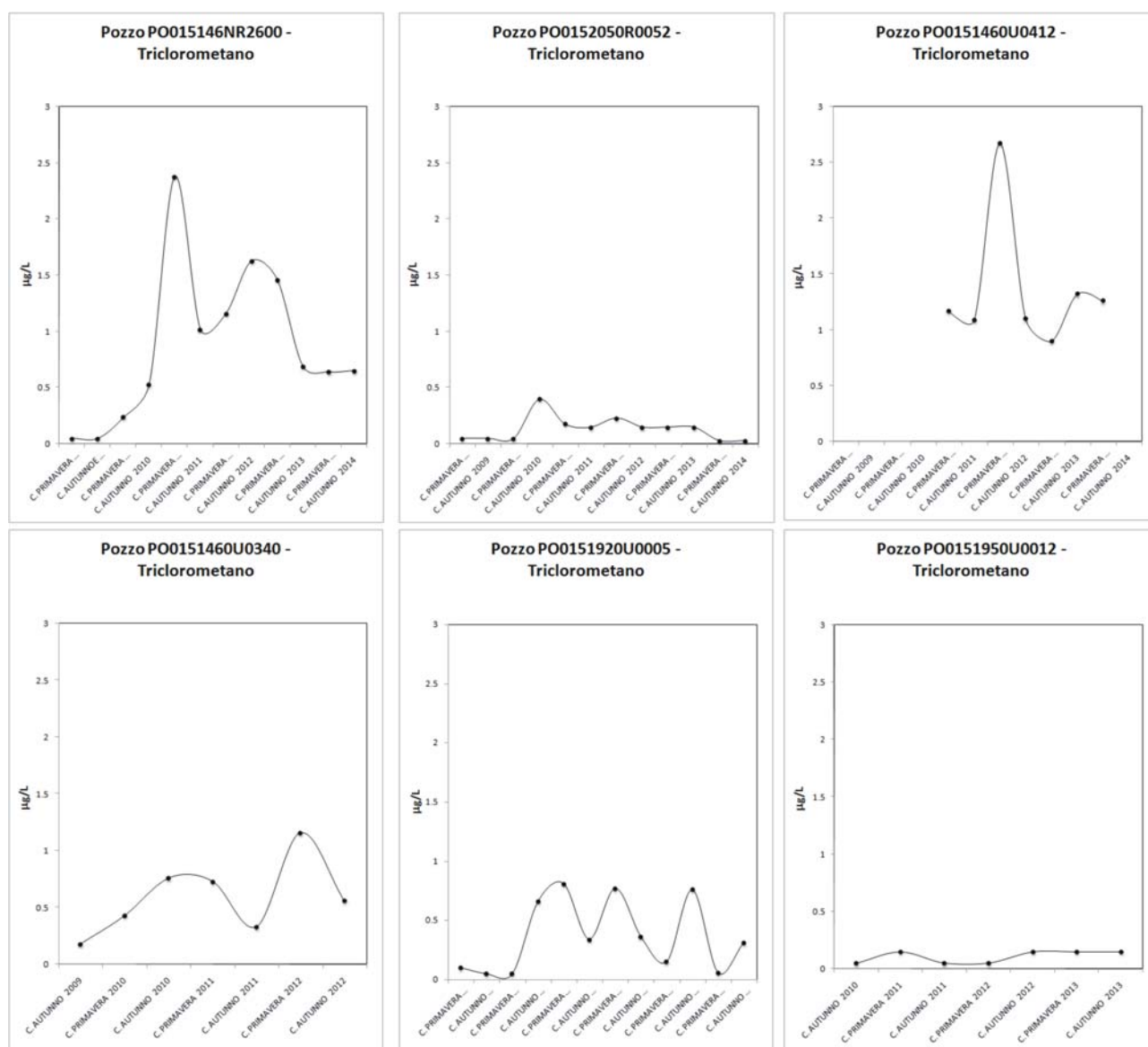


Figura 89. Variazione della concentrazione in Triclorometano nei pozzi della rete di monitoraggio ARPA Lombardia determinati nelle campagne di analisi autunnali e primaverili.

In particolare il pozzo PO015146NR2600 (falda superficiale) ha evidenziato concentrazioni in Tricloroetilene dell'ordine di 0.17-1.76 µg/L e il pozzo PO0151460U0412 concentrazioni comprese tra 0.9 e 3.27 µg/L.

I rimanenti pozzi della rete di monitoraggio ARPA Lombardia hanno evidenziato tra il 2009 e il 2014 concentrazioni, normalmente inferiori a 1 µg/L.

Anche i pozzi SEA, sia quelli idropotabili (falda profonda) che quelli industriali (falda superficiale) evidenziano concentrazioni molto basse in Tricloroetilene (normalmente al di sotto dei limiti di rivelabilità, < 1 µg/L) Solamente il Pozzo B, denominato Montis, ha evidenziato, in alcuni periodi, tenori in Tricloroetilene compresi tra 1 e 2 µg/L.

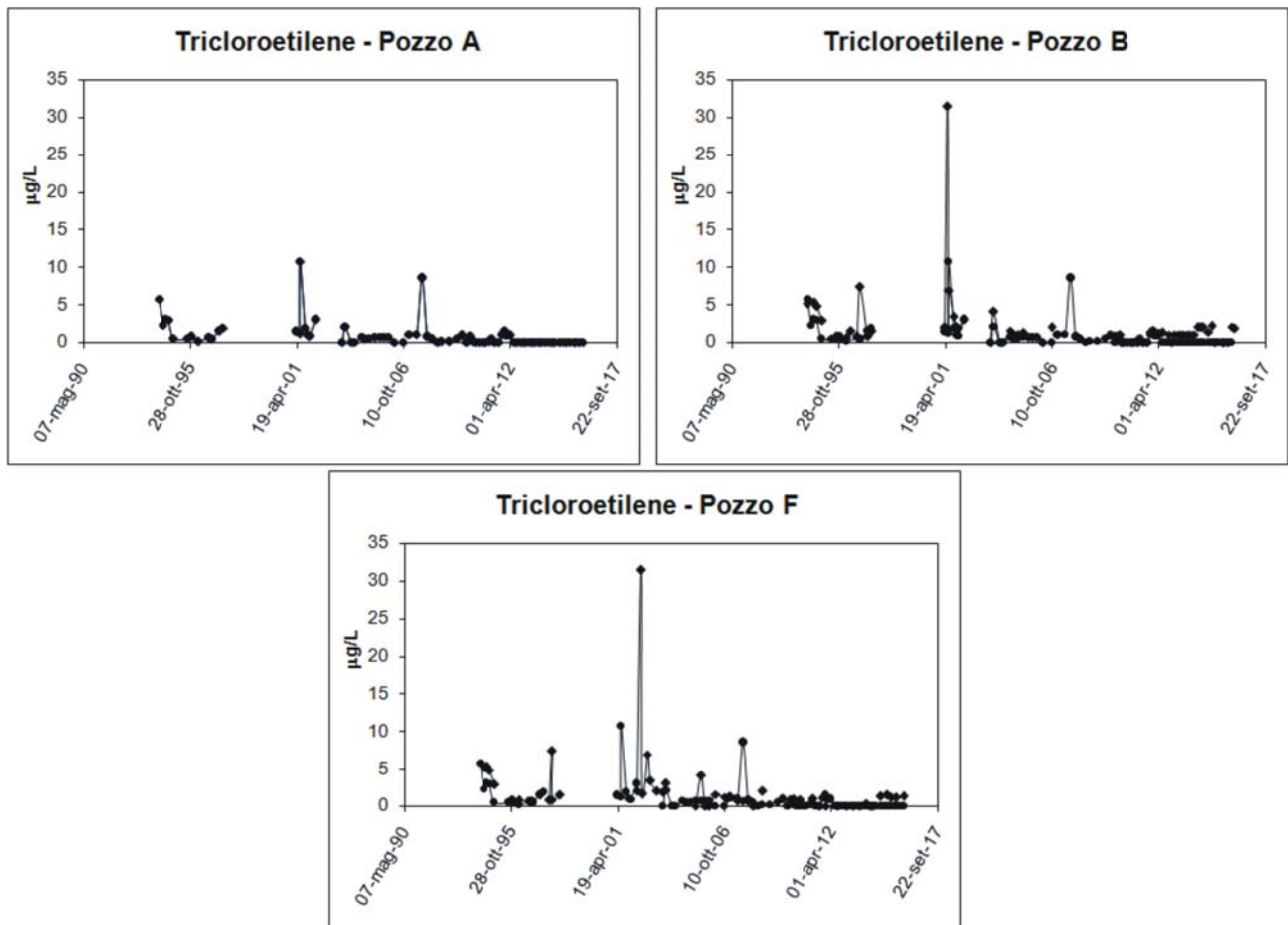


Figura 90. Variazione della concentrazione in Tricloroetilene nei pozzi SEA dell'area del sedime ad uso idropotabile, per gli anni 1990-2016.

Infine, il Triclorometano mostra concentrazioni maggiori nelle acque dei pozzi PO015146NR2600 (2.4-1.38 µg/L) e PO0151460U0412 (0.9-2.67 µg/L), mentre nei rimanenti pozzi sia profondi che superficiali le concentrazioni non superano in generale 1 µg/L.

Tra l'ottobre 2011 e marzo 2012 nelle acque emunte dal pozzo B (pozzo Montis) sono stati riscontrati, tra l'ottobre 2011 e marzo 2012, concentrazioni significative in TCEP (o tris(2-carbossietil)fosfina), variabili tra 0.530 e 1.480 µg/L.

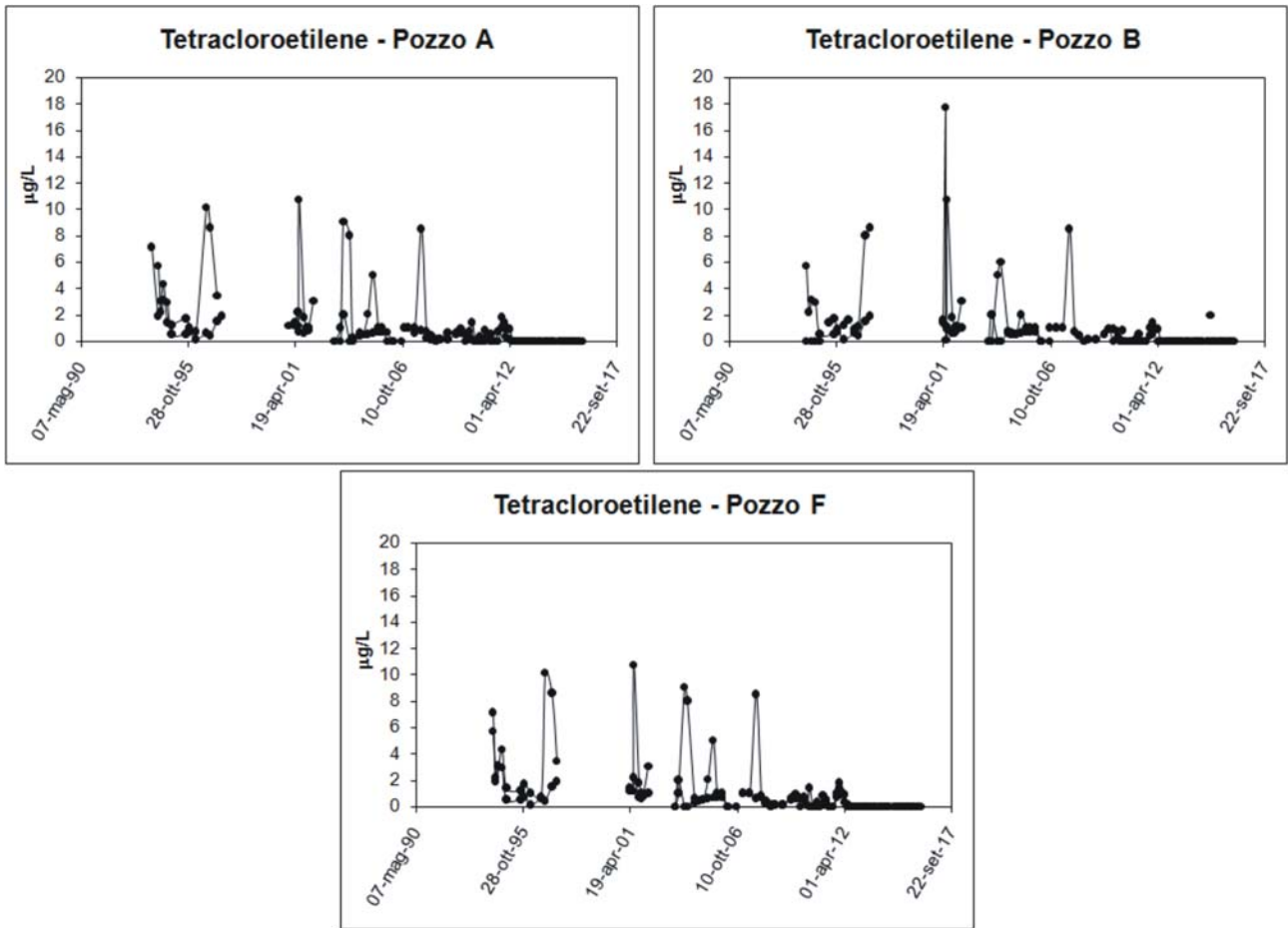


Figura 91. Variazione della concentrazione in Tetracloroetilene nei pozzi SEA dell'area del sedime ad uso idropotabile, per gli anni 1990-2016.

18. Analisi dei movimenti del terreno mediante dati interferometrici

L'interferometria è una tecnica di telerilevamento che si basa sull'analisi di immagini SAR (radar ad apertura sintetica), rilevate da sensori radar montati su una piattaforma mobile che emettono onde elettromagnetiche con particolari bande.

Quando il sensore acquisisce due immagini SAR di una medesima area in momenti diversi, si può utilizzare le informazioni contenute in entrambe le immagini per ottenere determinate misure. In particolare. Sottraendo la fase di un'immagine a quella dell'altra (interferometria differenziale o Synthetic Aperture Radar Differential Interferometry - DInSAR), si genera un interferogramma. Se non avvengono particolari cambiamenti nel periodo tra le due acquisizioni (spostamenti molto significativi in una certa area, es. collasso di una frana), la fase dell'interferogramma generato dipende solo dalla distanza sensore-bersaglio sulla superficie terrestre. Se quindi sono misurate delle differenze tra le due immagini SAR, è ragionevole ipotizzare che sia cambiata la distanza sensore-bersaglio a causa di particolari movimenti intercorsi tra le due acquisizioni (Fig. 92).

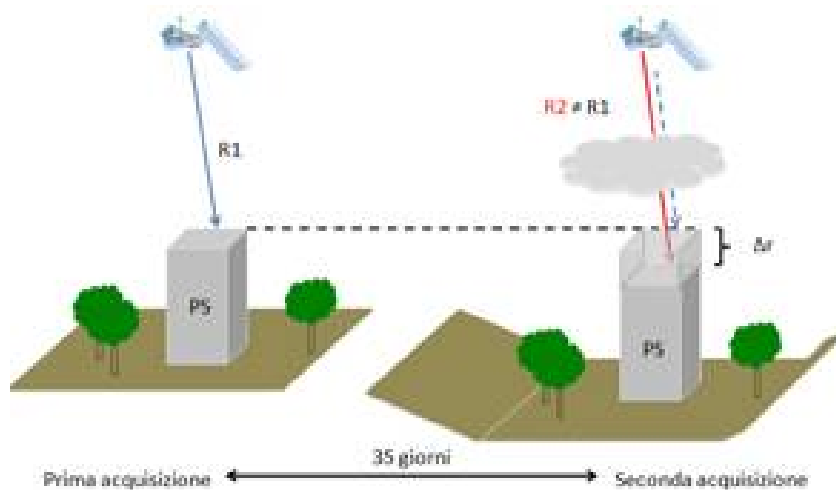


Figura 92. Principio alla base della tecnica DInSAR: combinando due o più immagini SAR è possibile misurare l'entità e la direzione dello spostamento di un bersaglio (fonte: <http://www.pcn.minambiente.it/GN/interferometria-differenziale-sar?showall=&start=1>).

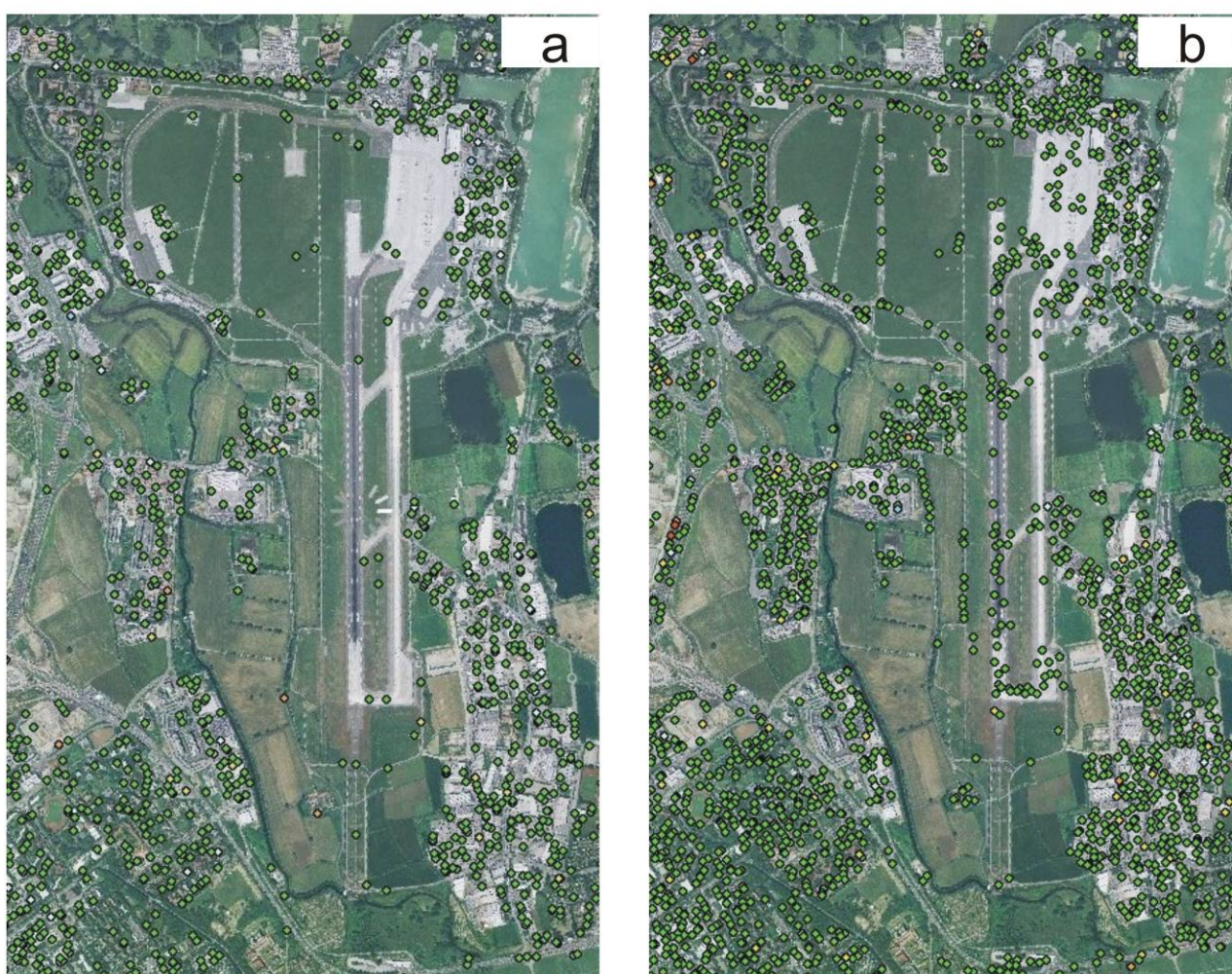
Questo principio fisico permette quindi di sfruttare due o più immagini SAR acquisite sulla stessa area in intervalli di tempo differenti per monitorare gli spostamenti dei bersagli sulla superficie legati a particolari processi geologici o strutturali. Per questo motivo la tecnica DInSAR è diventata uno tra i più comuni strumenti di monitoraggio dei movimenti del terreno, soprattutto dopo che si è cominciato ad utilizzare immagini SAR acquisite da sensori montati su satelliti orbitanti intorno alla Terra. In questo modo, è stato possibile ottenere misure degli spostamenti anche a scala molto vasta (plurichilometrica), monitorando l'andamento di questi per periodi temporali lunghi (pluriannuali), con misure relativamente vicine nel tempo (mediamente, a cadenza settimanale o plurisettimanale). I limiti della tecnica, legati alla cadenza plurigiornaliera dell'acquisizione delle immagini SAR da satellite e alle informazioni desumibili dall'interferogramma, permettono di monitorare in maniera efficace processi lenti o molto lenti, con tassi di deformazione millimetrici o centimetrici. Di conseguenza, la tecnica DInSAR che utilizza immagini SAR satellitari è particolarmente utilizzata nel monitoraggio di frane con cinematiso lento, faglie attive, masse magmatiche in lento

movimento, fenomeni di subsidenza del terreno con cedimenti piccoli ma continui nel tempo. Inoltre, questa tecnica è stata applicata anche all'analisi di cedimenti strutturali di edifici o altre infrastrutture.

Per maggiori dettagli e considerazioni sulla tecnica DInSAR e le sue applicazioni si fa riferimento in particolare ai lavori di Ferretti et al. (2001, 2011), Colesanti et al. (2003), Wasowsky e Bovenga (2014) e Boni et al. (2016).

Date le potenzialità di questa tecnica, si è ritenuto opportuno utilizzare dati DInSAR da satellite per valutare eventuali movimenti significativi del terreno nell'area del sedime di Milano Linate. Sono stati utilizzati dati interferometrici acquisiti nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale, i quali sono consultabili all'interno del Geoportale nazionale messo a punto dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (Tab. 2, capitolo 2.1).

I dati utilizzati fanno riferimento ad immagini SAR acquisite da diversi satelliti in momenti diversi.



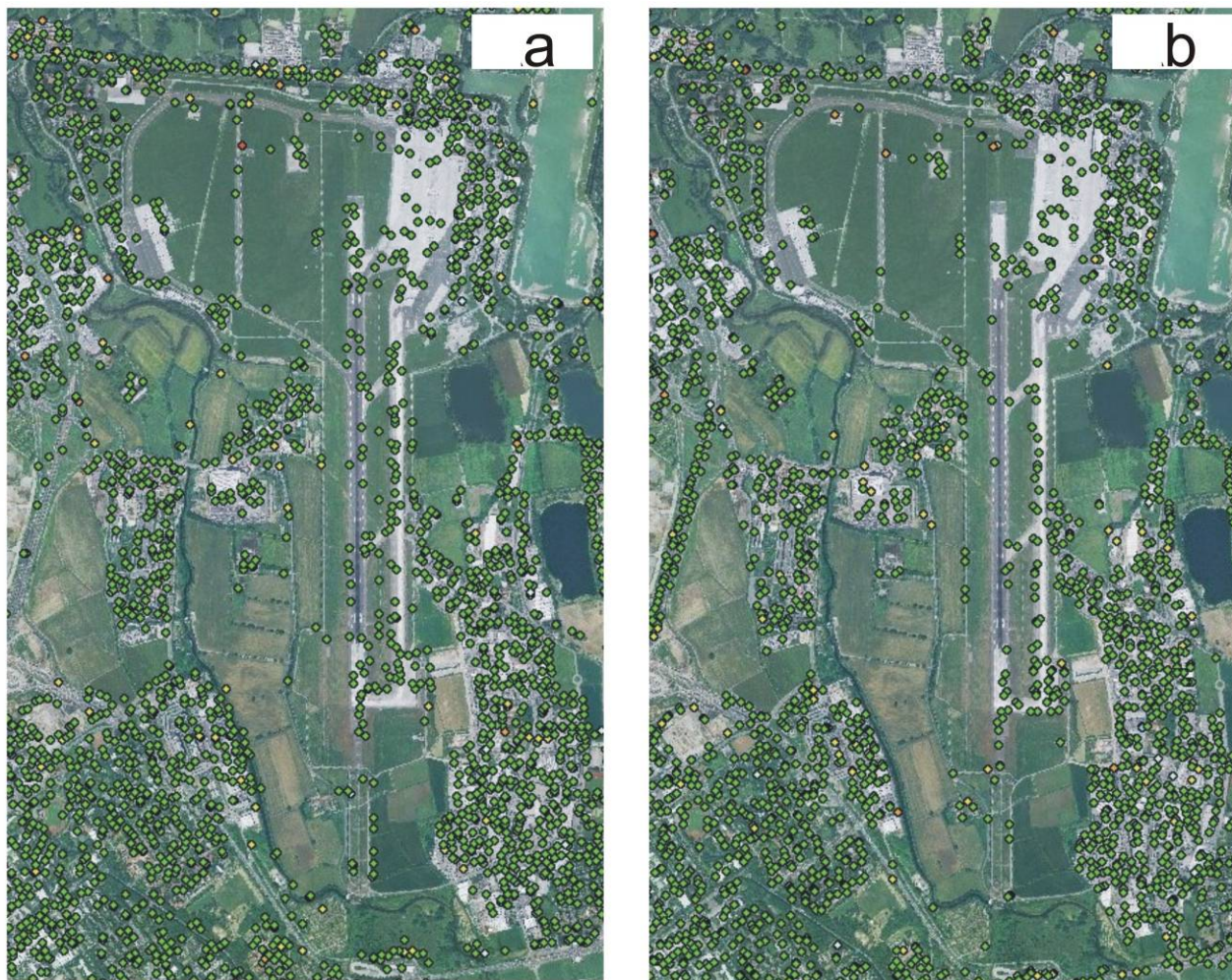
VLOS (mm/anno)

● -10/-5 ● -5/-3 ● -3/-1.5 ● -1.5/1.5 ● -1.5/3.0 ● 3.0/5.0

Figura 93. Andamento della VLOS misurato con dati dei satelliti ERS-1/2 (periodo di misura: Maggio 1992-Dicembre 2000): a) dati in geometria ascendente; b) dati in geometria discendente.

In particolare, sono stati utilizzati dati acquisiti dai satelliti ESA (European Space Agency) ERS-1/2 ed ENVISAT e dal satellite dell'Agenzia Spaziale Italiana COSMO-SkyMed. Le immagini acquisite

da ERS-1/2 hanno coperto il periodo Maggio 1992-Dicembre 2000, quelle acquisite da ENVISAT il periodo Dicembre 2002-Luglio 2010, quelle acquisite da COSMO-SkyMed il periodo Maggio 2011-Marzo 2014. In questo modo, è stato monitorato un intervallo di tempo significativo, pari a circa 22 anni.



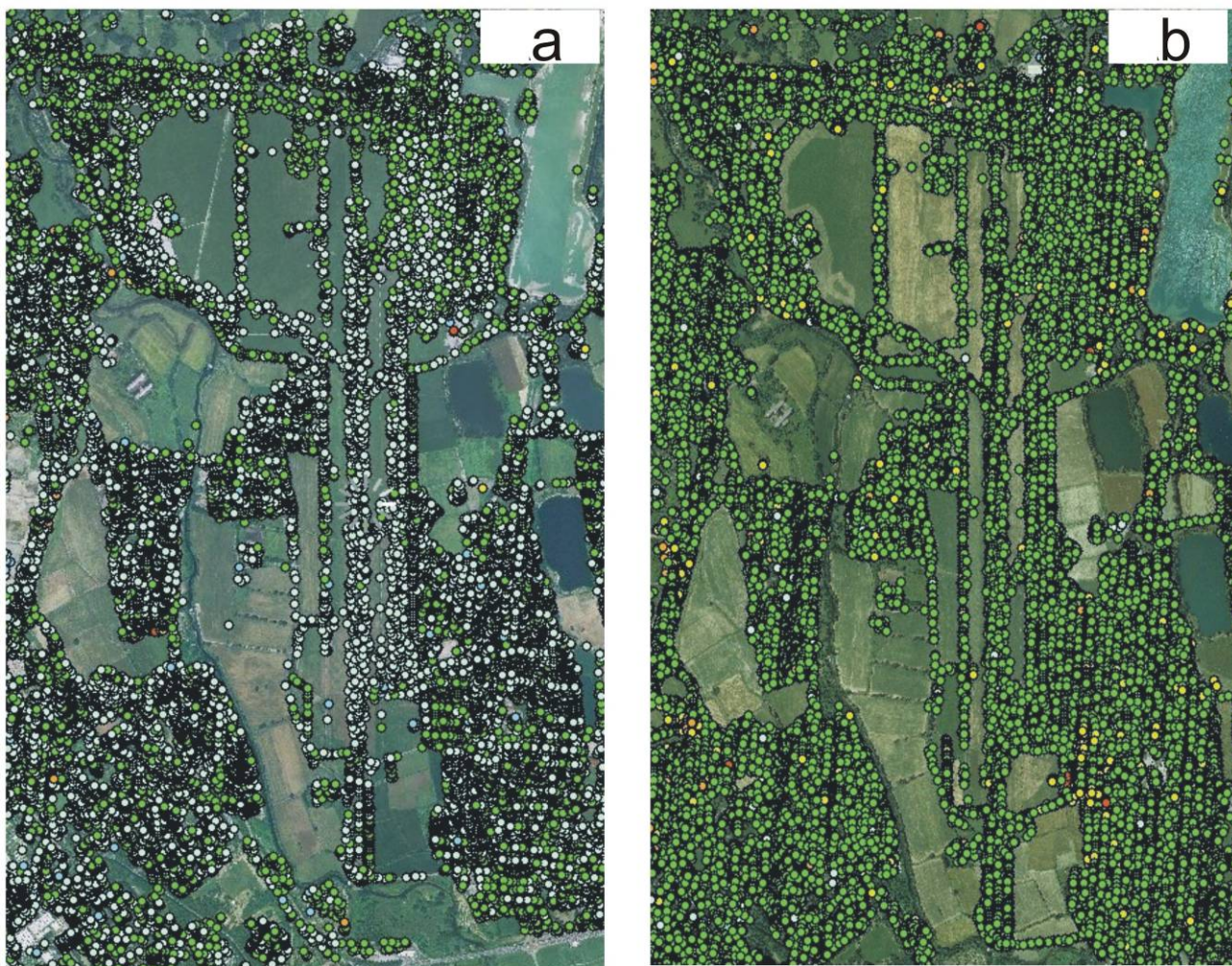
VLOS (mm/anno)

● -10/-5 ● -5/-3 ● -3/-1.5 ● -1.5/1.5 ● -1.5/3.0 ● 3.0/5.0

Figura 94. Andamento della VLOS misurato con dati del satellite ENVISAT (periodo di misura: Dicembre 2002-Luglio 2010): a) dati in geometria ascendente; b) dati in geometria discendente.

I satelliti ERS-1/2 ed ENVISAT operano in banda C con tempo di rivisitazione di 35 giorni, mentre il satellite COSMO-SkyMed opera in banda X e con tempo di rivisitazione di 8 giorni. L'utilizzo della banda X garantisce una maggiore densità di bersagli utilizzabili per le misure dello spostamento dato dalla tecnica DInSAR.

Sono stati considerati dati acquisiti con entrambe le geometrie possibile nel caso della tecnica DInSAR con dati satellitari: ascendente, per cui la direzione di spostamento del satellite è da sud verso nord; discendente, per cui la direzione di spostamento del satellite è da nord verso sud. Sono stati considerati dati acquisiti con entrambe le geometrie per avere una ulteriore conferma dei tassi di movimento misurati nell'area.



VLOS (mm/anno)

● -10/-5 ● -5/-3 ● -3/-1.5 ● -1.5/1.5 ● -1.5/3.0 ● 3.0/5.0

Figura 95. Andamento della VLOS misurato con dati del satellite COSMO-SkyMed (periodo di misura: Maggio 2011-Marzo 2014): a) dati in geometria ascendente; b) dati in geometria discendente.

Le immagini relative ai satelliti ERS-1/2 ed ENVISAT sono state processate mediante una tecnica chiamata PSInSARTM (Ferretti et al., 2000, 2001), mentre quelle del satellite COSMO-SkyMed con la tecnica PSP-IfSAR (Costantini et al., 2011). Entrambe le tecniche permettono di misurare spostamenti di bersagli assimilabili a punti, chiamati Persistent Scatterers (PS). Questi corrispondono a elementi naturali o manufatti antropici dotati di una elevata capacità riflettiva e che mantengono invariate le proprie caratteristiche. Nell'area di Linate, si tratta sostanzialmente di elementi antropici quali tetti di edifici, antenne, limiti di strade, guardrail.

La precisione di misura degli spostamenti misurati è dell'ordine di ± 1 mm/anno per tutti i satelliti considerati. La precisione di geocodifica dei bersagli, che indica l'errore di posizione rispetto al punto in cui un bersaglio si trova nella realtà, è dell'ordine di $\pm 6-10$ m lungo la direzione est-ovest, $\pm 2-5$ m lungo la direzione nord-sud, ± 1 m in altezza per dati elaborati con la tecnica PSInSARTM (ERS-1/2 ed ENVISAT). Viceversa, la precisione di geocodifica è inferiore a ± 10 m lungo la direzione est-ovest, ± 5 m lungo la direzione nord-sud, ± 1 m in altezza per dati elaborati con la tecnica PSP-IfSAR (COSMO-SkyMed).

Per maggiori dettagli sulle tecniche di processamento, si fa riferimento a Ferretti et al. (2001) ed a Costantini et al. (2011).

Il parametro utilizzato per avere indicazioni sui movimenti del terreno nell'area di Linate è la velocità di spostamento di ciascun bersaglio misurata dal satellite lungo la sua linea di vista (V_{LOS}). Si tratta del parametro più usato per caratterizzare i tassi di deformazione in un'area, in quanto indica il tasso medio di deformazione misurato per un certo bersaglio nel periodo di acquisizione delle immagini SAR di un certo satellite. Le caratteristiche pianeggianti dell'area studiata fanno sì la V_{LOS} corrisponda circa al reale tasso medio di deformazione (Wasowsky & Bovenga, 2014), per cui tale parametro è un efficace indice dei movimenti del terreno nell'area di Linate.

Dall'analisi delle V_{LOS} misurate per tutti i satelliti con entrambe le geometrie (Figg. 93, 94, 95), si nota immediatamente come l'area del sedime è caratterizzata da spostamenti medi estremamente esigui, in genere dell'ordine dei $-1.5/1.5$ mm/anno.

Locali bersagli sono caratterizzati da V_{LOS} inferiori a -3 mm/anno, ma non è possibile individuare aree più o meno estese con tassi di abbassamento significativamente alti da poter giustificare la presenza di un particolare processo di deformazione del terreno. Generalmente, infatti, bersagli con V_{LOS} compresa tra $-2/2$ mm/anno sono ritenuti sostanzialmente stabili (Wasowsky e Bovenga, 2014).

L'analisi dei dati interferometrici satellitari ha mostrato, quindi, come nell'area del sedime aeroportuale di Linate non vi siano stati, nel corso dell'ultimo ventennio circa, spostamenti significativi del terreno che potessero essere legati a deformazioni tali da provocare problematiche alle strutture ed all'ambiente in quest'area.

19. Analisi delle interazioni tra l'area aeroportuale e il sistema geologico, geomorfologico e idrogeologico

Lo studio condotto ha messo in luce i seguenti aspetti fondamentali:

- 1) il clima del territorio indagato è di tipo temperato sub-continentale, caratterizzato da una marcata escursione termica stagionale, soprattutto tra inverno ed estate, e da piogge annue mediamente abbondanti (media di 996.3 mm/anno, periodo 2004-2015);
- 2) il sedime aeroportuale si inserisce in un contesto pianeggiante, le cui forme morfologiche derivano dall'azione di erosione e deposito operata dal fiume Lambro e dai numerosi corsi d'acqua minori della zona, sia naturali (torrenti e cavi derivanti da fontanili) sia artificiali (cavi e rogge utilizzate del sistema irriguo o per lo smaltimento delle acque superficiali);
- 3) dal punto di vista geologico, l'area aeroportuale e il suo intorno sono caratterizzati dalla presenza di potenti depositi alluvionali di origine fluviale, depositi dal fiume Lambro e dagli altri corsi d'acqua minori presenti nella zona. Nei primi metri dalla superficie, questi depositi hanno granulometria grossolana, prevalentemente ghiaiosa, seppur con la presenza di estese aree, sia nel sedime che al suo esterno, dove sono presenti depositi superficiali, sotto il suolo, prevalentemente limoso-argillosi. I depositi prevalentemente ghiaiosi costituiscono il primo acquifero dell'area e presentano spessore superiori a 24 m, in aumento passando da N verso S. Al loro interno possono essere presenti locali orizzonti sabbiosi con spessori decimetrici o metrici, che tuttavia non sono lateralmente continui. Essi sono limitati verso il basso da un continuo livello argilloso, che costituisce l'orizzonte di separazione tra il primo e il secondo acquifero (depositi prevalentemente sabbiosi), la cui base è ubicata tra 48 e 88 m s.l.m;
- 4) la permeabilità dei depositi del primo acquifero, valutata tramite misure in campo su piezometri del sedime (*slug tests*), è elevata, dell'ordine di 10^{-3} - 10^{-2} m/s;
- 5) nonostante l'estesa presenza di zone urbanizzate o con riporti antropici, numerose aree esterne al sedime aeroportuale presentano suoli, che generalmente hanno un limitato spessore (inferiore a 2 m) e una granulometria simile a quella dei depositi alluvionali sottostanti da cui derivano. Il limitato spessore dei suoli e la loro granulometria grossolana implicano una loro limitata azione di protezione della prima falda da possibili contaminazioni;
- 6) l'area di studio non è stata interessata da eventi sismici significativi in tempi storici, come testimoniato dall'assenza di epicentri di terremoti con magnitudo momento M_w superiore a 2, avvenuti in Italia dal 1000 al 2014 (Catalogo CPTI15). Tutti i comuni dell'area di studio sono classificati in zona sismica 3 (bassa sismicità), secondo la classificazione sismica del territorio lombardo aggiornata al 10 Aprile 2016 (D.G.R. 2129/2014);
- 7) esondazioni del fiume Lambro hanno interessato in tempi storici (1947-1951) il settore occidentale del sedime. Le porzioni occidentali dell'area aeroportuale prospicienti a questo fiume ricadono in fascia B (aree di esondazione diretta e indiretta delle piene con tempo di ritorno di 200 anni) o C (aree di esondazione diretta e indiretta delle piene con tempo di ritorno di 500 anni), secondo le direttive Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI). Interventi di sistemazione idraulica volti a eliminare il rischio di possibili esondazioni nell'area del sedime sono stati progettati e si stanno mettendo in atto a partire dallo studio Franzetti et al. (2015);

- 8) dal punto di vista idrogeologico, nell'area di studio si susseguono, verticalmente, i quattro principali acquiferi della Pianura Padana. In particolare, il primo e il secondo acquifero sono quelli che interagiscono maggiormente con l'area aeroportuale. Sono inoltre quelli da cui sono emunte acque per uso industriale/antincendio (primo acquifero) e idro-potabile (secondo acquifero) dai pozzi presenti nel sedime;
- 9) la prima falda è quella che interagisce più significativamente con l'aeroporto. La direzione di flusso principale della prima falda è diretta circa da N verso S, con un gradiente piezometrico di circa 0.1%. I suoi livelli piezometrici hanno limitate oscillazioni temporali, generalmente inferiori ai 3 m su scala mensile o annuale. Nell'area del sedime aeroportuale, la soggiacenza della prima falda è mediamente compresa tra 1 e 4 m dal piano campagna;
- 10) considerando lo scenario dei massimi livelli piezometrici della prima falda raggiungibili a medio termine (tempo di ritorno di 25 anni), la soggiacenza della prima falda può raggiungere valori inferiori a 2 m in tutta l'area aeroportuale. Nella fascia centro-occidentale dell'aeroporto, la soggiacenza si può abbassare a valori inferiori a 1 m;
- 11) i prelievi idrici dai pozzi presenti nello scalo, analizzati nel periodo 1985-2015, mostrano una diminuzione a partire dai primi anni 2000, attestandosi attualmente al di sotto di 1,500,000 m³/anno. Anche considerando lo scenario ipoteticamente peggiore, rappresentato dalla messa in funzione contemporanea di tutti i pozzi ad uso industriale/antincendio secondo la loro portata di esercizio, gli abbassamenti dinamici indotti sulla prima falda sono poco significativi e si arrestano a distanze inferiori a 300 m da ciascun pozzo;
- 12) la vulnerabilità del primo acquifero, valutata mediante la metodologia SINTACS, si presenta sempre da alta a elevata per tutta l'area del sedime aeroportuale, anche considerando scenari diversi di soggiacenza della prima falda;
- 13) dal punto di vista della qualità chimica delle acque sotterranee, si segnalano solo locali contaminazioni temporanee in contaminanti organici (Tetracloroetilene, Tricloroetilene e Triclorometano). Nei pozzi SEA del sedime, queste contaminazioni sono estremamente ridotte dal 2012, molto spesso al di sotto del limite di rilevabilità strumentale della sostanza. La qualità delle acque è inoltre sostanzialmente simile in tutta l'area di studio;
- 14) l'analisi dei movimenti del terreno nell'area aeroportuale, effettuata tramite dati interferometrici satellitari, mostra tassi di movimento estremamente esigui, dell'ordine dei - 1.5/1.5 mm/anno durante l'intervallo di tempo analizzato (1992-2014).

Sulla base di questi risultati, si può quindi affermare che:

1. il potenziale di esondazione del fiume Lambro è controllato dalle opere previste nella relazione di Franzetti et al. (2015), in fase di realizzazione;
2. nel periodo di tempo analizzato (1990-2016), le oscillazioni dei livelli piezometrici della prima falda sono state di modesta entità su scala mensile e annuale. Tuttavia, si fa notare come potenzialmente il livello piezometrico della falda superficiale, in corrispondenza del sedime, possa risalire fino a meno di 1 dal piano campagna. A questo proposito, si raccomanda che l'esecuzione di eventuali nuove opere interrato venga limitata ad una profondità massima di 1-2 m dal piano campagna, adottando in fase progettuale tutte le idonee procedure di impermeabilizzazione di queste nuove opere;
3. anche tenendo in considerazione lo scenario peggiore di prelievo di acque dalla prima falda (messa in funzione contemporanea di tutti i pozzi ad uso industriale/antincendio secondo la loro portata di esercizio), non sembrano esserci variazioni significative dei livelli

piezometrici della prima falda indotte dai prelievi effettuati nel sedime. Inoltre, queste variazioni non sembrano estendersi all'esterno dell'area aeroportuale, anche grazie alla presenza dell'Idroscalo in prossimità dei pozzi del sedime, che svolge un ruolo di barriera idraulica rispetto a queste perturbazioni;

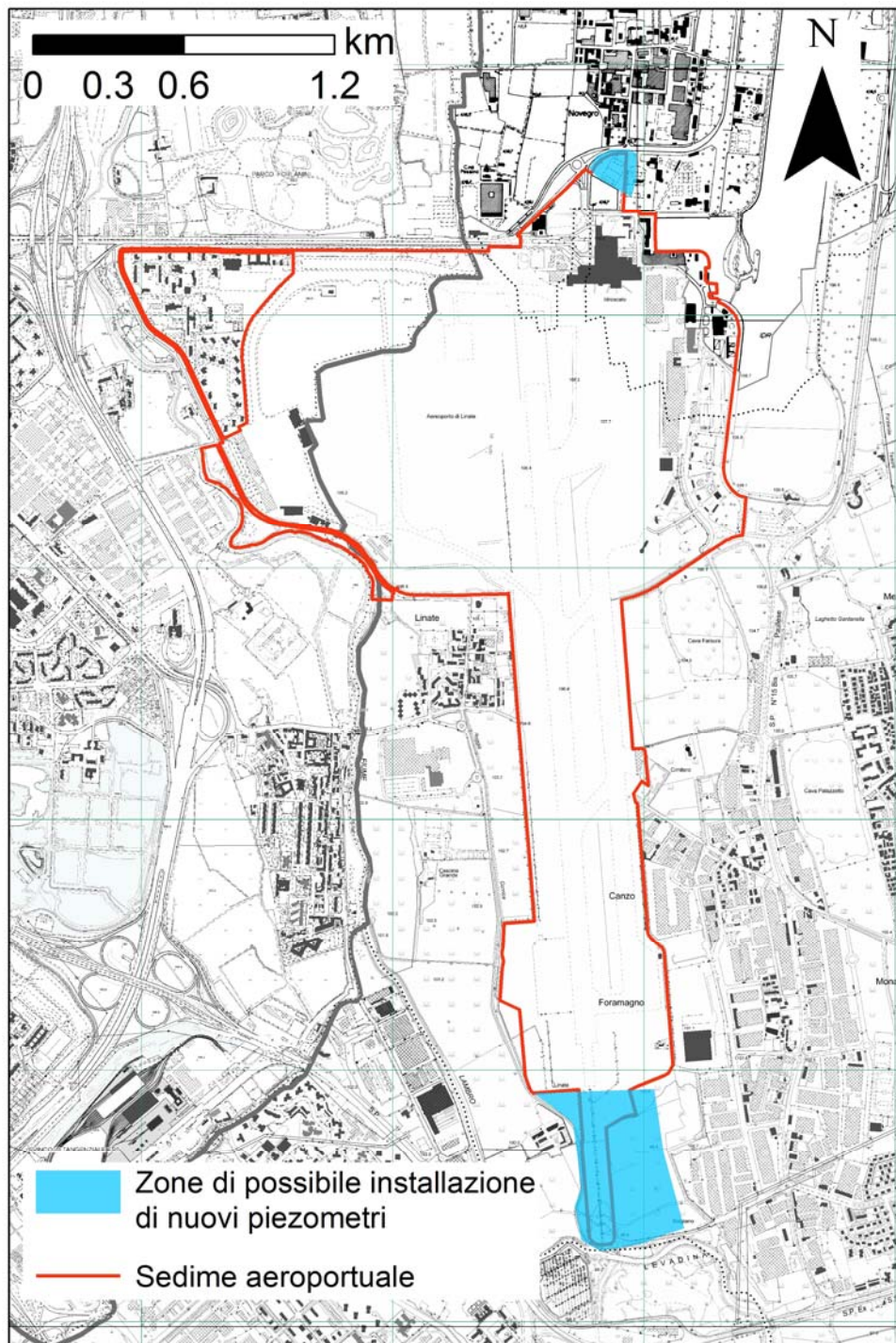


Figura 96. Aree di possibile installazione di nuovi piezometri per il monitoraggio dei livelli piezometrici e della qualità delle acque della prima falda.

4. il primo acquifero presenta una vulnerabilità da alta a elevata in tutto il sedime. Questo comporta la necessità di un adeguato controllo di tutta la rete idrica connessa alle attività aeroportuali attuali e future, che può entrare in contatto con le acque della prima falda;
5. la qualità delle acque sotterranee non sembra essere influenzata dalle attività dell'area aeroportuale, essendo essa simile a monte (a N) e a valle (a S) dell'aeroporto rispetto alla direzione di flusso principale della prima falda;
6. si suggerisce di continuare il monitoraggio delle caratteristiche chimiche sia delle acque sotterranee, emunte dai pozzi del sedime, che delle acque superficiali della rete idrica del sedime prima della loro immissione nel reticolo idrico superficiale;
7. non si evidenziano movimenti del terreno nel periodo di tempo analizzato (1992-2014), per cui l'area del sedime aeroportuale sembra essere stabile;
8. si consigliano, inoltre, le seguenti opere di monitoraggio: a) in considerazione della presenza di una direzione di flusso delle acque della prima falda costante nel tempo (N-S), si consiglia la realizzazione di un piezometro a monte (a N) e di uno valle (a S) del sedime aeroportuale (Fig. 96), per un controllo periodico dei livelli piezometrici e della qualità delle acque sotterranee; b) continua analisi di dati interferometrici satellitari, anche con risoluzione temporale maggiore (es. Sentinel-1A - Sentinel-1B, tempo di rivisitazione di 6 giorni), per un costante controllo dei movimenti del terreno.

Bibliografia

- Autorità di Bacino del Fiume Po AdBPo (2001). *Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica*.
- Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (2001). *Linee-guida per la redazione e l'uso delle carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento*. I.G.E.R., Roma.
- Ambrosetti P., Bartolini C., Bosi C., Carraro F., Ciaranfi N., Panizza M., Papani G., Vezzani L. & Zanferrari A. (1987). *Neotectonic Map of Italy (Scale 1:500.000)*. C.N.R., P. F. Geodinamica.
- Archeogeos (2014). *Traliccio HRR esistente dell'Aeroporto di Milano Linate-Codice progetto: PI 120051_13 - Relazione geologica, sismica e sulle indagini geotecniche*.
- American Society for Testing Materials (1988). *Annual Book of ASTM Standards*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ARPA Lombardia (2014). *Stato delle acque superficiali Bacino dei fiumi Lambro e Olona - Rapporto annuale 2013*. ARPA Lombardia, Milano.
- ARPA Lombardia (2015). *Stato delle acque superficiali Bacino dei fiumi Lambro e Olona - Rapporto annuale 2014*. ARPA Lombardia, Milano.
- Boni R., Pilla G. & Meisina C. (2016). *Methodology for detection and interpretation of ground motion areas with the A-DInSAR time series analysis*. Remote Sensing 8, 686. doi:10.3390/rs8080686.
- Bouwer H. & Rice R.C. (1976). *A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells*. Water Resources Research 12, 3, 423-428.
- Burrough P.A. (1986). *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Oxford University press, Oxford.
- Butler Jr J.J. (1997). *The design, performance, and analysis of slug tests*. Lewis Publishers, New York.
- Civita M. (1994). *Le Carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento:Teoria & Pratica*. Pitagora Editrice, Bologna.
- Civita M. & De Maio M. (2000). *Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico - SINTACS R5 - A new parametric system for the assessment and automatic mapping of ground water vulnerability to contamination*. Pitagora Editrice, Bologna.
- Civita M. (2005). *Idrogeologia applicata e ambientale*. Casa Editrice Ambrosiana, Rozzano.
- Comune di Milano (2012). *Relazione illustrativa e norme geologiche - Componenti geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio del Comune di Peschiera Borromeo*. Comune di Milano, Città Metropolitana di Milano.
- Colesanti C., Ferretti A., Novali F., Prati C. & Rocca F. (2003). SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 41, 7, 1685–1700.

- Colombo P. & Colleselli F. (2004). *Elementi di geotecnica - terza edizione*. Zanichelli editore spa, Bologna.
- Costantini M., Chen T., Xu Y., Trillo F., Vecchioli F., Kong L., Jiang D. & Hu Q. (2011). *High resolution ground deformations monitoring by COSMO-SkyMed PSP SAR interferometry: accuracy analysis and validation*. In: Ouwehand L. (ed.), *Proceedings of Fringe 2011*, ESA Communications, Noordwijk.
- DISS Working Group (2015). *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
- Elletipi (2016). *Indagini per nuovo hangar aviazione generale aeroporto Linate - Relazione metodologica e geotecnica*.
- ERSAL (1993). *I suoli del Parco Agricolo Sud Milano*. Ente Regionale di Sviluppo Agricolo della Lombardia – ERSAL, Milano.
- ERSAF (2004). *Suoli e paesaggi della Provincia di Milano*. Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste - ERSAF, Milano.
- Ferretti A., Prati C. & Rocca F. (2000). *Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38, 2202–2212.
- Ferretti A., Prati C. & Rocca F. (2001). *Permanent Scatterers InSAR Interferometry*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39, 8-20.
- Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F. & Rucci A. (2011). *A new algorithm for processing interferometric datastacks: SqueeSAR™*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49, 3460–3470.
- Francani V., Piccin A., Berra F., Battaglia D., Gattinoni P., Rigamonti I. & Rosselli S. (in stampa). *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000 - Foglio 118 Milano*. ISPRA-Servizio Geologico d'Italia - Regione Lombardia.
- Franzetti S. (2009). *Studio di allagamenti e pericolosità in sponda destra in condizioni attuali e di progetto*.
- Franzetti S., Radice A., Zubiani M. & Manzoni L. (2015). *Interventi di sistemazione fiume Lambro - Progetto definitivo*.
- Ghiselli A. & Merazzi M. (2012). *Relazione geologica - Studio geologico, idrogeologico e sismico di supporto al Piano di Governo del Territorio del Comune di Peschiera Borromeo*. Comune di Peschiera Borromeo, Città Metropolitana di Milano.
- Hvorslev M.J. (1951). *Time lag and soil permeability in ground-water observations*. Bull. No. 36, Waterways Exper. Sta. Corps of Engrs, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, pp. 1-50.
- Koppen W. (1936). *Das geographische System der Klimate*. In: Koppen, W. & Geiger G. (eds.), *Handbuch der klimatologie*, 1. C, Gebr, Borntraeger, 1–44.
- INGV (2009). *Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale*.

- Lark R.M., Mathers S.J., Thorpe S., Arkley S.L.B., Morgan D.J. & Lawrence D.J.D. (2013). *A statistical assessment of the uncertainty in a 3-D geological framework model*. Proceedings of the Geologists' Association 124, 946–958.
- Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S. & Rocchetti E. (2016). *DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15.
- Mucciarelli M., Donda F. & Valensise G. (2015). *Earthquakes and depleted gas reservoirs: which comes first?*. Natural Hazards and Earth System Sciences 15, 2201-2208.
- Muttoni G., Carcano C., Garzanti E., Ghielmi M., Piccin A., Pini R., Rogledi S. & Sciunnach D. (2003). *Onset of major Pleistocene glaciations in the Alps*. Geology 31, 989-992.
- Politecnico di Milano (2006). *Studio della falda al sedime aeroportuale di Linate*.
- Politecnico di Milano (2007). *Studio del fiume Lambro - modellazione 1D e 2D*.
- Provincia di Milano (1995). *Le risorse idriche sotterranee nella Provincia di Milano - Vol. I: Lineamenti idrogeologici*. Milano.
- Regione Lombardia & ENI (2002). *Geologia degli Acquiferi Padani della Regione Lombardia*. Ed. S.e.l.c.a., Firenze.
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B. & Gasperini P. (2016). *CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
- SAB (2012). *Nuova area de-icing piazzale nord - Relazione geologica, idrogeologica, gestione delle materie e sismica*.
- Sarsby R. (2000). *Environmental geotechnics*. Thomas Telford Publishing, London.
- Technital (2007). *Realizzazione di due nuovi hangar nell'area aviazione generale - Progetto definitivo*.
- Ummarino A. (2005a). *Studio sulla piezometria statica e dinamica dell'area "Petrolieri" dell'aeroporto di Milano Linate*.
- Ummarino A. (2005b). *Simulazione della messa in esercizio nel nuovo pozzo industriale Ind3bis e studio della piezometria dinamica dell'area "Petrolieri" dell'aeroporto di Milano Linate*.
- Ummarino A., Gaggino G. & Agnetti G. (2008). *Relazione idrogeologica e modello di piezometria dinamica per il complesso aeroportuale di Milano Linate*.
- USDA (1994). *Keys to soil taxonomy, 6th edn*. USDA-NRCS, US Government Printing office, Washington DC.
- Wackernagel H. (1998). *Multivariate Geostatistics*. Springer International Publishing, Cham.
- Waltham A.C. (1994). *Foundations of engineering geology*. Blackie Academic and Professional, London.
- Wasowski J. & Bovenga F. (2014). *Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives*. Engineering Geology 174, 103–138.

