

METODI DI PREVISIONE DELLA PIEZOMETRIA NELL'AREA MILANESE

A cura di V. Francani, L. Colombo, D. Cremonesi, G. Formentin
vincenzo.francani@polimi.it, loris.colombo@polimi.it, daniele.cremonesi@polimi.it,
giovanni.formentin@tethys-geco.it

Indice

1	INTRODUZIONE.....	2
2	STORIA DELL'ACQUIFERO SUPERFICIALE MILANESE.....	2
3	EVOLUZIONE DELLA PIEZOMETRIA SUPERFICIALE E DELLE VARIABILI DI INTERESSE.....	3
3.1	DATI STORICI DELLA PIEZOMETRIA NELL'AREA DI INTERESSE.....	3
3.2	CAMPAGNA DI MISURE DEL NOVEMBRE 2011 E CONFRONTO CON IL 1998: CALIBRAZIONE.....	7
3.3	ANALISI DEI PRELIEVI.....	8
3.4	RACCOLTA DATI DI PIOGGIA E QUANTIFICAZIONE DEI TEMPI DI RITORNO.....	9
3.5	IRRIGAZIONE.....	12
4	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO PREVISIONALE.....	13
4.1	CONDUCIBILITÀ IDRAULICA.....	14
4.2	CONDIZIONI AL CONTORNO.....	14
4.3	PRELIEVI.....	14
4.4	RICARICA SUPERFICIALE.....	14
4.5	CALIBRAZIONE.....	14
4.6	ANALISI PREVISIONALE DI POSSIBILI SCENARI FUTURI.....	14
5	CONCLUSIONE.....	16
6	BIBLIOGRAFIA.....	17

1 INTRODUZIONE

La progettazione di infrastrutture deve tenere conto della modalità di trattamento dell'acqua di falda presente a quote variabili e soggetta non solo a variazioni a scala regionale ma anche a carattere stagionale – locale che possono in taluni casi raggiungere anche i 2 m di oscillazione rispetto al livello medio.

In particolare, l'area del milanese è soggetta ad un continuo innalzamento dei livelli di falda (come individuato da diverse campagne di misura), che, iniziato nella metà degli anni Settanta, continua ancora oggi. Si ha quindi l'esigenza di eseguire uno studio idrogeologico previsionale che consideri dati storici pluviometrici e idrogeologici consistenti (serie storiche di almeno 50 anni). Un'indagine idrogeologica previsionale deve tenere conto quindi non solo delle condizioni attuali ma anche di quelle che potrebbero verificarsi a seguito di eventi capaci di dare luogo ad incrementi di livelli di falda non trascurabili ma ragionevolmente ipotizzabili. Si devono considerare per lo sviluppo di un modello previsionale la diminuzione dei prelievi per contaminazione, l'allontanamento o chiusura di grossi poli industriali idroesigenti, l'incremento anomalo delle precipitazioni, il contributo della rete irrigua presente. Le fasi principali quindi che portano alla modellazione previsionale del livello di falda, verranno illustrate nel seguente elaborato.

2 STORIA DELL'ACQUIFERO SUPERFICIALE MILANESE

La pianura lombarda è costituita da depositi fluviali e fluvio-glaciali che formano una

complessa alternanza di strati ghiaiosi, sabbio-ghiaiosi, siltosi e argillosi. Tali depositi di origine quaternaria hanno elevato spessore e sono sede di un acquifero di rilevante interesse per continuità areale e volumetrica. L'acquifero padano costituisce un sistema "monostrato": lungo la catena Alpina le ghiaie e le sabbie formano uno strato indifferenziato, spesso senza coperture a bassa permeabilità e con falda libera, mentre spostandosi verso sud esso si divide in più strati separati da livelli limo-argillosi in cui si riscontrano falde confinate (CAVALLIN ET AL., 1983).

Nell'area milanese, in base alla classificazione introdotta da CAVALLIN ET AL. il sottosuolo è suddiviso in tre unità litostratigrafiche, con granulometria decrescente verso il basso: entro una profondità di circa 100 m, due sistemi acquiferi di cui quello più superficiale (identificato entro i 40 – 50 m di profondità) è sede di una falda idrica e quello più profondo è sede di una falda semiconfinata. L'acquifero milanese presenta diverse problematiche che vanno dal sovra – sfruttamento idrico all'inquinamento delle acque sotterranee, da fenomeni di subsidenza a problemi legati alla diminuzione della soggiacenza della prima falda causata da profonde alterazioni dovute all'urbanizzazione. Dalla analisi centennale delle stazioni site in Milano (Figura 1) si possono vedere due diversi andamenti della falda superficiale: uno di drastico abbassamento dovuto agli effetti del prelievo ad uso potabile ed industriale durante il boom economico degli anni '70 ed uno di risalita ciclica dal 1975 fino ad oggi. I prelievi, infatti, sono più significativi nell'abbassamento o innalzamento del livello di falda rispetto alle precipitazioni, che possono indurre solamente oscillazioni di tipo stagionale.

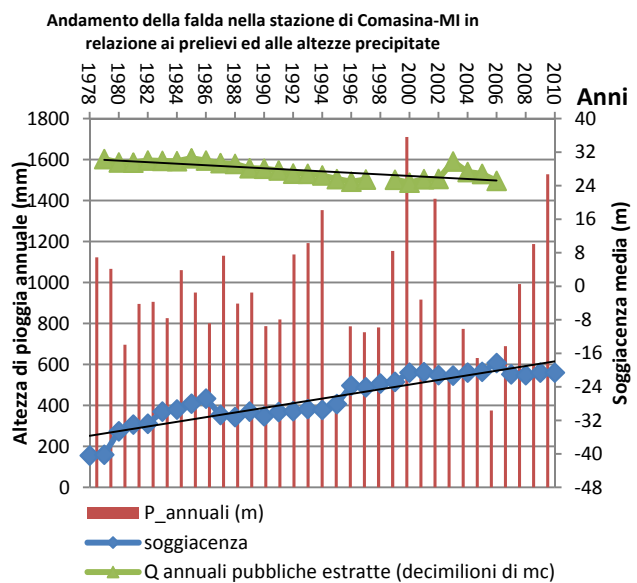
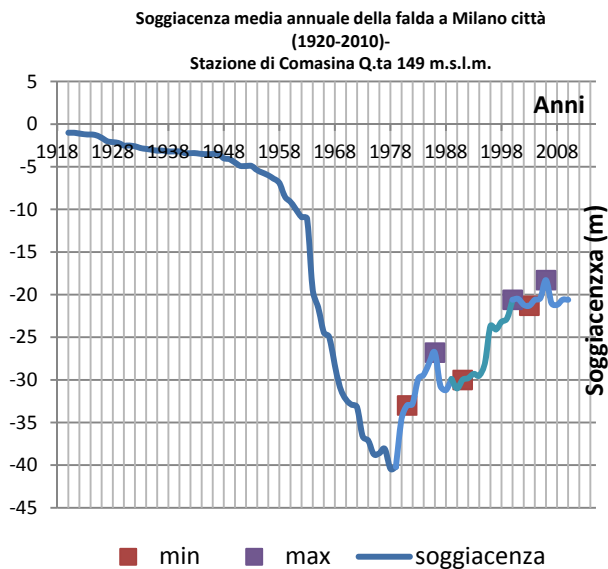


Figura 1- Andamento anni 1920-2010 della soggiacenza media nell'Area Nord di Milano - Dati di MM-Correlazione con precipitazioni e portate Area Milanese

La fase di abbassamento riscontrata nel Dopoguerra ha indotto alla progettazione delle infrastrutture, quali, ad esempio le linee metropolitane, i parcheggi e i magazzini a profondità poco elevate rispetto alla quota del piano campagna, senza la previsione adeguata di opere di protezione. Tuttavia, raggiunta la minima soggiacenza nel 1975, la falda ha avuto una inversione di tendenza in funzione delle vicende socio - economiche dell'area milanese. In particolare si ha avuta una lenta e progressiva risalita con massimi e minimi che possono essere ricondotti a piccoli cicli di quindici anni fino al giorno d'oggi.

La definizione di un modello previsionale deve prevedere quindi una ricostruzione di dettaglio di tutti gli elementi che rientrano nel bilancio: andamento geometrico - strutturale dei principali orizzonti acquiferi, distribuzione sull'areale delle grandezze idrogeologiche dei diversi orizzonti identificati nel sottosuolo, distribuzione delle principali voci di uscita (prelievi da falda, drenaggio cave) e di ricarica delle falde (piogge e irrigazioni). Si rende quindi

necessario il reperimento di dati riguardanti le variabili che rientrano nel modello in input.

3 EVOLUZIONE DELLA PIEZOMETRIA SUPERFICIALE E DELLE VARIABILI DI INTERESSE

3.1 DATI STORICI DELLA PIEZOMETRIA NELL'AREA DI INTERESSE

L'andamento della piezometria nella Provincia di Milano è studiato sin dai primi anni del Dopoguerra. La Provincia di Milano, infatti, dispone di dati storici sui livelli piezometrici, che possono essere utili per ricostruire l'andamento dei livelli di falda dal 1950, all'incirca, ad oggi.

Le figure riportate di seguito (Figura 2 – Figura 6) mostrano il progressivo andamento dei livelli di falda nella zona intorno alla Città di Milano. Dalle analisi storiche si evidenzia che eventi di riduzione delle portate e contemporaneo aumento anomalo delle precipitazioni si sono già verificati nel biennio 1976 – 1980, provocando sollevamenti anche

sensibili della piezometria rispetto al trend di

abbassamento continuo fino al 1958.

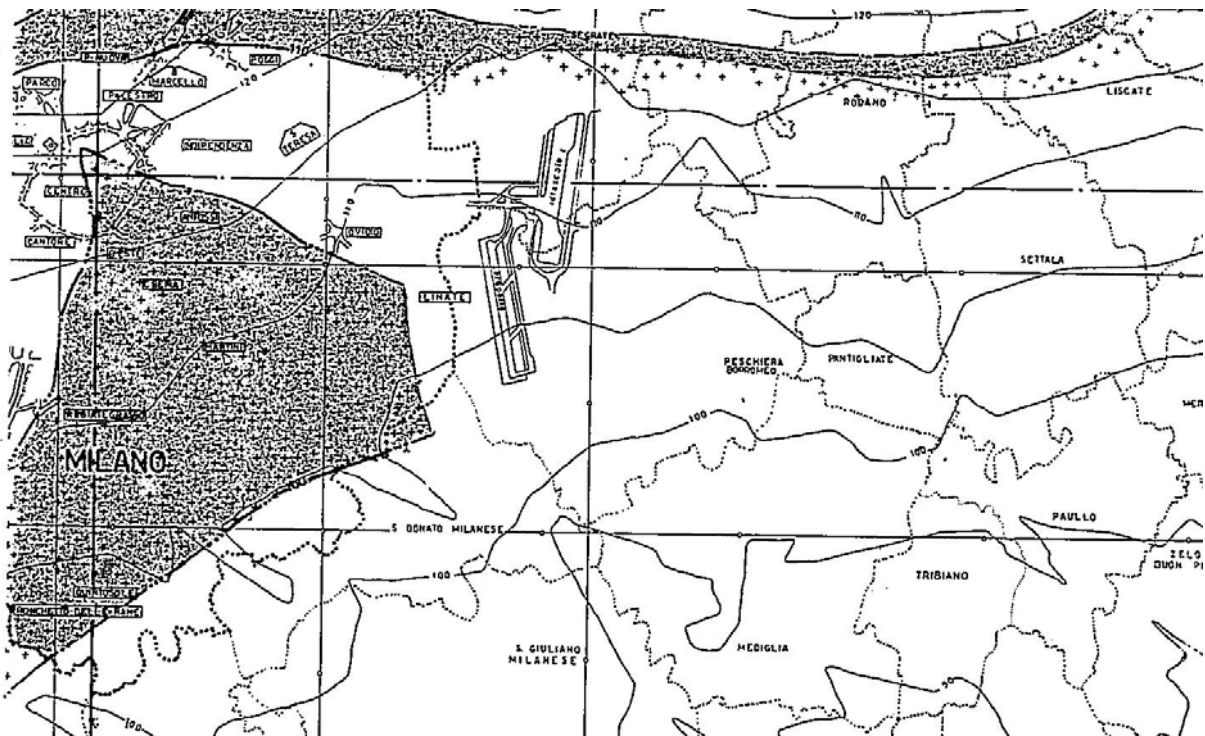


Figura 2 - Estratto della carta piezometrica della provincia di Milano del 1958

La Figura 2 mostra, ad esempio, come nel 1958 il livello piezometrico nell'Est – Milano si attestasse tra la quota 105 m s.l.m. e la quota 110 m s.l.m.

Analizzando, invece, i dati del 1992, si osserva come sia in corso uno spostamento verso l'alto delle quote piezometriche in

concomitanza con un marcato periodo di precipitazioni eccezionali abbinato alla riduzione dei prelievi idrici industriali derivanti dalla ridotta attività industriale (Figura 3): si nota, infatti, un innalzamento di circa 5 metri s.l.m. rispetto ai valori del 1958, nella stessa zona presa in considerazione.

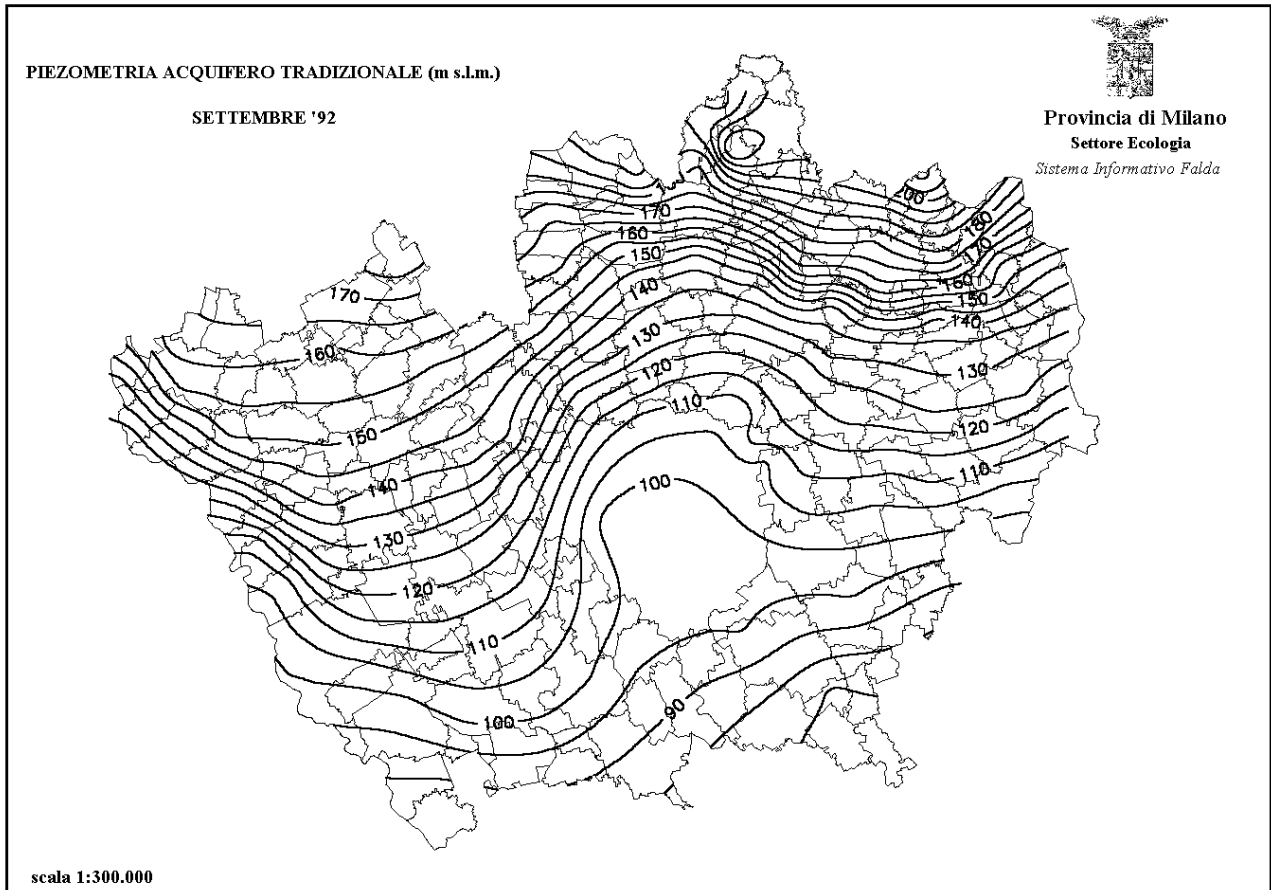


Figura 3 - Piezometria della Provincia di Milano nel settembre 1992

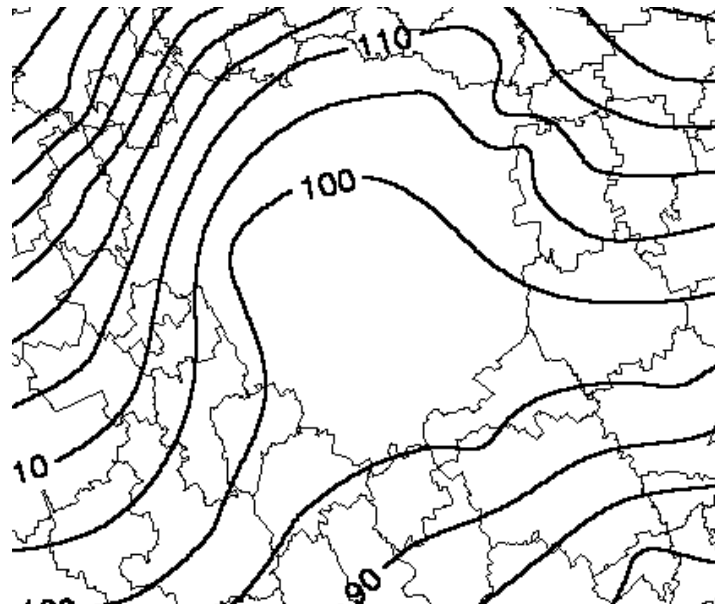


Figura 4 - Dettaglio della piezometria del 1992: il confronto con i valori del 1958, in Fig. 3.1, mostra un innalzamento di circa 5 m s.l.m.

La rappresentazione più recente disponibile è quella al Settembre 2011 (Figura 5).



Figura 5 - Piezometria della Provincia di Milano al Settembre 2011

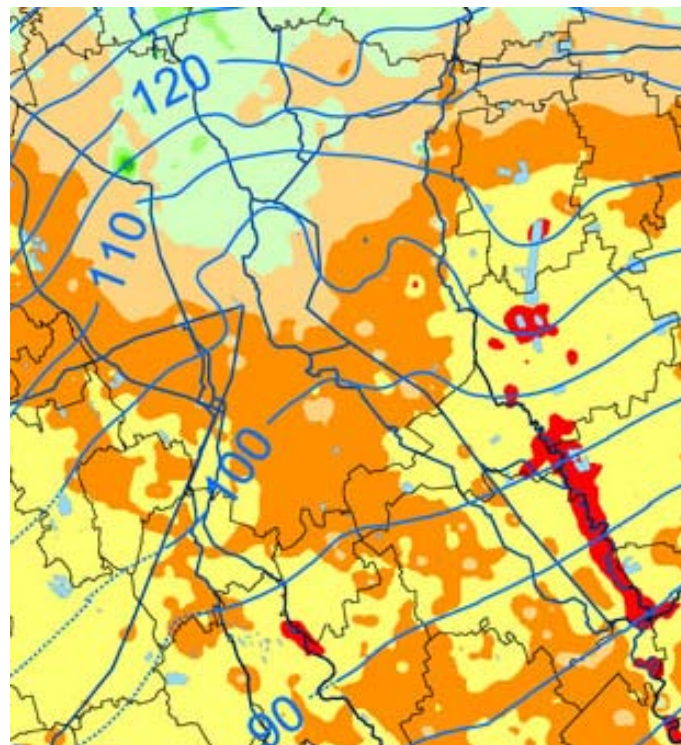


Figura 6 - Dettaglio della piezometria al Settembre 2011: è riconoscibile un ulteriore innalzamento rispetto alla situazione del 1992

Si può ritenere in prima approssimazione che il fattore che causa l'innalzamento della falda prolungato nel tempo sia rappresentato dalla ricollocazione dei punti di prelievo in aree lontane dai centri urbani.

3.2 CAMPAGNA DI MISURE DEL NOVEMBRE 2011 E CONFRONTO CON IL 1998: CALIBRAZIONE

L'aggiornamento della conoscenza dei livelli piezometrici è reso possibile dall'esecuzione di periodiche campagne di misura. La più

recente è stata effettuata nel Novembre 2011 nella zona Est di Milano.

Durante tale campagna sono stati rinvenuti alcuni piezometri, disposti in loco da ARPA o da Provincia di Milano in passato per precedenti campagne, che hanno permesso di misurare direttamente il livello della prima falda dell'acquifero lombardo.

All'incirca sugli stessi punti utilizzati nel 2011 era stata effettuata una precedente campagna di misure nel 1998, i cui risultati sono riportati nella seguente Figura 7.

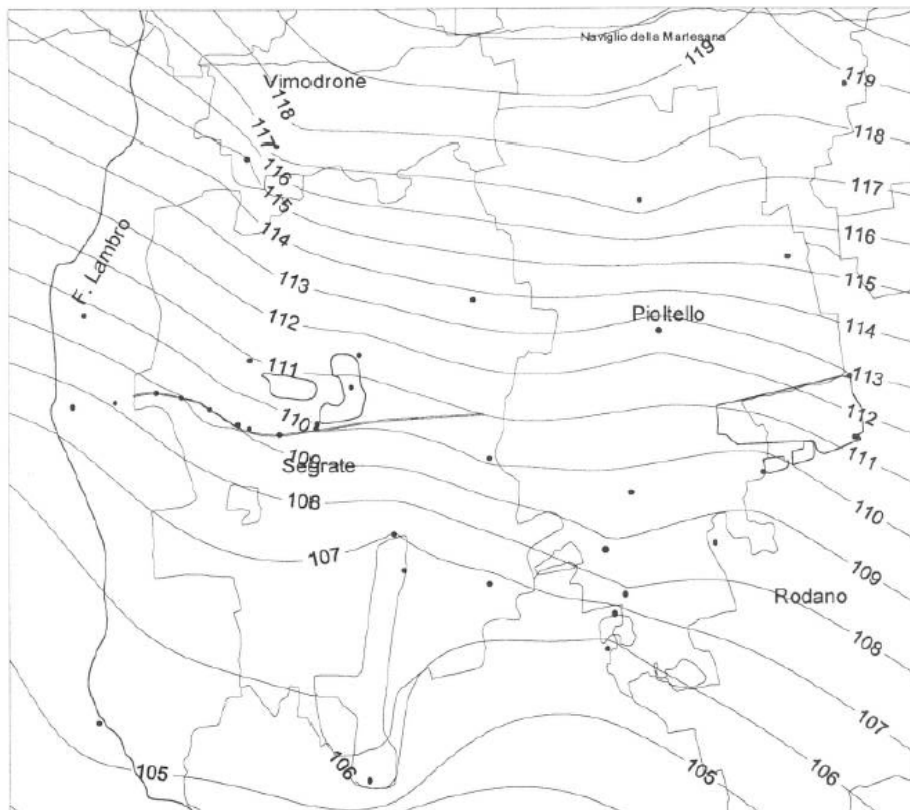


Figura 7 - Piezometria dell'Ottobre 1998 nell'area est di Milano (da Francani, Avanzini, 1999)

Il confronto tra quanto rilevato nel 1998 e quanto rilevato nel 2011 consente di concludere che la falda acquifera del milanese sta andando incontro ad un sollevamento. Se si prende come riferimento ad esempio l'Idroscalo, è possibile notare come tra il 1998 e il 2011, la piezometria abbia conosciuto un incremento di circa 2 m

s.l.m. (da circa 107 m s.l.m. a circa 109 m s.l.m.) in 13 anni.

È possibile concludere, dunque, che la falda acquifera del milanese è andata incontro ad un innalzamento dal 1976 ad oggi, soprattutto a causa della riduzione dei prelievi industriali, che costituivano una porzione importante fino alla metà degli Anni

'70. In seguito, soprattutto per la progressiva chiusura di numerose industrie, questi prelievi si sono ridotti, consentendo alla falda di risalire; è ragionevole ritenere che questo processo continui ancora oggi.

3.3 ANALISI DEI PRELIEVI

Nel precedente paragrafo si è detto che uno dei motivi che hanno determinato l'innalzamento della falda acquifera è da ricercarsi nella diminuzione dei prelievi, soprattutto industriali, dal 1976 ad oggi. Infatti, la pressione antropica sull'acquifero può essere causata in prima approssimazione dalla numerosità dei pozzi e dai volumi annui prelevati in milioni di metri cubi per ogni settore di utilizzo, pubblico o privato: la pressione sul sistema distributivo nell'area è caratterizzata dai consumi idrici pro-capite, la cui evoluzione nel tempo viaggia in parallelo con l'evoluzione della domanda della società e dell'andamento socio-economico. Inoltre è noto come il prelievo da acque superficiali non sia significativo nel Comune di Milano.

Accanto ai pozzi pubblici sono attivi anche un numero non inferiore di pozzi privati adibiti ad un uso prevalentemente industriale, distribuiti con una alta densità nel territorio. Esistono però numerosi pozzi e piezometri fermi ed in disuso. Dal 1993 al 2011 i prelievi si sono ridotti del 12 % (percentuale non discordante da quanto già previsto da Francani, Avanzini, 1999). A tal proposito, si è voluto analizzare l'andamento dei prelievi nella zona di Milano per vedere quale relazione vi è tra la diminuzione della falda e le portate estratte.

È stato anche possibile estrapolare un andamento delle portate per i prossimi anni fino al 2025, dal momento che le condizioni socio economiche non sono state studiate e sono di difficile previsione.

Metropolitana Milanese ha fornito le serie storiche riferite ai prelievi nelle diverse stazioni di monitoraggio nella zona del milanese dal 1979 al 2005 per i prelievi pubblici mentre la serie storica per i prelievi privati in possesso è dal 1986 al 2005.

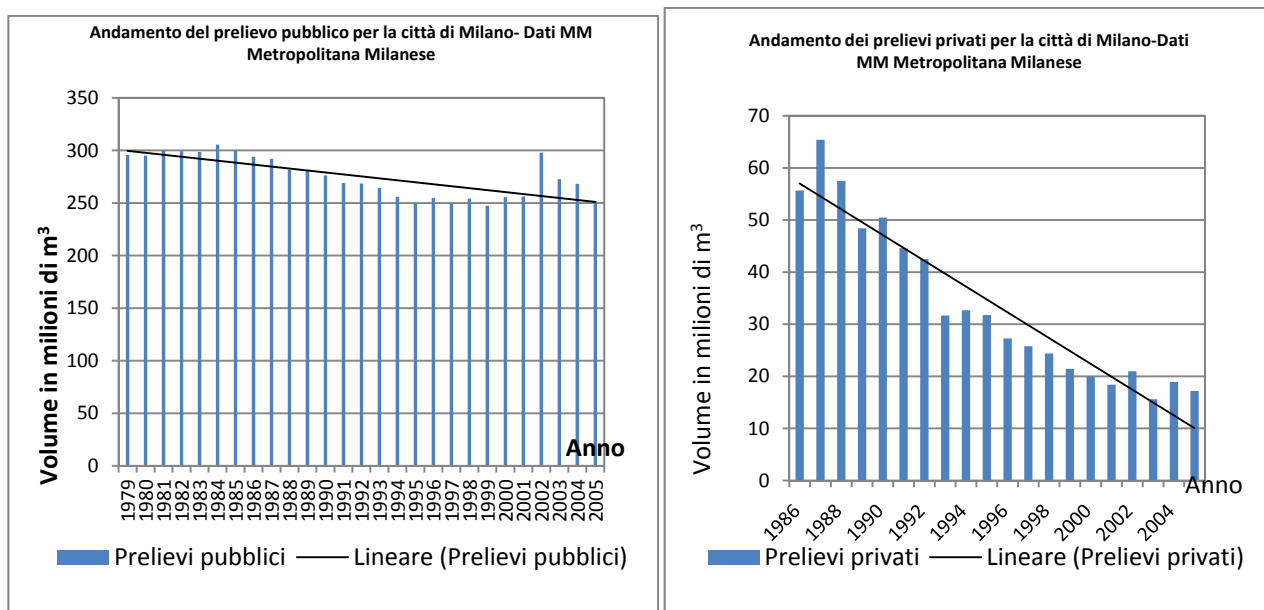


Figura 8 - Serie 1979-2006 dell'andamento dei prelievi pubblici e serie 1986-2006 prelievi privati nella città di Milano

La Figura 8 mostra come l'andamento dei prelievi pubblici abbia subito un decremento lineare pari a circa il 18%, fenomeno legato ad una costante diminuzione degli abitanti residenti, non compensata da una crescita dei consumi equivalenti pro-capite, sia per la diminuzione della domanda idrica industriale che per la saturazione del fabbisogno idropotabile pro-capite. Anche l'andamento dei prelievi privati nell'ultimo ventennio ha subito un decremento costante pari a circa il 24%.

Tale valore risulta essere assai più elevato rispetto al decremento dei prelievi da pozzi pubblici ed è dovuto alla progressiva e costante deindustrializzazione del territorio comunale e, in misura minore ma di difficile

quantizzazione, all'uso reversibile delle acque nei grandi poli industriali.

L'andamento totale dei prelievi (pubblici e privati) è stato studiato estrapolandone il trend per i prossimi anni, supponendo che l'andamento socio-economico sia quello attuale proiettato nell'immediato futuro. Il dato 2006, e i dati tra il 1995 e il 2000 provengono da altra fonte rispetto a quelli precedenti (Elaborazione Fondazione Lombardia per l'Ambiente su Dati Civico Acquedotto di Milano, Ufficio Statistica, 2002).

La Figura 9 mostra tale andamento e la retta di regressione dei dati in possesso fino al 2055.

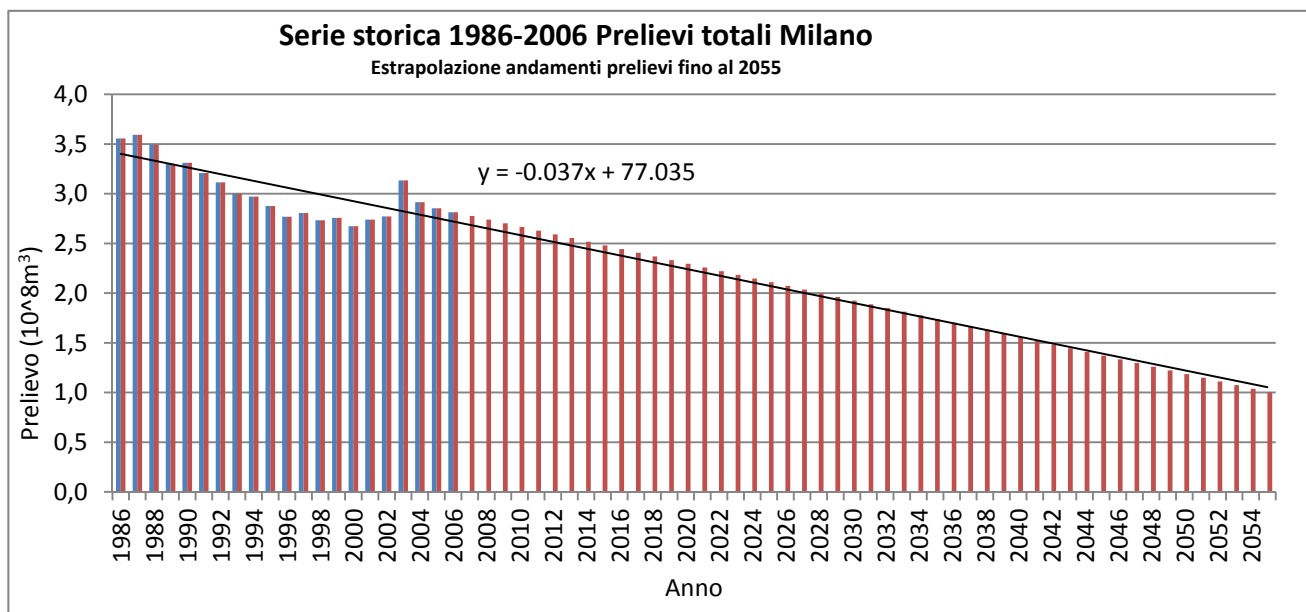


Figura 9 - Serie 1986-2006 dell'andamento dei prelievi totali nella città di Milano

Si osserva come il tasso di decrescita annuo sia di circa 3 punti percentuali, estrapolati però dall'attuale trend socio-economico. Sono state quindi calcolate le variazioni totali rispetto al 2006, ultimo anno di dati disponibili e misurati.

Si assisterà ad una variazione delle portate totali con l'attuale trend di diminuzione pari a circa il 6,58% al giorno d'oggi, di circa il 20% al 2021.

3.4 RACCOLTA DATI DI PIOGGIA E QUANTIFICAZIONE DEI TEMPI DI RITORNO

La Provincia di Milano è un territorio vasto, ma sufficientemente omogeneo dal punto di vista morfologico tale da poter considerare un'unica stazione pluviometrica come rappresentativa di tutta l'area di interesse. Si

è scelto, pertanto, la stazione meteorologica di Milano Lambrate come rappresentativa di tutta l'area, dal momento che essa dispone della serie di dati più completa e

temporalmente più lunga. La Figura 10 riporta l'andamento delle piogge dal 1917 al 2011.

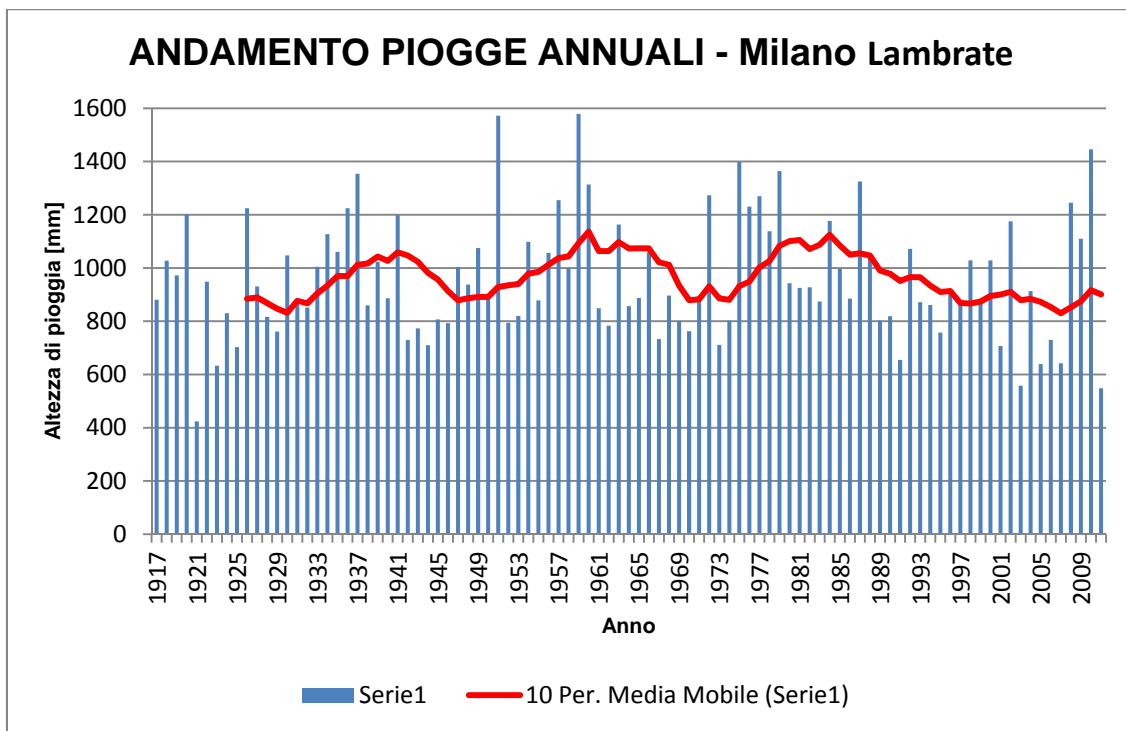


Figura 10 - Istogramma delle precipitazioni annue nel periodo 1917 – 2011 per la stazione di Milano Lambrate; in rosso è tracciato l'andamento delle medie mobili decennali (fonte: servizio meteorologico di ARPA Lombardia)

Come si evince dalla Figura 10, le piogge annue hanno subito oscillazioni pluriennali, con:

- minimi negli anni '20 - '25, '40 - '50, 65 - '70, 2000 - 2005;
- massimi negli anni '35-'40, a cavallo degli anni '60, '75-'80 e dal 2007 ad oggi.

Tabella 1– Statistiche delle piogge annue a Lambrate, nel periodo tra il 1917 e il 2011

MASSIMO [mm/a]	1578
MINIMO [mm/a]	423
MEDIA [mm/a]	960
DEV.ST.[mm/a]	244
C.O.V. [%]	25

Le statistiche (Tabella 1) della serie di pioggia a Milano Lambrate evidenziano che cadono circa 960 mm/anno, valore che ben rappresenta la situazione della Pianura Padana, con una deviazione standard relativamente bassa. Il coefficiente di variazione indica che i valori sono poco dispersi intorno alla media, pur presentando dei picchi di minimo e di massimo notevolmente differenti dallo stesso valor medio.

Può essere effettuata un'analisi statistica delle altezze di pioggia media annua. Nelle seguenti Figura 11– Figura 12 sono riportati sia l'istogramma delle frequenze, sia la curva di probabilità cumulata di pioggia.

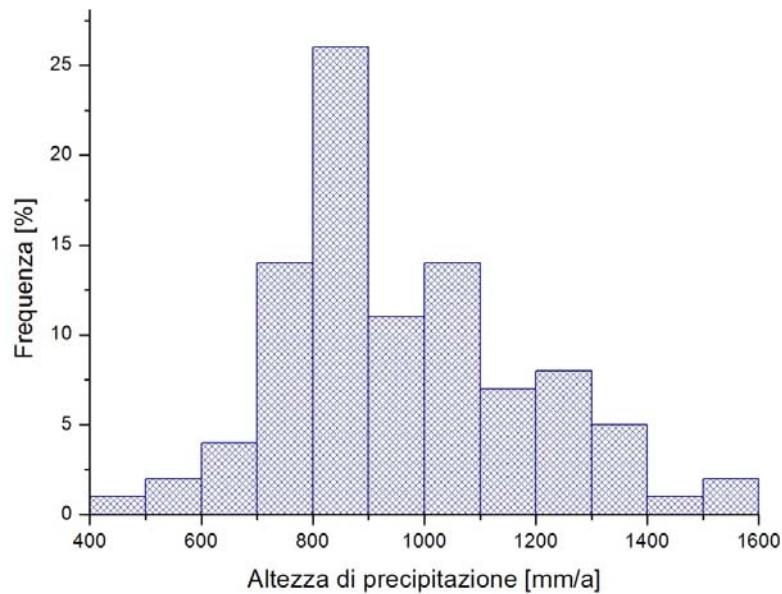


Figura 11 - Istogramma delle frequenze delle altezze di pioggia nella stazione di Milano Lambrate

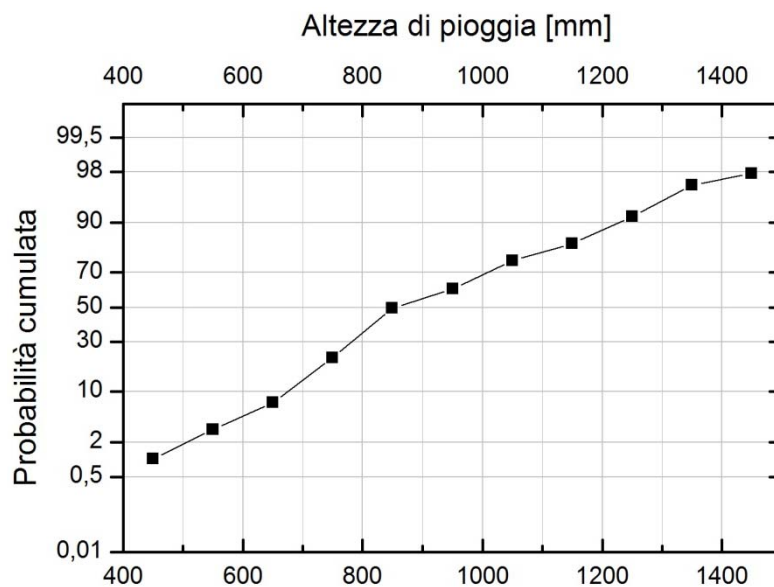


Figura 12 - Curva cumulata della distribuzione di probabilità delle altezze di pioggia nella stazione di Milano Lambrate

La conoscenza della curva di probabilità cumulata ha permesso di associare ad ogni altezza di pioggia il tempo di ritorno, calcolato con la semplice relazione $T_r = \frac{1}{1-P_h}$, dove T_r è il tempo di ritorno in anni, e P_h la

probabilità di non superamento dell'altezza di pioggia h .

Dalla curva cumulata riportata in Figura 12 è possibile costruire la tabella dei tempi di ritorno per prefissate altezze di pioggia (Tabella 2).

Tabella 2– Tabella dei tempi di ritorno per precipitazioni di assegnata altezza a Milano Lambrate

PROBABILITÀ	ALTEZZA DI PIOGGIA [mm]	TEMPO DI RITORNO [anni]
0.5	850	2
0.7	1000	3,3
0.8	1100	5
0.85	1150	6,7
0.9	1250	10
0.95	1300	20
0.98	1450	50
0.99	1500	100
0.995	1600	200

3.5 IRRIGAZIONE

Una componente variabile da considerare in un modello previsionale è anche la presenza dell'infiltrazione dovuta all'irrigazione; i dati possono essere reperiti dai Consorzi (ad esempio il Consorzio Villoresi Est Ticino per le portate delle derivazioni dei Navigli e delle portate estive), dal SIARL (Sistema Informativo Agricolture Regione Lombardia) per l'uso di destinazione del suolo e dal reticolo idrico della provincia Milanese.. Dal momento che molto spesso i dati difettano di informazioni quali portate dei canali minori oppure non sono aggiornati con le modifiche più attuali dell'uso del suolo o delle modifiche dei percorsi dei canali minori, una modalità di utilizzo dei dati in possesso è quello di individuare una zona ritenuta rappresentativa e stimarne una ricarica media per unità di area. Ad esempio, nell'hinterland milanese, è stato possibile delimitare una porzione compresa tra Naviglio Martesana, fiume Lambro e Canale Muzza: si sono considerate le acque derivate dal Naviglio Martesana e i suoli coltivati; sono stati esclusi invece i terreni a riposo ed il

contributo dei fontanili. Una volta individuata la superficie di irrigazione ($1.2 \cdot 10^8 \text{ m}^2$) e la portata derivata dal Martesana ($20 \text{ m}^3/\text{s}$) è stato possibile individuare una infiltrazione potenziale come rapporto tra le due grandezze. Tale valore va però corretto sia tenendo conto dell'efficienza dell'irrigazione (stimata a circa il 30%) sia tenendo conto che le portate sottoscritte variano durante la stagione (percentuale di utilizzo nei mesi dell'anno rispetto la portata massima derivata). Il dominio ad Est del Lambro può essere ben rappresentato da tali condizioni mentre la zona ad ovest dove i fontanili risultano pressoché assenti, l'apporto idrico esterno deve essere superiore. Per tale zona si sono escluse alcune aree in cui erano presenti i fontanili stessi. La zona agricola quindi risulta essere di minore estensione ($7.7 \cdot 10^7 \text{ m}^2$) (Figura 13). Il periodo da considerarsi per l'irrigazione è compreso tra la metà di aprile e la metà di settembre, ed il valore di ricarica risulta leggermente inferiore per la zona ad est del Lambro rispetto che quella ad Ovest.

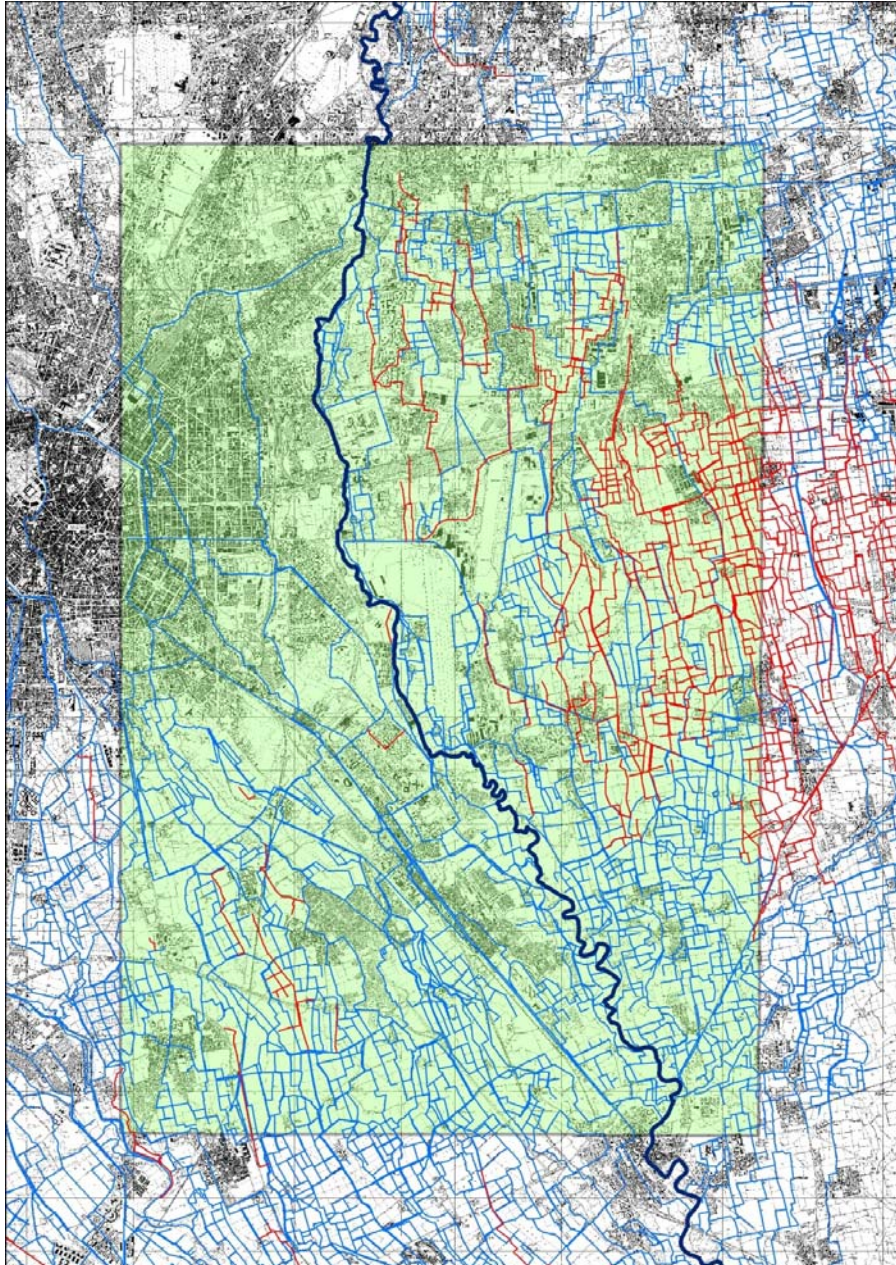


Figura 13 - Reticolo idrico nell'area di interesse. In rosso sono mostrati i canali originati da fontanili.

4 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO PREVISIONALE

Per esaminare quali siano i livelli di massimo sollevamento della falda compatibili con le caratteristiche idrogeologiche di studio, si è pervenuti con la raccolta di dati sulla struttura geologica esistente (conducibilità idraulica, livelli piezometrici, prelievi, ricarica dovuta ad irrigazione ed eventi meteorici)

integrati con una adeguata campagna *in situ* (raccolta livelli di soggiacenza). L'analisi è stata condotta mediante un modello idrogeologico utile per la previsione del livello di falda il più fedele possibile alle caratteristiche del sottosuolo e dei parametri dell'acquifero di una porzione di territorio dell'hinterland milanese.

Il modello è stato implementato tramite il codice di calcolo MODFLOW, sviluppato dall'U.S.G.S. (Mc Donald MG, Harbaugh AW, 1984). Il codice risolve le equazioni di flusso (equazione di Darcy e principio di

conservazione della massa) mediante una discretizzazione alle differenze finite, operata su una griglia ad elementi rettangolari. La prima fase è l'impostazione della griglia e del dominio di studio, impostando lungo la direzione verticale uno spessore che consideri l'intero acquifero tradizionale fino a 45 m di profondità, la cui base risulta essere il livello a granulometria fine che separa l'acquifero superficiale da quello profondo di profondità superiore ai 80-95 m da piano campagna.

La discretizzazione verticale avviene mediante quindi la suddivisione in layer; un approccio possibile è quello di avere 4 layer, due per l'acquifero superficiale, uno per quello profondo ed uno che funge da divisore tra i due acquiferi.

Di seguito vengono elencati i parametri di input che incidono sulla elaborazione finale dei risultati previsionali.

4.1 CONDUCEBILITÀ IDRAULICA

La conducibilità idraulica viene attribuita ad ogni layer del modello mediante distribuzione discreta con valori compresi tra $5 \cdot 10^{-6}$ m/s nella zona di separazione fra i due acquiferi fino ad un massimo di $3 \cdot 10^{-3}$ m/s nella zona di acquifero profondo. I valori utilizzati provengono da prove di portata eseguite in pozzi e piezometri e vengono referenziati tramite interpretazione basata sulle stratigrafie e le sezioni idrogeologiche disponibili o appositamente realizzate nel corso della elaborazione del modello concettuale.

4.2 CONDIZIONI AL CONTORNO

Lungo i lati nord, est ed ovest del dominio sono state applicate condizioni al contorno del tipo "General head boundary", corrispondenti a condizioni di Cauchy che consentono al livello piezometrico calcolato nel modello una maggiore libertà di variazione. Lungo il lato sud è stata impostata una condizione di carico costante: data la

distanza, l'influenza della condizione rispetto all'area di studio è molto limitata.

4.3 PRELIEVI

L'inserimento di pozzi attivi, sia privati che pubblici è stato fatto mediante condizioni di flusso imposto in uscita (condizione "well").

4.4 RICARICA SUPERFICIALE

La ricarica superficiale è costituita dalla somma dei contributi derivanti da precipitazioni ed irrigazione. Ai fini delle simulazioni, i contributi vengono applicati sulla superficie del modello mediante attribuzione di condizioni di flusso imposto in ingresso.

4.5 CALIBRAZIONE

La calibrazione del modello è stata effettuata utilizzando i valori di livello misurati in campo durante il 2011. La calibrazione è servita a rendere la direzione generale di deflusso e l'altezza di livello simili a quelle verificate elaborando le misure di campo. I parametri sottoposti a calibrazione sono le condizioni al contorno. A meno di lievi scostamenti presumibilmente da attribuirsi all'eterogeneità dei punti di misura e a disturbi locali causati dalle infrastrutture già realizzate i livelli piezometrici rispecchiano quelli realmente misurati. Il calcolo del livello di falda tiene quindi conto degli elementi precedentemente illustrati. Si creano quindi dei possibili scenari futuri, al variare delle ipotesi di variazione dei parametri di input: i livelli ottenuti sono analizzati dal punto di vista statistico con il Metodo Montecarlo.

4.6 ANALISI PREVISIONALE DI POSSIBILI SCENARI FUTURI

Per l'analisi previsionale sono possibili diversi scenari a seconda di quale variabile si vuol cambiare in input del modello:

- la ricarica dovuta alla precipitazione viene considerata mediante valori di precipitazioni estratte dalla distribuzione di piogge, e viene depurata dai flussi di evapotraspirazione e di ruscellamento; essa viene incrementata della quota parte dovuta all'infiltrazione da irrigazione.
- riduzione al 2016 dei prelievi secondo l'analisi del trend degli ultimi anni (a cinque anni di distanza dal 2011) del 7% rispetto alle portate estratte attualmente.

Secondo un approccio Monte Carlo, è opportuno svolgere almeno 100 simulazioni per ognuna delle quali la ricarica deve essere campionata a partire da una distribuzione

gaussiana limitata tra i valori minimo e massimo osservati. Il valore campionato stato viene poi attribuito al modello.

I risultati estratti al termine di ogni *run* vengono aggregati in modo da comporre le curve di probabilità cumulata per gli eventuali punti di osservazione. Le curve stabiliscono, per ogni punto di osservazione, la probabilità che il valore di livello piezometrico mostrato in ascissa non venga superato. Quindi il valore di (1-p) stabilisce la probabilità che tale livello piezometrico venga superato a causa di un periodo di ricarica media annua elevata. A titolo di esempio nel seguente grafico (Figura 14) si mostra la probabilità di superamento delle quote di falda in alcuni piezometri. La Tabella 3 riassume le probabilità di superamento delle quote di 112 m s.l.m. e 113 m s.l.m.

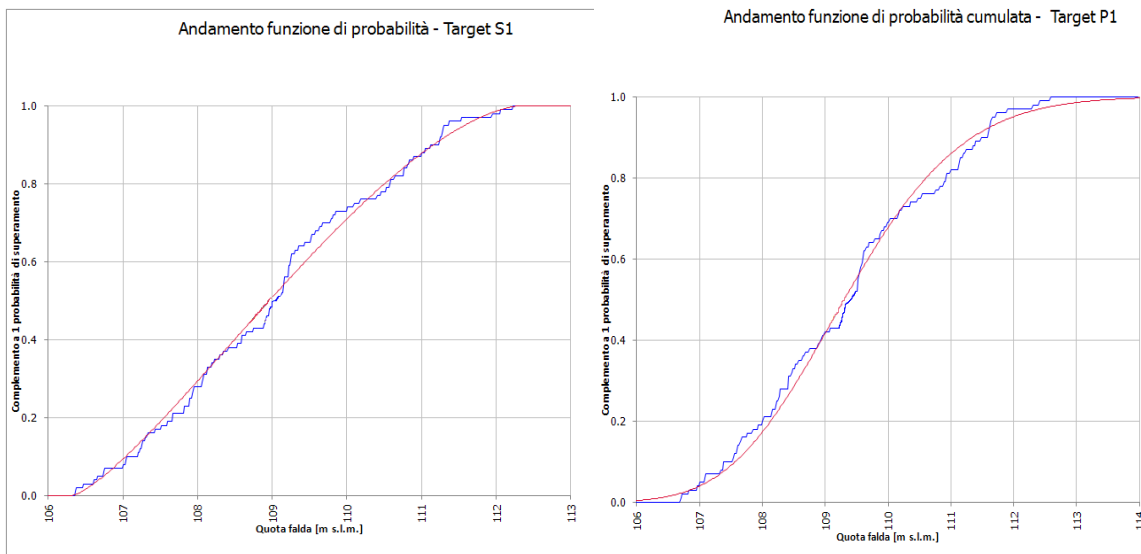


Figura 14 - Probabilità di superamento della quota 112 m s.l.m. in corrispondenza di alcuni piezometri, ottenute con il metodo Monte Carlo

Tabella 3– Probabilità di superamento della quota 112 m s.l.m. e 113 m s.l.m.

Target	P (h>112)	P (h>113)
S1	1%	<1%
P1	3%	1%

5 CONCLUSIONI

Le particolarità delle oscillazioni piezometriche e della loro ampiezza nel corso degli anni suggeriscono di limitare la previsione a un arco di tempo limitato, entro il quale le condizioni socioeconomiche, demografiche e della produzione industriale, alle quali è da attribuire il maggior peso nel contributo alle variazioni del livello piezometrico, sono ragionevolmente prevedibili:

- la riduzione della popolazione nel comune di Milano e/o nei comuni posti ad est del capoluogo;
- la riduzione del prelievo dagli acquiferi più superficiali a causa, ad esempio, di inquinamento diffuso;
- una sensibile riduzione del consumo pro capite;
- l'ottimizzazione di strutture e modalità di prelievo e distribuzione delle acque sotterranee;

L'importanza di prevedere nella maniera più realistica possibile scenari di cambiamento nei livelli di falda della zona del Milanese risulta essere molto attuale sia perché è una zona ad alta concentrazione abitativa e residenziale, sia perché è sede di importanti infrastrutture viarie quali linee metropolitane e strade a scorrimento urbano ed extraurbano.

L'analisi delle serie storiche delle variabili che possono influenzare la variazione della falda tra i quali le precipitazioni, l'irrigazione e la portata di estrazione pubblica e privata mostra come tali variabili ne influenzino la variazione, già in generale sollevamento dal 1965 ad oggi.

L'analisi di tipo probabilistica può dare in termini di percentuale di superamento del livello critico un'idea di come il livello di falda possa raggiungere livelli non accettabili per le infrastrutture esistenti nell'area di studio. Il modello previsionale risulta tanto più accurato quanto più i dati di input risultano affidabili e provenienti da serie storiche di lunga durata.

6 BIBLIOGRAFIA

Cavallin A., Francani V., Mazzarella S., “Studio idrogeologico della pianura compresa tra Adda e Ticino”, CAP Milano, 1983

Francani V., Avanzini M., “Verifica dell’oscillazione del livello di falda in corrispondenza del tracciato stradale ‘Raccordo Tangenziale Est di Milano e Dogana di Segrate’ – Allegato A: Ricostruzione dei profili piezometrici relativi all’ottobre 1998 e all’ipotesi B”, Febbraio 1999

McDonald M. G, Harbaugh A.W., A modular three dimensional finite difference ground water flow model.U.S. Geological Survey Open File Report 83-875, 1984

Consorzio Villoresi Est Ticino (<http://www.etvilloresi.it/portal-villoresi/sv1.do>) *per i dati relativi ai prelievi agricoli*

Provincia di Milano, Area qualità dell’ambiente ed energie (http://www.provincia.milano.it/ambiente/acqua/acque_sotterranee/) *per i dati storici di piezometrie e soggiacenza*

Servizio Meteorologico di ARPA Lombardia (<http://ita.arpalombardia.it/meteo/meteo.asp>) *per i dati pluviometrici*

SIARL – Sistema Informativo Agricolo della Regione Lombardia(<https://www.siarl.regione.lombardia.it/index.htm>) *per i dati relativi ai prelievi agricoli*