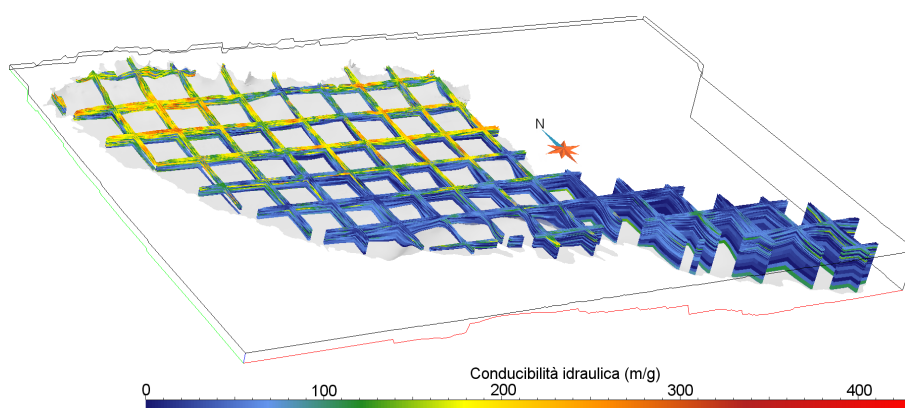


Dottorato di ricerca in Scienze Ambientali
Ciclo XXIII
Coordinatore: Prof. Marco Vighi

**RICOSTRUZIONE TRIDIMENSIONALE DELLE
CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE DELLA
PIANURA LOMBARDA, FINALIZZATA
ALL'APPLICAZIONE DI MODELLI DI FLUSSO E
TRASPORTO**



Tesi di: **Francesca Del Rosso**

Relatore: Prof. ssa Tullia Bonomi
Tutor esterno: Prof. Mauro Marchetti

Gennaio 2011

*Ai miei genitori e
a mia sorella*

INDICE

1	Introduzione	1
2	Obiettivi del progetto.....	5
3	Metodologia applicata	7
4	Inquadramento dell'area di studio	13
4.1	Inquadramento geografico	13
4.2	Inquadramento geomorfologico	16
4.3	Inquadramento geologico	19
4.4	Inquadramento idrogeologico	22
5	Raccolta, organizzazione e archiviazione dati	29
5.1	Dati puntuali statici.....	29
5.1.1	Raccolta dati puntuali statici	29
5.1.2	Archiviazione dati puntuali statici	30
5.2	Dati puntuali dinamici.....	37
5.2.1	Misure piezometriche.....	38
5.2.2	Prelievi	39
5.3	Dati spaziali	42
6	Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio.....	45
6.1	Definizione delle superfici del sistema idrogeologico	45
6.1.1	Spessori intercorrenti tra le superfici limite del modello	52
6.2	Modellazione 3D del sistema idrogeologico	61
6.2.1	Discretizzazione verticale delle tre griglie del modello.....	66
6.2.2	Visualizzazione 3D dell'intero modello del sistema idrogeologico	81

6.3	Importazione e analisi dei dati puntuali stratigrafici nello spazio 3D di Gocad.....	84
6.3.1	Proprietà tessiturali: percentili e istogrammi	85
6.3.2	Parametri idraulici: percentili e istogrammi	88
6.3.3	Funzione variogramma	91
6.3.4	Calcolo del variogramma in Gocad.....	94
6.3.5	Analisi dei variogrammi sperimentali	95
6.3.6	Variogrammi teorici delle proprietà tessiturali	99
6.3.7	Variogrammi teorici dei parametri idraulici.....	100
6.4	Interpolazione geostatistica	101
6.4.1	Tecnica geostatistica: Kringing	101
6.4.2	Procedimento di interpolazione in Gocad	103
6.4.3	Risultati delle interpolazioni dei dati puntuali all'interno delle griglie di calcolo	103
6.4.4	Sezioni 3D delle proprietà tessiturali.....	105
6.4.5	Sezioni 3D dei parametri idraulici	120
6.4.6	Confronto dei risultati ottenuti con sezioni idrogeologiche ricostruite con tecniche classiche ..	132
6.5	Problematiche incontrate e ancora aperte	137
7	Individuazione di livelli torbosi nell'area di bacino tra Ticino ed Oglio	141
7.1	Analisi delle percentuali di torba estratte dalla Banca Dati Tangram.....	142
7.2	Visualizzazione 3D delle percentuali di torba.	145
8	Caratterizzazione idrogeologica 3D a scala provinciale per la stima della disponibilità idrica del sottosuolo	155
8.1	Breve inquadramento delle province di Milano e di Monza e Brianza.....	155
8.1.1	Inquadramento geomorfologico e geologico.....	156
8.1.2	Inquadramento idrogeologico	158
8.2	Metodologia applicata.....	158
8.3	Elaborazione 3D dei dati statici.....	160
8.3.1	Modellazione della struttura geologica del sistema	160

8.3.2 Ricostruzione dell'eterogeneità dei depositi nel sistema	163
8.4 Elaborazione dei dati dinamici	170
8.4.1 Andamento piezometrico storico.....	171
8.4.2 Andamento piezometrico areale	177
8.4.3 Calcolo della soggiacenza della falda.....	185
8.5 Calcolo della disponibilità idrica nelle province di Milano e di Monza e Brianza.....	186
8.6 Calcolo della disponibilità idrica nelle 8 sottoaree a geomorfologia diversa	194
8.6.1 Confronto tra volumi di acqua mobile e pochi dati di prelievo	203
8.7 Problematiche incontrate e ancora aperte	204
9 Strumenti utilizzati.....	207
9.1 Tangram	207
9.2 Gocad.....	214
9.3 Altri software.....	216
9.4 Breve cenno a Modflow e Groundwater Vistas	217
Conclusioni	219
Bibliografia	229
Ringraziamenti	237
Allegato 1	239
Allegato 2.....	240
Allegato 3.....	241
Allegato 4.....	242
Allegato 5.....	243

Allegato 6.....	244
------------------------	------------

1 Introduzione

Il tema della risorsa idrica, della sua disponibilità, della possibilità per tutti di accedervi e della qualità minima garantita, è una questione di primaria importanza che coinvolge trasversalmente l'intera popolazione mondiale, soprattutto negli ultimi anni in cui svariati fattori, non ultimo l'incremento degli abitanti, hanno contribuito a rendere più incalzante.

La World Health Organization nel 2000 ha stimato che su circa 6.6 miliardi di persone, approssimativamente 1.1 miliardo, che nel 2020 si prevede aumenti a circa 3 miliardi, non ha accesso all'acqua potabile e pressappoco 2.4 miliardi di persone vive senza un sistema igienico-sanitario adeguato; ciò provoca un alto tasso di mortalità, causato da malattie legate all'acqua, che potrebbero essere evitate.

Secondo General Comment 15, CESCR del 2002, stilato dalle Nazioni Unite, "l'acqua è una risorsa naturale limitata e un bene pubblico, fondamentale per la vita e la salute. Il diritto umano all'acqua è indispensabile per condurre una vita dignitosa. E' un requisito per la realizzazione di tutti gli altri diritti umani"; continua poi sostenendo che "l'acqua deve essere trattata come un bene sociale e culturale, e non soprattutto come un bene economico". Inoltre, secondo il criterio, di sostenibilità, tale diritto va riconosciuto e garantito sia alle generazioni presenti sia a quelle future.

Con la Direttiva 2000/60/CE l'Unione Europea ribadisce che la risorsa idrica, sia essa superficiale o sotterranea, "non è un prodotto commerciale al pari degli altri, bensì un patrimonio che va difeso, protetto e trattato come tale". Uno degli scopi della direttiva è, infatti, di garantire una fornitura sufficiente di acque superficiali e sotterranee di buona qualità per un utilizzo idrico sostenibile, equilibrato ed equo. Per il Servizio Geologico americano (Alley et al., 1999) la sostenibilità idrica delle acque sotterranee consiste nell'utilizzo della risorsa per un tempo indefinito, senza causare conseguenze inaccettabili dal punto di vista ambientale, economico e sociale. Non è una risorsa non rinnovabile come il petrolio o il carbone, ma non è completamente rinnovabile come l'energia solare: le precipitazioni rigenerano continuamente l'acquifero, ma spesso le entrate al sistema sono inferiori rispetto alle uscite. Va inoltre preso in considerazione il fatto che la falda ha un tempo di risposta ritardato rispetto agli inputs che provengono dall'esterno, a volte molto elevato,

anche di migliaia di anni: la risposta dipende da diversi fattori (l'uso del suolo, il tipo di vegetazione, la tipologia del terreno e la conducibilità idraulica nel non saturo, le diverse condizioni meteo-climatiche..) e perciò gli effetti di qualsiasi variazione sulle acque sotterranee possono essere visibili anche molto lentamente nel tempo.

La legge di riferimento per le acque sotterranee a livello nazionale è il D. Lgs. 3 aprile 2006 n.152, che sostituisce totalmente il D. Lgs. 11 maggio 1999 n. 152, ponendo l'argomento della salvaguardia idrica al centro della sua parte terza. Secondo ciò che è riportato in esso, "lo stato ambientale delle acque sotterranee è definito in base allo stato quantitativo e a quello chimico" e, per quanto riguarda lo stato quantitativo, la valutazione delle condizioni viene fatta "in base alle caratteristiche dell'acquifero (tipologia, permeabilità, coefficienti di immagazzinamento) e del relativo sfruttamento (tendenza piezometrica o delle portate, prelievi per vari usi)".

Secondo quest'ottica, la tutela del patrimonio idrico costituisce uno degli obiettivi principali che gli enti amministratori e gestori del territorio devono perseguire, soprattutto in un periodo come quello attuale in cui le acque sono soggette a pressioni di tipo quantitativo (estrazione di acqua di falda mediante pozzi o derivazioni da corpi idrici superficiali), per soddisfare le varie tipologie di idroesigenza, e di tipo qualitativo, dovute a fonti di inquinamento puntuali e diffuse. Infatti la crescente richiesta di acque può comportare, anche in regioni caratterizzate da una generale disponibilità della risorsa, come ad esempio la Lombardia, problemi di approvvigionamento a livello locale, con le conseguenti ricadute sul contesto ambientale, sociale e produttivo.

Lo scopo è, quindi, quello di tendere ad una gestione integrata e sostenibile della risorsa, che miri al raggiungimento di un giusto equilibrio tra il mantenimento di uno stato ecologico naturale e il soddisfacimento del fabbisogno per uno sviluppo economico e sociale.

L'analisi di situazioni molto diverse tra loro e il collegamento di modelli sviluppati per singolo tematismi sono sicuramente due procedimenti complessi, soprattutto quando si affronta il tema delle acque sotterranee, che, forse perché apparentemente invisibili, sono da sempre poco indagate. Una conoscenza approfondita delle caratteristiche e dei corpi idrici sotterranei risulta quindi imprescindibile: in questa situazione i modelli risultano dei validi

strumenti di simulazione della realtà, sia che riguardino la struttura geologica e idrogeologica del sistema acquifero, sia che ne riproducano il flusso o la percolazione o il trasporto di inquinanti, oltre a fornire dei bilanci quantitativi e a contribuire alla realizzazione di previsioni sullo stato della risorsa.

E' a questo proposito che si aggancia il progetto di dottorato: l'attività si è svolta nel campo dell'Idrogeologia applicata e si è inserita in un programma di ricerca sviluppato all'interno del gruppo di Idrogeologia del Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio (DISAT), finalizzato allo sviluppo di metodologie informatiche applicate alle problematiche relative allo studio e alla gestione delle riserve idriche sotterranee. L'argomento di studio è vasto e complesso, per questo il progetto nasce anche dal prosieguo di altre ricerche concluse, in particolare si lega ad un progetto di ricerca triennale che è terminato a dicembre 2008, RICLIC-WARM (Regional Impact of Climatic Change in Lombardy Water Resources: Modelling and Applications, finanziato dall' Università di Milano-Bicocca, da ARPA Lombardia e dalla Fondazione Lombardia per l'Ambiente), il cui scopo è stato quello di sviluppare una metodologia scientifica che permetta di valutare gli impatti delle variazioni climatiche sulle risorse idriche superficiali e sotterranee. Il dottorato di ricerca ha seguito le tematiche del progetto e ha attinto, in parte, ai dati già raccolti.

2 Obiettivi del progetto

L'intento del progetto è consistito nella realizzazione di metodiche per lo sviluppo di tecnologie informatiche, applicate a problematiche idrogeologiche complesse, quali l'esecuzione di modelli di flusso e di trasporto nel "saturo" sia a scala locale che di bacino; si tratta di strumenti che possono anche fungere da supporto agli enti pubblici in materia di gestione integrata della risorsa idrica.

L'implementazione di tali tecnologie informatiche lega l'uso di una Banca Dati idrogeologica alla realizzazione di modelli geologici tridimensionali (Bonomi, 2009) per simulare l'eterogeneità di un acquifero, ricostruendone la struttura dei depositi sciolti fluviali e fluvio-glaciali e stimandone la distribuzione dei parametri idraulici: sono state ricreate le sequenze deposizionali succedutesi nel tempo in funzione di movimenti tettonici e dell'evoluzione dell'ambiente di deposizione, a partire da informazioni puntuali stratigrafiche. E' stato così possibile riprodurre una struttura sotterranea che non sia legata alla schematica suddivisione in acquiferi e acquitardi, ma caratterizzata dall'eterogeneità tessiturale e dalla variazione spaziale dei parametri idraulici.

E' riconosciuto che l'eterogeneità geologica esercita il maggior controllo sul comportamento di un serbatoio idrico sotterraneo e su molti altri aspetti che riguardano l'idrogeologia quantitativa come la calibrazione di modelli e la stima della ricarica. Essa è legata alla variazione delle dimensioni dei granuli, alla porosità, alla mineralogia, alle tessiture, alle proprietà meccaniche delle rocce, alla struttura e ai processi diagenetici. Tutti questi fattori provocano variazioni nelle conducibilità idraulica, nell'immagazzinamento e nella porosità e quindi controllano il flusso e il trasporto attraverso i sedimenti (Eaton, 2006).

Nel mondo scientifico esistono pareri contrastanti e dibattiti relativi all'utilità di introdurre l'eterogeneità dei parametri all'interno di un modello: si discute se sia un fattore fondamentale per poter catturare la complessità della natura, apportando dei miglioramenti nella capacità predittiva dei modelli e riducendone il grado di incertezza, (Gomez-Hernandez, 2006) o se invece ne aumenti la difficoltà e i tempi di risoluzione.

Il cosiddetto approccio tradizionale nel campo della calibrazione di modelli, per cui vige il principio di "parsimonia", sostiene che un

modello deve essere costruito nella maniera più semplice possibile, tenendo conto dei processi e delle caratteristiche del sistema, osservati in campo e rilevanti per l'aspetto predittivo del modello (Hill, 2006). Il sistema indagato viene, quindi, suddiviso in un ristretto numero di zone, caratterizzate da parametri con valori omogenei, definiti a priori dall'utente secondo conoscenze geologiche.

Al contrario chi sostiene la visione opposta (Doherty, 2003; Hunt et al., 2007) dimostra, invece, che l'introduzione della variabilità spaziale dei parametri di conducibilità idraulica e porosità produce dei miglioramenti più rilevanti nella calibrazione del modello rispetto all'approccio tradizionale.

L'eterogeneità geologica risulta un aspetto importante anche in modelli che simulano lo scambio tra fiume e acquifero (Fleckenstein et al., 2006) e ricopre un ruolo fondamentale nei modelli di trasporto, particolarmente sensibili ad essa (Scheib & Yabsaki, 1998): da questa dipende la dispersività, così come la forma del fronte e la propagazione del plume di un contaminante nell'acquifero. Capita spesso, infatti, che in modelli di trasporto si ometta di inserire i valori di dispersività, introducendo al loro posto l'eterogenea distribuzione dei valori di conducibilità idraulica (Feinstein, 2010).

3 Metodologia applicata

I modelli di flusso e di trasporto delle acque sotterranee dipendono dall'architettura stratigrafica, che a sua volta è governata da processi che controllano la distribuzione spaziale e temporale degli ambienti di deposizione e di alimentazione dei sedimenti (Edington & Poeter, 2006).

I metodi per determinare la distribuzione dei materiali e delle proprietà idrogeologiche ad essi associati sono molteplici, di seguito ne sono elencati alcuni esempi: la realizzazione e l'utilizzo di un simulatore di unità stratigrafiche (Edington & Poeter, 2006), l'individuazione di facies deposizionali o tessiturali tramite descrizioni di carote di terreno standard o interpretazioni geologiche dell'area, a cui associare valori di conducibilità idraulica in base a prove di portata o slug test (Fogg et al., 1998).

In altre circostanze vengono realizzati database in grado di archiviare qualsiasi tipo di informazione idrogeologica, derivante da investigazioni sul campo. Questi, in alcuni casi, possono fungere da supporto per la realizzazione di cartografie del sottosuolo e delle unità geologiche affioranti (Regione Emilia-Romagna, Banca dati geognostica 2000). In altri casi, invece, dall'analisi dei dati vengono prodotte distribuzioni statistiche delle proprietà geologiche e idrogeologiche, in base a classificazioni standard predefinite (Newell et al., 1991). La variabilità spaziale dei parametri idraulici può essere riprodotta anche con l'utilizzo di diverse tecniche geostatistiche (caso dei "pilot points" di Doherty, 2003), spesso lavorando con griglie di calcolo di milioni di celle (Fogg & Fleckenstein, 2008).

In questo panorama scientifico si inserisce la metodologia che viene sperimentata dal Gruppo di Idrogeologia del DISAT da qualche anno in aree e per scopi differenti tra loro (Bonomi, 1995; Bellini, 2006; Bonomi et al., 2006) e di cui il seguente dottorato ha sviluppato e implementato una parte, costituendo un altro esempio di caratterizzazione delle proprietà idrogeologiche. Essa consiste nella realizzazione di valutazioni quantitative delle caratteristiche tessiturali e idrogeologiche del sottosuolo, attraverso l'interpolazione di dati stratigrafici, archiviati in una specifica Banca Dati per pozzi; a partire da queste analisi viene in seguito sviluppato il modello idrogeologico di un acquifero medio costituito da depositi sciolti eterogenei.

Nello specifico il metodo di studio può essere suddiviso in 3 fasi principali:

1. raccolta dati, legati alle caratteristiche statiche (informazioni stratigrafiche) e/o a quelle dinamiche (misure piezometriche) del sistema idrogeologico, puntuali (pozzi per acqua) e/o spaziali (Modello Digitale del Terreno). E' una fase fondamentale nell'intero procedimento, deve perciò essere svolta in modo dettagliato e specifico, così come l'organizzazione e l'archiviazione, gestite attraverso l'uso di Banche Dati e Sistemi Informativi Territoriali. La qualità, quantità e densità dei dati, infatti, influenzano la validità dei risultati finali in qualsiasi progetto scientifico. In questa fase del lavoro ci si avvale dell'utilizzo di una Banca Dati (Tangram) appositamente realizzata dal Disat in collaborazione con il CNR-IDPA (Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali) di Milano (Bonomi et al., 1995);
2. ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche del sistema in esame: utilizzando una modellazione prima bidimensionale e poi tridimensionale, il sistema idrogeologico in esame viene riprodotto attraverso una griglia di calcolo, conforme alle dimensioni delle superfici limite (superficie topografica, base dell'acquifero, eventuali superfici deposizionali). La modalità e il dettaglio della discretizzazione delle griglia dipendono dalla tipologia dei processi deposizionali e degli eventi geologici che si vuole simulare e, anche, dalle esigenze dell'utente, determinate dagli scopi finali del progetto. La ricostruzione della distribuzione continua ed eterogenea delle proprietà tessiturali e dei parametri idraulici avviene attraverso interpolazione geostatistica dei dati puntuali stratigrafici all'interno della griglia 3D. Gli output di questa fase (riproduzione delle geometrie del sistema e della distribuzione di conducibilità idraulica e porosità efficace) sono gli input dell'ultima fase. Gli strumenti informatici utilizzati in questa parte del lavoro sono software di calcolo 2D come Surfer8, e 3D come Gocad, in grado di visualizzare, analizzare, elaborare e ricostruire corpi geologici;
3. realizzazione di un modello di flusso e trasporto nell'area di studio: tramite codici di calcolo che si basano su modelli matematici alle differenze finite, è possibile ricreare il flusso della falda nel sottosuolo e simulare il comportamento di eventuali contaminanti percolati nell'acquifero. A seguito di un'attenta calibrazione del modello, in cui le piezometrie simulate vengono confrontate con misure sul campo per determinarne la validità e

affidabilità, è possibile ottenere delle informazioni sul bilancio di massa del sistema e poterne stimare la potenzialità idrica. Nel caso dell'applicazione di un modello di trasporto è necessario raccogliere informazioni anche relative alle proprietà chimico-fisiche di sostanze, eventualmente percolate in falda, al fine di simularne l'interazione con l'acquifero (dispersione, trasporto, degradazione, ritardo). Per la realizzazione del modello matematico si utilizza il codice di calcolo alle differenze finite MODFLOW, sviluppato dal Servizio Geologico Americano (U.S. Geological Survey), che lavora anch'esso su una griglia tridimensionale regolare di celle. L'interfaccia grafica utilizzata è Groundwater Vistas 5.

Il procedimento appena descritto non ha un andamento unidirezionale, ma è soggetto ad un feedback iterativo continuo tra la fase di caratterizzazione idrogeologica (fase 2) e quella di modellizzazione di flusso e trasporto (fase 3) (Figura 3.1). Nella fase 2 vengono prodotti gli input per la fase 3 (geometrie del sistema e distribuzione di conducibilità idraulica e porosità efficace): il livello di dettaglio con cui è ricostruito tridimensionalmente l'intero sistema condiziona l'attività modellistica successiva e ne segna il grado di attendibilità. Ad esempio, un elevato dettaglio nella definizione dei parametri idraulici consente una migliore simulazione delle direzioni delle linee di flusso nello spazio e dell'evolversi dei pennacchi di contaminazione.

A sua volta, i risultati ricavati dalla simulazione di flusso o trasporto, a seguito dei processi di calibrazione e analisi di sensitività, indirettamente forniscono indicazioni sulla validità e rappresentatività dei parametri di input inseriti, di cui le caratteristiche idrogeologiche sono una parte importante. Il procedimento, quindi, dalla fase 3 torna alla fase 2 per la correzione di eventuali errori e la revisione di incertezze, secondo le indicazioni provenienti dalla fase 3. Si tratta di un circolo continuo: il processo si ripete secondo una serie di iterazioni circolari (si parla infatti di feedback iterativo) lungo il percorso tracciato nello schema di Figura 3.1, fino ad ottenere una simulazione del sistema acquifero e del suo comportamento idrodinamico che più si avvicina alla realtà del sottosuolo indagato, in funzione dei dati raccolti (statici e dinamici). Questi ultimi, infatti, normalmente non cambiano, si trovano al di fuori del processo di feedback; può capitare, però, il caso in cui, nonostante i cambiamenti effettuati, la simulazione non migliori, per scarsità, bassa densità o

limitata rappresentatività dei dati. In tal caso, è necessario intervenire anche su di essi, integrandone la raccolta.

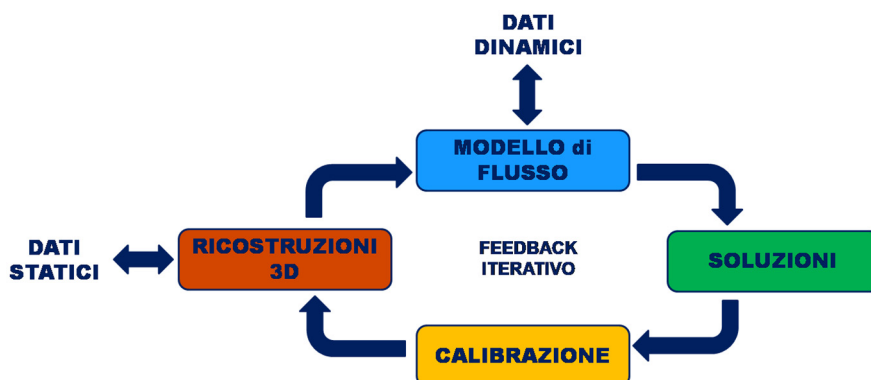


Figura 3.1 – Schematizzazione del processo di feedback iterativo che è alla base della metodologia applicata

Il presente dottorato si è concentrato sulle prime due fasi della metodologia di lavoro, occupandosi, in un caso (Figura 3.2), della ricostruzione delle caratteristiche statiche del sistema idrogeologico dell'area di bacino tra Ticino e Oglio, al fine di ricreare i parametri idraulici, fondamentali per l'applicazione di successivi modelli di flusso e/o trasporto. Infatti la conducibilità idraulica, che costituisce il volume di acqua gravifica che attraversa, nell'unità di tempo, l'unità di superficie di una sezione retta dell'acquifero, sotto l'effetto di un gradiente idraulico (Civita, 2005) e contribuisce al calcolo della Conduttanza, un fattore che rappresenta la facilità di infiltrazione della risorsa idrica attraverso un volume di materiale, ovvero la capacità dell'acqua di fluire da una cella all'altra, all'interno di un modello idrogeologico. In un modello di trasporto la porosità efficace, che rappresenta il rapporto fra i vuoti intercomunicanti e il volume totale di un mezzo, serve per calcolare la velocità advettiva, ossia la velocità di un contaminante trasportato dal flusso idrico sotterraneo (Feinstein, 2010).

Il procedimento di feedback si è realizzato tra l'attività del seguente dottorato e i risultati del modello di flusso a scala di bacino del progetto di dottorato della Dott.ssa Paola Canepa "*Il bilancio delle acque sotterranee nella pianura lombarda in relazione agli effetti del cambiamento climatico*" (Dottorato in Scienze Ambientali, XXIII ciclo).

Nell'altro caso (Figura 3.2), i risultati della fase 2 (la distribuzione della porosità efficace), combinati con le oscillazioni della falda nel tempo e nello spazio, sono serviti per la stima della disponibilità idrica nel sottosuolo delle province di Milano e di Monza e Brianza.

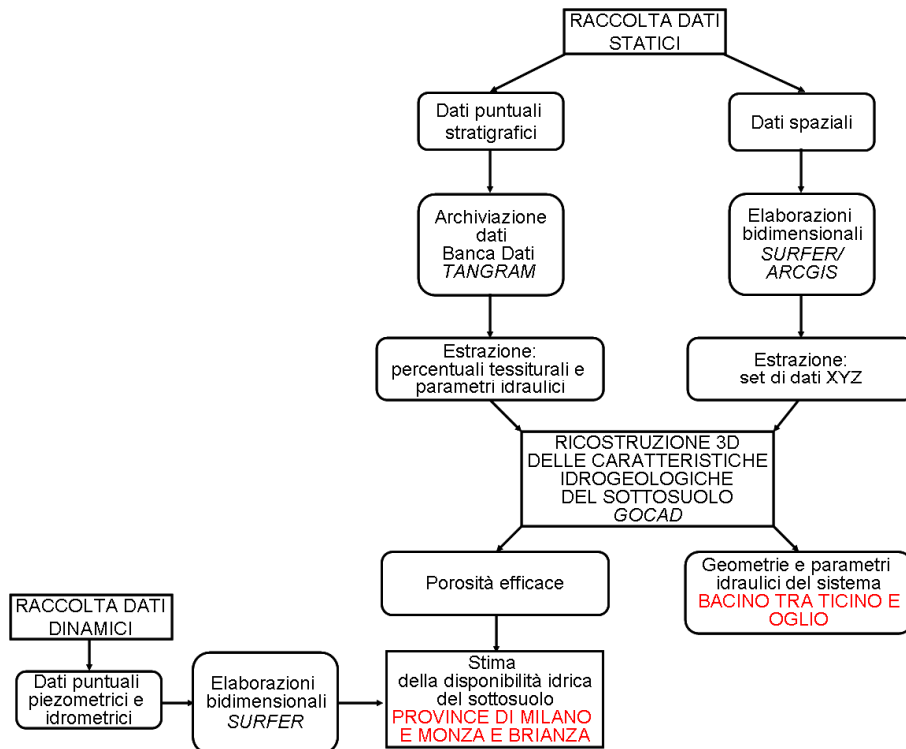


Figura 3.2 – Schematizzazione di dettaglio dell'attività svolta nel presente dottorato

4 Inquadramento dell'area di studio

Il metodo di studio, discusso nel capitolo precedente, è stato applicato alla regione Lombardia, situata nel settore nord-occidentale italiano, confinante a Nord con la Svizzera, ad Ovest con il Piemonte, ad Est con il Veneto e il Trentino-Alto Adige e a Sud con l'Emilia-Romagna. Il suo territorio regionale di 23'863 km² è distribuito in 12 province (Figura 4.1) ed è il più popoloso d'Italia con 9'866'104 abitanti (dati ISTAT). La superficie della Lombardia si divide tra una porzione pianeggiante (47%), una montana (41%) ed una collinare (12%). Il progetto di dottorato si è occupato di due zone del settore di pianura, secondo scale geografiche diverse (capitolo 3).

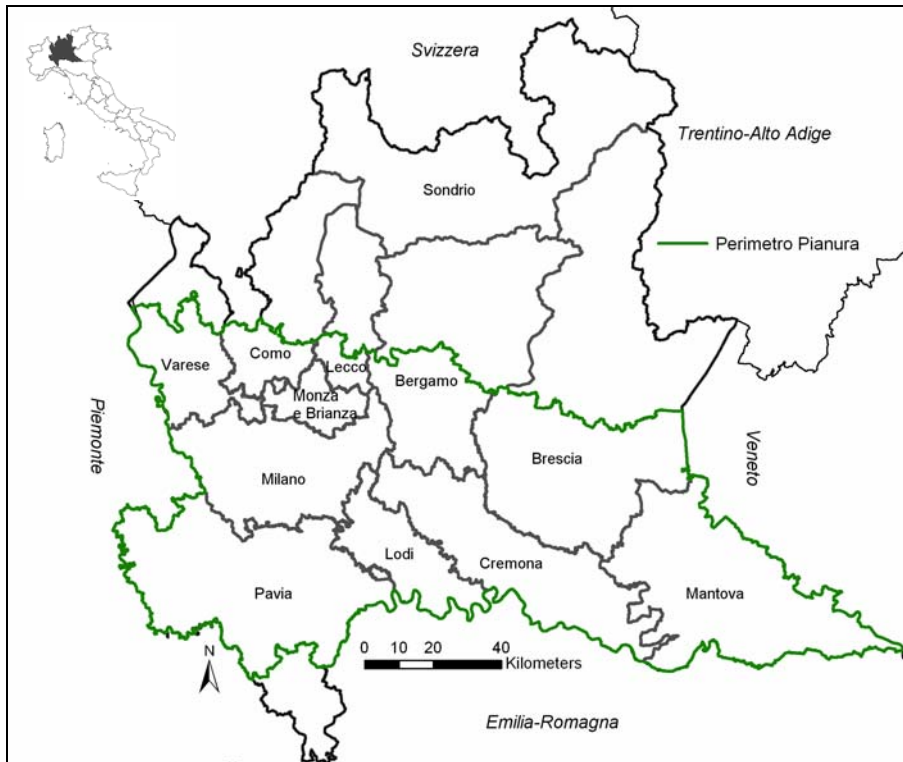


Figura 4.1 – Regione Lombardia: in grigio le 12 province e in verde il perimetro della pianura

4.1 Inquadramento geografico

La porzione pianeggiante della regione occupa un territorio di oltre 13'600 km², che degrada verso il Po e costituisce una porzione

rilevante della Pianura Padana. Oltre il 50% della pianura lombarda è caratterizzata dall'uso agricolo.

In pianura si trovano anche molti centri urbani, tra cui quello più grande e sviluppato corrispondente al comune di Milano, capoluogo di provincia e di regione.

Il clima è moderatamente continentale con inverni piuttosto freddi ed estati relativamente lunghe e calde. Durante l'anno, in primavera e in autunno si registrano i massimi di precipitazione, al contrario in inverno ed estate si verificano i due minimi. Altri elementi caratterizzanti sono la ventilazione scarsa, le nebbie autunnali e i frequenti temporali estivi (Regione Lombardia, PTUA – Rapporto Ambientale –VAS, 2006).

La regione, in generale, rappresenta una delle maggiori riserve idriche d'Europa, che, allo stesso tempo, risulta essere molto vulnerabile: per quanto riguarda le acque superficiali, il rischio deriva dall'intensa e diffusa presenza di attività industriali che spesso usano l'acqua dei corpi idrici superficiali per i processi di lavorazione, compromettendone la qualità; per quanto riguarda le acque sotterranee il rischio di contaminazione deriva sempre da attività antropiche ed è facilitato dall'elevata permeabilità dei depositi superficiali che favoriscono, soprattutto vicino alle pre-Alpi, una ricarica veloce e diretta della falda e quindi la percolazione di eventuali sostanze inquinanti.

In base alla tipologia di captazione la risorsa idrica utilizzata in Lombardia proviene per il 93.2% da derivazione da acque superficiali e fontanili, per il 6.42% da pozzi e per 0.37% da sorgenti (dati del Catasto dell'utenze Idriche, 2003. Regione Lombardia, PTUA, Allegato 5, 2006). In particolare l'acqua utilizzata per la produzione di energia elettrica deriva in totale dai corpi superficiali; l'acqua ad uso civile (potabile, igienico sanitario e assimilati quali antincendio e zootecnico) proviene principalmente da prelievi da pozzi, in piccola parte da derivazioni e sorgenti. La fonte principale per le irrigazioni sono le derivazioni da acque superficiali e da fontanili, in percentuale minore viene utilizzata l'acqua sotterranea. Anche per l'uso industriale e per la piscicoltura vengono sfruttate soprattutto le acque superficiali.

Esiste una fitta rete idrografica, caratterizzata dalla presenza di corsi d'acqua naturali e artificiali (canali e rogge), e da numerosi fontanili.

La pianura fa parte del bacino idrografico del fiume Po, di cui sono corsi d'acqua di secondo ordine in sinistra idrografica i fiumi: Agogna, Ticino, Olona meridionale, Lambro, Adda, Oglio, Mincio; in destra idrografica si ritrovano i fiumi: Staffora e Secchia. In sinistra idrografica sono fiumi di terzo ordine di rilievo anche l'Olona-Lambro meridionale (affluente Lambro), il Brembo e il Serio (affluenti Adda), il Mella e il Chiese (affluenti Oglio), come si può vedere in Figura 4.2.

La maggior parte dei fiumi ha origine dalle Alpi e scende ad alimentare i grandi laghi e il Po lungo la sua sponda sinistra. I loro bacini idrografici hanno un tratto alpino che nella maggior parte dei casi ha orientamento prevalente da Nord a Sud, con l'eccezione dell'Adda sopralacuale che ha orientamento Est-Ovest, e poi un tratto vallivo con orientamento Nord-SudEst.

I fiumi più importanti della regione, oltre al Po, sono quelli che defluiscono dai grandi laghi: Ticino, Adda, Oglio, Chiese e Mincio. Questi ultimi sono caratterizzati da un regime stabile dei deflussi. Altri corsi d'acqua, quali i fiumi Olona, Lambro, Brembo, Serio, Mella e Cherio, hanno regime unicamente torrentizio, alla stregua di quelli di provenienza appenninica, come lo Staffora.

Questo complesso sistema naturale ha subito nel corso del tempo consistenti interventi di trasformazione e di sistemazione idraulica, volti soprattutto a regimare il flusso delle acque fluviali e a garantire l'irrigazione in agricoltura, che ne hanno alterato le caratteristiche morfologiche naturali e hanno condotto ad un livello di artificializzazione piuttosto intenso. Il reticolo artificiale è strettamente integrato e interagente con quello naturale. I canali, alcuni dei quali navigabili, costituiscono una rete fittissima lunga circa 9.425 km, realizzata per regolamentare le acque fluviali e irrigare le coltivazioni (Regione Lombardia, PTUA – Rapporto Ambientale –VAS, 2006). In particolare, nei bacini di pianura sublacuali (come Ticino, Mincio, Adda e Oglio), l'uso prevalente è quello irriguo, che dalla tarda primavera all'inizio dell'autunno può ridurre anche significativamente le portate naturali del corso d'acqua a valle della derivazione (Regione Lombardia, PTUA – Relazione Generale, 2006). Tra i canali principali il Naviglio Grande e il Villoresi prendono acqua dal fiume Ticino; la Martesa, la Muzza e il canale Vacchelli acquisiscono acqua dal fiume Adda (Figura 4.2).

La falda superficiale emerge naturalmente e divide la pianura in alta e bassa: questo fenomeno è chiamato risorgive o fontanili (Figura 4.2). Cavallin et al. (1983) individuano come causa una concomitanza

di fattori: variazioni granulometriche, si passa infatti da una zona con depositi grossolani ad alta permeabilità, ad un'altra con depositi più fini con conseguente diminuzione di permeabilità, diminuzione del gradiente topografico della superficie e del gradiente idraulico, alimentazione da parte dei canali irrigui, maggiore infiltrazione a causa della minore urbanizzazione e minore infiltrazione per la diminuzione della granulometria dei sedimenti, presenza di paleoalvei a granulometria maggiore. La linea lungo cui si sviluppano i fontanili dipende dalla soggiacenza della falda a piccole profondità; per questo motivo le oscillazioni dovute all'attività umana possono provocare delle variazioni di ubicazione: si sposta verso Nord delle aree in cui vi è un'alimentazione artificiale legata all'irrigazione delle rogge e si sposta verso Sud quando l'emungimento da pozzi provoca un cono di depressione, come nell'area milanese.

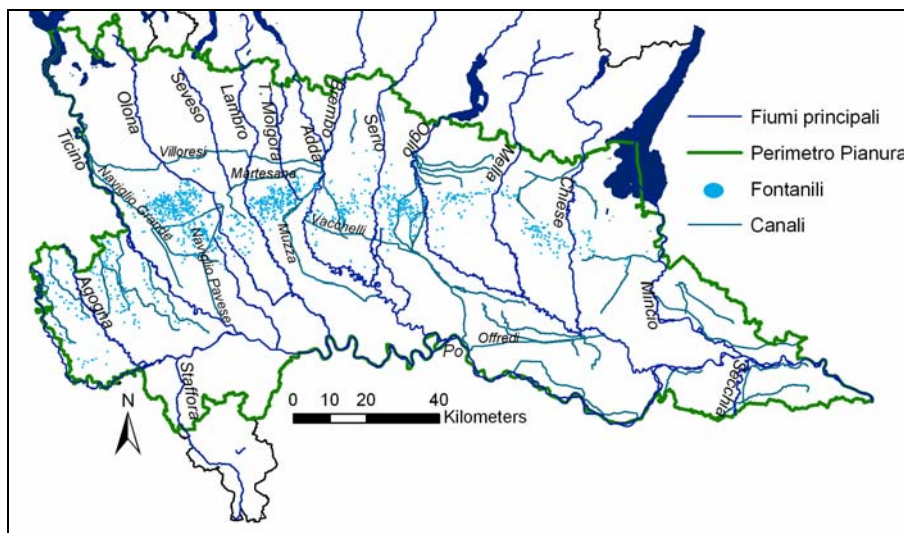


Figura 4.2 – Idrografia principale nella pianura lombarda

4.2 Inquadramento geomorfologico

L'evoluzione della Pianura Padana, di cui quella lombarda è una porzione importante, è legata allo sviluppo della catena alpina prima e di quella appenninica nella fase successiva, rappresentando, all'inizio, l'avanfossa del sistema alpino, e poi di quello appenninico. Questa avanfossa presenta un profilo asimmetrico con minore inclinazione del lato settentrionale rispetto a quello meridionale, dove,

in prossimità del margine appenninico, si raggiungono le profondità maggiori (7000-7500 m circa).

Dal Pliocene ad oggi questa depressione è stata progressivamente colmata dalla deposizione di sedimenti in parte marini ed in parte continentali di notevole spessore, denotando una subsidenza accentuata.

L'evoluzione plio - quaternaria può essere, così, sintetizzata dividendola in tre fasi:

- fase del ritiro del mare e della sedimentazione di depositi continentali fluvio - lacustri, deltizi e di pianura costiera (Pliocene superiore – Pleistocene inferiore) su parte della pianura;
- fase glaciale, comprende diverse fasi di crisi glaciale (Pleistocene);
- fase postglaciale, di sedimentazione alluvionale e di erosione (Olocene).

Sembra certo che il sollevamento della pianura iniziò dal Piemonte occidentale già nel Pliocene superiore e si estese gradualmente e con minore intensità alla Lombardia (Regione Lombardia, 2001)

Nel Pleistocene Superiore – Olocene si sarebbe avuto il lento innalzamento della pianura lombarda, testimoniato dalla presenza di terrazzi nei depositi fluvio-glaciali e alluvionali più antichi. Tale innalzamento non sarebbe stato uniforme nell'area. Infatti in corrispondenza dell'area di Milano vi sarebbe una depressione con degli alti a Nord e a Sud. La mancanza di terrazzi in corrispondenza dell'area milanese nonché la convergenza della rete idrografica e il maggior spessore dei depositi grossolani fanno propendere per una zona subsidente rispetto a quelle circostanti (Cavalli et al., 1983) Le variazioni climatiche che hanno interessato la deglaciazione hanno prodotto cambiamenti nelle caratteristiche idrodinamiche dei principali fiumi della pianura, passando da una fase di aggradazione ad una fortemente erosiva da parte dei fiumi. Durante l'ultimo massimo glaciale, infatti, le condizioni ambientali favorirono l'instaurarsi di grandi portate sia solide che liquide. Nella aree alpine l'estesa superficie dei ghiacci limitava l'evapotraspirazione e la presenza di suolo ghiacciato impediva l'infiltrazione; di conseguenza la quasi totalità delle precipitazioni veniva concentrata alla chiusura dei bacini (agli scaricatori fluvioglaciali). Inoltre le azioni dei ghiacciai facilitarono la presenza di sedimenti trasportabili dalle acque superficiali. Tutte queste caratteristiche produssero la formazione di potenti superfici di aggradazione, tra cui ciò che viene definito il "livello fondamentale

della Pianura". Successivamente a questa fase, dall'ultima glaciazione, l'evoluzione geomorfologica è rappresentata principalmente da eventi di erosione fluviale, che hanno generato l'incisione dei depositi di conoide tardo-pleistocenica. Si può quindi affermare che il "livello fondamentale della Pianura" testimonia l'arresto di ogni fase di aggradazione fluviale su di essa; a piccola scala si tratta, infatti, di una forma non attiva (Marchetti M., 1996). Inoltre, rappresenta un importante limite cronologico: identifica la transizione tra i periodi glaciali (Pleistocene) e i cicli erosivi post-glaciali (Olocene), quest'ultimi corrispondono al periodo compreso tra la fine della glaciazione e i giorni nostri.

Il "livello fondamentale della Pianura" costituisce la maggior parte della pianura lombarda, si è formato per colmamento alluvionale durante l'ultima glaciazione; è debolmente inclinato da Nord-Ovest a Sud-Est e si inserisce tra la fascia delle conoidi pedemontane e le aree depresse bonificate della valle del fiume Po (Figura 4.3).

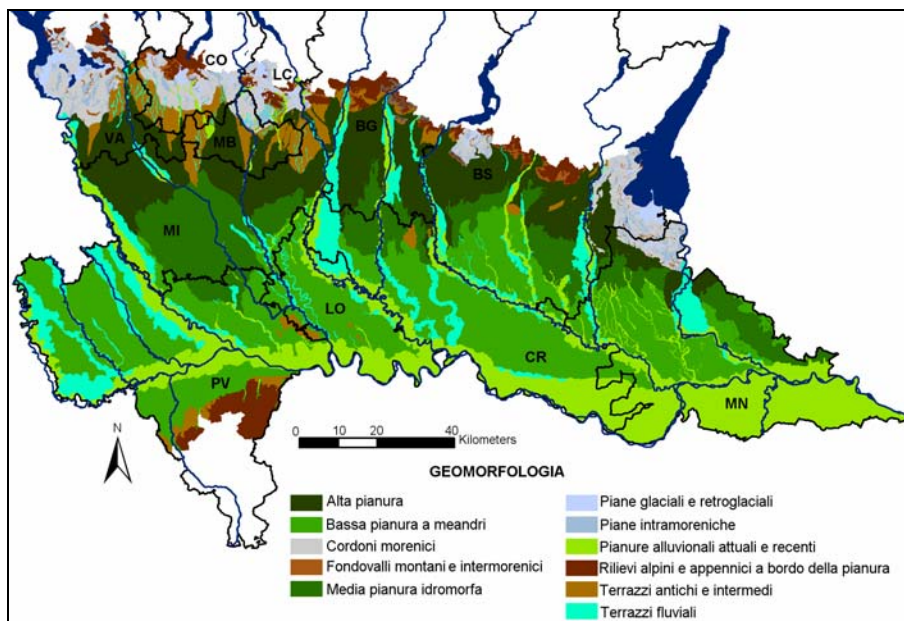


Figura 4.3 – Carta della geomorfologia della pianura lombarda

Esso è caratterizzato da forme al suo stesso livello: convesse in rilievo su di esso e concave, incise. Non è più interessato da idrografia principale: i fiumi attuali scorrono, infatti, entro larghe valli incassate in esso, occupandone spesso una porzione estremamente ridotta; il loro andamento è meandriforme, in contrasto con i fiumi

presenti in epoche antiche, costituiti, invece, da canali multipli intrecciati a basso indice di sinuosità. Nel livello fondamentale si ritrovano tracce dell'idrografia abbandonata che testimonia portate ben maggiori di quelle attuali (Marchetti M., 1990). Si tratta dei cosiddetti paleoalvei: questi costituiscono antichi percorsi fluviali attualmente abbandonati, che si trovano anche a discrete distanze rispetto ai corsi attuali, come ad esempio per il caso del fiume Adda (Beretta et al., 1992)

Il livello fondamentale è legato a monte con i ripiani altimetricamente più elevati della pianura, i terrazzi a "ferretto" che si raccordano più a Nord con le cerchie moreniche.

4.3 Inquadramento geologico

L'inquadramento geologico concerne i rapporti stratigrafici e geometrici dei corpi rocciosi affioranti e del sottosuolo.

In corrispondenza del limite settentrionale della pianura e della fascia prealpina, in alcune zone affiora il substrato indifferenziato che comprende varie formazioni sedimentarie e cristalline con età dal Paleozoico al Terziario. Le unità più esterne (Gonfolite e Flysch) hanno una bassa o scarsa permeabilità e impediscono l'alimentazione dei potenziali acquiferi sottostanti. E' possibile una ricarica lungo faglie e/o fratture (Cavallin et al., 1983). La serie dei depositi che costituisce il complesso degli acquiferi lombardi inizia con i terreni tipici di un'unità nota in letteratura come "Villafranchiano". Tali depositi sono costituiti da sedimenti continentali fini (prevalgono i limi, ma sono comuni anche le sabbie fini e le argille, e sono molto frequenti le torbe, che indicano un ambiente di sedimentazione in acque ferme). Lo spessore di questa unità, che verso il basso fa passaggio molto graduale ai sedimenti marini pliocenici o quaternari (sabbie fini, limi e argille) può essere anche superiore ai 100 m. I depositi di questa importante unità costituiscono la base su cui giacciono i più permeabili depositi fluvioglaciali e alluvionali.

L'unità "villafranchiana" è stata sottoposta ad un chiaro sollevamento dopo la sua deposizione; nel corso di questa fase la sua parte superiore venne erosa e profondamente incisa; nei solchi vallivi così creati si vennero a deporsi ghiaie e sabbie di grande spessore, che nella Lombardia a Est del fiume Seveso e già in parte nella valle del Fiume Olona, sono frequentemente cementate. A seguito di questi fenomeni, il "tetto" dei sedimenti villafranchiani si

presenta molto irregolare e i depositi sono discontinui su grandi distanze.

L'unità è ricoperta da un più o meno marcato spessore di depositi grossolani, che sono sottili nelle fasce pedemontane lontane dalle aree di maggiore sedimentazione alluvionale, e molto spessi (anche 100 m) al centro della pianura, cui seguono dei conglomerati che possono avere anch'essi grande spessore; valore molto elevato della potenza di questa successiva unità si sono riscontrati in diverse località, in particolare nella provincia di Como, dove si osservano anche 60 m di spessore di conglomerati; a questa unità è attribuito il nome di "Ceppo Lombardo". Essa si trova lungo le incisioni dei principali fiumi ed è costituita da arenarie e conglomerati da poco a molto cementati. Importante è la permeabilità secondaria che presenta e di conseguenza, dove affiora, il "Ceppo" risulta esserci un potenziale acquifero, alimentato dalle acque superficiali provenienti dagli apparati morenici. Anche questa unità mostra chiare tracce di sollevamento, ed è in molti affioramenti fortemente inclinata, in particolare lungo i bordi prealpini (Regione Lombardia, 2001).

Nell'alta pianura, appoggiati sopra il "Ceppo", si trovano i depositi glaciali che costituiscono gli apparati morenici e che formano le cerchie moreniche. Litologicamente sono estremamente eterogenei e si ritrovano elementi dalle dimensioni dei blocchi fino a quelli delle argille. La matrice limosa è abbondante per cui la loro permeabilità è da bassa a scarsa, salvo locali variazioni (Cavallin et al., 1983).

I successivi episodi glaciali, convenzionalmente raggruppati in diverse fasi, sono caratterizzati dalla deposizione di una vasta coltre di sedimenti fluvioglaciali e sedimenti alluvionali legati alla presenza di un ghiacciaio in fase di ritiro.

Dai ghiacciai usciva, infatti, una massa idrica notevole, capace di trasportare e di deporre in pianura grandi quantità di sedimenti; sui sedimenti della parte alta della pianura fluvioglaciale vennero deposte le morene frontali di diverse fasi glaciali.

I sedimenti depositi da un primo avanzamento del ghiacciaio venivano successivamente sottoposti ad un processo di erosione da parte delle fiumane che erano collegate con il successivo evento glaciale, durante il quale venne risparmiata una parte della pianura fluvioglaciale precedente. Essa ora affiora in lembi concentrati sugli altipiani terrazzati della zona pedemontana, definiti depositi terrazzi a "ferretto": superficialmente sono alterati e i prodotti di questo processo (ferretto) di colore rossastro hanno spessore variabile da 2

a 8 m. Litologicamente sono costituiti da elementi arrotondati con diametro variabile e mediamente inferiore a 10 cm. E' presente una matrice sabbioso-argillosa.

I depositi fluvioglaciali e alluvionali sono tendenzialmente molto grossolani nella alta e media pianura. Nella zona assiale della pianura, essi sono ovunque sabbioso-limosi, con rare lenti di ghiaia. Costituiscono l'estesa superficie del "livello fondamentale della pianura". Da un punto di vista tessiturale si possono distinguere da Nord verso Sud delle fasce a granulometria decrescente, così definite da Cavalli et al. (1983):

- zone a ghiaie prevalenti, gli elementi prevalenti sono costituiti da ciottoli grossolani fino a ghiaie fini mescolati a sabbie, decisamente subordinate;
- zone a ghiaie e sabbie, la percentuale di sabbia aumenta, a causa dell'azione dei fiumi che formarono la pianura per aggradazione verticale e laterale, con diminuzione di energia verso Sud;
- zone a sabbia prevalente, le sabbie sono la quasi totalità dei sedimenti. Esistono livelli ghiaiosi, subordinati in spessore ed estensione;
- zone ad argille prevalenti, formano corpi potenti, attribuibili alla formazione di conche palustri o all'esondazione con depositi di materiali fini.

Nella parte sommitale della serie dei depositi si trovano le alluvioni recenti e attuali: sono materiali che presenti negli attuali alvei dei fiumi che formano la rete idrografica; sono costituiti da ghiaie prevalenti nella porzione settentrionale e passano a termini più fini nel settore meridionale. In base alle loro caratteristiche granulometriche possono essere fonte di alimentazione degli acquiferi sottostanti.

Un elemento geologico di grande interesse è rappresentato dagli antichi alvei fluviali che sono stati successivamente ricoperti da sedimenti glaciali o di altro tipo e da essi nascosti, così da essere o del tutto scomparsi o molto modificati. Gli antichi alvei risultano spesso riempiti da sedimenti molto permeabili, quali ghiaie e sabbie, aspetto che contrasta nettamente con la litologia delle aree adiacenti in cui il fiume aveva scavato il proprio letto senza deporvi sedimenti grossolani. Per questo motivo costituiscono la via preferenziale della circolazione idrica sotterranea. Nella zona occidentale il paleoalveo principale è quello del fiume Ticino, i cui sedimenti si ritrovano nel sottosuolo milanese. A Est del fiume Olona è presente un marcato

paleoalveo di questo corso d'acqua, che confluisce con uno analogo del fiume Lambro determinando un avvallamento particolarmente esteso fra Olona e Adda. L'antico alveo del Lambro, caratterizzato da una buona permeabilità e trasmissività dell'acquifero, risulta spostato in posizione più occidentale rispetto all'attuale, e non è escluso che formasse una struttura unica con il paleoalveo del Seveso. Fra Lambro e Adda si osservano altre depressioni, che corrispondono ad antichi alvei del torrente Molgora (Figura 4.2) e del fiume Adda. Il paleoalveo di quest'ultimo non risulta, in effetti, ben identificabile, salvo che nella zona di confluenza con il F.Serio poco a monte di Pizzighettone, anche per gli effetti di una neotettonica particolarmente attiva in questo settore (Regione Lombardia, 2001)

4.4 Inquadramento idrogeologico

La descrizione delle caratteristiche idrogeologiche del sottosuolo della pianura segue lo schema riportato in Figura 4.4. Secondo Martinis & Mazzarella (1971) il sottosuolo può essere suddiviso, dal basso verso l'alto, in acquiferi profondi, costituiti dai livelli permeabili presenti all'interno dei depositi continentali (Villafranchiani) del Pleistocene inferiore, e in un acquifero tradizionale comunemente sfruttato dai pozzi pubblici, costituito da depositi fluvio-glaciali del Wurm, Riss e Mindel Auct. e da depositi del Ceppo Auct. (Francani & Pozzi, 1951). La base di tale acquifero è generalmente definita dai depositi superficiali Villafranchiani. L'acquifero tradizionale, secondo Francani & Pozzi corrisponde al I acquifero e II acquifero e, secondo Regione Lombardia & Eni-Divisione Agip (2002), è identificato, da due Unità Idrostratigrafiche: i Gruppi Acquiferi A e B.

4 Inquadramento dell'area di studio

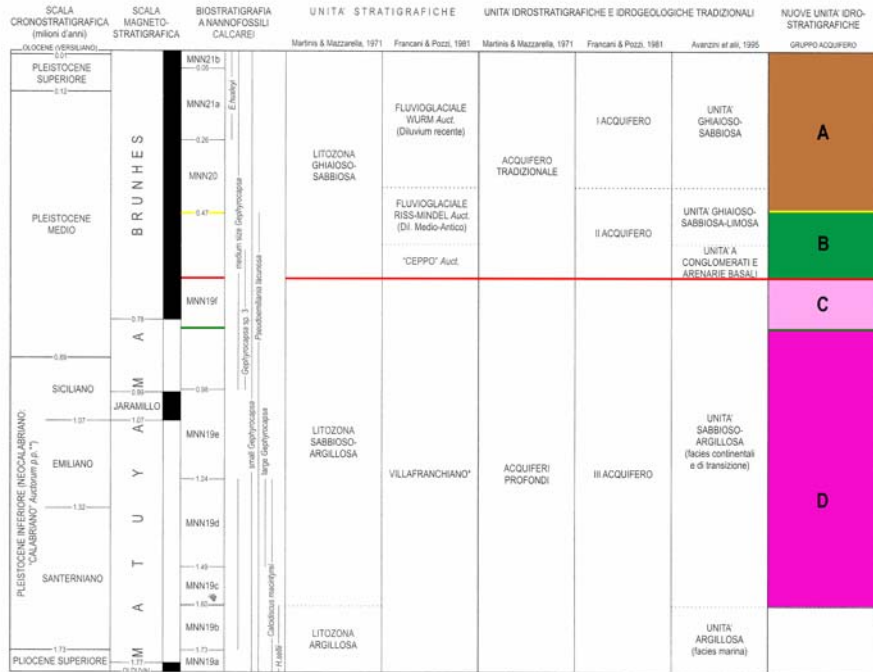


Figura 4.4 - Schema dei rapporti stratigrafici tra Gruppi Acquiferi (*Geologia degli Acquiferi Padani della Regione Lombardia – Relazione tecnica*. Regione Lombardia e Eni-Divisione Agip, 2002)

Gli acquiferi profondi sono costituiti da livelli argillosi anche molto spessi e continui ai quali sono intercalati lenti e banchi di ghiaie e sabbie. I depositi Villafranchiani, separati da livelli poco permeabili da quelli soprastanti, contengono falde in pressione che ricevono alimentazione dagli altri acquiferi dove l'erosione ha intagliato i livelli argillosi, permettendo il contatto fra gli acquiferi Villafranchiani e quelli superiori. In alcune aree questi acquiferi sono molto produttivi (per esempio fra Olona e Ticino); essi costituiscono una riserva interessante. La trasmissività di questi depositi è generalmente di un ordine di grandezza inferiore a quello degli acquiferi soprastanti.

Dal punto di vista strutturale e a scala regionale, l'acquifero tradizionale può essere definito come un sistema "monostrato", costituito da depositi fluviali e fluvioglaciali, formati durante il Quaternario: si tratta di un'alternanza di strati ghiaiosi, sabbiosi-ghiaiosi, sabbiosi, siltosi e argillosi. Esso assume caratteristiche diverse nella alta (a Nord) e nella bassa pianura (a Sud).

Nella parte Nord della pianura è presente una sola falda libera (una sola unità ghiaioso-sabbiosa), mentre nella parte a Sud si

trovano due unità ghiaioso-sabbiose separate da livelli limoso-argillosi, discontinui nella parte mediana della pianura e più continui nella parte meridionale, dove si vengono così a creare una falda libera superiore e una confinata più profonda. Infatti, in quest'ultime due porzioni della pianura, il corpo acquifero "tradizionale" viene comunemente distinto un acquifero freatico superficiale ed uno semiconfinato/confinato sottostante; si parla, perciò, di "monostrato compartimentato".

Le falde libere sono contenute entro sedimenti ghiaioso-sabbiosi con scarse lenti argillose di ridotte dimensioni, attribuibili alla sedimentazione dei corsi d'acqua attuali e di quelli wurmiani. Anche i depositi glaciali (morene) ospitano falde libere, che, a differenza di quelle nominate sopra, sono di scarso interesse per la loro ridotta produttività. Esse, però, grazie alla loro buona estensione, consentono l'assorbimento di una notevole riserva che viene trasmessa agli acquiferi contenuti nei depositi alluvionali sottostanti, al limite dell'area pedemontana. Per questo motivo ne va considerato il ruolo idrologico.

Le falde semiconfinite/confinite scorrono per lo più all'interno dei depositi fluvioglaciali più antichi e del Ceppo, nei quali sono presenti diaframmi argillosi più estesi e spessi, capaci di produrre qualche differenza di livello piezometrico con la falda libera contenuta nei depositi wurmiani; la superficie di separazione fra acquiferi liberi e semiconfinati/confinati corrisponde quindi quasi sempre al contatto fra depositi wurmiani e sedimenti più antichi (Regione Lombardia, 2001).

Secondo la suddivisione di Avanzini et al. (1985, Figura 4.4), partendo dal piano campagna e proseguendo in profondità si incontra per prima l'Unità ghiaioso-sabbiosa: essa è costituita da ghiaie e sabbie prevalenti con rare lenti di argilla che aumentano a Sud creando falde confinate o semiconfinite vicino alla superficie. La permeabilità, in generale, è molto elevata e consente la ricarica dell'acquifero tramite l'infiltrazione superficiale delle acque meteoriche e di quelle provenienti dai corsi d'acqua superficiali e dai canali artificiali. Al di sotto di essa si trova l'Unità ghiaioso-sabbioso-limosa e conglomeratica, costituita da ghiaie e sabbie immerse in una matrice limoso-argillosa. I conglomerati sono molto più frequenti nel settore orientale e settentrionale dell'area di studio e le caratteristiche idrauliche variano in base al loro grado di cementazione e fratturazione. Successivamente è presente l'Unità sabbioso-argillosa, composta da depositi villafranchiani, argille e limi con orizzonti torbosi

e intercalazioni sabbiose, talora ghiaiose e conglomeratiche. Questa unità è sede di falde profonde, confinate, di limitata produttività, è invece assente nel settore pedemontano. Alla base del sottosuolo dell'area di studio si ritrova l'Unità argillosa: argille prevalenti di colore grigio-azzurro con fossili e intercalazioni di modesti livelli sabbiosi.

La ricarica dell'acquifero avviene attraverso percolazione delle acque meteoriche, delle acque irrigue, per drenaggio dai corpi superficiali e da falde più a monte; dipende dalla permeabilità del terreno e dall'uso del suolo, si realizza, quindi, in maniera differenziata nei diversi settori.

Nell'alta pianura si registra un'infiltrazione delle precipitazioni di anche il 25-30% del totale annuo; nelle aree irrigue, principalmente nella bassa pianura, la falda è alimentata dalle perdite dei canali, circa il 50% dell'acqua fornita al terreno, che non viene utilizzata dalle colture e rifluisce nel reticolo scolante o percola nelle falde sotterranee. Nella parte centrale della pianura le falde in pressione sono in parte rialimentate per fenomeni di drenanza attraverso acquitardi semipermeabili.

I terreni che ospitano le falde superficiali svolgono la funzione di ricevere direttamente l'alimentazione, che viene poi trasmessa alle falde semiconfinite, attraverso le piogge, i corsi d'acqua e le irrigazioni.

Nella media pianura, l'ispessimento dei livelli argillosi-limosi contenuti nei depositi fluvioglaciali, prevalentemente in quelli più antichi, annulla o limita in modo molto rilevante il trasferimento di acque dalla prima falda agli acquiferi semiconfinati. Proseguendo verso Sud e approfondendosi la continuità laterale e lo spessore degli acquicludi e degli acquitardi aumenta, incrementando la separazione e il confinamento delle falde più profonde da quelle superficiali.

In base a questi elementi e alla permeabilità degli strati superficiali, il Piano di Tutela e Uso delle acque (Regione Lombardia, 2006) individua quattro differenti aree:

a) area a monte della fascia delle risorgive (Figura 4.2), dove l'acquifero è praticamente ininterrotto da livelli poco permeabili e corrisponde alle alluvioni oloceniche e ai sedimenti fluvioglaciali wurmiani. In questa porzione della pianura l'infiltrazione da piogge, nevi e irrigazioni, permette la ricarica della falda libera, tramite la quale può pervenire nella zona delle falde semiconfinite;

b) area di non infiltrazione alle falde, costituita dalle aree in cui affiora la roccia impermeabile o dove è presente una copertura

argillosa (depositi fluvioglaciali del Pleistocene medio e antico e Villafranchiano);

c) zone ad alimentazione mista, in cui le falde superficiali sono alimentate da infiltrazioni locali, ma non trasmettono tale afflusso alle falde più profonde, dalle quali sono separate da diaframmi poco permeabili. Quest'area corrisponde alla massima parte della pianura, soprattutto alla bassa pianura dove i livelli argillosi-limosi si ispessiscono e aumentano il confinamento delle falde più profonde;

d) zona di interscambio tra falde superficiali e profonde in prossimità di alcuni corsi d'acqua e soprattutto del Fiume Po. Si verifica anche, come ad esempio in prossimità del Fiume Ticino, che il fiume eserciti una forte azione drenante sulla falda superficiale, provocando un interscambio d'acqua tra falde in senso contrario, ovvero da quella più profonda a quella superficiale.

Per quanto riguarda il seguente progetto di dottorato, è stata indagata la porzione di sottosuolo relativa all'acquifero tradizionale, corrispondente ai Gruppi Acquiferi A e B (Regione Lombardia % Eni-Divisione Agip, 2002). L'indagine si è approfondita anche, per quanto riguarda l'alta pianura (in corrispondenza della zona mediana della provincia di Milano e meridionale della provincia di Bergamo), alla parte superiore del Gruppo Acquifero C, dove i depositi hanno caratteristiche simili a quelli dei Gruppi Acquiferi più recenti e sovrastanti.

Come accennato all'inizio del capitolo, la metodologia di studio è stata applicata a scale differenti, visualizzate in Figura 4.5:

- scala di bacino (perimetro fucsia), è compresa ad Ovest ed Est rispettivamente tra i fiumi Ticino e Adda. Il limite meridionale è il confine regionale, coincidente con il fiume Po; il limite settentrionale è stato tracciato in corrispondenza dell'affioramento del substrato roccioso e secondo i limiti idrologici di sottobacini superficiali;
- scala provinciale (poligono rosa chiaro, dal bordo marrone), corrisponde al territorio delle province di Milano (ad esclusione del comune di San Colombano al Lambro) e Monza e Brianza;
- scala locale (perimetri arancioni), 8 sottoaree individuate all'interno delle province di Milano e Monza e Brianza, in base alle caratteristiche geomorfologiche e alla tipologia di ricarica (una descrizione più dettagliata verrà fornita nel capitolo 8).

4 Inquadramento dell'area di studio

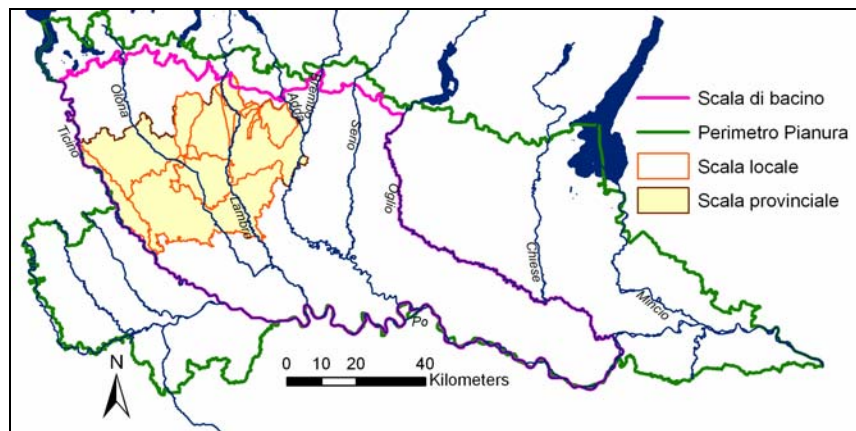


Figura 4.5 – Area di studio del progetto di dottorato. Sono evidenziate le differenti scale geografiche indagate

5 Raccolta, organizzazione e archiviazione dati

La prima fase della metodologia applicata (capitolo 3), è consistita nella raccolta, organizzazione e archiviazione di tutti quei dati necessari (in formato cartaceo e/o digitale) per l'elaborazioni successive, ovvero legati alle caratteristiche statiche (informazioni stratigrafiche) e/o a quelle dinamiche (misure piezometriche) del sistema idrogeologico, puntuali (pozzi per acqua) e/o spaziali (DTM). Inoltre sono state raccolte informazioni bibliografiche, fondamentali per l'inquadramento dell'area di studio, per la strutturazione e l'applicazione corretta dei processi, e per il confronto dei risultati con la reale conformazione del sottosuolo, al fine, anche, di valutare l'affidabilità del metodo sviluppato.

5.1 Dati puntuali statici

Si tratta dei dati relativi alle caratteristiche statiche del sistema acquifero in esame; in questo dottorato ci si è concentrati sulle informazioni stratigrafiche relative ai pozzi per acqua presenti nella pianura lombarda.

5.1.1 Raccolta dati puntuali statici

E' stata realizzata una raccolta sistematica di dati relativi a pozzi per acqua, provincia per provincia, principalmente presso le sedi delle amministrazioni provinciali, raccogliendo le numerose informazioni contenute nelle pratiche di concessione pozzi. Qualche dato è stato fornito da Arpa Lombardia, soprattutto per quanto riguarda la Rete regionale di Monitoraggio Quantitativa (paragrafo 5.2).

L'operazione è stata guidata da un duplice obiettivo: da un lato la realizzazione di un archivio dinamico e facilmente consultabile, relativo al censimento di tutti i pozzi presenti sul territorio, dall'altro la raccolta di tutti i dati stratigrafici reperibili, necessari alla ricostruzione delle caratteristiche idrogeologiche del sistema in esame. La raccolta è andata ad integrare l'impegnativa attività di reperimento dati eseguita per tesi di laurea e di dottorato precedenti, ma soprattutto per il progetto RICLIC, conclusosi nel dicembre 2008 (Rapporto finale del progetto RICLI-WARM, 2009), a cui si è attivamente contribuito.

Il lavoro risulta essere completo per solo 9 delle 12 province della pianura lombarda: Varese, Como, Lecco, Bergamo, Milano, Monza e

Brianza (dato che al momento della raccolta la provincia non era ancora stata istituita, i pozzi ricadono ancora nella vecchia provincia di Milano e per praticità, all'interno della tesi, la provincia di Monza e Brianza verrà sempre assimilata ad essa), Lodi, Cremona e Brescia (progetto terminato a metà 2010). Per quanto riguarda Pavia, il censimento è stato concluso solo nel settore in sponda sinistra del Ticino, il Pavese; nell'Oltrepo, nella Lomellina, come in provincia di Sondrio e Mantova sono state avviate o verranno a breve intraprese delle collaborazioni con gli enti pubblici per ultimare la raccolta nell'intera regione.

5.1.2 Archiviazione dati puntuali statici

I dati sopra menzionati sono stati archiviati in una Banca Dati idrogeologica, Tangram, appositamente realizzata dal Disat, in collaborazione con il CNR-IDPA di Milano (Bonomi et al., 1995). Il database da febbraio 2008 è online (www.tangram.samit.unimib.it); una descrizione più dettagliata delle caratteristiche del software e del suo funzionamento è riportata nel paragrafo 9.1. La Banca Dati contiene in totale 34718 pozzi, di cui 31238 in Lombardia. Il seguente dottorato si è, però, focalizzato solo sulle province di Varese, Como, Lecco, Bergamo, Milano, Lodi, Cremona e il Pavese, comprese tra Ticino e Oglio, per un totale di 21523 pozzi (Tabella 5.1), di cui più della metà si trovano nelle province di Milano, Bergamo e Lodi, come mostra l'immagine Figura 5.1. L' 11.4% si trova a Varese; le informazioni della provincia di Cremona (4.85%) sono state scaricate dal sito ufficiale della Provincia (www.atlanteambientale.it) e sono aggiornate al 2009. Per quanto riguarda Pavia, i dati inseriti sono relativi alla sola zona del Pavese, in sponda sinistra del Po.

I 21523 pozzi sono suddivisi in 4'656 pubblici e 16867 privati. Circa il 43.6% (9178) del totale ha la stratigrafia e circa il 77% (16583) possiede informazioni relative alle coordinate geografiche; di questi 8429 hanno la stratigrafia (Tabella 5.1).

Province	Pozzi archiviati	Pozzi Pubblici	Pozzi Privati	Pozzi con stratigrafia	Pozzi georeferenziati	Pozzi georeferenziati con stratigrafia
Bergamo	3836	519	3317	1755	2152	1242
Como	1134	464	670	669	1117	659
Cremona	1043	278	765	542	980	479
Lecco	372	172	200	217	320	207
Lodi	4368	219	4149	414	3437	528
Milano	7617	2106	5511	3705	5607	3493
Pavia	703	161	542	310	600	302
Varese	2450	737	1713	1566	2370	1519
TOTALE	21523	4656	16867	9178	16583	8429

Tabella 5.1 – Riepilogo dei pozzi inseriti in Tangram relativamente alle 8 province ubicate nell'area di bacino Ticino-Oglio

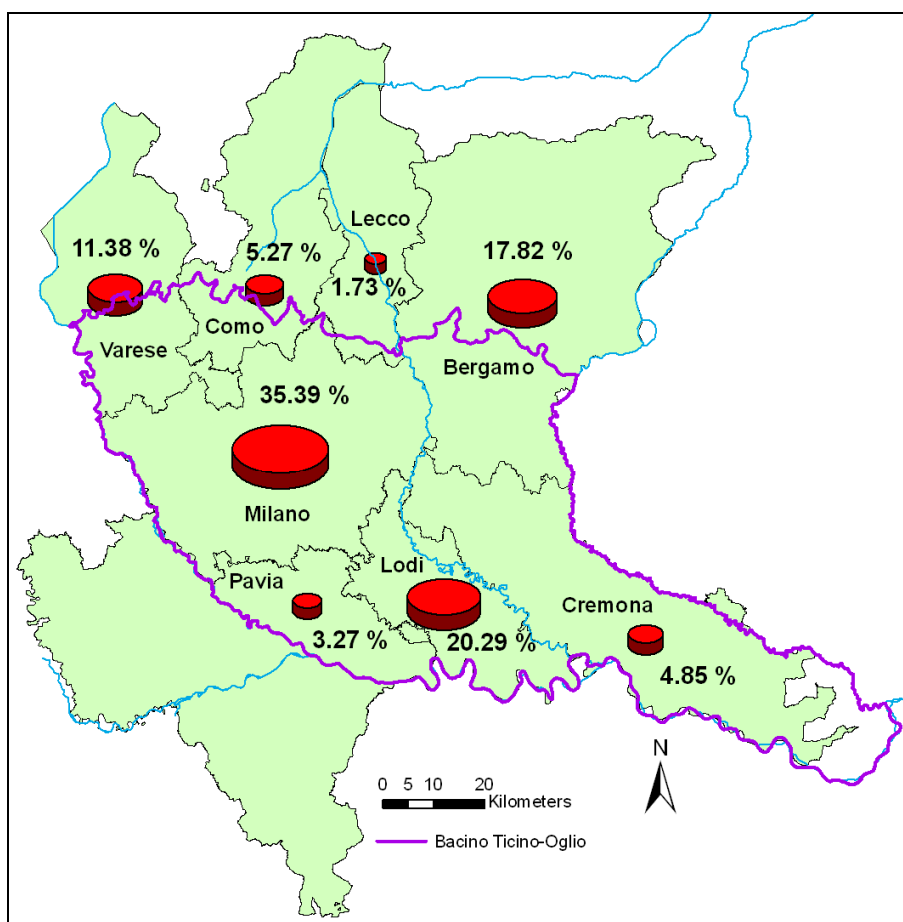


Figura 5.1 - Percentuale dei pozzi archiviati in Tangram, suddivisa per le province prese in esame. Il bordo in viola corrisponde al perimetro dell'area tra Ticino e Oglio.

La profondità media raggiunta dai pozzi è 60 m, i pozzi più profondi (rispettivamente 1000 m e 862 m) sono sondaggi Agip che si trovano nella provincia di Varese. Ben 5397 non hanno dati relativi alla profondità e 629 non raggiungono 10 m di profondità, 3147 superano 100 m e 351 si approfondiscono oltre 200 m (Figura 5.2).

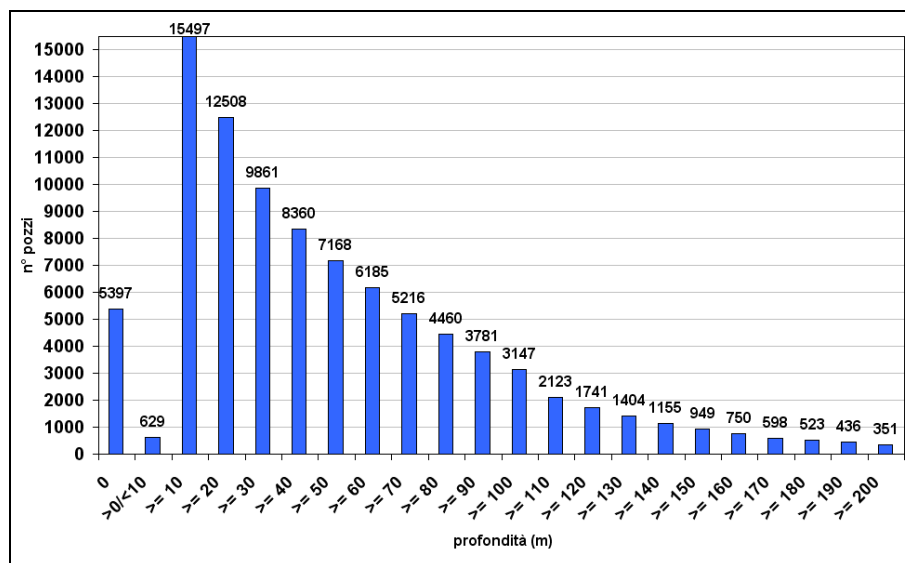


Figura 5.2 - Distribuzione delle profondità cumulate dei pozzi dell'area

Qualsiasi elaborazione geostatistica non può prescindere dall'ubicazione dell'oggetto in esame, perciò le coordinate geografiche dei pozzi sono fondamentali; ugualmente lo è la presenza della stratigrafia, da cui si possono ricavare informazioni relative alle caratteristiche idrogeologiche del sistema in esame (litologie e parametri idraulici). Nell'area di Bacino tra Ticino e Oglio, dei 21523 pozzi archiviati, 16583 (circa il 77%) sono georeferenziati, di questi 8429 hanno la stratigrafia e i restanti 8154 ne sono privi. Solamente 4940 non hanno coordinate geografiche.

Le amministrazioni provinciali di Como, Lecco e Varese, presso cui sono stati raccolti i dati, avevano già predisposto dei database ben organizzati e dettagliati, perciò le informazioni relative ai pozzi archiviati sono complete. Nella Figura 5.3, infatti, per queste province il numero dei pozzi georeferenziati (con e senza stratigrafia) è decisamente maggiore rispetto a quello dei pozzi privi di georeferenziazione e i pozzi georeferenziati con stratigrafia sono superiori a quelli senza stratigrafia. Per la provincia di Lodi,

nonostante l'amministrazione provinciale disponga di un database dettagliato e ben organizzato, invece, i pozzi georeferenziati senza stratigrafia sono superiori a quelli con stratigrafia. Probabilmente nel numero totale dei pozzi archiviati sono considerati anche pozzi vecchi, per cui nella pratica di concessione l'informazione stratigrafica non era stata richiesta.

Come detto sopra, i dati relativi ai pozzi della provincia di Cremona sono aggiornati al 2009 e corrispondono solamente a quelli caricati sul sito della Provincia; la raccolta, quindi, non risulta essere così dettagliata come per le altre province: per questo motivo probabilmente i pozzi georeferenziati senza stratigrafia sono leggermente superiori a quelli con stratigrafia. Per quanto riguarda la provincia di Bergamo, l'amministrazione provinciale ha acquisito le vecchie pratiche del ex-Genio Civile, che non erano organizzate in un database ordinato, e, probabilmente, alcune informazioni possono essere anche andate perse durante il trasferimento dei dati cartacei da una sede all'altra. I dati risultano, quindi molto frammentari e incompleti, di molti pozzi mancano infatti le coordinate geografiche: come si può vedere in Figura 5.3 il numero di pozzi non georeferenziati (1648) è molto alto.

Infine sia per Milano che per Pavia i pozzi georeferenziati con stratigrafia sono la maggior parte sul totale archiviato per singola provincia (46% per Milano e 43% per Pavia).

5 Raccolta, organizzazione e archiviazione dati

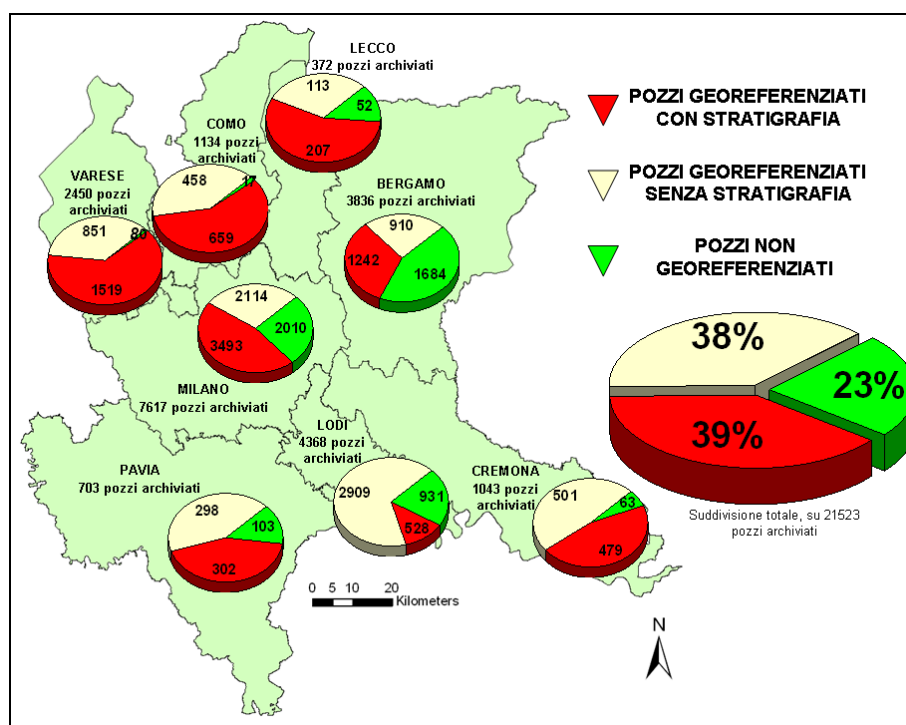


Figura 5.3 - Suddivisione per provincia in pozzi georeferenziati con stratigrafia (in rosso), georeferenziati senza stratigrafia (in bianco) e non georeferenziati (in verde)

Nelle elaborazioni successive saranno utilizzati principalmente pozzi georeferenziati con stratigrafia, il 39% sul totale dei pozzi archiviati. In Figura 5.4 è visualizzata la distribuzione dei pozzi georeferenziati con stratigrafia (in rosso), rispetto a quelli senza stratigrafia (in verde).

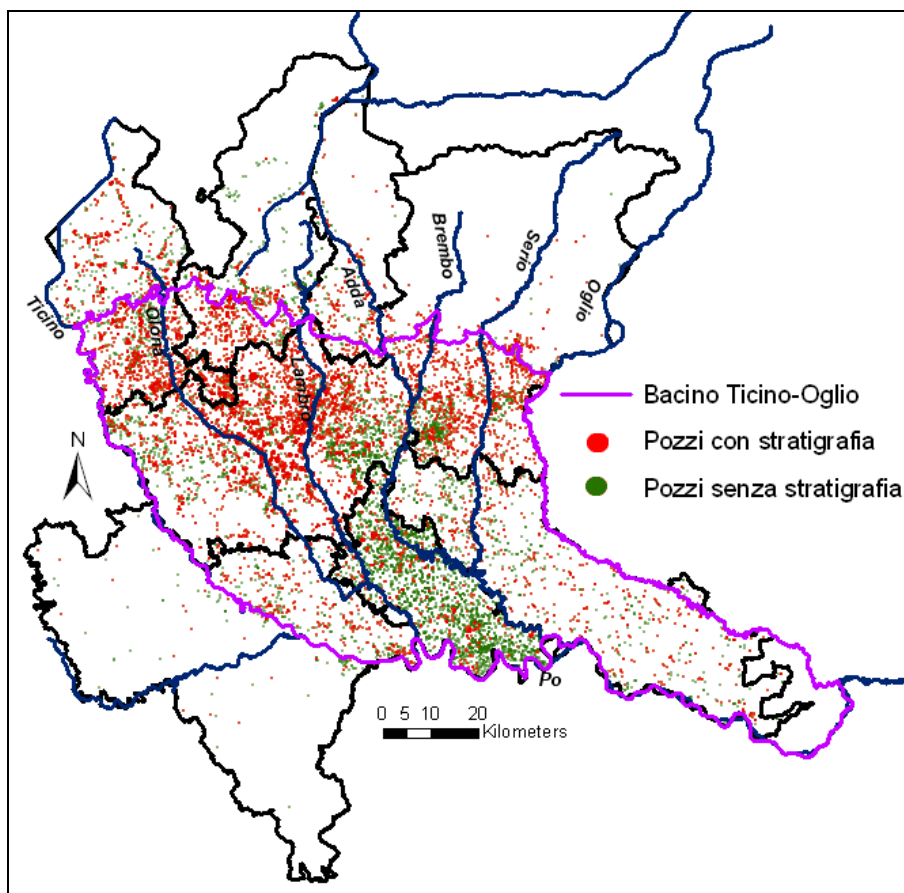


Figura 5.4 – Distribuzione dei pozzi georeferenziati con stratigrafia (in rosso) e senza stratigrafia (in verde), nella porzione di pianura lombarda tra Ticino ed Oglio

Di solito i pozzi pubblici sono utilizzati per l'approvvigionamento idrico, pescano acqua dagli acquiferi più protetti e meno vulnerabili e sono quelli con i dati più dettagliati, quindi nella maggior parte dei casi hanno la stratigrafia. Nel set di pozzi archiviati nel bacino Ticino-Oglio, infatti, 3872, circa l'83% sul totale dei pozzi pubblici, posseggono informazioni stratigrafiche.

Dall'analisi della Tabella 5.1 si nota che i pozzi privati sono più numerosi di quelli pubblici: fanno, infatti, parte di questa categoria non solo quelli ad uso industriale, irriguo, o nel campo del terziario, ma anche i piccoli pozzi appartenenti a privati, sfruttati per la semplice irrigazione del proprio giardino o per attività legate alle abitazioni. Il numero dei privati senza stratigrafia (11353) è maggiore di quelli con stratigrafia (5514), in quanto il dato per le concessioni

non è sempre richiesto, diversamente da ciò che avviene per i pubblici.

Un'altra informazione interessante che è stata analizzata nel set di dati è la relazione che intercorre tra la profondità raggiunta da ciascun pozzo e l'ubicazione degli stessi. I pozzi vengono perforati e poi fenestrati in corrispondenza dei livelli acquiferi, perciò la profondità raggiunta può dare indicazioni sulla collocazione di un acquifero. Un pozzo può anche pescare da diversi acquiferi. Alcuni pozzi captano l'acquifero superficiale, altri quelli profondi, altri entrambi. Infine, le profondità massime raggiunte dai pozzi, segnano anche il limite entro il quale si è sicuri che le successive elaborazioni basate su dati puntuali siano valide; oltre tale profondità esiste la possibilità che i risultati ottenuti siano frutto di sola interpolazione e quindi privi di significato, perché non ancorati a dati puntuali di partenza.

La Figura 5.5 riporta una mappa della suddivisione dei pozzi georeferenziati con stratigrafia (8429) in funzione delle profondità da loro raggiunte: si nota che i pozzi a Nord dell'area, vicino alla zona pedemontana, dove lo spessore dell'acquifero è basso, non si approfondiscono oltre i 50 m (soprattutto nelle province di Varese, Como e Lecco); sicuramente questi pescano acqua dall'acquifero superficiale, l'unico esistente in quella zona. Procedendo verso Sud, rimanendo però nell'alta pianura le profondità raggiunte dai pozzi aumentano: la maggior parte è compresa tra 50 e 150 m, un discreto numero raggiunge e supera i 200 m, spingendosi, in quantità minori, anche intorno ai 300 m. Circa a metà pianura i pozzi risultano essere meno profondi, presumibilmente in corrispondenza della fascia dei fontanili in cui il sottosuolo diventa meno permeabile e la tavola d'acqua si trova molto vicino alla superficie. Nella porzione meridionale della pianura, la densità dei pozzi georeferenziati con stratigrafia diminuisce; nel Pavese e nella provincia di Cremona, la profondità raggiunta torna ad essere piuttosto alta, in media tra i 100 e i 200 m, con pochi pozzi che si approfondiscono anche a 250-300 m, raggiungendo anche acquiferi più profondi. In quest'ultima provincia, accanto a pozzi discretamente profondi, ne esistono svariati che non superano i 50 m di profondità. Nella provincia di Lodi i pozzi sono invece poco profondi, perché captano acquiferi in pressione a basse profondità.

I pozzi più profondi del set di dati analizzato si trovano a Nord, esterni all'area di pianura: sono pozzi profondi ubicati in provincia di

Varese in cui captano in acquiferi locali non connessi a quelli presenti in pianura, e in provincia di Bergamo, dove captano in roccia.

Da notare che a Sud-Ovest della provincia di Cremona, nella porzione della provincia di Mantova circoscritta dai fiumi Oglio e Po, non ci sono dati stratigrafici, ciò implica che la ricostruzione delle proprietà idrogeologiche in quel punto potrà essere poco significativa.

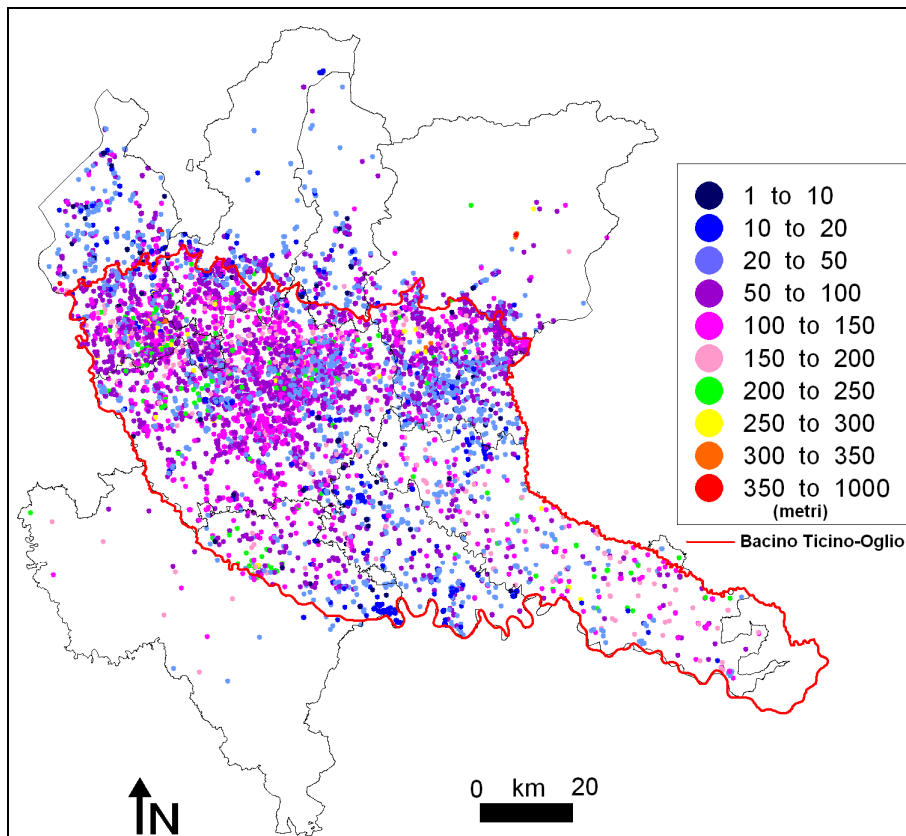


Figura 5.5 – Suddivisione dei pozzi georeferenziati con stratigrafia, in base alla profondità da essi raggiunta

5.2 Dati puntuali dinamici

Per quanto riguarda i dati relativi agli aspetti dinamici del sistema idrogeologico, a scala provinciale sono stati reperiti i dati piezometrici appartenenti alla Rete di Monitoraggio della Provincia di Milano (CAP) e alcuni dati relativi ai prelievi annui da falda nello stesso territorio.

5.2.1 Misure piezometriche

Si tratta di misure mensili dal 1979 al 2005, il cui numero cambia di anno in anno (in Figura 5.6 sono visualizzati i 146 pozzi del 2003). Il numero di stazioni varia nel tempo, la rete è cambiata, sono stati tolti o aggiunti punti di misura: nel 1979 i pozzi sono circa 70, negli anni '80 raggiungono il numero di circa 200, negli anni '90 si ha il numero massimo di pozzi di monitoraggio, circa 280-290 pozzi, e dal 2000 in poi il numero cala a circa 160. Ci si aspetta, quindi, che la precisione e l'attendibilità delle carte piezometriche, che verranno decritte successivamente, varieranno in base alla quantità e alla densità dei punti di misura presenti sul territorio provinciale.

Accanto a questi dati provinciali sono stati consultati, principalmente in fase di elaborazione, le misure mensili piezometriche (dal 2001 al 2005 Figura 5.6), derivanti dalla Rete di Monitoraggio Quantitativo di ARPA Lombardia a livello regionale (su tutta la regione le misure sono circa 275 variabili nel tempo). Per quanto riguarda l'area in esame, il numero di dati piezometrici della rete regionale utilizzato è circa 60. Al 2006 la Rete ARPA contava di 357, ma non vi è ancora stata disponibilità di accedere ai dati recenti.

Ad integrazione dei dati piezometrici, sono stati raccolti dati idrometrici, provenienti da archivi di ARPA Lombardia: le misure sono state registrate tramite strumenti meccanici (il livello idrometrico viene registrato in continuo su un diagramma), manuali (le misure vengono eseguite manualmente dall'operatore della stazione alle ore 12) e automatici (il dato viene registrato in automatico e viene direttamente inviato ad ARPA Lombardia con una frequenza di 15 minuti). Se disponibili, i dati coprono l'arco temporale 1951-2005, le misure delle stazioni automatiche partono dal 1998. In totale sono state raccolte misure relative a 5 stazioni idrometriche meccaniche/manuali e a 7 automatiche (Figura 5.6).

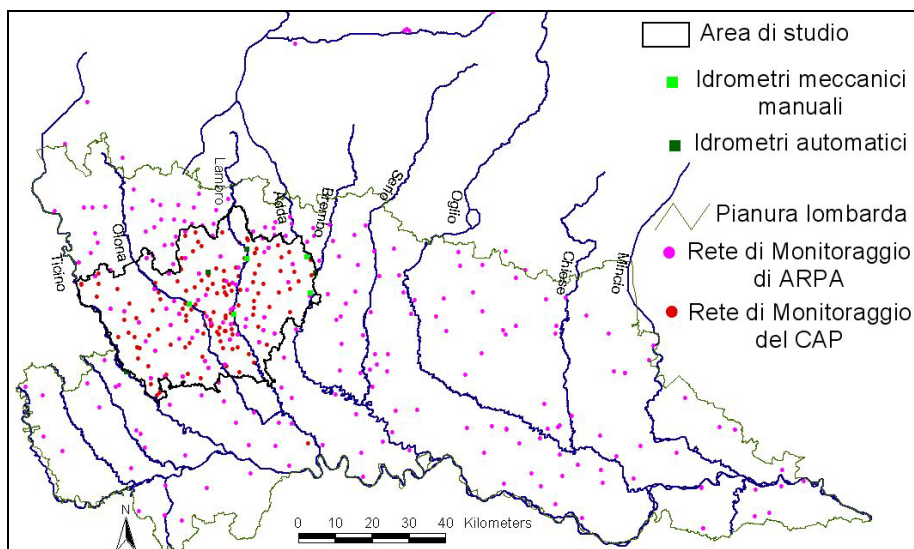


Figura 5.6 - Ubicazione dei piezometri del CAP, dei piezometri e degli idrometri della Rete di Monitoraggio Quantitativo di ARPA Lombardia

5.2.2 Prelievi

I pochissimi dati reperiti relativi ai prelievi da falda sono elencati di seguito:

- le misure degli emungimenti pubblici e privati annuali del 1980, aggregati a livello di comune, provengono da un lavoro sullo studio del bilancio idrico provinciale (Beretta et al., 1985), che stima un prelievo globale annuo di circa 1 miliardo di m³; di questo circa il 60% è relativo a prelievi pubblici. Dalla Figura 5.7 si osserva che Milano e i comuni situati nel suo hinterland costituiscono i settori in cui gli emungimenti sono i più alti dell'area; queste zone sono infatti caratterizzate da un elevato numero di abitanti e da significativi prelievi ad uso civile ed industriale;

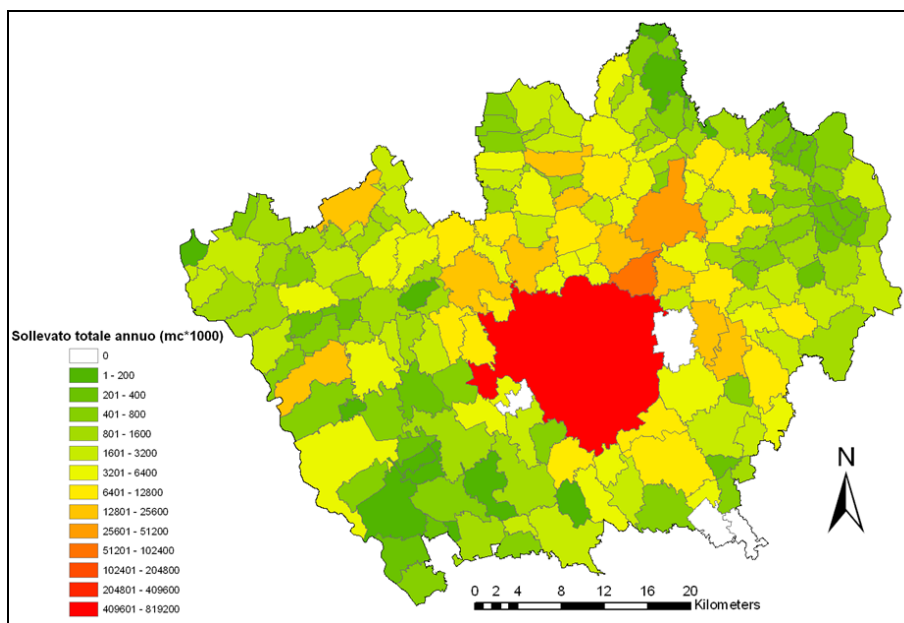


Figura 5.7 - Distribuzione dei prelievi a livello comunale nel 1980, all'interno dell'area di studio. Dati provenienti da Beretta et al. (1985)

- sono stati messi a disposizione dall'ufficio del SIF della Provincia di Milano per il 2008 (Figura 5.8), i quantitativi di acqua prelevata da 704 pozzi del Catasto delle Utenze Idriche (CUI), per un progetto precedente sull'area del consorzio BrianzAcque (Rapporto tecnico, Bonomi et al., 2009). In Figura 5.8 sono visualizzati gli emungimenti aggregati per comune, confrontati con il numero totale di abitanti residenti in ciascun comune. Non sembra però esserci una relazione diretta tra residenti e portate di acqua prelevate; non si esclude che tale rapporto possa risentire della non completezza delle informazioni di base o di fenomeni esterni non considerati;

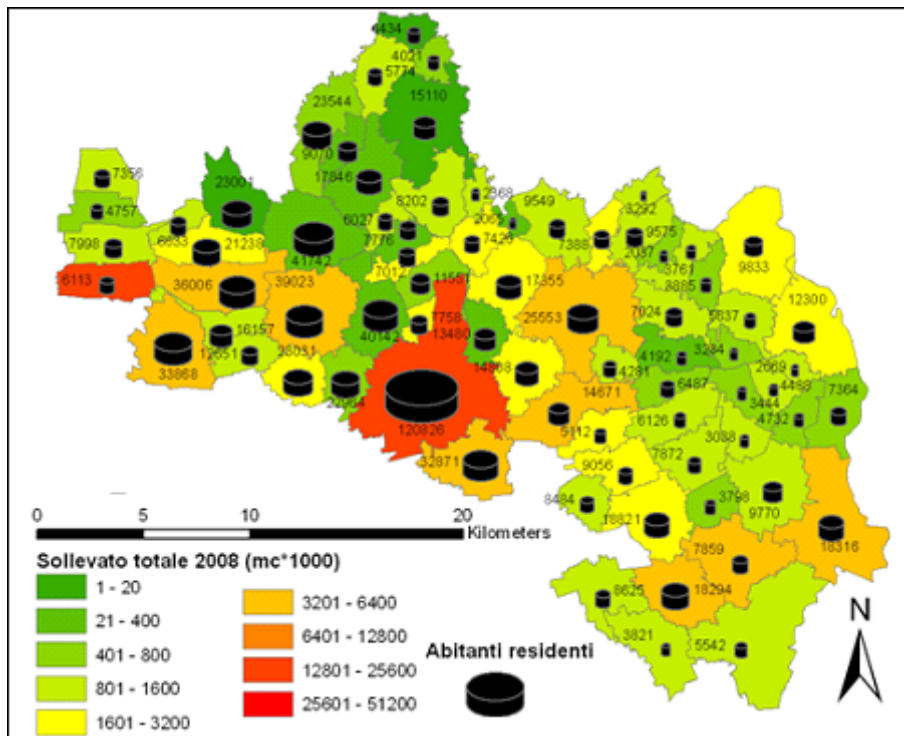


Figura 5.8 - Distribuzione dei prelievi a livello comunale nel 2008, all'interno del territorio del consorzio di BrianzaAcque

- da una presentazione di Metropoli Milanese SPA (Carrettini, 2009) ad un convegno, sono stati estrapolati i dati relativi al volume di acqua erogato all'anno dall'acquedotto: si sa che questi quantitativi non corrispondono esattamente ai volumi prelevati dall'acquifero, ma possono comunque fornire un ordine di grandezza. In Figura 5.9 è riportato l'andamento di questi valori dal 2000 al 2008: si osserva che nei 9 anni indagati i volumi erogati sono diminuiti di quasi 16 milioni m^3 , in particolare si nota una decrescita significativa dal 2005 al 2008.

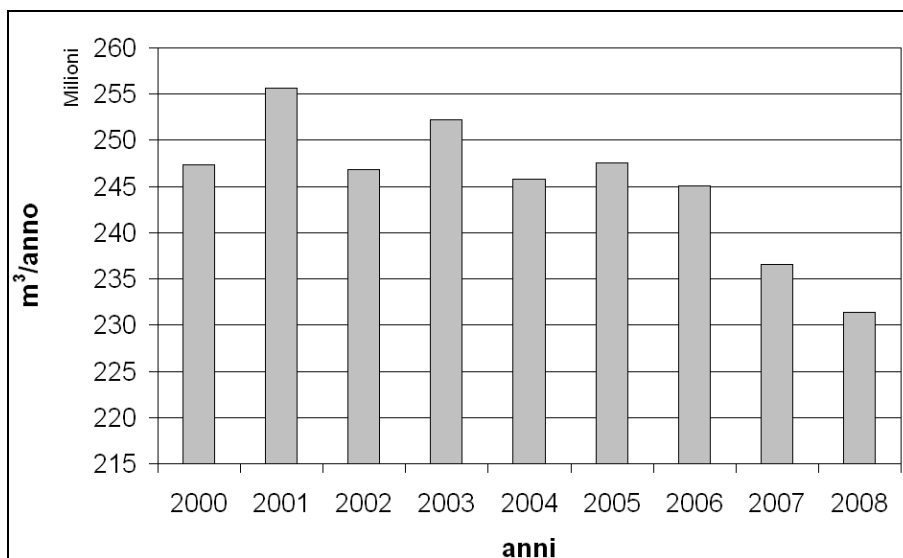


Figura 5.9 – Volumi di acqua erogati all'anno dall'acquedotto di Milano (Carrettini, 2009)

5.3 Dati spaziali

Sono state raccolte tutte le informazioni necessarie a inquadrare geograficamente, geomorfologicamente e geologicamente l'area di studio, e a ricostruire le superfici del sistema idrogeologico in esame. Di seguito sono elencati i dati raccolti in questa fase:

- mappa della rete idrografica naturale e artificiale della Regione Lombardia, in formato vettoriale;
- carta della geomorfologia della pianura della Regione Lombardia, in formato raster;
- Modello Digitale del Terreno della pianura realizzato da CNR-Irpi (Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica) in formato raster. In pianura, a differenza della zona di montagna, il DTM ha una risoluzione di 250 m, livello di dettaglio piuttosto basso, ma è l'unica fonte esistente a scala regionale. Da questa superficie sono stati estratti i punti relativi all'area pianeggiante tra Ticino e Oglio (Figura 5.10). Le quote degradano da un valore massimo di circa 440 m s.l.m. a Nord verso un minimo di circa 9 m s.l.m. a Sud, Sud-Est. Valori bassi si ritrovano anche in alcune valli fluviali, come nel caso del fiume Adda, in corrispondenza della provincia di Lodi;

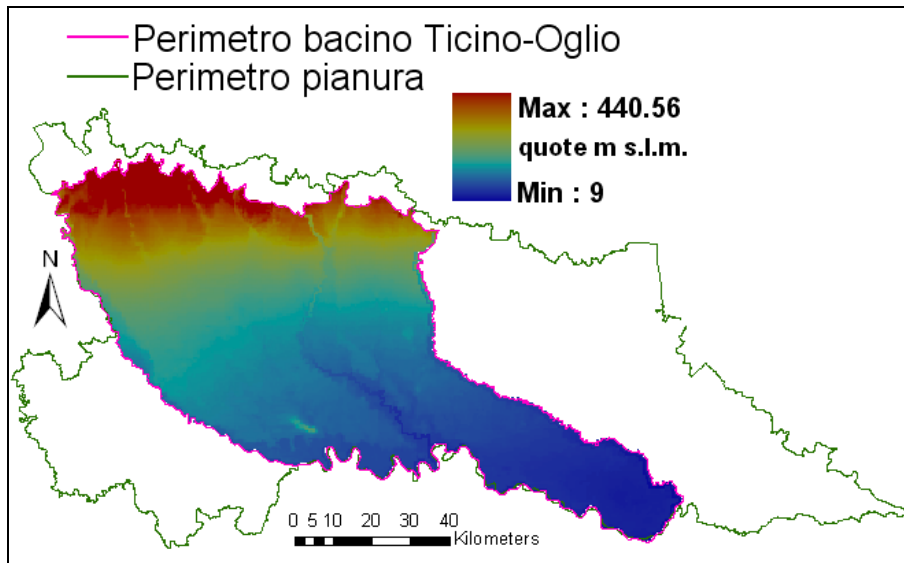


Figura 5.10 – Estrazione a scala di bacino del Modello Digitale del Terreno della pianura lombarda

- superfici basali dei Gruppi Acquiferi definiti da Regione Lombardia & Eni-Divisione Agip (2002), sottoforma di mappe cartacee. Nello studio condotto è proposta una stratigrafia del sottosuolo della pianura lombarda basata sul riconoscimento e definizione di unità idrostratigrafiche, informalmente definite Gruppi Acquiferi A, B, C e D, dal più recente e superficiale, al più antico e profondo. Essi sono legati a specifici eventi geologici e corrispondono a cambiamenti nell'ambiente deposizionale. Le mappe delle corrispondenti superfici basali sono state limitate non al margine della pianura, ma dove l'oggettività del dato sismico, confortato dai dati di pozzo, assume un carattere interpretativo: la sismica è stata elaborata per l'individuazione di strutture profonde e quindi la definizione dei livelli superficiali può essere localmente piuttosto scarsa. Nelle aree poste al margine settentrionale della pianura, le superfici stratigrafiche considerate sono molto superficiali, rendendo il loro riconoscimento sulla sismica largamente interpretativo; infatti le mappe delle superfici A e B sono meno estese delle mappe relative a C e D, quest'ultime sono più profonde ed hanno quindi un dato sismico maggiormente attendibile. I gruppi acquiferi vengono rappresentati fino all'intersezione dell'interfaccia acqua dolce/acqua salmastra, perché oltre sono saturi di acqua salata. In parte si sovrappongono a ricostruzioni realizzate nel territorio dell'Emilia-

Romagna (Regione Lombardia & Eni-Divisione Agip, 2002). Nel progetto di dottorato sono state utilizzate le sole superfici basali A, B e C;

- superficie topografica corrispondente al territorio delle province di Milano e Monza e Brianza (Figura 5.11), ricostruita a partire dalle curve di livello ogni 5 m di Marchetti (1992). Le quote variano da un minimo di circa 70 m s.l.m. a Sud e un massimo di circa 300 m s.l.m. a Nord vicino alla zona delle Prealpi lombarde. Lungo il confine occidentale si può scorgere la valle del Ticino, mentre lungo il margine orientale, principalmente nel settore settentrionale, la valle dell'Adda;

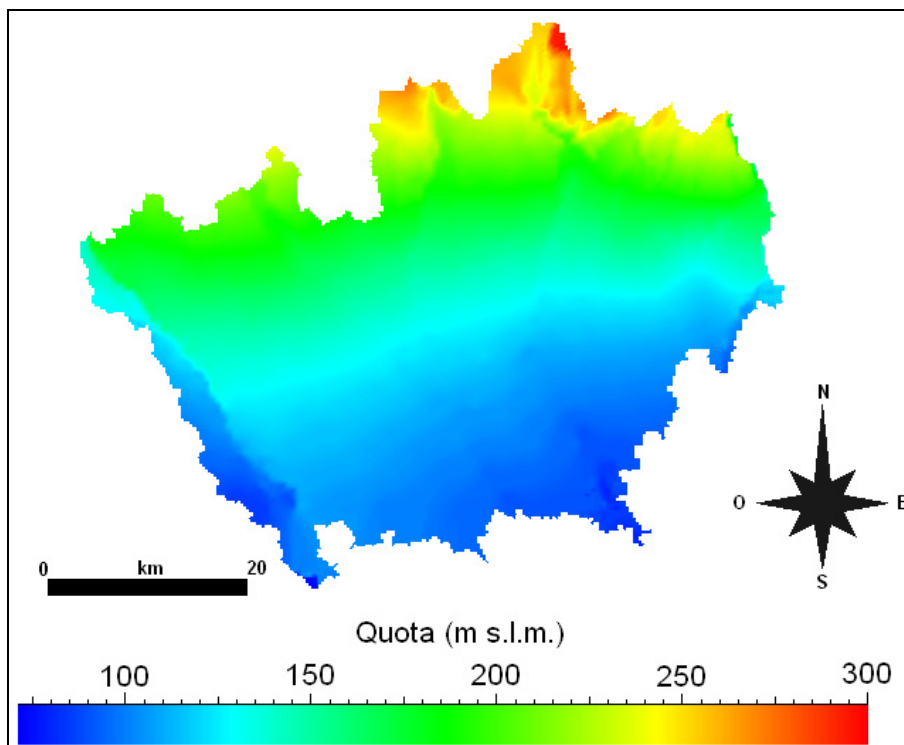


Figura 5.11 – Modello digitale del terreno relativo alle province di Milano e Monza e Brianza

- sezioni litostratigrafiche realizzate in precedenti lavori, relativamente alle province di Milano e di Monza e Brianza (Avanzini et al., 1995; Beretta et al., 1984; CAP 1973; Denti et al., 1988).

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

La caratterizzazione del sistema si basa sul metodo utilizzato dal gruppo di ricerca di Idrogeologia del Disat relativo all'interpolazione tridimensionale spaziale dei dati stratigrafici. In questa fase del lavoro (la fase 2 secondo lo schema del capitolo 3) è stata ottenuta la ricostruzione 3D del sistema idrogeologico e delle sue caratteristiche, sulla base di metodiche di interpolazioni geostatistiche, previa l'analisi delle reali sequenze deposizionali, dei movimenti tettonici e dell'evoluzione dell'ambiente di deposizione che hanno interessato l'area e che hanno influenzato gli spessori e le caratteristiche sedimentologiche, le tipologie e giaciture dei sedimenti.

Vengono descritte le operazioni che, relativamente all'area di bacino tra Ticino e Oglio, sono state di base per la costruzione 3D della struttura:

- definizione delle superfici del sistema idrogeologico;
- modellazione del sistema idrogeologico attraverso griglie 3D;
- importazione e analisi dei dati puntuali stratigrafici nello spazio 3D;
- visualizzazione dei risultati tramite sezioni 3D di distribuzione delle proprietà tessiturali (percentuali di materiali grossolani, medi e fini) e dei parametri idraulici (conducibilità idraulica e porosità efficace).

6.1 Definizione delle superfici del sistema idrogeologico

Il sistema idrogeologico è stato ricostruito in funzione delle dimensioni e della morfologia di diverse superfici: superficie topografica, base del modello e superfici basali dei Gruppi Acquiferi A, B e C, in cui il lo studio di Regione Lombardia & Eni-Divisione Agip (2002) suddivide il sottosuolo lombardo, assieme al quarto Gruppo Acquifero denominato D.

Tralasciando un commento sulla superficie topografica di cui si è parlato nel paragrafo 5.3, per prima cosa si descrivono le basi dei Gruppi Acquiferi considerati nel seguente lavoro, dalla più antica e profonda, alla più recente e superficiale, ovvero C, B e A.

L'andamento dei singoli profili delle superfici deposizionali è imputabile all'attività combinata di diversi fattori che hanno caratterizzato il Pleistocene e poi l'Olocene: eventi tettonici, periodi di trasgressione e regressione marina, oscillazioni climatiche quaternarie con conseguenti fasi di avanzata e ritiro dei ghiacciai, processi sedimentari durante il trasporto, la deposizione e l'erosione da parte dei ghiacciai e dei corsi idrici.

Il gruppo Acquifero C è stato attribuito alla parte bassa dal medio Pleistocene. Un importante evento trasgressivo ripartisce la successione sedimentaria in due distinti cicli regressivi: inferiore e superiore. Nella parte bassa del primo si ritrovano sedimenti marini di piattaforma, principalmente argilla siltosa-sabbiosa, grigia, fossilifera. Si passa poi a sabbie grigie prevalenti da fini a finissime, bioturbate e fossilifere dei sistemi litorali e successivamente a sabbie grigie, medie, classate, a stratificazione media e spessa, con resti vegetali, di ambienti deltizi. Nella parte alta della regressione inferiore si ritrovano sedimenti continentali di piana alluvionale con sabbia grigia da finissima a media, laminata, alternata ad argilla siltosa verde e argilla palustre bruno-nerastra ricca in materia organica.

Proseguendo verso quote maggiori si incontrano i sedimenti derivanti dall'evento trasgressivo: essi provengono da un sistema litorale a prevalenti sabbie finissime e silt bioturbati, quindi con argilla marina, grigia, fossilifera, di piattaforma.

Nel ciclo regressivo superiore, infine, si trovano sedimenti di ambiente transizionale con prevalente sabbia grigia fine e media, in strati graduati da medi a molto spessi, laminata, con abbondanti frammenti vegetali. Seguono sabbie grigie da finissime a medie alternate ad argilla siltosa verde e argilla palustre bruno-nerastra, da sedimentazione in ambiente continentale.

Il gruppo presenta, quindi, una notevole variabilità sedimentaria che provoca importanti conseguenze di natura idrogeologica: gli intervalli di sistemi deltizi e litorali rappresentano dei serbatoi di significativo spessore con buone caratteristiche idrogeologiche per quanto riguarda porosità e permeabilità. Le alternanze continentali di sabbie grigie e argille verdi di piana alluvionale rappresentano un buon serbatoio; dove prevalgono, invece, le sequenze più argillose esiste un sufficiente confinamento e protezione delle falde sottostanti. Il livello impermeabile di argille marine di significato spessore stratigrafico e notevole continuità laterale, divide il gruppo acquifero in due distinti acquiferi su un ampio settore della pianura lombarda

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

(Regione Lombardia & Eni-Divisione Agip, 2002). La superficie basale del gruppo acquifero C si trova tra - 780 m s.l.m. e 180 m s.l.m. circa, come mostra la Figura 6.1, dove le porzioni bianche a Sud e Sud-Est della mappa indicano zone erose.

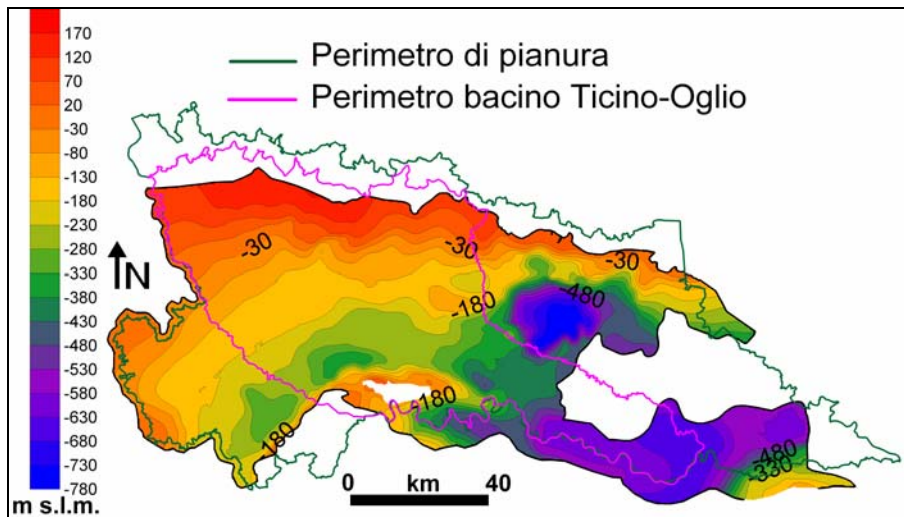


Figura 6.1 - Ricostruzione bidimensionale della superficie basale del Gruppo Acquifero C

L'ambiente di deposizione del Gruppo Acquifero B è esclusivamente continentale, con sistemi deposizionali di piana alluvionale, dominata da sistemi fluviali braided ad alta energia. Indica il passaggio alla deposizione generalizzata di sedimenti grossolani, ovvero sabbie medio-grossolane, sabbie ciottolose, ghiaie a matrice sabbiosa. La separazione con il Gruppo Acquifero C è piuttosto netta, ad esclusione della porzione settentrionale dove anche quest'ultimo è costituito da depositi di piana alluvionale in ambiente continentale.

La successione sedimentaria mostra un chiaro aumento della granulometria dal basso verso l'alto: alla base di essa si trovano in prevalenza litologie sabbiose, con sabbia grigia o grigio-giallastra, da fine a grossolana e presenze di sedimenti fini con intercalazioni di argilla siltosa e silt di spessore da decimetrico a metrico. Probabilmente nei settori meridionali della pianura si verifica un aumento della frequenza e degli spessori dei livelli argillosi a bassa permeabilità con conseguente confinamento delle falde.

A quote maggiori si passa a granulometrie grossolane, con evidente preponderanza di ghiaie a Nord vicino alle zone prealpine di

alimentazione e sabbie in quelle più meridionali e distali (Regione Lombardia & Eni-Divisione Agip). La superficie basale del gruppo acquifero B si trova tra - 620 m s.l.m. e 170 m s.l.m. circa (Figura 6.2).

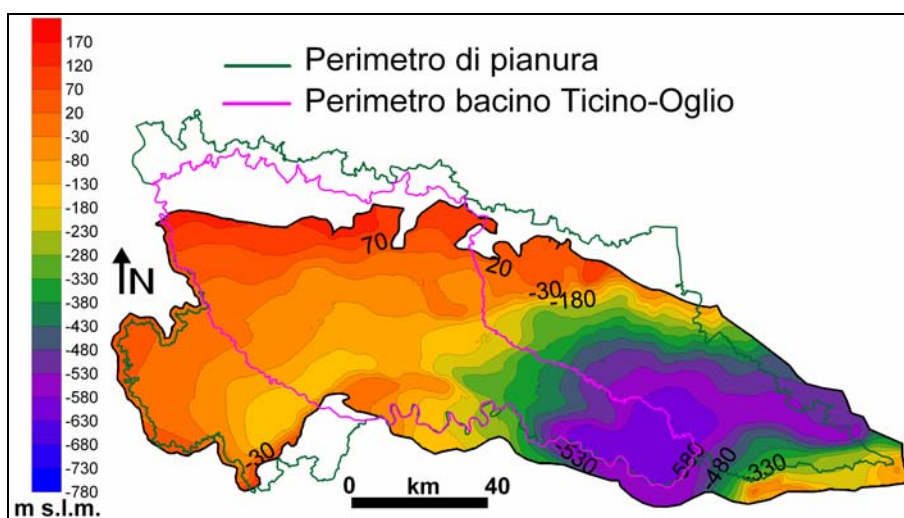


Figura 6.2 - Ricostruzione bidimensionale della superficie basale del Gruppo Acquifero B

L'ambiente di deposizione del Gruppo Acquifero A è continentale, dominano le piane alluvionali con sistemi fluviali di tipo braided. Gli apporti molto grossolani provengono dalle aree alpine in erosione, con direzione Nord-Sud e costituiscono la maggior parte dei depositi del gruppo. Questo è infatti rappresentato principalmente da ghiaie e ghiaie grossolane, poligeniche, da grigie a grigio-giallastre, a matrice sabbiosa, ad elevate permeabilità e porosità. Spostandosi, invece, verso Sud e allontanandosi dalle zone di alimentazione si individua una variazione laterale dei sedimenti, con aumento delle litologie sabbiose (da medie a grossolane, spesso ciottolose) a scapito di quelle ghiaiose. Sono presenti intercalazioni decimetriche di argilla e argilla-siltosa, di ridotto spessore, tale da provocare raramente dei confinamenti della falda.

Per analogie sedimentarie e litologiche è difficile individuare la separazione con il Gruppo Acquifero B sottostante, entrambi costituiscono infatti l'acquifero tradizionale della pianura.

Dai caratteri sedimentari della successione si intuisce che il gruppo è legato a sistemi fluviali contraddistinti da un'elevata energia dei depositi sedimentari, energia determinata dalle fasi di

deterioramento climatico dei cicli glaciali pleistocenici (Regione Lombardia & Eni-Divisione Agip). La superficie basale del Gruppo Acquifero A si trova tra - 370 m s.l.m. e 170 m s.l.m. circa, come mostra la Figura 6.3, dove la porzione bianca a Sud della mappa tra l'isolinea - 30 m s.l.m. e 20 m s.l.m. indica una zona erosa.

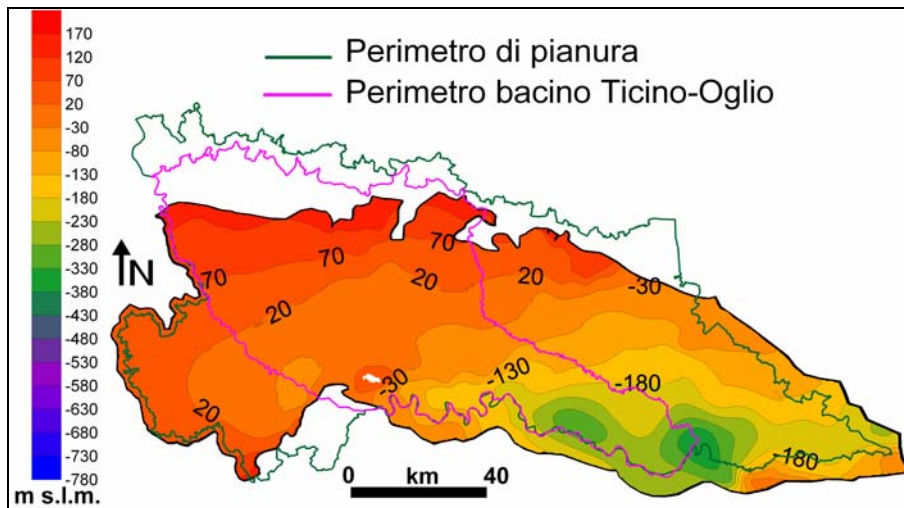


Figura 6.3 - Ricostruzione bidimensionale della superficie basale del Gruppo Acquifero A

Le superfici basali dei Gruppi Acquiferi, appena descritte, sono state ricavate dalle relative carte, dopo scansione: le isoipse sono state digitalizzate tramite Arcgis e trasformate in punti. I punti sono quindi stati interpolati in Surfer 8, ottenendo così mappe digitali bidimensionali, mostrate sopra (Figura 6.1, Figura 6.2 e Figura 6.3).

L'andamento della deposizione dei sedimenti nell'acquifero tradizionale (compreso tra superficie topografica e superficie basale del Gruppo Acquifero B) segue la giacitura delle superfici basali A e B: la modellazione di questo sistema idrogeologico verrà, quindi, realizzata in modo conforme a queste due superfici, simulando l'acquifero attraverso una griglia di dimensioni e forma simili alla morfologia delle superfici limite (superficie topografica, basi A e B).

Gocad, per un'esigenza tecnica e di calcolo, ha bisogno che tutte le superfici, utilizzate per la costruzione di una griglia 3D, abbiano la stessa estensione. Per questo motivo sono state considerate unicamente le porzioni delle superfici basali A e B incluse all'interno del perimetro dell'area di studio (in fucsia nelle Figura 6.1 e Figura 6.2). Successivamente queste sono state ricostruite, in modo fittizio

tra il loro limite settentrionale e il confine Nord dell'area di studio. In corrispondenza di questa porzione, infatti, lo studio regionale non ha individuato i Gruppi Acquiferi A e B, in quanto i complessi rapporti intercorrenti tra le Unità Idrogeologiche affioranti al margine Sudalpino e i Gruppi Acquiferi non sono stati analizzati perché necessitano di approfondimenti e dati specifici. L'interpolazione geostatistica è stata fatta, quindi, proseguire oltre i limiti delle singole superfici in ambiente bidimensionale.

I punti grigliati delle tre superfici relative all'acquifero tradizionale (superficie topografica Base A e Base B) sono stati importati, proiettati nello spazio 3D di Gocad e trasformati, tramite triangolazione, in corpi geologici 3D.

Come detto nel capitolo 4.4, i depositi ghiaiosi-sabbiosi dell'acquifero tradizionale si approfondiscono anche nel Gruppo Acquifero C, in corrispondenza del settore settentrionale dell'area di studio, dove assumono discreti spessori. Inoltre, relativamente a questa porzione molti pozzi raccolti si approfondiscono oltre la base B, andando, probabilmente, a pescare acqua in falde profonde. Al contrario nella zona Sud Sud-Est i pozzi, visualizzati in nero in Figura 6.4, raggiungono una profondità che è minore della metà dello spessore intercorrente tra la superficie topografica (in giallo) e la base B (in verde).

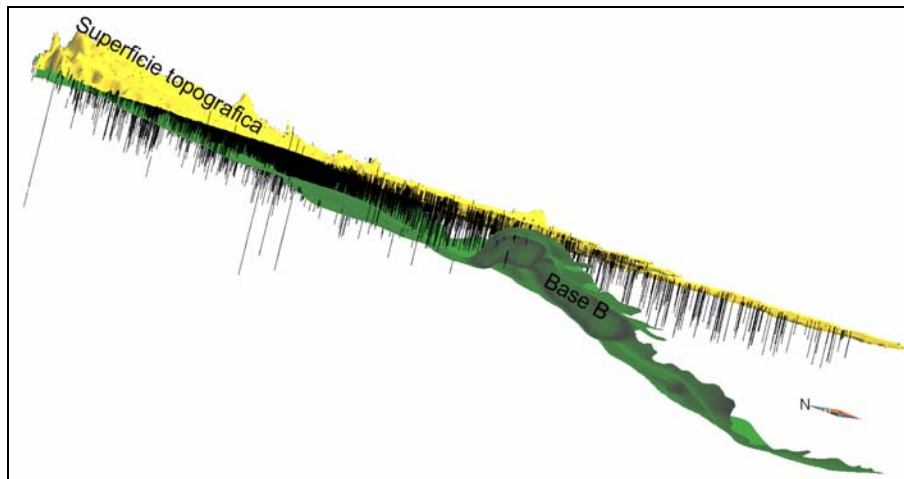


Figura 6.4 – Distribuzione 3D dei pozzi raccolti nell'area di studio, proiettati tra la superficie topografica (in giallo) e la base del Gruppo Acquifero B, relativamente all'area di studio indagata

Per questi motivi si è deciso di includere nel modello anche il Gruppo Acquifero C, in corrispondenza della sola porzione settentrionale dell'area di studio, e di creare, quindi, una base per il modello a partire da una molteplicità di dati: nel settore meridionale del bacino sono stati utilizzati i punti derivanti dalla superficie basale B, corrispondente alla base dell'acquifero tradizionale; nel settore centro-settentrionale è stata considerata la superficie basale C ed infine, vicino al limite Nord della pianura (la parte Nord della province di Milano e Monza e Brianza, le porzioni meridionali delle province di Varese, Como, Lecco e Bergamo), dove le basi B e C non sono state individuate nello studio regionale, la base è stata ricostruita a partire dalle stratigrafie dei pozzi archiviati in Tangram e dall'analisi di sezioni lito-stratigrafiche pubblicate relativamente a quell'area (Avanzini et al., 1995; Beretta et al., 1984; CAP 1973; Denti et al., 1988). Si è cercato di individuare il livello impermeabile di divisione tra l'acquifero tradizionale e quelli più profondi.

La base del modello, risultante dai dati descritti è mostrata in Figura 6.5. In particolare, partendo da Sud-Est fino all'isolinea 0 m s.l.m. (evidenziata in rosa) sono stati utilizzati i punti derivanti dalla base B, tra l'isolinea 0 m s.l.m. e l'isolinea 150 m s.l.m. (evidenziata in rosso) sono stati utilizzati i punti della base C, mentre dall'isolinea 150 m s.l.m. al termine dell'area di studio (evidenziata in fucsia) sono stati utilizzati i punti derivati dalle stratigrafie dei pozzi inseriti in Tangram, in base all'analisi di sezioni lito-stratigrafiche.

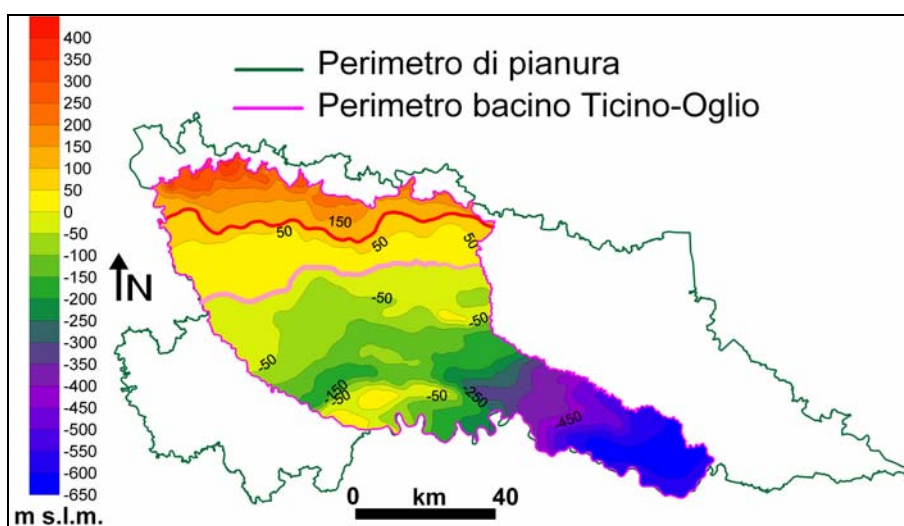


Figura 6.5 – Ricostruzione bidimensionale della base del sistema idrogeologico in esame, a scala di bacino

Anche la base del modello è stata trasformata, attraverso triangolazione, in un corpo geologico 3D.

6.1.1 Spessori intercorrenti tra le superfici limite del modello

La figura 6.6 riporta le quattro superfici posizionate nello spazio tridimensionale, sovrapposte l'una all'altra. Sulla superficie topografica è proiettata la distribuzione dello spessore intercorrente tra essa e la base del modello, ossia lo spessore dell'intero sistema idrogeologico considerato.

Una peculiarità di Gocad è quella di associare ad un'unica visualizzazione diverse informazioni: in questo caso ad una di tipo qualitativo, ovvero l'ubicazione nelle tre dimensioni delle superfici, ne viene collegata un'altra che quantifica una proprietà quale lo spessore. Esso varia tra qualche decina di centimetri (circa 0.045 m) a Nord, in prossimità dei rilievi, dove compaiono affioramenti rocciosi a bassa permeabilità, emersi a seguito della forte erosione durante il periodo della deglaciazione, e oltre 600 m a Sud-Est, dove, al contrario le superfici divergono.

Si nota una riduzione dello spessore dell'acquifero anche a Sud-Ovest dell'area di studio, il colle di San Colombano, dove si osserva un innalzamento delle quattro superfici, imputabile ad un evento tettonico che ha determinato il sollevamento e l'affioramento del substrato marino in superficie, in corrispondenza di un'anticlinale asimmetrica molto fagliata (Provincia di Pavia -Divisione Ambiente Settore Risorse Naturali, 2006).

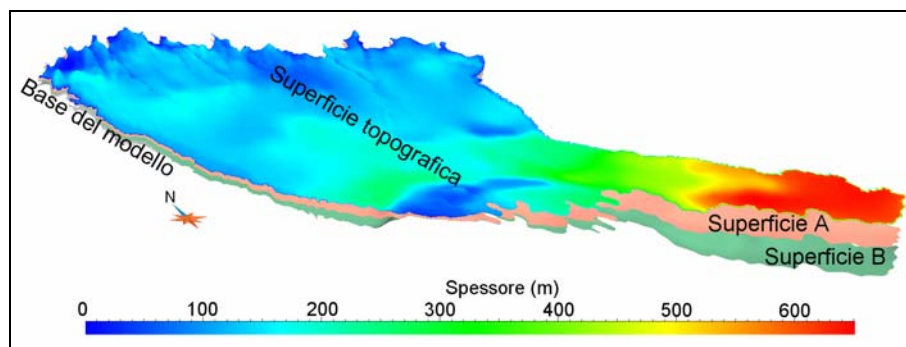


Figura 6.6 – Superfici del sistema idrogeologiche proiettate come corpi geologici nello spazio 3D. E' visualizzato anche l'andamento dello spessore tra superficie topografica e base del modello

L'andamento dello spessore intercorrente tra una superficie e l'altra è simile a quello dell'intero sistema indagato: tendenzialmente cresce da Nord verso Sud, Sud-Est; da Nord al diminuire della quota, per circa 60 km, si nota un incremento graduale, non più di 100 m - 150 m di differenza. Nei restanti 80 km, si registrano variazioni massime di 300 m - 400 m. Situazione diversa, rispetto a questa appena descritta, si verifica relativamente allo spessore intercorrente tra la Base B e la base del modello: come mostra la Figura 6.7 i valori di spessore variano tra un minimo di qualche decina di centimetri ed un massimo di 84 m. Nella porzione centro-meridionale e all'estremità settentrionale lo spessore non supera i 4 m, le due superfici sono, infatti, molto vicine in quanto nel primo caso la base del modello in questa zona è stata ricavata dai punti della superficie basale del Gruppo Acquifero B (paragrafo 6.1); la seconda zona è in corrispondenza dell'affioramento del substrato e in generale lo spessore di tutto l'acquifero è qui molto ridotto. Invece, nella fascia centro-settentrionale i valori si discostano dal resto dell'area, sono compresi tra 25 m e 84 m: questa zona corrisponde all'abbassamento della base del modello nella porzione superiore del Gruppo Acquifero C (paragrafo 6.1).

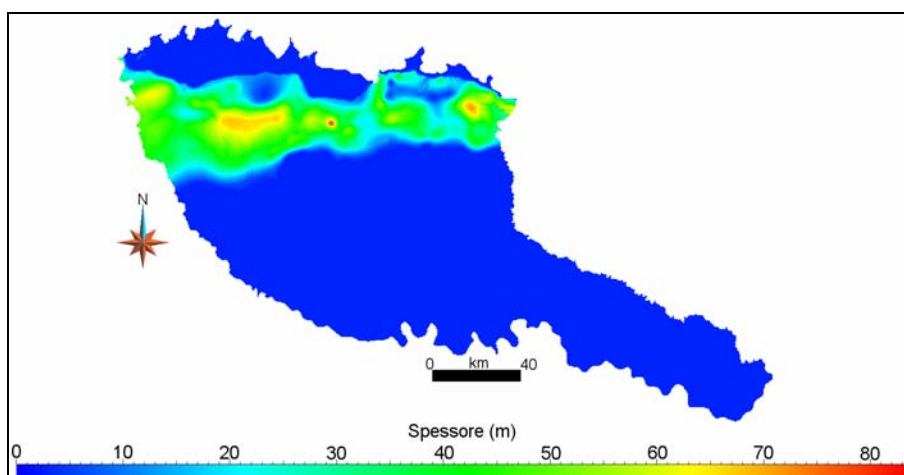


Figura 6.7 – Spessore intercorrente tra la Base B e la base del modello

Nelle immagini seguenti sono riportate due sezioni ($j=94$ in figura 6.10 e $i=123$ in figura 6.12) che mostrano, relativamente alla area di studio indagata, la modellazione tridimensionale delle geometrie dei Gruppi Acquiferi A, B e C, ottenuta tramite Gocad. Le ricostruzioni

sono state confrontate con due sezioni idrostratigrafiche (sezione 5a in figura 6.9 e sezione 2 in figura 6.11) realizzate nello studio regionale (Regione Lombardia & Eni-Divisione Agip, 2002): lo spessore di sottosuolo riprodotto da queste sezioni è maggiore di quello interessato dalla modellazione avvenuta con il software Gocad, la profondità massima supera gli 800 m al di sotto del piano campagna. Nelle sezioni del lavoro regionale sono stati infatti individuati anche il Gruppo Acquifero D, più antico e più profondo degli altri tre, e il limite tra acqua dolce e acqua salmastra.

Va precisato che Gocad permette solamente la visualizzazione di sezioni lungo linee rette, quindi le sezioni simulate non coincidono esattamente con quelle di Eni-Agip, ma ne rappresentano una valida approssimazione. In Figura 6.8 è mostrata l'ubicazione delle quattro sezioni.

Come accennato sopra, le figure 6.9 e 6.11 riproducono due visioni in sezioni dell'Unità Idrostratigrafiche A, B, C e D, riportate nel lavoro regionale. Tali unità sono delimitate da superfici di inconformità prodotte da fasi deformative di importanza regionale; al loro interno sono riconoscibili più unità di rango minore, delimitate da superfici di inconformità di significato più locale.

I sedimenti fini (argille o limi) che formano la parte superiore di ogni unità costituiscono una barriera impermeabile (acquicludo) o poco permeabile (acquitardo) che determina un relativo isolamento idraulico di una data unità rispetto alla soprastante. Nel complesso, quindi, l'insieme delle unità idrostratigrafiche principali costituisce una successione di corpi sedimentari acquiferi articolati (Gruppi Acquiferi), relativamente isolati gli uni dagli altri, costituiti al loro interno da corpi sedimentari acquiferi di rango e dimensioni minori (Complessi Acquiferi). Nelle sezioni idrostratigrafiche vengono correlate le unità componenti i Gruppi Acquiferi, ovvero i Complessi Acquiferi. Ogni Complesso Acquifero è costituito da un Sistema Acquifero (in colore) e da un Sistema Acquitardo (in grigio). Il primo è l'insieme dei serbatoi acquiferi e può essere definito come un'unità idrogeologicamente omogenea costituita da sedimenti relativamente grossolani che comprende anche barriere di permeabilità locali; il secondo è l'insieme dei corpi impermeabili o poco permeabili e può essere definito come un'unità idrogeologicamente omogenea costituita da sedimenti fini che possono contenere anche serbatoi acquiferi di minore entità (Regione Lombardia & Eni-Divisione Agip, 2002).

La sezione 5a (figura 6.9) è orientata circa in direzione Ovest-Est e visualizza l'andamento dei corpi sedimentari lungo l'asse del bacino padano, ossia lungo la direzione di massima deformazione; per questo motivo le deformazioni stesse sono attenuate. Infatti, così come accade nella sezione $j=94$ (figura 6.10), non si notano dei rilevanti sollevamenti o depressioni, soprattutto nelle superfici basali dei Gruppi Acquiferi A e B; gli spessori aumentano verso Est: lo spessore dell'Unità Idrostratigrafica A varia da circa 60 m a Ovest a circa 80 m a Est. Lo spessore dell'Unità Idrostratigrafica B è compreso tra circa 100 m a Ovest e circa 150 m ($j=94$)/180 m (sezione 5a) a Est. La sezione $j=94$ si trova circa nella media pianura (figura 6.8), dove la base del modello non si approfondisce fino al Gruppo Acquifero C: questo, infatti, nell'immagine 6.10 è modellato sottoforma di un corpo molto sottile, quasi inesistente, rispetto agli altri due Gruppi Acquiferi. Il motivo di questa configurazione è legato allo spessore intercorrente tra la superficie basale del Gruppo Acquifero B e la base del modello (figura 6.7).

La sezione 2 (figura 6.11) ha orientazione Nord-Sud, rappresenta le geometrie dei corpi sedimentari trasversali all'asse del bacino e si trova in una zona in cui la tettonica ha conferito alle unità sedimentarie una geometria cuneiforme, visibile anche nella sezione $i=123$ (figura 6.12), relativamente al Gruppo Acquifero B, in corrispondenza del fiume Lambro Meridionale. Entrambe le sezioni nella zona meridionale sono interessate da rilevanti deformazioni, probabilmente legate all'azioni delle rampe laterali dei fronti appenninici più esterni: la base dell'Unità Idrostratigrafica B, infatti, si solleva e lo spessore si riduce rapidamente fino quasi ad annullarsi. Nella sezione $i=123$, nel settore settentrionale, viene riprodotta anche la porzione superiore del Gruppo Acquifero C.

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

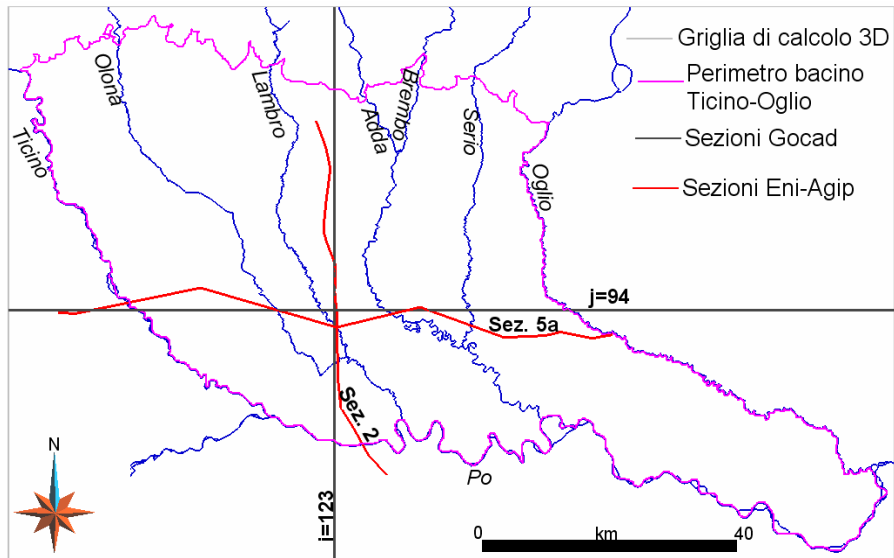


Figura 6.8 – Visione in pianta delle sezioni di Eni-Agip (in rosso) a confronto con le due corrispettive sezioni ricostruite in Gocad (in nero)

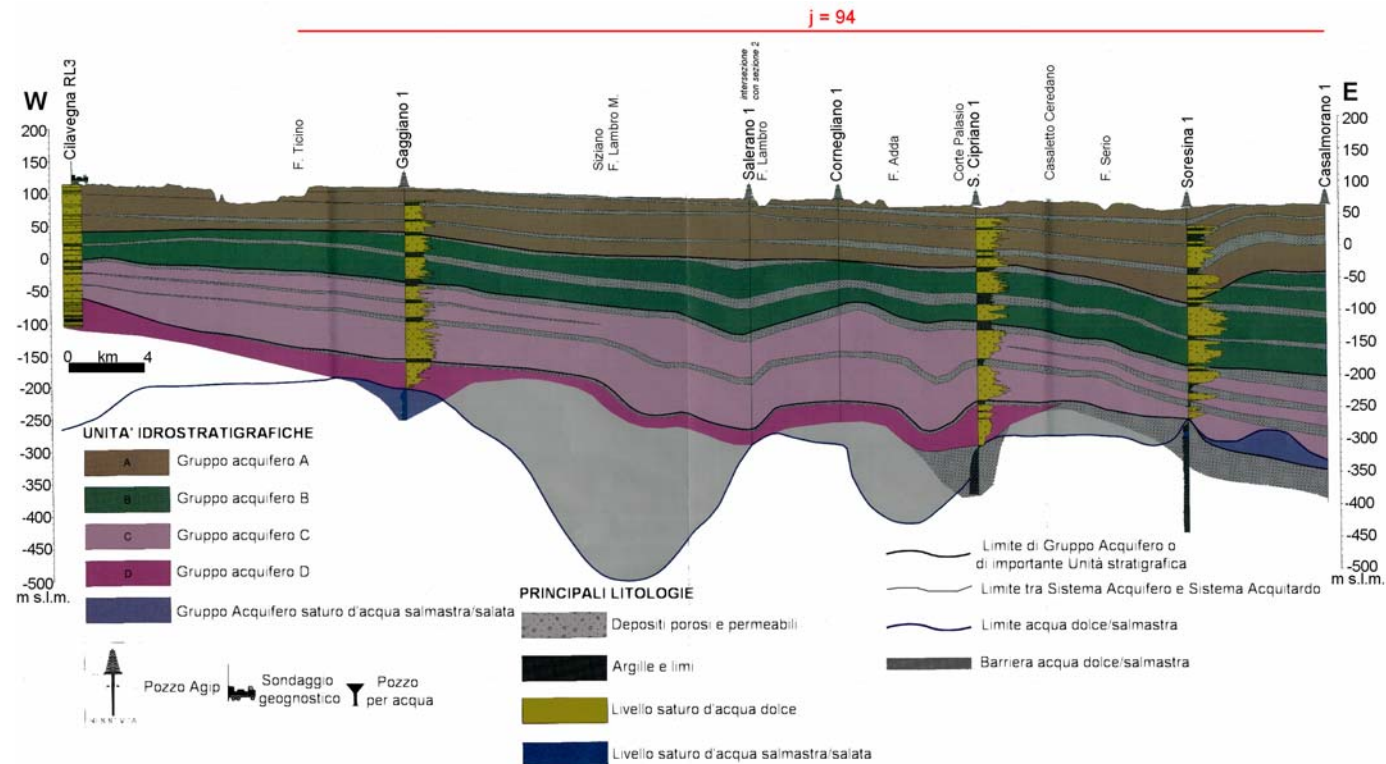


Figura 6.9 – Sezione 5a del lavoro di Regione Lombardia & Eni-Agip (2002): suddivisione del sottosuolo in base ai Gruppi Acquiferi. In rosso è riportata la lunghezza corrispondente della sezione j=94, realizzata tramite Gocad, visibile in figura 6.10



Figura 6.10 – Sezione Ovest-Est j=94, ricostruita in Gocad, relativa al sistema idrogeologico in esame

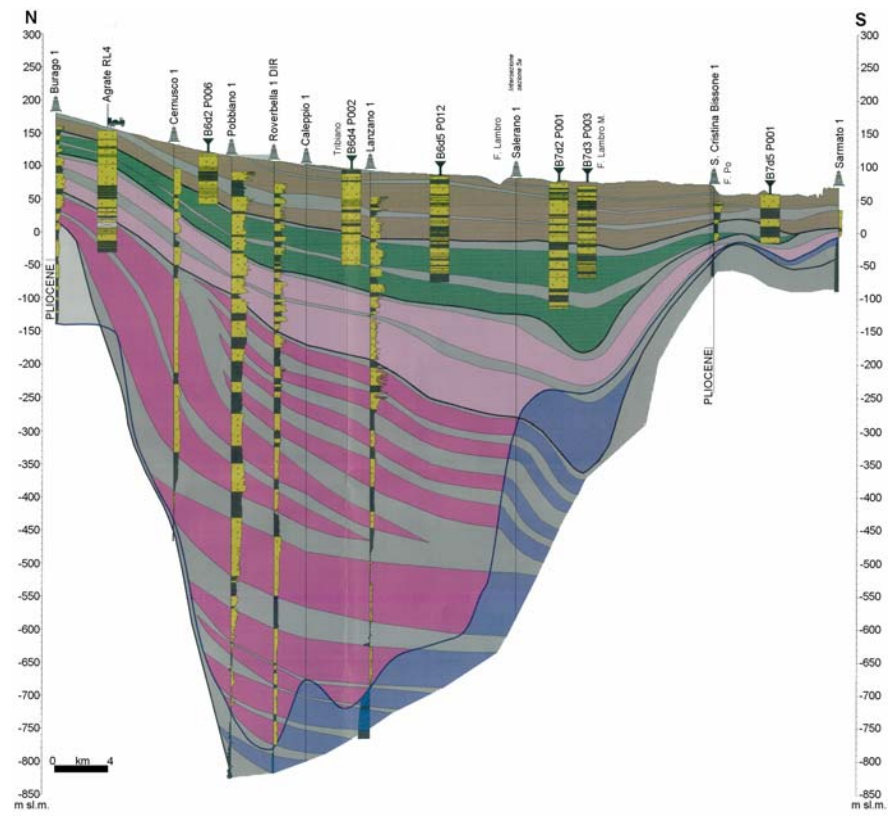


Figura 6.11 –Sezione 2 del lavoro di Regione Lombardia & Eni-Divisione Agip (2002): suddivisione del sottosuolo in base ai Gruppi Acquiferi. Per la legenda fare riferimento a figura 6.9

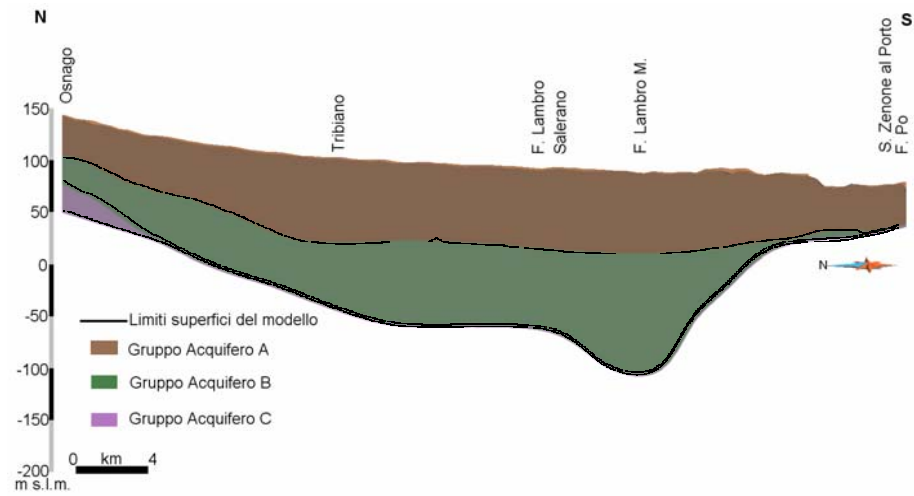


Figura 6.12 – Sezione Nord-Sud 123 (i= 123), ricostruita in Gocad, relativa al sistema idrogeologico in esame

6.2 Modellazione 3D del sistema idrogeologico

In questa fase del lavoro verrà simulato il volume dell'intero sistema idrogeologico in esame attraverso una griglia di calcolo 3D: questo è un passaggio fondamentale nell'ottica della realizzazione di un modello di flusso successivo e in relazione al processo di feedback iterativo descritto nel capitolo 3. Infatti, nel mondo di Modflow (software per il calcolo del flusso nel saturo, paragrafo 9.4) l'estensione e la discretizzazione della griglia, la stratificazione del sistema e delle proprietà entro e attraverso gli strati sono elementi fondamentali per la costruzione del modello di flusso. In particolare la stratificazione del sistema è importante perché all'interno di un singolo strato il movimento dell'acqua è solamente orizzontale; il movimento verticale, invece, viene simulato attraverso l'inserimento di molteplici strati ed è così possibile distinguere i diversi gradienti verticali (Feinstein, 2010).

Viene brevemente descritto il procedimento generale di costruzione di una griglia tramite Gocad.

La griglia (l'oggetto modellistico tridimensionale è denominato *SGrid*) viene creata in base alle dimensioni (estensione e quote) delle superfici limite del sistema che deve riprodurre: la griglia è inizialmente regolare, ossia tutte le celle in cui essa è discretizzata hanno le medesime dimensioni. E' di tipo cell-centered (Figura 6.13), ovvero il valore delle proprietà viene assegnato a centro cella. L'origine dell'*SGrid* (X_0, Y_0, Z_0) si trova in basso a sinistra; gli assi X, Y e Z sono denominati rispettivamente u, v e k e sono definiti da tre corrispondenti vettori *step_v*, *step_u* e *step_w*. Ogni asse è diviso in nodi, corrispondenti ai vertici di ciascuna cella, i cui indici sono *i* lungo l'asse X, *j* lungo l'asse Y e *k* lungo l'asse Z. La somma dei nodi lungo ogni asse è definita dai valori *nv*, *nu* e *nw*.

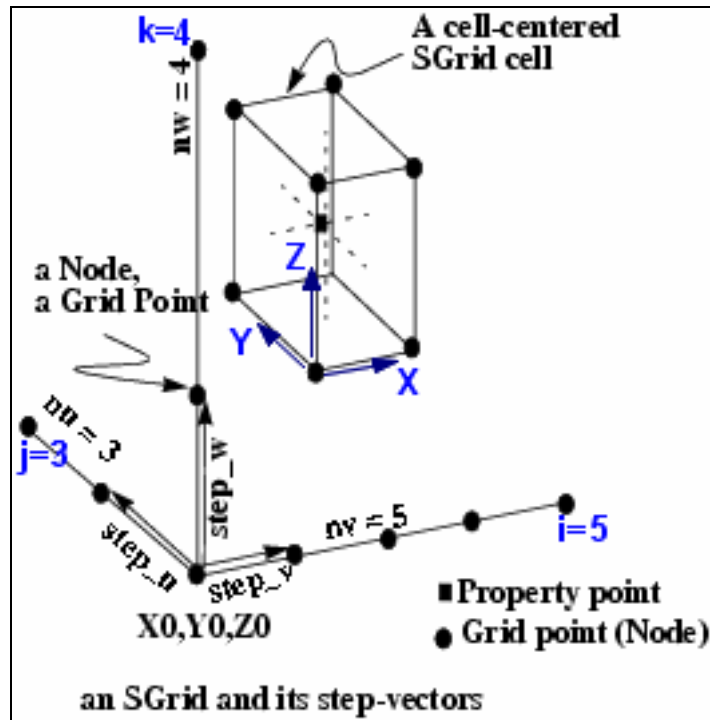


Figura 6.13 – Esempio grafico di un S-Grid object e i suoi componenti (Earth Decision 2.1, 2004, modificato)

La griglia simula un sistema reale e per renderla conforme alla morfologia delle superfici che la delimitano, le viene applicata una deformazione per adattarla ad esse. All'interno di Gocad esistono tre tipi di deformazione:

- 1- deformazione proporzionale a due superfici (gli strati risultano paralleli alle due superfici di controllo, Figura 6.14). Secondo questa deformazione le facce superiore e inferiore della griglia si adattano alle due superfici considerate. Le celle vengono proporzionalmente compresse o dilatate lungo la Z, per adattarsi o riempire lo spazio tra le due superfici. Il numero degli strati attivi rimane uguale a quello della griglia indeformata e costante in tutto il volume interessato;

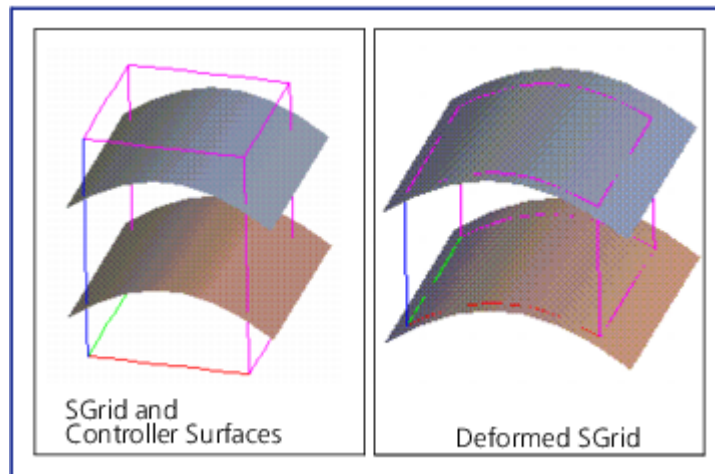


Figura 6.14 - Griglia deformata in modo conforme a 2 superfici, Top e Bottom (Paradigm, 2008)

- 2- deformazione rispetto ad una delle due superfici considerate e troncata rispetto all'altra (gli strati risultano paralleli ad una sola superficie, Figura 6.15). Secondo questa deformazione tutti gli strati che prima erano orizzontali, si adattano alla morfologia della superficie in base a cui avviene la deformazione (*Controller Surface*). Inoltre, questi vengono spostati sopra o sotto se la superficie guida costituisce rispettivamente il Bottom o il Top del sistema. La porzione della griglia che non si trova sopra o sotto la *Controller Surface* non viene deformata. Si può decidere di eseguire un taglio lungo l'altra superficie considerata (Figura 6.15 in basso): alcune celle vengono inattivate affinché le dimensioni della griglia si adattino al taglio; queste continuano ad essere fisicamente presenti, ma hanno spessore nullo e quindi non sono visibili. Il numero degli strati attivi diminuisce rispetto alla conformazione precedente il taglio, in modo variabile in base alla spessore intercorrente tra le due superfici e in base alla morfologia della superficie secondo cui è avvenuto il taglio;

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

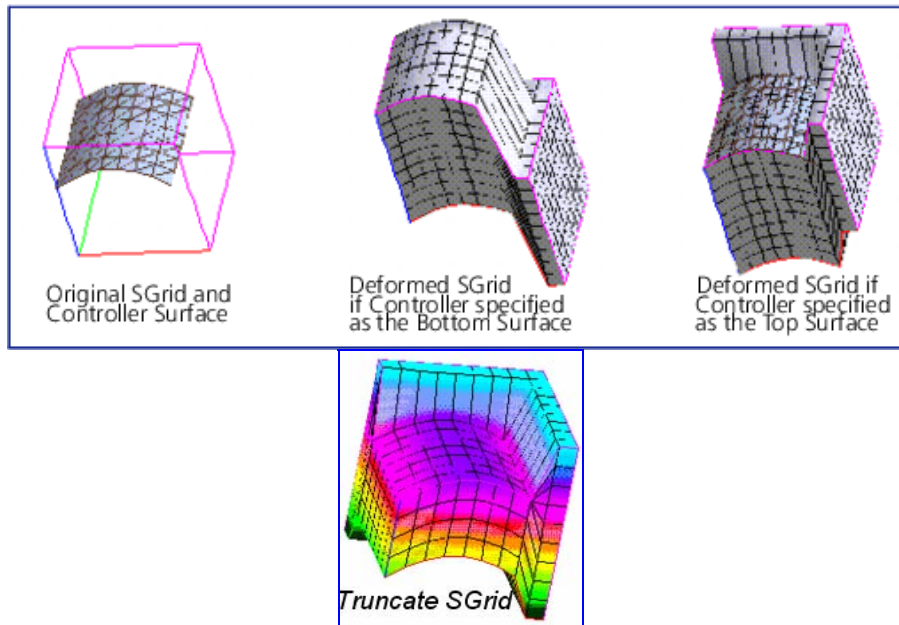


Figura 6.15 – Griglia deformata parallelamente ad una delle due superfici considerate, Top o Bottom (in alto), e tagliata rispetto all'altra (in basso) (Paradigm, 2008)

- 3- deformazione rispetto a molteplici superfici (gli strati risultano paralleli a 3 o più superfici). In Figura 6.16 a sinistra si vede la relazione geometrica tra le superfici considerate e la griglia indeformata; in mezzo viene mostrata la deformazione della griglia rispetto alle superfici Top e Bottom; infine a destra è proposta la conformazione della griglia dopo la deformazione rispetto a tre superfici. Non si può specificare secondo quale superficie viene modificato ciascuno strato, si tratta di un'operazione automatica del software. In questo modo si possono modellare diversi strati geologici all'interno di un'unica griglia.

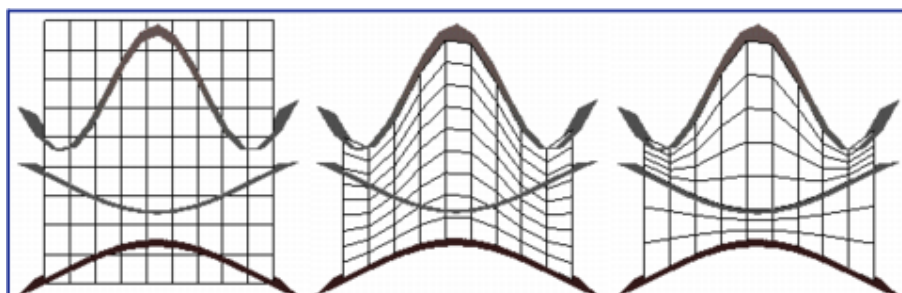


Figura 6.16 – Griglia deformata proporzionalmente a più superfici (Paradigm, 2008)

La scelta della deformazione varia a seconda della tipologia di evento geologico o deposizionale che si vuole riprodurre.

Al termine della deformazione viene individuata una regione (*Data*), completamente inscritta nella griglia, che ha un'estensione identica a quella dell'area di studio: al di fuori di essa qualsiasi valore non ha significato, questa porzione esterna è infatti considerata di *No Data*.

Per quanto riguarda l'area di pianura lombarda, compresa tra Ticino e Oglio (estensione areale pari a circa 6900 km²), in conformità con la reale suddivisione del sottosuolo secondo i Gruppi Acquiferi individuati da Regione Lombardia & Eni-DivisioneAgip (2002, figure 6.9 e 6.11), il sistema idrogeologico compreso tra superficie topografica e base del modello (paragrafo 6.1) è stato riprodotto attraverso la costruzione di tre griglie sovrapposte, corrispondenti ai Gruppi Acquiferi A, B e C, considerando per quest'ultimo solo la porzione superiore, relativa alla zona settentrionale dell'area di studio (come descritto nel paragrafo 6.1 e visualizzato attraverso le sezioni riportate nelle immagini 6.10 e 6.12). Le tre griglie sono state quindi denominate rispettivamente griglia A, B e C.

In Figura 6.17 viene mostrata la grigliatura indeformata e regolare dell'intero sistema idrogeologico in esame, compreso tra superficie topografica (perimetro in giallo) e base del modello (perimetro in grigio); frapposti tra i limiti superiore e inferiore sono riportati anche i perimetri delle superfici basali dei Gruppi Acquiferi A (in rosso) e B (in verde). L'intero blocco ha dimensioni pari a 166.5 km x 103.5 km x 1158 m.

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

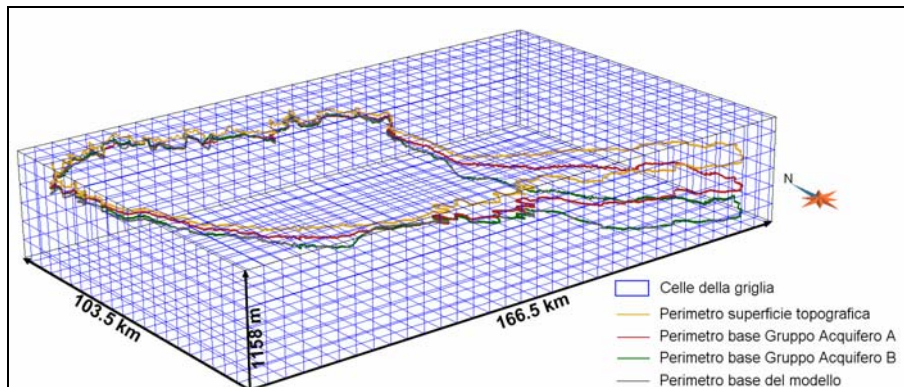


Figura 6.17 – Grigliatura indeformata del sistema idrogeologico indagato compreso tra superficie topografica (perimetro in giallo) e base del modello (perimetro in grigio). Vengono mostrati anche i perimetri delle superfici basale dei Gruppi Acquiferi A (in rosso) e B (in verde)

Come accennato in precedenza, la scelta delle dimensioni delle celle è in funzione dell'estensione dell'area di studio (scala regionale, scala provinciale, scala locale..), delle esigenze dell'utente, dello scopo finale per il quale viene realizzata la caratterizzazione e in base alla densità dei dati puntuali di input. In questo caso si tratta di un'indagine che ha lo scopo di caratterizzare un sistema idrogeologico a scala di bacino e di creare i dati di input per un modello di flusso relativo alla stessa area (capitolo 3); inoltre i dati stratigrafici sono distribuiti in modo disomogeneo e il DTM, da cui è stata estratta la superficie topografica del modello, ha una risoluzione pari a 250 m x 250 m. In base a queste premesse le dimensioni areali delle celle di ciascuna griglia sono state impostate a 500 m x 500 m, ritenendo non significativo un dettaglio maggiore. Sono state, quindi, ottenute 333 colonne x 207 righe (Tabella 6.1).

	MINIMO	MASSIMO	COLONNE/RIGHE	N° DI NODI
X	1469000	1635500	333	334
Y	4972000	5075500	207	208

Tabella 6.1 – Coordinate XY delle griglie A, B e C

6.2.1 Discretizzazione verticale delle tre griglie del modello

La scelta della discretizzazione verticale delle tre griglie è scaturita da un compromesso (Reilly & Harbaugh, 2004) tra diverse esigenze, guidate dallo scopo finale di realizzare una modellazione il

più fedele possibile alla reale conformazione dell'acquifero indagato e che possa essere la base per il modello di flusso successivo. Vengono elencati i criteri rispettati durante la realizzazione della discretizzazione verticale:

- mantenere all'interno della griglia un numero di celle totali non troppo elevato, che non crei problemi di calcolo nel modello di flusso successivo, impedendo il raggiungimento della convergenza. Il software utilizzato (Modflow) ottiene il massimo delle prestazioni con modelli costituiti da un numero di celle fino a circa 1 milione. Valori superiori potrebbero provocare errori o risultati incompleti. Per questo motivo un primo tentativo di discretizzazione dell'intero sistema in esame (107 strati in totale, suddivisi in 7'375'617 celle) era fallito, in quanto Modflow non era stato in grado di raggiungere la convergenza, ottenendo un errore non accettabile nella stima del bilancio di massa del sistema;
- assegnare un dettaglio verticale agli strati tale da poter individuare i livelli argillosi, importanti per la divisione tra un acquifero e l'altro. Lo spessore dei corpi a bassa permeabilità di una certa rilevanza è circa 10 m, quindi si cercherà di creare degli strati il cui spessore non superi questo valore;
- privilegiare il dettaglio della discretizzazione nella porzione superficiale dell'area di studio, rispetto a quella più profonda, e in quella settentrionale, rispetto a quella meridionale. I primi metri del sottosuolo sono interessati dalla ricarica ed è quindi fondamentale una precisa modellazione di essi per la corretta simulazione dell'infiltrazione e percolazione dell'acqua nelle falde, nell'ottica di modelli di flusso nel saturo e di percolazione nel non saturo. A Nord, in particolare, si verifica la maggior ricarica diretta dell'acquifero, grazie all'elevata permeabilità dei depositi superficiali; in questa zona, inoltre, la densità dei dati stratigrafici è più alta rispetto a quella meridionale. A Sud il flusso orizzontale è predominante rispetto a quello verticale, l'acquifero diventa più compartimentato, impedendo, a volte, lo scambio idrico tra falde: la ricarica avviene anche per infiltrazione da perdite da canali irrigui o per drenanza da falde a monte (Beretta et al., 1992; Gandolfi et al., 2007). Inoltre la quantità di dati stratigrafici è minore, pochissime stratigrafie, infatti, si approfondiscono oltre la superficie A (Figura 6.4).

Secondo queste premesse la discretizzazione e la deformazione di ciascuna delle tre griglie (A, B e C) sono state realizzate di volta in volta in maniera differente, come spiegato di seguito:

- griglia A, ricostruita tra superficie topografica e superficie basale del Gruppo Acquifero A, deformata rispetto alla base e troncata rispetto al top (Figura 6.15 e Figura 6.18 a sinistra);
- griglia B, ricostruita tra superficie basale del gruppo acquifero A e superficie basale del gruppo acquifero B, deformata parallelamente ad entrambe (Figura 6.14 e Figura 6.18 in mezzo);
- griglia C, ricostruita tra superficie basale del gruppo acquifero B e base del modello, deformata parallelamente al top e troncata rispetto alla base (Figura 6.15 e Figura 6.18, a destra).

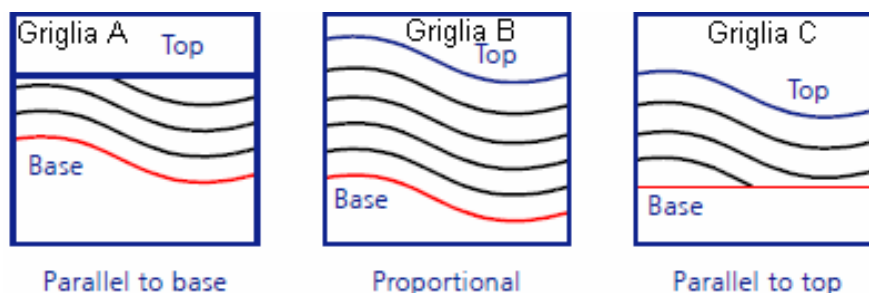


Figura 6.18 – Modellazione delle diverse tipologie di deposizioni, attraverso deformazioni della griglia di calcolo 3D (Paradigm, 2008)

Segue una dettagliata descrizione di ciascuna griglia.

Griglia A

I limiti verticali di questa griglia sono superficie topografica (Top) e base del Gruppo Acquifero A (Bottom).

La griglia regolare e indeformata è stata costruita (è stato utilizzato il comando *Grid_New_From_Corners*) in modo che al cui interno potessero essere iscritte le due superfici limite, le quote della griglia sono infatti comprese tra la quota massima del Top (443 m s.l.m. circa) e la quota minima del Bottom (-367 m s.l.m. circa). Lo spessore risultante di 810 m è stato suddiviso in 81 strati da 10 m ciascuno, per un totale di 2'136'861 celle, come riepilogato in Tabella 6.2.

	MINIMO	MASSIMO	STRATI	N° DI NODI
Z (m s.l.m.)	-367	443	81	82

Tabella 6.2 – Riepilogo della discretizzazione verticale della griglia A

Per riprodurre l'andamento delle sequenze stratigrafiche e gli effetti dell'erosione superficiale la griglia è stata deformata parallelamente alla Base A e troncata rispetto alla superficie topografica (*Grid_Tools_Initialize_Parallel to Top or Bottom*, secondo gli schemi mostrati in Figura 6.15 in mezzo e in Figura 6.18 a sinistra). E' stata creata una regione (*Data*) dalle dimensioni dell'area di studio, all'interno della quale verranno elaborati i dati puntuali.

Secondo quanto descritto nel paragrafo 6.2, la deformazione e il taglio applicati hanno rimodellato le celle e gli strati della griglia, adattandoli alla morfologia delle due superfici e provocando una variazione di spessore tra diversi settori della griglia: al di fuori della regione *Data* lo spessore delle celle è ovunque pari a 10 m, le celle in questa porzione non hanno subito né deformazione né alcun taglio. All'interno della regione *Data*, invece, varia tra 0 m e 10 m, in funzione del taglio: negli strati superficiali esistono moltissime celle a spessore nullo, il cui numero diminuisce con la profondità e procedendo verso Sud Sud-Est. In Figura 6.19 tramite la visualizzazione in pianta di una sezione orizzontale della griglia, viene rappresentato lo spessore delle celle nell'ottantunesimo strato, lo strato più superficiale: all'interno della regione *Data* lo spessore è ovunque uguale a zero (colore fucsia), sul bordo assume un valore di circa 6 m - 8 m (tra verde e giallo), nella regione di *No Data* è costante a 10 m (colore rosso). In Figura 6.20, rappresentante lo strato 39, in una piccola zona a Sud dell'area di studio compaiono le prime celle con spessore diverso da zero, all'interno della regione *Data*. Infine in Figura 6.21 (strato 20) nella parte a Sud-Est le celle hanno ormai tutte spessore uguale a 10 m, nella porzione settentrionale, invece, continuano ad essere prive di volume e lungo il perimetro e al centro della regione lo spessore oscilla tra 6 m e 8 m.

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

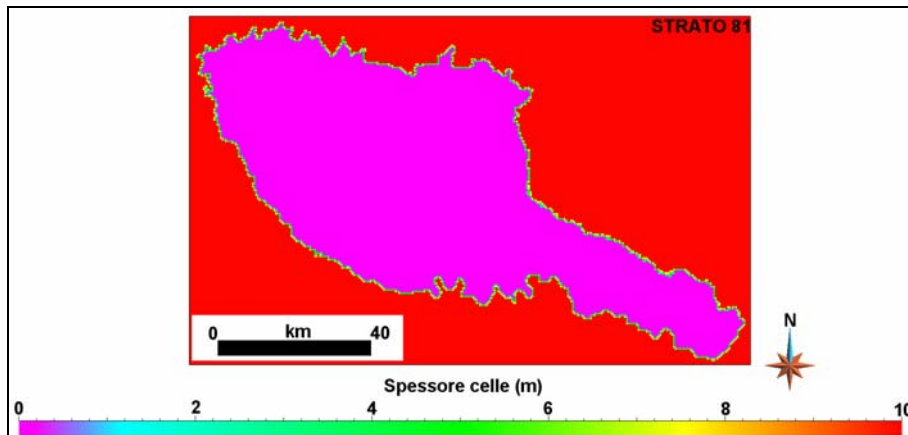


Figura 6.19 – Distribuzione dello spessore delle celle nello strato 81, il primo dall'alto

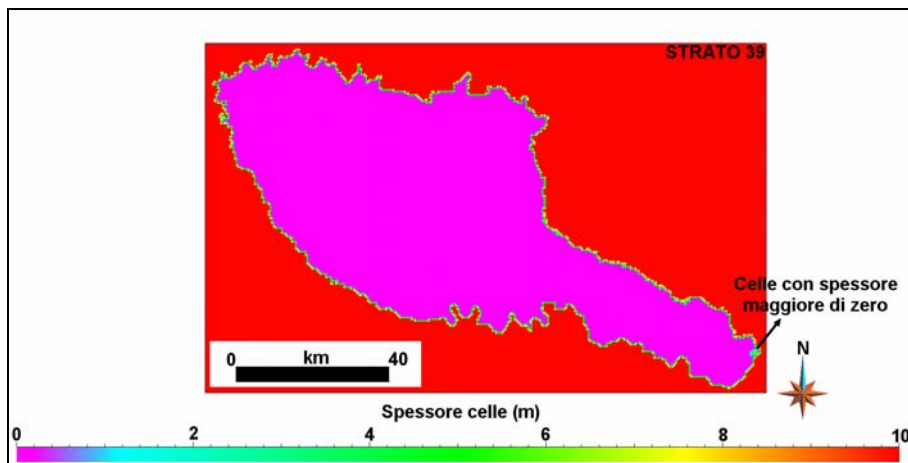


Figura 6.20 - Distribuzione dello spessore delle celle nello strato 39, il primo con qualche cella con spessore maggiore di zero

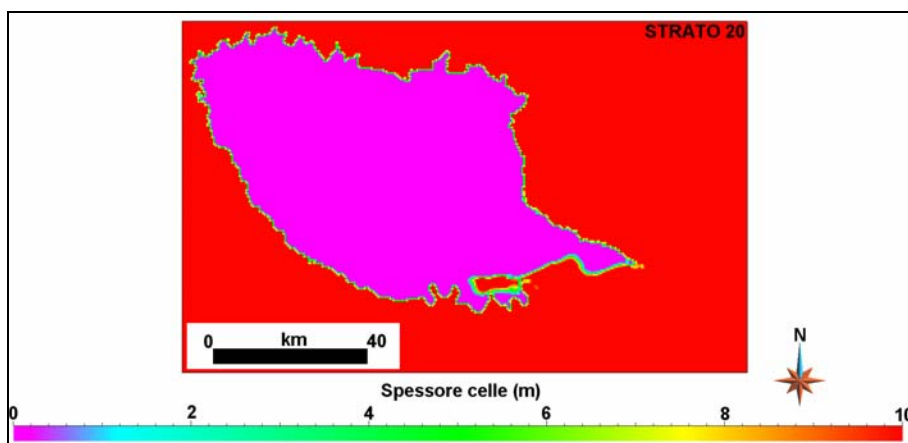


Figura 6.21 - Distribuzione dello spessore delle celle nello strato 20

Dall'analisi delle sezioni $i=110$ (figura 6.23) e $i=289$ (figura 6.25), che attraversano l'area di studio in direzione Nord-Sud, rispettivamente in una zona centro-occidentale e in una zona più piccola a Sud-Est (figura 6.22), si nota che esiste una discreta differenza tra lo spessore delle due: nel primo caso (figura 6.23) questo varia tra un minimo di circa 20 m e un massimo di circa 100 m, mentre in figura 6.25 lo spessore è compreso tra circa 230 m e 300 m.

Nella sezione $i=110$, al fine di adattare gli strati alla nuova configurazione della griglia, il taglio ha interessato uno spessore di griglia maggiore e, quindi, il numero di celle con volume pari a zero risulta essere molto elevato: su 81 strati solamente pochissimi, tra 2 e 10 (Figura 6.23), sono effettivamente attivi. Viceversa, nella sezione $i=289$ il taglio ha interessato uno spessore di griglia minore e, quindi, il numero di strati con volume superiore a zero è maggiore rispetto alla sezione $i=110$, esso varia tra 30 e 39 (figura 6.25).

Un dettaglio della sezione $i=110$ (figura 6.24) esemplifica meglio il fenomeno delle celle inattive superficiali: in entrambi i casi evidenziati, lo strato più superficiale corrisponde allo strato 81 (in nero), quello immediatamente sottostante (in rosso) corrisponde rispettivamente da destra a sinistra allo strato 3 e allo strato 5. Ciò significa che nel primo caso ci sono 78 celle sovrastanti con spessore pari a zero, nel secondo 76.

Infine nella sezione 289 (figura 6.25) le porzioni grigie laterali corrispondono a parte della regione di *No Data*, fuoriescono, infatti, dall'area di studio e costituiscono la griglia regolare indeformata (81 strati di 10 m di spessore ciascuno); spostandosi al centro della sezione si nota che la griglia, all'interno della regione *Data*, viene schiacciata.

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

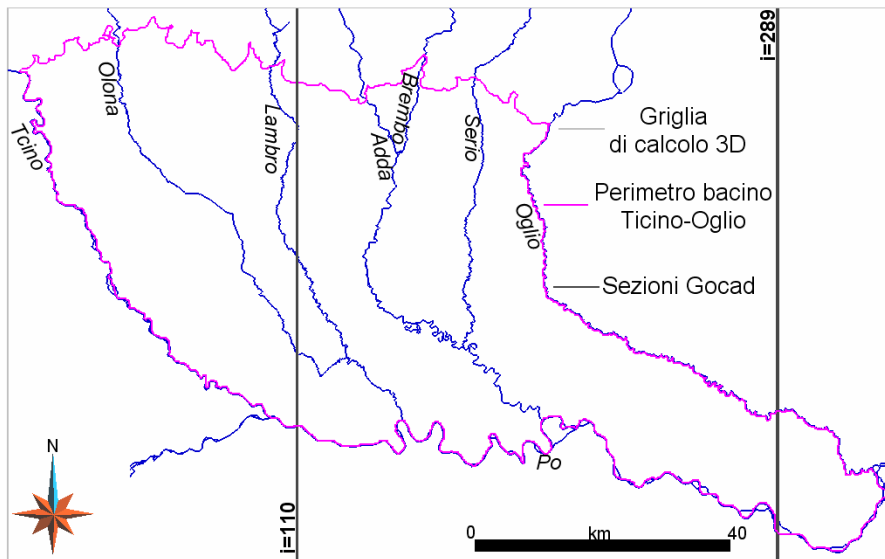


Figura 6.22 – Visione in pianta della griglia e delle due sezioni Nord-Sud: colonna 110 e colonna 289. In rosso è riportato il perimetro dell'area di studio

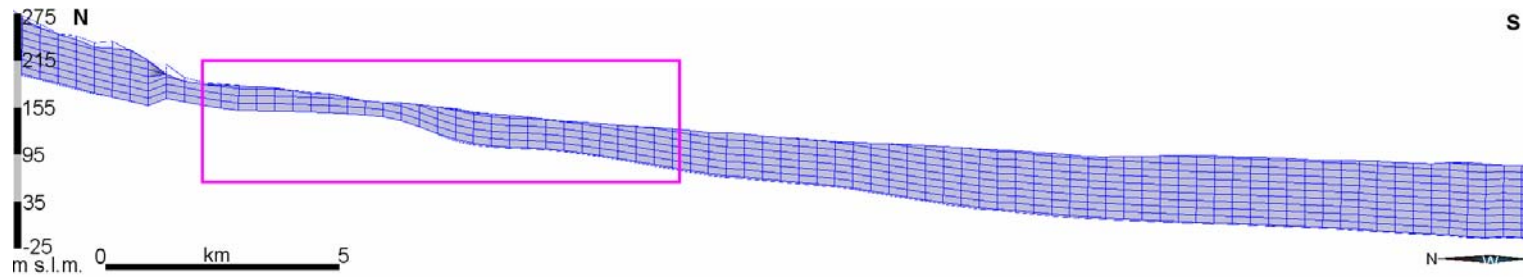


Figura 6.23 – Sezione Nord-Sud i=110: suddivisione in strati della griglia A, in fucsia la porzione illustrata in dettaglio in figura 6.24

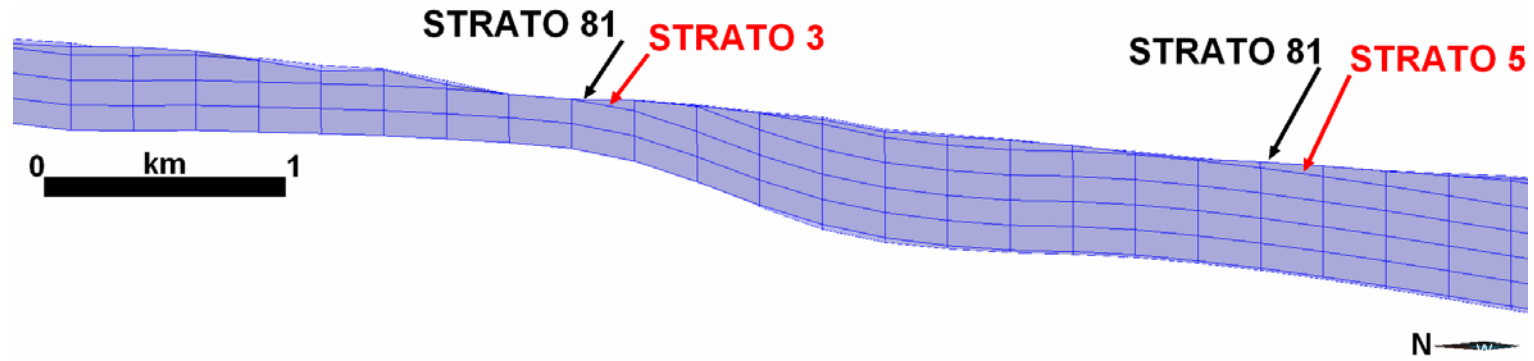


Figura 6.24 - Dettaglio della sezione Nord-Sud i=110 in figura 6.23

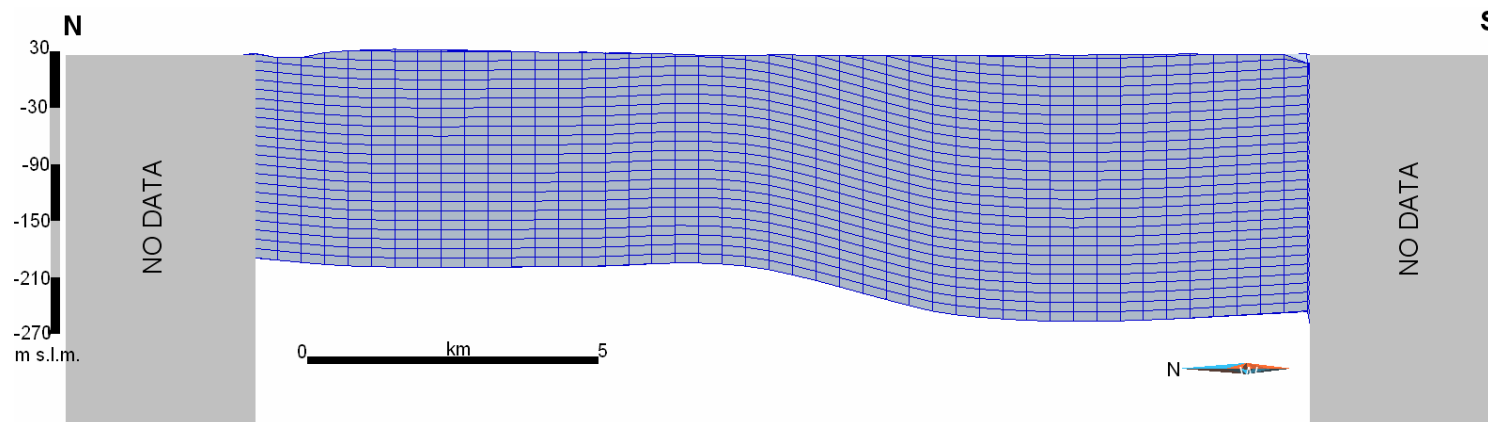


Figura 6.25 – Sezione Nord-Sud i=289. Sezione con in evidenza la suddivisione in strati della griglia A. Le porzioni laterali in grigio corrispondono a parte della regione di No Data, al di fuori dei limiti dell'area di studio

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

Queste celle a spessore pari a zero hanno lo stesso comportamento delle celle “pinched” di un modello di flusso: sono molto sottili, praticamente invisibili, ed ininfluenti sulla soluzione del modello; per tale motivo vengono escluse dalla regione *Data* in cui si realizzeranno le interpolazioni dei dati puntuali. Mentre in un modello di flusso, non potendo essere eliminate, viene assegnato loro uno spessore fittizio, ad esempio 0.2 piedi (Feinstein et al., 2010).

Secondo questa assunzione sono stati eliminati i 41 strati superficiali completamente privi di spessore nella regione *Data*, ottenendo una griglia di 39 strati (Tabella 6.3). Le celle a spessore nullo rimaste, nonostante la rimozione attuata, sono state sottratte alla regione: questa, quindi, ha uguale volume a quella originaria, ma numero di celle inferiore, ovvero 313,860.

COLONNE	RIGHE	STRATI	CELLE TOTALI	CELLE NELLA REGIONE DATA
333	207	39	2'688'309	313'860

Tabella 6.3 – Riepilogo delle dimensioni della griglia A finale

Griglia B

La griglia B è stata costruita considerando come Top la base del Gruppo Acquifero A e come Bottom la base del Gruppo Acquifero B, impostando uno spessore di 258 m, che corrisponde alla differenza tra la quota massima della Base A e la quota minima della Base B (Tabella 6.4).

	MINIMO	MASSIMO	STRATI	NODI
Z (m s.l.m.)	-367	-625	6	7

Tabella 6.4– Discretizzazione verticale della griglia B

Entrambe sono superfici deposizionali reali e la stratificazione dei sedimenti depositi nel tempo segue la loro giacitura. Per questo motivo è stata applicata alla griglia regolare una deformazione proporzionale ad entrambe (*Parallel to Top and Bottom*, Figura 6.14 e Figura 6.18 in mezzo).

Le celle della griglia hanno subito uno schiacciamento e/o una dilatazione in base allo spessore intercorrente tra le due superfici: a seguito della deformazione la griglia è suddivisa ovunque nello stesso numero di strati, 6, a spessore variabile in dipendenza dell'entità della deformazione subita. Quindi i 43 m di spessore, scelti per gli strati indeformati in modo da mantenere, dopo la deformazione, il dettaglio

dei 10 m di spessore nelle celle della porzione settentrionale dell'area di studio, ora oscillano tra 9 m e 1 m circa, dove lo schiacciamento è stato rilevante (zona settentrionale), e tra 50 m – 65 m, dove è accaduto l'opposto e si è verificata una dilatazione (zona Sud Sud-Est). Come detto in precedenza, questa differenza di spessore tra le due zone è giustificata dal fatto che nella zona meridionale pochissimi pozzi si approfondiscono oltre la Base A (Figura 6.4).

L'andamento dello spessore nei singoli strati in porzioni diverse dell'area di studio viene mostrata in Figura 6.26, con una visualizzazione da Ovest per apprezzare graficamente meglio le variazioni da Nord a Sud.

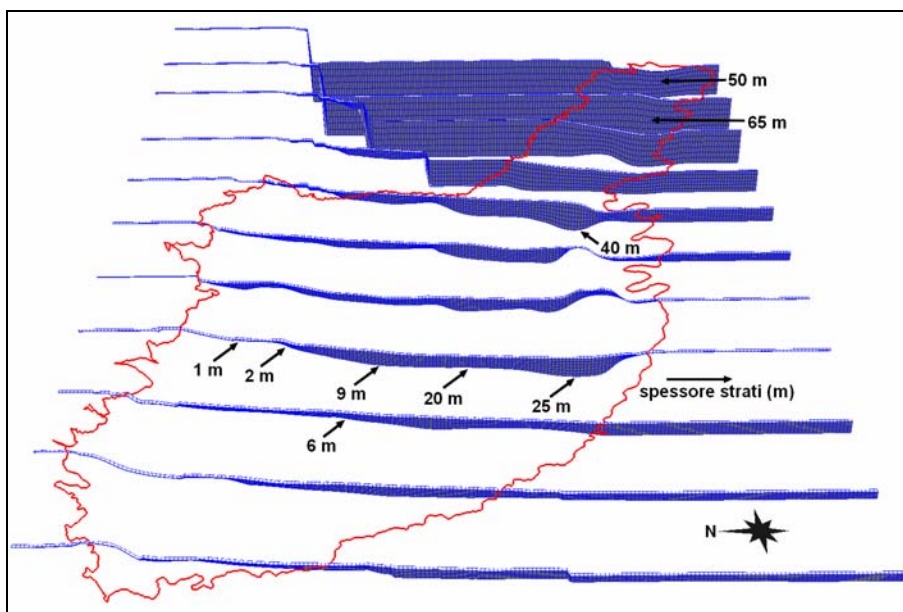


Figura 6.26 – Sezioni Nord-Sud della griglia B. In alcuni punti sono evidenziati gli spessori medi degli strati. In rosso è riportato il perimetro della regione *Data*

Nelle immagini 6.27 e 6.28 sono riportate le sezioni Nord-Sud $i=110$ e $i=289$ (visione in pianta Figura 6.22) in cui si può chiaramente notare la disparità di spessore degli strati tra zone diverse nell'area di studio, sia all'interno delle stessa sezione, sia tra sezioni diverse. Le due sezioni sono ugualmente composte da 6 strati ciascuna. Nella sezione $i=289$ sono ben visibili le porzioni laterali, corrispondenti alla regione di *No Data* (in grigio).

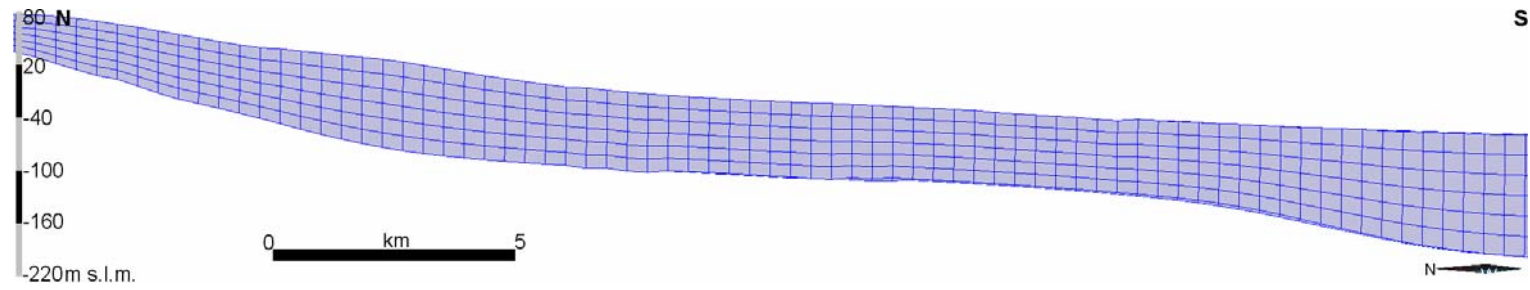


Figura 6.27 – Sezione Nord-Sud i=110 all'interno della griglia B

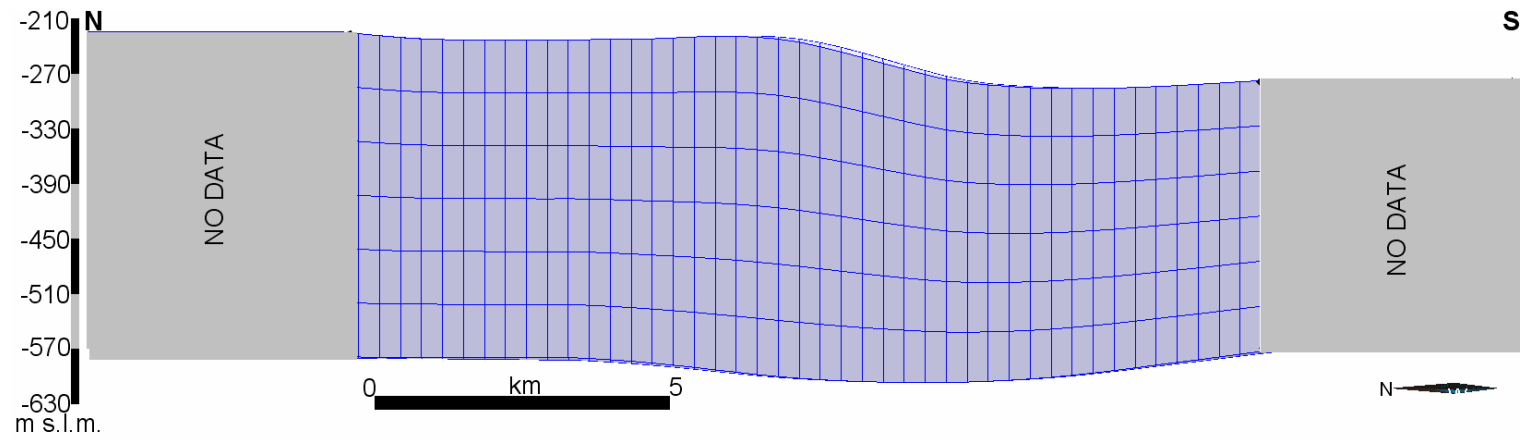


Figura 6.28 – Sezione Nord-Sud i=289 all'interno della griglia B

Nella Tabella 6.5, sotto riportata, sono elencate le dimensioni finali della griglia B:

COLONNE	RIGHE	STRATI	CELLE TOTALI	CELLE NELLA REGIONE DATA
333	207	6	413,586	157'908

Tabella 6.5 – Dimensioni finali della griglia B

Griglia C

La griglia C è stata costruita tra la superficie della Base B (Top) e la base del modello (Bottom).

Lo spessore della griglia regolare compreso tra la quota massima della Base B e la quota minima della base del modello è 90 m e, per potere ottenere uno spessore dei singoli strati pari o inferiore a 10 m, secondo i criteri elencati sopra, è stato suddiviso in 10 strati orizzontali di 9 m ciascuno.

L'andamento della deposizione dei sedimenti in questo settore del sottosuolo segue la giacitura della Base B; per questo motivo la griglia è stata deformata in modo conforme al Top del sistema (Figura 6.15 e Figura 6.18 a destra) e le è stato applicato un taglio secondo la base del modello.

Per permettere l'adattamento delle celle della griglia alla conformazione delle due superfici secondo cui è avvenuta la deformazione, il taglio ha modificato lo spessore delle celle, inattivandone molte vicino alla base del modello. L'immagine 6.29 mostra la conformazione della griglia dopo la deformazione subita: essa rispecchia l'andamento dello spessore tra le superfici limite, visualizzato in Figura 6.7. All'interno della regione *Data*, nel settore centro-meridionale e nell'estrema porzione settentrionale, la griglia ha uno spessore molto sottile rispetto al resto della regione (Figura 6.29, visualizzazione da Ovest per apprezzare meglio la variazione dello spessore della griglia in direzione longitudinale), esiste, infatti, solamente un unico strato attivo di mediamente 2 m. Nella fascia centro-settentrionale, invece, la griglia è suddivisa in media da 6 strati attivi.

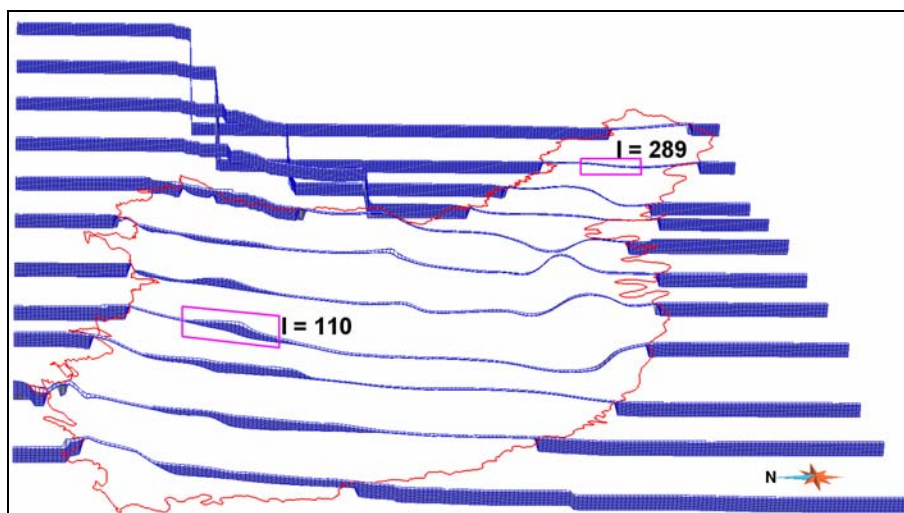


Figura 6.29 – Sezioni Nord-Sud della griglia C; in rosso è evidenziato il perimetro della regione *Data*

Questo comportamento è ben evidenziato nei dettagli delle sezioni $i=110$ (Figura 6.30) e $i=289$ (Figura 6.31) indicati in Figura 6.29 attraverso rettangoli fucsia.

Nella sezione $i=110$ (Figura 6.30) nel punto più spesso ci sono 7 strati attivi composti da celle di mediamente 9 m di spessore; in nero è evidenziato lo strato più profondo ($k=1$) e in rosso lo strato immediatamente sovrastante, lo strato 3: ciò significa che in quel punto c'è una cella schiacciata, quella corrispondente allo strato 2. Al contrario nella sezione $i=289$ (Figura 6.31) esiste un unico strato attivo ($k=9$), di spessore di circa 2 m; gli altri 8 sono schiacciati e hanno spessore nullo.

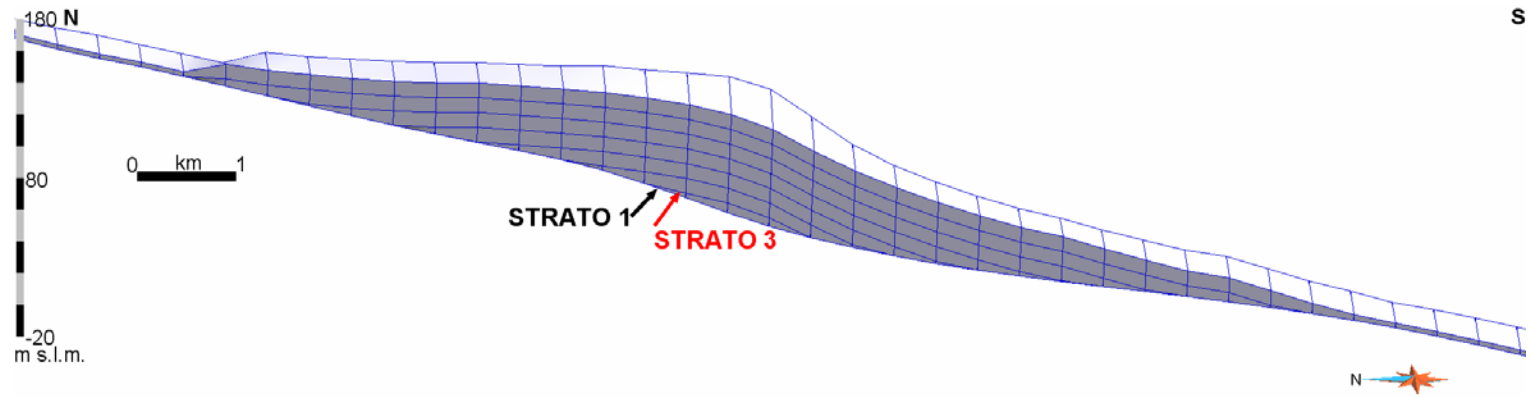


Figura 6.30 – Dettaglio della sezione Nord-Sud i=110

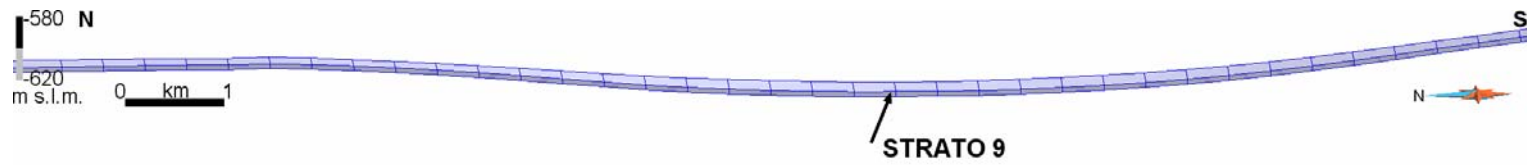


Figura 6.31 – Dettaglio della sezione Nord-Sud i=289

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

Come per la griglia A, gli strati completamente inattivi, caratterizzati da uno spessore nullo, sono stati eliminati: si tratta unicamente del primo strato dal basso ($k=1$); si è così ottenuta una nuova griglia con 9 strati. Le rimanenti celle inattive (187'223 celle, il 79% della regione *Data*) sono state sottratte alla regione *Data* (costituita da 236'862 celle), ricavando una regione costituita da 49'639 celle (Tabella 6.6), in cui verrà realizzata l'interpolazione dei dati puntuali.

COLONNE	RIGHE	STRATI	CELLE TOTALI	CELLE NELLA REGIONE DATA
333	207	9	620'379	49'639

Tabella 6.6 – Dimensioni della griglia C

6.2.2 Visualizzazione 3D dell'intero modello del sistema idrogeologico

Il sistema idrogeologico, riepilogando, è stato discretizzato secondo 3 griglie di calcolo corrispondenti ai Gruppi Acquiferi A, B e C (Regione Lombardia & Eni-Divisione Agip) e suddiviso in 333 colonne, 207 righe e 54 strati, per un totale di 3'722'274 celle (Tabella 6.7). Lo spessore e l'inclinazione degli strati dipendono dalla deformazione, ad essi applicata, rispetto alle superfici deposizionali delle basi dei Gruppi Acquiferi A e B e derivano dai tagli realizzati secondo la superficie topografica e la base del modello.

In totale la regione *Data* è costituita da 521'407 celle.

COLONNE	RIGHE	STRATI	CELLE TOTALI	CELLE NELLA REGIONE DATA
333	207	54	3'722'274	521'407

Tabella 6.7 – Dimensioni della discretizzazione dell'intero sistema idrogeologico

Per riassumere quanto descritto nel paragrafo precedente, lungo le sezioni Nord-Sud $i=110$ (Figura 6.32) e $i=289$ (Figura 6.33) si può apprezzare la discretizzazione verticale del sistema idrogeologico attraverso le tre griglie sovrapposte, visualizzate con colori differenti: rosso per la griglia A, blu per la griglia B ed infine verde per la griglia C (in nero sono riportati i limiti delle superfici che separano le griglie). L'ultimo strato di ciascuna griglia corrisponde al primo di quella sottostante. Le griglie A e B sono divise dalla superficie basale A, mentre le griglie B e C sono separate dalla superficie basale B. Secondo l'andamento dello spessore nell'intero sistema indagato

(Figura 6.6), si nota una differenza tra diversi settori dell'area di studio: nella sezione $i=110$ (Figura 6.32), che attraversa in senso longitudinale la porzione centro-occidentale dell'area di studio (ubicazione riportata in Figura 6.22), lo spessore aumenta verso Sud fino a un valore massimo di circa 250 m. Nella sezione $i=289$ (Figura 6.33), che percorre da Nord a Sud la porzione Sud-Est della provincia di Cremona (ubicazione riportata in Figura 6.22), lo spessore è più o meno costante e il valore massimo corrisponde a 630 m.

Nelle Figura 6.32 e Figura 6.33, in base alle esigenze elencate nel paragrafo 6.2.1, il dettaglio della discretizzazione verticale, infine ottenuta, è maggiore negli strati superficiali principalmente interessati dalla ricarica e nel settore settentrionale dell'area di studio, dove è concentrato il maggior numero di dati stratigrafici puntuali. Nella porzione Sud-Est, invece, i dati sono molto scarsi, in particolare pochissimi si approfondiscono oltre la base della griglia A, come mostrato in Figura 6.34.

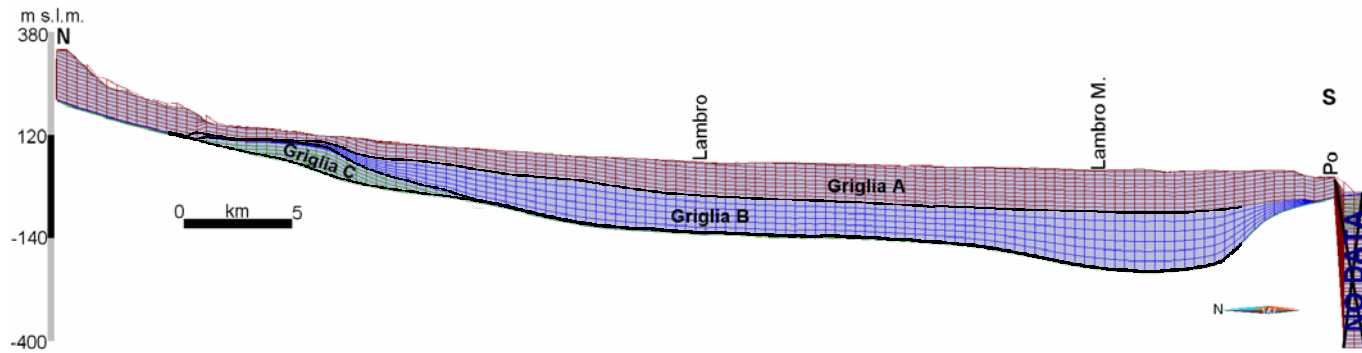


Figura 6.32 – Sezione Nord-Sud i=110. Discretizzazione delle 3 griglie sovrapposte: dall'alto verso il basso griglia A (in rosso), griglia B (in blu) e griglia C (in verde)

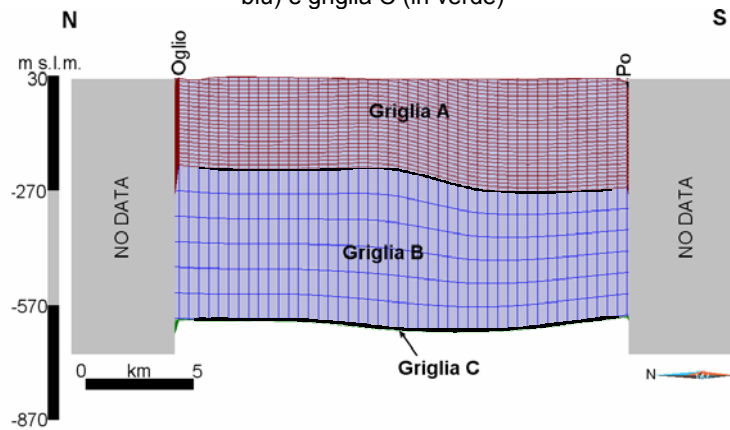


Figura 6.33 – Sezione Nord-Sud i=289. Discretizzazione delle 3 griglie sovrapposte: dall'alto verso il basso griglia A (in rosso), griglia B (in blu) e griglia C

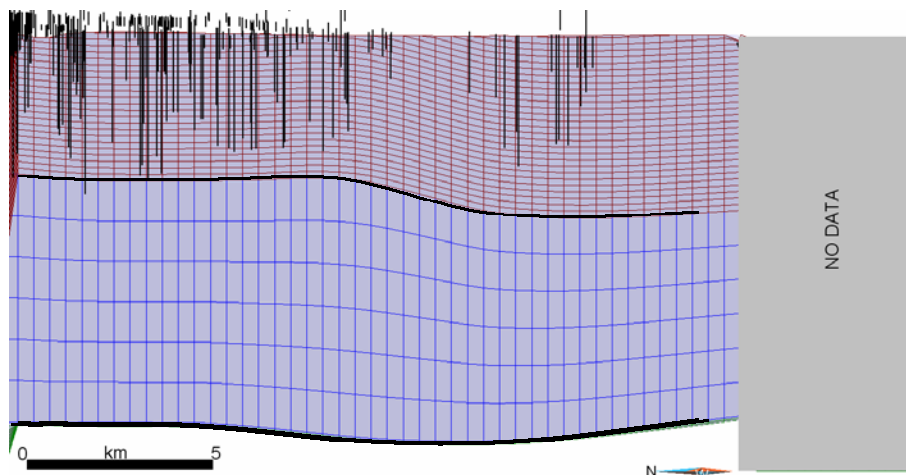


Figura 6.34 - Dettaglio sulla regione *Data* della sezione $i=289$. Le linee nere verticali rappresentano i dati puntuali: pochissimi si approfondiscono oltre la base della griglia A

6.3 Importazione e analisi dei dati puntuali stratigrafici nello spazio 3D di Gocad

Una volta definito l'assetto finale della struttura geologica da simulare attraverso la costruzione di griglie di calcolo, i dati stratigrafici puntuali sono stati estratti dalla Banca Dati (dettagli sul procedimento di estrazione sono forniti nel paragrafo 9.1), sottoforma di due set di punti XYZ, uno per le proprietà tessiturali e uno per i parametri idraulici, e sono stati importati nello spazio 3D di Gocad.

Le quote (Z) di ciascuno di essi derivano da una vuotatura di tutti i pozzi archiviati in Tangram rispetto al DTM, che, nonostante abbia una bassa risoluzione, costituisce una superficie di riferimento comune per tutti i dati puntuali.

In Figura 6.35 e nel relativo dettaglio nella porzione settentrionale dell'area di studio (Figura 6.36) si può vedere il pointset di dati puntuali estratti da Tangram proiettato tra la superficie topografica (in giallo) e la base dell'acquifero (in grigio), con una visione da Ovest: risulta evidente che nella porzione Sud Sud-Est dell'area di studio i dati non raggiungono la base del modello. Questo potrà risultare un problema nelle successive interpolazioni.

Al contrario nelle porzioni mediana e settentrionale, la profondità dei dati copre l'intero spessore del sistema in esame e, principalmente a Nord, in molti casi le colonne stratigrafiche superano la base del modello. Associata a ciascun punto è visualizzata, come proprietà, la conducibilità idraulica.

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

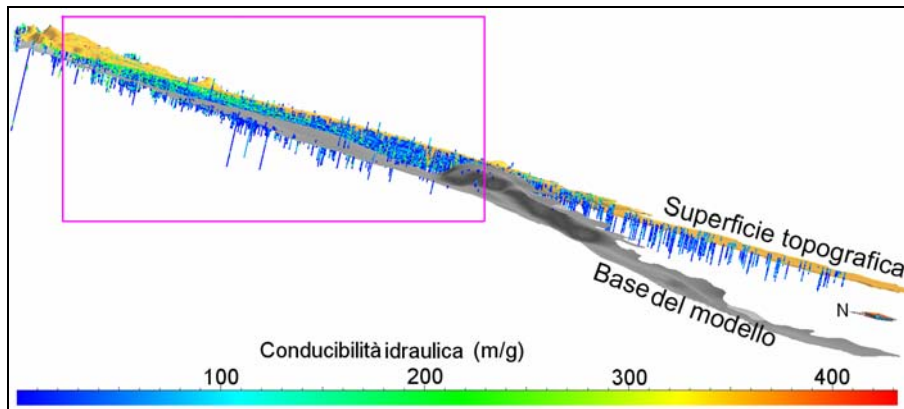


Figura 6.35 – Proiezione tra la superficie topografica e la base dell’acquifero dei dati puntuali estratti da Tangram. E’ visualizzata come proprietà associata la conducibilità idraulica

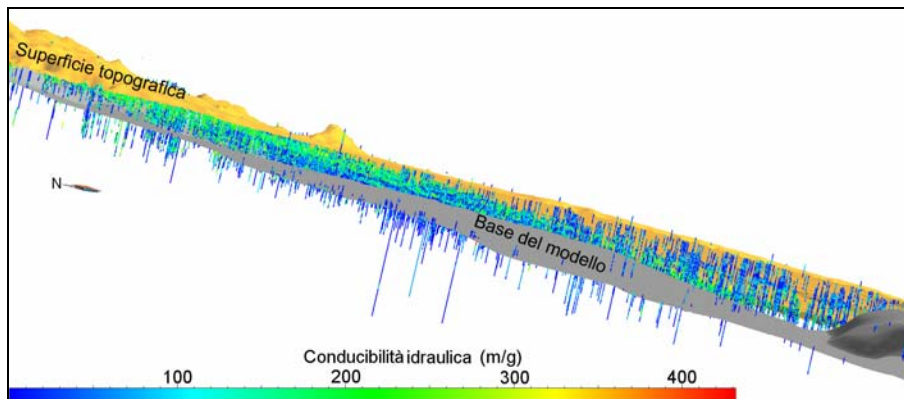


Figura 6.36 – Dettaglio della Figura 6.35, all’interno del rettangolo fucsia

Nei paragrafi 6.3.1 e 6.3.2 è riportata una breve analisi statistica relativa ai diversi sets di dati puntuali proiettati nello spazio 3D; nei paragrafi 6.3.5 e 6.3.6 viene esaminata la correlazione dei dati nello spazio, attraverso il calcolo di variogrammi per ogni proprietà.

6.3.1 Proprietà tessiturali: percentili e istogrammi

Le proprietà tessiturali considerate sono suddivise in materiali grossolani (trovanti, ciottoli, conglomerato, ghiaia e ghiaietto), medi (sabbia, arenaria e sabbia fine) e fini (limo, argilla e torba); la presenza di ciascuna litologia è espressa in percentuale rispetto alle altre due, secondo uno schema di pesi percentuali, descritto in dettaglio nel paragrafo 9.1. I valori sono compresi tra 0% e 100%, dove 0% indica l’assenza di una determinata litologia rispetto alle

altre, in una specifica zona. In totale sono stati estratti dalla Banca Dati e importati in Gocad 307'783 punti per ciascun gruppo tessiturale.

In Tabella 6.8 è riportata la suddivisione in percentili del range di valori percentuali assunti da ciascuna proprietà: essa fornisce un'indicazione sulla frequenza di distribuzione di queste percentuali nella porzione di sottosuolo indagata.

Relativamente a tutte e tre le tessiture si nota che il 25% dei punti ha valore pari a 0%. Il valore della mediana (Median) al diminuire della granulometria decresce (per i materiali grossolani si tratta di 40.095%, per quelli medi di 25.038% ed per i fini corrisponde a 0.0055%): ciò significa che i punti che assumono valori pari a 0% aumentano in modo inverso rispetto alla granulometria. Infatti per le litologie grossolane i punti che hanno valori nulli sono pari a 108'097, per quelle medie si tratta di 119'911 punti e per quelle fini di 161'140 punti.

Ad un altro 25% dei dati (compreso tra il 75th percentile e il massimo) sono attribuiti i valori percentuali compresi tra 70.049-100, 60.1181-100 e 60.1212 rispettivamente per termini grossolani, medi e fini: questo mostra che le percentuali tessiturali alte sono in generale piuttosto diffuse, se pur in maniera minore rispetto a quelle nulle. Inoltre questi dati statistici indicano che le percentuali grossolane alte dominano su quelle fini e medie.

	Termini Grossolani %	Termini Medi %	Termini Fini %
Minimum	0	0	0
25th percentile	0	0	0
Median	40.095	25.038	0.0055
75th percentile	70.049	60.1181	60.1212
Maximum	100	100	100

Tabella 6.8 – Percentili per le proprietà tessiturali

La distribuzione delle proprietà tessiturali può essere rappresentata anche da un istogramma in cui viene confrontata la frequenza delle percentuali di ciascuna litologia rispetto alle altre due: nell'immagine 6.37 viene visualizzata la relazione intercorrente tra classi percentuali tessiturali e il numero di punti che assumono valori compresi all'interno di queste stesse classi. L'istogramma descrive il comportamento nello spazio dei valori percentuali maggiori di 0%, ossia viene analizzata solamente la presenza di proprietà tessiturali:

per i materiali grossolani si tratta di 199'686 punti, per i medi di 187'872 punti e per i fini di 146'643 punti. In ogni classe percentuale dell'asse X, l'estremo minore è escluso, mentre è incluso l'estremo maggiore. Per una visualizzazione più chiara del trend, è stato anche deciso di isolare la classe 100% rispetto alle altre.

Bisogna tenere conto che i dati puntuali derivano da stratigrafie dislocate nell'area di studio in modo disomogeneo, sia lungo il piano X Y, sia lungo la verticale Z. Per questo motivo l'istogramma non può essere propriamente assimilabile ad un andamento gaussiano, che in natura descrive il comportamento della maggior parte dei fenomeni continui.

Dall'analisi dell'istogramma emerge che la frequenza più alta per i materiali grossolani e fini si verifica nella classe 100%, mentre per quelli medi nella classe 30%_40%. Ad esclusione delle classi percentuali 60_70 e 100, le tessiture grossolane dominano rispetto alle altre due nelle classi medio-alte. Le litologie medie, a differenza delle altre due, abbondano nelle classi percentuali medio-basse (dalla 10 esclusa alla 50 inclusa). La presenza dei termini fini, invece, è superiore rispetto alle altre due nelle sole classi 0%_10% e 100%, oltre a dominare nella classe 0%.

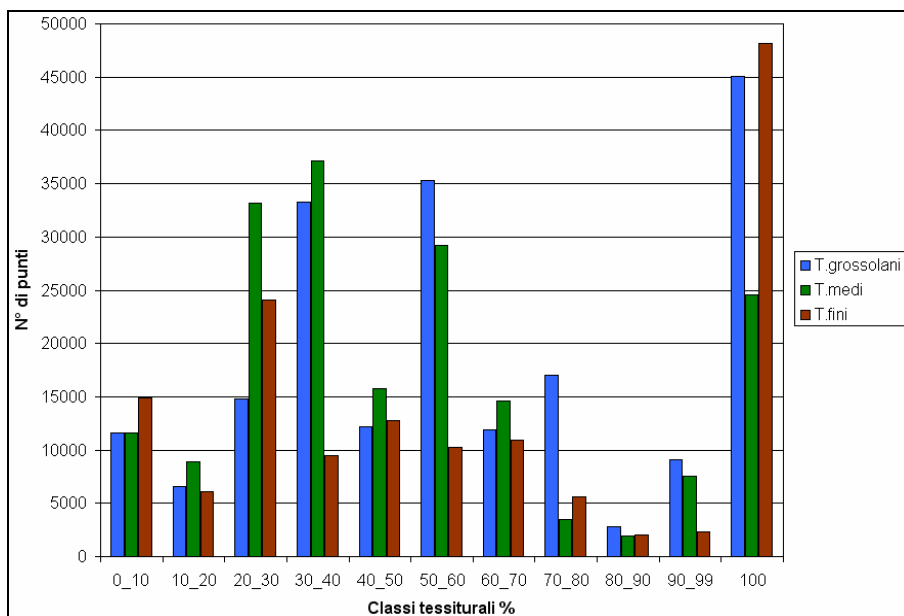


Figura 6.37 – Iistogramma di frequenza dei valori percentuali puntuali delle tessiture

L'andamento dell'istogramma di frequenza è anche influenzato dal procedimento con cui, attraverso pesi percentuali, vengono inserite e poi estratte dalla Banca Dati le caratteristiche stratigrafiche dei pozzi (vedi paragrafo 9.1). Questo condiziona, successivamente, l'aspetto del trend degli istogrammi dei parametri idraulici.

6.3.2 Parametri idraulici: percentili e istogrammi

I valori dei parametri idraulici (conducibilità idraulica e porosità efficace) si basano su valori di letteratura e vengono automaticamente assegnati a ciascun livello del sottosuolo in funzione delle percentuali tessiturali, di cui rappresentano una sintesi.

In totale, per ciascun parametro idraulico, sono stati estratti dalla Banca Dati e importati in Gocad 316'643 punti (il motivo della differenza con il numero dei punti per le proprietà tessiturali è spiegato nel paragrafo 9.1).

I valori puntuali di conducibilità idraulica nell'area di studio sono inclusi in un range molto ampio che varia tra 0.00864 m/g (permeabilità pari ad un'argilla) e 432 m/g (permeabilità uguale ai ciottoli).

Secondo le statistiche riportate in Tabella 6.9, circa il 50% dei punti (intervallo incluso tra minimo e mediana) assume valori compresi tra 0.00864 m/g e 20.5982 m/g, corrispondenti a solo il 17.6% del range di valori. All'altro 50% dei dati (intervallo incluso tra mediana e massimo) è attribuito il rimanente 82.4% dei valori (da 75.9051 m/g a 432 m/g). Questo significa che la distribuzione della frequenza dei valori di conducibilità idraulica non è omogenea all'interno dell'area di studio: i valori maggiori di 179.31 m/g, ma soprattutto quelli relativi alle litologie grossolane (tra 259.2 m/g e 432 m/g) sono presenti in quantità molto basse rispetto a valori di permeabilità decisamente inferiori (0.00864 m/g – 20.5982 m/g).

	Conducibilità idraulica (m/g)
Minimum	0.00864
25th percentile	20.5982
Median	75.9051
75th percentile	179.31
Maximum	432

Tabella 6.9 – Percentili per la conducibilità idraulica

Come per le tessiture, l'istogramma di frequenza della conducibilità idraulica (Figura 6.38) ha un andamento anomalo, a

causa della disomogeneità della distribuzione dei dati stratigrafici nell'area. Lungo l'ascissa del grafico sono riportate 28 classi di valori: per una visualizzazione più immediata è stata isolata la classe 0.00864 m/g e il restante range di valori è stato suddiviso in 27 classi omogenee da circa 16 valori ciascuna, in cui l'estremo minimo è escluso e l'estremo massimo è incluso.

La frequenza massima è raggiunta nella classe 64 m/g_80 m/g che comprende sabbie pure (conducibilità idraulica pari a 69.12 m/g) e sabbie mescolate a basse percentuali (5%) di litologie fini o litologie grossolane. Altri picchi relativi si trovano in corrispondenza della classe 0.00864 m/g (secondo la Figura 6.37 la frequenza della classe 100% dei materiali fini è molto alta), della classe 176 m/g_192 m/g (relativa ad esempio a litologie circa sabbiose con ciottoli), della classe 0.00864 m/g_16 m/g (corrispondente a materiali limoso-argillosi e materiali fini con bassissime percentuali sabbiose o ghiaiose) e della classe 144 m/g_160 m/g (relativa ad esempio a litologie sabbiose con ghiaia). Conducibilità idrauliche pari a litologie ghiaiose, ghiaiose con scarsa presenza di materiali fini o ciottoli (comprese tra 240 m/g e 272 m/g) hanno una frequenza discreta, al contrario dei valori relativi a tessiture ghiaiose ciottolose, ciottolose con poco materiale fine, ciottolose sabbiose e ciottolose pulite (da 320 m/g a 432 m/g) che sono presenti in quantità molto basse.

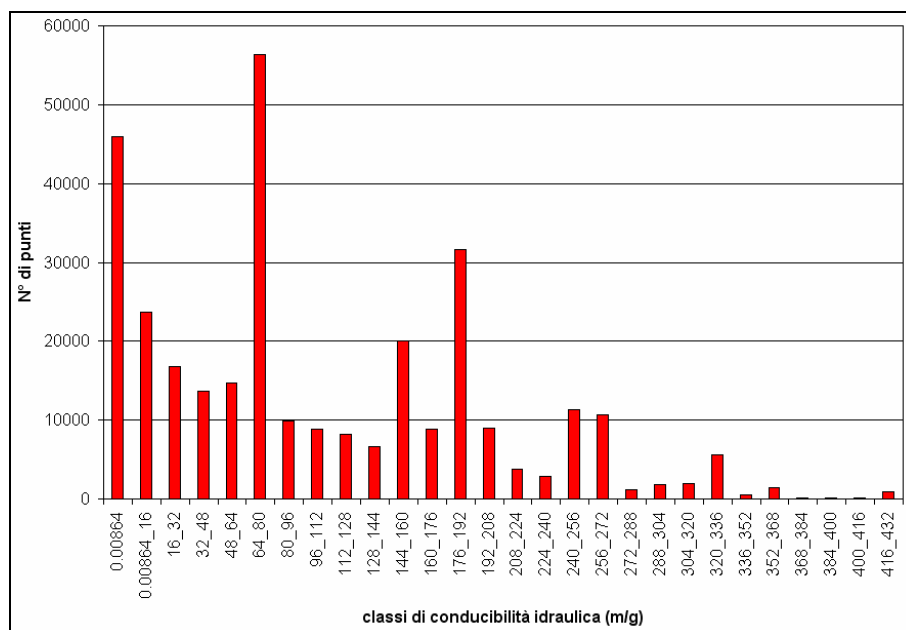


Figura 6.38 – Istogramma di frequenza dei valori puntuali di conducibilità idraulica

I valori percentuali di porosità efficace sono compresi tra un minimo di 4% (corrispondente alla porosità efficace di terreno di riporto e terreno vegetale) e un massimo di 28% (corrispondente alla porosità efficace dei ciottoli).

Il 25% dei dati puntuali (intervallo incluso tra il minimo e 25th percentile) assume valori compresi tra 4% e 11.9856% (pari alla porosità efficace di circa un'argilla con ghiaia o un limo con argilla); un altro 25% (intervallo compreso tra il 75th percentile e il massimo) ha valori compresi tra 20.9606% (corrispondente alla porosità efficace di una sabbia con ciottoli) e 28%. Ad un terzo 25% sono attribuiti i valori compresi tra 19.0053% (porosità efficace di circa una sabbia) e 20.9606% (Tabella 6.10). Ciò indica che gli estremi del range (minimo e massimo) sono poco frequenti all'interno dell'area di studio, al contrario di ciò che accade per i valori corrispondenti a porosità efficaci di sabbia e ghiaia.

	Porosità efficace %
Minimum	4
25th percentile	11.9856
Median	19.0053
75th percentile	20.9606
Maximum	28

Tabella 6.10 – Percentili per la porosità efficace

Secondo l'istogramma mostrato in Figura 6.39, la frequenza massima si trova, infatti, in corrispondenza del 22% di porosità efficace. Fatta eccezione per un picco relativo al 5% (porosità efficace di un'argilla) ed uno al 15% (porosità efficace di un limo), la frequenza più alta si registra in corrispondenza delle porosità efficaci di materiali a granulometria media (sabbia, arenaria) e grossolana (ghiaia, ghiaietto, conglomerato fessurato), ovvero corrispondenti all'intervallo 19%-22%, ad esclusione delle litologie ciottolose, i cui valori di porosità efficace si trovano in quantità ridotte.

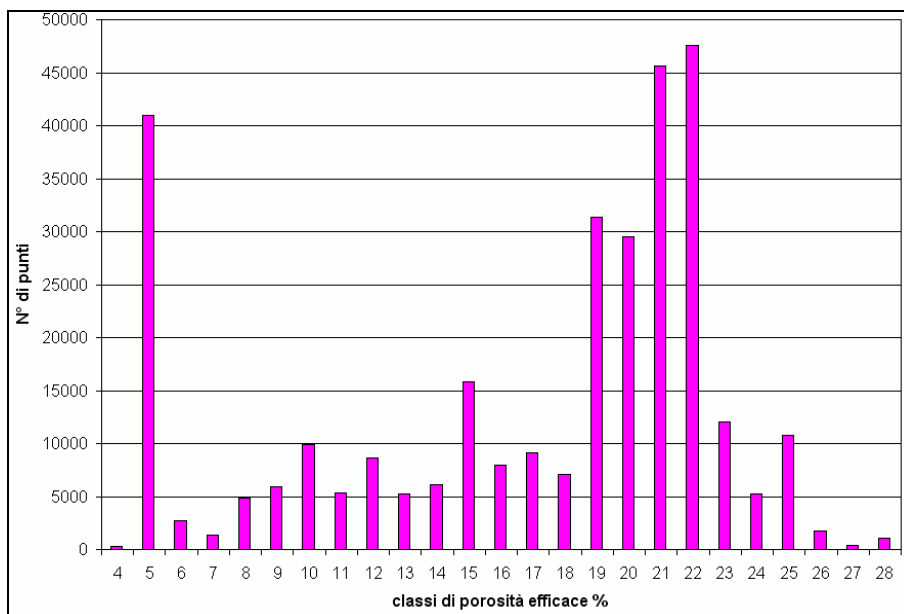


Figura 6.39 – Istogramma di frequenza dei valori puntuali di porosità efficace

6.3.3 Funzione variogramma

E' possibile ottenere informazioni relative alla variabilità spaziale dei dati puntuali e la correlazione tra essi attraverso il calcolo del variogramma. Questa funzione in Gocad viene poi utilizzata per l'interpolazione geostatistica dei dati puntuali in esame, attraverso il Kriging, come verrà descritto nel paragrafo 6.4.

Il variogramma sperimentale è un grafico che illustra la variabilità media fra i campioni (sottoforma di coppie di punti) verso la distanza che li separa; rappresenta, quindi, la misura quantitativa della loro correlazione spaziale (Ciotoli, 2007). Esso mostra l'andamento della correlazione dei valori del parametro indagato all'aumentare della distanza: solitamente all'aumentare di essa la correlazione diminuisce e contemporaneamente la variabilità cresce fino ad un valore massimo in corrispondenza di una determinata distanza; in questo punto il variogramma raggiunge un asintoto, la variabilità non cresce più e non esiste più alcuna correlazione tra i dati.

L'andamento del variogramma sperimentale viene matematicamente descritto da una funzione (il modello del variogramma) che meglio ne approssima il trend. Si tratta di una funzione tridimensionale con due variabili indipendenti (la direzione, θ , e la distanza di separazione, h , tra le coppie di punti) ed una

dipendente (il valore del variogramma γ). Realizzare un variogramma significa far fittare una curva matematica predefinita (come ad esempio una curva sferica, gaussiana, esponenziale o power) con il set di punti dal valore noto (Golden Software, 2002), così come viene mostrato in Figura 6.40.

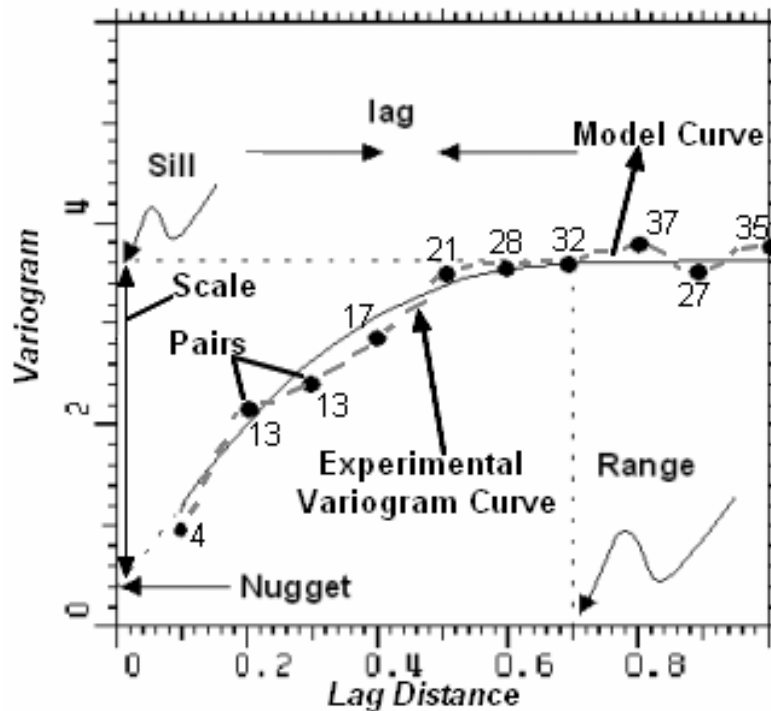


Figura 6.40 - Schema di un variogramma sperimentale teorico: in evidenza i parametri della funzione (Paradigm, 2008, modificata)

In Figura 6.40 è riportato un variogramma sperimentale costituito da gruppi di coppie di punti (PAIRS) separate da una specifica distanza (LAG WIDTH); a ciascun gruppo di coppie è infatti associato un valore medio di varianza. Nell'immagine accanto ad ogni punto è riportato il numero di coppie in corrispondenza di un determinato lag distance. Il variogramma sperimentale è approssimato tramite un modello teorico (MODEL CURVE): la curva cresce fino ad un certo valore di variabilità, dopo il quale, raggiunge un asintoto e non varia più. Ciò significa che da quel punto in poi all'aumentare della distanza la varianza delle coppie dei punti non cambia, rimane costante e non esiste più correlazione tra di esse. Il valore del variogramma in cui viene raggiunto l'asintoto è chiamato SILL, che è la somma del NUGGET EFFECT (quantificazione della variabilità ad una scala

molto bassa e dell'errore di campionamento) e della SCALE (la scala verticale dei componenti strutturali del variogramma). Il sill solitamente corrisponde alla varianza statistica dei dati puntuali. Il valore di lag distance in corrispondenza del sill è definito RANGE, ossia l'intervallo di distanza da cui non si riscontra più variabilità.

Come detto sopra, una delle variabili indipendenti di un variogramma è la direzione; è fondamentale poter individuare la direzione specifica lungo cui si ha la massima variabilità del fenomeno studiato. In un variogramma areale il calcolo avviene lungo direzioni espresse in gradi a partire da Nord in senso orario (Azimuths), all'interno di un dominio ellissoidale (Figura 6.41).

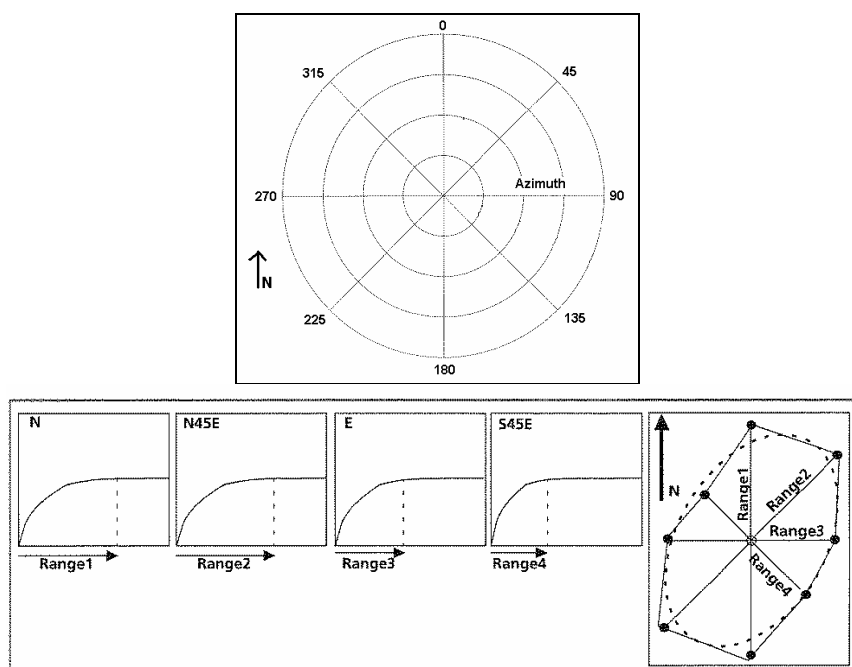


Figura 6.41 – In alto, posizione degli Azimuths nello spazio e in basso, esempio di variogrammi direzionali (*Paradigm, 2008*)

Il software 3D Gocad, calcola un variogramma sperimentale per ciascuno degli 8 azimuths principali (0, 30, 45, 60, 90, 120, 135 e 150, posizionati secondo lo schema mostrato in Figura 6.41). Se si conoscono le principali direzioni di deposizione dei sedimenti, è consigliabile concentrarsi sul variogramma lungo gli Azimuths corrispondenti a quelle direzioni. Il modello teorico che viene utilizzato nell'interpolazione è solamente uno, perciò è più significativo riprodurre quello che approssima con più precisione la direzione di

deposizione (Paradigm, 2008): ad esempio, relativamente al bacino Ticino-Oglio, si tratta della direzione di scorrimento dei fiumi principali, ossia Nord-Ovest Sud-Est, che in termini di Azimuths significa 120, 135 e 150, con i corrispettivi complementari 300, 315 e 330.

6.3.4 Calcolo del variogramma in Gocad

A seguito di diverse prove, tra le varie opzioni fornite da Gocad, la scelta è ricaduta su un *Areal variogram* con *XYW transformation using Top Horizon and Bottom Horizon*, dove *Top Horizon and Bottom Horizon* sono rispettivamente la superficie topografica e la base del modello; ciò significa che i punti esterni a questi due limiti non vengono utilizzati per le successive elaborazioni.

Dal punto di vista tecnico una *XYW transformation* indica che le due superfici prese in considerazione definiscono l'intervallo di Z (quota) per ogni punto XY dato e che questo intervallo, in seguito, viene definito come il range normalizzato W (0,1): le coordinate Z per ciascun punto vengono, quindi, sostituite da valori di W. Nel calcolo del variogramma areale i dati vengono suddivisi in strati paralleli alle due superfici considerate e tutte le distanze correlate vengono espresse in unità XY. La trasformazione XYW viene utilizzata per griglie rettangolari, in cui gli strati non siano piatti, bensì curvi (Figura 6.42 a destra). La stratificazione è conforme alle superfici limite che vengono considerate (Top e Bottom Horizon). Questo processo si addice alla struttura del sistema in esame: gli strati della griglia sono curvi, conformi alla morfologia e alla giacitura di superfici limite che indicano il senso di deposizione dei sedimenti. Al contrario, con l'utilizzo della trasformazione XYZ (figura 6.42 a sinistra), relativamente al caso di studio, dati non appartenenti allo stesso strato potrebbero essere erroneamente correlati, provocando risultati privi di senso nell'interpolazioni successive.

Infine, scegliendo un *Areal variogram* il software realizza una specie di appiattimento della stratificazione lungo superfici parallele agli assi della griglia di calcolo, lungo la direzione W, e il calcolo del variogramma avviene quindi in un ambiente bidimensionale. Questo tipo di approssimazione può essere considerata coerente con la struttura idrogeologica indagata, in quanto il sottosuolo è costituito da depositi fluvio-glaciali depositatisi secondo orizzonti stratificati.

Il concetto chiave di queste operazioni è trasformare tutto in un mondo in cui gli oggetti siano rettilinei e poi riportarli nuovamente ad una rappresentazione coerente con il mondo reale (Cheng, 2002).

Il variogramma 2D risulta, anche, più veloce e più preciso di quello 3D (Paradigm, 2008).

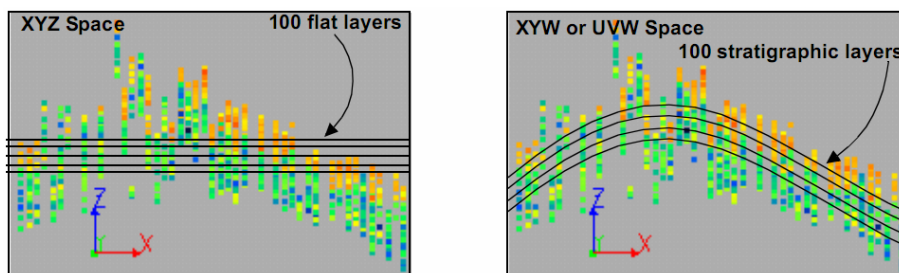


Figura 6.42 – Come un set di dati 3D viene stratificato durante il calcolo di un variogramma areale (a sinistra in ambiente XYZ e a destra in ambiente XYW) (Cheng, 2002)

6.3.5 Analisi dei variogrammi sperimentali

E' stato calcolato un variogramma sperimentale tra la superficie topografica e la base del modello per ciascuna proprietà (percentuali dei materiali grossolani, medi e fini, conducibilità idraulica e porosità efficace) ed applicato in ugual modo alle 3 griglie. Come riportato nel paragrafo precedente, la modellazione dei variogrammi sperimentali è avvenuta lungo gli Azimuths 120, 135 e 150 (direzione Nord-Ovest Sud-Est), nelle immagini seguenti (figure 6.43, 6.44, 6.45, 6.46 e 6.47) si può infatti notare come gli andamenti lungo gli Azimuths sopra elencati, siano decisamente più significativi rispetto agli altri.

Dall'analisi dei variogrammi sperimentali (figure 6.43, 6.44, 6.45, 6.46 e 6.47) realizzati per ogni proprietà idrogeologica (tessiture e parametri idraulici) si riscontrano delle caratteristiche comuni, di seguito elencate:

- ✓ gli andamenti differiscono tra una direzione e l'altra (Azimuth), ciò significa che rappresentano un fenomeno anisotropo; in tal modo è, infatti, considerata l'eterogenea distribuzione dei depositi nel sottosuolo indagato;
- ✓ i valori dei nugget effect sono alti: ciò, come per la maggior parte dei fenomeni geologici, è indice di un comportamento discontinuo del fenomeno in esame. Se un valore di $\gamma(h)$ non tende a zero per $h = 0$, si parla di variabilità a piccole distanze, in cui la variabile

risulta essere molto irregolare (Ciotoli, 2007). La causa potrebbe essere dovuta in parte all'elevata eterogeneità dei depositi fluvio-glaciali e in parte a qualche errore di interpretazione delle colonne stratigrafiche in fase di campionamento e archiviazione;

- ✓ ad esclusione dell'Azimuth 90, lungo cui è visibile un comportamento anomalo, completamente diverso dalle altre direzioni, i variogrammi sperimentali possono indicativamente essere suddivisi in due insiemi in base ai valori di range e sill. Del primo gruppo fanno parte i grafici lungo le direzioni 120, 135 e 150, nel secondo, invece, ricadono i variogrammi lungo gli Azimuth 0, 30, 45 e 60. Ciò identifica un fenomeno con proprietà direzionali (range diversi, anisotropia geometrica) e legato a depositi stratificati (sill diversi, anisotropia zonale) (Ciotoli, 2007), come, effettivamente, si verifica nella realtà del sistema indagato;
- ✓ in entrambi i gruppi l'oscillazione dei punti dei variogrammi sperimentali e, in alcuni casi, il decremento di γ in corrispondenza dei valori massimi di lag distance è probabilmente imputabile alla distribuzione disomogenea dei dati puntuali di input sia in direzione orizzontale, sia lungo la verticale;
- ✓ nel primo gruppo (direzioni 120, 135 e 150) tendenzialmente i valori di sill e range sono maggiori rispetto al secondo gruppo; questo significa che lungo questi Azimuths la variabilità dei dati è più elevata e che i valori sono correlabili per grandi distanze, aspetto che in generale è preferibile. Per ogni proprietà, inoltre, i valori di soglia (sill) superano i valori di varianza statistica dei rispettivi dati puntuali di input: se esiste un valore di soglia, esso generalmente corrisponde alla varianza statistica dei dati (Deutsch Calyton, 2002). Nel presente studio si è scelto di utilizzare valori alti di sill, superiori alla varianza dei dati puntuali, prediligendo un'elevata variabilità delle coppie di punti.

I variogrammi sperimentali dei termini grossolani e medi crescono gradualmente (Figura 6.43 e Figura 6.44), superando i valori di varianza statica dei dati puntuali (rispettivamente 1411.66 e 1101.13, Tabella 6.11), ad eccezione dell'Azimuth 90 per i materiali grossolani.

Anche per i termini fini la variabilità cresce oltre il valore di varianza statistica (1464.02) lungo le direzioni 90, 120, 135 e 150; al contrario ne è inferiore per gli Azimuth 0, 30 45 e 60 (Figura 6.45).

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

Per tutte le tre proprietà il numero di coppie di dati analizzati lungo le direzioni 0, 30, 45, 60 e 90 è decisamente inferiore rispetto agli altri Azimuth: non supera mai circa 9 milioni di coppie, contro gli oltre 14 milioni per la direzione 120, più di 11 milioni lungo l'Azimuth 135 e oltre 13 milioni per l'Azimuth 150.

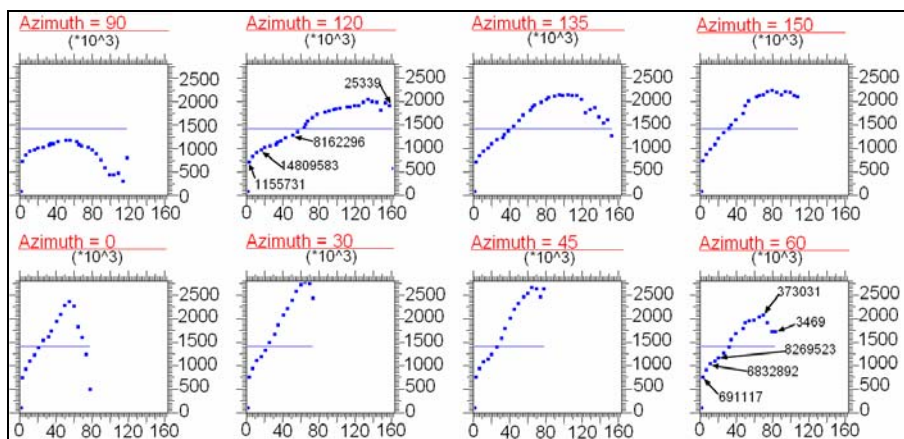


Figura 6.43 - Variogramma sperimentale dei **termini grossolani**. La linea blu corrisponde alla varianza dei dati puntuali

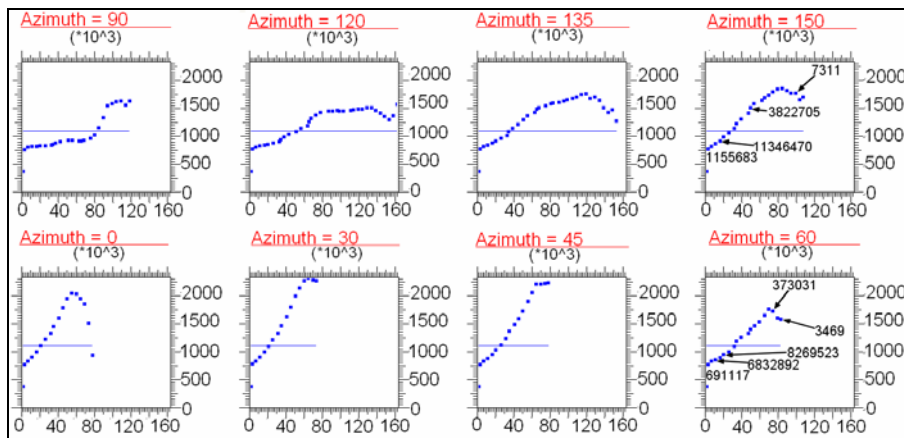


Figura 6.44 - Variogramma sperimentale dei **termini medi**. La linea blu corrisponde alla varianza dei dati puntuali

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

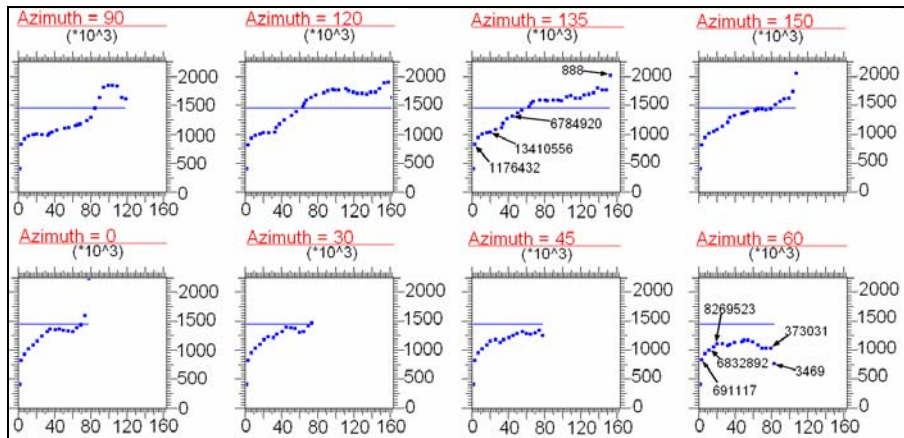


Figura 6.45 - Variogramma sperimentale dei **termini fini**. La linea blu corrisponde alla varianza dei dati puntuali

I variogrammi sperimentali per la conducibilità idraulica proseguono oltre il valore di varianza statistica (8535.61), ad eccezione per quello lungo l'Azimuth 90, che è totalmente più basso, e per quello lungo la direzione 60 che ne è solamente tangente (Figura 6.46). Il nugget effect è di circa 4800 e, soprattutto lungo l'Azimuth 120, il variogramma mostra una spiccata crescita della variabilità per grandi distanze.

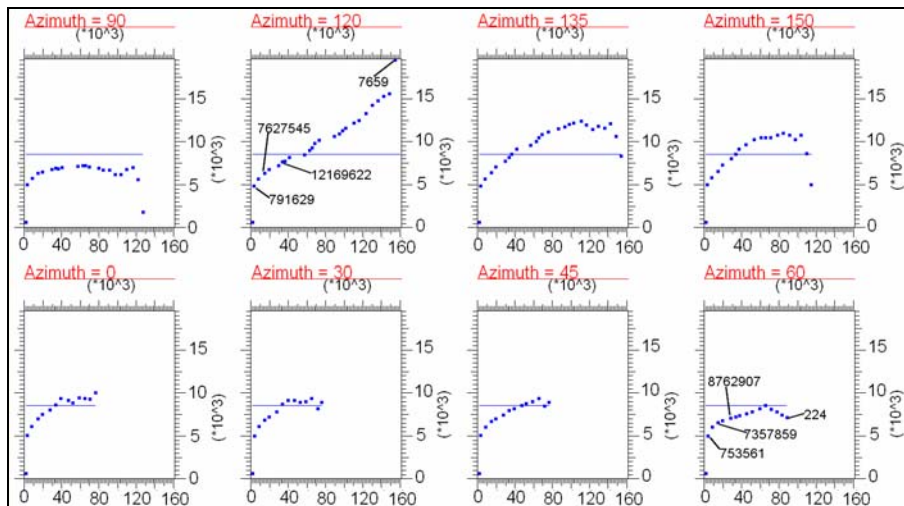


Figura 6.46 - Variogramma sperimentale della **conducibilità idraulica**. La linea blu corrisponde alla varianza dei dati puntuali

Lungo gli Azimuths 0 e 60 i variogrammi sperimentali della porosità efficace non raggiungono il valore di varianza statistica

(37.8323), ma un plateau e poi decrescono; nelle direzioni 30 e 45 diventano tangenti ad essa nel momento in cui la correlazione dei dati si interrompe (Figura 6.47). In corrispondenza dell'Azimuth 90 il variogramma cresce oltre al valore di varianza statistica, ma poi decresce, riportandosi al di sotto di esso. Invece, lungo le tre distanze rimanenti (120, 135 e 150), i variogrammi sperimentali, crescono con gradualità differente e superano il valore di varianza statistica.

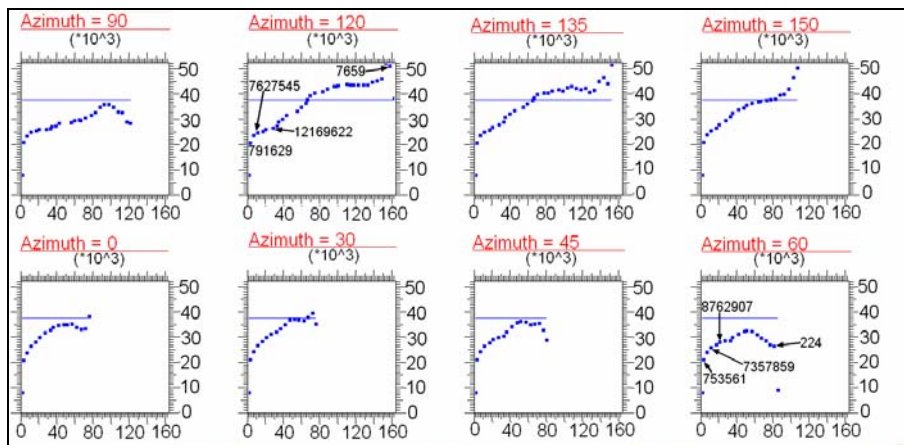


Figura 6.47 - Variogramma sperimentale della porosità efficace. La linea blu corrisponde alla varianza dei dati puntuali

6.3.6 Variogrammi teorici delle proprietà tessiturali

Le curve scelte che meglio approssimano i variogrammi sperimentali per ciascuna proprietà tessiturale sono di tipo esponenziale, si nota una crescita piuttosto graduale e continua della variabilità all'aumentare del lag distance. Per ciascuna proprietà tessiturale ci si è concentrati sull'Azimuth in cui il grafico corrispondente, una volta raggiunto l'asintoto, non decresca nuovamente, abbia la massima variabilità, ossia un valore elevato di sill, e il maggior numero di punti e di coppie di dati puntuali sperimentali. La scelta è quindi ricaduta sull'Azimuth 120 per i materiali grossolani, sul 150 per i medi ed infine sul 135 per i fini (figura 6.48).

Nella Model Curve dei termini grossolani è stato mantenuto un nugget effect alto (Tabella 6.11), al contrario, per le altre due tessiture è stato abbassato.

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

	MODEL TYPE	NUGGET EFFECT	SILL	RANGE	NUMBER OF LAGS	VARIANCE
Termini grossolani	Esponenziale	750	2133.28	155589	100000	1411.66
Termini medi	Esponenziale	400	1941.83	93079.7	100000	1101.13
Termini fini	Esponenziale	400	1897.65	135389	100000	1461.02

Tabella 6.11– Parametri relativi alle model curve dei variogrammi per le proprietà tessiturali

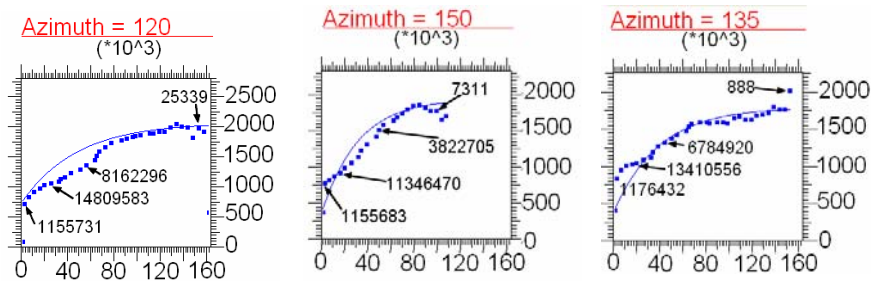


Figura 6.48- Modelli teorici che approssimano i variogrammi sperimentali lungo differenti Azimuths per i **termini grossolani** (sinistra), **medi** (centro) e **fini** (destra). E' anche riportato il numero di coppie di dati per alcuni punti del grafico.

6.3.7 Variogrammi teorici dei parametri idraulici

La curva modello per la conducibilità idraulica è stata costruita fittando il variogramma sperimentale dell'Azimuth 120 (Figura 6.49), scegliendo un modello esponenziale per simulare l'aumento di γ con la distanza. Ugualmente per la porosità efficace è stato utilizzato un modello teorico esponenziale per approssimare l'andamento del variogramma sperimentale lungo l'Azimuth 120.

In entrambi i casi il nugget effect è stato abbassato fino ad un valore pari a zero (Tabella 6.12).

Il numero di coppie di punti, per entrambi i parametri idraulici, risulta essere piuttosto alto: tende a crescere fino a oltre 12 milioni decrescendo poi fino a circa 7600 circa ad una elevata lag distance (Figura 6.49)

	MODEL TYPE	NUGGET EFFECT	SILL	RANGE	NUMBER OF LAGS	VARIANCE
Conducibilità idraulica	Esponenziale	0	16504.6	149383	100000	8535.61
Porosità efficace	Esponenziale	0	47.2034	132420	100000	37.8323

Tabella 6.12 - Parametri relativi alla model curve del variogramma per la conducibilità idraulica

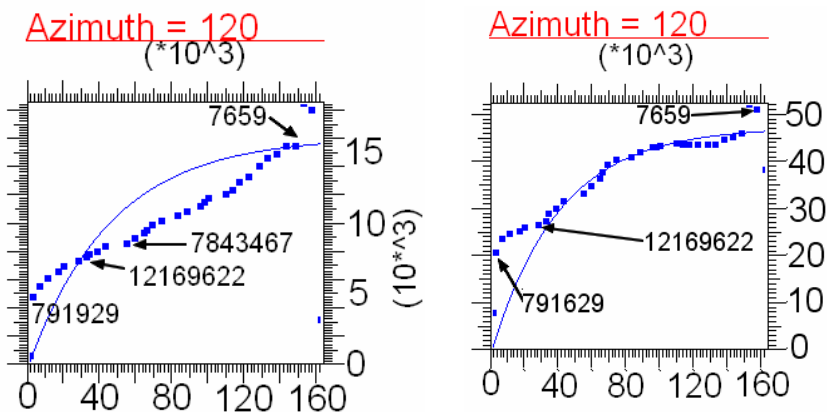


Figura 6.49 - Modelli teorici che approssimano i variogrammi sperimentali lungo Azimuth 120 per la **conducibilità idraulica** a sinistra e per la **porosità efficace** a destra. E' anche riportato il numero di coppie di dati per alcuni punti del grafico: si nota che sono identici per entrambi i parametri idraulici

6.4 Interpolazione geostatistica

L'attribuzione dei valori percentuali tessiturali e dei parametri idraulici al sistema idrogeologico viene realizzata tramite interpolazione geostatistica dei dati puntuali estratti da Tangram (paragrafo 6.2). L'operazione consiste nella propagazione delle caratteristiche idrogeologiche discrete nell'intero volume del modello, ricavandone così una distribuzione continua ed eterogenea.

La geostatistica riproduce i trends geologici di deposizione durante il processo di interpolazione; le direzioni e l'ubicazione ricoprono un ruolo fondamentale per poter valutare la probabilità che si riproducano determinate distribuzioni delle proprietà in esame, per stabilire la correlazione tra i dati e per stimare i valori in punti non noti. Con la geostatistica è possibile riprodurre delle orientazioni spaziali preferenziali e delle correlazioni spaziali che includono anche trends strutturali e sedimentari.

In campo geostatistico, la tecnica più utilizzata per l'interpolazione di dati geologici/idrogeologici puntuali è il kriging.

6.4.1 Tecnica geostatistica: Kriging

Questa tecnica viene definita con l'acronimo B.L.U.E. "best linear unbiased estimator": Linear perché i valori stimati sono combinazioni lineari e pesate dei dati disponibili, Unbiased, poiché la media dei residui è uguale a 0, Best poiché tende a minimizzare la varianza

dell'errore (per errore si intende la differenza tra il valore stimato e il valore reale misurato).

Il kriging stima una proprietà in posizioni non note, risolvendo una serie di equazioni lineari che minimizzano la varianza di stima. Nel realizzare una stima accurata il kriging tiene conto del numero di osservazioni e della qualità dei dati, della posizione dei punti all'interno del dominio, della distanza dei punti e della regolarità della variabile da stimare (bassa dispersione). Nel calcolo è naturale assegnare un peso maggiore ai valori osservati che sono localizzati nelle vicinanze del punto da stimare (Ciotoli, 2007). Per assegnare questi pesi a ciascun punto il kriging utilizza il modello variogramma.

L'utilizzo di una funzione pesata, il variogramma, è la differenza principale tra il kriging e gli altri metodi geostatistici. Questo tiene in considerazione la distanza, la direzione che è presente tra il punto da stimare e i punti in cui si conoscono i valori, e la presenza di eventuali anisotropie del fenomeno che si sta studiando. In geologia tutte le direzioni non sono uguali, non hanno lo stesso peso, oltre alla distanza, conta il trend geologico locale, infatti, ad esempio, esiste una differenza se il punto noto si trova ad Est o a Sud del punto da stimare (Paradigm, 2008).

L'equazione del kriging è:

$$f(X_0^*) = \sum_{i=1, \dots, n} \lambda_i(X^*) f(X_i),$$

ossia si tratta della stima di una grandezza distribuita nello spazio, per il punto generico X_0 per cui la grandezza non è misurata, conoscendo i valori $f_i = f(X_i)$, misurati in n punti. $X_i = 1, 2, \dots, n$. $\lambda_i(X^*)$ è un coefficiente che serve per minimizzare la varianza dell'errore di stima.

Il kriging ha però dei limiti e può provocare delle leggere incongruenze: produce un effetto di appiattimento (*smoothing*), ossia tende a smussare i valori estremi, sovrastimando i più bassi e sottostimando quelli più alti. Questo effetto di appiattimento è particolarmente evidente a distanze elevate dai punti noti della variabile interpolata. Esso è direttamente proporzionale alla varianza calcolata dal kriging: lo smoothing non esiste nei punti in cui la varianza è zero, al contrario la stima ottenuta è completamente appiattita nei punti molto lontani dai dati noti. In queste posizioni i valori stimati sono tutti pari alla media e la varianza è costante (Deutsch Clayton, 2002).

6.4.2 Procedimento di interpolazione in Gocad

I pesi utilizzati dall'interpolatore vengono calcolati dalla curva modello che meglio approssima il variogramma sperimentale. L'equazione è essenzialmente la stessa dell'inverso della distanza solo che, mentre in quest'ultimo i pesi sono calcolati secondo una funzione arbitraria, nel Kriging sono basati sul modello di continuità spaziale definito del variogramma.

Il comando utilizzato da Gocad è *SGrid_Geostatistics_Kriging*, attraverso cui si imposta il set di dati puntuali e la relativa proprietà da interpolare, l'area in cui effettuare l'elaborazione e la legge da seguire secondo il variogramma calcolato in precedenza (paragrafi 6.3.6 e 6.3.7). E' importante spuntare l'opzione *Advanced Options_ No data assignment*: in questo modo tutte le celle subiscono il processo di kriging (Paradigm, 2008) e il risultato dell'interpolazione ha un aspetto continuo.

L'interpolazione operata dal Kriging trasforma la distribuzione discreta di ciascuna proprietà in una distribuzione continua 3D di essa, all'interno dell'intero volume del sistema indagato, in corrispondenza della regione *Data*.

6.4.3 Risultati delle interpolazioni dei dati puntuali all'interno delle griglie di calcolo

In Gocad è possibile visualizzare i prodotti dell'elaborazioni attraverso sezioni parallele ai tre assi della griglia oppure nell'intera regione *Data*.

Nei seguenti paragrafi verranno mostrate: sezioni Nord-Sud, Ovest-Est e sezioni incrociate (rappresentazione più significativa), attraverso le quali è possibile apprezzare in dettaglio il comportamento deposizionale delle percentuali litologiche e dei parametri idraulici secondo specifiche direzioni e osservare le variazioni di spessore a livello dell'intera area di studio e per singoli settori di essa.

Tutte le sezioni sono affiancate da una legenda cromatica che associa i colori freddi ai valori minimi di una proprietà, mentre i colori caldi ai massimi. In ciascuna immagine è visualizzata anche la base del modello in grigio chiaro, come riferimento spaziale. In figura 6.50 è riprodotta una visione in pianta delle sezioni longitudinali (in rosso, identificate dall'indice i), latitudinali (in grigio, identificate dall'indice j) e incrociate della griglia all'interno della regione *Data*, corrispondente all'area di studio indagata. E' visualizzata una sezione ogni 20,

ciascuna dista l'una dall'altra 10 km, ad esclusione delle prime (distanti dal bordo della griglia 5 km) ed ultime (distanti dal bordo della griglia 1.5 km) righe e colonne ($j=10$, $i=10$ e $i=330$).

Alla rappresentazione di ciascuna caratteristica idrogeologica, è affiancata la relativa mappa di varianza (sottoforma di sezioni incrociate) che Gocad calcola in automatico durante l'interpolazione. Essa misura la dispersione dei valori attorno alla media e dà un'informazione sull'affidabilità dei risultati ottenuti in base alla distribuzione dei dati puntuali di partenza: dove è alta i valori simulati si discostano particolarmente dai valori noti, al contrario dove risulta essere più bassa, la simulazione è più fedele ai valori puntuali di input.

Le modellazioni di ciascuna proprietà, ritenute, infine, rappresentative della reale conformazione del sottosuolo, sono state ricavate in seguito a numerose prove, realizzate anche per ridurre l'effetto di *smoothing* (paragrafo 6.4.1) creato dal Kriging: si è cercato di minimizzarlo attraverso l'utilizzo di valori di nugget effect particolarmente bassi (paragrafi 6.3.6 e 6.3.7). In alcuni casi, inoltre, si è verificato un fenomeno opposto a quello di appiattimento: è capitato che i dati simulati ottenuti si distribuissero in un intervallo diverso da quello dei dati puntuali di input, ossia valori minimi negativi (situazione molto diffusa) e valori superiori ai massimi (circostanza più rara); i primi non hanno significato idrogeologico, i secondi non sono rappresentativi delle tessiture presenti (Bellini, 2006). Ciò è probabilmente imputabile ad una sorta di deriva geostatistica dell'interpolatore che ha proseguito il calcolo oltre i valori limite del range iniziale. Perciò, a tutti i valori negativi è stato assegnato il valore minimo dell'intervallo dei dati puntuali di partenza e, se verificatosi, ai valori superiori ai massimi, è stato associato il valore dell'estremo massimo dell'intervallo.

L'interpolatore ha, ovviamente, assegnato un valore simulato ad ogni cella attiva per ciascuna griglia all'interno della regione *Data*, ciò significa 313'860 per la griglia A, 157'908 per la griglia B e 49'639 per la griglia C. E' in questo modo che viene riprodotta l'eterogeneità del sottosuolo.

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

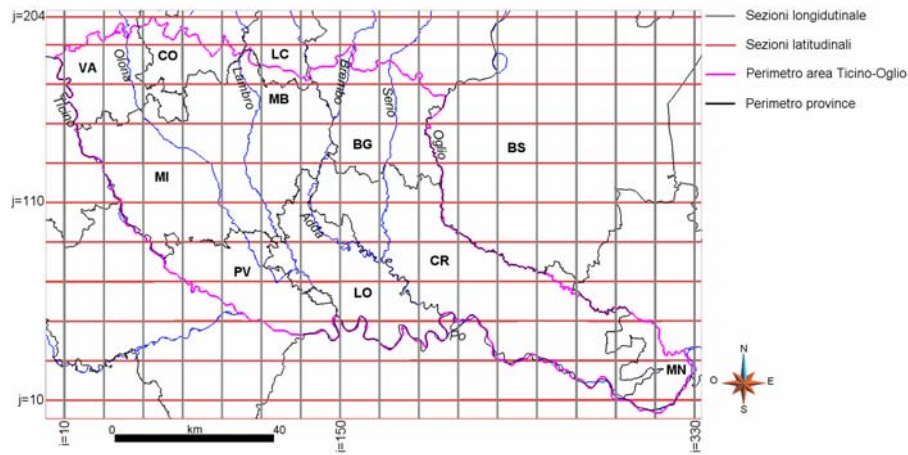


Figura 6.50 – Visione in pianta delle sezioni longitudinali, latitudinali e incrociate all'interno della griglia di calcolo

6.4.4 Sezioni 3D delle proprietà tessiturali

I risultati ottenuti dall'interpolazione delle proprietà tessiturali (termini grossolani, medi e fini) sono stati analizzati anzitutto tramite la visualizzazione di istogrammi di frequenza e, in secondo luogo, attraverso sezioni 3D.

Gocad crea in automatico istogrammi che mostrano la frequenza di accadimento di una determinata proprietà: essa consiste, per una proprietà continua, nel numero di dati puntuali che ricadono all'interno di ciascuna barra dell'istogramma diviso il numero totale dei dati puntuali (Paradigm, 2008). Il range dei valori percentuali di ciascuna litologia è stato suddiviso in 10 intervalli da 10 valori ciascuno.

A ciascun istogramma è sovrapposta una curva normale, si può perciò verificare quanto la distribuzione di una proprietà si avvicini o si discosti da un comportamento gaussiano che si sa essere di norma quello più diffuso tra i fenomeni e i processi naturali continui.

In ogni sezione viene evidenziata la presenza in percentuale di ciascuna classe tessiturale rispetto alle altre due, così che, per ottenere un'idea complessiva della distribuzione effettiva di tutti i termini tessiturali, occorre considerare contemporaneamente le tre rappresentazioni.

Termini grossolani

Da una prima osservazione degli istogrammi di frequenza dei materiali grossolani lungo la verticale dell'intero sistema idrogeologico (griglia A, B e C, figura 6.51), si nota che:

- ✓ il valore massimo raggiunto si abbassa all'aumentare della profondità: nella griglia A è 100%, anche se pochissimi punti assumono questo valore (l'intervallo percentuale 90-100 ha una frequenza di solo 0.86%); per la griglia B è circa 96% ed infine per la griglia C è circa 84%;
- ✓ nella griglia A l'intervallo percentuale 0-50 ha una frequenza del 77.62%, contro il 22.38% dell'intervallo 50-100. Pur essendoci una predominanza di percentuali basse (solo l'intervallo 0-10% ha una frequenza del 45.09%), vi è una discreta presenza delle percentuali medio-alte: la frequenza del range percentuale 50-80 è del 19.23%, di cui il 5.39% corrisponde all'intervallo percentuale 70-80;
- ✓ in entrambi gli istogrammi delle griglie B e C si nota una diminuzione delle percentuali dei materiali grossolani rispetto alla griglia A. La presenza dell'intervallo percentuale 0-50 aumenta a scapito di quello 50-100, mostrando una frequenza del 91.16% nella griglia B e del 91.58% nella griglia C. Anche la quantità della classe percentuale medio-alta 50-70 decresce: in entrambe le griglie è di circa 7.3%. I valori più alti, compresi nell'intervallo percentuale 80-94 per la griglia B e 70-84 per la griglia C, hanno una frequenza molto bassa, rispettivamente di 0.32% e 1.02%.

Nelle sezioni longitudinali, latitudinali e incrociate (Figura 6.52, Figura 6.53 e Figura 6.54) si nota che superficialmente vicino al limite settentrionale dell'area di studio, i materiali grossolani sono per lo più presenti per il 40%-50%, con alcune lenti intorno al 82%. La diffusione di valori medio-bassi alternati ad alti valori, presenti sporadicamente, è dovuta alla presenza in questa zona di depositi morenici, costituiti da materiale estremamente eterogeneo, da blocchi ad argille, con un'abbondante matrice limosa.

Spostandosi di qualche chilometro più a Sud si osserva una presenza di depositi grossolani del 70%-80%, che diminuisce gradualmente a 40%-30%, per giungere nelle province di Cremona e Lodi a valori che oscillano tra 0% e 5%, con intercalazioni intorno a 20%; nella porzione settentrionale della provincia di Cremona si ritrovano rare lenti superficiali a valore 60%.

Approfondendosi, la presenza dei materiali grossolani in generale è 50%-30% e diminuisce a 10%-20% al decrescere della quota e della latitudine, fino a raggiungere valori intorno a 0%.

Si nota, quindi, un decremento da Nord verso Sud, Sud-Est, secondo la direzione di scorrimento e deposizione dei fiumi. Dalle sezioni ricostruite è possibile individuare la separazione che esiste tra alta e bassa pianura: a Nord dominano i depositi grossolani, mentre a Sud, oltre la linea dei fontanili, scarseggiano. La separazione è in corrispondenza della media pianura (circa la porzione meridionale della provincia di Milano), dove i livelli argilloso-limosi contenuti nei depositi fluvio-glaciali si ispessiscono, impedendo all'acqua di percolare in profondità; la falda è molto vicina al piano campagna e in alcuni casi emerge in superficie, dando luogo al fenomeno delle risorgive (Regione Lombardia, 2006).

In corrispondenza della sezione $j=170$ (Figura 6.53 e Figura 6.54), nel settore orientale, tra Adda e Oglio, a 20-30 m di profondità è visibile una potente zona di depositi grossolani (90%-100%). Ugualmente accade lungo la medesima sezione, nel settore occidentale, tra Olona e Lambro, probabilmente in corrispondenza dei corrispettivi paleoalvei che si trovano rispettivamente più ad Est e più ad Ovest di quelli attuali. Inoltre si può scorgere una grossa lente (circa 45%) a circa 100 m dal piano campagna in corrispondenza della zona centrale della provincia di Milano tra Olona e Lambro (tra le sezioni $i=90$ e $i=110$, Figura 6.54).

Nella zona meridionale della provincia di Lodi, vicino al Po (sezioni $i=170$ e $i=190$, $j=50$ Figura 6.54) si nota che i depositi grossolani nei primi 30 metri del sottosuolo sono presenti al 40%, quantità maggiore rispetto all'intorno; probabilmente si tratta di materiali alluvionali a granulometria più grossolana rispetto alla zona circostante.

Nella provincia di Cremona e nella piccola porzione della provincia di Mantova, vicino alla confluenza tra Oglio e Po, la densità dei dati è molto bassa, soprattutto in profondità, dove non sono stati raccolti pozzi che si approfondiscono oltre 200 m. I risultati possono essere perciò errati, ad esempio vicino alla base del modello si osserva un livello regolare di 60 m di spessore, con circa il 30% dei depositi grossolani: a quella profondità la presenza di quantità simili è anomala. I risultati ottenuti vanno, perciò, confrontati con la mappa della varianza (Figura 6.55) per avere un'indicazione sulla loro affidabilità: si nota infatti che nella punta meridionale dell'area di

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

studio, in corrispondenza della provincia di Mantova, essa assume valori di 0.8, che in profondità variano tra 1 e 1.1, così come in generale negli strati più profondi della bassa pianura. Al contrario, nel resto dell'area di studio i valori simulati prodotti sembrano essere piuttosto affidabili, la varianza è di circa 0.4-0.5.

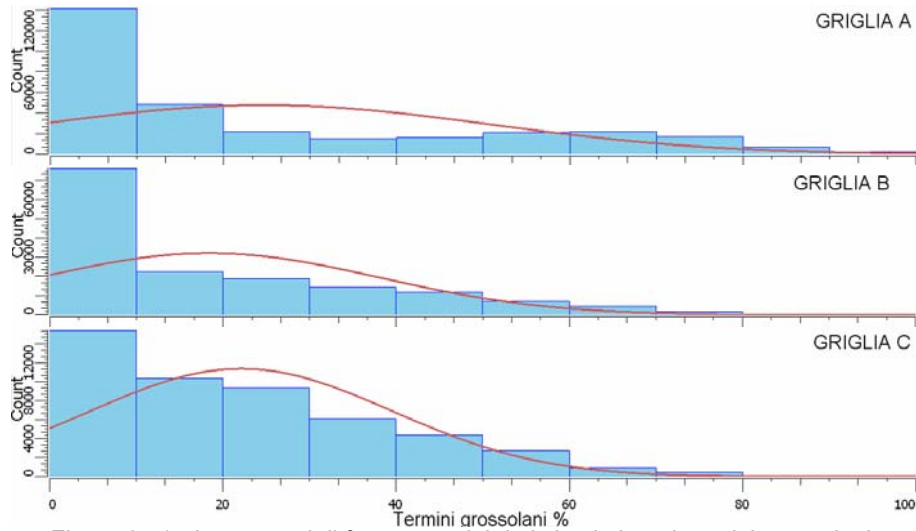


Figura 6.51 - Istogrammi di frequenza dei dati simulati per i termini grossolani, rispettivamente nelle griglie A, B e C

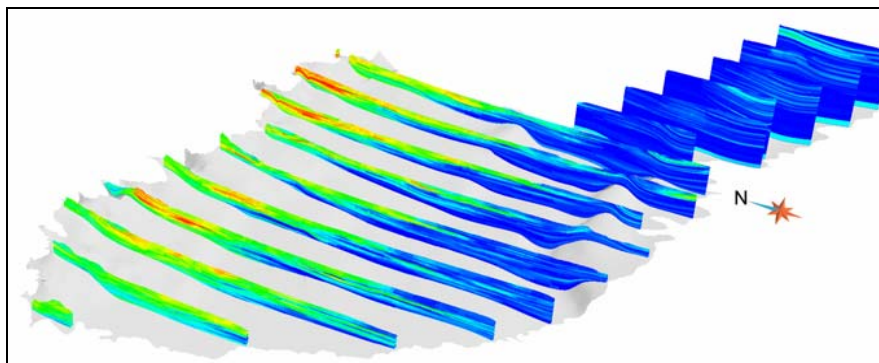


Figura 6.52 - Distribuzione di **materiali grossolani** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni longitudinali

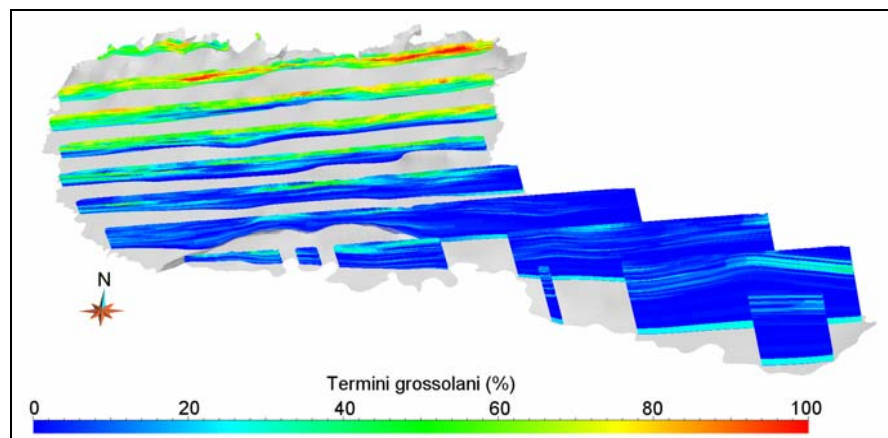


Figura 6.53 - Distribuzione di **materiali grossolani** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni latitudinali

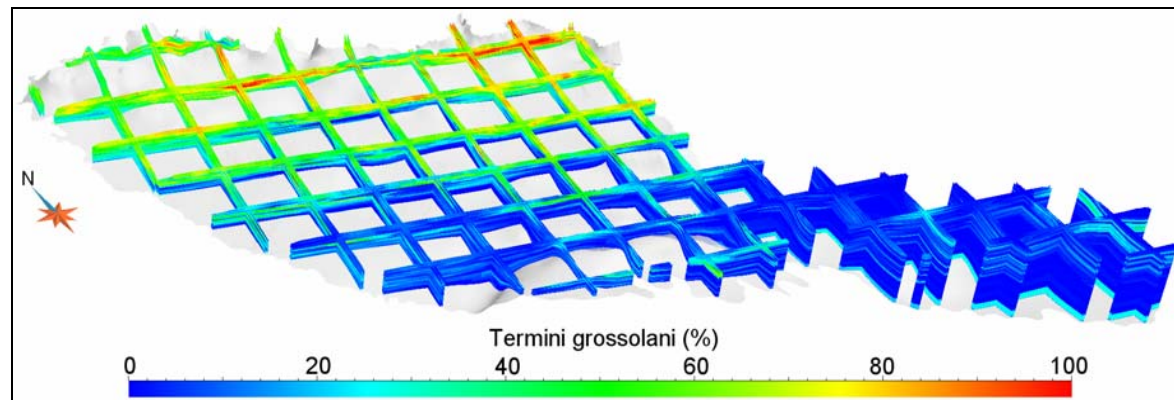


Figura 6.54 - Distribuzione di **materiali grossolani** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni incrociate

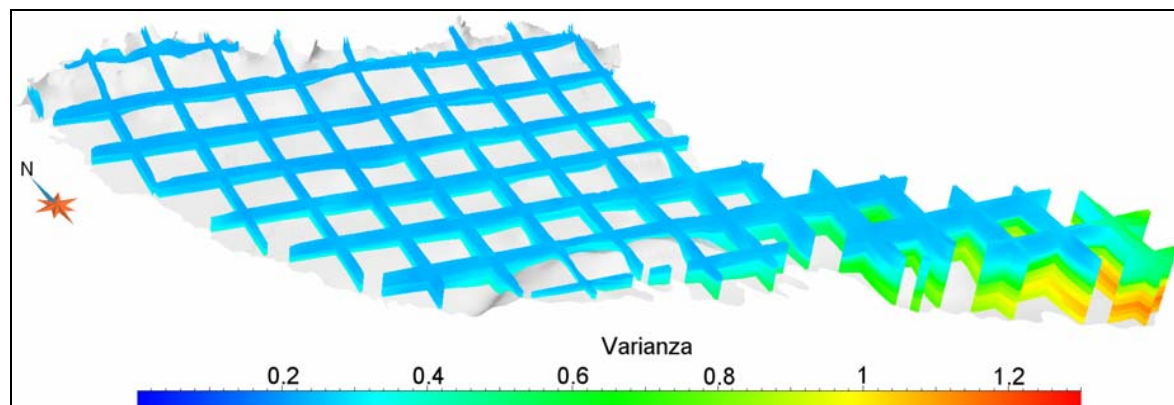


Figura 6.55 - Distribuzione della varianza dei materiali grossolani all'interno dell'area di studio, lungo sezioni incrociate

Termini medi

Osservando gli istogrammi di frequenza dei termini medi lungo la verticale dell'intero sistema idrogeologico (griglia A, B e C, Figura 6.56), si nota che:

- ✓ nella griglia A l'intervallo coperto dai risultati è 0%-100%, nella griglia B è compreso tra 0% e 94%, ed infine nella griglia C tra 0% e 84%. Come per i termini grossolani, anche in questo caso i massimi diminuiscono con la profondità;
- ✓ l'apice della curva gaussiana, all'aumentare della profondità, si sposta verso le percentuali più basse, ad ulteriore dimostrazione che la presenza di materiali medi diminuisce passando da una griglia all'altra. Inoltre la frequenza delle percentuali 0-50 rispetto a quella dell'intervallo percentuale 50-100 aumenta: nella griglia A è 63.81%, nella B 73.9% e nella C 92.12%. Allo stesso modo, le percentuali alte (70%-100%) diminuiscono: nella griglia A sono presenti per 11.45%, nella B per 4.55% ed infine nella C per 0.54%;
- ✓ i valori più diffusi nelle tre griglie si spostano verso valori più bassi dell'asse X dell'istogramma: se nella griglia A corrispondo all'intervallo 30%-50%, nella B e nella C si riferiscono rispettivamente a 30%-40% e 10%-20%.

Le sezioni, longitudinali, latitudinali e incrociate (Figura 6.57, Figura 6.58 e Figura 6.59), mostrano a Nord, vicino alla zona prealpina, una bassa presenza di materiali a granulometria media, in particolare a Nord-Est, dove i valori sono compresi tra 0%-5%, con rare lenti intorno a 15%. A Nord-Ovest, le percentuali sono leggermente più alte, intorno a 10%-15%.

Qualche chilometro più a Sud e spostandosi verso la media pianura (Figura 6.57, Figura 6.58 e Figura 6.59) la presenza di materiali medi aumenta (dominano i valori pari a 50%-60%), principalmente negli strati superficiali dove si incontrano lenti anche a valori pari o superiori al 95%. E' evidente, inoltre, una loro predominanza ad Ovest rispetto ad Est. Quest'ultimo fenomeno è ben visibile tra le province di Milano e Pavia, ma soprattutto nel settore del Pavese (a cavallo tra le sezioni $j=250 - j=270$ e $i=90 - i=110$, Figura 6.59): infatti qui i litotipi sabbiosi, mischiati a ghiaietto e a intercalazioni argillose-limose, caratterizzano i depositi alluvionali superficiali e a profondità variabili (50-60 m) si incontra un potente spessore di sabbie a

granulometria media (Provincia di Pavia-Divisione Ambiente, Settore Risorse Naturali, 2006).

Nella bassa pianura le percentuali più diffuse oscillano attorno al 50% e al 40% - 45% al diminuire della quota; esiste qualche lente di valore 70%, soprattutto vicino al fiume Po. Queste lenti, però, si assottigliano con la profondità.

A circa 100 m dalla superficie, in corrispondenza della zona centrale della provincia di Milano tra Olona e Lambro, è visibile una lente di circa 10 m di spessore a valore 75%, assimilabile alle medie percentuali di materiale grossolano (25%) nella stessa porzione. Si potrebbe trattare di falde semi-confinare o confinate costituite da sabbie ghiaiose.

Come per i termini grossolani, anche i valori dei materiali medi in profondità, nell'estrema porzione Sud (confine tra province di Cremona e Mantova) sono poco affidabili e la varianza corrispondente raggiunge valori di 1.3 (Figura 6.60). Al contrario nel resto dell'area, la varianza è bassa, 0.2 - 0.3, e aumenta leggermente con la profondità.

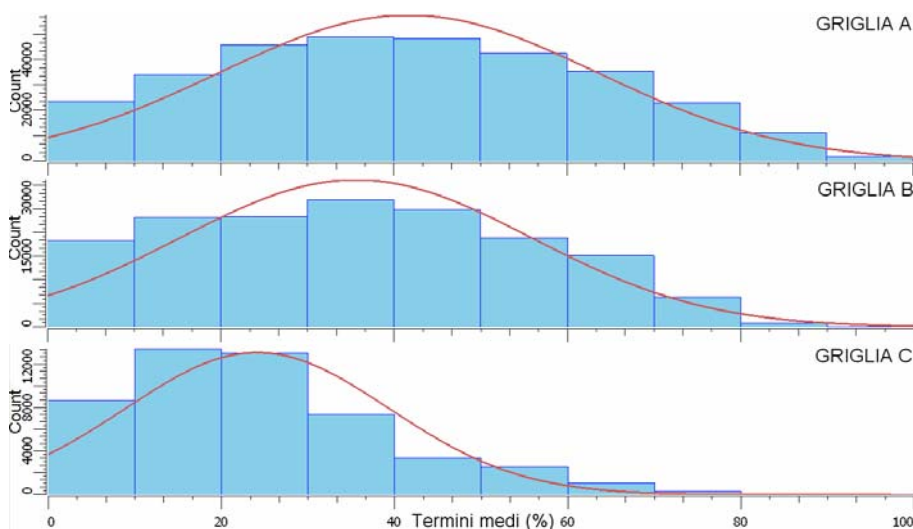


Figura 6.56 - Istogrammi di frequenza dei dati simulati per i **materiali medi**, rispettivamente nelle griglie A, B e C

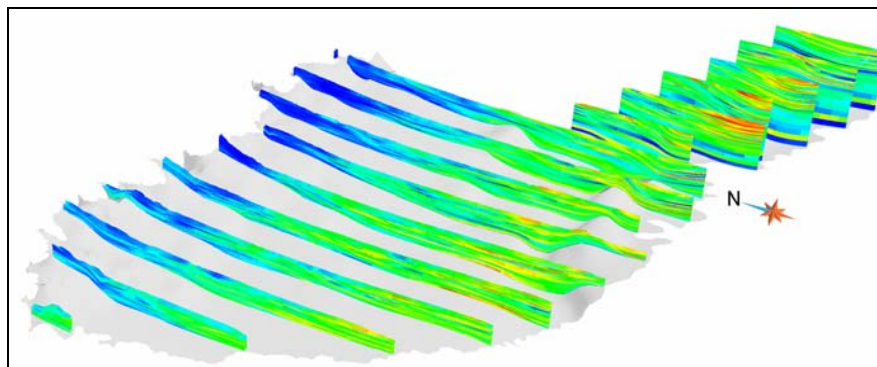


Figura 6.57 - Distribuzione di **materiali medi** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni longitudinali

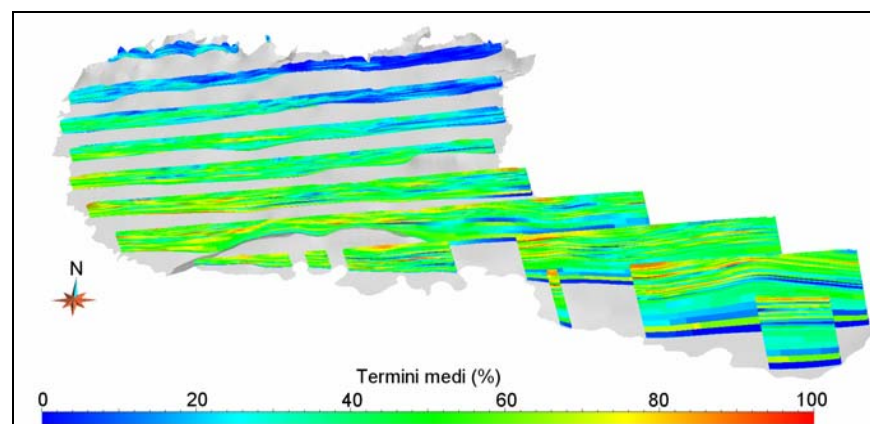


Figura 6.58 - Distribuzione di **materiali medi** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni latitudinali

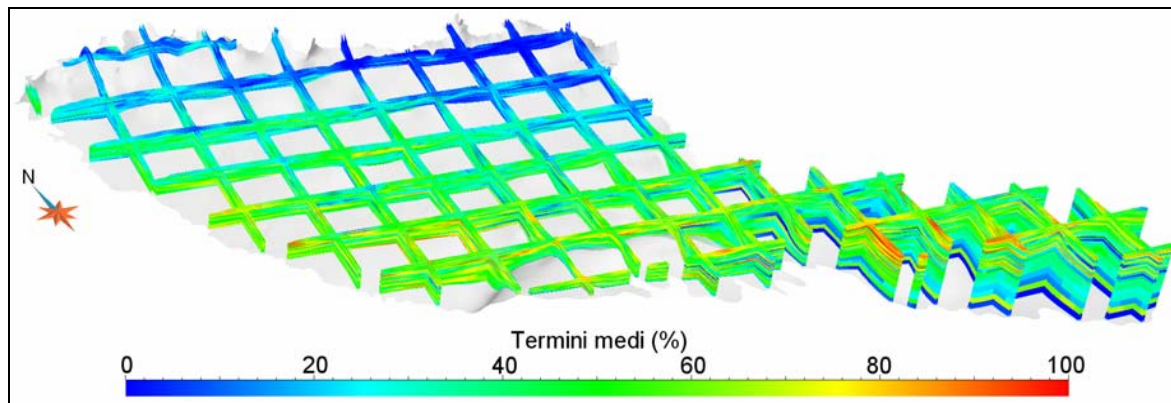


Figura 6.59 - Distribuzione di materiali medi all'interno dell'area di studio, lungo sezioni incrociate

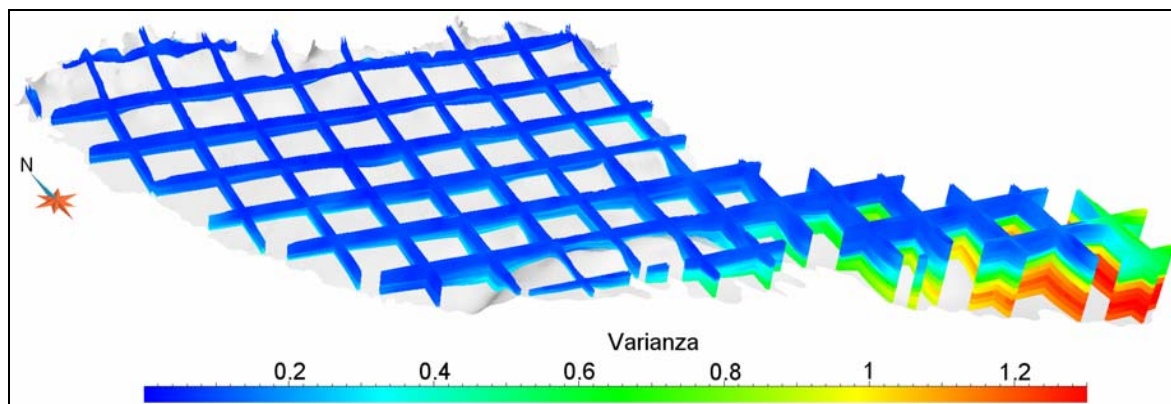


Figura 6.60 - Distribuzione di varianza di **materiali medi** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni incrociate

Termini fini

E' possibile osservare la distribuzione dei materiali a granulometria fine al variare della profondità, attraverso gli istogrammi di frequenza nelle tre griglie (Figura 6.61), riportati sotto:

- ✓ il valore percentuale minimo dell'intero range considerato aumenta dalla griglia B alla C: infatti, mentre nelle prime due griglie corrisponde a 0%, nella C è 3%. Secondo lo stesso principio la frequenza delle percentuali 0-50 diminuisce all'aumentare della profondità, a favore dei valori 50%-100%: nella griglia A corrisponde a 75.08%, nella B a 58.66% ed infine nella C a 40.03%;
- ✓ approfondendosi all'interno del sistema idrogeologico, l'apice della curva normale si sposta verso valori percentuali più alti e gli intervalli più frequenti corrispondono a valori più elevati lungo l'asse X: per la griglia A si tratta di 20%-30%, per la griglia B è 30%-40% ed infine nella griglia C corrisponde a 50%-60%. Inoltre in quest'ultima griglia la distribuzione dei dati è più o meno gaussiana, in quanto la mediana (55.74%) è molto simile alla media (54.20%);
- ✓ la presenza dell'intervallo percentuale 70-100 (griglia A 7.03%, griglia B 13.97%, griglia C 22.83%) aumenta a discapito di quello 0-30 (griglia A 49.27%, griglia B 23.09%, griglia C 12.78%).

Nelle sezioni longitudinali, latitudinali e incrociate (Figura 6.62, Figura 6.63 e Figura 6.64) si osserva che nell'alta pianura gli strati superficiali sono caratterizzati da valori molto bassi (0%-5%), intercalati ad intervalli, più o meno spessi, a percentuali che oscillano tra 20%-25%. Fa eccezione la porzione tra Lambro e Adda, al limite settentrionale dell'area di studio tra le province di Monza e Brianza, Lecco e Bergamo, in cui i materiali fini sono presenti principalmente al 60%, con lenti di circa 10 m di spessore a valori 75%-80%. Ci si trova in corrispondenza dei terrazzi fluvio-glaciali in cui in superficie abbondano le argille del "Ferretto".

Procedendo verso Sud, Sud-Est e approfondendosi, le percentuali medio-alte (50%-60%) aumentano, gli intervalli a valori bassi si assottigliano e si approfondiscono; aumenta il numero e lo spessore di lenti con percentuali maggiori a 75%.

Quindi, dall'analisi degli istogrammi e delle sezioni si deduce che la percentuale dei materiali fini aumenta con la profondità e in direzione Nord-Sud, Sud-Est; si tratta di un comportamento

antagonista rispetto ai materiali grossolani, in conseguenza alla diminuzione di energia di deposizione dei fiumi.

Così come per le due tessiture descritte sopra, anche per i materiali a granulometria fine, la varianza (Figura 6.65) assume valori maggiori nella porzione meridionale dell'area di studio, nello specifico in superficie (zona della provincia di Mantova) è circa 0.7 e in profondità raggiunge valori pari a 1.2.

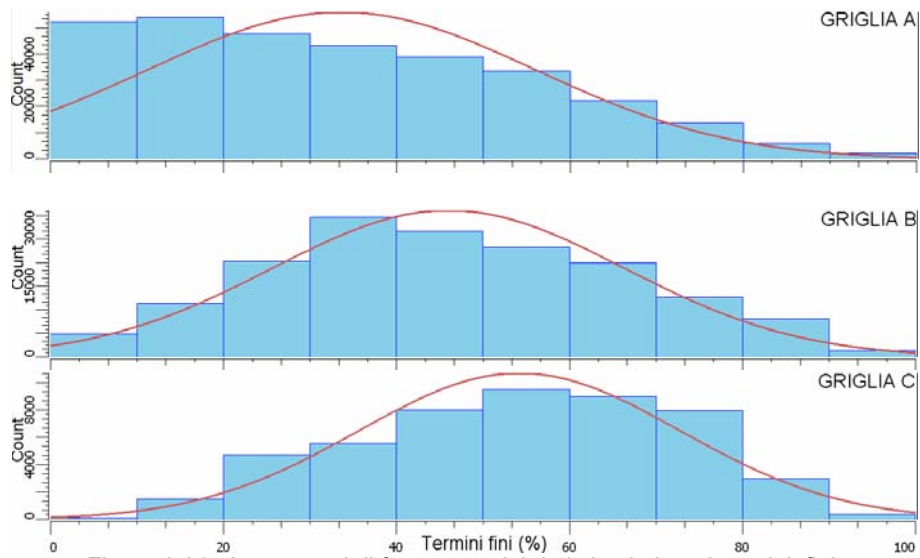


Figura 6.61 - Istogrammi di frequenza dei dati simulati per i termini fini, rispettivamente nelle griglie A, B e C

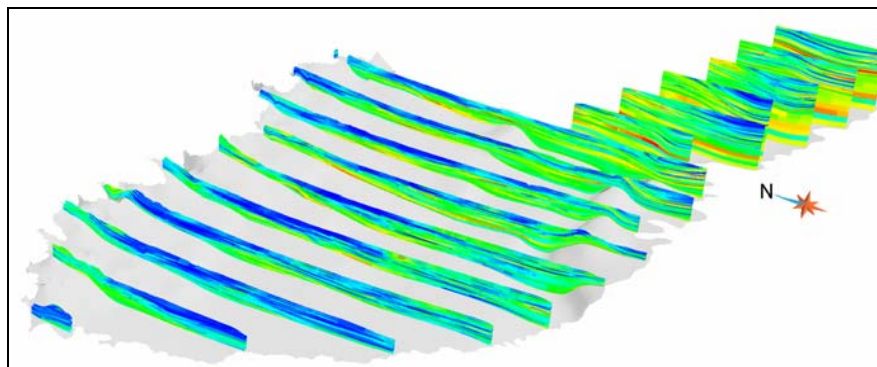


Figura 6.62 - Distribuzione di **materiali fini** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni longitudinali

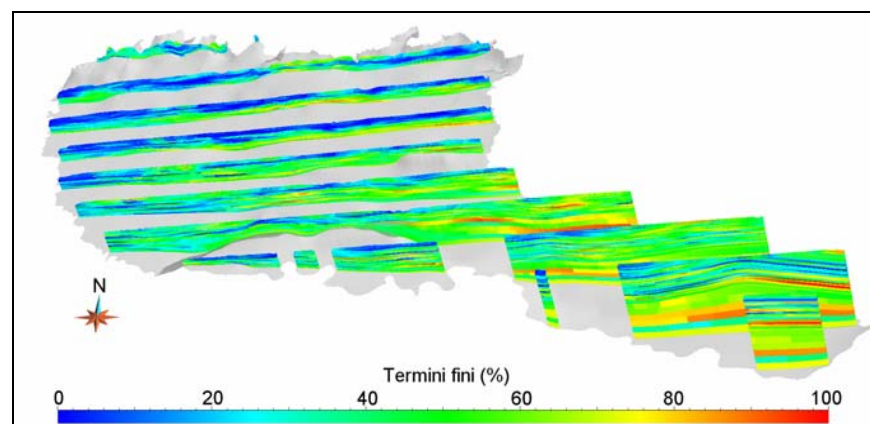


Figura 6.63 - Distribuzione di **materiali fini** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni latitudinali

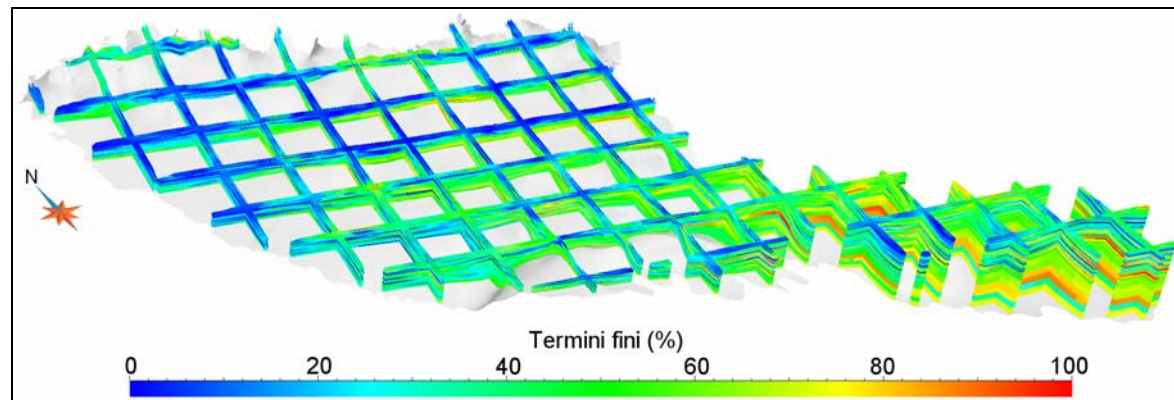


Figura 6.64 - Distribuzione di **materiali fini** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni incrociate

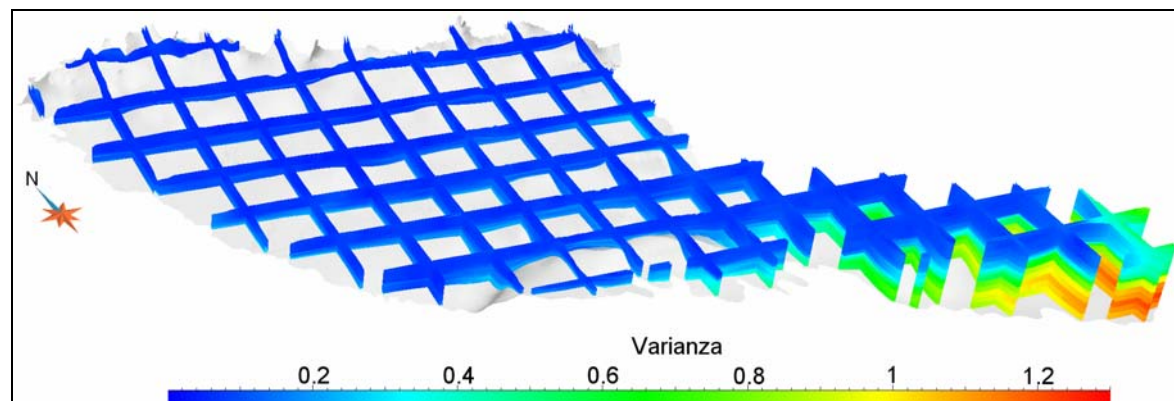


Figura 6.65 - Distribuzione della varianza di **materiali fini** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni incrociate

I risultati prodotti dalle interpolazioni delle tre tipologie litologiche mostrano un decremento della granulometria dei sedimenti da Nord verso Sud, Sud-Est, in funzione della diminuzione dell'energia di deposizione dei principali fiumi nell'area di studio: Marchetti (2000) spiega che si determina deposizione fluviale quando l'energia teorica del corso d'acqua non è sufficiente a sostenere il lavoro prodotto fino a quel momento dalla corrente stessa. Il fiume, quindi, rimodula la distribuzione energetica nel sistema eliminando le azioni più dispendiose: il flusso idrico riduce l'azione di erosione e abbandona il carico in eccesso a partire dalle quantità unitarie più dispendiose, ovvero dal materiale più grossolano (il più pesante) a quello più fine. Per questo motivo, nei tratti dove si verifica un decremento di velocità per la riduzione della pendenza, avviene la deposizione del materiale più grossolano nella parte prossimale, mentre diminuiscono progressivamente le dimensioni dei clasti depositati verso il piede del conoide stesso.

Nell'area di studio si realizza una diminuzione della granulometria dei sedimenti anche dagli strati superficiali a quelli profondi, per una variazione degli ambienti di deposizione (come descritto nel paragrafo 6.1, relativamente ai Gruppi Acquiferi).

Vicino al limite settentrionale dell'area, nella porzione centro orientale, a cavallo tra le province di Monza e Brianza, Lecco e in minima parte di Bergamo, si nota un decremento dei materiali grossolani e medi rispetto al settore occidentale, probabilmente imputabile alla presenza in superficie delle argille del "Ferretto" dei terrazzi fluvioglaciali e a movimenti tettonici che hanno provocato l'affioramento del substrato.

Proprio in base a questa distribuzione della granulometria, che diminuisce verso Sud, il cosiddetto "acquifero tradizionale", costituito da una falda libera nell'alta pianura, viene compartimentato dalla frazione argillosa-limosa, sempre più frequente e spessa, al diminuire della latitudine. Si passa quindi ad un sistema multi falda, con falde semi-confinata, la cui ricarica proviene anche in parte per infiltrazione dagli strati superficiali e in parte per drenanza da falde a monte, fino a giungere nella provincia di Cremona a falde confinate, completamente separate da quelle sovrastanti.

Si nota, invece, un aumento della granulometria dei depositi in corrispondenza delle valli fluviali, dovuta ad alluvioni attuali e recenti: questo si verifica nei settori settentrionali ad opera dei principali fiumi dell'area di studio, dove prevalgono le ghiaie. Nel settore meridionale

ciò è visibile lungo le anse del fiume Po in provincia di Lodi, dove le litologie medie sono presenti al 60%-70% e quelle grossolane al 30%-40%.

Osservando la distribuzione dei depositi grossolani si distingue chiaramente la netta separazione tra zone ad alta e bassa percentuale, che coincide circa con la separazione tra alta e bassa pianura. Per le altre due proprietà tessiturali, invece, questa divisione non è così evidente, i valori percentuali intermedi (40-60) infatti sono molto diffusi, ad esempio, nel caso dei materiali a media granulometria occupano la maggior parte dell'area di studio.

6.4.5 Sezioni 3D dei parametri idraulici

I valori dei parametri idraulici rappresentano una sintesi delle caratteristiche tessiturali, possono perciò riprodurre al meglio il comportamento idraulico del sistema, evidenziando l'alternanza tra orizzonti acquiferi e acquitardi o la differenza tra zone più o meno produttive. Per meglio evidenziare questa suddivisione idrogeologica la distribuzione della conducibilità idraulica e della porosità efficace nell'area è stata frazionata in 5 classi (Tabella 6.13), a seconda della granulometria dei sedimenti: vi sono due classi per i materiali a granulometria fine, la classe fine 2 è composta da tutti quei materiali con conducibilità idraulica e porosità efficace pari (roccia) o inferiore (terreno vegetale o terreno di riporto) ad un'argilla. Della classe fine1 fanno parte i sedimenti con conducibilità idraulica e porosità efficace uguale ad un limo e maggiori di un'argilla. I valori di k e n_e dei materiali appartenenti alla classe media sono uguali a quelle di una sabbia e superiori a quelle di un limo. La classe grossolana 2, invece, contiene materiali a granulometria maggiore di una sabbia e pari ad una ghiaia e, infine, della classe grossolana 1 fanno parte i depositi con i valori di conducibilità idraulica e porosità efficace maggiori nell'area di studio, ossia corrispondenti a materiali a prevalenza ciottolosa.

NOME CLASSE	INTERVALLO k (m/g)	INTERVALLO n_e (%)
Fine 2	$k \leq 0.00864$	$n_e \leq 5$
Fine 1	$0.00864 < k \leq 0.0864$	$5 < n_e \leq 15$
Media	$0.0864 < k \leq 69.12$	$15 < n_e \leq 19$
Grossolana 2	$69.12 < k \leq 259.2$	$19 < n_e \leq 22$
Grossolana 1	$259.2 < k \leq 432$	$22 < n_e \leq 28$

Tabella 6.13 - Classi di conducibilità idraulica e porosità efficace in cui è stata suddivisa l'area di studio

Conducibilità idraulica

I valori di conducibilità idraulica dei dati puntuali di input variano tra un range di 0.00864 m/g e 432 m/g (paragrafo 6.3.2). Il procedimento geostatistico non è stato, però, in grado di ottenere simulazioni che raggiungessero il valore 432 m/g, ma il valore massimo ricavato è stato 417 m/g, valore appartenente comunque allo stesso ordine di grandezza. Il motivo probabilmente deriva dal fatto che all'interno del set di dati di input i valori massimi del range sono presenti in quantità molto basse rispetto al totale, come riportato in Tabella 6.10, rendendone difficile la riproduzione nel calcolo eseguito da Gocad. Questo può anche essere considerato un effetto del fenomeno di smoothing.

All'aumentare della profondità l'estremo massimo del range diminuisce: per la griglia A è 417 m/g, per la griglia B è 407 m/g e per la griglia C è 335 m/g. Nelle prime due griglie si tratta di valori di conducibilità relativi circa a dei ciottoli, mentre nella terza griglia il valore corrisponde a circa la permeabilità di ciottoli con ghiaia. Infatti, come si osserva nelle immagini Figura 6.66, Figura 6.67 e Figura 6.68, la presenza della classe grossolana 1, a conducibilità maggiore, occupa l'1.05% del volume nella griglia A e lo 0.01% nella griglia B. Stranamente la presenza percentuale di questa classe aumenta leggermente nella griglia C in corrispondenza di piccole zone nel settore settentrionale dell'area di studio, forse per la presenza di piccoli acquiferi in profondità. Al contrario l'elevata crescita della percentuale della classe grossolana 2 dalla griglia B (19.04%) alla griglia C (38.62%), soprattutto lungo il margine orientale dell'area di studio, in corrispondenza della provincia di Cremona, è probabilmente imputabile ad un errore nella fase di interpolazione, dovuto alla mancanza di dati ad elevate profondità; infatti la varianza in questa zona assume valori da 0.7 a 1.15 circa (Figura 6.72).

La classe media è presente in grandi quantità nelle tre griglie: nella griglia A occupa il 53.49% dell'area totale, lasciando però spazio principalmente alla classe grossolana 2 e in parte alla grossolana 1 nella zona settentrionale; mentre nelle griglie B e C è distribuita su quasi tutto il volume. In questa classe, infatti, ricadono anche litologie con elevata matrice fine (le litologie corrispondenti sono infatti comprese tra un limo e una sabbia).

Le classi fine 2 e 1 dominano le zone più meridionali e più profonde di ciascuna griglia; solo in piccole percentuali si trovano sparse anche nelle porzioni centrali e settentrionali dell'area di studio.

Dall'osservazione delle sezioni, longitudinali, latitudinali e incrociate (Figura 6.69, Figura 6.70 e Figura 6.71) si nota che nell'alta pianura conducibilità idrauliche comprese tra 250 e 300 m/g si trovano in livelli anche di 30 m di spessore, con lenti superficiali e circoscritte corrispondenti ai valori massimi raggiunti (intorno a 400 m/g). Ad esempio nella zona meridionale della pianura della provincia di Varese si trovano i depositi del Complesso Ghiaioso Sabbioso, con spessori di qualche decina di metri, caratterizzati da una buona conducibilità idraulica (Autorità d'Ambito Territoriale della provincia di Varese, 2007).

Anche in profondità si incontrano livelli significativi a media-alta permeabilità (200-230 m/g), più potenti nella zona occidentale, come tra le province di Varese e Como (tra sezione i=70 e i=90, in corrispondenza della sezione j=170, Figura 6.71), dove esiste un livello a spessore variabile tra 15 m e circa 40 m, a permeabilità media di 230 m/g. Le intercalazioni a permeabilità più basse (130 m/g, 100 m/g e 80 m/g) aumentano e si ispessiscono con la profondità, ma soprattutto verso Est. Gli strati più bassi del modello, in questa porzione dell'area di studio, hanno conducibilità idraulica inferiore a 10 m/g, con sporadiche sottili lenti di 100 m/g circa.

Procedendo verso Sud i sedimenti con permeabilità sempre più bassa (50 m/g-70 m/g) si ispessiscono. Nella media pianura si distinguono lenti superficiali a permeabilità intorno a 250-260 m/g, mentre nella bassa pianura le lenti, più circoscritte, assumono valori intorno a 150-200 m/g. Vicino al Po, in provincia di Lodi, (sezioni i=170, i=190 all'incrocio con al sezione j=50, Figura 6.71) si nota una zona di circa 30 m con conducibilità idraulica variabile tra 115 m/g e 200 m/g, corrispondente al 60%-70% dei materiali medi e al 30%-40% dei grossolani, visibili nella stessa zona (paragrafo 6.4.3).

Infine nella media e bassa pianura, negli strati profondi, la permeabilità varia tra 50 m/g-30 m/g, fino a valori inferiori a 5 m/g.

Da queste osservazioni si deduce che la conducibilità idraulica, così come la percentuale dei termini grossolani, diminuisce da Nord a Sud. Infatti, studi precedenti (Francani et al., 1994), parlano di una crescente riduzione della permeabilità dei depositi superficiali a partire dai limiti fra le province di Milano e Lodi a Ovest, e dalla parte

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

mediana delle provincia di Bergamo ad Est, verso Sud. Il decremento si verifica anche all'aumentare della profondità.

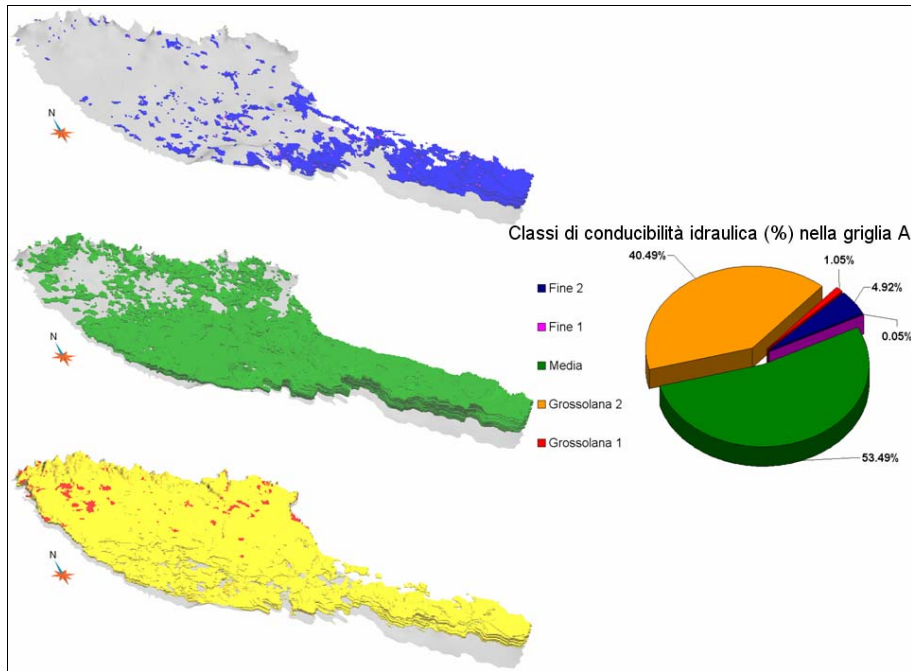


Figura 6.66 - Zonazione delle classi di permeabilità nella **griglia A**; a destra grafico a torte della presenza percentuale delle classi

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

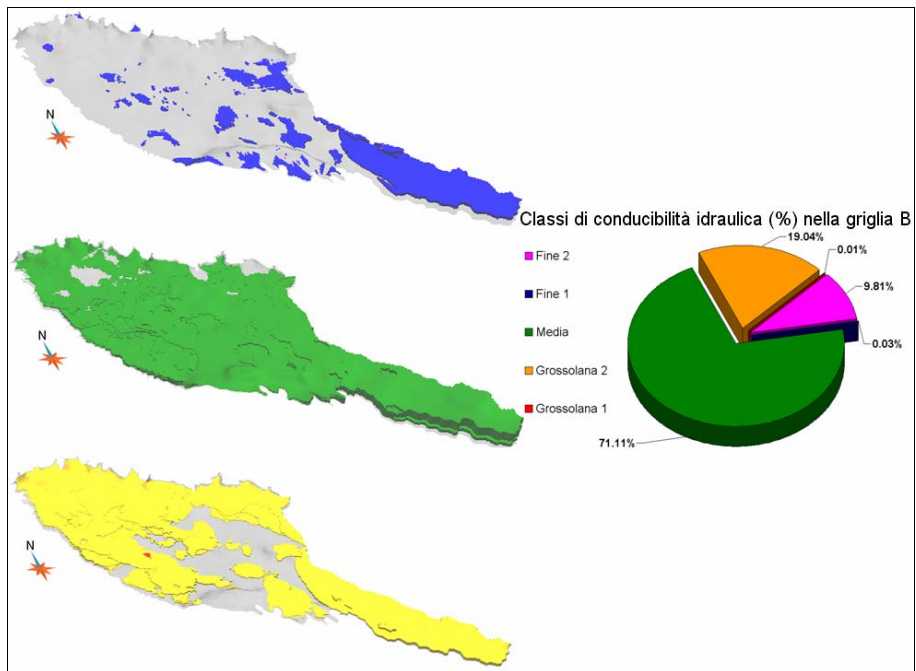


Figura 6.67 - Zonazione delle classi di permeabilità nella griglia B; a destra grafico a torte della presenza percentuale delle classi

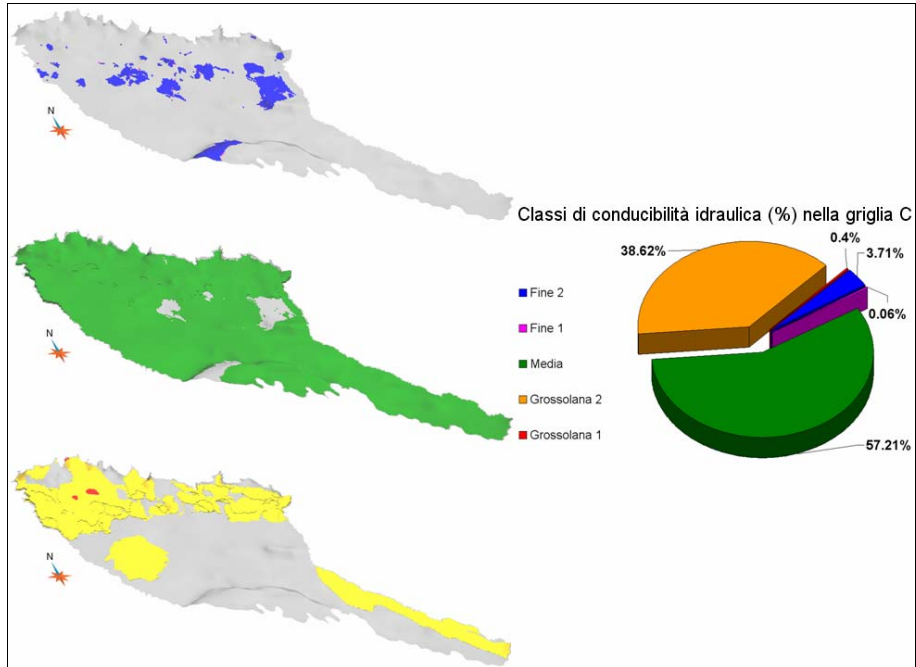


Figura 6.68 - Zonazione delle classi di permeabilità nella **griglia C**; a destra grafico a torte della presenza percentuale delle classi

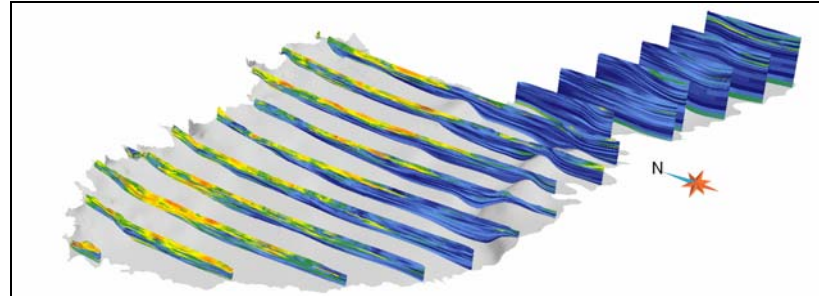


Figura 6.69 - Distribuzione di **conducibilità idraulica** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni longitudinali

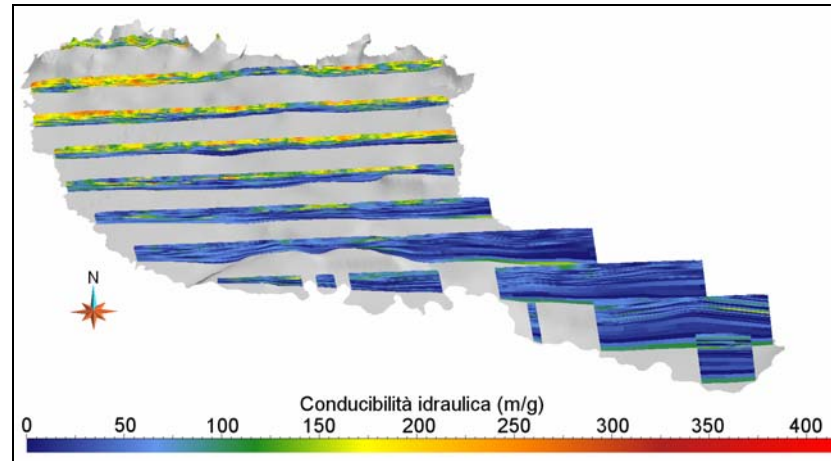


Figura 6.70 - Distribuzione di **conducibilità idraulica** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni latitudinali

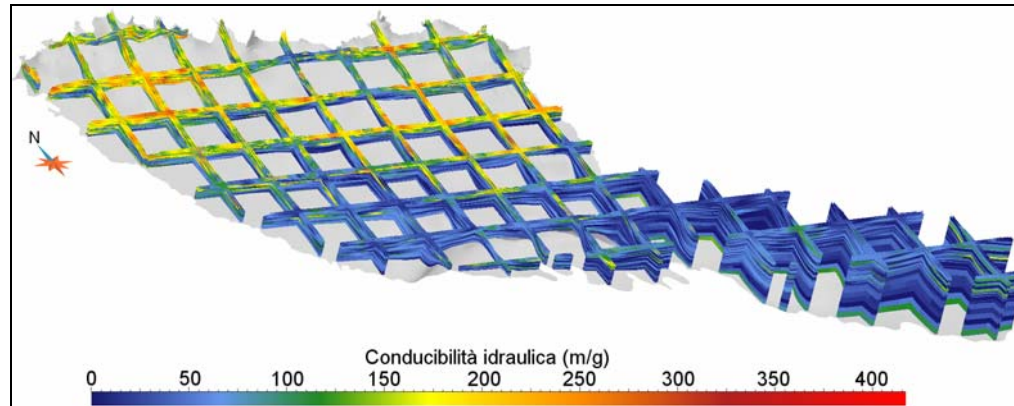


Figura 6.71 - Distribuzione di **conducibilità idraulica** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni incrociate

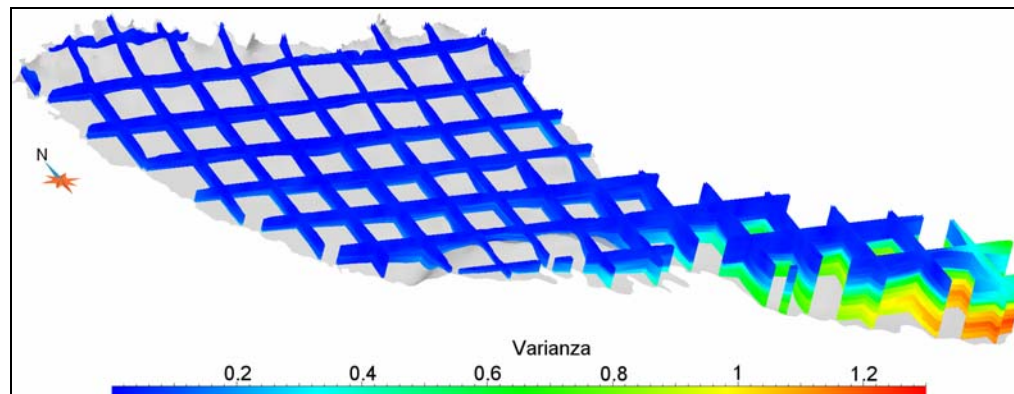


Figura 6.72 - Distribuzione della varianza di **conducibilità idraulica** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni incrociate

Porosità efficace

L'intervallo di valori di porosità efficace considerati è compreso tra 4% e 28% (Tabella 6.10).

Il valore massimo del range di dati diminuisce, anche in questo caso, da una griglia all'altra: nella griglia A corrisponde a 28%, si abbassa, poi, nella griglia B a 26.7% e nella griglia C a 23%. Inoltre, osservando la distribuzione delle classi nel volume del sistema idrogeologico e nei grafici a torta corrispondenti (Figura 6.73, Figura 6.74 e Figura 6.75), relativi alla presenza percentuale di ciascun gruppo, è evidente come la classe grossolana 1 diminuisca all'aumentare della profondità: nella griglia A è presente per 4.91%, nella griglia B per 0.21% e nella la griglia C per 0.23%. Probabilmente, come per il caso della conducibilità idraulica, esistono nella zona settentrionale dell'area di studio degli acquiferi di piccole dimensioni ad elevate profondità.

La presenza percentuale delle classi fine 1 e 2 cresce gradualmente all'approfondirsi degli strati, a scapito delle altre classi: nella griglia A occupano il 42.9% del volume, nella griglia B il 75.41% e nella griglia C 72.59%.

Nella griglia A, superficialmente, in corrispondenza della piccola porzione della provincia di Mantova, è presente una discreta quantità di materiali appartenenti alla classe grossolana 1 (Figura 6.73): si tratta di un comportamento discordante rispetto all'intorno e probabilmente di un errore in fase di interpolazione, dovuto all'assenza di dati. La varianza (Figura 6.79) in quel punto, infatti, è rilevante, corrisponde a 0.5-0.7, e aumenta in profondità.

Le sezioni longitudinali, latitudinali e incrociate (Figura 6.76, Figura 6.77 e Figura 6.78) mostrano che:

- ✓ in superficie, in corrispondenza dell'alta pianura dominano valori intorno a 20%-22%, intercalati da livelli con percentuali di porosità efficace pari a 18%-19%. Si incontra anche qualche lente di 10 m di spessore a porosità efficace pari a 26%-28%. Nella zona tra Lambro e Adda, tra le province di Monza e Brianza, Lecco e Bergamo, vicino al limite settentrionale dell'area di studio esiste però un livello di circa 35 m di spessore in cui la porosità efficace assume valori di 10%-5%. Spostandosi nella bassa pianura i livelli di porosità 18%-19% si ispessiscono e aumentano le intercalazioni con 10%-5% di porosità efficace;

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

- ✓ in profondità i valori percentuali più diffusi sono 14-16. Nella porzione settentrionale si trovano ancora lenti di circa 22%-24%. Per il resto dell'area, gli strati a porosità efficace bassa (10% e inferiori) aumentano in direzione Sud, Sud-Est.

Si può dire quindi che i materiali che costituiscono l'alta pianura, in particolare negli strati superficiali, hanno una porosità efficace maggiore rispetto alla bassa pianura e agli strati più profondi.

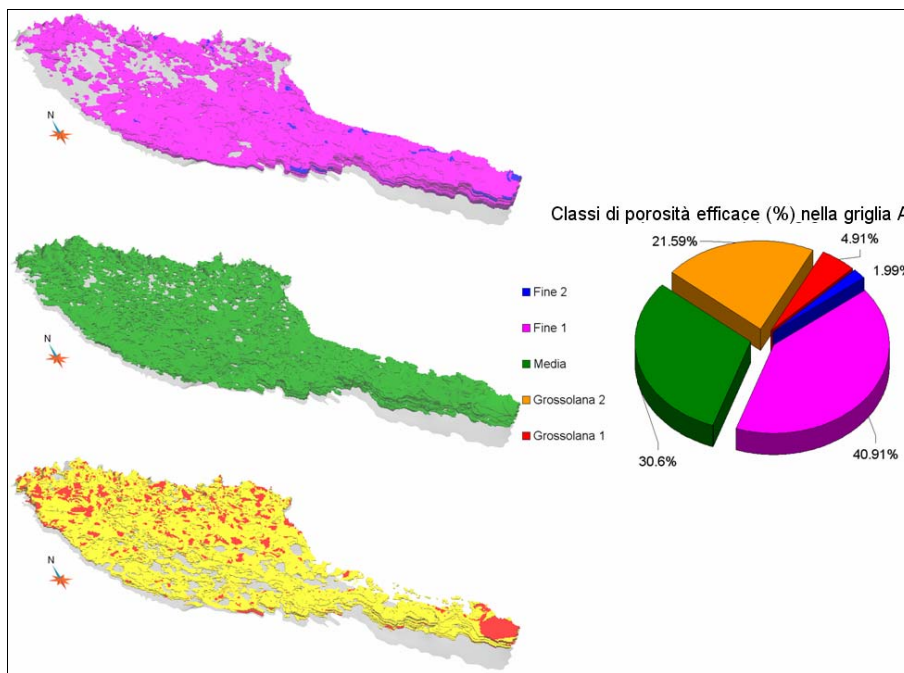


Figura 6.73 - Zonazione delle classi di porosità efficace nella **griglia A**; a destra grafico a torte della presenza percentuale delle classi

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

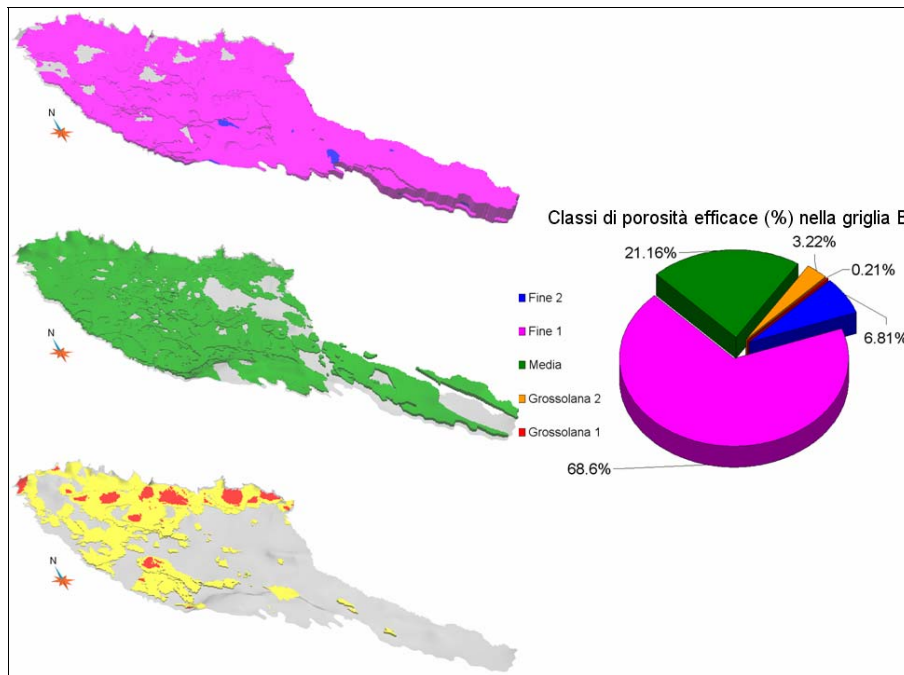


Figura 6.74 - Zonazione delle classi di porosità efficace nella **griglia B**; a destra grafico a torte della presenza percentuale delle classi

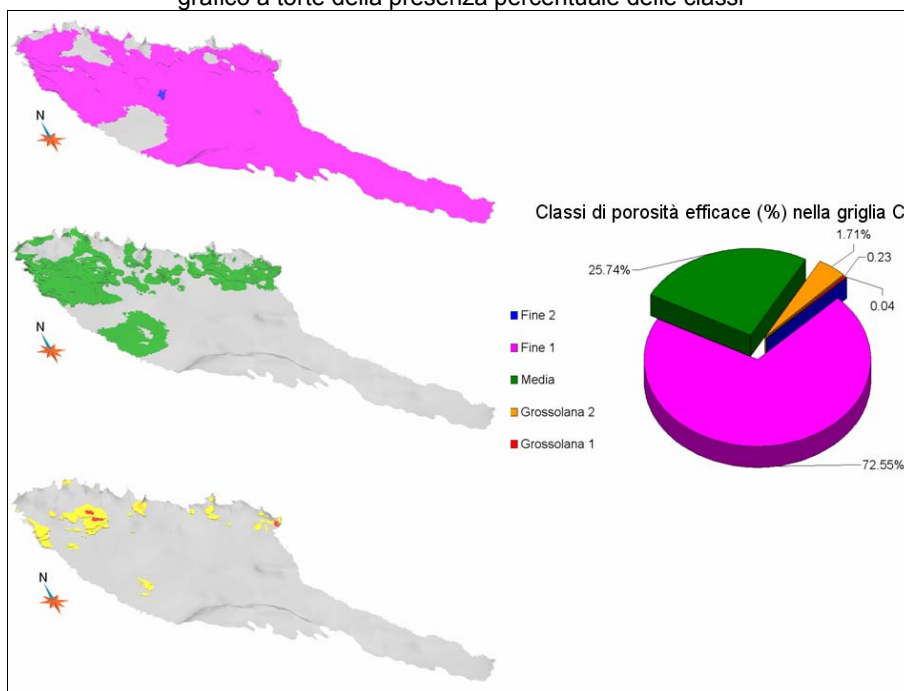


Figura 6.75 - Zonazione delle classi di porosità efficace nella **griglia C**; a destra grafico a torte della presenza percentuale delle classi

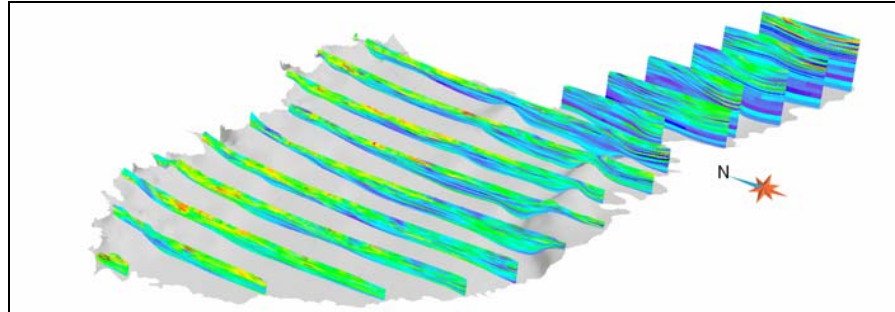


Figura 6.76 - Distribuzione di **porosità efficace** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni longitudinali

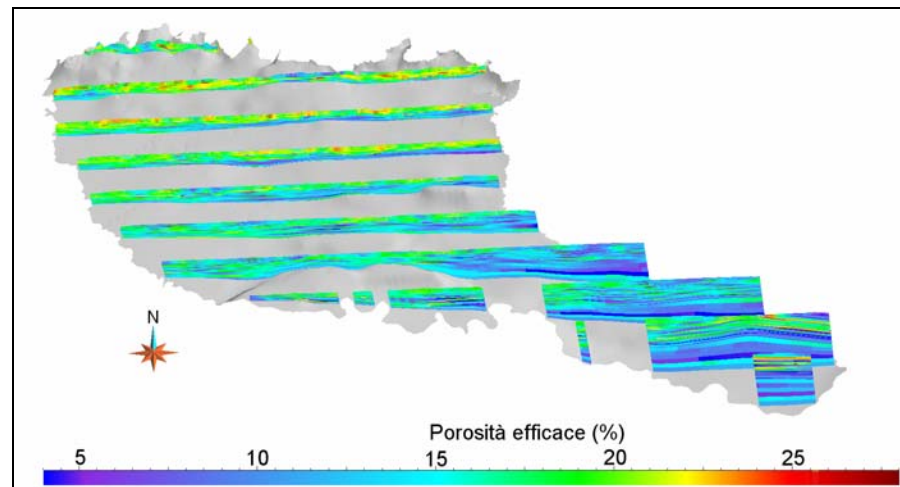


Figura 6.77 - Distribuzione di **porosità efficace** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni latitudinali

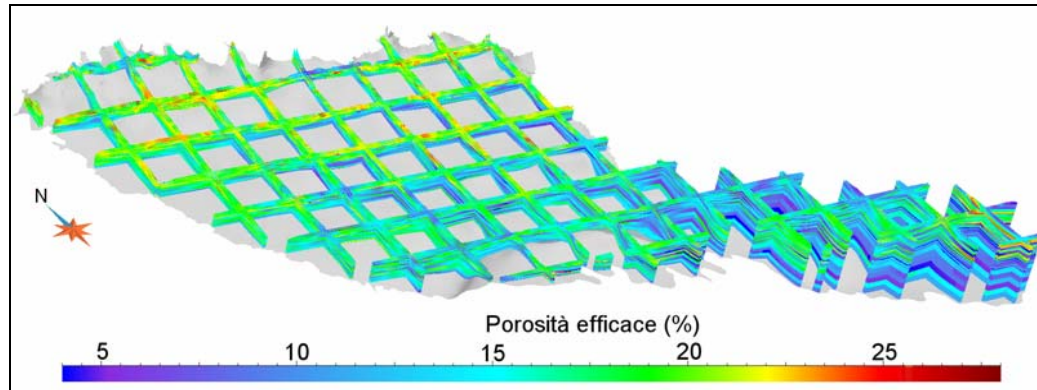


Figura 6.78 - Distribuzione di **porosità efficace** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni incrociate

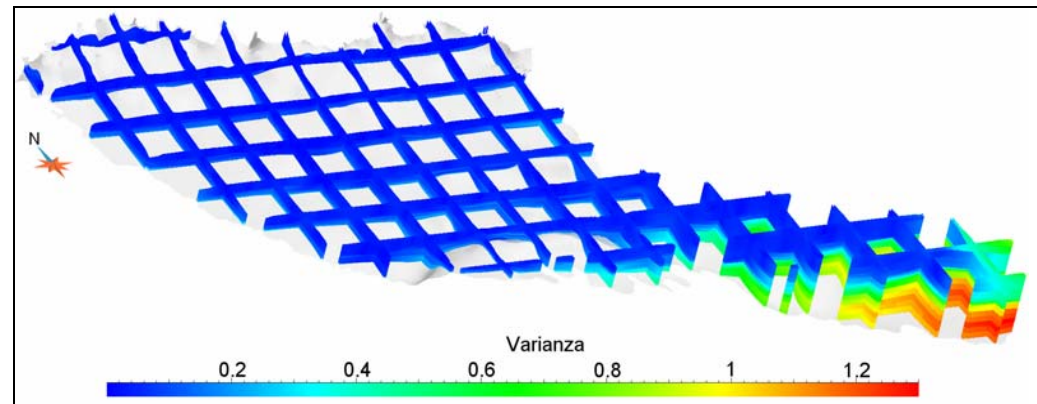


Figura 6.79 - Distribuzione della varianza **porosità efficace** all'interno dell'area di studio, lungo sezioni incrociate

La distribuzione dei parametri idraulici nell'area di studio rispecchia la distribuzione della granulometria dei depositi e risulta, quindi, decrescere da Nord verso Sud, Sud-Est e dagli strati superficiali verso quelli profondi, dove prevalgono i litotipi fini. Secondo questo schema, infatti, l'alta pianura, escludendo la porzione dei terrazzi ferrettizzati dove i valori di conducibilità idraulica sono ridotti, è costituita da terreni permeabili, con acquiferi intercalati da diaframmi a bassa permeabilità, di scarso spessore ed estensione tale da non permettere la separazione tra falde. In questa porzione la ricarica da parte delle precipitazioni e dei corpi idrici superficiali è diretta.

Invece nella media e bassa pianura, dove si verifica l'ispessimento e la dilatazione degli intervalli argillosi-limosi, la minore o maggiore permeabilità di questi diaframmi influenza il grado di confinamento delle falde e diventa, quindi, un fattore discriminante per l'alimentazione delle falde. Infatti, ad esempio, nella provincia di Cremona la trasmissività tra falde superficiali e profonde può variare anche di un ordine di grandezza.

In profondità gli orizzonti a conducibilità idraulica e porosità efficace maggiori rispetto all'intorno indicano la presenza di acquiferi confinati, come, nel caso della provincia di Milano, tra le sezioni $i=90$ e $i=110$ (Figura 6.71).

6.4.6 Confronto dei risultati ottenuti con sezioni idrogeologiche ricostruite con tecniche classiche

Al fine di verificare l'affidabilità dei risultati prodotti e la bontà del metodo applicato è stato realizzato un confronto tra due sezioni latitudinali e due longitudinali, ricostruite tramite l'interpolazione di Gocad con quattro sezioni litologiche, tratte da letteratura e ricostruite secondo le tecniche classiche di correlazione manuale dei dati stratigrafici. Sono state scelte quattro sezioni idrogeologiche, di cui due ubicate nel territorio di Milano e Monza e Brianza (Avanzini et al., 1995, sezione 1 e sezione A, allegato 1), identificative della conformazione dell'alta e media pianura, e due nella provincia di Cremona (Beretta et al., 1992, sezione 2 e sezione B, allegato 4), rappresentanti la struttura della bassa pianura.

Le sezioni 1 e A sono state associate rispettivamente alla riga $j=153$ (allegato 2) e alla colonna $i=98$ (allegato 3); le sezioni 2 e B sono state rispettivamente associate alla riga $j=111$ (allegato 5) e alla riga $i=195$ (allegato 6). Va ricordato che tali associazioni non

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

coincidono esattamente, dato che Gocad permette esclusivamente la visualizzazione di sezioni parallele agli assi della griglia di calcolo.

Le tracce delle 8 sezioni sono riportate in Figura 6.80.

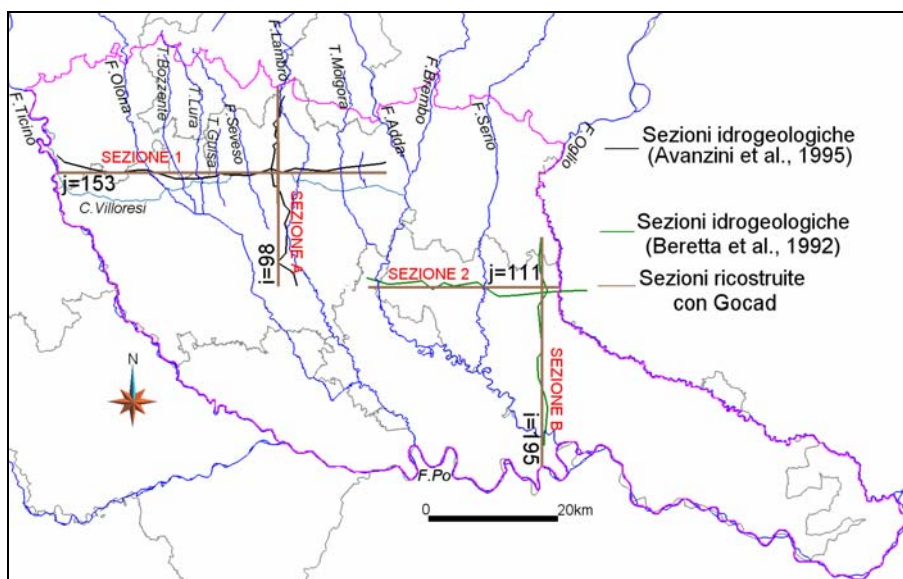


Figura 6.80 – Tracce delle 4 sezioni ricostruite in Gocad (in marrone), delle due sezioni litologiche che attraversano le province di Milano e Monza e Brianza (in nero) e delle due sezioni ubicate nella provincia di Cremona (in verde)

Nelle sezioni riportate negli allegati 2,3, 5 e 6 viene illustrata la ricostruzione delle tessiture (materiali grossolani, medi e fini) e della conducibilità idraulica, che ne rappresenta una sintesi. In ciascuna sezione sono riportati in nero i profili delle quattro superfici limite del modello: dal piano campagna verso il basso si distinguono la superficie topografica, la superficie basale del Gruppo Acquifero A, la superficie basale del Gruppo Acquifero B e la base del modello.

Le sezioni litologiche (allegati 1 e 4) sono state modificate per adattare alla risoluzione e alla dimensione del testo; per meglio confrontare i diversi spessori indagati, a ciascuna delle sezioni corrispondenti è sovrapposto in rosso il profilo della base del modello ricostruito in Gocad.

La riga $j=153$ (allegato 2) attraversa da Ovest verso Est il territorio compreso tra Lonate Pozzolo e Basiano, tagliando in ordine il fiume Olona, i torrenti Bozzente, Lura e Guisa, i fiumi Lambro e Seveso ed

infine il torrente La Molgora. Tra gli ultimi due fiumi elencati viene intersecata dalla colonna i=98 e dalla sezione 3.

Pur interessando uno spessore che quasi ovunque è inferiore a quello indagato dalla sezione 1, ne riproduce abbastanza fedelmente la progressiva riduzione della potenza della litozona superficiale a prevalenza ghiaiosa procedendo verso Est. Ugualmente simula in maniera piuttosto corretta la variazione di profondità alla quale viene individuato il tetto della litozona argillosa, che a partire da Monza verso Est si rinviene a profondità gradualmente minori.

Nel settore tra i fiumi Seveso e Lambro netta è la distinzione tra i materiali superficiali a prevalenza ghiaiosa e quelli sottostanti a predominanza argillosa.

Tra i torrenti Lura e Guisa si individua a circa 70 m di profondità in mezzo ad una preponderanza di sedimenti grossolani, un'alternanza di livelli a prevalenza sabbiosa e limoso-argillosa. Meno evidente è la compartimentazione che si nota in corrispondenza di Busto Arsizio.

A tale descrizione può essere aggiunta una valutazione quantitativa della conducibilità idraulica, non direttamente stimabile nelle sezioni litologiche. Parallelamente alla riduzione della litozona a prevalenza ghiaiosa da Ovest verso Est, anche i valori di conducibilità idraulica diminuiscono nella medesima direzione, interessando uno spessore via via più ridotto: si passa da valori tra i 200 – 270 m/g (ghiaia sabbiosa, ghiaia) con lenti anche superiori a 300 m/g (ghiaia ciottolosa) a valori intorno a 100 – 60 m/g, in cui la frazione a granulometria grossolana è rispettivamente ridotta a circa il 40% o quasi assente. Al di sotto dell'acquifero tradizionale i valori di conducibilità idraulica non sperano i 40 m/g. Si individuano due livelli di circa 7 m di spessore, vicino alla base del modello, leggermente più a Est del fiume Olona con valori di conducibilità idraulica più alta dell'intorno, circa 170-200 m/g (più o meno ghiaia con sabbia).

La colonna i=98 (allegato 3) attraversa da Nord verso Sud il territorio compreso tra Giussano e San Donato Milanese, scorrendo parallelamente al fiume Lambro e percorrendo in senso longitudinale l'alta e la medio-bassa pianura. Anche in questo caso lo spessore modellizzato è inferiore rispetto a quello indagato dalla sezione litologica corrispondente (Sezione A).

L'acquifero è qui costituito dall'unità a conglomerati e arenarie fino all'altezza di Milano, definite rispettivamente dalle percentuali dei materiali grossolani e medi. Si osserva una riduzione dello spessore

di questa unità procedendo verso Sud, oltre ad una diminuzione della granulometria. Si tratta delle strutture dei paleoalvei di Lambro e Seveso.

La sezione riproduce piuttosto fedelmente il formarsi di litotipi sabbiosi argillosi alla base del modello in corrispondenza di Desio e a circa 110 m di profondità in corrispondenza di Milano: questi segnano il passaggio dall'unità conglomeratica alle argille sottostanti, di cui viene correttamente simulato l'approfondirsi del tetto con una costante pendenza.

I valori di conducibilità più alti (250-270 m/g) si ritrovano nei depositi ghiaiosi-sabbiosi conglomeratici che costituiscono l'acquifero tradizionale; nel passaggio tra l'unità conglomeratica e le argille i valori si abbassano a 100 -80 m/g, per poi diminuire a conducibilità idrauliche inferiori a 40 m/g e a 10 m/g.

Per quanto riguarda le sezioni ricostruite nella provincia di Cremona (sezioni j=111 e i=195), nonostante interessino uno spessore maggiore rispetto alle sezioni litologiche (sezioni 2 e B), le ricostruzioni ottenute sono poco affidabili, poco coerenti con le reali caratteristiche del sottosuolo. Questo accade perché in questa porzione del bacino la densità dei pozzi con stratigrafia, in base a cui è avvenuta l'interpolazione 3D è bassa, soprattutto in profondità (figura 5.7), al di sotto della base A.

La riga j=111 (allegato 5) attraversa latitudinalmente il settore settentrionale della provincia di Cremona, dall'Adda ad Ovest ,all'Oglio ad Est. Riproduce la distribuzione nei primi 60 m dei depositi ghiaiosi ghiaiosi-sabbiosi. Ad Est di Romanengo si osserva un innalzamento, costituito da materiali prevalentemente sabbiosi. Si distingue, non molto chiaramente, un alternanza di livelli sabbiosi e limoso-argillosi a circa 70-80 m di profondità in corrispondenza di Pianengo e del fiume Serio. In generale è difficile cogliere le intercalazioni di materiali fini, all'interno dei sedimenti a granulometria più grossolana.

Uguale comportamento si osserva per la conducibilità idraulica: fatta eccezione per una certa variabilità che si osserva in circa i primi 60 m dove i valori variano tra un minimo di 130 m/g e un massimo di 240 m/g, negli strati più profondi non si colgono le alternanze di strati a permeabilità differenti. Qui la permeabilità oscilla tra 40-70 m/g (sabbia, limosa-sabbia) e valori inferiori a 10 m/g.

La colonna i=195 (allegato 6) attraversa interamente la provincia di Cremona, congiunge Calcio (provincia di Bergamo) con Maccastorna (provincia di Lodi). Lo spessore modellizzato è decisamente maggiore rispetto a quello ricostruito nella sezione B, che interessa circa il solo Gruppo Acquifero A.

La granulometria e lo spessore dei sedimenti, che vicino a Calcio è di circa 50 m, diminuiscono procedendo verso Sud, a partire da Cumignano sul Naviglio si passa infatti da sedimenti ghiaiosi-sabbiosi a sedimenti prettamente sabbiosi. Al di sotto di questi strati più permeabili, si notano orizzonti a prevalenza argillosa con intercalazioni sabbiose, riprodotti da Gocad con poca precisione.

Si osserva una differenza netta di permeabilità tra la zona prossima a Calcio, in cui gli strati costituiti dai sedimenti più grossolani hanno una conducibilità idraulica compresa tra 120 m/g e 240 m/g, e il resto della sezione in cui i valori variano tra 8 m/g e 65 m/g. Si nota un incremento nella conducibilità idraulica in corrispondenza dell'Adda dove i valori raggiungono nuovamente i 160-200 m/g.

Nella porzione meridionale di questa sezione i risultati della simulazione mostrano un andamento deposizionale all'interno del Gruppo Acquifero A piuttosto anomalo e diverso da ciò che è riprodotto nella sezione idrogeologica B, esso descrive un avvallamento. La giacitura degli starti della griglia A e, di conseguenza, la deposizione dei sedimenti seguono la morfologia della Base A che in quel punto evidenzia proprio un avvallamento. Questa conformazione non è corretta, costituisce una problematica ancora aperta che si potrà risolvere attraverso un processo di continua implementazione del metodo applicato.

Dall'analisi delle sezioni ubicate nella provincia di Cremona, si evince che l'utilizzo della stessa scala cromatica impiegata per la descrizione delle sezioni del territorio tra Milano e Monza e Brianza è riduttivo: infatti nella media e bassa pianura, dove la compartimentazione del sottosuolo è maggiore, l'infittimento del dettaglio della legenda renderebbe più precisa l'interpretazione dei diversi livelli litologici. Questa è un'operazione sicuramente necessaria nel momento in cui si voglia realizzare un'indagine ad una scala geografica ridotta, provinciale o locale.

6.5 Problematiche incontrate e ancora aperte

Nella realizzazione del modello tridimensionale dell'area di bacino sono state incontrate delle problematiche che, nel maggior parte dei casi, rimangono ancora aperte. Queste dipendono sia dalla qualità e quantità dei dati di input, sia dalle prestazioni e dalle procedure automatizzate degli strumenti informatici utilizzati. Ne vengono di seguito descritti i principali.

La non omogenea distribuzione dei dati stratigrafici sia lungo la superficie (direzione XY) sia lungo lo spessore del sottosuolo (direzione Z) crea aree a diversa densità di informazioni, provocando incongruenze ed errori nei risultati finali dell'interpolazioni, specialmente in zone in cui i dati sono quasi o del tutto assenti (porzione meridionale della provincia di Cremona e porzione della provincia di Mantova, in corrispondenza della confluenza del fiume Oglio nel Po). La validità dei prodotti dell'elaborazioni, infatti, decresce al diminuire del numero dei dati puntuali e all'aumentare della distanza da essi. Si è cercato di fornire un'indicazione sul grado di affidabilità dei risultati prodotti, attraverso mappe di varianza o confrontando le simulazioni con lavori realizzati in precedenza. Una stima matematica più precisa dell'errore nel processo di interpolazione potrebbe validare con più sicurezza l'intero procedimento applicato. Allo stesso tempo la procedura con cui i valori di conducibilità idraulica vengono automaticamente attribuiti al sottosuolo, in funzione dei litotipi e della relativa presenza percentuale (paragrafo 9.1), potrebbe essere calibrata attraverso il confronto con valori ricavati da misure in campo, quali prove di pompaggio.

Gli ultimi dati stratigrafici raccolti risalgono alla fine del 2008: l'aggiornamento della Banca Dati e l'integrazione di informazioni derivanti dalla perforazione di nuovi pozzi possono contribuire al miglioramento della caratterizzazione tessiturale e della parametrizzazione delle aree indagate, soprattutto dove la densità dei dati è bassa.

Il Modello Digitale del Terreno (DTM) della pianura lombarda (CNR-Irpi), da cui è stata ricavata la superficie topografica nell'area tra Ticino e Oglio, ha una bassa risoluzione (celle di dimensioni 250 m x 250 m): questo si osserva principalmente confrontando le quote dei pozzi ricavate tramite quotatura su DTM con le poche quote

ottenute da misure in campo tramite GPS. Spesso tra di esse esiste una differenza anche di qualche metro.

Un altro effetto che si nota è lo scarso dettaglio nella riproduzione della morfologia del territorio, soprattutto lungo le valli fluviali: la proiezione dei fiumi nello spazio 3D tramite la quotatura dei fiumi in base alla superficie topografica produce errori significativi nell'andamento e nell'inclinazione dei corsi idrici superficiali sul territorio indagato. Questo è sicuramente un problema per il successivo modello di flusso, in cui i fiumi sono elementi fondamentali per la simulazione del comportamento della falda ed è quindi necessaria un'estrema precisione nel modellarli.

I tempi di elaborazione del software di calcolo Gocad, relativamente all'interpolazione dei dati stratigrafici nella griglia 3D, sono stati piuttosto alti, ognuna ha richiesto mediamente 8-9 ore di calcolo: in un procedimento in cui le ripetute correzioni e i continui cambiamenti delle impostazioni iniziali hanno portato allo svolgimento di numerosi tentativi, l'elevata lunghezza di esecuzione di ciascuno di essi ha fortemente condizionato le tempistiche del progetto.

Per questo motivo, nei mesi scorsi è stata avviata una collaborazione tra il gruppo di Idrogeologia del Disat e il centro di calcolo Cilea, per tentare di abbassare i tempi di elaborazione del programma. Il Cilea ha messo a disposizione l'elevata esperienza in campo informatico e le potenti macchine che possiede, mentre il gruppo di Idrogeologia ha fornito un supporto tecnico sull'utilizzo del programma e relativamente ai progetti su cui eseguire alcuni test.

Purtroppo non sono stati raggiunti i risultati sperati, probabilmente per un problema intrinseco alla scrittura del programma: l'esecuzione in batch, bypassando l'interfaccia grafica, non ha portato miglioramenti, inoltre, l'interpolazione dei dati, attraverso kriging, non supporta il calcolo parallelo, che avrebbe potuto snellire l'elaborazione suddividendola tra diverse CPU.

Esistono sicuramente due aspetti positivi nati da questa collaborazione: tramite la configurazione in remoto, che permette il collegamento con il server su cui fisicamente il software gira, è possibile utilizzare Gocad da qualsiasi pc legato alla rete internet; inoltre, attraverso i molteplici tentativi eseguiti, aumentando regolarmente la complessità elaborativa con griglie a numero di celle crescente, non è ancora stato trovato un limite massimo nell'esecuzione, se pur con tempi molto lunghi. Ciò è un risultato

6 Ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche nel bacino tra Ticino e Oglio

incoraggiante, soprattutto in vista della realizzazione di modelli a scala geografica più ampia, quali ad esempio l'intero bacino del Po.

7 Individuazione di livelli torbosi nell'area di bacino tra Ticino ed Oglio

La torba è un deposito composto da resti vegetali in decomposizione, si accumula in suoli più o meno ricchi di acqua e privi di ossigeno.

I livelli torbosi si trovano in corrispondenza di zone isolate che in passato erano paludose. Si ipotizza che la formazione di questi ambienti umidi sia dovuta a stagnazione di acque superficiali, causata dal basso gradiente topografico, o dal riempimento di depressioni del terreno, attraverso l'emergenza superficiale della falda. Questo ultimo caso si è, ad esempio, verificato nella bassa pianura veneto-friulana, durante il Last Glacial Maximum: Miola et al. (2006) spiegano che la risalita superficiale delle acque sotterranee in quella zona sia stata favorita dalla bassa permeabilità dei depositi sottostanti che impedivano l'infiltrazione dell'acqua meteorica in profondità, da condizioni meteo-climatiche fredde e, quindi, da un basso tasso di evapotraspirazione. In questa situazione la deposizione e l'attività organica prevalse sulla sedimentazione alluvionale mineralogica, si verificò, quindi, un accumulo di strati continui di torba. I livelli torbosi vennero poi sepolti nel momento in cui accadde il processo contrario, secondo cui la deposizione alluvionale superò quella organica.

La sola presenza di torba, anche se in quantità minime, ricopre un ruolo importante sia in campo geomorfologico sia in campo chimico, relativamente alla qualità delle acque sotterranee: può essere considerata un marker nell'individuazione dell'evoluzione tardo-pleistocenica della pianura padana e può essere legata alla liberazione di arsenico e ammoniaca nelle falde profonde.

Per quanto riguarda l'ambito geomorfologico, un esempio proviene anch'esso dalla conformazione della pianura veneto-friulana dove sono stati realizzati diversi studi relativi al legame tra presenza di torba ed evoluzione tardo-pleistocenica. Infatti analisi stratigrafiche, datazione al radiocarbonio e studi di palinologia hanno permesso a Fontana et al. (2010) di trovare tracce di torba nell'area indagata in diversi momenti del Tardo Pleistocene, in seguito ad eventi deposizionali, geologici e condizioni climatiche particolari: strati sottili di torba e materiale organico sono stati rinvenuti in corrispondenza del culmine della penultima glaciazione, nella seconda parte del medio Würm ed anche durante l'acme del Last Glacial Maximum.

Per quanto riguarda l'ambito chimico, sono stati realizzati molteplici studi che legano la presenza di torba alla contaminazione delle falde profonde da parte di arsenico di origine naturale, derivante da rocce vulcaniche e sedimentarie: l'arsenico viene adsorbito dagli idrossidi e dai minerali argillosi, oltre ad essere associato alla sostanza organica presente. Zavatti et al. (1995), nello studio relativo alle acque sotterranee della Pianura Padana, riportano che sono state misurate concentrazioni del metalloide notevolmente più alte nei livelli argillosi e/o torbosi rispetto ai contigui livelli sabbiosi; queste concentrazioni sono risultate superiori di un fattore pari anche a tre o quattro. Mc Arthur et al. (2001), in un lavoro relativo agli acquiferi del Bangladesh, sottolineano che la distribuzione di torba nei sedimenti dell'acquifero costituisce la principale fonte di controllo sull'inquinamento da arsenico.

Infine, anche nello studio di Francani et al. (1994), realizzato nella provincia di Cremona, viene ribadito il fatto che la presenza di materiale organico è in grado di influenzare la qualità delle acque sotterranee. Nello specifico si fa riferimento all'azione dei microrganismi combinata alla presenza di argille miste a limi e torba che facilita l'incremento dell'ammoniaca nelle acque: la concentrazione di NH_3 nelle falde profonde, infatti, è dovuta al fatto che in corrispondenza dei depositi del Pleistocene inferiore - Pleistocene superiore, ricchi di torba, si libera ammoniaca, la cui concentrazione aumenta con la profondità.

L'individuazione di livelli torbosi nel sottosuolo risulta perciò un aspetto significativo da affrontare: sfruttando l'elevata quantità di dati stratigrafici archiviati nella Banca Dati e le potenzialità del software di elaborazione 3D, è stato realizzato un tentativo di ricostruzione 3D della distribuzione di torba nel sottosuolo del bacino tra Ticino e Oglio. Per prima cosa sono state analizzate la frequenza e la distribuzione delle percentuali torbose puntuali nel sistema idrogeologico, attraverso un istogramma e attraverso la proiezione di tali dati nello spazio 3D di Gocad, in relazione alle superfici limite del sistema. In secondo luogo è stata eseguita l'interpolazione dei dati puntuali nell'intero volume considerato.

7.1 Analisi delle percentuali di torba estratte dalla Banca Dati Tangram

Le percentuali di torba sono state estratte da Tangram ogni 2 m: i valori ricavati forniscono la percentuale di torba in un determinato

7 Individuazione dei livelli torbosi nell'area di bacino tra Ticino e Oglio

livello stratigrafico rispetto agli altri elementi, ovvero le proprietà tessiturali e quei termini presenti nelle stratigrafie, ma privi di significato idrogeologico (paragrafo 9.1). A differenza delle caratteristiche idrogeologiche, le stratigrafie che contengono valori di torba maggiori di zero sono una percentuale molto bassa rispetto al totale (solo il 13%, Tabella 7.1 e Figura 7.1) e soprattutto interessano spessori di sottosuolo piuttosto sottili (di qualche metro, difficilmente superano i 10 m).

PROVINCIA	STRATIGRAFIE CON PRESENZA DI TORBA
Bergamo	57
Como	21
Cremona	200
Lecco	11
Lodi	129
Milano e Monza e Brianza	484
Pavia	99
Varese	115
Totale	1116

Tabella 7.1 - Distribuzione per provincia delle sole stratigrafie con presenza di livelli torbosi

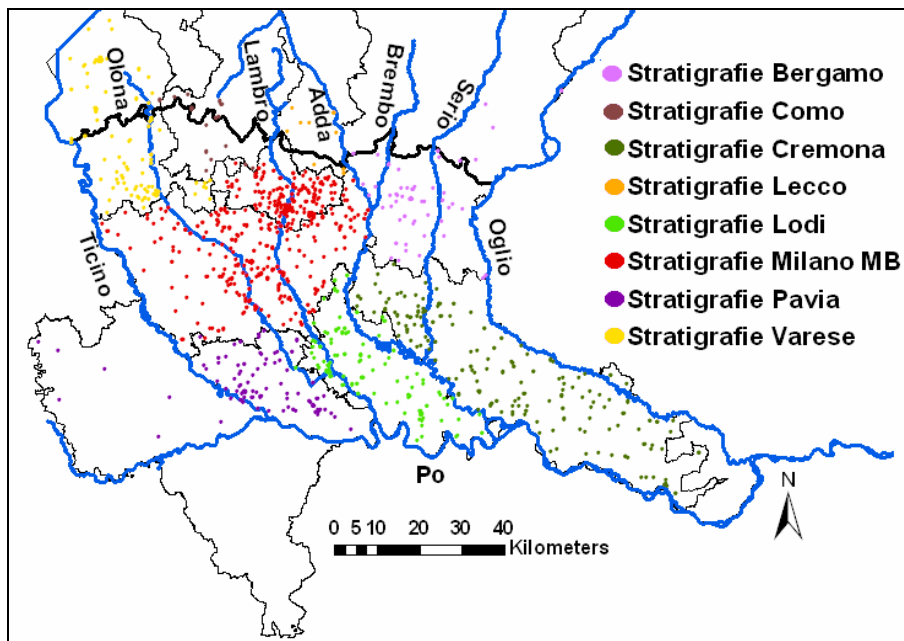


Figura 7.1 - Distribuzione all'interno dell'area di pianura lombarda tra Ticino e Oglio delle sole stratigrafie con presenza di livelli torbosi, suddivise per province in base alla legenda cromatica riportata

Dall'estrazione è stato ricavato un set di 69'089 punti, di cui solamente 6012 (8.7% del totale estratto) corrispondono a valori maggiori di 0%. Relativamente a questo sottogruppo è stato ricostruito l'istogramma di frequenza riportato in Figura 7.2: sono state individuate 10 classi omogenee di torba percentuale, ciascuna di 10 valori; il minimo di ciascuna classe è escluso e quello massimo è incluso nell'intervallo considerato.

Dall'osservazione dell'istogramma (Figura 7.2) si nota che le percentuali maggiori di 40 sono scarsamente diffuse. La classe con la frequenza più alta è quella 30%_40%: si tratta probabilmente di quantità di torba associata all'argilla (argilla torbosa o argilla con torba, secondo lo schema dei pesi percentuali del capitolo 10). I punti corrispondenti a percentuali pari alla classe 90%_100% si trovano in livelli spessi non più di 2 m - 4 m, per la maggior parte ubicati in superficie; qualche raro caso di livelli con percentuali di torba così alte e con spessore pari o superiore a 6 m si trova ad elevate profondità. Dal grafico si deduce, quindi, che in generale la torba è scarsamente presente nell'area indagata

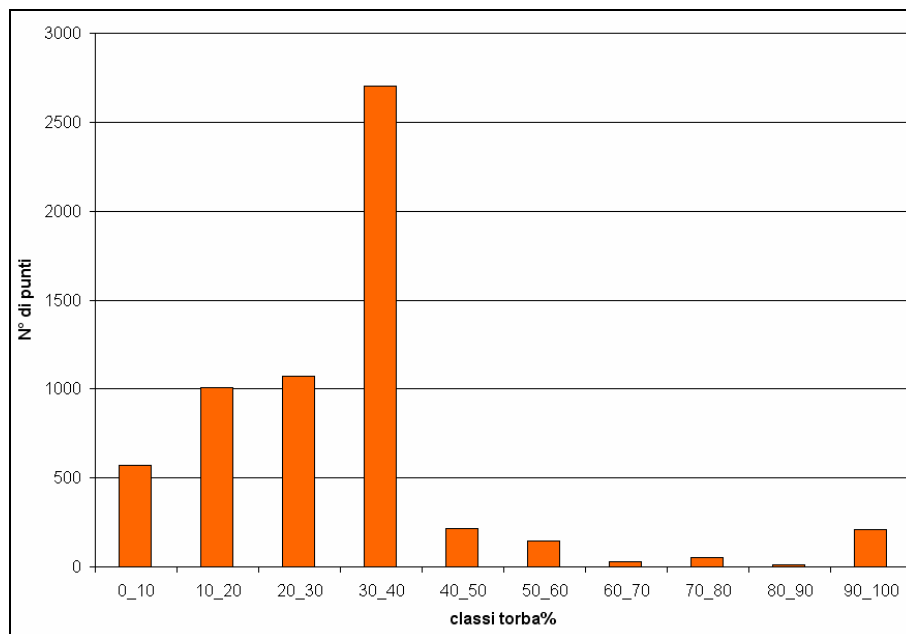


Figura 7.2 - Istogramma di frequenza dei valori percentuali di torba, maggiori di 0%

7.2 Visualizzazione 3D delle percentuali di torba

Inizialmente i valori puntuali percentuali di torba sono stati proiettati tra la superficie topografica e la Base A (Figura 7.3) e tra la Base A e la Base B (Figura 7.4): il rosso indica presenza di torba e il grigio assenza di essa (valore pari a 0%), lungo ciascun pozzo considerato. Dalle immagini, attraverso una visualizzazione da Ovest, si nota presenza di torba nella porzione centro settentrionale, al di sotto sia della Base A che della Base B; al contrario, a Sud-Est in corrispondenza della porzione centro-meridionale della provincia di Cremona, tutti i valori puntuali di torba si trovano all'interno del Gruppo Acquifero A. In generale, in questa porzione dell'area di studio, vi è una carenza di dati stratigrafici (come mostra anche l'immagine 6.4).

Anche in Figura 7.5, dove viene proposta una visione dall'alto dei valori di torba, si osserva una totale assenza di essi nell'estrema punta a Sud-Est dell'area di studio. Inoltre si rileva mancanza di torba anche nell'estrema porzione settentrionale e a Nord-Est.

Tale visualizzazione tridimensionale ha permesso di mettere in relazione la presenza puntuale di torba con le superfici basali dei Gruppi Acquiferi, potendo assegnare loro non solo una collocazione spaziale, ma anche temporale, dato che le superfici rappresentano un cambiamento nell'ambiente deposizionale dell'area e corrispondono, quindi, ad uno specifico periodo nell'evoluzione della pianura.

7 Individuazione dei livelli torbosi nell'area di bacino tra Ticino e Oglio

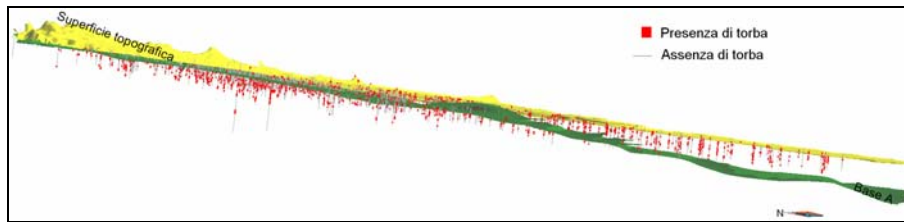


Figura 7.3 – Proiezioni dei valori di torba (in rosso valori maggiori di zero e in grigio valori uguali a zero) tra superficie topografica e Base A

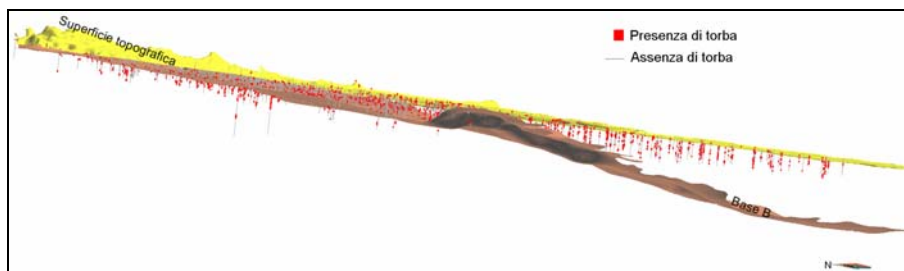


Figura 7.4 - Proiezioni dei valori di torba (in rosso valori maggiori di zero e in grigio valori uguali a zero) tra superficie topografica e Base B

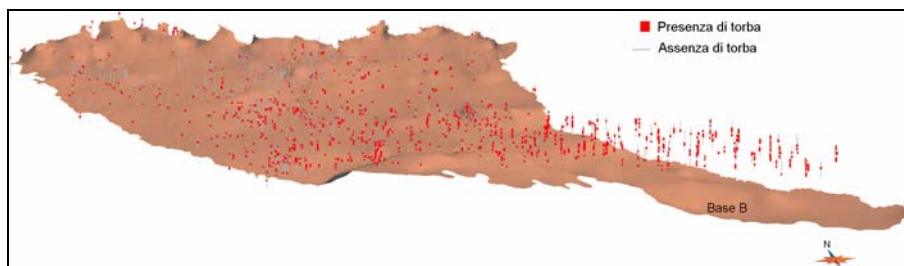


Figura 7.5 – Visione dall'alto della distribuzione dei valori di torba nell'area di studio, in marrone la Base B

L'interpolazione dei dati puntuali produce una rappresentazione più chiara ed immediata delle dimensioni e della posizione dei livelli di una determinata proprietà nel sistema; per questo motivo è stata realizzata tale elaborazione 3D.

E' stata mantenuta la medesima suddivisione del sistema idrogeologico in tre griglie, corrispondenti ai Gruppi Acquiferi A, B e C, così come per la ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche. Però, data la bassa densità di dati puntuali e l'esiguo spessore dei livelli torbosi, è stato infittito il numero di strati lungo la verticale, come viene riepilogato in Tabella 7.2, così da ottenere nelle zone ricche di dati uno spessore delle celle non superiore a 3 m.

GRIGLIA	N° STRATI	SPESSORE CELLE (m)	N° CELLE REGIONE DATA
Griglia A	130	Variabile tra 0 m e 3 m	3'426'020
Griglia B	17	Variabile tra 0.045 m e 24 m	448'069
Griglia C	29	Variabile tra 0 m e 3 m	124'727

Tabella 7.2 – Riepilogo discretizzazione griglia A, B e C, utilizzate per l'interpolazione della torba percentuale

I processi che hanno condotto all'origine della torba sono differenti da quelli che hanno portato alla deposizione dei sedimenti fluviali e fluvio-glaciali, non mostrano, infatti, una regolarità nella variabilità spaziale. Questo comportamento è ben visibile dall'analisi del variogramma sperimentale che evidenzia una crescita praticamente nulla, esso, infatti, raggiunge quasi immediatamente un asintoto; non emerge alcuna direzione principale lungo cui si sia verificato il fenomeno, né alcuna regola che ne guidi la distribuzione nel sistema idrogeologico. Ciò dimostra una bassissima correlazione tra coppie di punti.

E' stato, perciò, scelto un modello sferico per meglio approssimare il variogramma sperimentale ottenuto (Figura 7.6).

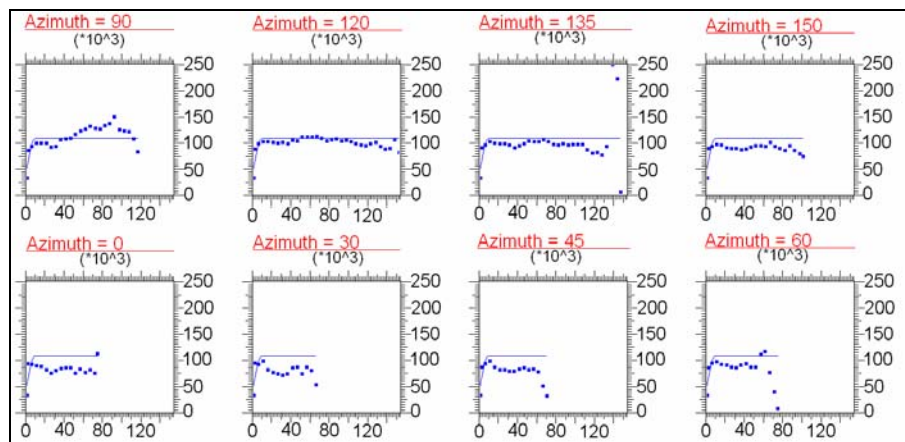


Figura 7.6 – Variogramma relativo alle percentuali di torba. Nugget Effect = 50, Sill = 108.475 e Range = 10303.6

Il variogramma è stato utilizzato dal Kriging durante l'interpolazione geostatistica.

I risultati ottenuti vengono visualizzati tramite sezioni longitudinali (Figura 7.7), latitudinali (Figura 7.8) e incrociate (Figura 7.9),

appoggiate sulla base del modello, colorata di verde. I dati puntuali utilizzati per l'interpolazione sono posizionati accanto alle sezioni, sottoforma di sottili linee grigie, rappresentanti le colonne stratigrafiche dei singoli pozzi considerati. In questo modo, così come dall'analisi della distribuzione della varianza (Figura 7.10), è possibile capire dove i risultati siano affidabili, perché derivanti da dati effettivamente presenti, e dove lo siano di meno perché frutto unicamente di un calcolo matematico in zone prive di misure reali. I valori di varianza più bassi (0.4-0.5) si trovano infatti in corrispondenza delle zone a maggior concentrazione di dati; invece la varianza più alta (1.2, 1.4 e valori maggiori) risulta essere in profondità, nell'estrema punta Sud-Est dell'area di studio dove non esistono dati, così come a Nord-Est.

Data la disomogeneità nella disposizione dei valori percentuali di torba nell'area di studio e l'elevata predominanza delle percentuali nulle rispetto a quelle maggiori di zero (paragrafo 7.1), i valori percentuali simulati, ottenuti nella distribuzione continua, non raggiungono il 100% di torba, ma il valore massimo è circa 89%. L'estremo massimo della scala cromatica è stato infatti impostato a 90%, mentre quello minimo è 2.5%: questo valore è stato assimilato allo 0%, ovvero all'assenza di torba. Secondo la tabella dei pesi percentuali (tabella 9.1), in fase di archiviazione il valore a cui viene associata la minima presenza di un elemento in una stratigrafia è 5%. In questo caso è stata, quindi, eseguita un'approssimazione considerando i valori inferiori a 5% identificativi di totale assenza o di presenza molto bassa di torba. Per farne risaltare il contrasto con il resto dei valori percentuali, è stata assegnata all'intervallo 0% - circa 3.5% una colorazione bianca; lo sfondo delle immagini è grigio scuro, per non confondersi con i colori delle sezioni.

Per una visualizzazione più dettagliata, viene mostrata una sezione ogni 10, ovvero una ogni 5 km.

Dalle immagini 7.7, 7.8 e 7.9 si nota che, causa assenza di dati in profondità, a Sud-Est dell'area di studio (porzione meridionale della provincia di Cremona e piccolo settore della provincia di Mantova), l'interpolazione non è riuscita: infatti, per quanto riguarda la griglia B la distribuzione della torba è stata ricostruita fino all'incrocio tra la sezione longitudinale $i=40$ e quella latitudinale $j= 270$, mentre nella griglia C sono stati simulati dati fino all'incrocio tra la sezione longitudinale $i=40$ e quella latitudinale $j=240$ (per la numerazione delle sezioni si faccia riferimento alla figura 6.5).

Nell'alta pianura lenti di torba si trovano in profondità, soprattutto intorno al 10%-20%. Un'eccezione è il livello superficiale di circa 50 m a Nord-Ovest, in corrispondenza della pianura della provincia di Varese, probabilmente dovuto ad un errore nell'elaborazione, a causa dei pochi dati là presenti. Valori più alti e diffusi sono presenti nella porzione centrale dell'alta pianura, dove c'è la maggior concentrazione di dati puntuali: qui, in profondità, si rileva un livello di circa 6 m a valori intorno al 40%.

Spostandosi verso Sud, Sud-Est la quantità di torba aumenta, anche in superficie, soprattutto verso il limite orientale dell'area di studio, identificato dal fiume Oglio, dove i depositi argillosi, a cui spesso sono associate tracce di torba, dominano rispetto alle altre litologie.

Nel centro della provincia di Lodi, a circa – 24 m s.l.m., all'interno del Gruppo Acquifero B, esiste una lente di 7 m di spessore, lunga circa 4,5 km, con valori percentuali maggiori di 40%. In questa porzione i dati puntuali sono pochi, la presenza di questi quantitativi di torba è certa attorno ai dati misurati, dove questi non esistono, si possono solamente fare delle supposizioni.

Uguualmente, nella parte settentrionale della provincia di Cremona, a maggiori profondità, ma sempre in corrispondenza del Gruppo Acquifero B, si ritrovano lenti spesse circa 6 m, lunghe circa 2 km, con valori intorno al 50%.

Nella zona meridionale, vicino alle anse del fiume Po, soprattutto tra le province di Lodi e Cremona, la presenza di torba al di sotto del piano campagna è discreta: forse deriva dalla formazione in passato di lanche del fiume, dove, a causa del basso gradiente topografico, si è verificato il ristagnamento di acqua superficiale per lungo tempo, avviando i processi di degradazione e di produzione di torba.

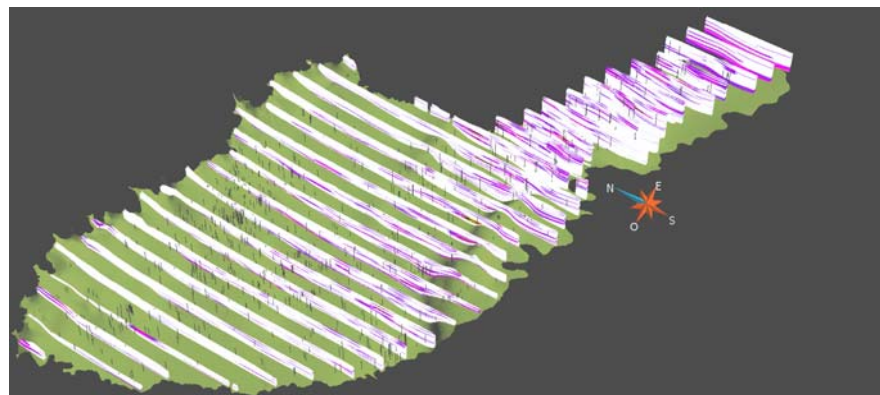


Figura 7.7 - Distribuzione di torba % all'interno dell'area di studio, lungo sezioni longitudinali

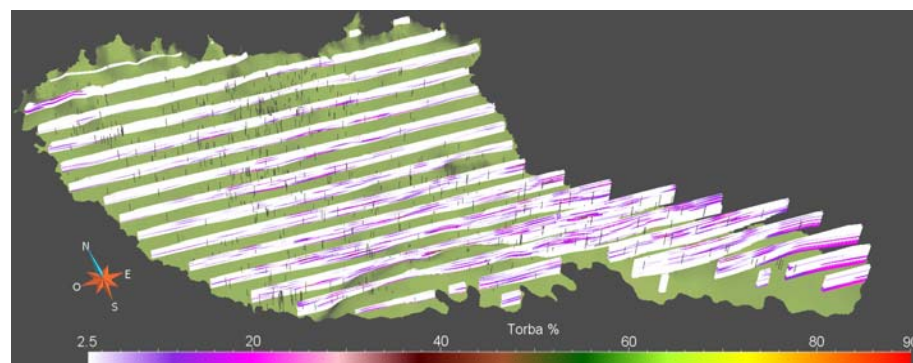


Figura 7.8 - Distribuzione di torba % all'interno dell'area di studio, lungo sezioni latitudinali

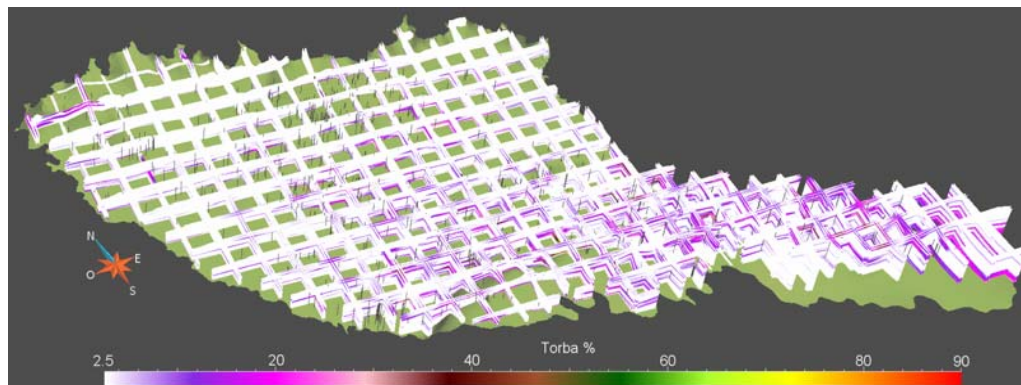


Figura 7.9 - Distribuzione di torba % all'interno dell'area di studio, lungo sezioni incrociate

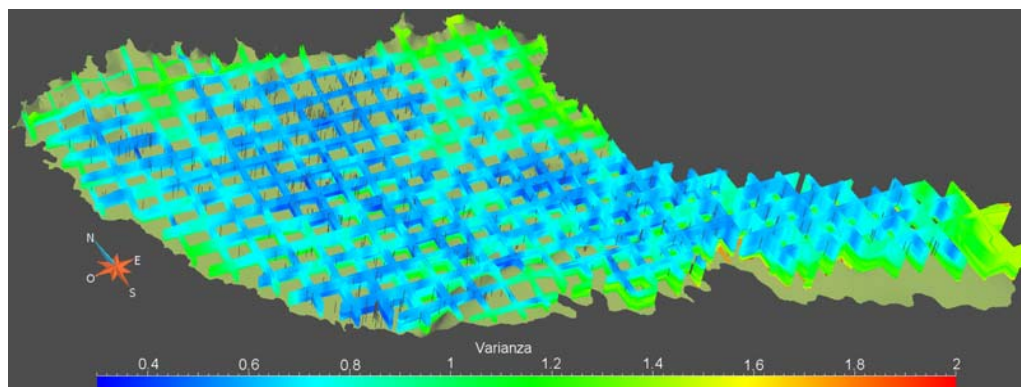


Figura 7.10 - Distribuzione di varianza di torba % all'interno dell'area di studio, lungo sezioni incrociate

La visualizzazione secondo regioni 3D corrispondenti alle classi percentuali di torba simulate ha permesso la realizzazione di grossolane valutazioni quantitative: in base all'istogramma di frequenza dei dati simulati, nelle singole griglie sono state individuate 3 regioni corrispondenti a tre classi percentuali di torba (5%-15%, 15%-30% e maggiore di 30%, non considerando i valori minori di 5%); ad ogni mappa prodotta (Figura 7.11, Figura 7.12 e Figura 7.13) è associato il grafico a torta equivalente alla presenza di ciascuna classe nella corrispettiva griglia.

Anche da questa rappresentazione emerge la predominanza di valori nulli o quasi di torba (<5%) nei 3 gruppi Acquiferi; tra le percentuali maggiori di 5%, invece, la classe più diffusa è 5-15%. Inoltre, le regioni costituite da i valori maggiori di 30% in generale e dai valori 15-30% per gli Acquiferi B e C sono limitate in singole isole attorno alle misure di input (pozzi in grigio), a dimostrazione del fatto che il processo di formazione della torba è avvenuto in zone isolate e circoscritte.

Nel Gruppo Acquifero A, in corrispondenza dell'alta pianura (Figura 7.11) non vi sono tracce significative di torba, ad eccezione di alcuni episodi di cui non si ha la certezza a causa di una mancanza di dati puntuali. Nella media e bassa pianura il volume occupato dalle singole regioni aumenta in modo crescente dalla classe maggiore di 30% alla classe 5-15%. La presenza di valori nell'estrema punta a Sud-Est non è realistica per totale assenza di dati di input.

Nell'Gruppo Acquifero B (Figura 7.12) la presenza di torba è minore rispetto agli altri due: non è immediato capire se ciò sia dovuto ad una reale assenza di questo elemento nell'ambiente deposizionale o alla mancanza di dati o ad un errore nell'interpolazione. Le regioni corrispondenti alle due classi più alte (15%-30%, maggiore 30% occupano porzioni rilevanti a Sud della provincia di Lodi, vicino al Po, e a Nord-Est della provincia di Cremona, lungo il fiume Oglio.

Infine nel Gruppo Acquifero C i valori compresi tra 5-15% sono i più diffusi e occupano pressappoco una fascia in senso latitudinale nell'alta pianura. Le regioni 15-30% e maggiore di 30%, invece, compaiono sottoforma di isolati spot più o meno al centro dell'alta pianura.

7 Individuazione dei livelli torbosi nell'area di bacino tra Ticino e Oglio

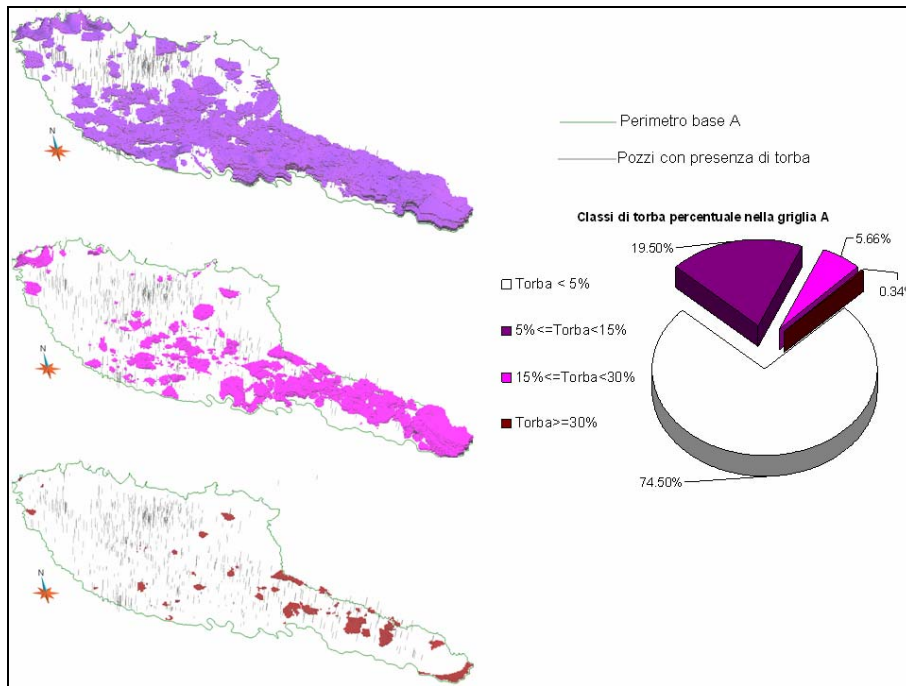


Figura 7.11 – Zonazione delle classi di torba nella griglia A; a destra grafico a torte della presenza percentuale delle classi. In verde è riprodotto il limite della base A

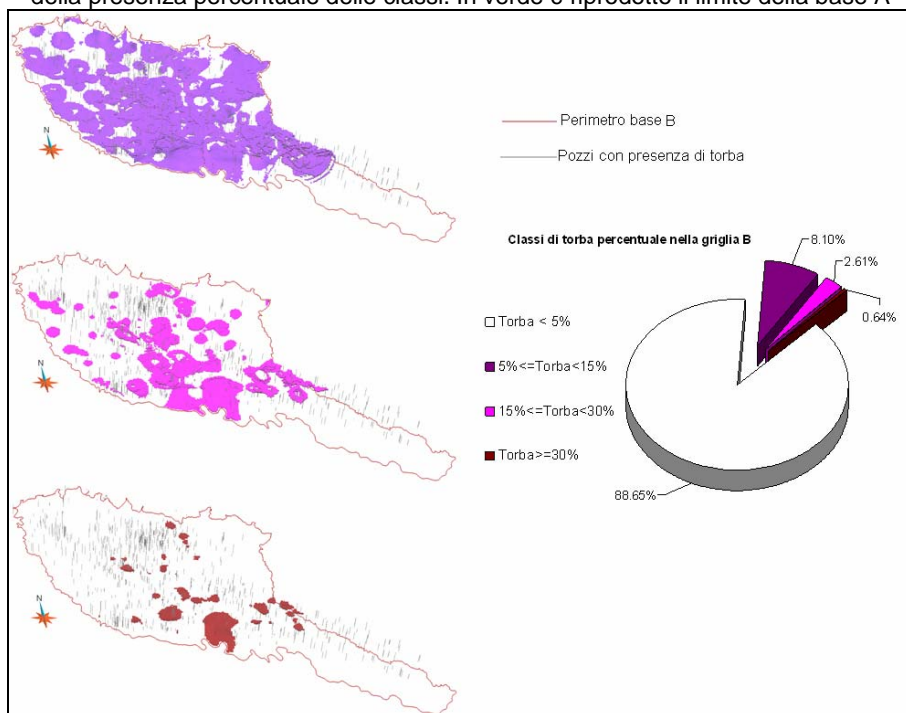


Figura 7.12 – Zonazione delle classi di torba nella griglia B; a destra grafico a torte della presenza percentuale delle classi. In rosso è riprodotto il limite della base B

7 Individuazione dei livelli torbosi nell'area di bacino tra Ticino e Oglio

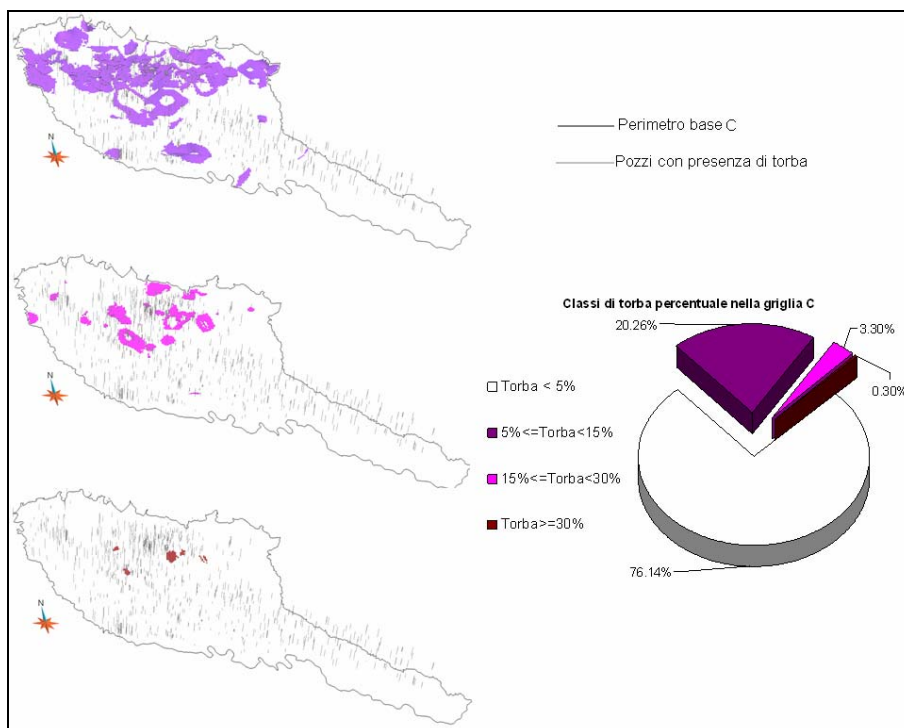


Figura 7.13 - Zonazione delle classi di torba nella griglia C; a destra grafico a torte della presenza percentuale delle classi. In grigio è riprodotto il limite della base B

Nonostante le valutazioni quantitative riportate sopra non siano del tutto affidabili e precise, emerge, comunque, che tracce di torba, più o meno marcate, si ritrovano sia nel Gruppo Acquifero A, sia nel Gruppo Acquifero B, sia al di sotto di esso, tra i depositi villafranchiani, ovvero in corrispondenza del pleistocene superiore, medio e dell'inferiore (figura 4.4). Ciò indica che in quei periodi nel bacino lombardo si sono verificate determinate condizioni climatiche, deposizionali e geologiche tali da creare ambienti favorevoli alla formazione di torba: principalmente condizioni di elevata umidità, stagnazione di acqua e assenza di ossigeno.

8 Caratterizzazione idrogeologica 3D a scala provinciale per la stima della disponibilità idrica del sottosuolo

L'acqua sotterranea del sottosuolo delle province di Milano (ad esclusione del comune di San Colombano al Lambro) e Monza e Brianza è la principale fonte per l'approvvigionamento idrico potabile e non potabile, in particolare lo sfruttamento a scopo civile si concentra soprattutto in corrispondenza del comune di Milano, dove il prelievo medio areale è di oltre 46 l/s km² (Regione Lombardia, PTUA, Allegato 5, 2006). La risorsa sotterranea soddisfa la quasi totalità dell'uso industriale e parte di quello agricolo. Si tratta quindi di una risorsa strategica per queste province e la sua conservazione risulta un obiettivo importante, che richiede programmi d'azione per evitarne il depauperamento quantitativo e qualitativo. La conoscenza dell'entità delle riserve, delle sue variazioni, dei suoi utilizzi, oltre che della sua qualità è perciò un aspetto fondamentale per l'applicazione di efficaci e mirate azioni volte al risparmio idrico (Bonomi et al., 2010).

A questo proposito la metodologia di caratterizzazione idrogeologica tridimensionale, descritta nel capitolo 6, è stata applicata al territorio delle province di Milano (ad esclusione del comune di San Colombano al Lambro) e di Monza e Brianza, finalizzata alla stima della disponibilità idrica.

La scelta è ricaduta su queste due province perché costituiscono un'area indagata da anni, per cui esiste una discreta quantità di dati di monitoraggio, con maggior continuità nel tempo, rispetto ad altre zone di pianura.

8.1 Breve inquadramento delle province di Milano e di Monza e Brianza

Il territorio delle province di Milano e Monza e Brianza si estende tra il corso del fiume Ticino ad Occidente, il corso del fiume Adda ad Oriente e confina con le pendici delle Prealpi a Nord; a Sud il limite è costituito dal confine amministrativo con la Provincia di Lodi. Sono situate in posizione centrale rispetto all'intera area della regione Lombardia (Figura 8.1). Il reticolo idrografico naturale è molto ben sviluppato in direzione Nord-Sud, mentre una fitta rete di canali artificiali si sviluppa in direzione trasversale, mettendo in

comunicazione da Ovest verso Est i principali corsi d'acqua. Il settore centro-meridionale dell'area di studio è in particolare caratterizzato dalla presenza della zona dei fontanili, che si estende lungo una fascia allungata in direzione Ovest-Est.

I settori settentrionali e centrali della Provincia sono caratterizzati da un'elevata urbanizzazione, mentre le aree più a Sud sono destinate principalmente all'agricoltura. Il diverso uso del suolo influenza in modo differente il bilancio idrogeologico dell'area e lo stato qualitativo delle acque sotterranee.

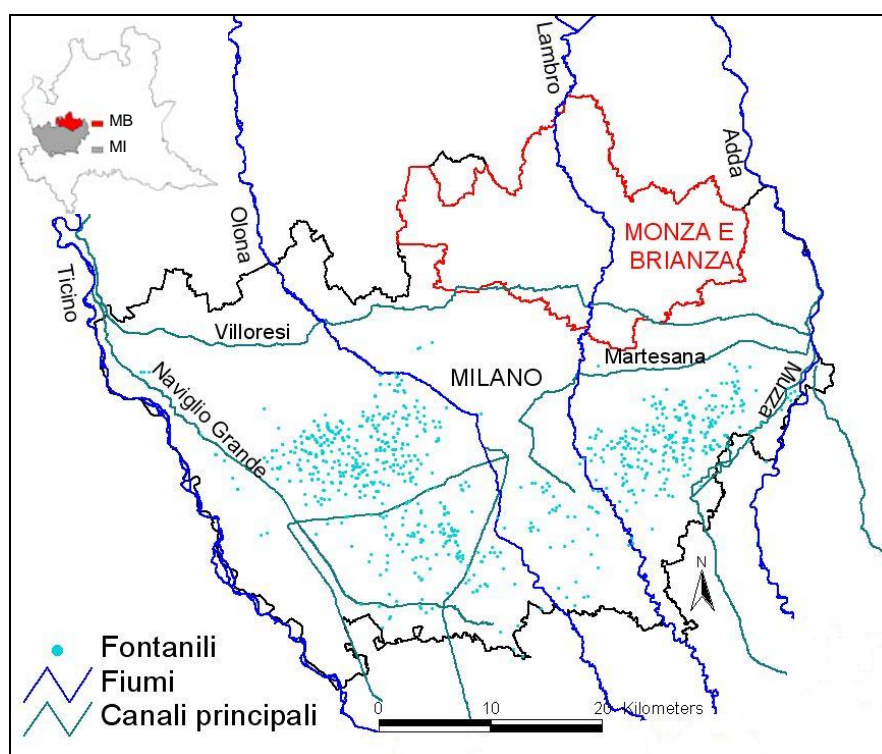


Figura 8.1 – Rete idrografica nelle province di Milano e Monza e Brianza

8.1.1 Inquadramento geomorfologico e geologico

Dal punto di vista geomorfologico (nella figura 8.2 è proposto un dettaglio della carta geomorfologica della Regione Lombardia), l'area di studio può essere così descritta: a Nord, vicino alle Prealpi si individuano le morene, costituite da ciottoli e blocchi caotici in matrice limoso-argillosa; sempre nella zona settentrionale si trovano i terrazzi ferrettizzati (antichi e intermedi, rissiani e mindeliani), costituiti da ghiaie, sabbie e ciottoli arrotondati in abbondante matrice limoso-

argillosa. Nei terrazzi più antichi l'alterazione dei depositi determina la presenza in superficie del tipico vetusol (Cremaschi, 1987), denominato Ferretto per il caratteristico colore rossastro, di notevole spessore. La presenza di argilla in superficie e la loro compattezza rende tali depositi poco permeabili alle acque di infiltrazione. Lungo i fiumi principali esistono i terrazzi fluviali, affiancati dalle relative pianure alluvionali: sono costituiti da ghiaie e sabbie con lenti di argilla e limo più o meno estese, si tratta della copertura alluvionale recente a riempimento delle valli di erosione post-wurmiane disposte lungo i corsi idrici. Infine la maggior parte del territorio è occupata da depositi ghiaioso-sabbiosi wurmiani di buona trasmissività. Da Nord a Sud si distinguono l'alta pianura, la media pianura idromorfa e in minima parte la bassa pianura a meandri: sono caratterizzate da ghiaie e sabbie in matrice limosa con locali lenti di argille; nella pianura idromorfa la quantità dei depositi fini aumenta dando origine al fenomeno delle risorgive.

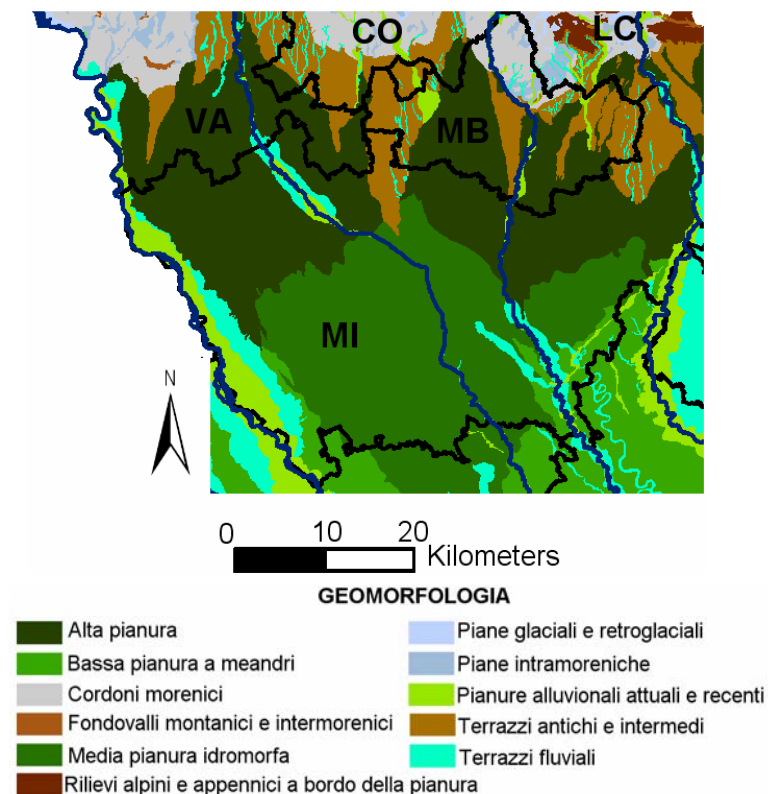


Figura 8.2 – Dettaglio della carta geomorfologica regionale (figura 5.9) relativo alle province di Milano e Monza e Brianza

8.1.2 Inquadramento idrogeologico

Il sottosuolo delle due province nella parte basale è costituito da una successione di sedimenti plio-pleistocenici, principalmente limi e argille d'origine marina con rare sabbie e ghiaie, mentre nella parte sommitale si ritrovano alternanze di ghiaie, sabbie, limi e argille d'origine alluvionale e fluvio-glaciale. In quest'area, come in tutta la zona padana, le principali variazioni litologiche sono contraddistinte dalla progressiva prevalenza di terreni limosi argillosi, che si verifica sia con l'aumento della profondità, dovuto a evidenti modifiche dell'ambiente di sedimentazione, sia procedendo da Nord a Sud, connesso con la diminuzione dell'energia di trasporto degli agenti deposizionali (Provincia di Milano, 2000). Per una dettagliata descrizione delle unità idrogeologiche ci si riferisca alla suddivisione di Avanzini et al. mostrata in figura 4.4 e commentata nel paragrafo 4.4.

E' stato indagata la stessa porzione di sottosuolo modellizzata nel bacino Ticino-Oglio (l'acquifero tradizionale, comprensivo della porzione superiore del Gruppo Acquifero C, relativamente alla porzione centro-settentrionale del territorio), che viene comunemente sfruttata dai pozzi profondi fino a 80-100 m dal piano campagna nel settore Nord e fino a 140 m a Sud di Milano (Provincia di Milano, 1995).

8.2 Metodologia applicata

Il metodo applicato ha lo scopo di valutare il quantitativo di acqua presente in un serbatoio idrico sotterraneo, in base alle caratteristiche idrogeologiche dell'area in esame e al variare delle condizioni piezometriche storiche. Il livello piezometrico della falda è la manifestazione di una serie di fattori (le caratteristiche geologiche, la precipitazione, la posizione e le caratteristiche dei corpi idrici superficiali, la quota di evapotraspirazione, i prelievi e le irrigazione) che influenzano il naturale flusso idrico e quindi il bilancio di massa del sistema: le oscillazioni della falda all'interno del serbatoio sotterraneo costituiscono il bilancio netto del sistema e sono quindi indicative del quantitativo d'acqua contenuto in un serbatoio idrico sotterraneo.

In una prima fase, avviene la ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche del sistema, secondo la procedura mostrata in figura 3.2 e utilizzata anche per l'area di bacino (capitolo 6). Particolare

attenzione viene assegnata alla ricostruzione della distribuzione della porosità efficace nel sottosuolo che stima le dimensioni dei pori dei sedimenti effettivamente attraversabili dall'acqua e fornisce un'indicazione sulla quantità d'acqua immagazzinabile nel sottosuolo.

In una seconda fase, viene riprodotto il comportamento dinamico dell'acquifero, attraverso la ricostruzione delle variazioni del livello della falda nel tempo.

I risultati di queste due fasi del lavoro vengono incrociati per stimare il volume di terreno saturo e, all'interno di questo, calcolare la quantità d'acqua che si trova nei pori dei depositi a granulometria grossolana e media (considerando valori di porosità efficace maggiori e uguali al 17%) corrispondente al volume di acqua mobile che è in grado di filtrare all'interno dell'acquifero. Questo volume corrisponde alla reale disponibilità idrica presente nel sottosuolo e comprende sia le riserve strategiche dell'acquifero sia la parte che può risultare disponibile al prelievo. Dal punto di vista tecnico, la griglia tridimensionale di calcolo che simula l'intero volume dell'acquifero viene tagliata secondo la superficie piezometrica e viene, perciò suddivisa in porzione insatura del sottosuolo e porzione satura del sottosuolo. La porzione di interesse è quella satura, di cui in automatico è possibile calcolarne il volume, che viene qui denominato volume saturo del terreno. All'interno del terreno saturo possono essere individuati: una matrice solida, costituita solo da materiale solido (ad esempio, ghiaia, sabbia, limo o argilla), una porzione di acqua di ritenzione, ovvero quella quantità di acqua che viene trattenuta ed intrappolata nei pori dei sedimenti fini e non è in grado di muoversi. Infine una porzione di acqua mobile, ossia quella quantità di acqua che si trova nei pori intercomunicanti all'interno di depositi a granulometria grossolana e media (rappresentati dal parametro della porosità efficace).

La somma della quantità di acqua di ritenuta e acqua mobile identifica il volume di acqua immagazzinata, di cui solo una parte rappresenta la disponibilità dell'acquifero.

In Figura 8.3 vengono schematicamente mostrate le relazioni intercorrenti tra volume di terreno saturo, acqua immagazzinata, di ritenuta e mobile e matrice solida.

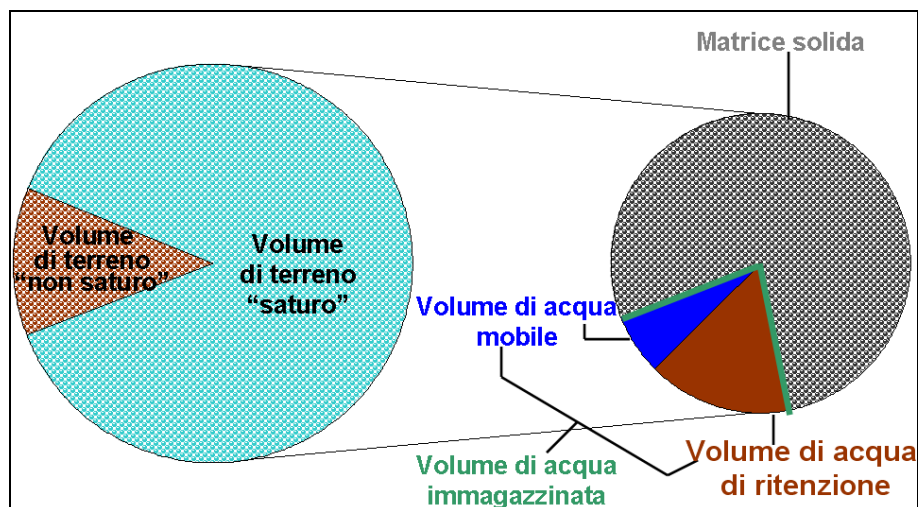


Figura 8.3 - Suddivisione tra acqua e matrice solida all'interno di un acquifero.

Per quanto riguarda la stima del volume di acqua immagazzinata e di acqua mobile, bisogna prendere in considerazione le classi di porosità efficace caratterizzanti il sistema idrogeologico: il volume di ciascuna di esse, rappresentate sotto forma di regioni all'interno della porzione satura, viene moltiplicato per il valore percentuale della classe corrispondente e i singoli valori risultanti vengono infine sommati. Per la stima del volume di acqua immagazzinata vengono prese in considerazione tutte le classi di porosità efficace, mentre per il volume di acqua mobile solamente quelle relative ai depositi grossolani e medi.

8.3 Elaborazione 3D dei dati statici

Questo paragrafo tratta della caratterizzazione del sistema idrogeologico: simulazione della struttura geologica, attraverso l'individuazione di superfici limiti, e ricostruzione della distribuzione continua ed eterogenea dei depositi nel serbatoio sotterraneo, con particolare attenzione alla relativa porosità efficace, fondamentale per la stima della disponibilità idrica (paragrafo 8.2).

8.3.1 Modellazione della struttura geologica del sistema

Nonostante il sistema idrogeologico in esame fosse già stato modellizzato all'interno dell'area di bacino e potesse essere quindi ricavato attraverso un'estrazione dal sistema più grande, si è scelto di

procedere alla costruzione di una nuova griglia, perché le condizioni iniziali erano differenti:

- in questo caso è stata realizzata un'indagine a scala provinciale;
- la superficie topografica ha un dettaglio molto elevato;
- lo scopo che ha guidato la caratterizzazione 3D del sistema, è diverso;
- non vi sono vincoli sul numero totale di celle nella griglia.

Quindi è stata costruita una griglia conforme alle superfici limite elencate di seguito dalla più superficiale alla più profonda:

- superficie topografica derivata dal Modello Digitale del Terreno (DTM), ricavato dalle curve di livello ogni 5 m di un lavoro di Marchetti del 1992 (figura 5.11);
- superficie basale del Gruppo Acquifero A, estratta a scala provinciale dalla superficie realizzata per l'area di bacino (paragrafo 6.1);
- superficie basale del Gruppo Acquifero B, estratta a scala provinciale dalla superficie realizzata per l'area di bacino (paragrafo 6.1);
- base del modello, estratta a scala provinciale dalla superficie realizzata per l'area di bacino (paragrafo 6.1).

Ne è risultata una griglia regolare di 272 colonne x 220 righe x 205 strati. Ogni cella ha dimensioni 250 m x 250 m x 2 m, per un totale di più di 12 milioni, di cui circa 6 milioni costituiscono la regione *Data* (Tabella 8.1).

COLONNE	RIGHE	STRATI	CELLE TOTALI	CELLE NELLA REGIONE <i>DATA</i>
272	220	205	12'267'200	6'261'315

Tabella 8.1 – Riepilogo della griglia relativa al sistema idrogeologico indagato nelle province di Milano e Monza e Brianza

Alla griglia è stata applicata una deformazione rispetto alle quattro superfici elencate sopra (paragrafo 6.2, figura 6.16), ottenendo strati a spessore variabile tra qualche centinaia di centimetri a circa 3.5 m, in funzione dell'entità della deformazione subita dalla griglia in ciascun punto.

La figura 8.4 mostra la griglia 3D di calcolo deformata; inscritte al suo interno vi sono le quattro superfici limite: in rosso la superficie topografica, in marrone la Base A, in giallo la Base B e in verde la base del modello.

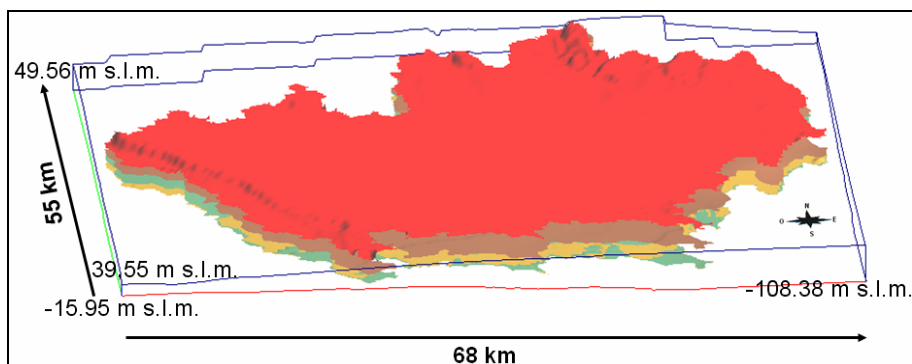


Figura 8.4 - Griglia 3D di calcolo deformata secondo le quattro superfici all'interno di essa (dall'altro verso il basso rispettivamente superficie topografica, Base A, Base B e base del modello)

In Figura 8.5 è riprodotto lo spessore del sistema indagato (visualizzato sottoforma di proprietà sulla superficie topografica): i valori variano tra un minimo di circa 30 cm a Nord e un massimo di 194 m a Sud. Nella maggior parte dell'area (colori verdi) lo spessore varia tra 100-130 m, ad Ovest lungo la scarpata del Ticino è costante intorno a 100-115 m.

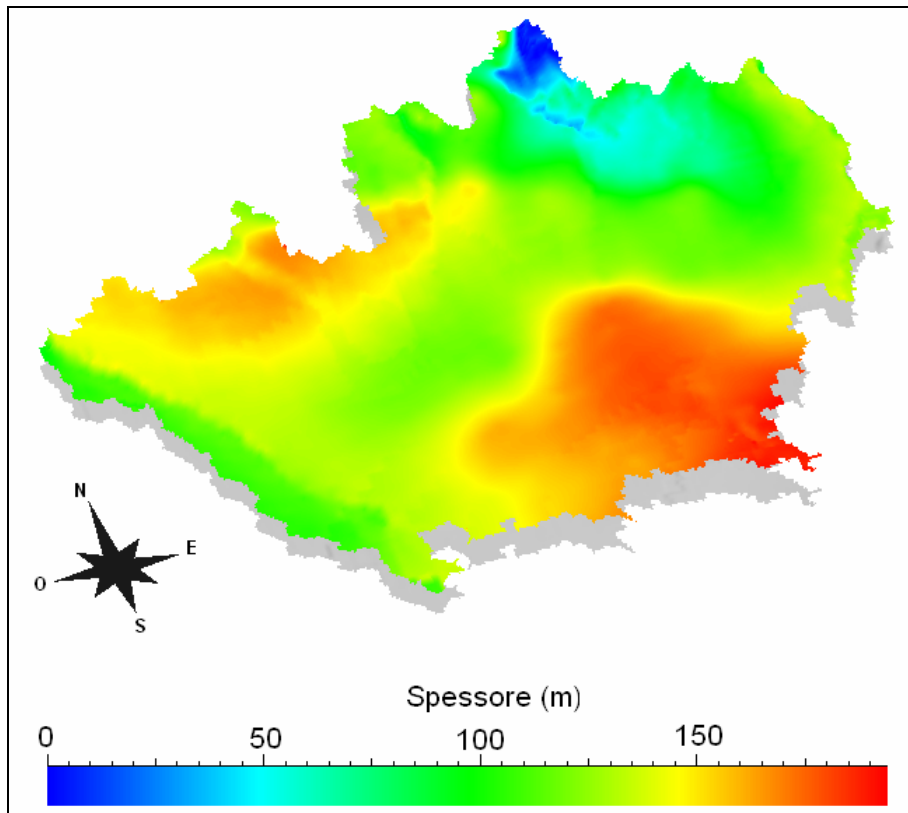


Figura 8.5 – Distribuzione dello spessore del sistema indagato, proiettato sulla superficie topografica. In grigio viene mostrata la base del modello

8.3.2 Ricostruzione dell'eterogeneità dei depositi nel sistema

L'eterogeneità dei depositi è stata riprodotta utilizzando le informazioni stratigrafiche dei 3493 pozzi georeferenziati, visualizzati in verde nella Figura 8.6.

In Tangram, relativamente alle due province, sono archiviati 7617 pozzi, di cui circa il 48% possiede la stratigrafia (Tabella 8.2).

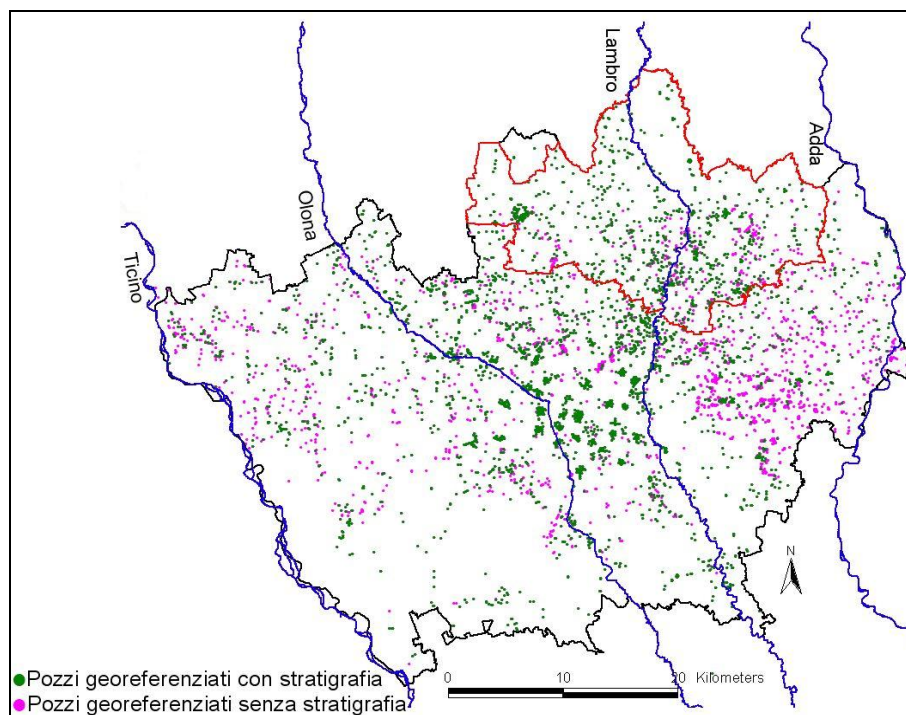


Figura 8.6 - Distribuzione dei pozzi georeferenziati, suddivisi in pozzi con stratigrafia (in verde) e pozzi senza stratigrafia (in viola)

POZZI TOTALI	7617
PROFONDITA' MASSIMA	587 m
PROFONDITA' MEDIA	50,96 m
POZZI CON STRATIGRAFIA	3705 (di cui 3493 georeferenziati)
% POZZI CON STRATIGRAFIA	48.6%

Tabella 8.2 - Riepilogo dei pozzi delle province di Milano e Monza e Brianza, inseriti in Tangram

Sono stati estratti i dati stratigrafici georeferenziati (3493) fino a una profondità massima di 587 m (corrispondente al pozzo più profondo), secondo livelli di 2 m di spessore, ottenendo un set di 149440 punti, relativo alle proprietà tessiturali percentuali (termini grossolani, medi e fini). Questi dati puntuali sono stati interpolati tramite Kriging all'interno della griglia ricostruita (paragrafo 8.3.1), dopo aver calcolato il variogramma per ciascuna tipologia di litologia. La distribuzione continua ed eterogenea ricavata per ciascuna di esse è visualizzata nella seguente immagine (figura 8.7), tramite sezioni incrociate (una ogni 20, ossia una ogni 5 km), parallele agli

assi della griglia; la distribuzione dei valori percentuali è rappresentata da una scala cromatica dove i colori freddi sono associati ai valori più bassi e quelli caldi ai valori più alti.

Analizzando i risultati dell'interpolazione, si nota che la distribuzione delle tessiture segue l'andamento di deposizione dei corsi idrici principali presenti sul territorio: la direzione di scorrimento dei fiumi è circa Nord-Sud, lungo cui si osserva una diminuzione della granulometria dei depositi, imputabile al decremento dell'energia di trasporto. Inoltre si individua un aumento dei depositi fini con la profondità, probabilmente dovuto a mutamenti nei bacini di deposizione; si tratta di caratteristiche congruenti a ciò che riporta la descrizione idrogeologica dell'area (paragrafo 8.1.2) e alla distribuzione dei depositi a scala di bacino (paragrafo 6.4.4).

I valori dei termini grossolani (figura 8.7, in alto) diminuiscono con la profondità e da Nord a Sud: in superficie assumono percentuali intorno al 40%-60% e si notano rare lenti tra l'80% e 100% in piccole zone a Nord, vicino all'area di ricarica dell'acquifero; all'aumentare della profondità e procedendo verso Sud, i valori diminuiscono fino a percentuali inferiori al 10%. Nell'estrema punta settentrionale della provincia di Monza e Brianza, leggermente ad Est del fiume Lambro, in superficie i materiali grossolani si trovano in percentuali più basse rispetto all'intorno: ciò dipende dalla presenza delle morene e dei terrazzi ferrettizzati (figura 8.2), ricchi, invece, di depositi fini (figura 8.7, in basso).

Nel territorio indagato abbondano i valori percentuali medio bassi (35%-55% circa) dei materiali a granulometria media (figura 8.7, in mezzo). In generale si riscontra una scarsità di materiali medi ad Est, Nord-Est, rispetto che ad Ovest, Sud-Ovest, dove sia in superficie che a qualche decina di metri di profondità si incontrano livelli del 75% -80% e lenti intorno al 95%. Nella zona centrale dell'area, circa in corrispondenza del comune di Milano, intorno a 120 m di profondità, si individuano dei livelli con valori di 85%-90%, probabilmente sede di acquiferi profondi.

La distribuzione dei materiali fini (figura 8.7, basso) mostra un comportamento opposto a quello depositi grossolani: in superficie abbondano le percentuali basse (intorno al 10-20%), mentre spostandosi verso Sud e in profondità la quantità di termini fini aumenta raggiungendo i valori massimi (90-100%) in alcune lenti a medie ed elevate profondità. Si riscontra anche un incremento dei valori percentuali in profondità, lungo la direzione Ovest-Est.

8 Caratterizzazione idrogeologica 3D a scala provinciale

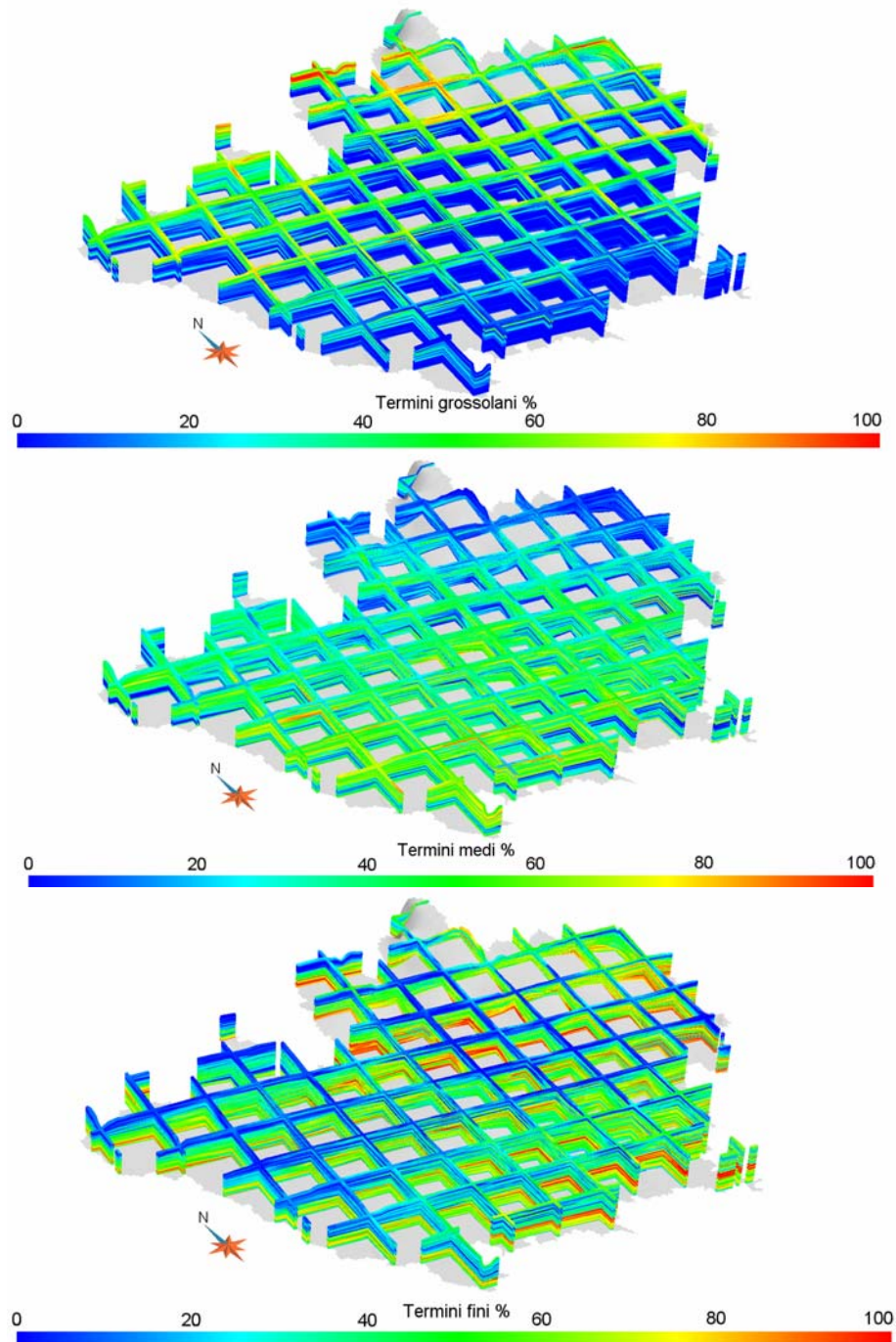


Figura 8.7 – Dall'alto verso il basso, distribuzione percentuale dei materiali grossolani, medi e fini all'interno del territorio delle due province, attraverso sezioni incrociate

Una volta ricostruita l'eterogeneità dei depositi, lo studio si è concentrato sull'analisi della relativa porosità efficace, esaminando, per prima cosa, la distribuzione dei valori percentuali puntuali (151'644) nell'area di studio, e poi ricostruendone la distribuzione 3D nel serbatoio sotterraneo, tramite interpolazione geostatistica con la tecnica Kriging.

Dall'osservazione dell'istogramma di frequenza (Figura 8.8) si nota che la classe più diffusa è la 22% e che in generale poco più della metà dei dati puntuali assumono valori compresi nell'intervallo percentuale 19-22 (corrispondente a litologie sabbiose, sabbiosghiaiose e ghiaiose). Anche la classe 5% (corrispondente alla porosità efficace di un'argilla) è presente in quantità discrete (11.8% dei dati hanno tale valore di porosità efficace), rispetto alle altre classi che hanno una distribuzione più o meno omogenea.

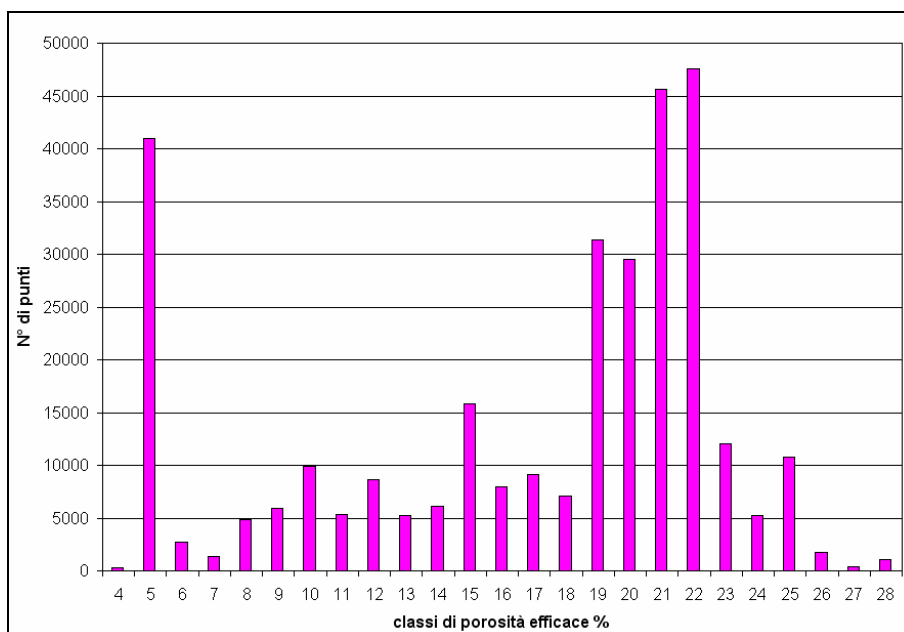


Figura 8.8 - Istantogramma di frequenza dei valori puntuali di porosità efficace

I risultati dell'interpolazione tridimensionale sono visualizzati tramite un istogramma di frequenza, realizzato in automatico da Gocad, in Figura 8.9, e lungo sezioni incrociate nell'immagine 8.10.

L'andamento della distribuzione ha un comportamento che si avvicina a quello di una curva gaussiana: gli estremi del range (4% e 28%) hanno una frequenza molto bassa, il valore della mediana

(17%) è simile al valore medio (16%). Si osserva la massima frequenza (*proportion* 0.1) in corrispondenza della classe 21%.

Valori percentuali di porosità efficace intorno a 21-22, con sporadiche lenti del 26%-28% si individuano negli strati superficiali e a pochi metri di profondità a Nord, Nord-Ovest dell'area. I valori infatti tendono a diminuire da Nord verso Sud, con la profondità e da Ovest verso Est, similmente al comportamento della granulometria dei sedimenti (Figura 8.7). In particolare il decremento che si osserva in profondità in senso longitudinale da Ovest verso Est, rispecchia l'incremento dei materiali fini mostrato in figura 8.7 in basso.

A Nord dell'hinterland milanese, nell'alta pianura (Figura 8.10), a circa 120 m di profondità, si nota un livello di circa 10 m con valori di porosità efficace intorno al 21%-22% e sottili lenti a 23%.

Nel resto dell'area sono molto diffusi i valori pari a 19% che con la profondità si abbassano a 16%, per raggiungere poi valori inferiori al 10% e i valori minimi (4% - 5%).

L'affidabilità dei risultati è maggiore (valori di varianza tra 0.1 e 0.3, Figura 8.11) nella zona centrale dell'area di studio, dove, ovviamente esiste la maggior concentrazione di dati puntuali (come mostrato in Figura 8.6); a Sud, Sud-Ovest, zona in cui i pozzi georeferenziati con stratigrafia scarseggiano, la varianza aumenta, raggiungendo in profondità i valori più alti (circa 1.33).

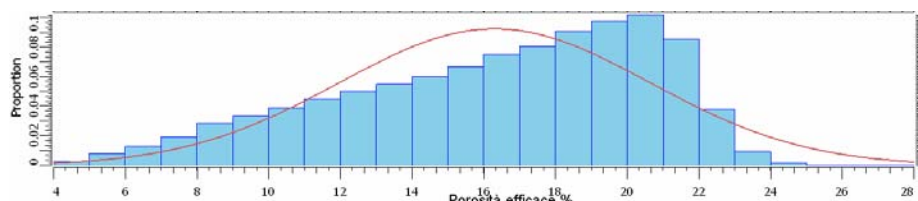


Figura 8.9 – Istogramma di frequenza dei dati simulati di porosità efficace

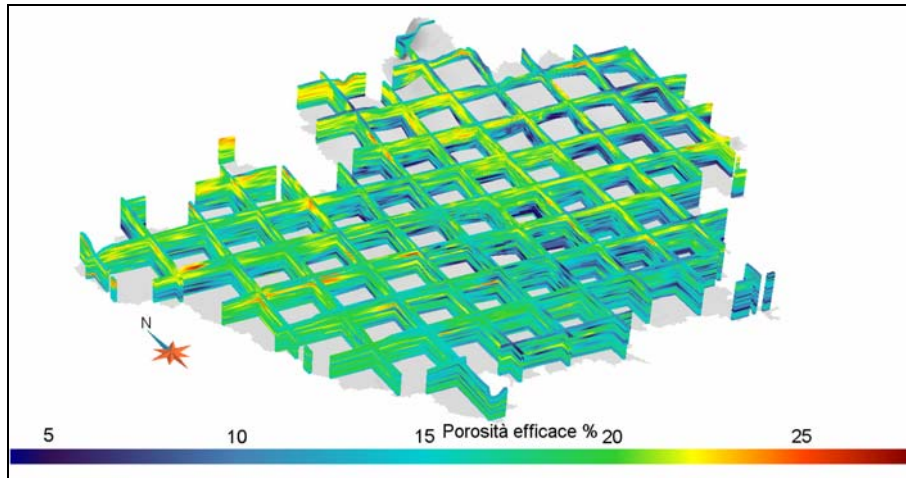


Figura 8.10 – Distribuzione di porosità efficace nel territorio delle due province, attraverso sezioni incrociate

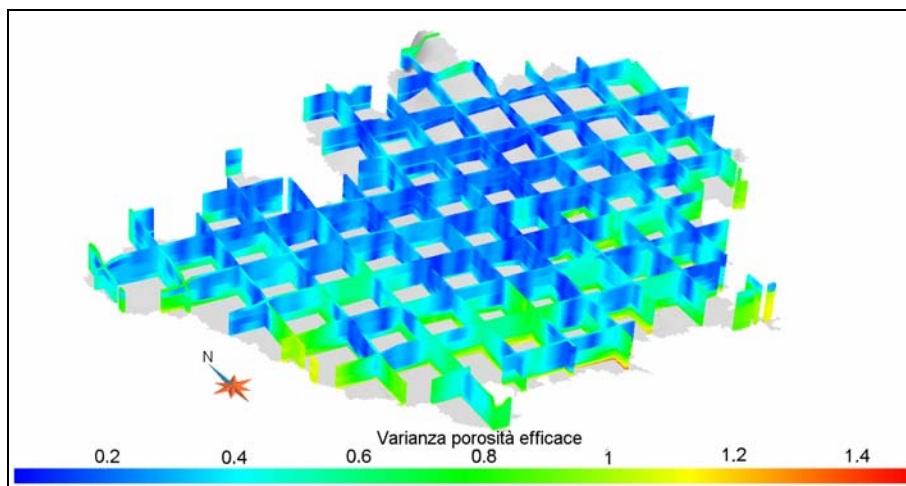


Figura 8.11 - Distribuzione della varianza della porosità efficace nel territorio delle due province, attraverso sezioni incrociate

Secondo la metodologia applicata, descritta nel paragrafo 8.2, l'intero sistema è stato suddiviso in 25 regioni, corrispondenti alle 25 classi di porosità efficace percentuale; a titolo esemplificativo, in Figura 8.12 viene mostrata la distribuzione delle classi percentuali 5 (in blu), 7 (in verde chiaro) e 24 (in giallo scuro), che occupano rispettivamente 1.16%, 2.26% e 0.18% dell'intero volume del serbatoio sotterraneo.

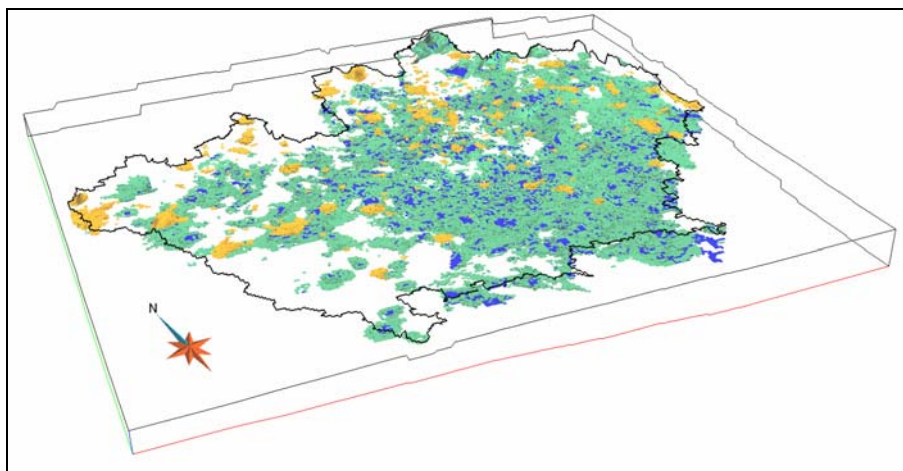


Figura 8.12 – Regioni di porosità efficace: 5%, (in blu), 7% (in verde chiaro) e 24% (giallo scuro). In nero è disegnato il perimetro della superficie topografica

8.4 Elaborazione dei dati dinamici

La variazione dinamica della tavola d'acqua nel tempo, è stata calcolata elaborando i dati della rete di Monitoraggio del CAP di Milano dal 1979 al 2005 e della Rete di Monitoraggio Quantitativa di ARPA Lombardia (2001 – 2005), ad integrazione dei primi (Figura 8.13).

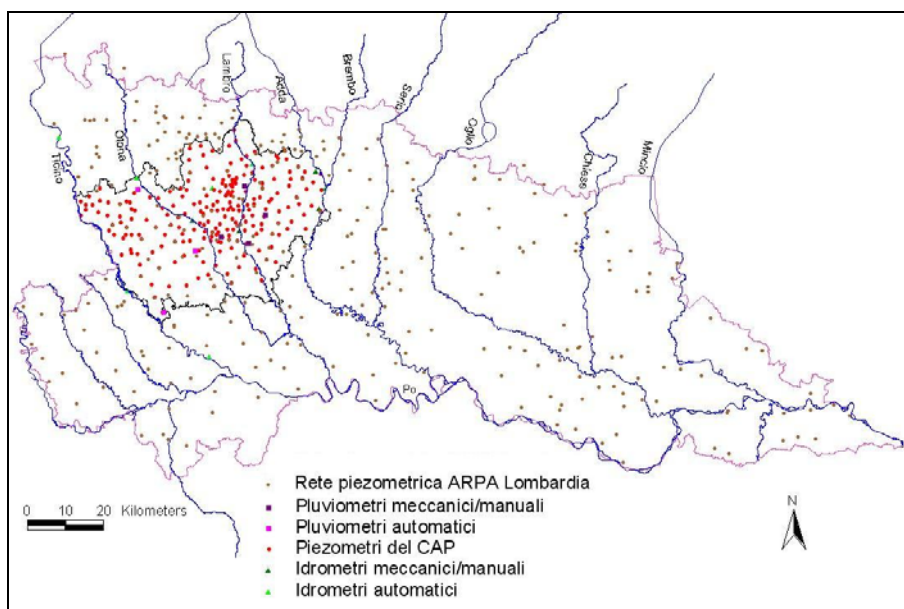


Figura 8.13 - Ubicazione dei piezometri del CAP, dei piezometri e degli idrometri della Rete di Monitoraggio Quantitativo di ARPA Lombardia

8.4.1 Andamento piezometrico storico

E' stato ricostruito l'andamento temporale del livello piezometrico nei pozzi geograficamente più significativi e con la serie di dati più completa. Gli obiettivi sono stati molteplici: si è voluto verificare se nell'arco degli anni di misura (i dati in nostro possesso sono misure mensili dall'inizio del 1979 a giugno del 2005) ci siano stati dei cambiamenti nei livelli, di quale entità e a che cosa siano dovute le variazioni, se ad un fattore puramente geografico o a fattori esterni, anche di origine antropica. Purtroppo spesso la mancanza o la frammentarietà dei dati, soprattutto negli ultimi anni, e gli errori nelle misure impediscono la possibilità di svolgere delle analisi e delle elaborazioni sempre corrette.

Di seguito sono riportati due esempi di serie temporale piezometrica in due comuni differenti, Muggiò (Figura 8.14) e Monza (Figura 8.15): in entrambi i casi sono presenti i valori di 8 stazioni di misura, ubicate in punti diversi l'una dall'altra. Ciascuna ha un inizio e una fine di misura differente e i dati risultano quindi molto frammentati. Per il comune di Muggiò, nonostante il numero elevato di stazioni, non si riesce a coprire tutti i 27 anni di analisi; i dati, però sembrano essere piuttosto coerenti e le misure sono comprese in un range omogeneo (circa tra 130 m s.l.m. e 147 m s.l.m.), fatta eccezione per alcuni errori evidenti. Al contrario, nel comune di Monza si hanno dati per tutto il periodo di indagine e gli andamenti temporali in tutte le stazioni di misura sono congruenti tra loro; solo in un caso (0151490142) il livello della tavola d'acqua si discosta dagli altri, li supera di circa 20 m, probabilmente per una quota di riferimento diversa. In questi casi, durante la fase di elaborazione spaziale delle superfici piezometriche, si è cercato di individuare e correggere eventuali errori o valori non concordi con quelli all'intorno.

8 Caratterizzazione idrogeologica 3D a scala provinciale

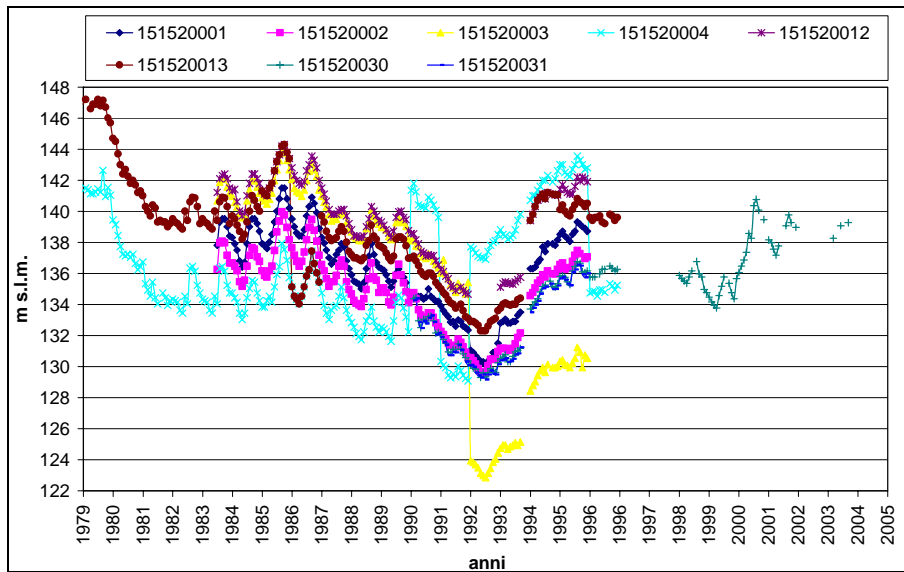


Figura 8.14 - Andamento temporale del livello piezometrico in 8 stazioni del comune di Muggiò

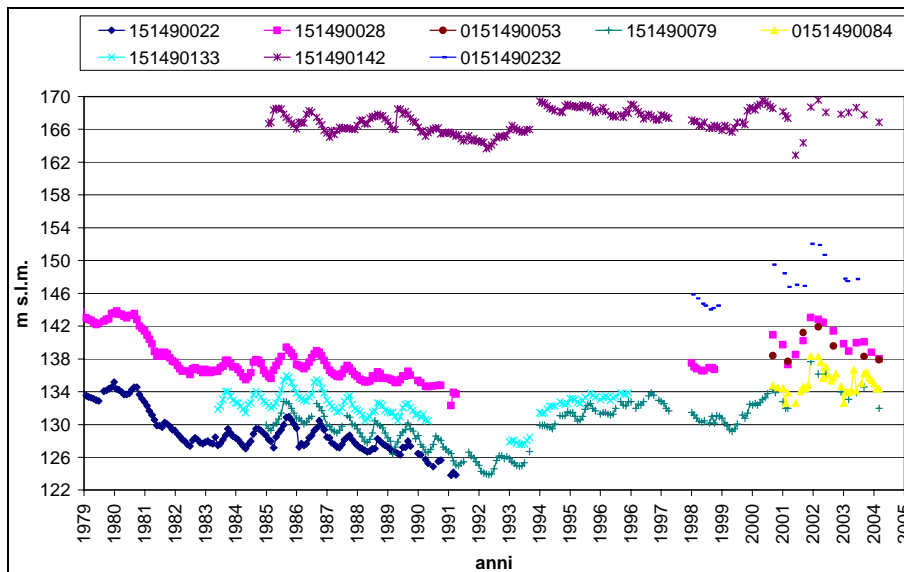


Figura 8.15 - Andamento temporale del livello piezometrico di 8 stazioni nel comune di Monza

In entrambi i grafici si osserva il ben noto innalzamento del 1979, massimo relativo del secolo dovuto a un periodo di precipitazioni nettamente superiori alla media (Bonomi & Cavallin, 1997), dopo il quale il livello della tavola d'acqua è sceso abbastanza velocemente fino ai primi anni '80; è poi rimasto più o meno costante, con picchi e

abbassamenti, per poi decrescere nuovamente a circa metà degli anni '90, per il continuo aumento di prelievi sotterranei. Dopo il 1992 è iniziata la grande dismissione industriale con la chiusura di molti pozzi privati, in particolare nell'area urbanizzata milanese, che ha comportato la risalita del livello della falda. La risalita è continuata abbastanza regolarmente.

Osservando i grafici temporali costruiti e al fine di realizzare delle valutazioni significative sulle voci di bilancio idrogeologico, è utile suddividere il territorio delle due province in tre aree, in cui le diverse caratteristiche geomorfologiche, geologiche, idrogeologiche e di uso del suolo, influenzano in modo differente il comportamento della tavola d'acqua:

1. un'area a Nord, in cui, grazie alla buona permeabilità dei depositi superficiali, la falda riceve una ricarica diretta dalle piogge. L'andamento del livello piezometrico risulta unicamente influenzato dalle precipitazioni (Figura 8.16);
2. una più a Sud, in particolare a Sud dei grandi canali, quali il Villoresi e la Muzza, in cui la tavola d'acqua mostra un andamento stagionale principalmente legato al ciclo delle irrigazioni. Un'influenza da parte delle precipitazioni sul livello della falda si verifica solo a seguito di eventi piovosi prolungati nel tempo (Figura 8.17 e Figura 8.18): il trend aumenta a seguito episodi piovosi o diminuisce a seguito di prolungati eventi siccitosi;
3. una fortemente urbanizzata ed industrializzata, come ad esempio il comune di Milano, in cui si notano gli effetti provocati dall'elevato sfruttamento dei prelievi per uso potabile ed industriale, soprattutto negli anni '70 (Figura 8.19) (Bonomi et al., 2008).

Relativamente alla prima area (Figura 8.16) sono stati messi a confronto la precipitazione in una stazione pluviometrica a Monza e gli andamenti piezometrici nel comune di Cinisello Balsamo e nella stessa Monza, due stazioni differenti, geograficamente vicine, che sembrano avere un trend sequenziale. Si nota che la falda risponde in modo marcato alle variazioni di pioggia, se eventi particolarmente siccitosi o piovosi si prolungano nel tempo; inoltre la risposta del sistema sotterraneo non è immediata, ma sfasata di circa un anno, sempre che non ci siano altri fattori antropici esterni che la influenzano.

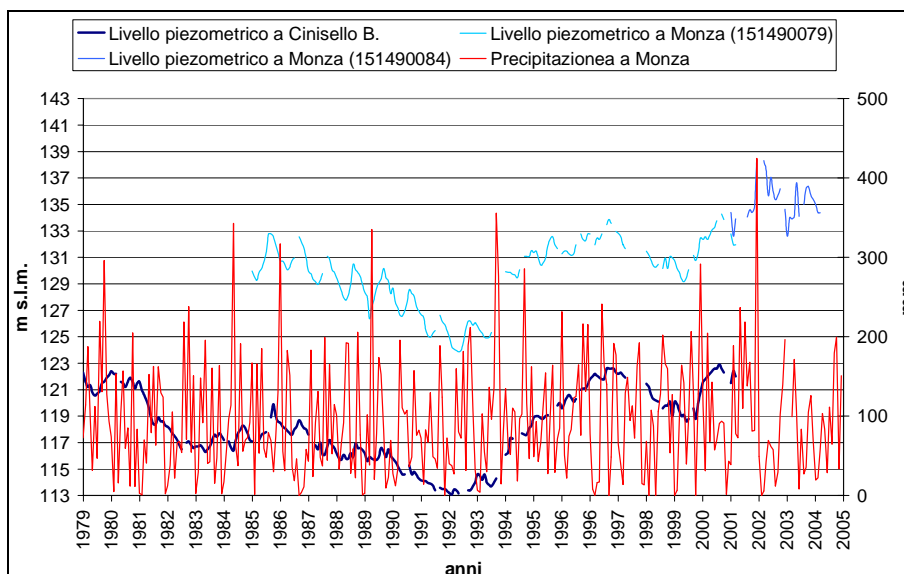


Figura 8.16 - Confronto tra l'andamento mensile delle precipitazioni nella stazione di Monza e gli andamenti piezometrici mensili nei comuni di Cinisello Balsamo e Monza, dal 1979 al 2005

Per esemplificare la relazione tra precipitazioni e livello della falda nella seconda zona sono stati messi a confronto gli andamenti piezometrici nel comune di Cernusco con la precipitazione (Figura 8.17) e con il livello del canale della Martesana (dati forniti dal Consorzio dell'Adda, Figura 8.18): si riscontra un trend ciclico che rispecchia la ciclicità delle irrigazioni; il periodo irriguo va infatti da aprile a settembre, mentre in inverno gli apporti idrici sono bassi. La falda ne risente in modo stagionale con qualche mese di ritardo dovuto a diversi fattori, ad esempio l'utilizzo dell'acqua da parte dell'apparato radicale delle piante, il tipo di suolo e il tempo di percolazione dell'acqua nel non saturo (Figura 8.18).

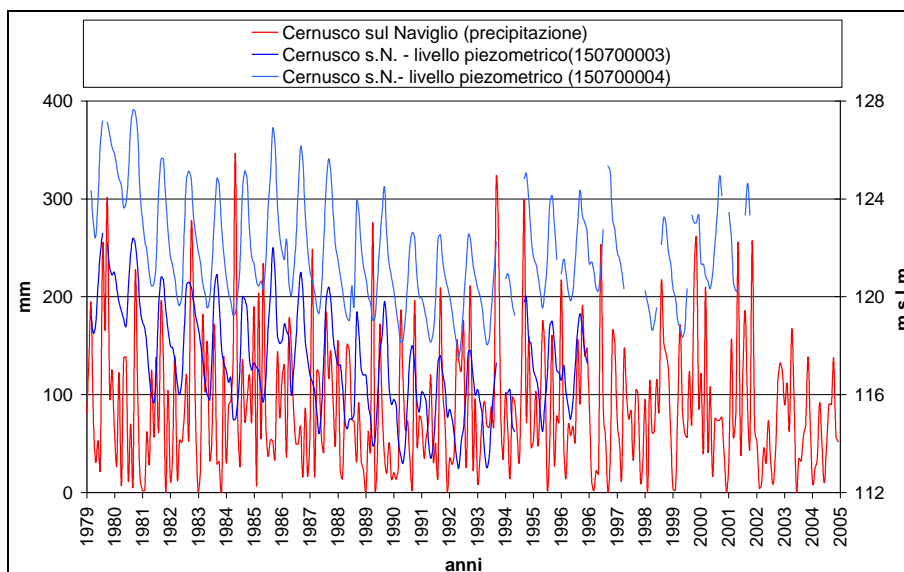


Figura 8.17 - Confronto tra l'andamento mensile delle precipitazioni e gli andamenti piezometrici mensili nel comune di Cernusco sul Naviglio, dal 1979 al 2005

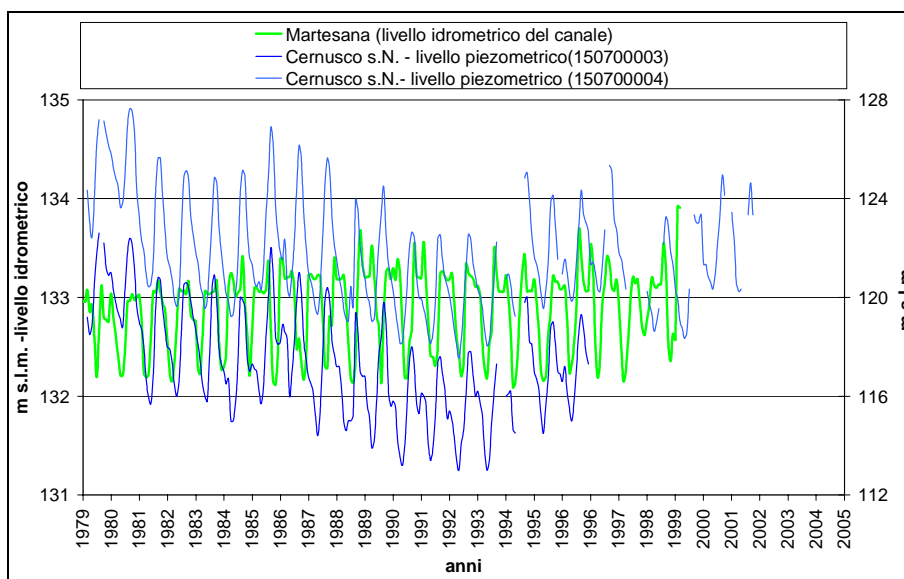


Figura 8.18 - Confronto tra l'andamento mensile del livello idrometrico nel canale della Martesana e gli andamenti piezometrici mensili nel comune di Cernusco sul Naviglio, dal 1979 al 2005

Relativamente alla terza zona, invece, si è andati ad analizzare il comportamento della falda in una area fortemente urbanizzata, il comune di Milano: in Figura 8.19 sono messi a confronto l'andamento freaticometrico nella stazione di Via Morsenchio (dati forniti dall'Unità

Operativa Idrografia di Arpa Lombardia e raccolti per il progetto RICLIC-WARM) e l'andamento pluviometrico di Milano Brera, storica stazione di cui esiste una serie pluri-secolare. In questo caso si nota marcatamente l'influenza dei prelievi ad uso potabile ed industriale sul livello della falda: è evidente il forte abbassamento verificatosi negli anni '70, periodo che è stato protagonista del boom industriale, e la risalita del trend piezometrico a partire dalla fine degli anni '70, in cui le industrie sono state chiuse e trasferite al di fuori del territorio comunale. L'innalzamento della tavola d'acqua ha provocato danni a strutture (metropolitana, cantine..) costruite negli anni precedenti, per le quali non era stato tenuto in considerazione il livello naturale ed originario della falda (Bonomi & Cavallin, 2007). Si può vedere come comunque la falda sia influenzata dagli eventi meteorici prolungati nel tempo, come ad esempio l'elevata piovosità del periodo 1976-1979, che ha provocato un aumento della tavola d'acqua.

Altro aspetto che si osserva è la risposta sempre ritardata della falda a seguito di un evento meteorico; il ritardo è però inferiore rispetto a quanto avviene nelle zone irrigue, in cui durante la percolazione nel terreno l'acqua interagisce con gli apparati radicali delle piante (Bonomi et al., 2008), rallentando il raggiungimento della falda.

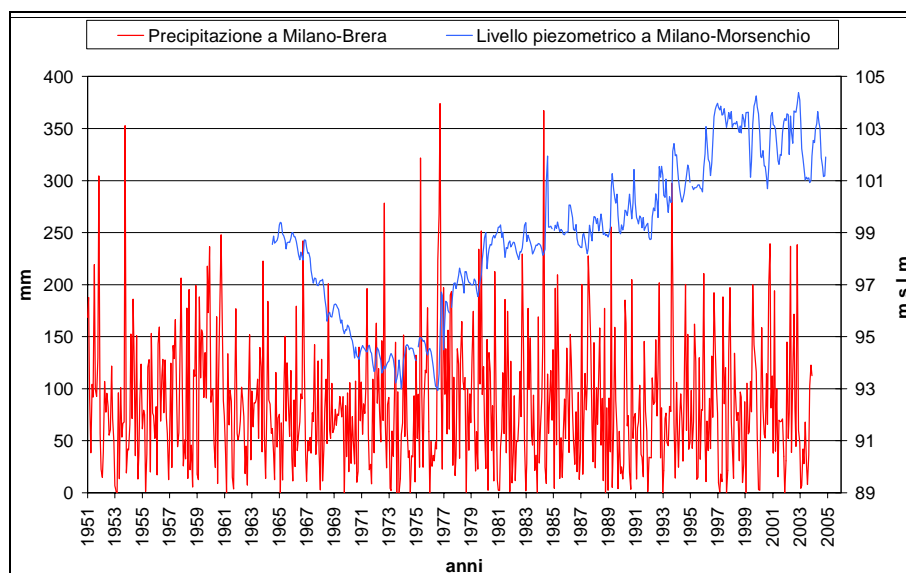


Figura 8.19 - Confronto tra l'andamento mensile della precipitazione nella stazione di Milano Brera e l'andamento piezometrico mensile di Milano dal 1951 al 2005

8.4.2 Andamento piezometrico areale

Si è passati, poi, ad un'analisi spaziale, cercando di ricostruire le superfici piezometriche all'interno dell'area di studio, tramite Surfer: è stato riprodotto l'andamento della tavola d'acqua dal 1979 al 2005 e a titolo esemplificativo in Figura 8.20 sono riportate le superfici piezometriche ogni 5 anni (1980, 1985, 1990, 1995, 2000 e 2005).

La ricostruzione ha riguardato i valori medi annuali piezometrici relativi alle stazioni di misura prese in considerazione. Per riprodurre la relazione intercorrente tra acque sotterranee e acque superficiali, sono stati utilizzati anche i dati dei livelli idrometrici dei fiumi principali dell'area e dell'intorno (raccolti nell'ambito di progetti scientifici precedenti) (Bonomi et al., 2008). Inoltre la riproduzione corretta della piezometria in corrispondenza delle scarpate dei fiumi Adda e Ticino, è stata ottenuta inserendo misure di livello alla base delle scarpate che simulassero le sorgenti presenti in tali settori.

Nel settore settentrionale dell'area di studio si sono verificate delle difficoltà nell'interpolazione dei dati, causate dagli elevati gradienti idraulici e dalla mancanza di misure disponibili esterne all'area stessa; per questo motivo sono state inserite delle condizioni al contorno fisse, ricavate da misure piezometriche rilevate (Beretta et al., 1984) nei comuni di Cernusco, Missaglia, Casatenovo, Renate, Arosio, Mariano Comense e Mozzate. La scelta è giustificata dalla bassa escursione piezometrica dei livelli di tali pozzi e/o dalla lontananza dall'area in esame.

Sempre nella zona settentrionale dell'area di studio si è andati ad intervenire per forzare l'andamento della falda e riprodurre la conformazione particolare del livello piezometrico, influenzata dal fiume Lambro e dal suo paleoalveo; questa conformazione viene riprodotta solamente se tutte le misure della tavola d'acqua sono presenti (in corrispondenza dei comuni di Carate Brianza, Briosco e Giussano). Perciò in assenza di esse si è pensato di fissare il livello di Carate Brianza a 212 m s.l.m., valore medio dei pochi dati disponibili (escursione massima 1 m), mentre per i livelli mancanti del 2000 e del 2005 di Briosco e Giussano, sono stati utilizzati gli ultimi valori registrati relativi all'anno 1995.

L'elaborazione dei dati è avvenuta all'interno di una griglia regolare di 68 km x 55 km (273 colonne per 221 righe), con celle quadrate di 250 m x 250 m, per un totale di 60332 celle. È stato utilizzato il Kriging, come metodo di elaborazione geostatistica.

Le superfici piezometriche medie annuali risultanti sono riportate in Figura 8.20 e sono relative agli anni 1980, 1985, 1990, 1995, 2000 e 2005; in esse sono indicate le isopieze con equidistanza di 10 m e le stazioni di misura utilizzate per le interpolazioni. Appare evidente come la rete di monitoraggio sia variata negli anni: il numero e la densità dei piezometri sono gradualmente diminuiti dal 1980 al 2005, soprattutto in corrispondenza del comune di Milano.

Il flusso della falda è tendenzialmente Nord-Sud, i livelli piezometrici variano tra circa 70-75 m s.l.m. a Sud-Est e circa 260 m s.l.m. a Nord. Modifiche apprezzabili delle direzioni di flusso idrico sono legate all'accentuarsi della depressione dell'hinterland milanese tra il 1980 ed il 1990, che crea un forte richiamo idrico dalle zone circostanti, ed un recupero dei livelli nel periodo seguente (1995-2005), con contemporanea tendenza alla normalizzazione e deviazione verso Sud delle direzioni di flusso. Sono evidenti gli effetti di drenanza dei fiumi Ticino e Adda, che scorrono su terreni topograficamente depressi, in particolare nella zona nord-orientale si distingue chiaramente un flusso radiale divergente, che risente, appunto dell'effetto drenante del fiume Adda.

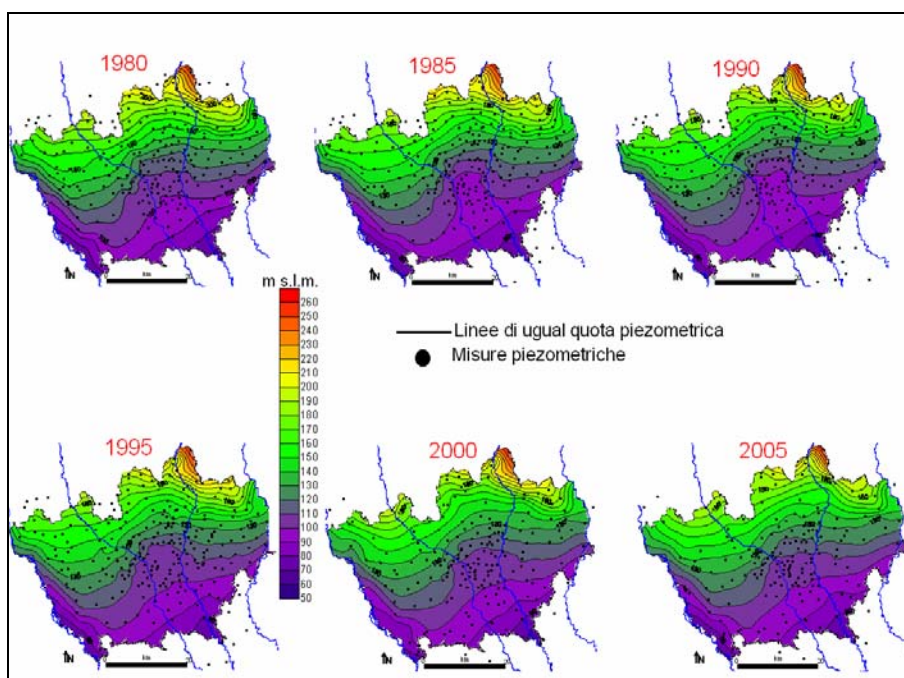


Figura 8.20 - Superfici piezometriche in m s.l.m. relative all'area di studio del 1980, 1985, 1990, 1995, 2000 e 2005

La differenza tra i livelli piezometrici nei diversi anni consente di quantificare le oscillazioni piezometriche. Si osserva in tal modo che nell'intero periodo considerato, dal 1980 al 2005, nelle province di Milano e Monza Brianza le variazioni del livello piezometrico, illustrate in Figura 8.21, presentano un abbassamento generalizzato di 5-10 m che raggiunge anche 10-30 m nel settore centro-settentrionale. Zone d'innalzamento della falda si osservano nel settore Sud-Occidentale dell'area di studio e in particolare nell'area del comune di Milano e in alcuni comuni a Sud-Ovest di esso.

Un'analisi più in dettaglio del periodo considerato è stata ottenuta analizzando le variazioni tra il 1980 e il 1990 (Figura 8.22) e tra il 1990 e il 2005 (Figura 8.23). Si osserva come nel primo periodo si sia verificato un abbassamento generalizzato di circa 5 m, con accentuazione a 10-15 m nella porzione settentrionale in corrispondenza dei comuni di Lentate sul Severo, Lazzate, Cogliate, Misinto, Severo, Cesano Maderno, Ceriano Laghetto; nel resto dell'area di studio si notano solo alcuni settori con lieve innalzamento di livello.

Nel periodo seguente, 1990-2005, l'abbassamento appare più rilevante sempre a Nord, ma in corrispondenza dei comuni di Besana B., Triuggio, Lesmo, Macherio, Biassono, anche fino a 20-30 m. Al contrario tutto il settore centrale, da Nord a Sud, come lungo gran parte del corso del Ticino, presenta un recupero di livello anche di 10 m.

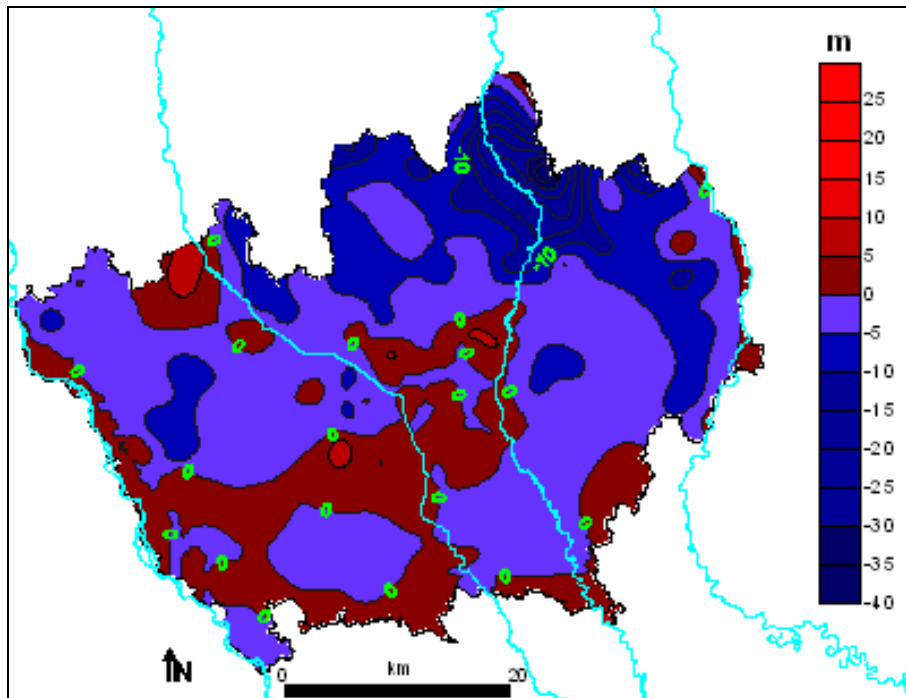


Figura 8.21 - Differenza areale (m) del livello piezometrico tra il 2005 e il 1980 all'interno dell'area di studio

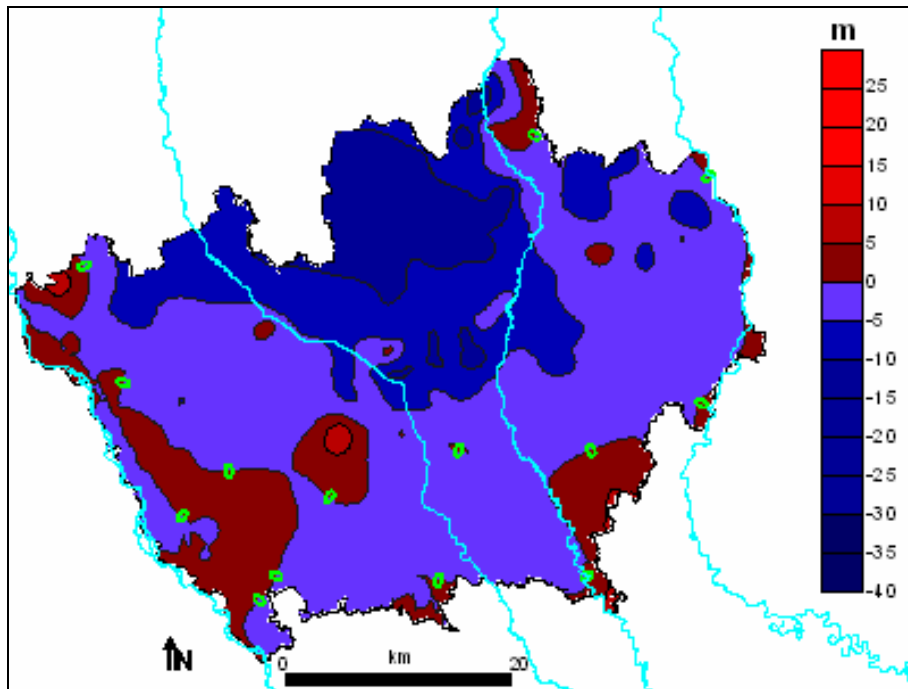


Figura 8.22 - Differenza areale (m) del livello piezometrico tra il 1990 e il 1980 all'interno dell'area di studio

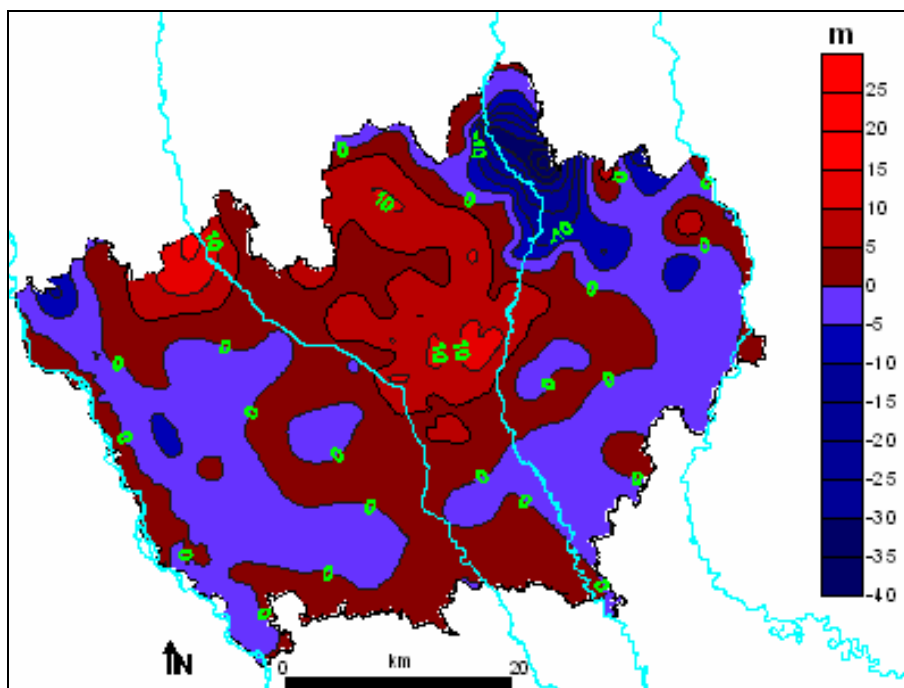


Figura 8.23 - Differenza areale (m) del livello piezometrico tra il 2005 e il 1990 all'interno dell'area di studio

Se si prende in considerazione l'anno 1982, il cui livello piezometrico è stato identificato nel PTUA (Piano di Tutela ed Uso delle Acque) 2006 come livello piezometrico di riferimento degli ultimi circa 30 anni, è possibile confrontare con esso gli altri anni, individuando quelli che si possono considerare in deficit o in surplus idrico. Si può anche presupporre che la quantità di acqua immagazzinata nel sottosuolo avrà lo stesso comportamento. Sono di seguito riportati 3 esempi: la differenza piezometrica tra il 1982 e gli anni 1980, 1990 e 2005.

Osservando il confronto di Figura 8.24, il 1980 si può definire come un anno di surplus idrico, rispetto al 1982, come già si evinceva dal trend storico puntuale. La tavola d'acqua è infatti quasi ovunque più alta di circa 5 m, addirittura nel settore settentrionale in corrispondenza dei comuni di Lentate sul Seveso, Lazzate, Cogliate, Misinto, Severo, Cesano Maderno, Ceriano Laghetto supera il livello piezometrico del 1982 di circa 10-15 m; solamente in una piccola porzione del comune di Milano e in alcuni comuni a Sud-Ovest la falda si è abbassata di circa 5 m.

Al contrario, il 1990 (Figura 8.25), in particolare, e il 2005 (Figura 8.26) si possono considerare in deficit, rispetto al 1982.

Nel 1990 le province di Milano e di Monza e Brianza hanno registrato un abbassamento della tavola d'acqua più o meno uniforme ovunque di circa 5 m, con porzioni in cui si è abbassata fino a -10 m. Solo in alcune porzioni del territorio lungo il Ticino e a Sud, la falda si è alzata di circa 5 m.

Nel 2005 l'abbassamento di 5 m è meno diffuso; si registra a Nord un abbassamento particolarmente accentuato da 5 a oltre 15 m. Le porzioni in cui la falda si è alzata, sono aumentate, si ipotizza che dal 1990 al 2005 ci sia stato in molte zone un recupero del livello piezometrico.

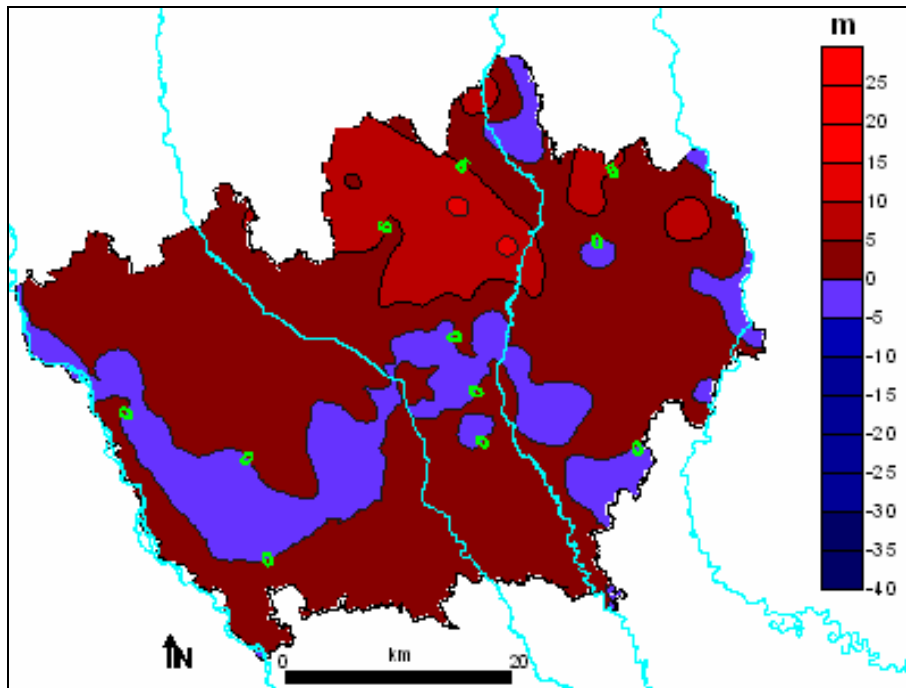


Figura 8.24 - Differenza areale (metri) del livello piezometrico tra il 1980 e il 1982 nell'area di studio

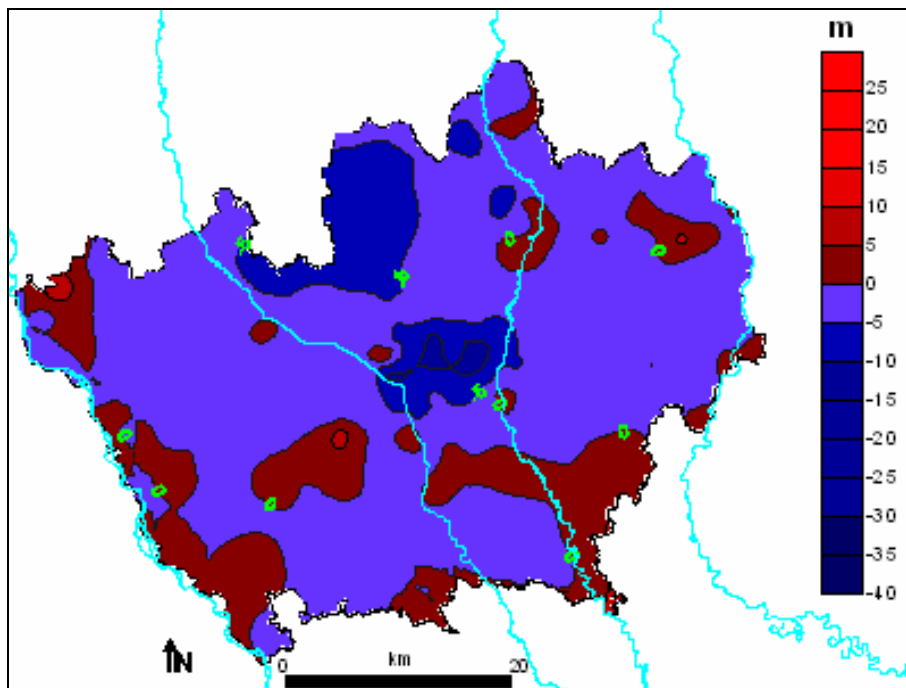


Figura 8.25 - Differenza areale (metri) del livello piezometrico tra il 1990 e il 1982 nell'area di studio

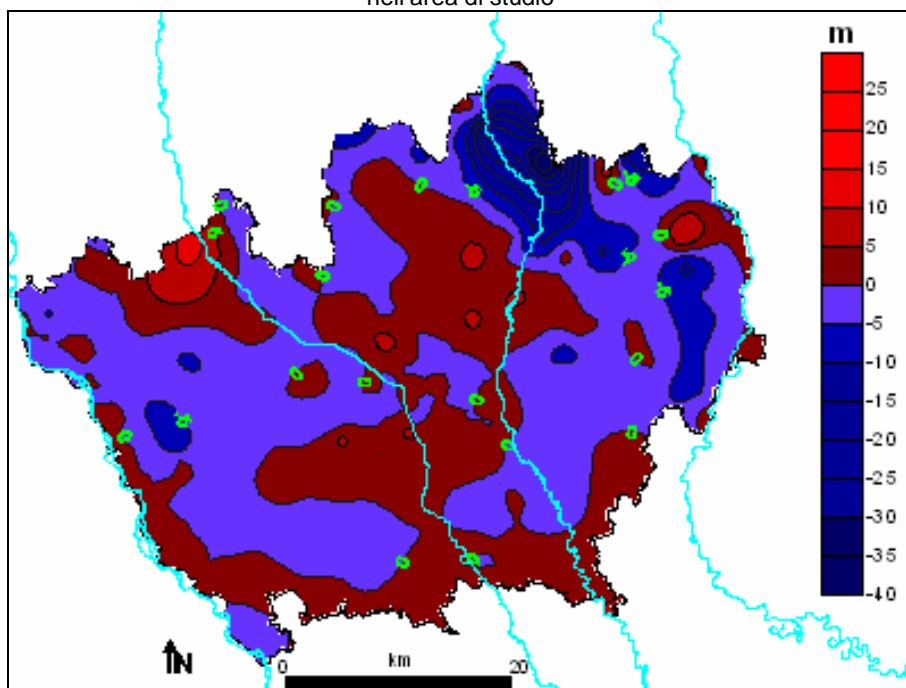


Figura 8.26 - Differenza areale (metri) del livello piezometrico tra il 2005 e il 1982 nell'area di studio

8.4.3 Calcolo della soggiacenza della falda

I punti grigliati di ciascuna superficie piezometrica sono stati importati e proiettati nello spazio 3D di Gocad: tramite triangolazione sono stati trasformati in corpi tridimensionali.

Attraverso una procedura automatica, è stato calcolato lo spessore intercorrente tra la superficie topografica dell'area di studio e la superficie piezometrica di ciascuno dei 27 anni indagati, ottenendo, perciò, una distribuzione della soggiacenza media annuale della falda nel territorio (Figura 8.27, in cui sono visualizzate le carte per gli anni 1980, 1985, 1990, 1995, 2000 e 2005). La profondità della tavola d'acqua varia, a seconda degli anni, tra un minimo di circa 0 m dal piano campagna ad un massimo di circa 93 m; i valori massimi si trovano a Nord della provincia, dove il profilo topografico e quello piezometrico divergono, in quanto il primo tende a salire, mentre il secondo rimane più o meno costante, ossia in queste aree lo spessore piezometrico diminuisce, mentre la soggiacenza aumenta. Proseguendo verso Sud, ossia avvicinandosi alla linea dei fontanili, punto in cui la falda affiora in superficie, i valori si abbassano notevolmente; ne è un'eccezione l'area del comune di Milano, dove i valori di soggiacenza rimangono più alti dell'intorno. Questo comportamento è imputabile ai prelievi di acqua sotterranea, che sono decisamente maggiori in un'area industrializzata e densamente popolata come quella del capoluogo di provincia (è lo stesso fenomeno che si riscontra nelle carte piezometriche, Figura 8.20). Si nota, però, che con gli anni la falda in corrispondenza del comune di Milano si è alzata, la soggiacenza è infatti diminuita, probabilmente perché l'entità dei prelievi è diminuito, soprattutto quello industriale, spostato fuori dalla zona urbana. Infine valori bassi di soggiacenza, prossimi allo zero, si ritrovano lungo i fiumi, in quanto il sistema superficiale e sotterraneo vengono in contatto l'uno con l'altro; in particolare ciò è visibile lungo il Ticino e, in maniera minore, lungo l'Adda

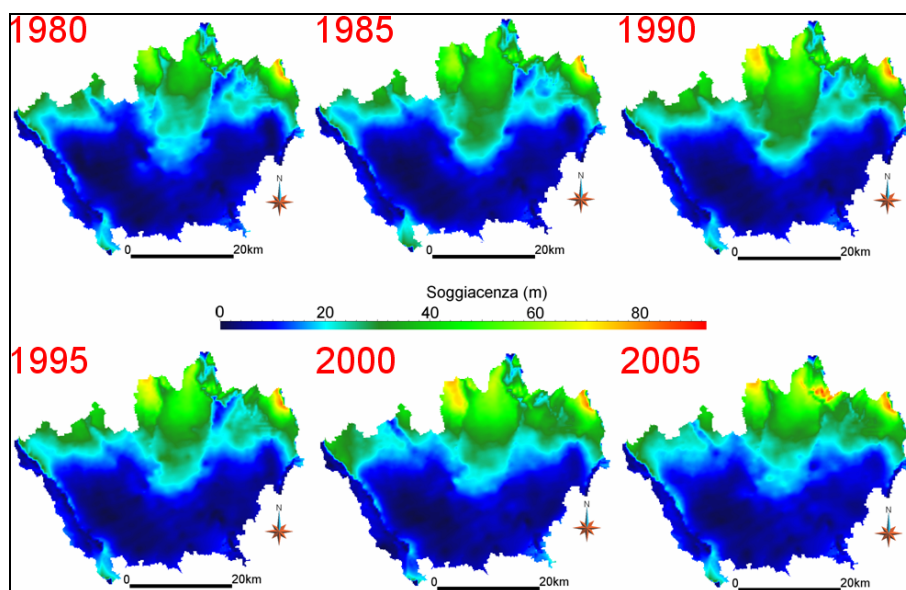


Figura 8.27 – Carta della soggiacenza media annuale per gli anni 1980, 1985, 1990, 1995, 2000 e 2005

8.5 Calcolo della disponibilità idrica nelle province di Milano e di Monza e Brianza

A questo punto del procedimento sono stati incrociati i risultati dell'elaborazioni 3D dei dati statici (ricostruzione della struttura geologica e della distribuzione di porosità efficace nel sistema idrogeologico) e dei dati dinamici (calcolo delle superfici piezometriche storiche dal 1979 al 2005), ricavando:

- il volume di sottosuolo presente nell'area di indagine, compreso tra superficie topografica e base del modello;
- il volume di terreno saturo, in funzione della tavola d'acqua relativa a ciascun anno considerato, dal 1979 al 2005;
- il volume di acqua immagazzinata;
- il volume di acqua mobile (l'effettiva disponibilità).

Un esempio della procedura è illustrata in Figura 8.28, relativamente all'anno 1980: è riportato il volume intero dell'acquifero (in marrone, circa 252.56 miliardi m^3) intersecato dalla superficie piezometrica del 1980 (in blu). Il volume di terreno saturo (marrone chiaro) è la porzione che si trova al di sotto della tavola d'acqua.

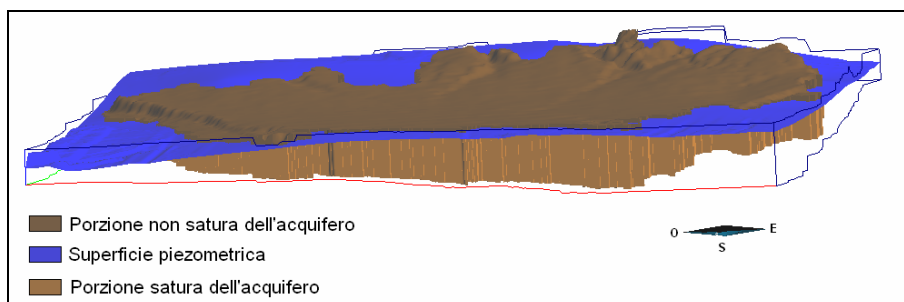


Figura 8.28 – Suddivisione del sistema idrogeologico in porzione non satura (marrone scuro) e porzione satura (marrone chiaro) secondo l'andamento della superficie piezometrica del 1980

Nell'immagine 8.29 è riportato l'istogramma dei volumi di terreno saturo nei 27 anni di indagine: i valori sono compresi tra un minimo di circa 215.5 miliardi di m^3 /anno nel 1991 ed un massimo di circa 222.5 miliardi di m^3 /anno nel 1980, anno che corrisponde, come visto, al massimo piezometrico. Il trend è variabile, ma in generale leggermente decrescente: i valori diminuiscono piuttosto drasticamente dalla metà degli anni '80 ai primi anni '90, in seguito si registra una leggera crescita, che comunque non supera mai i 118 miliardi di m^3 /anno. La fine degli anni '90 è caratterizzata da un'altra evidente decrescita che culmina nel 2000 (circa 216.8 m^3 /anno). Dal 2000 al 2004 si registra un recupero di quantità d'acqua, che decresce nuovamente nel 2005.

Il trend è in accordo con i trend piezometrici storici illustrati nel paragrafo 8.4.1.

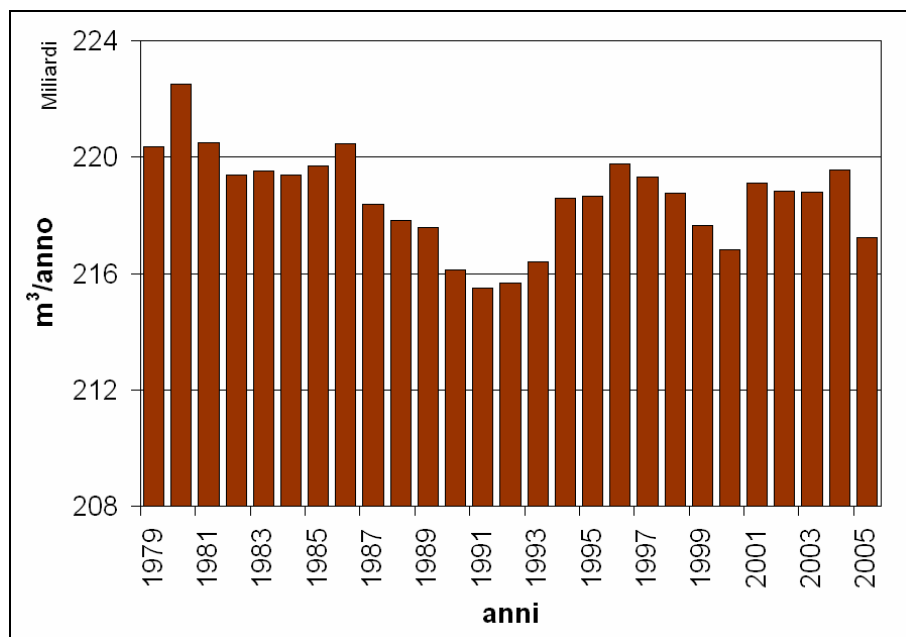


Figura 8.29 - Istogramma dei volumi di terreno saturo dal 1979 al 2005 stimati all'interno dell'area di studio

Tuttavia la reale quantità di acqua immagazzinata nel volume di terreno saturo sopra calcolato dipende dai suoi valori di porosità efficace che corrisponde al volume effettivamente occupato dall'acqua nei vuoti della matrice solida.

In Figura 8.30 è riportato un istogramma che mostra il volume di terreno che ciascuna delle 25 classi di porosità efficace (dal 4% al 28%) occupa all'interno del rispettivo volume saturo di terreno. Il riferimento temporale è quinquennale.

I valori maggiori si registrano in corrispondenza della classe 19%, che assieme a alla 18% e alla 20% è la più rappresentata all'interno del terreno saturo. Si osserva anche che le prime 4 classi (da 4% a 7%) non variano negli anni, questo è imputabile al fatto che rappresentano la porosità efficace dei depositi più fini, che si trovano principalmente in profondità e non sono perciò stati interessati dall'oscillazione della superficie piezometrica.

Moltiplicando il volume di ciascuna classe per il valore di porosità efficace corrispondente e sommando i prodotti ottenuti per ogni anno, sono stati ricavati i valori di acqua immagazzinata, ovvero la disponibilità idrica potenziale dell'acquifero (Figura 8.31). I valori stimati sono compresi tra un minimo di 31.9 miliardi di m³/anno nel

1991 e un massimo di circa 33.3 miliardi di m³/anno nel 1980; il trend è simile a quello dei volumi di terreno saturo (Figura 8.29).

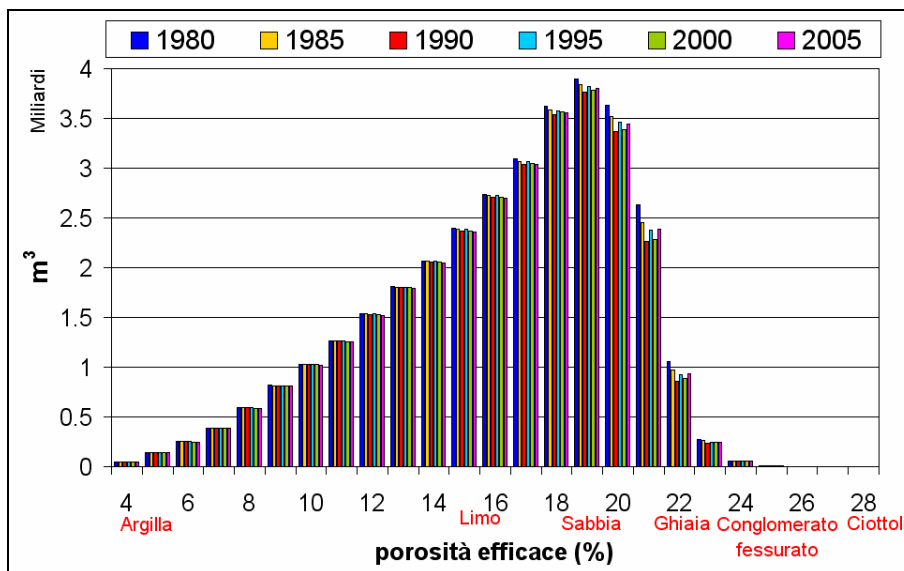


Figura 8.30 – Istogramma di tutte le classi percentuali di porosità efficace relative all'area di studio negli anni 1980, 1985, 1990, 1995, 2000 e 2005

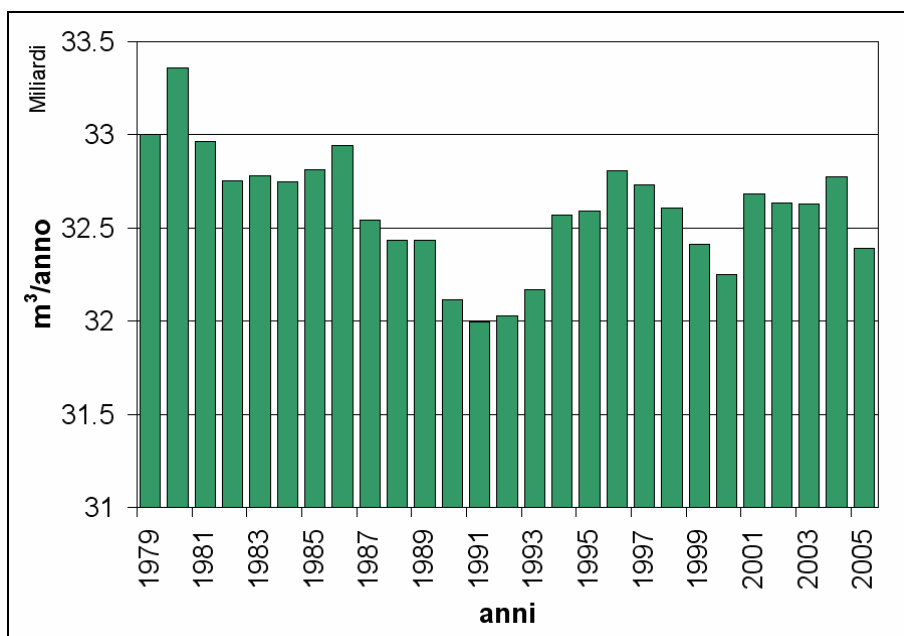


Figura 8.31- Istogramma dei volumi di acqua immagazzinata dal 1979 al 2005 stimati all'interno dell'area di studio

L'acqua immagazzinata nell'acquifero, tuttavia, non è tutta acqua libera, in quanto i sedimenti a granulometria fine presentano conducibilità idrauliche tali da rendere la mobilità dell'acqua bassa o nulla. Una stima dei volumi di acqua mobile, che rappresenta il volume d'acqua soggetto a movimento all'interno dell'acquifero, è stata quindi effettuata prendendo in considerazione solo le classi di porosità efficace relative ai termini medi e grossolani, ossia dalla classe 17% (sabbia limosa) alla classe 28% (ciottoli), come illustrato in Figura 8.32. Il volume delle classi da 25% a 28% è molto basso rispetto alle altre, non supera qualche centinaio di migliaia di m^3 e perciò, per un problema di scala verticale, graficamente risulta pari a zero.

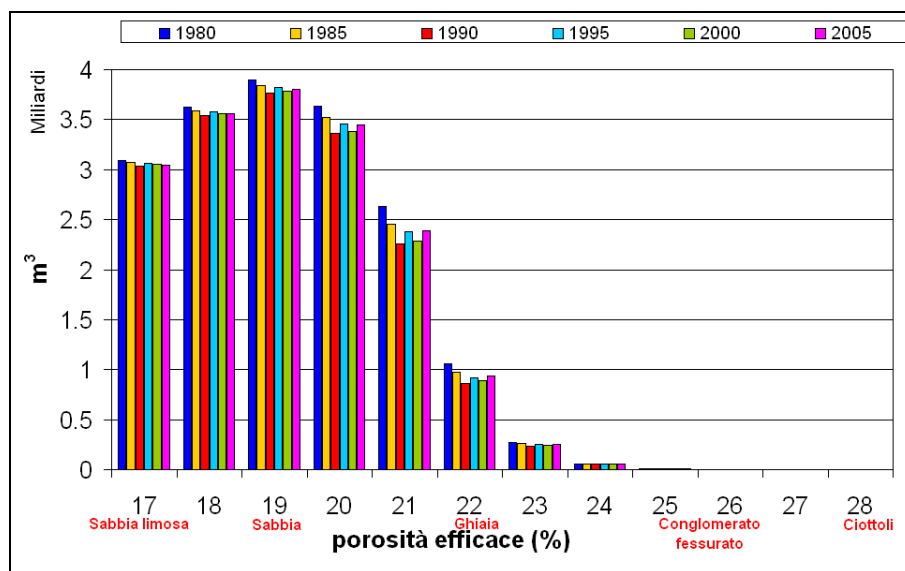


Figura 8.32 - Istogramma delle classi percentuali di porosità efficace relative ai depositi medi e grossolani, all'interno dell'area di studio negli anni 1980, 1985, 1990, 1995, 2000 e 2005

Tramite lo stesso procedimento seguito per il calcolo dell'acqua immagazzinata, sono stati stimati i volumi di acqua mobile (Figura 8.33): i valori sono compresi tra circa 17 miliardi di m^3 /anno nel 1991 e circa 18.3 miliardi di m^3 /anno nel 1980. L'andamento generale è meno eterogeneo rispetto ai volumi di terreno saturo e ai volumi di acqua immagazzinata, ma anche in questo caso si nota un trend complessivo in leggera decrescita. Andando a svolgere un'analisi più attenta si possono individuare dei punti in cui la direzione del trend cambia completamente, probabilmente sotto l'influenza anche delle

variazioni di piovosità. L'elevato quantitativo di acqua nel 1980 deriva come visto dalle elevate precipitazioni registrate a fine degli anni '70, così come la diminuzione significativa di volumi d'acqua dal 1986 al 1991 potrebbe essere stata causata principalmente da un aumento dei consumi e in parte da un deficit piovoso prolungato che ha avuto il culmine tra il 1989 e il 1991 (Bonomi et al., 2008). Allo stesso modo l'aumento dei volumi d'acqua mobile dal 1992 al 1996 è stato concomitante ad un periodo particolarmente piovoso.

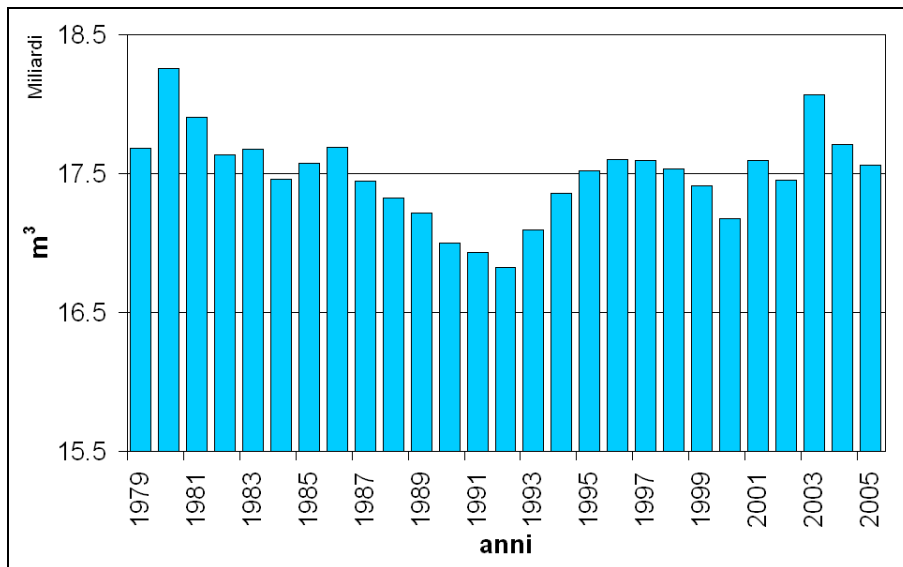


Figura 8.33 – Istogramma dei volumi di acqua mobile dal 1979 al 2005 stimati all'interno dell'area di studio

I volumi di acqua mobile sono la fotografia della disponibilità idrica e rappresentano il bilancio netto del sistema, che è uguale al rapporto tra ricarica (precipitazione efficace, irrigazione efficace, perdite dai canali, alimentazione dai fiumi etc...) e prelievi (pompaggi, sorgenti, alimentazione di fiumi etc...). E' possibile anche valutare la differenza tra un anno e il successivo: si possono così ricavare indicazioni sulle variazioni annuali della quantità di acqua immagazzinata nel serbatoio, identificando quali periodi possono essere considerati in deficit o in surplus idrico.

Nell'istogramma di Figura 8.34 è riportata la differenza tra i volumi d'acqua mobile stimati 1982, anno il cui livello piezometrico viene preso come riferimento e quelli calcolati negli altri 27 anni. Il 1980 mostra un surplus di circa 541.5 milioni m³. Si notano due periodi di deficit prolungato dal 1987 al 1995 e dal 1997 al 2005. Il 1991 è

l'anno in cui il deficit raggiunge il valore massimo di poco inferiore a 700 milioni di m³.

Le differenze sono quindi contenute entro i 700 milioni, che, rapportati alla quantità di acqua disponibile media (17.5 miliardi di m³/anno) nel periodo considerato, è 4%.

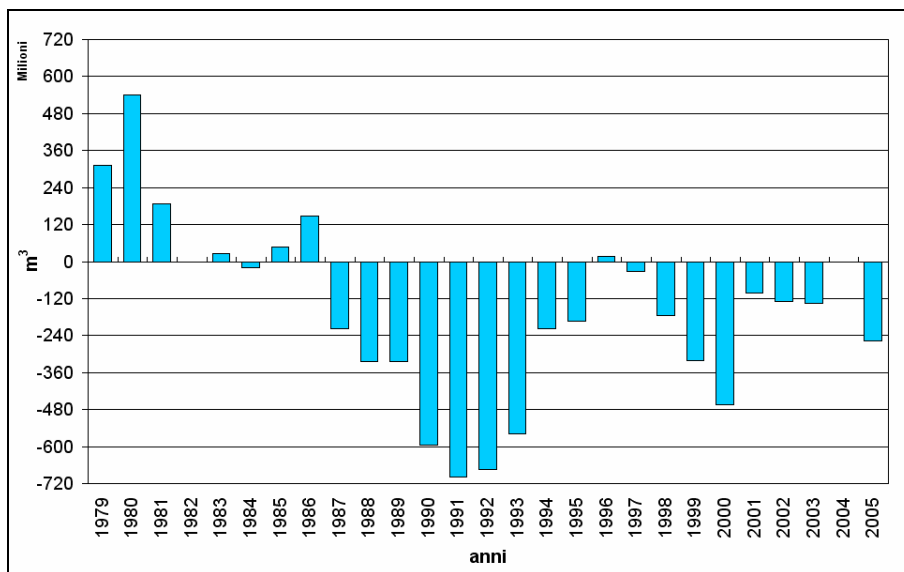


Figura 8.34 - Istogramma delle differenze di acqua mobile tra il 1982 e tutti gli altri anni

Infine in tabella 8.3 è riportato un riepilogo e confronto dei volumi di terreno saturo (costituisce in media l'86.6% dell'intero volume del serbatoio sotterraneo considerato), di acqua immagazzinata e di acqua mobile: si evince che circa il 15% della porzione satura dell'acquifero corrisponde alla acqua immagazzinata, mentre 8% circa rappresenta la reale disponibilità idrica.

ANNO	VOLUME DI TERRENO SATURO (miliardi m³/anno)	VOLUME DI ACQUA IMMAGAZZINATA (miliardi m³/anno)	VOLUME DI ACQUA MOBILE (miliardi m³/anno)
1979	220.35	33	18.04
1980	222.51	33.36	18.27
1981	220.5	32.97	17.92
1982	219.37	32.75	17.73
1983	219.51	32.78	17.75
1984	219.39	32.75	17.71
1985	219.71	32.81	17.78
1986	220.45	32.94	17.88
1987	218.38	32.54	17.51
1988	217.83	32.43	17.41
1989	217.59	32.43	17.41
1990	216.12	32.11	17.13
1991	215.50	31.99	17.03
1992	215.68	32.03	17.06
1993	216.41	32.17	17.17
1994	218.58	32.58	17.51
1995	218.67	32.59	17.54
1996	219.78	32.81	17.75
1997	219.33	32.73	17.7
1998	218.77	32.61	17.55
1999	217.65	32.41	17.41
2000	216.80	32.25	17.27
2001	219.12	32.68	17.63
2002	218.84	32.63	17.60
2003	218.79	32.63	17.59
2004	219.56	32.78	17.73
2005	217.25	32.39	17.47

Tabella 8.3 - Volumi di terreno saturo, acqua immagazzinata e acqua mobile calcolati nel territorio delle due province, dal 1979 al 2005

Per un'analisi temporale più di dettaglio, a titolo esemplificativo, è stata calcolata la disponibilità idrica relativamente al mese di marzo di ciascun anno indagato, ricostruendo le oscillazioni del livello della falda a partire dalle misure piezometriche medie di tale mese.

Dai risultati ottenuti si è osservato che in generale il trend è il medesimo: dal 1980, anno con il valore più alto (circa 18.5 miliardi m³), si verifica una decrescita che culmina nei primi anni '90 a cui corrispondono i valori minimi calcolati (esattamente nel 1992, con circa 16.8 miliardi di m³) e poi un leggero recupero delle quantità d'acqua mobile, che negli ultimi anni sembra di nuovo decrescere lentamente (Figura 8.35). I valori stimati nei mesi di marzo sono inferiori rispetto a quelli annuali, le differenze variano tra qualche decina di milioni m³ e poche centinaia di milioni m³. Ne sono però un'eccezione gli anni 1999, 2003 e 2005, in particolare i volumi di

acqua mobile del 2003 superano quelli medi annui per più di 400 milioni di m³. Per tale anno è stato calcolato il secondo valore più alto tra i 27 indagati, per quanto riguarda marzo: al contrario di ciò che accade per l'aggregazione annuale, si nota un surplus rispetto al livello piezometrico di riferimento per la falda (anno 1982), probabilmente imputabile agli effetti del piovoso autunno 2002. A livello annuale, invece, il valore stimato è inferiore perché risulta influenzato anche forse dal deficit idrico provocato dal periodo estivo particolarmente siccitoso, verificatosi nell'estate di quell' anno.

Indagini più accurate potrebbero aiutare capire quanto queste differenze siano imputabili ad un'effettiva variazione della risorsa nel tempo, quindi ad una variazione della ricarica e/o dei prelievi, o siano semplicemente dovute alla mediazione statistica applicata al dato a livello annuale o ad un cambiamento nei punti e nella frequenza delle misure piezometriche all'interno dello stesso anno e della serie temporale indagata.

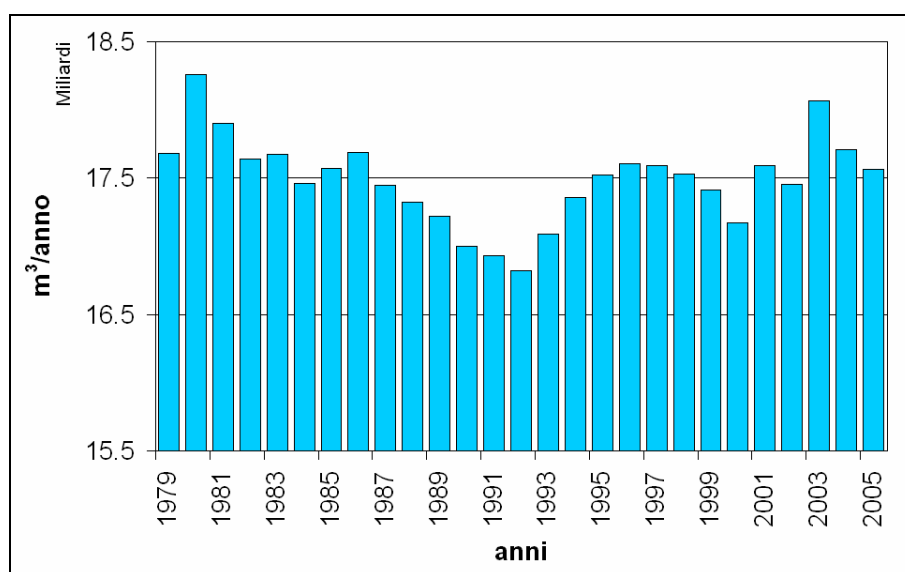


Figura 8.35 - Istogramma dei volumi di acqua mobile dal 1979 al 2005, stimati utilizzando le misure piezometriche del mese di marzo per ciascun anno indagato

8.6 Calcolo della disponibilità idrica nelle 8 sottoaree a geomorfologia diversa

E' stata svolta un'analisi di dettaglio, passando da un'indagine a scala geografica provinciale ad una locale e tenendo conto della

differenziazione delle caratteristiche fisiche e del comportamento idrodinamico del territorio: le stime della disponibilità idrica sono state realizzate in 8 aree diverse individuate in base alla geomorfologia dell'area di studio (figura 8.2) e alla tipologia di ricarica. Assemblando le pianure alluvionali attuali e recenti con i terrazzi fluviali e associando a bassa pianura a meandri con la media pianura idromorfa, sono risultate le seguenti zone: a Nord vicino all'area pedemontana i terrazzi ferrettizzati (denominati "Terrazzo Ovest", "Terrazzo Centro" e "Terrazzo Est") e le morene; a Sud di essi sono state identificate l'alta pianura, la pianura idromorfa, il terrazzo fluviale del Ticino (denominato "Terrazzo Ticino") e il Comune di Milano (Figura 8.36).

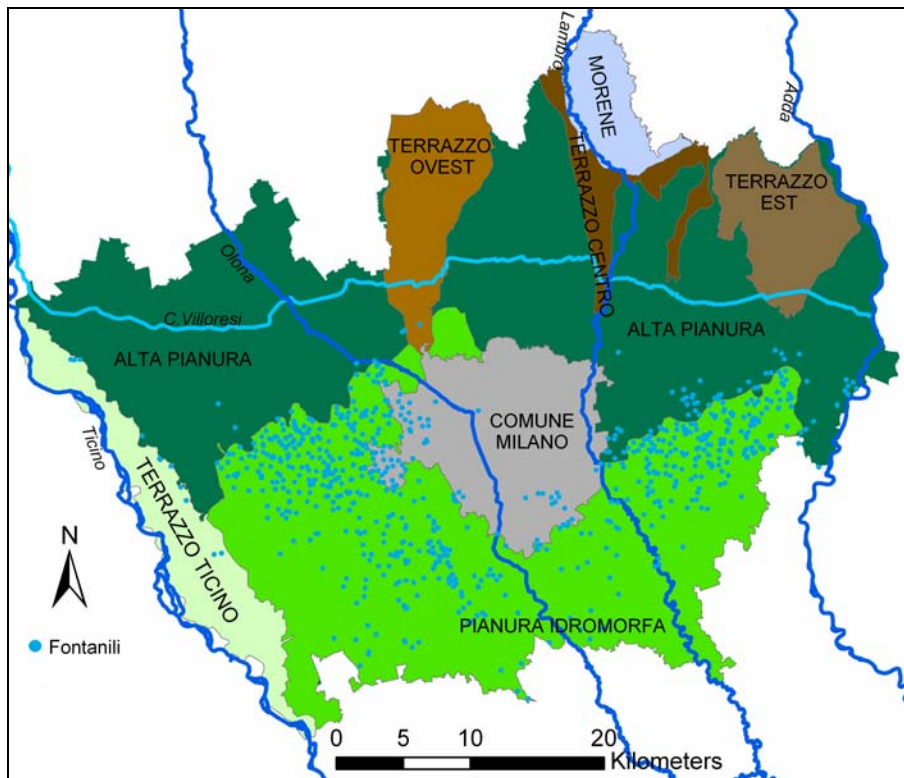


Figura 8.36 - Suddivisione dell'area di studio in 8 sottoaree a geomorfologia diversa: terrazzo ovest, terrazzo centro, morene, terrazzo est, alta pianura, pianura idromorfa, terrazzo fluviale del Ticino e comune di Milano

La zona più estesa è l'alta pianura, occupa infatti circa il 39% dell'area di studio, seguita dalla pianura idromorfa (31%); il terrazzo centro interessa la superficie più ridotta delle 8 (circa 2%) (Figura

8.37, in alto a destra). La Figura 8.37 mostra la ripartizione nelle 8 sottoaree della disponibilità idrica media nei 27 anni indagati: i volumi di acqua mobile si distribuiscono nell'area di studio in modo proporzionale alla superficie occupata da ciascuna di esse. Infatti i due serbatoi più capienti sono quelli dell'alta pianura e della pianura idromorfa con, rispettivamente, una media di circa di 7 e 6.3 miliardi m^3 /anno (Tabella 8.4). Decisamente inferiori sono i quantitativi dei terrazzi ferrettizzati e delle morene, che in generale non superano 1 miliardo, addirittura per le morene i volumi di acqua mobile sono circa 68 milioni m^3 /anno. Per i settori del terrazzo del Ticino e del comune di Milano (Tabella 8.4) si osservano valori intermedi, se pur inferiori rispetto alle due aree di pianura (Tabella 8.4).

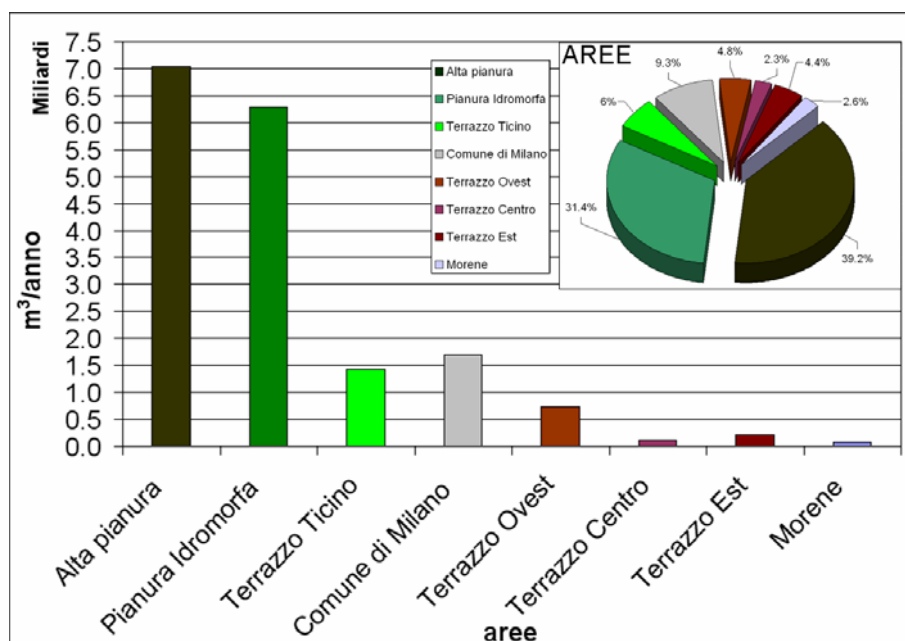


Figura 8.37 – Istogramma della disponibilità idrica media (volumi di acqua mobile) nei 27 anni indagati per ciascuna delle 8 sottoaree a geomorfologia diversa. In alto a destra è riportato un grafico a torta sulla suddivisione percentuale della superficie occupata da ciascuna sottoarea nel territorio di Milano e Monza e Brianza

AREE	VOLUME DI ACQUA MOBILE MEDIO (miliardi m³/anno)
Alta pianura	7.037
Pianura idromorfa	6.281
Terrazzo Ticino	1.430
Comune di Milano	1.706
Terrazzo Ovest	0.725
Terrazzo Centro	0.117
Terrazzo Est	0.211
Morene	0.068

Tabella 8.4 – Volume di acqua mobile medio per i 27 anni indagati, in ciascuna sottoarea

Per una rappresentazione più chiara delle differenze nelle riserve idriche delle singole aree e per un confronto più preciso in termini di produttività, i volumi di acqua mobile sono stati espressi per unità di area (m³/km²), di cui di seguito sono riportati gli andamenti nei 27 anni indagati, sottoforma di istogrammi: per primi vengono analizzati quelli relativi alle aree situate a Nord del canale Villoresi (Figura 8.38, Figura 8.39, Figura 8.40 e Figura 8.41) e successivamente quelli a Sud di esso (Figura 8.42, Figura 8.43, Figura 8.44 e Figura 8.45). Il canale Villoresi è tra i più importanti nell'area di studio e può, quindi, fungere da divisorio ideale tra zone a diverso comportamento di ricarica.

Nei quattro settori a Nord del canale Villoresi (terrazzo Ovest, terrazzo centro, morene e terrazzo Est), si osserva un trend in generale decrescita, soprattutto nel terrazzo Ovest (Figura 8.38), dove, fatta eccezione per gli anni 1985 e 1986, dal 1982 al 2005 la disponibilità idrica risulta essere inferiore al livello minimo sostenibile, in modo più o meno marcato.

I quantitativi oscillano frequentemente nei 27 anni: nei quattro istogrammi si osservano degli alti relativamente ai periodi 1979-1981, 1985-1986 e circa 1994-1998, che, ad esclusione del terrazzo Ovest, corrispondono a periodi di surplus idrico o sono in linea con il comportamento di riferimento del 1982. Al contrario nei periodi 1990-1993 e 1999-2000 i volumi di acqua mobile assumono valori bassi rispetto alla media e identificano fasi di deficit idrico. In alcuni casi, le variazioni corrispondono anche a valori superiori al milione di m³/km². Tale comportamento è identificativo di una zona in cui la principale voce di ricarica è costituita dalle precipitazioni e in cui la tavola d'acqua risponde più velocemente a queste sollecitazioni: infatti sia dal 1975 al 1979, sia dal 1992 al 1996 si sono verificati periodi di intense piogge, che hanno provocato, relativamente a queste aree,

un quasi immediato innalzamento della falda e un conseguente aumento nella disponibilità idrica. Ugualmente dal 1989 al 1991 si è riscontrato un periodo siccitoso che ha quindi prodotto degli abbassamenti nel livello della tavola d'acqua e nella quantità di acqua disponibile nei serbatoi sotterranei.

I ridotti quantitativi di acqua mobile nel terrazzo Est (Figura 8.41) e soprattutto nel terrazzo centro (Figura 8.39) e nelle morene (Figura 8.40) sono imputabili al basso spessore dell'acquifero, oltre alla bassa permeabilità dei depositi superficiali all'acqua di infiltrazione e alla bassa porosità efficace ricostruita. Nel terrazzo Ovest (Figura 8.38), invece, i volumi di acqua mobile sono più alti perché lo spessore dell'acquifero è maggiore, così come i valori di porosità efficace.

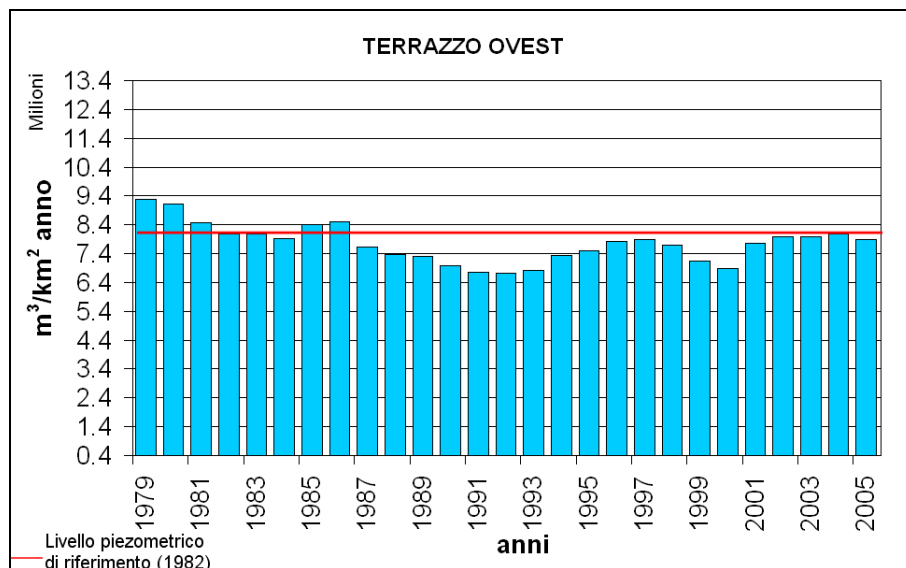


Figura 8.38 - Istogramma dei volumi di acqua mobile nel terrazzo Ovest

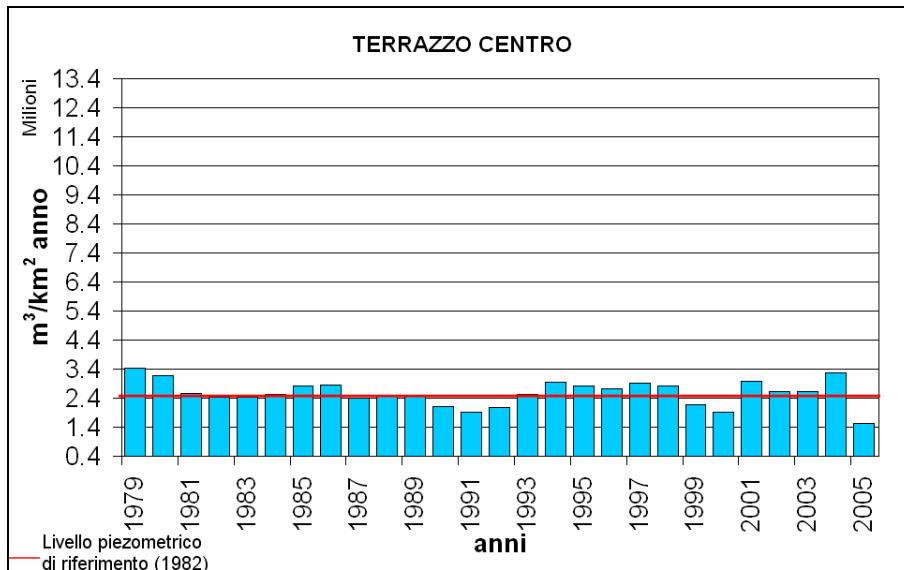


Figura 8.39 -Istogramma dei volumi di acqua mobile nel terrazzo centro

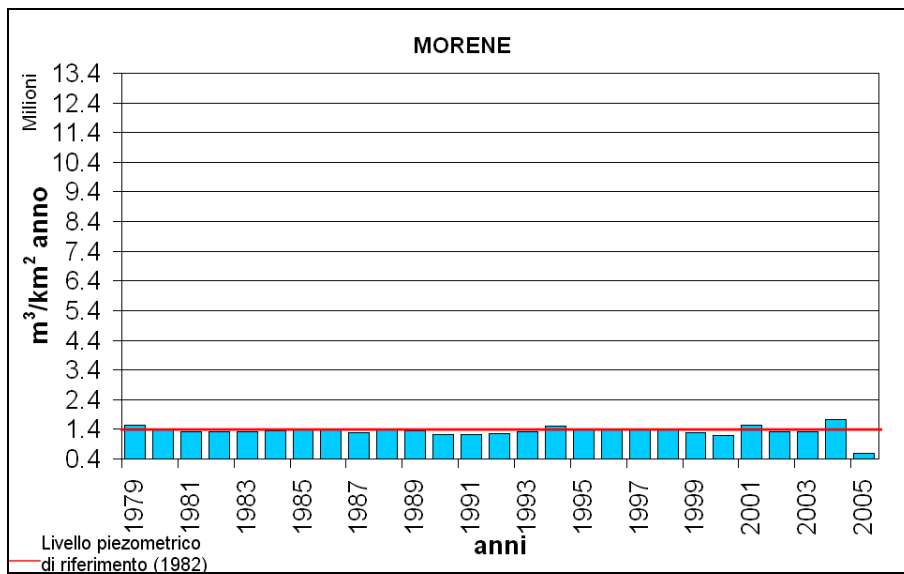


Figura 8.40 - Istogramma dei volumi di acqua mobile nelle morene

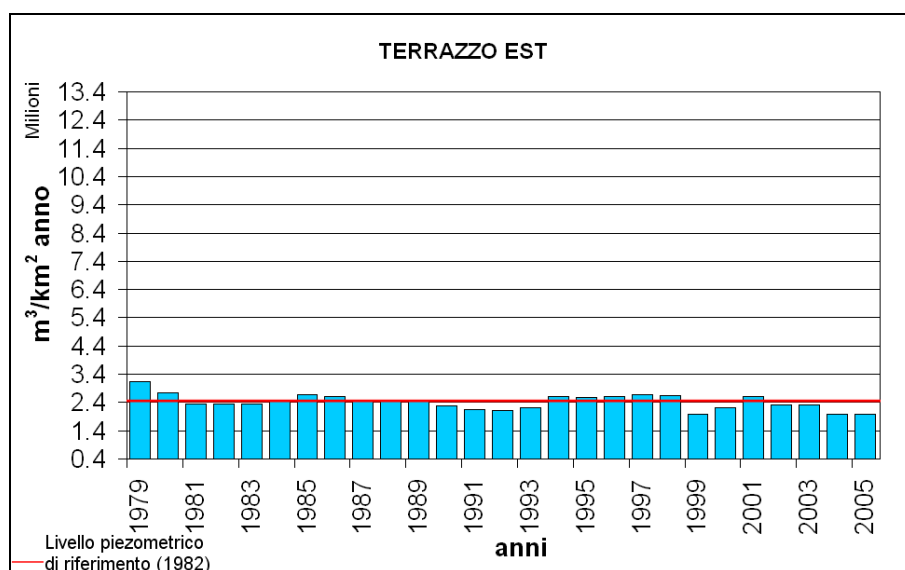


Figura 8.41 -Istogramma dei volumi di acqua mobile nel terrazzo Est

A Sud del canale Villoresi, si osserva che la disponibilità idrica è superiore rispetto al settore settentrionale, infatti in tutte e quattro le aree (Figura 8.42, Figura 8.43, Figura 8.44 e Figura 8.45) i volumi di acqua mobile non scendono sotto 8.4 milioni di m^3/km^2 , questo perché lo spessore dell'acquifero (Figura 8.5) aumenta, raggiungendo i valori più elevati dell'area di studio. Ad esempio, prendendo in considerazione il 1980, la quantità di acqua contenuta nel serbatoio del terrazzo Ticino (l'area più produttiva, Figura 8.44) è circa 8 volte superiore a quella delle morene (Figura 8.40).

Il trend della disponibilità idrica nel periodo indagato ha un comportamento piuttosto uniforme nel terrazzo Ticino (Figura 8.44) e nella pianura idromorfa (Figura 8.45), in cui i quantitativi di acqua mobile sono circa ovunque pari o prossimi al livello minimo sostenibile. Nella pianura idromorfa il trend uniforme dei volumi di acqua mobile rispecchia il comportamento della falda che in questa zona, caratterizzata dall'emergenza dei fontanili e da una bassa soggiacenza (Figura 8.27), è privo di marcate oscillazioni nel tempo.

Nell'alta pianura e nel comune di Milano si notano, invece delle oscillazioni: in entrambi è evidente un periodo di deficit rispetto al 1982 che nell'alta pianura inizia nel 1987 e prosegue fino al 2005, mentre nel comune di Milano comincia nel 1985 e termina nel 1995. In quest'ultima zona il principale fattore che influenza il comportamento della falda e quindi la disponibilità idrica, corrisponde

ai prelievi, particolarmente elevati fino ai primi anni '90; dal 1992 si è invece verificato un recupero nei volumi di acqua mobile, confermato anche da quanto descritto nel paragrafo 8.4.2 relativamente alla ricostruzione piezometrica dell'area di studio. Infatti dal 1996 (anno più produttivo nei 27 indagati per il comune di Milano) al 2005 i valori di disponibilità idrica sono superiori o prossimi al valore minimo sostenibile. Inoltre in questa zona, al contrario delle altre tre, si nota un trend in leggera crescita.

Un'altra voce di bilancio che contribuisce alla ricarica nel settore a Sud del Villoresi deriva dalle perdite dei canali irrigui, qui numerosi: essi costituiscono una porzione importante di alimentazione del serbatoio sotterraneo.

Nonostante la ridotta superficie, soprattutto in relazione alle altre tre aree, il settore del terrazzo del Ticino risulta essere il più produttivo: favoriscono questa situazione la scarsità di prelievi, che, come detto sopra, si concentrano nel comune di Milano e nel suo hinterland, soprattutto a Nord di esso, gli apporti irrigui, è infatti in prossimità dei più importanti canali dell'area (Figura 8.1), e una buona porosità efficace nell'intero volume di sottosuolo interessato.

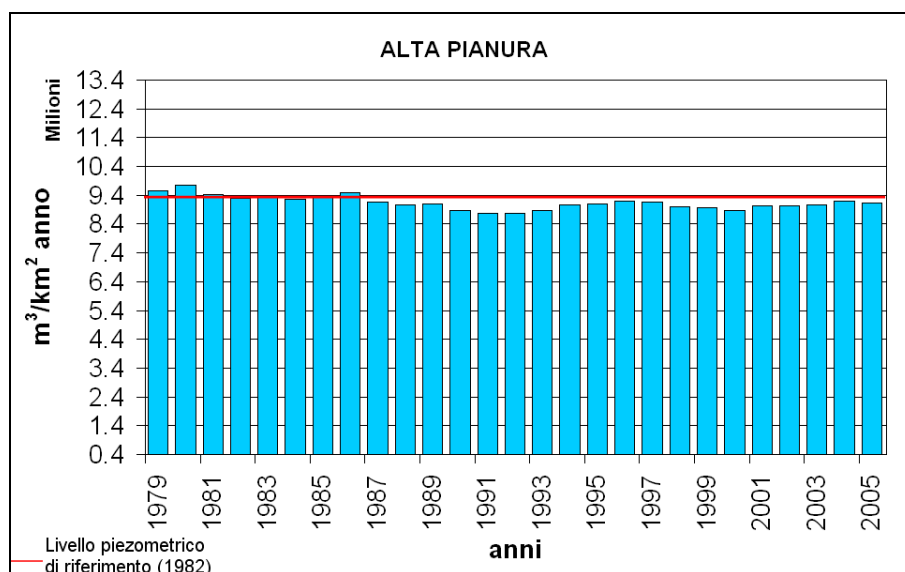


Figura 8.42- Istogramma dei volumi di acqua mobile nell'alta pianura

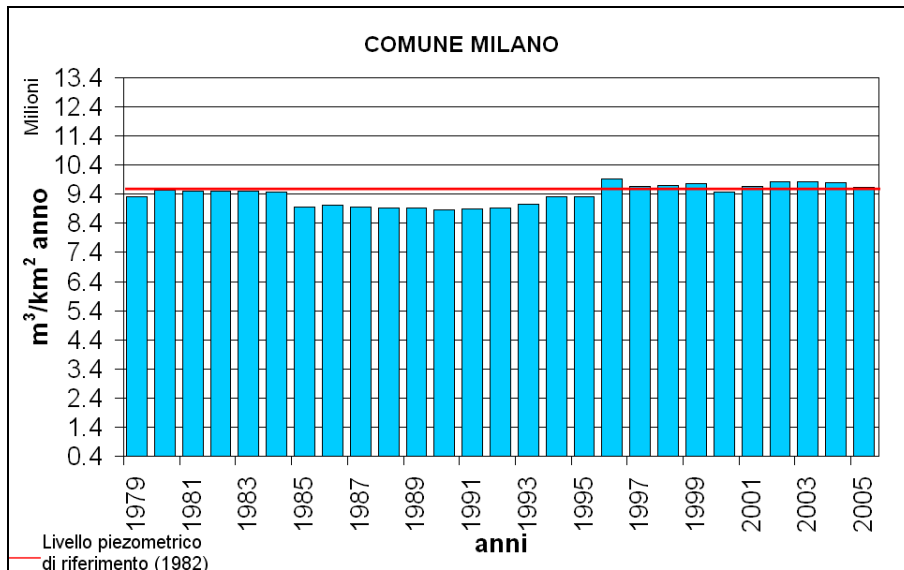


Figura 8.43 - Istogramma dei volumi di acqua mobile nel comune di Milano

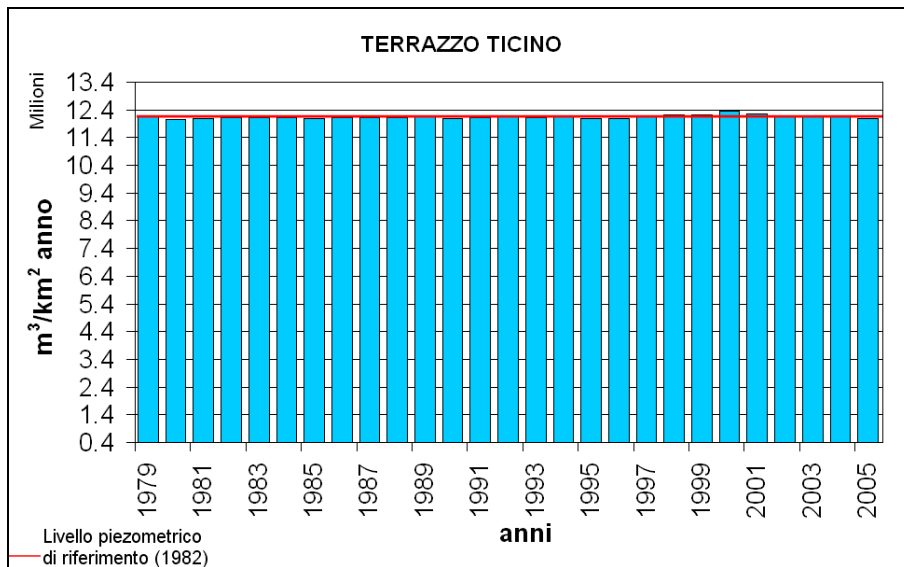


Figura 8.44- Istogramma dei volumi di acqua mobile nel terrazzo fluviale del Ticino

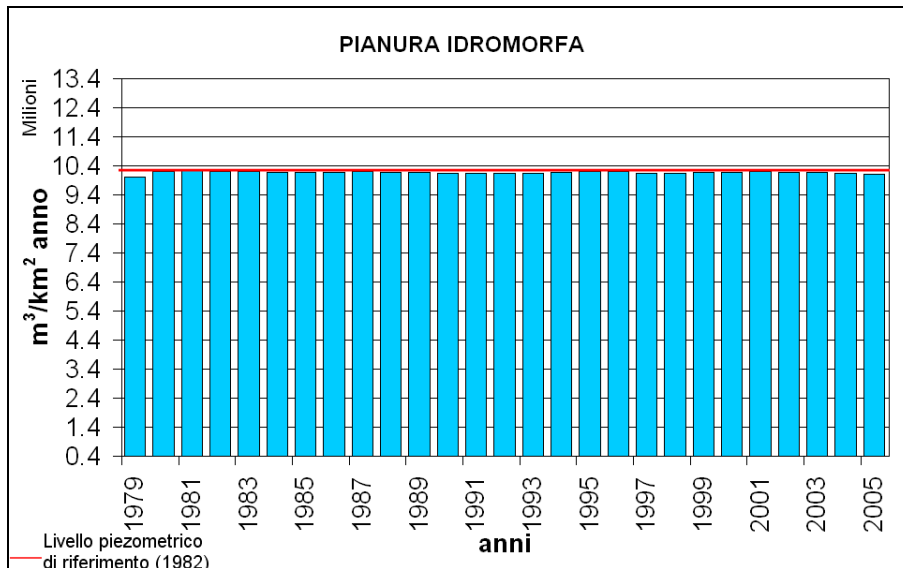


Figura 8.45 - Istogramma dei volumi di acqua mobile nella pianura idromorfa

8.6.1 Confronto tra volumi di acqua mobile e pochi dati di prelievo

La disponibilità idrica, come detto in precedenza, è una fotografia del bilancio idrico tra ricarica e prelievi. In un'ottica gestionale che mira a individuare quanto l'oscillazione della disponibilità idrica sia influenzata da cause naturali o dall'attività antropica, in base ad un buon o cattivo utilizzo della risorsa per le diverse attività umane, risulta significativo poter confrontare i volumi di acqua mobile con gli effettivi prelievi da acque sotterranee. La disponibilità di questi dati è però molto frammentaria, se non inesistente; è infatti un'informazione difficile da reperire: presso le amministrazioni provinciali, che si occupano dei dati relativi alle pratiche dei pozzi, esistono in modo dettagliato informazioni riguardanti le portate di concessione, che però sono differenti dall'esatta quantità di acqua prelevata in un anno in un determinato pozzo. Le concessioni sono, infatti, dei permessi rilasciati dall'autorità per poter prelevare acqua per un periodo variabile (da 15 a 40 anni), in base all'uso, non rappresentano perciò il preciso quantitativo prelevato, ne forniscono un'indicazione.

Secondo il Regolamento regionale 2/2006 art.33 in applicazione alle indicazioni del D.Lgs. 152/2006 art.95 e successive modifiche, dovrebbe essere un obbligo di ciascun proprietario (pubblico o privato) comunicare regolarmente quanta acqua preleva dal proprio

pozzo, ma ciò accade molto raramente e molto spesso le poche informazioni presenti sono ancora in formato cartaceo.

A titolo esemplificativo è stato realizzato in un paio di sottoaree considerate un confronto tra la disponibilità idrica e gli esigui dati di prelievo reperiti.

Gli unici dati che sono stati reperiti sono stati descritti nel paragrafo 5.2.2. Utilizzando questi pochissimi dati, è stato svolto un confronto tra 2 sottoaree a comportamento completamente opposto: il terrazzo Est (Figura 8.41) e il comune di Milano (Figura 8.43).

La disponibilità idrica nel comune di Milano è circa 4 volte superiore a quella nel terrazzo Est: nel primo i valori massimi sono stati registrati nel 1996 e quelli minimi nel 1990, mentre nel secondo rispettivamente nel 1979 e nel 1999. Il terrazzo Est, influenzato principalmente dalle precipitazioni mostra un trend decrescente, al contrario il comune di Milano, in cui i fattori più impattanti sono i prelievi antropici, mostra un andamento in crescita.

Prendendo in considerazione i dati dei prelievi elencati nel paragrafo 5.2.2 e tenendo conto delle limitazioni del caso, si è giunti alle seguenti conclusioni: nel terrazzo Est dal 1979 al 2005 si nota una diminuzione di quasi 100 milioni m^3 (nella produttività del serbatoio una diminuzione di circa 1.1 milioni m^3/km^2), mentre i prelievi totali sono aumentati di 6 milioni m^3 ca; al contrario nel comune di Milano è visibile un aumento di quasi 60 milioni m^3 (nella produttività del serbatoio un aumento di circa 3.2 milioni m^3/km^2), mentre i prelievi pubblici sono diminuiti di 124 milioni m^3 ca.

8.7 Problematiche incontrate e ancora aperte

Carenze più o meno evidenti delle reti di monitoraggio relative al comportamento dinamico della falda (reti piezometriche e di prelievi) nelle province di Milano e Monza e Brianza pregiudicano valutazioni quantitative sul bilancio sotterraneo. L'interruzione di serie storiche, la frammentarietà del periodo di rilevamento, il diradamento o anche la cessazione delle misure piezometriche da uno specifico periodo in poi compromettono le analisi e le considerazioni relative alla falda e alle sue variazioni. Inoltre la quasi totale assenza di dati relativi agli emungimenti da acqua sotterranee non permette di creare un quadro completo nella stima della disponibilità idrica del sottosuolo, che è limitata anche da un fattore temporale: la raccolta dei dati piezometrici è, infatti, aggiornata a fine 2005, non è stato perciò possibile realizzare delle valutazioni sugli ultimi anni.

Per completare e dare validità al quadro di analisi si dovrebbe disporre in modo più accurato dei prelievi idrici sotterranei e affrontare l'altro aspetto determinante per la comprensione del bilancio idrico sotterraneo: il contributo della ricarica da precipitazioni.

9 Strumenti utilizzati

Di seguito vengono descritti i principali strumenti informatici utilizzati per lo svolgimento del progetto.

9.1 Tangram

TANGRAM è una banca dati implementata in collaborazione tra l'IDPA del CNR di Milano (Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali) e il DISAT che è stata predisposta per fini scientifici di ricerca e che mira a realizzare un archivio di dati completo di tutte le informazioni relative ai pozzi per acqua, comprese quelle che, di valore unicamente scientifico, non vengono comunemente utilizzate. Si tratta di un database che permette di archiviare, estrarre ed elaborare qualsiasi informazione relativa ad un pozzo. In TANGRAM ogni pozzo è univocamente identificato da un codice di 10 cifre così definito: 3 cifre per la provincia (secondo codice Istat), 3 per il comune (secondo codice Istat) e 4 per il pozzo (secondo numerazione locale). Ad es. il codice 0150030001 corrisponde al pozzo 0001 ubicato nel comune di Agrate (003), in provincia di Milano (015). In particolare TANGRAM prevede l'inserimento per ciascun pozzo delle seguenti caratteristiche: dati amministrativi (indirizzo, proprietario, coordinate geografiche, quota, profondità, uso, tipologia, stato), caratteristiche del pozzo (profondità e diametro perforazione, caratteristiche e profondità della tubazione cieca e dei filtri, avampozzo, cementazione e impermeabilizzazione), dati piezometrici (data, misura del livello e quota di riferimento), consumi, prove idrauliche (livello statico, dinamico e portata) e stratigrafia.

Per quest'ultimo modulo è stato impostato un criterio descrittivo mediante codifica che rappresenta la parte innovativa del programma, consentendo la successiva elaborazione quantitativa del dato stratigrafico. Infatti ciascun intervallo stratigrafico, da mera descrizione qualitativa, viene trasformato in codici alfanumerici a 8 caratteri: i primi 4 caratteri del codice si riferiscono al litotipo predominante, gli altri 4 a quello presente in percentuale minore. In entrambi i casi, i quattro caratteri componenti il codice prevedono l'identificazione del litotipo attraverso, nell'ordine, un sostantivo (argilla, ghiaia, sabbia,...), un aggettivo (limoso, argilloso,...), uno stato (compatto, alterato,...) e un colore (giallo, rossiccio,...). L'ordine con cui vengono inseriti i singoli caratteri nel codice riveste particolare importanza, in quanto i primi 2 caratteri relativi ad ognuno dei litotipi

ed indicanti le caratteristiche tessiturali (litotipo predominante: posizioni 1-2; litotipo secondario: le posizioni 5-6), ne determinano anche il peso percentuale in fase di estrazione e quindi di elaborazione, secondo la Tabella 9.1. Ad es. la dicitura “sabbia grigia media con pochi ciottoli” viene codificata in 605M020, codice così costruito:

(litotipo dominante)

posizione 1 =6 = sabbia (litotipo dominante) = X

posizione 2 =0 = nessun inserimento = 0

posizione 3 =5 = media

posizione 4 =M = grigia

(litotipo secondario)” con”

posizione 5 =0 = nessun inserimento = 0

posizione 6 = 2 = pochi ciottoli (litotipo secondario) = X

posizione 7 =0 = nessun inserimento

posizione 8 =0 = nessun inserimento

Nell'esempio sopra descritto, la suddivisione delle caratteristiche tessiturali (posizione 1-2: litotipo dominante e posizione 5-6: litotipo secondario) risulta essere: sabbia con pochi ciottoli (X00X) e ricade quindi nel caso 2, secondo la Tabella 9.1. La sabbia viene quindi ritenuta come presente al 95%, mentre la ghiaia è presente al 5%. Sulla base dei termini descrittivi inseriti, e quindi del codice relativo, Tangram consente anche di produrre e stampare una colonna stratigrafica schematica per ciascun pozzo.

	PESO 1 (%)	PESO 2 (%)	PESO 3 (%)	PESO 4 (%)
CASO 1 (X000)	100	0	0	0
CASO 2 (X00X)	95	0	0	5
CASO 3 (X0X0)	60	0	40	0
CASO 4 (X0XX)	60	0	35	5
CASO 5 (XX00)	70	30	0	0
CASO 6 (XX0X)	70	25	0	5
CASO 7 (XXX0)	50	25	25	0
CASO 8 (XXXX)	50	25	20	5

Tabella 9.1 - Suddivisione dei pesi percentuali assegnati alle diverse caratteristiche tessiturali a seconda della posizione che occupano nel codice alfa-numerico.

Per quanto riguarda i parametri idraulici del terreno, TANGRAM prevede l'attribuzione di valori di conducibilità idraulica e porosità efficace in funzione dei litotipi e della rispettiva presenza percentuale, sulla base di tabelle di conversione interne al programma. Lo schema relativo all'intero percorso, dalla codifica del dato stratigrafico alla sua conversione quantitativa in termini percentuali tessiturali e in valori di parametri idraulici è riportato in Figura 9.1.

Le tabelle di conversione, dei pesi percentuali sono state realizzate in base alle regole dettate dall'Associazione Geotecnica Italiana (AGI); quelle relative ai parametri idraulici (Figura 9.2) derivano dall'incrocio di dati di letteratura (Freeze & Cherry, 1979; Anderson & Woessner, 1992). Entrambe possono essere variate in funzione di specifiche esigenze e/o delle caratteristiche dell'area cui appartengono i pozzi.

I dati presenti in Tangram relativi a qualunque modulo descritto possono essere estratti in file Ascii o Excel, secondo un criterio amministrativo (provincia, uno o più comuni) o geografico (coordinate geografiche), in funzione delle finalità delle elaborazioni.

Particolarmente flessibile, in quanto rappresenta lo strumento della ricerca, è la possibilità di estrazione delle caratteristiche legate all'elemento stratigrafico: di volta in volta è possibile specificare al programma i criteri che si vuole siano soddisfatti dall'estrazione, in funzione delle proprie necessità. Vanno definiti:

- area d'indagine, individuata sulla base di criteri spaziali (attraverso coordinate geografiche, indicando un riquadro d'interesse), territoriali (attraverso la selezione di uno o più comuni, una o più province) o puntuali (attraverso la selezione di un singolo pozzo), profondità di investigazione e ampiezza dell'intervallo di estrazione. La variazione dell'intervallo di investigazione e della profondità investigata consente di variare il dettaglio dell'interpretazione stratigrafica e dell'informazione estratta, a seconda delle esigenze specifiche;
- tipologia degli elementi da estrarre. La selezione avviene sulla base di quattro raggruppamenti o selezioni, definite in modo che risultino funzionali alle finalità dell'indagine. Nel caso dell'estrazioni della presenza percentuale delle classi tessiturali in queste quattro selezioni vengono rispettivamente inseriti i termini grossolani (trovanti, ciottoli, conglomerato, ghiaia, ghiaietto e conglomerato fessurato), medi (sabbia, arenaria e sabbia fine), fini (limo, argilla, torba) e tutti quei termini presenti nelle

stratigrafie, ma privi di significato idrogeologico (avampozzo, roccia terreno di riporto e terreno vegetale), che, proprio per questo motivo vengono eliminati prima di qualsiasi elaborazione.

In fase di estrazione il software opera una media pesata tra le percentuali litologiche presenti in un determinato strato e il suo stesso spessore; una colonna stratigrafica può essere, perciò, suddivisa in molteplici livelli, con spessori differenti fino al dettaglio massimo di 1 m. In questo modo, la precisione e la variabilità dei valori di conducibilità idraulica calcolati rispecchia maggiormente l'eterogeneità dei depositi.

I risultati dell'estrazione stratigrafica sono dei files Ascii di punti (un esempio per le tessiture è visualizzato in Figura 9.3 e per i parametri idraulici in Figura 9.4: ciascun punto corrisponde ad un livello stratigrafico estratto ed è identificato dalle coordinate geografiche (X e Y), dalla quota (QUOTA m s.l.m.) e dal codice (CODICE) del pozzo a cui appartiene, ed infine dalla quota del livello estratto (QUOTA LIV m s.l.m.), ricavata in automatico per differenza tra la quota del pozzo e la profondità del livello. A ciascun punto sono associati come proprietà i valori percentuali delle tessiture (termini grossolani SEL1%, medi SEL2% e fini SEL3%) (Figura 9.3) e i valori di porosità efficace (POR%) e di conducibilità idraulica (PERM m/d) (Figura 9.4). La SEL4% corrisponde ai termini privi di significato idrogeologico, vengono quindi eliminati tutti i punti con SEL4% uguale o maggiore del 10%, questo è il motivo per cui il numero totale di punti estratti nei due files spesso diverge, pur derivando dalla stessa quantità di pozzi.

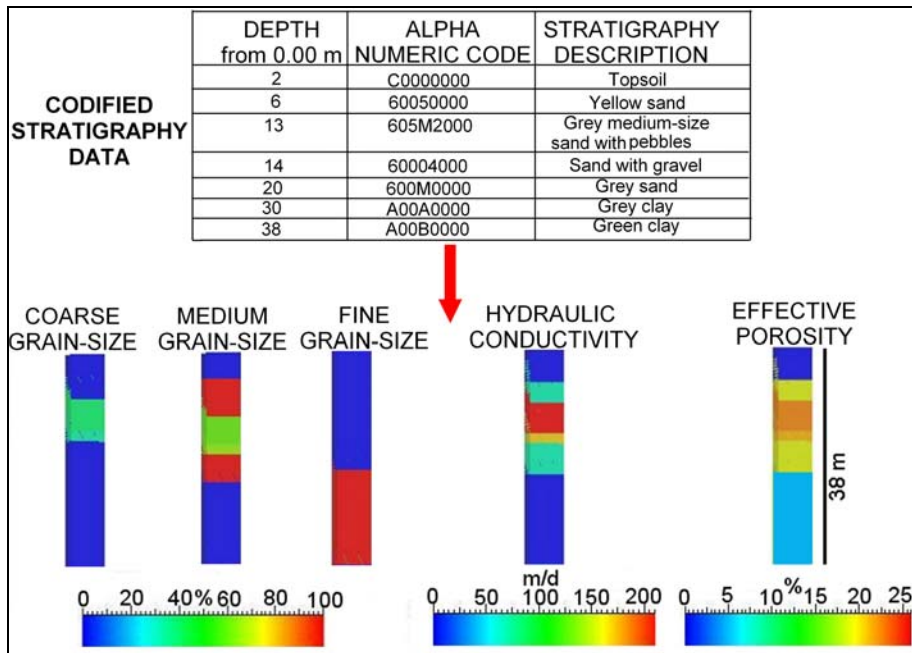


Figura 9.1 - Schema relativo al trattamento dei dati stratigrafici: archiviazione, codifica ed estrazione

9 Strumenti utilizzati

Descrizione	Permeabilità m/g	Permeabilità m/sec	Porosità %
ARENARIA	43,2000000000	0,0005000000000000	19,0000000000
ARGILLA	0,0086400000	0,0000001000000000	5,0000000000
ARGILLOSA	0,0086400000	0,0000001000000000	5,0000000000
ARGILLOSI	0,0086400000	0,0000001000000000	5,0000000000
ARGILLOSO	0,0086400000	0,0000001000000000	5,0000000000
AVAMPOZZO	0,0000000000	0,0000000000000000	0,0000000000
CIOTTOLI	432,0000000000	0,0050000000000000	28,0000000000
CIOTTOLOSA	432,0000000000	0,0050000000000000	28,0000000000
CIOTTOLOSI	432,0000000000	0,0050000000000000	28,0000000000
CIOTTOLOSO	432,0000000000	0,0050000000000000	28,0000000000
CONGLOM. FESS.	86,4000000000	0,0010000000000000	25,0000000000
CONGLOMERATO	69,1200000000	0,0008000000000000	22,0000000000
GHIAIA	259,2000000000	0,0030000000000000	22,0000000000
GHIAIETTO	86,4000000000	0,0010000000000000	20,0000000000
GHIAIOSA	259,2000000000	0,0030000000000000	22,0000000000
GHIAIOSI	259,2000000000	0,0030000000000000	22,0000000000
GHIAIOSO	259,2000000000	0,0030000000000000	22,0000000000
LIMO	0,0864000000	0,0000010000000000	15,0000000000
LIMOSA	0,0864000000	0,0000010000000000	15,0000000000
LIMOSI	0,0864000000	0,0000010000000000	15,0000000000
LIMOSO	0,0864000000	0,0000010000000000	15,0000000000
MARNOSA	0,0086400000	0,0000001000000000	15,0000000000
ROCCIA	0,0086400000	0,0000001000000000	5,0000000000
SABBIA	69,1200000000	0,0008000000000000	19,0000000000
SABBIA FINE	8,6400000000	0,0001000000000000	19,0000000000
SABBIOSA	69,1200000000	0,0008000000000000	19,0000000000
SABBIOSI	69,1200000000	0,0008000000000000	19,0000000000
SABBIOSO	69,1200000000	0,0008000000000000	19,0000000000
SUBSTRATO	0,8640000000	0,0000100000000000	1,0000000000
TERR. RIPORTO	0,0000000001	0,0000000000000011	0,0000000001
TERR. VEGETALE	0,0000000001	0,0000000000000011	0,0000000001
TORBA	0,0086400000	0,0000001000000000	15,0000000000
TORBOSA	0,0086400000	0,0000001000000000	15,0000000000
TORBOSI	0,0086400000	0,0000001000000000	15,0000000000
TORBOSO	0,0086400000	0,0000001000000000	15,0000000000
TROVANTI	432,0000000000	0,0050000000000000	28,0000000000

Figura 9.2 – Tabella di conversione per i valori di conducibilità idraulica e porosità efficace (www.tangram.samit.unimib.it, modificata)

CODICE	X	Y	SEL1%	SEL2%	SEL3%	SEL4%	LIV(m)	QUOTA LIV(m s.l.m.)	QUOTA (m s.l.m.)
160030011	1560980	5059160	40	0	60	0	1	236	237
160030011	1560980	5059160	40	0	60	0	3	234	237
160030011	1560980	5059160	40	0	60	0	5	232	237
160030011	1560980	5059160	60	0	40	0	7	230	237
160030011	1560980	5059160	60	0	40	0	9	228	237

Figura 9.3 - Porzione del file di estrazione da Tangram delle proprietà tessiturali

CODICE	X	Y	POR(%)	PERM(m/g)	LIV(m)	QUOTA LIV(m s.l.m.)	QUOTA(m s.l.m.)
160030011	1560980	5059160	14.2	172.805184	1	236	237
160030011	1560980	5059160	14.2	172.805184	3	234	237
160030011	1560980	5059160	14.2	172.805184	5	232	237
160030011	1560980	5059160	15.2	155.523456	7	230	237
160030011	1560980	5059160	15.2	155.523456	9	228	237

Figura 9.4 - Porzione del file di estrazione da Tangram dei parametri idraulici

A partire dal mese di febbraio 2008 il programma è consultabile online (www.tangram.samit.unimib.it): la Figura 9.5 mostra la schermata dell'homepage di TANGRAM che visualizza la distribuzione di tutti i pozzi archiviati. Si tratta di un totale di 25.030 pozzi, lombardi e piemontesi raccolti nell'ambito di lavori di tesi di

laurea, borse di dottorato e di progetti di ricerca. L'accesso e il download dei dati è regolato attraverso passwords in funzione di specifiche autorizzazioni, in quanto i dati archiviati sono ritenuti di proprietà esclusiva degli Enti gestori che li hanno messi a disposizione a scopo di ricerca; la sezione relativa all'aggiornamento dei dati è invece accessibile al solo DISAT.



Figura 9.5 – Homepage di www.tangram.samit.unimib.it

In Figura 9.6 è riportato un dettaglio della Lombardia e in parte del Piemonte che mostra la densità dei pozzi archiviati in quell'area, sottoforma di nuvole colorate; ad ogni nuvola è associato il numero di pozzi ubicati nell'area circostante ad essa. La carta visualizzata sul fondo deriva da Google Earth.

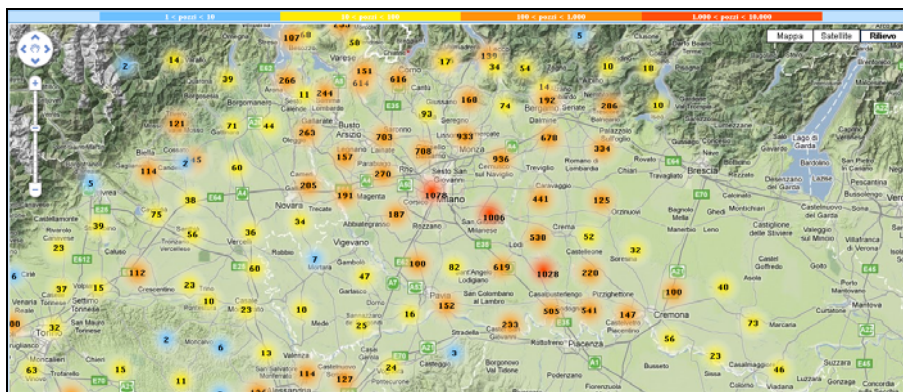


Figura 9.6 – Dettaglio della distribuzione di alcuni pozzi archiviati in Tangram, con una base geografica derivata da Google Earth

9.2 Gocad

Gocad (Geological Object Computer Aided Design) fu sviluppato negli anni '90 dal Gocad Research Group, attualmente costituito da numerosi centri di ricerca universitari e da società industriali, a seguito di un progetto nato nel 1989 presso la Scuola Nazionale di Geologia (ENSG) di Nancy, Francia. E' largamente impiegato nell'industria petrolifera e del gas per la modellazione di complesse strutture geologiche sotterranee e allo stesso tempo si è diffuso anche in altri campi, quali ad esempio le scienze ambientali, la medicina e l'antropologia.

Il software, ora, è un prodotto commerciale e l'interfaccia per l'applicazione del programma è interamente di proprietà di Paradigm Geophysical (www.pdgm.org).

Gocad permette la visualizzazione, l'interpretazione e la geoanalisi in 3D di corpi e fenomeni geologici; è inoltre in grado di integrare informazioni provenienti da sorgenti diverse in un unico ambiente 3D.

E' un sistema modellatore di superfici e volumi, oltre che di proprietà spaziali. Secondo l'approccio implementato, infatti, la geometria di qualsiasi oggetto viene definita da uno specifico set di nodi (punti) nello spazio tridimensionale, ne viene modellata la topologia attraverso l'unione di questi nodi, a cui vengono associate le relative proprietà fisiche (www.gocad.org).

Ogni oggetto che può essere visualizzato in Gocad è un "GOCAD Object"; quelli che sono stati utilizzati per il progetto di dottorato sono PointSet, Curve, Surface, S-Grid e Well. Il programma permette di creare tali oggetti da altri e di modificarli.

PointSet, Curve e Surface sono definiti Atoms Object, perché formati da atomi (punti) con precise caratteristiche di interconnessione. Ogni punto è posizionato nello spazio grazie alla definizione delle coordinate X, Y, Z e può trasportare valori di proprietà. Le coordinate di ogni punto sono considerate di default delle proprietà ed è possibile rappresentare l'andamento della longitudine, latitudine e quota attraverso diverse scale cromatiche. Per ogni proprietà Gocad prevede la possibilità di definire un valore di *No Data*, ossia di quel numero che viene riconosciuto dal software come "assenza del valore in quel punto".

PointSet

E' un insieme di punti che non presentano alcuna connessione. Molteplici strumenti di ottimizzazione sono disponibili per la gestione di questi oggetti: è possibile spostare, rimuovere o selezionare atomi di un PointSet, oppure cambiarne l'aspetto.

Curve

E'un insieme di segmenti, connessi o meno, ognuno dei quali unisce due punti. Un atomo non può far parte di più di due segmenti. Una curva può essere aperta o chiusa.

Gocad permette di costruire una Curve da una serie di altri oggetti, come ad esempio dal bordo di una Surface o unendo gli atomi di un PointSet.

Esistono molteplici comandi per poter modificare una Curve, agendo sugli atomi o sui segmenti.

Surface

E' un insieme di triangoli, connessi o disconnessi. Ogni triangolo presenta tre atomi, uno per ogni vertice, ed un lato non può appartenere a più di due triangoli.

Una Surface può essere costruita da differenti Gocad Object: da un set di punti, da punti e da una curva, da due curve.

Tra le molteplici operazioni di gestione e modifica di una Surface, può essere eseguito un taglio lungo altre superfici, può essere fatta coincidere con i marker di pozzi, modellata con un set di punti.

SGrid

E' una griglia stratigrafica tridimensionale, che può essere tagliata da piani e modellata in funzione di superfici: ogni cella viene deformata e assume andamento e orientazione di tali superfici.

L'informazione al suo interno può essere associata a centro cella o ai singoli vertici e un set di informazioni può essere generato da un processo di interpolazione. Possono essere visualizzate delle Section e delle Property Section, alla quale sono associate tutte le proprietà contenute in una sezione. Possono, inoltre, essere create delle Region, ovvero delle porzioni di oggetto, totalmente disconnesse le une dalle altre.

E' possibile trasformare una distribuzione discreta di proprietà puntuali in una continua all'interno del volume di un serbatoio sotterraneo modellizzato, tramite tecniche geostatistiche, tra cui il kriging con il calcolo del variogramma o il DSI (Discrete Smooth Interpolation), metodo peculiare del software.

9.3 Altri software

Fondamentale in ogni passaggio del lavoro è stato l'utilizzo dei GIS (Geographic Information System), che costituiscono un sistema con specifiche funzioni per acquisire, elaborare, gestire e restituire dati georiferiti.

Si tratta di insiemi di strumenti hardware e software, capaci di raccogliere, archiviare e all'occorrenza estrarre, elaborare e rappresentare dati spaziali del mondo reale.

Oltre a rappresentare geometricamente oggetti presenti nella realtà, i GIS rispondono anche all'esigenza di gestire le relazioni spaziali tra i diversi elementi e sono quindi in grado di strutturare i dati definendone la topologia, prevedendo inoltre l'inserimento di componenti descrittive degli oggetti stessi.

Un'altra proprietà che li contraddistingue è la capacità di georeferenziare i dati, ossia di attribuire ad ogni elemento le sue coordinate spaziali reali, memorizzandole secondo le coordinate del sistema di riferimento in cui è realmente situato. Basandosi su un modello geo-relazionale, mettono pertanto in relazione la localizzazione e la topologia degli elementi (punti, linee, aree), con i loro attributi descrittivi.

Software impiegati con tali peculiarità sono stati ArcView Gis 3.2 e ArcGis 9.

In minima parte e per elaborazioni bidimensionali di punti XYZ è stato utilizzato il software Surfer 8. La caratteristica principale di questo software è quella di utilizzare la funzione di *gridding*; tale metodo di interpolazione consente di creare mappe accurate da dati XYZ attraverso la costruzione di un grid, cioè di una matrice di celle, ognuna delle quali può contenere un valore descrittivo di una proprietà o caratteristica.

Surfer permette l'interpolazione di dati puntuali in una griglia, i cui limiti vengono impostati in base alle esigenze dell'utente, che può stabilire inoltre le dimensioni della cella elementare ed il metodo di interpolazione opportuno; tra questi si ricordano ad esempio: *Inverse Distance to a Power*, *Kriging*, *Minimum Curvature*, *Polynomial Regression*, *Triangulation*.

9.4 Breve cenno a Modflow e GroundWater Vistas

Viene di seguito riportata una breve descrizione del software Modflow e dell'interfaccia grafica GroundWater Vistas perché accennati nel corpo della tesi.

Modflow

Modflow è un modello idrogeologico tridimensionale alle differenze finite che simula il flusso delle acque sotterranee e valuta il bilancio di massa del sistema, attraverso la ricerca, in modo iterativo, di una soluzione numerica all'equazione alle derivate parziali che, insieme con le condizioni al contorno e iniziali di carico idraulico, costituisce la rappresentazione matematica di un sistema di flusso delle acque sotterranee.

E' scritto in Fortran.

In Modflow l'acquifero viene discretizzato in un numero finito di celle, le cui dimensioni sono scelte dall'utilizzatore in relazione al volume dell'acquifero stesso e agli obiettivi che si intende raggiungere. Ogni cella è interessata da un flusso in entrata e da uno in uscita. Tutti i parametri che caratterizzano il sistema idrogeologico sono assegnati a punti discreti, detti nodi, in corrispondenza dei quali viene calcolato il carico idraulico.

Oltre tramite ad una discretizzazione spaziale, è possibile ricostruire il flusso sotterraneo attraverso una discretizzazione temporale, che permette il calcolo del carico idraulico in transitorio, al cambiare di determinate proprietà col passare del tempo.

GroundWater Vistas

E' un software che facilita l'uso di complessi modelli tridimensionali di flusso delle acque sotterranee, come Modflow, attraverso una flessibile interfaccia grafica. Organizza l'input del modello in modo intuitivo e grafico e automaticamente attribuisce i vari dati ai pacchetti idonei (dove per pacchetto si intende ogni caratteristica del modello che richiede un file di input di dati distinto).

Conclusioni

Il presente dottorato, svolto nel triennio 2008-2010, si è sviluppato nel campo dell'Idrogeologia applicata, inserendosi in un filone di ricerca che mira ad implementare metodologie informatiche, applicate alle problematiche relative allo studio e alla gestione delle riserve idriche sotterranee.

Negli ultimi decenni la consapevolezza della necessità di proteggere e salvaguardare questo bene insostituibile si è fatta sempre più incalzante, spingendo gli enti pubblici verso una politica di utilizzo sostenibile e di risparmio della risorsa. Ciò non può prescindere da una preliminare e dettagliata indagine del sottosuolo, finalizzata alla conoscenza del comparto sotterraneo, relativamente alla sua struttura geologica e idrogeologica. Questi aspetti, infatti, condizionano il comportamento idrodinamico della risorsa.

Secondo quest'ottica il seguente studio si è occupato della ricostruzione dell'eterogenea distribuzione dei depositi fluviali e fluvioglaciali del sottosuolo nella pianura lombarda e della variabilità dei parametri idraulici ad essi associati, attraverso l'elaborazione geostatistica di dati puntuali stratigrafici. I risultati ricavati sono serviti per lo sviluppo del modello di flusso, realizzato nelle tesi di dottorato della Dott.ssa Paola Canepa "*Il bilancio delle acque sotterranee nella pianura lombarda in relazione agli effetti del cambiamento climatico*" (Dottorato in Scienze Ambientali, XXIII ciclo); e nel territorio provinciale di Milano e Monza e Brianza per la stima della disponibilità idrica del serbatoio sotterraneo indagato.

L'attività di ricerca ha prodotto molteplici risultati, spendibili sia nel campo della ricerca scientifica, sia in quello della gestione del territorio, a partire dall'implementazione della Banca Dati Tangram (Bonimi et al., 1995), a seguito di una sistematica raccolta dati avvenuta nelle province lombarde comprese tra Ticino e Oglio. Sono state archiviate migliaia di dati relativi a pozzi per acqua (21523), tra cui numerosi dati idrogeologici (16583 pozzi con stratigrafia di cui 8429 georeferenziati), che sono stati oggetto di processi di omogeneizzazione e codifica. L'utilità di una Banca Dati specifica è duplice: da un lato costituisce il motore dell'intero procedimento scientifico applicato, essendo una preziosa fonte di informazioni relative al sottosuolo e una valorizzazione del dato stratigrafico che spesso viene considerato un mero descrittore. Dall'altro, l'organizzazione e l'archiviazione in un unico database dei dati relativi

Conclusioni

ai pozzi permette una gestione più sicura, più snella e più rapida delle informazioni. Il dato informatizzato è più facilmente gestibile del cartaceo: in questo formato le operazioni di consultazione e di download risultano più rapide, anche quando si tratta di un'enorme quantità di informazioni da gestire contemporaneamente. Con la stessa semplicità è possibile procedere ad un continuo aggiornamento. Questo procedimento può risultare vantaggioso per le abituali attività svolte da enti pubblici come ad esempio le amministrazioni provinciali o regionali.

Di seguito vengono descritti i risultati ottenuti nelle due aree indagate.

Area di pianura tra Ticino e Oglio

In base ad un'attenta analisi delle reali sequenze deposizionali, dei movimenti tettonici, dell'evoluzione dell'ambiente di deposizione, delle tipologie e delle giaciture dei sedimenti, è stato scelto di ricostruire l'assetto idrogeologico dell'acquifero tradizionale nel bacino tra Ticino e Oglio; questo, secondo uno studio di Regione Lombardia e Divisione-Eni Agip, può essere suddiviso in due Unità Idrostratigrafiche o Gruppi Acquiferi A e B, di ambiente deposizionale continentale, in cui dominano le piane alluvionali. Per analogie litologiche, è stata presa in considerazione anche la porzione superiore del Gruppo Acquifero C, relativamente al settore centro-settentrionale dell'area di studio, dove numerosi pozzi si approfondiscono oltre la base dell'Unità Idrostratigrafica B, interessando il Gruppo Acquifero sottostante (figura 6.4).

L'utilizzo di software modellatori bidimensionali (Surfer, ArcGis) e tridimensionali (Gocad) di corpi geologici e l'impiego di metodiche geostatistiche hanno permesso la ricostruzione della struttura geometrica e delle caratteristiche idrogeologiche del sistema indagato, necessarie per la realizzazione del successivo modello di flusso.

Mantenendo una coerenza geologica e sedimentaria con la realtà del sottosuolo, i tre diversi Gruppi Acquiferi sono stati modellizzati separatamente attraverso tre griglie di calcolo denominate, per analogia, A, B e C. La separazione tra ognuna di esse e la successiva sottostante è stata individuata dalle superfici basali delle Unità Idrostratigrafiche, che identificano barriere impermeabili o poco permeabili e determinano un relativo isolamento idraulico di un dato Gruppo Acquifero con quello soprastante. In questo modo, attraverso

procedimenti insiti nel programma Gocad (paragrafo 6.2), è stato possibile assegnare alle griglie una conformazione coerente con la morfologia delle superfici deposizionali, attribuendo agli strati, in cui sono state discretizzate, un'inclinazione proporzionale alla loro giacitura.

I limiti superiore e inferiore sono stati individuati, rispettivamente, nel Modello Digitale del Terreno di CNR-Irpi e in una superficie ricostruita appositamente per il modello, a partire da dati provenienti dalle basi dei Gruppi Acquiferi B e C, da stratigrafie e da sezioni idrogeologiche (paragrafo 6.1).

Riassumendo, lo spessore del sistema idrogeologico indagato, compreso tra qualche decina di centimetri a Nord, vicino ai rilievi, e oltre 600 m a Sud-Est, è stato modellizzato tramite una discretizzazione orizzontale e verticale di più di 520 mila celle attive, per 333 colonne, 207 righe e 54 strati. In questo modo è stato possibile:

- riprodurre la corretta giacitura e inclinazione della deposizione dei materiali fluviali e fluvio-glaciali del sottosuolo indagato, in base allo schema di suddivisione in Gruppi Acquiferi (A, B, C), corrispondenti alle 3 griglie di calcolo;
- riprodurre con elevato dettaglio le zone superficiali dell'area di studio, in cui si verifica la maggior ricarica degli acquiferi;
- individuare i livelli argillosi (lo spessore dei corpi a bassa permeabilità di una certa rilevanza è circa 10 m), identificativi della separazione tra un sistema acquifero e l'altro.

L'andamento della distribuzione delle caratteristiche tessiturali e dei parametri idraulici del sistema, ricreate nell'area di studio attraverso l'interpolazione di oltre 8400 dati stratigrafici, si dimostra coerente con i dati di letteratura e con alcune sezioni idrogeologiche classiche (allegati 1 e 4) poste a confronto dei risultati ottenuti dalle interpolazioni (allegati 2,3, 5 e 6). In generale si osserva una diminuzione di granulometria da Nord a Sud, Sud-Est, in funzione di una diminuzione dell'energia di trasporto dei principali fiumi presenti (Marchetti, 2000), e all'aumentare della profondità, a causa di variazioni nell'ambiente deposizionale. L'alta pianura è prevalentemente costituita da terreni permeabili che permettono lo scambio idrico tra falde; nella media e bassa pianura l'ispessimento degli intervalli argillosi-limosi a scarsa conducibilità idraulica influenza il grado di confinamento delle falde.

Conclusioni

La disomogenea ubicazione dei dati stratigrafici di input nell'intero volume indagato ha condizionato la validità dei risultati ottenuti, per esempio le simulazioni prodotte in profondità specialmente nella porzione centro-meridionale della provincia di Cremona sono scarsamente affidabili, poiché pochissimi pozzi si approfondiscono oltre la base B. La situazione peggiore si verifica in corrispondenza del settore della provincia di Mantova, alla confluenza dell'Oglio nel Po, dove c'è una totale assenza di dati.

La struttura delle griglie A e B e la distribuzione 3D di conducibilità idraulica e di porosità efficace all'interno di esse sono state direttamente importate dalla Dott. ssa Canepa nel modello di flusso, Modflow, dopo la conversione in un formato compatibile con l'interfaccia grafica GrondWater Vistas.

Durante il progetto si sono riscontrati dei limiti dipendenti sia dalla qualità e quantità dei dati di input, sia dalle prestazioni e dalle procedure automatizzate degli strumenti informatici utilizzati; l'approccio utilizzato è in continuo sviluppo e può essere soggetto a miglioramenti e perfezionamenti, in base alle esperienze realizzate. Risulta importante, in un immediato futuro, poter validare il procedimento automatizzato di Tangram per il calcolo delle percentuali tessiturali e i parametri idraulici, attraverso il confronto con valori di conducibilità idraulica stimati in campo. Un altro utile aspetto da considerare consiste nella realizzazione di una stima più puntuale dell'errore relativo ai risultati ottenuti dal processo di interpolazione.

Su suggerimento del Prof. Mauro Marchetti, relatore esterno della tesi, il procedimento di interpolazione 3D dei dati, oltre che per la quantificazione dei classici parametri idrogeologici, è stato anche utilizzato per l'individuazione dei livelli torbosi nell'area di bacino. Dall'elaborazione 3D dei valori percentuali di torba, estratti singolarmente dalla Banca Dati, è stato possibile individuare le zone in cui si trovano tracce, più o meno significative, di questo elemento, e zone caratterizzate da una totale assenza di esso. L'ubicazione dei livelli torbosi in relazione alla posizione delle superfici basali dei Gruppi Acquiferi A e B, ha permesso di associare le tracce di torba a dei periodi temporali specifici: lo sviluppo e il perfezionamento di questo metodo possono rappresentare un ulteriore strumento a supporto della ricerca per la ricostruzione di paleosuperfici sepolte e

livelli che risultino dei marker nello studio geomorfologico e stratigrafico della pianura lombarda.

Territorio provinciale di Milano e Monza e Brianza

La ricostruzione 3D delle caratteristiche idrogeologiche del sistema acquifero a scala provinciale è servita per il calcolo della disponibilità idrica del serbatoio sotterraneo: essa costituisce sia le riserve strategiche dell'acquifero sia la parte che può risultare disponibile al prelievo.

Attraverso tecniche informatizzate che permettono l'elaborazione computerizzata di numerosi dati, è stata realizzata una quantificazione dei metri cubi di acqua immagazzinata in media in ciascun anno del periodo 1979 - 2005, all'interno del sottosuolo delle due province, in funzione dell'oscillazione della tavola d'acqua nello spazio e nel tempo e tramite una stima delle classi di porosità efficace.

La riproduzione dell'andamento storico piezometrico e delle variazioni dinamiche della falda (1979 - 2005), con particolare attenzione alle differenze di livello tra un anno e l'altro, hanno indicato un flusso prevalente da Nord verso Sud e un effetto drenante esercitato dai fiumi Ticino e Adda. E' risultato inoltre che dal 1979 al 2005 si è verificato un generale abbassamento della tavola d'acqua di circa 5-10 m con una depressione di anche 10-30 m nel settore centro-settentrionale dell'area di studio; al contrario si è registrato un recupero di livelli, fino a 5 m, nel comune di Milano per una diminuzione dei prelievi industriali, nel suo hinterland e a Sud-Ovest di esso.

In base a tale comportamento dinamico e alla ripartizione del sottosuolo in classi di porosità efficace, ricavate da interpolazione 3D di dati stratigrafici (uguale procedimento utilizzato per l'area di bacino), i calcoli hanno mostrato che la disponibilità idrica media annua, identificata dai volumi di acqua mobile, oscilla tra circa 17 miliardi m³ del 1991 e circa 18.3 miliardi m³ del 1980. Il trend dei 27 anni indagati, ricollegabile al trend socio-economico che controlla gli interventi antropici, quali prelievi sotterranei e irrigazioni, e al trend naturale delle precipitazioni, mostra i valori più bassi tra la fine degli anni '80 e la prima metà dei '90, da cui cresce in modo alterno, rimanendo comunque al di sotto dei valori massimi riscontrati nei primissimi anni '80.

Conclusioni

Il calcolo delle variazioni volumetriche di ciascun anno rispetto al 1982, il cui livello piezometrico è considerato il livello di riferimento minimo sostenibile della falda negli ultimi 30 anni (Regione Lombardia, 2006), ha permesso di effettuare valutazioni sui quantitativi di acqua che è possibile sfruttare e quelli che devono essere considerati esclusivamente una riserva strategica. Sono stati anche individuati periodi di surplus, come nel periodo 1979 -1981, e deficit idrico, come nel periodo 1987 – 1995, in cui le perdite massime pari a circa 700 milioni m³ sono state registrate nel 1991.

L'utilizzo di una differente aggregazione temporale dei dati piezometrici ha portato a risultati specifici per quel mese, facendo emergere informazioni diverse rispetto al comportamento medio annuale; si è infatti passati ad analizzare i valori medi di marzo per ciascun anno considerato. Un evidente esempio è rappresentato dal 2003, che relativamente al mese di marzo, corrisponde al secondo valore più alto dei 27 anni, contrariamente alla stima annuale; probabilmente è l'effetto degli eventi piovosi dell'autunno del 2002.

La stima in funzione delle diverse caratteristiche geomorfologiche e della differente tipologia di ricarica ha portato alla valutazione quantitativa della disponibilità idrica in 8 settori appartenenti all'area di studio: 4 a Nord del canale Villoresi, ovvero il terrazzo Ovest, il terrazzo Centro, le morene e il terrazzo Est; 4 a Sud di esso, ossia l'alta pianura, la bassa pianura idromorfa, il terrazzo fluviale del Ticino e il comune di Milano. In questi sono state individuate le zone a maggior potenziale idrico (a Nord del Villoresi si tratta del terrazzo Ovest e a Sud del canale è il terrazzo Ticino) e anche in questo caso sono state eseguite delle analisi in funzione del livello minimo sostenibile (anno 1982).

In conclusione emerge che il serbatoio idrico sotterraneo delle due province costituisce una notevole riserva idrica naturale, che, nonostante un trend leggermente decrescente non sembra a rischio: le riserve degli ultimi anni indagati, infatti, sono prossime a quelle del livello minimo sostenibile e il deficit massimo (4%) rispetto al valore medio registrato nel periodo studiato non sembra essere significativo.

La mancanza di dati relativi alla ricarica (precipitazioni efficaci, irrigazioni efficaci, perdite da canali e fognature, alimentazione da fiumi..) e alle uscite dal sistema (prelievi, fontanili, drenaggio da fiumi..) non ha permesso la realizzazione di precise e sicure valutazioni relative al bilancio idrogeologico dell'area, individuando, ad esempio, quale fattore influenzi maggiormente la disponibilità

idrica in una determinata zona geografica o in uno specifico periodo di tempo (mese, anno..). Gli unici dati reperiti relativi ai prelievi annui da pozzi non sono completi e hanno permesso solamente un grossolano confronto tra due sottoaree indagate. Manca, infatti, ancora una strutturata rete di monitoraggio relativa agli emungimenti annui da falda.

Il lavoro svolto potrebbe essere soggetto a integrazioni: sicuramente l'aggiornamento al 2010 delle stime effettuate, recuperando i dati piezometrici degli ultimi 5 anni. In secondo luogo potrebbe essere calcolata la ricarica al sistema nell'area di studio, in base alle caratteristiche geologiche del non saturo, all'uso del suolo, alle condizioni climatiche, e differenziandola in base alle caratteristiche geomorfologiche. Inoltre un approfondimento potrebbe provenire dall'applicazione di un modello di flusso nell'area indagata; in questo modo il dettaglio degli scambi idrici tra i diversi comparti e del bilancio di massa sarebbe maggiore.

Infine la sperimentazione di questo metodo può essere un utile strumento a supporto della gestione del territorio, attraverso l'individuazione di aree a maggior o minor potenzialità e quindi aree di potenziale sfruttamento o di potenziale rischio di deficit idrico, in base a cui poter indirizzare le politiche di risparmio idrico.

Dal riepilogo dei risultati ottenuti, emergono due importanti aspetti innovati, sviluppati in questo dottorato.

Il primo consiste nella ricostruzione di dettaglio dell'eterogeneità della pianura lombarda, attraverso il procedimento di codifica delle informazioni stratigrafiche, che ne consente successivamente l'elaborazione quantitativa. E' stato possibile estrarre da Tangram valori puntuali percentuali corrispondenti alla presenza relativa nel sottosuolo di materiali grossolani, medi e fini, e valori relativi a conducibilità idraulica e porosità efficace. L'interpolazione di questi dati puntuali nello spazio tridimensionale di una griglia di calcolo ha riprodotto l'eterogenea e continua variabilità spaziale delle litologie e dei parametri idraulici associati, tramite l'assegnazione di un valore diverso a ciascuna cella della griglia. In questo modo è stata simulata una struttura sotterranea che si avvicina maggiormente alla reale distribuzione dei sedimenti nel sottosuolo e che si differenzia dalla classica e schematica suddivisione in acquiferi e acquitardi, a cui solitamente viene attribuita una conducibilità idraulica media dei depositi che costituiscono quel determinato strato. Ciò risulta

Conclusioni

importante in vista dell'implementazione di modelli di flusso e trasporto: infatti si sa che il dettaglio con cui è ricostruita la struttura 3D geologica e con cui sono definiti i parametri idraulici consente una migliore simulazione delle direzioni delle linee di flusso nello spazio e dell'evolversi dei pennacchi di contaminazione.

In secondo luogo, l'innovazione deriva dall'approccio applicato: attraverso l'impiego di tecniche e procedure computerizzate, è stato possibile gestire ed elaborare, in contemporanea, un'elevata quantità di dati, con tempistiche, se pur elevate, inferiori, rispetto all'utilizzo delle tecniche classiche. Due esempi derivano dalle caratterizzazioni idrogeologiche realizzate alle due scale geografiche considerate:

- nell'area di bacino tra Ticino ed Oglio sono stati interpolati 307'783 valori percentuali relativi alle tessiture e 316'643 valori relativi a conducibilità idraulica e porosità efficace, all'interno di un sistema di circa 6900 km², modellizzato in 333 colonne x 207 righe x 54 strati, per un totale di oltre 3 milioni di celle (poco più di 520 mila celle attive), di dimensioni 500 m x 500 m x uno spessore variabile in ogni punto;
- nel territorio delle province di Milano e Monza e Brianza sono stati interpolati 149'440 valori percentuali relativi alle tessiture e 151'644 valori relativi a porosità efficace, all'interno di un sistema di circa poco più di 1950 km², modellizzato in 272 colonne x 220 righe x 205 strati, per un totale di oltre 12 milioni di celle (circa 6 milioni di celle attive), di dimensioni 250 m x 250 m x uno spessore variabile tra qualche centinaia di centimetri e 3 m.

In un procedimento di tal genere le procedure geostatistiche, in base ai dati di input, individuano in modo automatico regioni a più alta e più bassa conducibilità idraulica e identificano dove esiste eterogeneità e dove prevale l'uniformità nella distribuzione dei parametri, come un naturale risultato del processo. Si tratta di un'approssimazione della realtà geologica, invece che di una distribuzione basata su zone con valori uniformi di conducibilità idraulica (Doherty, 2003), come accade solitamente nell'approccio tradizionale. Ciò porta a presupporre che il metodo utilizzato nel presente dottorato sembri più oggettivo.

Gli strumenti informatici utilizzati sono stati fondamentali nello svolgimento dell'attività di ricerca: Sistemi Informativi Territoriali, importante supporto anche per l'organizzazione della dettagliata

raccolta di dati puntuali e spaziali, software di interpolazione geostatistica 2D (Surfer) e 3D (Gocad). Si tratta di sistemi sfruttati a livello internazionale la cui affidabilità è testimoniata da un impiego pluridecennale e dall'applicazione in numerosi casi di studio in tutto il mondo. Le informazioni bibliografiche consultate sono state fondamentali per l'inquadramento dell'area di studio, per la strutturazione e l'applicazione dei processi, e per il confronto dei risultati con la reale conformazione del territorio, al fine, anche, di valutare l'affidabilità del metodo sviluppato.

A completamento e arricchimento dell'attività svolta nei tre anni di ricerca, sono state numerose le partecipazioni a corsi nazionali e internazionali; questi hanno costituito fruttuose esperienze per l'approfondimento e per l'apprendimento di tecniche geostatistiche di analisi e di elaborazione di dati ambientali, oltre che per il miglioramento nell'utilizzo di software specifici per la ricerca sviluppata. La presenza a diversi convegni nazionali e internazionali è stato un importante momento di confronto relativamente ai parziali risultati ottenuti progressivamente nel tempo, oltre a fornire spunti di riflessione e idee da sviluppare nel progetto di ricerca. Significativa è stata la permanenza di un mese negli Stati Uniti, dove si è venuti a contatto con una realtà scientifica diversa e molto stimolante. Un'importante fonte di suggerimenti e supporto scientifico per il progetto di dottorato è pervenuta dall'esperienza presso il Geoscience Department dell'University of Wisconsin Milwaukee, grazie alla collaborazione con il Dott. Daniel Feinstein, ricercatore dell'U.S. Geological Survey e professore aggiunto al Geoscience Department. In quest'occasione l'attenta analisi dei primi risultati del modello di flusso a scala di bacino (tesi di dottorato della Dott.ssa Paola Canepa *"Il bilancio delle acque sotterranee nella pianura lombarda in relazione agli effetti del cambiamento climatico"*. Dottorato in Scienze Ambientali, XXIII ciclo) e della relativa calibrazione ha anche permesso l'individuazione delle criticità e degli errori derivanti dalla caratterizzazione 3D del sistema idrogeologico indagato. In base alle indicazioni derivate, la modellizzazione tridimensionale delle caratteristiche idrogeologiche del sistema è stata ridefinita, sia per quanto riguarda la discretizzazione della griglia, a simulazione della struttura geologica, sia per quanto riguarda la distribuzione continua delle proprietà tessiturali e dei parametri idraulici.

Bibliografia

- Alley W.A., Reilly T., Franke O. L., 1999 – *Sustainability of Ground-Water Resources*. U.S. Geological Survey Circular 1186. Denver, Colorado
- Anderson M.P., Woessner W.W. 1992 – *Applied Groundwater Modeling – Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press Inc. S. Diego (CA)
- Autorità d'Ambito Territoriale della Provincia di Varese, 2007 – *Piano d'Ambito*. Servizio Idrico Integrato. Capitolo 3
- Avanzini M., Beretta G., Francani V., Nespoli M., 1995 – *Indagine preliminare sull'uso sostenibile delle falde profonde nella provincia di Milano*. C.A.P. Milano.
- Bellini R., 2006 – *Sviluppo di metodologie e tecniche informatiche applicate allo studio e alla gestione delle risorse idriche sotterranee*. Tesi di Dottorato, XIX ciclo. Università degli studi di Milano – Bicocca
- Beretta G.P., Denti E., Francani V., Sala P. 1984 - *Lineamenti idrogeologici del settore sublacuale della provincia di Como*. Acque Sotterranee I, n.4, pp.23-62
- Beretta G.P., Cavallin A., Francani V., Mazzarella S., Pagotto A., 1985 - *Primo Bilancio idrogeologico della Pianura Milanese*. Estratto da Acque Sotterranee, a. II, n°2, 3, 4, Giugno-Settembre-Dicembre 1985
- Beretta G.P., Francani V., Fumagalli L., 1992 – *Studio idrogeologico della provincia di Cremona*. Pitagora Editrice Bologna. ISBN 88-371-0605-X
- Bonomi T., 1995 – *SIT per la valutazione del bilancio del sistema idrogeologico milanese*. Fondazione Lombardia per l'Ambiente. Minima Naturalia
- Bonomi T., 2009. *Database development and 3D modeling of textural variations in heterogeneous, unconsolidated aquifer media: application to the Milan plain*. *Computers & Geosciences*. 35, 134 – 145. DOI 10.1016/j.cageo.2007.09.006.
- Bonomi T., Canepa P., Del Rosso F.& Rossetti A. 2008 – *Relazioni temporali pluridecennali di dati pluviometrici, idrologici e piezometrici nella pianura lombarda tra Ticino e Oglio*. *Giornale di geologia applicata*. Vol. 9 (2), pp. 227-248 issn: 1826-1256. Doi: 10.474/gga.2008-02.2-12.0242.

- Bonomi T. & Cavallin A. 2007 – *La struttura idrogeologica e le variazioni piezometriche: elementi critici nella gestione delle acque sotterranee*. Giornale di Geologia Applicata 5 (2007) 125-134, doi: 10.1474/GGA.2007-05.0-09.0173.
- Bonomi T., Cavallin A., De Amicis M. 1995 - *Un database per pozzi: TANGRAM*. Quaderni Geologia Applicata, suppl., 31/95, 3.461-3.465.
- Bonomi T., Fumagalli L., Canepa P., Del Rosso F., 2010. *Parametrizzazione 3D e modelli idrogeologici del sottosuolo della pianura lombarda, con particolare riferimento alla provincia di Milano*. Estratto da UNA NUOVA GEOLOGIA PER LA LOMBARDIA Convegno in onore di Maria Bianca Cita. Milano 6-7 novembre 2008. Istituto Lombardo – Accademia di Scienze e Lettere.
- Bonomi T., Fumagalli L., Dotti N., con la collaborazione di De Luca N. e Palazzo B., 2006 – *Fenomeno di inquinamento da solventi: elaborazioni idrogeologiche e idrochimiche e modellizzazione idrogeologica tridimensionale del flusso e del trasporto*. Università Milano – Bicocca, Disat – Arpa, Dip. provinciale di Milano.
- Carrettini C., 2009 – *L'acquedotto di Milano*. Convegno "Acqua Ambiente e Biodiversità". Università degli Studi di Milano – Bicocca, Dipartimento di Biotecnologie e Bioscienze, 27 marzo 2009
- Cavallin A., Francani V., Mazzarella S., 1983 - *Studio idrogeologico della pianura compresa fra Adda e Ticino*. CAP Milano. Estratto dalla rivista Costruzioni. Casa editrice La Fiaccola, Milano.
- Cheng A., 2002 – *Gocad - Basics In Geostatistics And Reservoir-Property Modeling. An Introductory Course to Reservoir Characterization in Gocad*. T-Surfer Corporation
- Ciotoli G., 2007 – *Dispense del Corso di Perfezionamento in Statistica Avanzata per Scienze Geologiche, Naturali, biologiche ed Ambientali*. 21-23 maggio 2007. Scuola Internazionale di Statistica Applicata alle Scienze Naturali ed Ambientali, Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo".
- Civita M., 2005 - *Idrogeologia applicata e ambientale*. Editore CEA, 736 pp.
- Consorzio per l'Acqua Potabile ai comuni della provincia di Milano, CAP 1973 - *Depauperamento delle risorse idriche sotterranee nel comprensorio della Brianza a nord del Canale Villoresi . Soluzioni a breve, medio e lungo termine*.

-
- Cremaschi M., 1987 – *Paleosols and Vetosols in the Central Po Plain (Northern Italy). A study in Quaternary Geology and Soil development*. Unicopli, Milano, pp. 316
 - Denti E., Francani V., Fumagalli L., Pezzera G., Sala P. 1988 - *Studio idrogeologico del foglio Vimercate I.G.M. 1:50.000*. In Studi Idrogeologici sulla Pianura Padana n.4, Politecnico di Milano, 1988, Litotipografie Grafiche Somalia, Cormano: 1.1-1.39
 - Deutsch Clayton V., 2002 – *Geostatistical reservoir modelling. Applied Geostatistics series*. Oxford University Press, New York, 376 pp. ISBN 0-19-513806-6
 - Doherty J., 2003 – *Ground Water Model Calibration Using Pilot Points and Regularization*. GROUND WATER Vol. 41, No. 2, 170-177
 - Earth Decision 2.1, 2004 – *User's Guide*
 - Eaton T.T., 2006. *On the importance of geological heterogeneity for flow simulation*. Sedimentary Geology 184, 187-201
 - Edington D. & Poeter E., 2006. *Stratigraphic control of flow and transport characteristics*. GROUND WATER Vol. 44, No. 6: 826-831
 - Feinstein D.T., 2010 – *Problemi di flusso*. Dispense del modulo 1 del corso di specializzazione Modellistica di Flusso e di Trasporto negli acquiferi. Università degli Studi di Milano – Bicocca, 5 - 8 Ottobre 2010
 - Feinstein D. T., 2010 – *Tecniche avanzate di flusso e trasporto*. Dispense del modulo 2 del corso di specializzazione Modellistica di Flusso e di Trasporto negli acquiferi. Università degli Studi di Milano – Bicocca, 12-14 Ottobre 2010
 - Feinstein D.T., Hunt R.J., Reeves H.W., 2010 – *Regional Groundwater-Flow Model of the Lake Michigan Basin in Support of the Great Lakes Basin Water Availability and Use Studies*. Scientific Investigation Report 2010-5109. U.S. Geological Survey
 - Fleckenstein J.H., Niswonger R.G., Fogg G.E., 2006. *River-aquifer interactions, geologic heterogeneity and low-flow management*. Ground Water Vol. 44, no. 6, 837-852
 - Fogg G.E. & Fleckenstein J.H., 2008. *Efficient upscaling of hydraulic conductivity in heterogeneous alluvial aquifers*. Hydrogeology Journal 16: 1239-1250
 - Fogg G.E., Noyes C.D., Carle S.F., 1998. *Geologically based model of heterogeneous hydraulic conductivity in an alluvial setting*. Hydrogeology Journal (1998) 6: 131-143

Bibliografia

- Francani V., Beretta G.P., Bareggi A., Nobile A., Cremonini Bianchi M., Cattaneo F., *Movimentazione*, 1994 – *Aspetti Idrogeologici del problema della presenza di Azoto ammoniacale nelle acque sotterranee della provincia di Cremona*. Pitagora Editrice Bologna ISBN 88-371-0731-5
- Fontana A., Mozzi P., Bondesan A., 2010 – *Late pleistocene evolution of the Venetian-Friulian Plain*. Rend. Fis. Acc. Lincei DOI 10.1007/s 12210-010-0093-1
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979 - *Groundwater*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632, 604 pp.
- Gandolfi C., Ponzini G., Giudici M., 2007 – *Realizzazione di un modello preliminare del flusso idrico nel sistema acquifero della provincia di Cremona*. Relazione Finale – Università degli studi di Milano - Istituto di Idraulica Agraria. Dipartimento di Scienze della Terra “A. Desio”, Provincia di Cremona Settore Ambiente.
- Golden Software, Inc., 2002 – *User’s Guide Surfer 8*
- Gomez-Hernandez J.J., 2006 – *Complexity*. GROUND WATER Vol. 44, No.6: 782-785
- Hill M. C., 2006 – *The Practical Use of Simplicity in Developing Ground Water Models*. GROUND WATER Vol. 44, No.6: 775 – 781
- Hunt R.J., Doherty J., Tonkin M.J., 2007 – *Are Models Too Simple? Arguments for Increased Parameterization*. GROUND WATER Vol. 45, No.3: 254-262
- Marchetti Mauro, 1990 – *Cambiamenti idrologici nella Pianura Padana centrale a Nord del fiume Po: i casi di “Underfit streams” dei fiumi Mincio, Oglio e Adda*. Geogr. Fis. Dinam. Quat. 13 (1990), 53-62.
- Marchetti Mauro, 1992 – *Geomorfologia ed evoluzione recente della Pianura Padana centrale a Nord del fiume Po*. Tesi di dottorato, IV ciclo, Dip. Di Scienze della Terra, Milano, 164 pp.
- Marchetti Mauro, 1996 – *Variazioni idrodinamiche dei corsi d’acqua della Pianura Padana centrale connesse con la de glaciazione*. Il Quaternario. Italian Journal of Quaternary Sciences. 9(2), 1996, 465-472
- Marchetti Mauro, 2000 – *Geomorfologia fluviale*. Pitagora Editrice Bologna. ISBN 88-371-1199-1
- McArthur J.M., Ravenscroft P., Safiulla S., Thirlwall M.F., 2001 – *Arsenic in groundwater: Testing pollution mechanisms for sedimentary aquifers in Bangladesh*. WATER RESOURCES RESERCH, Vol. 37, No.1, 109 -117

- Miola A., Bondesan A., Corain L., Favaretto S., Mozzi P., Piovan S., Sostizzo I., 2006 – *Wetlands in the Venetian Po Plain (northeastern Italy) during the Last Glacial Maximum: Interplay between vegetation, hydrology and sedimentary environment*. Review of Paleobotany and Palynology 141 (2006) 53-81.
- Newell C.J., Hopkins L.P., Bedient P.B., 1991 – *A Hydrogeologic Database for Ground-Water Modeling*. Ground Water Vol. 28, No.5: 703-714
- Paradigm., 2008 - Gocad Suite 2.5. *User's Guide Part IX Reservoir Modeling*. Paradigm Geophysical Corp
- Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Direttiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 ottobre 2000 che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque*, Gazzetta Ufficiale della Comunità Europea, 22.12.2000, 65 pp
- Provincia di Milano, Assessorato all'Ambiente e Politecnico di Milano D.S.T.M., 1995. *Le risorse idriche sotterranee nella Provincia di Milano. Volume I: Lineamenti idrogeologici*.
- Provincia di Milano - Direzione Centrale Ambiente Sistema Informativo Falda & Politecnico di Milano D.I.I.A.R. Sezione Ambientale Geologia Applicata, 2000 – *Le risorse idriche sotterranee nella Provincia di Milano. Vol. 2 – Stato qualitativo delle acque anni 1990 – 1996 – 1997*.
- Provincia di Pavia, Divisione Ambiente Settore Risorse Naturali, 2006 – *Lo stato dell'acque in provincia di Pavia*. Capitolo 5.
- Rapporto finale del progetto RICLIC WARM 2009 - Responsabile Prof. Cavallin. Unità WP3 Acque sotterranee, Bonomi T., Fumagalli L., Canepa P., Del Rosso F..60 pp.
- Rapporto tecnico, 2009 – *Assetto idrogeologico del territorio di BrianzaAcque*. Responsabili scientifici Bonomi T. & Fumagalli L. Collaboratori Del Rosso F. & Canepa P. 91 pp.
- Regione Lombardia – Risorse idriche e Servizi di Pubblica Utilità, 2001 – *Acque Sotterranee in Lombardia. Gestione sostenibile di una risorsa strategica*.144 pp
- Regione Lombardia. Legge regionale n. 26 *Disciplina dei servizi locali di interesse economico generale. Norme in materia di gestione dei rifiuti, di energia, di utilizzo del sottosuolo e di risorse idriche*, 13 dicembre 2003.
- Regione Lombardia, Direzione Generale Reti e Servizi di Pubblica Utilità, 2006 – *Programma di tutela e uso delle acque. Relazione generale*. Capitolo 2. 102 pp.

- Regione Lombardia, Direzione Generale Reti e Servizi di Pubblica Utilità, 2006 – *Programma di tutela e uso delle acque. Allegato 3 alla Relazione Generale, Classificazione dello stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei di pianura*. 334 pp.
- Regione Lombardia, Direzione Generale Reti e Servizi di Pubblica Utilità, 2006 – *Programma di tutela e uso delle acque. Allegato 5 alla Relazione Generale, Gli Usi attuali della risorsa idrica*. 50 pp.
- Regione Lombardia, Direzione Generale Reti e Servizi di Pubblica Utilità, 2006 – *Programma di tutela e uso delle acque. Rapporto Ambientale (VAS)*. 250 pp.
- Regione Lombardia, ENI Divisione Agip, a cura di Carcano C. e Piccin A., 2002 - *Geologia degli acquiferi padani della Regione Lombardia*. Relazione Tecnica.
- Reilly T.E. & Harbaugh A.W., 2004 – *Guidelines for Evaluating Ground-Water Flow Models*. Scientific Investigation Report 2004-5038. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey
- Repubblica Italiana 2006 – *Decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152*. Norme in materia ambientale.
- Scheibe T. & Yabusaki S., 1998. *Scaling of flow and transport behaviour in heterogeneous groundwater systems*. Advances in Water Resources, Vol. 22, No. 3, 223-238
- *Substantive Issues Arising in the Implementation of the International Covenant on Economic, Social and Cultural, The right to water* (arts. 11 and 12 of the International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights), CESCR, 29th Session, Geneva, 11-29 Novembre 2002, Agenda Item 3.
- WHO, The Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000, Geneva, 2000, p.1.
- www.atlanteambientale.it
- www.gocad.org
- www.pdgm.org
- www.tangram.samit.unimib.it
- www.worldwatercouncil.org
- Zavatti A., Attramini D., Bonazzi A., Boraldi V., Malagò R., Martinelli G., Naldi S., Patrizi G., Pezzera G., Vandini W., Venturini L., Zuppi G.M., 1995 – *La presenza di Arsenico nelle acque sotterranee della Pianura Padana: evidenze ambientali e ipotesi geochimiche*. Atti del 2° Convegno Nazionale sulla protezione e gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie,

Tecnologie e Obiettivi. Nonantola (Modena), 17-18-19 Maggio
1995. Quaderni di Geologia Applicata, Pitagora Editrice Bologna

Ringraziamenti

Un sentito ringraziamento:

alla Prof.ssa Tullia Bonomi, per avermi offerto l'opportunità di svolgere questo dottorato, per aver messo a mia disposizione la sua competenza scientifica e professionale, per la disponibilità e per l'interesse dimostrati nei miei confronti, per le conoscenze e per gli insegnamenti a me trasmessi;

alla Dott.ssa Letizia Fumagalli per la disponibilità mostrata nei miei confronti e per l'interesse dimostrato verso il progetto svolto, per le conoscenze e l'esperienza messe a disposizione e per la paziente e puntuale cura con cui ha corretto i miei lavori;

al Prof. Angelo Cavallin, per il continuo interesse mostrato nei confronti del lavoro svolto, per i consigli fornitimi in base alla sua esperienza e per le opportunità offertemi durante questi anni di ricerca;

al Prof. Mauro Marchetti, per la disponibilità offertami come relatore esterno della tesi, per l'attenzione e l'impegno dimostrati nella revisione delle relazioni annuali, per il prezioso supporto professionale e per gli interessanti consigli scientifici fornitimi durante questi tre anni di dottorato;

al Dott. Daniel Feinstein, fonte inesauribile di conoscenza e suggerimenti, per il suo continuo supporto scientifico e costante disponibilità, persino da oltreoceano;

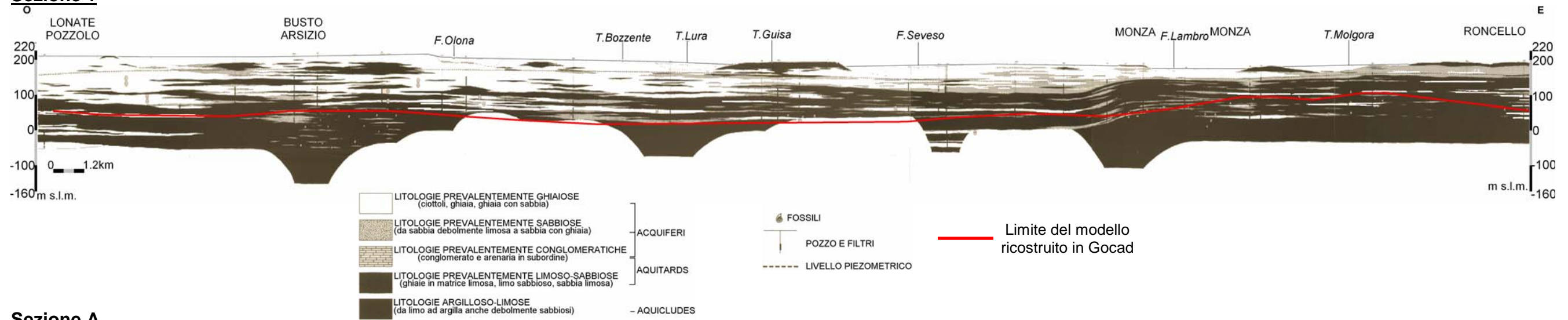
al Dott. Alessandro Fontana, per la disponibilità dimostrata e per avermi mandato degli interessanti articoli ad arricchimento del progetto;

a Paola, insostituibile collega, con cui ho condiviso gioie e dolori del dottorato, un'ottima compagna di lavoro e soprattutto una cara amica;

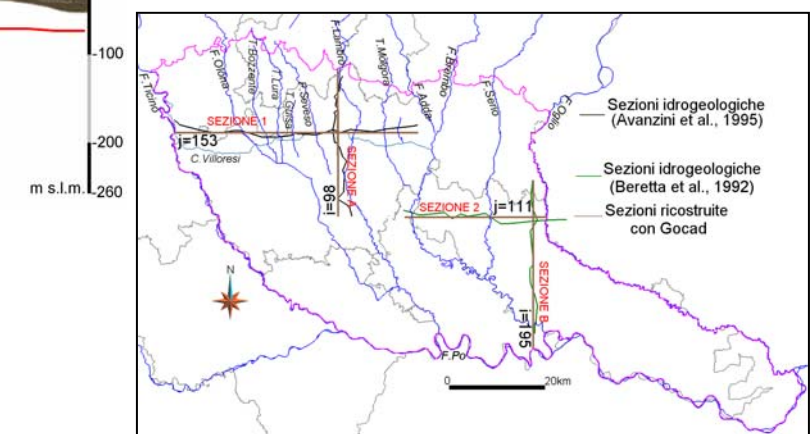
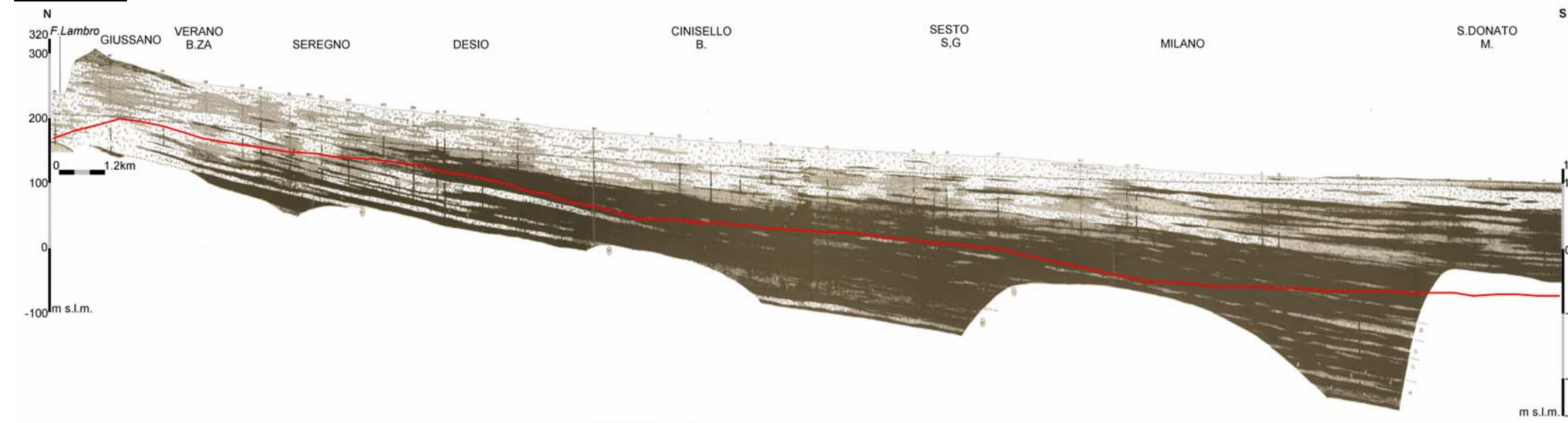
ai miei genitori e a mia sorella, le insostituibili e indispensabili costanti della mia vita, presenti in ogni momento.

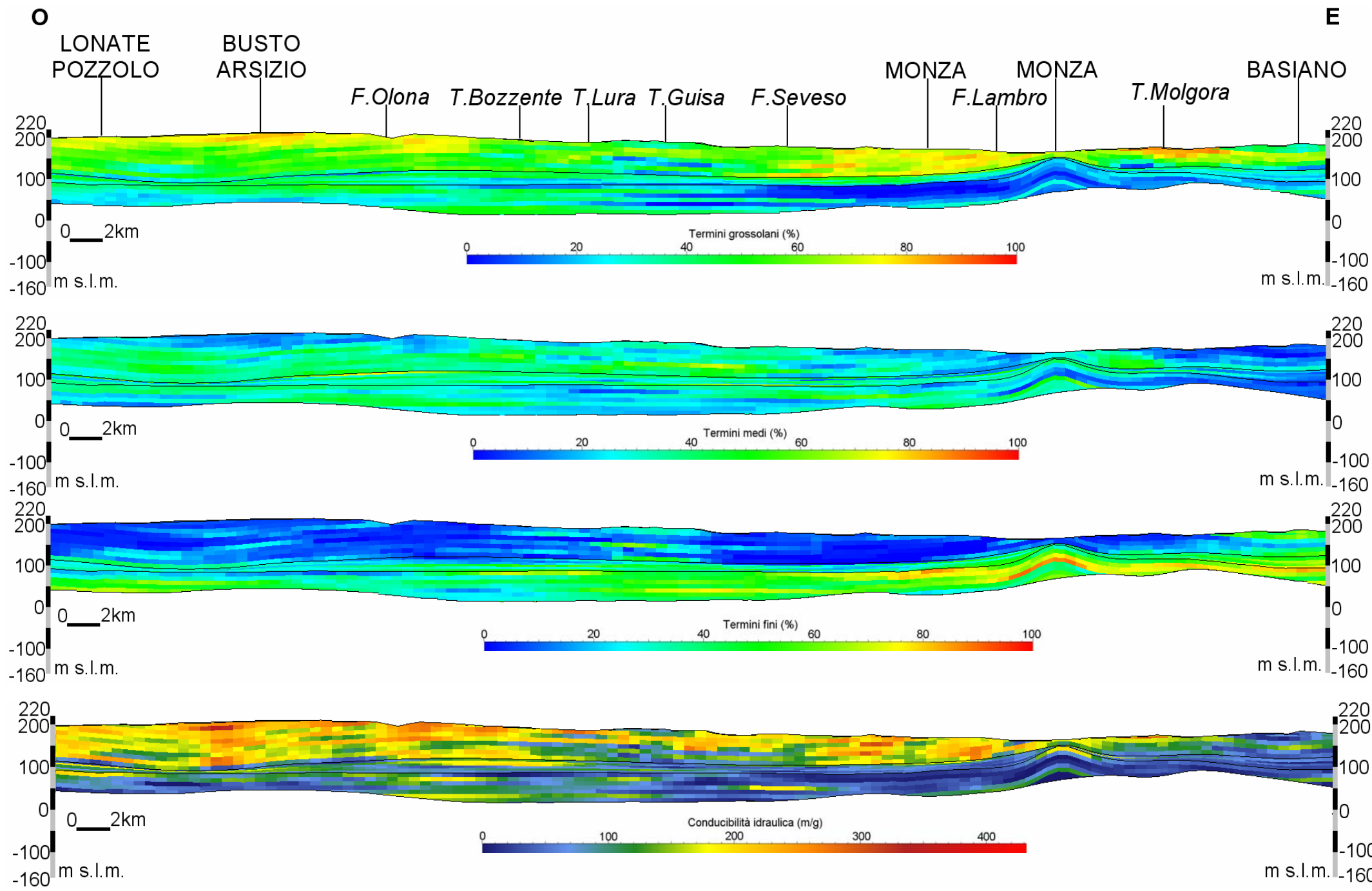
Allegato 1
Sezioni idrogeologiche
(Avanzini et al., 1995)

Sezione 1



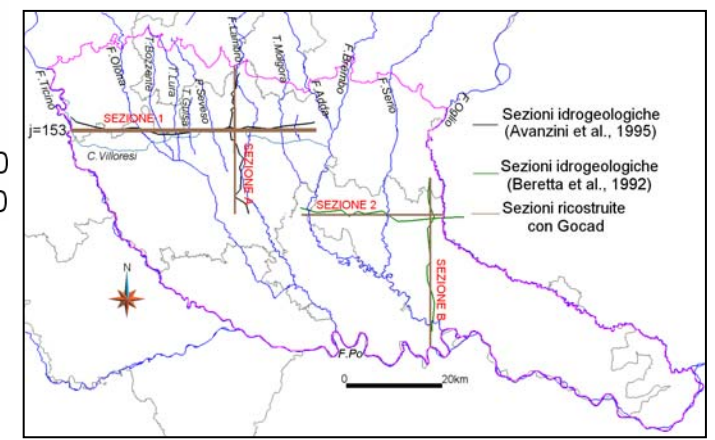
Sezione A

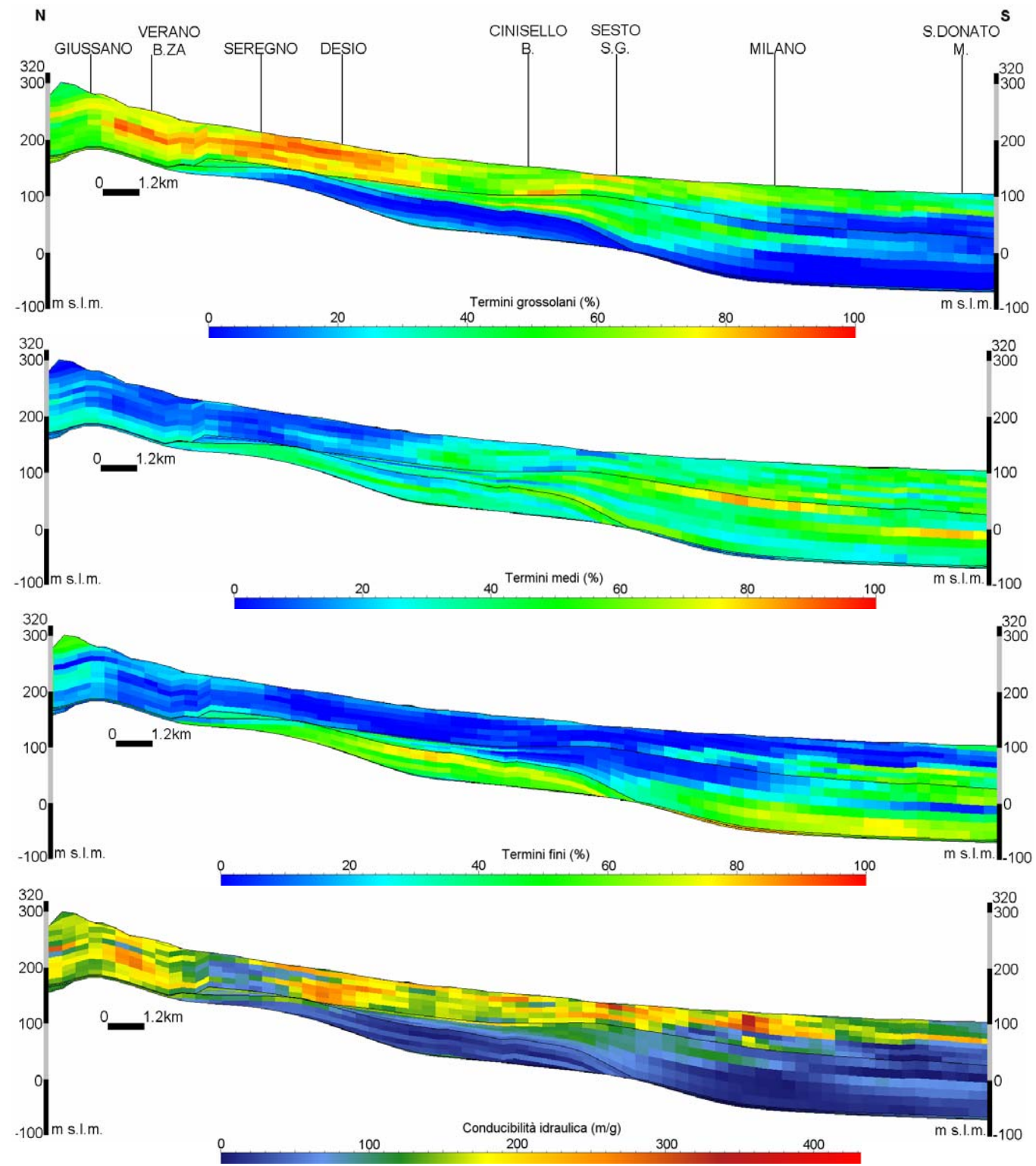




Allegato 2
Sezione j=153 – Tessiture e
conducibilità idraulica

- Dall'alto verso il basso vengono visualizzati i profili di:
- superficie topografica;
 - base A;
 - base B;
 - base del modello.



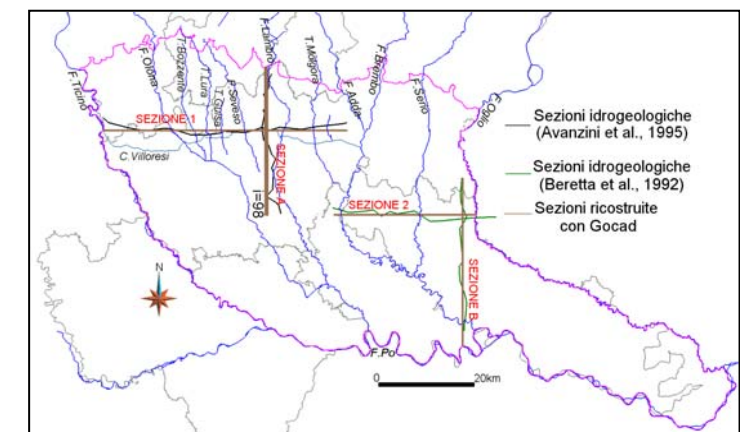


Allegato 3

Sezione i=98 – Tessiture e conducibilità idraulica

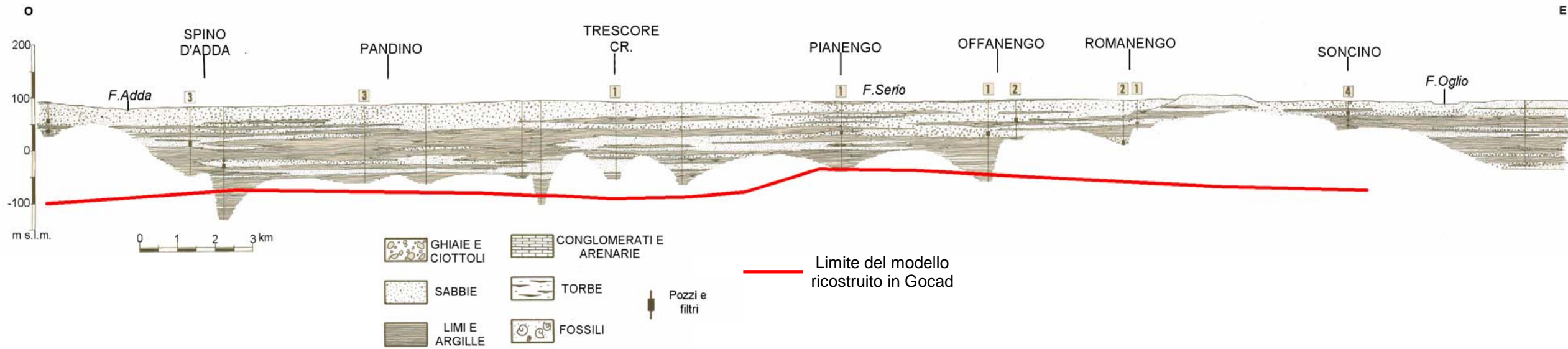
Dall'alto verso il basso vengono visualizzati i profili di:

- superficie topografica;
- base A;
- base B;
- base del modello.

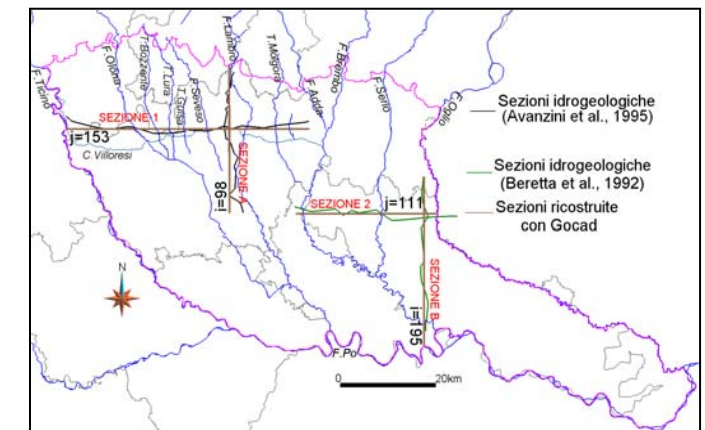
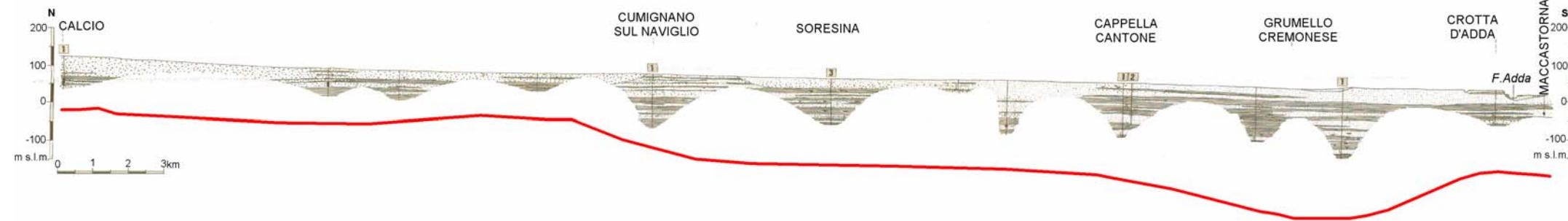


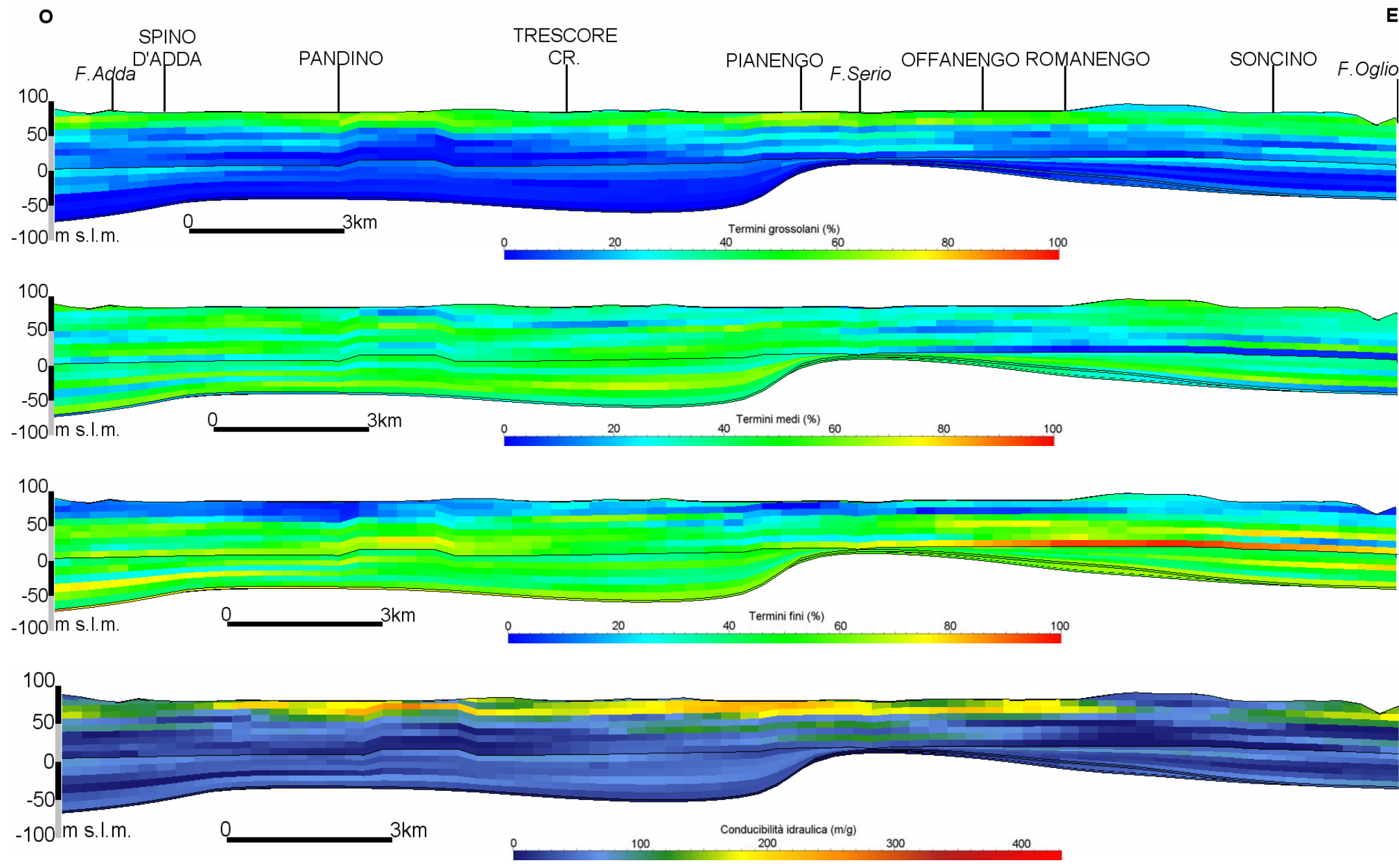
Allegato 4
Sezioni idrogeologiche
(Beretta et al., 1992)

Sezione 2



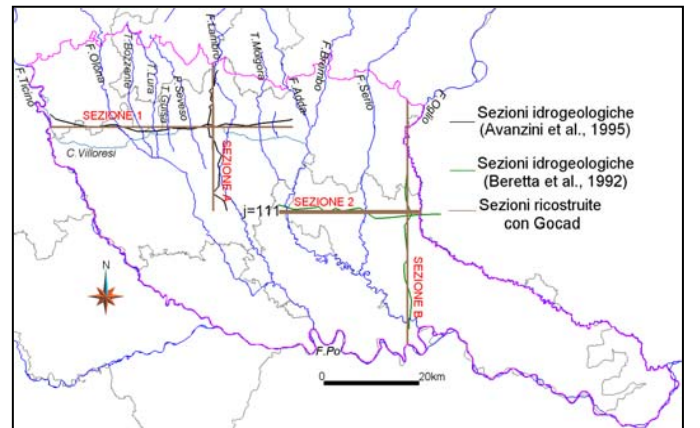
Sezione B

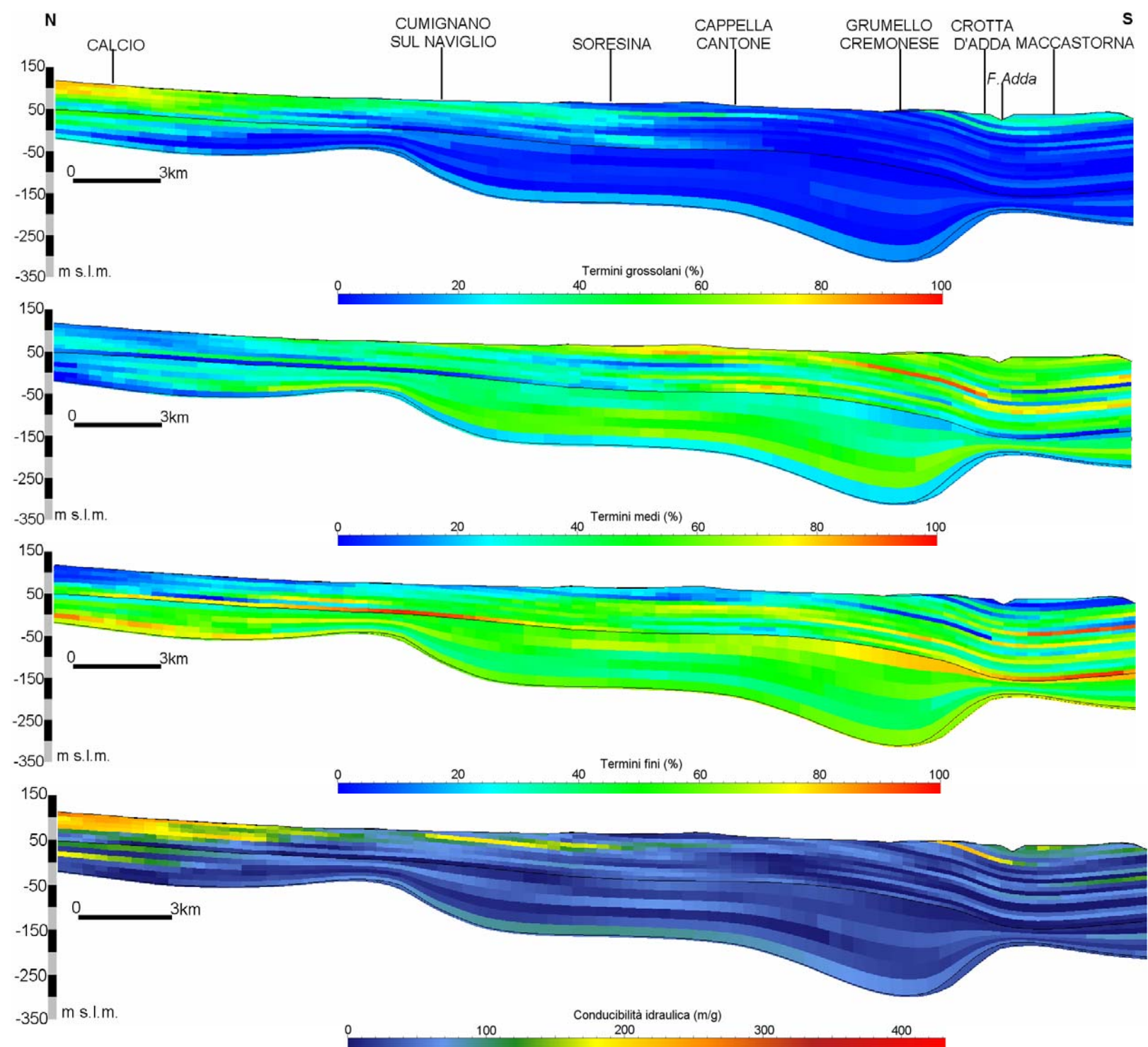




Allegato 5
Sezione j=111 - Tessiture e
conducibilità idraulica

- Dall'alto verso il basso vengono visualizzati i profili di:
- superficie topografica;
 - base A;
 - base B;
 - base del modello.





Allegato 6 Sezione i=195 - Tessiture e conducibilità idraulica

Dall'alto verso il basso
vengono visualizzati i profili
di:

- superficie topografica;
- base A;
- base B;
- base del modello.

