

# Valutazione della ricarica del sistema acquifero della bassa pianura friulana

Grazia Martelli, Cristina Granati

Dipartimento di Georisorse e Territorio, Università di Udine, Via Cottonificio, 114, 33100 Udine  
grazia.martelli@uniud.it, cristina.granati@uniud.it

## *Recharge evaluation of the Friuli plain aquifer system*

**ABSTRACT:** In the Friuli Plain (NE Italy), two distinct aquifer systems (unconfined in the northern area, multilayered in the southern sector) are mutually connected. The aim of the present work is to evaluate both the yearly average groundwater recharge and the sustainability of the intensive groundwater extraction drawn from the Low Plain's aquifer system. In this area, the geometrical characterization of each aquifer layer, outlined by means of lithostratigraphic correlations, has allowed to organize a quantitative monitoring network addressed to hydraulic head measurements. A geostatistical approach has been applied to the analysis of the piezometric levels in both aquifer systems, and of the precipitation and the temperature data collected for the whole Plain area. Computing the groundwater flow from the High Plain to the Low Plain's aquifer system, the active recharge of the latter has been compared with the estimated annual groundwater extraction drawn from the Low Plain's aquifer system.

*Key terms:* Friuli Plain, low plain aquifer recharge, kriging

*Termini chiave:* Pianura friulana, ricarica attiva, kriging

## **Riassunto**

L'area oggetto di studio è una porzione della pianura friulana posta in sinistra Tagliamento e si estende su di una superficie di circa 1800 Km<sup>2</sup>. Il territorio considerato ricade all'interno di un sistema regionale caratterizzato da due strutture idrogeologiche collegate idraulicamente senza soluzione di continuità: l'alta pianura, sede di un acquifero indifferenziato di tipo freatico passa gradualmente in direzione meridiana all'acquifero multifalda della bassa pianura nel quale la circolazione idrica avviene per falde sovrapposte.

Il sistema multifalda riceve pertanto le acque dal sistema freatico a meno delle portate sfiorate dalla fascia delle risorgive, elemento di confine tra i due domini che si sviluppa con continuità ad andamento Est-Ovest lungo tutta la pianura friulana. Le portate in entrata si distribuiscono in almeno sette degli otto livelli confinati riconosciuti nel sottosuolo della bassa pianura che si sviluppano in profondità per uno spessore complessivo non inferiore ai 300 m.

Questi livelli acquiferi sono intensamente sfruttati per uso agricolo e, soprattutto nella bassa pianura, per uso civile ed ittigenico. Tale sfruttamento ha provocato negli ultimi 40 anni un lento ma costante abbassamento dei livelli freaticometrici nell'alta pianura con velocità media calcolata di 10 cm/anno e, contestualmente, una perdita di pressione delle falde confinate più superficiali che fanno parte del sistema acquifero della bassa pianura.

Lo scopo del presente lavoro è stato quello di calcolare

l'entità della ricarica media annua che compete al sistema acquifero della bassa pianura e valutare la sostenibilità dei consistenti prelievi che in esso vengono effettuati.

La ricostruzione geometrica degli orizzonti acquiferi presenti nel sottosuolo della bassa pianura, condotta attraverso l'elaborazione delle stratigrafie di oltre 300 pozzi idrici, ha consentito di organizzare una rete di monitoraggio quantitativo che ha interessato tutti i livelli acquiferi riconosciuti e di ricostruirne i campi di moto.

Per quanto riguarda le caratteristiche della falda freatica dell'alta pianura sono stati elaborati i dati provenienti da una rete regionale di rilevamento dei livelli piezometrici e da alcuni pozzi di competenza dell'ex Servizio Idrografico.

L'analisi dei dati è stata condotta in entrambi i casi con l'ausilio di metodi geostatistici.

La raccolta di dati termo-pluviometrici, relativamente all'alta pianura, ha consentito di acquisire delle informazioni sull'andamento delle precipitazioni e dell'evapotraspirazione reale e quindi avere una stima della precipitazione efficace.

La valutazione della ricarica al sistema acquifero della bassa pianura è stata condotta in modo indiretto, calcolando la portata che attraversa la superficie di separazione tra le due strutture idrogeologiche. Tale valore è stato confrontato con il volume di prelievo stimato.

## **Caratteri idrogeologici dell'area di studio**

L'area oggetto del presente studio è una porzione della pianura friulana (Fig. 1) che si estende per circa 1.800 km<sup>2</sup>

tra il Fiume Tagliamento ad Ovest e le propaggini del Carso goriziano, i rilievi collinari del Collio e delle Prealpi centro-orientali ad Est, mentre l'anfiteatro morenico del Tagliamento ed il Mare Adriatico ne costituiscono i naturali limiti rispettivamente settentrionale e meridionale.

I processi deposizionali che si sono verificati nel Pleistocene superiore hanno portato ad una suddivisione del territorio in due domini idrogeologici (Comel, 1955, 1958; Dal Prà & Antonelli, 1978; Vecchia et al., 1968). A Nord della fascia delle risorgive si sviluppa l'alta pianura, caratterizzata da depositi detritici grossolani prevalentemente ghiaiosi, irregolarmente cementati in orizzonti di conglomerato ed intercalati a livelli di sabbia e

raramente di argilla; tali depositi hanno origine alluvionale e fluvio-glaciale, essendo il risultato della rapida progredazione di un sistema di conoidi alluvionali formatosi per effetto dell'ultimo massimo glaciale wurmiano (Dal Prà & Antonelli, 1978; Mosetti & Feruglio, 1964a, 1964b; Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, 1971; Stefanini, 1972, 1978; Stefanini & Cucchi, 1977b; Vecchia et al., 1968; Bondesan & Fontana, 1999; Boschian, 1993); la potenza del materasso alluvionale aumenta progressivamente da Nord Est (circa 50 m ai piedi dei rilievi collinari) verso Sud Ovest, ove si superano i 450 m di spessore.

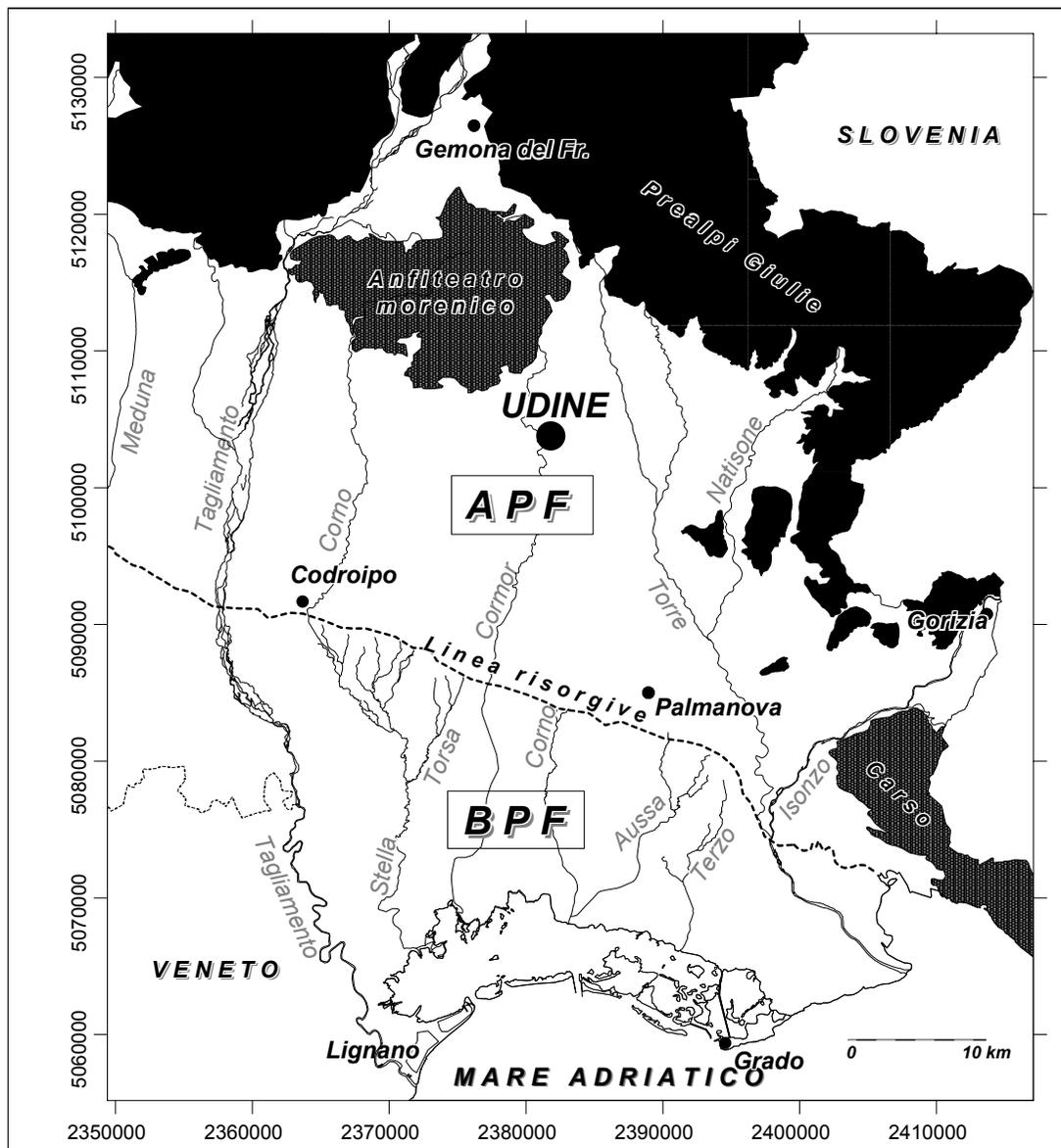


Fig. 1 – La pianura alluvionale friulana compresa tra i fiumi Tagliamento ed Isonzo (APF = Alta Pianura Friulana; BPF = Bassa Pianura Friulana).

The Friuli alluvial plain between the Tagliamento River to the W and the Isonzo River to the E (APF = High Friuli Plain; BPF = Low Friuli Plain).

A Sud della fascia delle risorgive si estende la bassa pianura, caratterizzata da potenti depositi pelitici intercalati in modo complesso ed irregolare ad orizzonti ghiaioso-sabbiosi che si trovano a profondità sempre maggiore man mano che ci si sposta verso meridione; sono inoltre presenti estesi orizzonti torbosi. I depositi della bassa pianura sono in parte di origine fluvio-glaciale ed in parte di origine marina, lagunare e palustre (Doro & D'Ambrosi, 1954; Martinis, 1957; Mosetti & Mosetti, 1985; Osservatorio Geofisico Sperimentale di Trieste, 1988a, 1988b, 1988c; Stefanini & Cucchi, 1976, 1977a) e la loro genesi è legata alle variazioni eustatiche connesse al glacialismo wurmiano.

Nell'alta pianura, l'elevata permeabilità del materasso alluvionale incide notevolmente sui deflussi della rete idrografica superficiale, determinando intensi fenomeni di infiltrazione e di circolazione subalvea.

La transizione dall'alta alla bassa pianura è evidenziata in superficie dagli affioramenti di risorgiva (Feruglio, 1925), che si dispongono all'interno di una fascia territoriale, larga alcuni chilometri, che si sviluppa, nel settore studiato, per circa 40 km in direzione Est Ovest a quote comprese tra 30 e 40 m s.l.m.. Dall'allineamento di tali sorgenti traggono origine i fiumi di risorgiva, che, insieme alle canalizzazioni artificiali, costituiscono il reticolo idrografico della bassa pianura, impostato su un substrato essenzialmente impermeabile; anche le portate dei fiumi alpini (Tagliamento e Isonzo) aumentano in corrispondenza della linea delle risorgive.

Tale situazione determina il passaggio da un potente e continuo sistema acquifero indifferenziato di tipo freatico a monte, ad un complesso sistema acquifero multifalda a valle, in stretta connessione reciproca (Granati et al., 2001; Martelli & Roda, 1998; Martelli et al., 2003; Stefanini & Cucchi, 1977a). Analoghe configurazioni sono riconosciute nell'ambito dell'intera Pianura Padana (Regione Emilia-Romagna, ENI-AGIP, 1998; Regione Lombardia e ENI-AGIP, 2002).

L'alimentazione all'acquifero freatico dell'alta pianura è garantita dalle precipitazioni efficaci e dalle perdite per dispersione laterale e in subalveo dei corsi d'acqua che la attraversano (Mosetti, 1983; Stefanini, 1978). L'acquifero freatico alimenta a sua volta l'acquifero multifalda della bassa pianura che per la sua struttura si presenta privo di vie di ricarica verticali (Mosetti, 1983; Vecchia et al., 1968).

### Le sezioni litostratigrafiche

La geometria del sistema acquifero della bassa pianura (Stefanini & Cucchi, 1977a, 1977b) è stata ricostruita con buon dettaglio (Martelli et al., 2004) attraverso i dati litostratigrafici provenienti da 339 pozzi idrici. L'utilizzo di tali dati, derivanti da fonti diverse di acquisizione, ha implicato delle operazioni preliminari di omogeneizzazione e di riclassificazione dei materiali riconosciuti dai perforatori, sulla base di opportuni criteri idrogeologici: la suddivisione in 4 classi (ghiaia e conglomerato, sabbia,

argilla, torba) è stata effettuata, in mancanza di significativi dati sperimentali, con riferimento ai valori di permeabilità media che contraddistinguono le litologie considerate (Freeze & Cherry, 1979).

Partendo dagli orizzonti produttivi segnalati dai perforatori nei pozzi utilizzati per l'esecuzione delle sezioni litostratigrafiche ed estendendo le correlazioni tra i singoli livelli acquiferi agli orizzonti litologicamente simili rinvenibili alla stessa profondità media, è stato possibile riconoscere nel sottosuolo della bassa pianura tre sistemi acquiferi (Martelli et al., 2004):

- un sistema "confinato" multifalda, costituito da 8 falde artesiane sovrapposte e variamente ramificate (identificate con una lettera da A ad H nel senso della profondità crescente), che si sviluppa tra -19 m s.l.m. e oltre -500 m s.l.m.;
- un sistema "di transizione", a ridosso delle risorgive, particolarmente sviluppato nel settore nord-occidentale, caratterizzato dalla presenza dei primi 2 livelli idrici confinati ( $S_1$ ,  $S_2$ ) ubicati a quote comprese tra +27.2 e -12.2 m s.l.m.;
- un sistema "freatico" che si sviluppa in modo abbastanza continuo nella parte settentrionale dell'area lungo una fascia ad andamento sub-parallelo alla zona delle risorgive a quote comprese tra +44 m s.l.m. e -18 m s.l.m.; procedendo verso meridione la falda freatica tende a scomparire e dove è presente ha degli spessori estremamente ridotti, dell'ordine del metro.

Le caratteristiche geometriche (spessore in m e profondità media in m s.l.m.) del sistema confinato è sintetizzate in Tab. 1. Ciascuna falda risulta identificata con una lettera, mentre i relativi sottolivelli sono contraddistinti mediante un termine numerico. Per la *Falda H*, i dati relativi alla profondità del letto coincidono con la profondità di fondo foro, per cui gli spessori calcolati debbono ritenersi approssimati per difetto.

Sulla base dei dati litostratigrafici disponibili, sono state tracciate alcune sezioni orientate in senso parallelo e trasversale alle principali direzioni di deflusso delle acque superficiali e sotterranee. Vengono di seguito proposte due delle sezioni più rappresentative, nella resa grafica delle quali la scala verticale è amplificata rispetto alla scala orizzontale di un fattore  $Z_{magn}$  riportato in calce alla relativa figura.

Entrambe le sezioni sono state costruite lungo le spezzate di collegamento tra i pozzi; per rendere evidente l'andamento delle spezzate è stato necessario disegnare le sezioni con uno spessore costante uguale alla lunghezza del pozzo più profondo. In questo modo, nel disegno, al di sotto dei pozzi più superficiali compare un'area bianca nella quale non è indicata la litologia.

In particolare, la *Sezione 1* (Fig. 2) che si sviluppa per circa 18 km nella parte orientale della bassa pianura, mostra in corrispondenza della zona delle risorgive, il passaggio in superficie tra l'orizzonte compatto di ghiaie dell'alta pianura ed un primo orizzonte di argilla che si sviluppa poi

con continuità per tutta la lunghezza della sezione; procedendo in senso meridiano, i livelli di argilla diventano sempre più frequenti e potenti, mentre contemporaneamente diminuisce lo spessore ed aumenta la profondità delle ghiaie. La fascia delle risorgive si colloca in corrispondenza di una significativa riduzione di granulometria dei materiali alluvionali, che si traduce in una diminuzione di permeabilità che determina l'affioramento parziale delle acque freatiche dell'alta pianura.

Nella *Sezione 4* (Fig. 3), ubicata nella parte più occidentale dell'area di studio e lunga circa 14 km, si osserva che l'orizzonte di ghiaia è continuo nei livelli più alti, mentre risulta intercalato in profondità da livelli argillosi che diventano sempre più frequenti procedendo

verso Sud Est.

### Raccolta dei dati piezometrici

La disponibilità di informazioni relative al livello freaticometrico dell'alta pianura è garantita dalla presenza sul territorio di oltre 200 stazioni di misura facenti parte di:

- rete di rilevamento piezometrico regionale della Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Servizio dell'Idraulica: sono stati raccolti i dati del livello di falda relativi al periodo 1967-1999 (dati pubblicati negli *Annali freaticometrici regionali*), integrati con misure effettuate negli anni 2000-2004 (dati inediti forniti dall'Unità Operativa Idrografica di Udine);

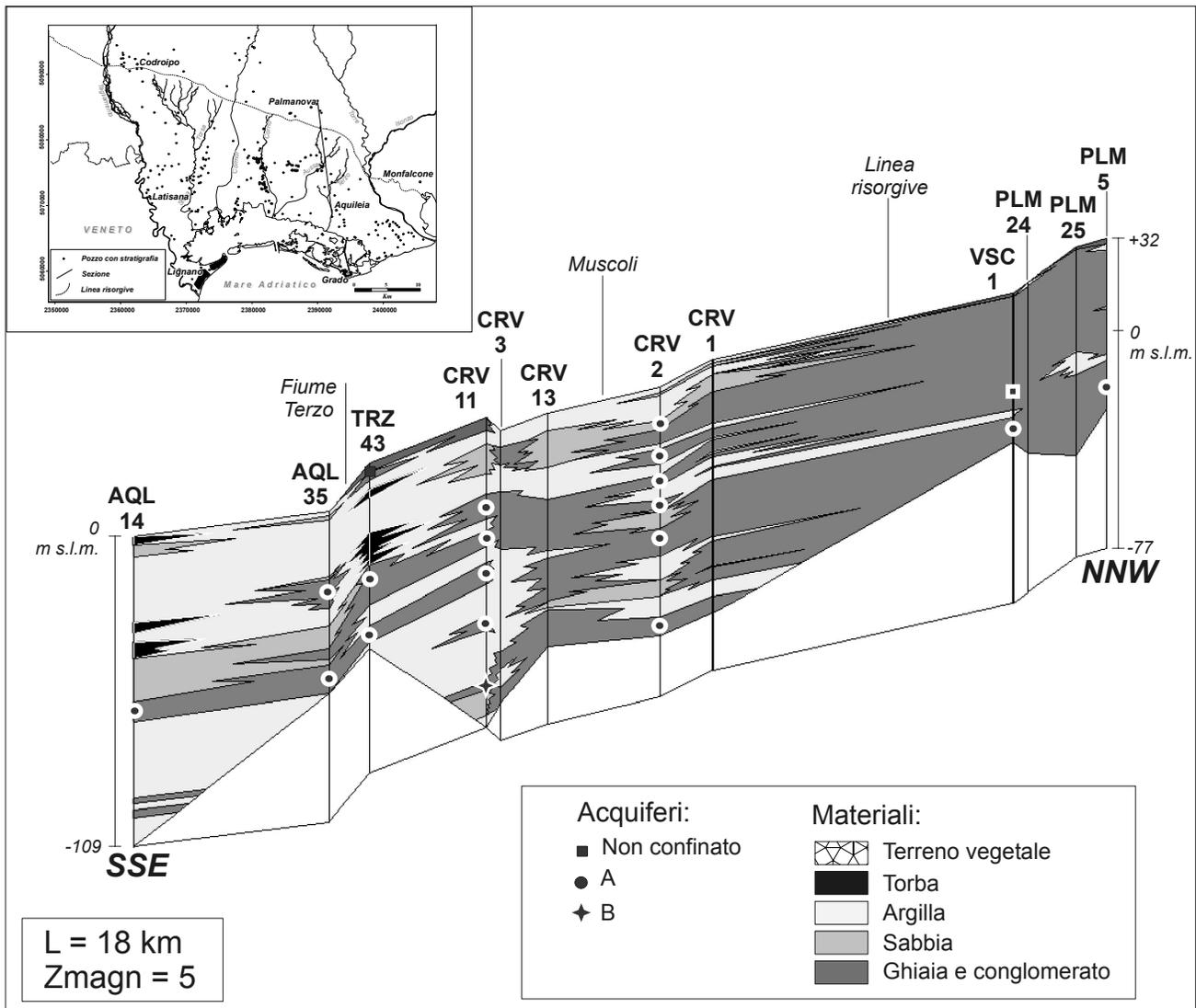


Fig. 2 – Sezione n. 1. I pozzi sono identificati mediante il codice del Comune di appartenenza (AQL: Aquileia; TRZ: Terzo d'Aquileia; CRV: Cervignano del Friuli; VSC: Visco; PLM: Palmanova) associato ad un indice numerico. I simboli grafici, descritti in legenda, evidenziano gli orizzonti produttivi segnalati dai perforatori dei pozzi.

*Cross-section n.1. Water-wells are initialised with the code of the respective municipality followed by a number. Different dot symbols are used in order to identify the productive horizons evidenced by the drilling operators.*

Tab.1 – Sintesi dei principali dati (spessore, profondità) dei livelli acquiferi del sistema confinato della bassa pianura.  
*Main data of depth and thickness of the low plain confined aquifer systems.*

| FALDA          | N° pozzi | SPESSORE (m) |      |      | PROFONDITA' (-m s.l.m.) |       |
|----------------|----------|--------------|------|------|-------------------------|-------|
|                |          | min          | max  | med  | min                     | max   |
| <b>A</b>       | 152      | 1,2          | 58,3 | 29,7 | 19,4                    | 80,3  |
| A <sub>1</sub> | 46       | 1,2          | 20,0 | 10,6 | 19,4                    | 34,8  |
| A <sub>2</sub> | 82       | 2,0          | 37,0 | 19,5 | 38,5                    | 63,9  |
| A <sub>3</sub> | 88       | 1,5          | 27,0 | 14,3 | 62,0                    | 80,3  |
| <b>B</b>       | 102      | 1,5          | 27,4 | 14,5 | 80,1                    | 112,4 |
| B <sub>1</sub> | 61       | 2,0          | 21,5 | 11,8 | 80,1                    | 91,7  |
| B <sub>2</sub> | 44       | 1,5          | 20,0 | 10,8 | 91,5                    | 104,2 |
| B <sub>3</sub> | 9        | 4,5          | 11,3 | 7,9  | 106,9                   | 112,4 |
| <b>C</b>       | 57       | 2,8          | 37,0 | 19,9 | 114,6                   | 148,3 |
| C <sub>1</sub> | 15       | 3,0          | 11,0 | 7,0  | 114,6                   | 122,3 |
| C <sub>2</sub> | 21       | 2,0          | 19,0 | 10,5 | 125,8                   | 137,2 |
| C <sub>3</sub> | 20       | 4,0          | 21,0 | 12,5 | 140,7                   | 148,3 |
| <b>D</b>       | 76       | 1,1          | 20,0 | 10,6 | 152,5                   | 179,3 |
| D <sub>1</sub> | 57       | 1,1          | 18,5 | 9,8  | 152,5                   | 168,5 |
| D <sub>2</sub> | 22       | 3,5          | 15,0 | 9,3  | 165,8                   | 179,3 |
| <b>E</b>       | 40       | 3,7          | 32,0 | 17,9 | 181,5                   | 215,8 |
| E <sub>1</sub> | 7        | 4,0          | 15,0 | 9,5  | 181,5                   | 190,9 |
| E <sub>2</sub> | 11       | 4,0          | 16,0 | 10,0 | 193,3                   | 206,6 |
| E <sub>3</sub> | 21       | 3,7          | 13,2 | 8,5  | 211,2                   | 215,8 |
| <b>F</b>       | 52       | 1,5          | 40,3 | 20,9 | 219,5                   | 261,8 |
| F <sub>1</sub> | 11       | 4,3          | 20,9 | 12,6 | 219,5                   | 230,5 |
| F <sub>2</sub> | 23       | 1,5          | 11,0 | 6,3  | 232,2                   | 241,1 |
| F <sub>3</sub> | 13       | 4,0          | 11,0 | 7,5  | 244,8                   | 255,1 |
| F <sub>4</sub> | 4        | 7,7          | 11,0 | 9,4  | 258,2                   | 261,8 |
| <b>G</b>       | 3        | 9,0          | 12,7 | 10,9 | 267,3                   | 276,4 |
| <b>H</b>       | 22       | 2,7          | 62,0 | 32,4 | 303,3                   | 553,0 |

- rete di osservazione dell'ex Servizio Idrografico: sono state acquisite misure freatiche effettuate nel periodo 1974-1996 (dati pubblicati negli Annali Idrologici, parte II), integrate con misure inedite fornite dall'Unità Operativa Idrografica di Udine effettuate nel periodo 1997-2004

Per la ricostruzione del campo di moto sono stati elaborati i dati di 96 stazioni piezometriche caratterizzate da numerosità campionaria pari o superiore a 20 anni di osservazioni. Le misure di livello sono state espresse in termini di quota media annua (in m s.l.m.) (*Tab. 2*).

Le caratteristiche piezometriche del sistema acquifero della bassa pianura sono state studiate grazie a due campagne di misura effettuate nei periodi gennaio-febbraio e settembre-ottobre 2003 su un campione di 134 pozzi le cui caratteristiche sono riportate in *Tab. 3* mentre la distribuzione dei pozzi nelle diverse falde è riportata in *Tab. 4*.

Tali campagne sono risultate fondamentali da un punto di vista conoscitivo, in quanto nella bassa pianura non esistono reti di monitoraggio quantitativo, ma dati piezometrici sporadici relativi ad un esiguo numero di pozzi, che raramente possiedono i requisiti necessari ad una

loro corretta interpretazione; nella maggior parte dei casi, infatti, non è nota la profondità dei filtri ed inoltre, la frequente mancanza del dato relativo alla profondità del pozzo di misura ne impedisce l'attribuzione ad uno dei livelli acquiferi riconosciuti nel sottosuolo.

#### **Elaborazione dei dati freatiche della falda dell'Alta pianura**

La ricostruzione dell'andamento freatiche della falda è stata effettuata sottoponendo i dati disponibili ad un preliminare processo di omogeneizzazione onde ottenere, per ciascuna stazione di misura, la quota media annua (in m s.l.m.) del livello freatiche nell'intervallo temporale considerato.

La successiva analisi dei dati così ottenuti è stata quindi condotta con l'ausilio delle tecniche geostatistiche basate sulla teoria delle variabili regionalizzate (Department of the Army, 1997; Kitanidis, 1997). La variabilità spaziale che caratterizza l'andamento del livello freatiche e che costituisce parte integrante delle informazioni dell'insieme campionario di valori disponibili, è infatti di natura complessa e sfugge ad una descrizione quantitativa

dettagliata. Un approccio conveniente per la trattazione di tale scenario è quello stocastico, in cui la grandezza di interesse viene trattata come funzione *random* dello spazio: ogni valore da essa assunto è associato ad una ubicazione spaziale ed esiste almeno una implicita connessione tra valore ed ubicazione. Tale schema concettuale consente di formulare previsioni in punti non campionati e di quantificare il grado di incertezza ad esse associato. L'approccio geostatistico, attraverso l'introduzione dei concetti di variabile regionalizzata  $Z(x)$ , funzione aleatoria caratterizzata da legge spaziale, e di correlazione spaziale, si propone di determinare i valori incogniti di una grandezza attraverso estimatori, cioè attraverso opportune combinazioni lineari dei valori noti, i cui coefficienti sono scelti in modo da rendere minima la varianza dell'errore

commesso nella stima di ciascun valore interpolato.

L'elaborazione dei dati freaticometrici è stata condotta sfruttando le potenzialità offerte dal pacchetto "Surfer" versione 7.0, programma di *contouring* bidimensionale in ambiente *Windows*, e dal software interattivo "Geoas®" versione 1.2.1 in ambiente *DOS*. Nel loro insieme, tali strumenti informatici garantiscono la specificazione diretta dei parametri in tutte le fasi sia di costruzione del variogramma sperimentale che di scelta del variogramma teorico, unitamente alla possibilità di eseguire la calibrazione tramite "cross-validation" e di utilizzare l'algoritmo di *kriging* per trasformare automaticamente in mappe descrittive, mediante opportuni metodi di *gridding* controllabili dall'operatore, gli attributi  $Z$  di un qualunque insieme disperso di punti georeferenziati.

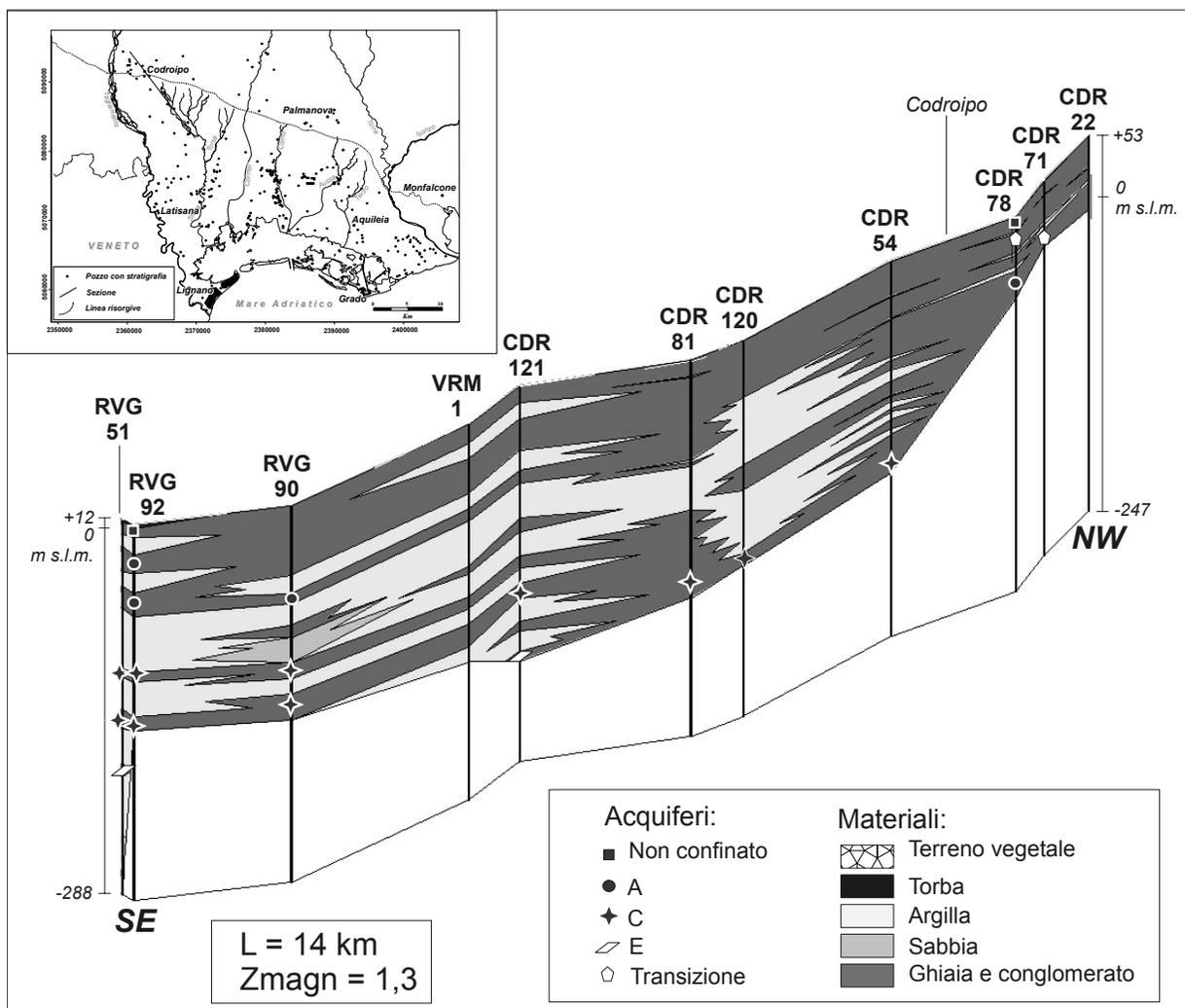


Fig. 3 – Sezione n. 4. I pozzi sono identificati mediante il codice del Comune di appartenenza (RVG: Rivignano; VRM: Varmo; CDR: Codroipo) associato ad un indice numerico. I simboli grafici, descritti in legenda, evidenziano gli orizzonti produttivi segnalati dai perforatori dei pozzi.

*Cross-section n.4. Water-wells are initialled with the code of the respective municipality followed by a number. Different dot symbols are used in order to identify the productive horizons evidenced by the drilling operators.*

Tab. 2 – Le 96 stazioni freaticometriche dell'alta pianura prese in considerazione.  
*Phreatimetric gauge network in the high plain.*

| Codice stazione | Comune pozzo                 | Quota boccapozzo (m slm) | X       | Y       | Valore freatic. medio (m slm) |
|-----------------|------------------------------|--------------------------|---------|---------|-------------------------------|
| 0011r           | S. Giorgio della Richinvelda | 83,55                    | 2351124 | 5100557 | 67,11                         |
| 0012r           | S. Giorgio della Richinvelda | 71,03                    | 2351660 | 5099123 | 53,49                         |
| 0014r           | S. Giorgio della Richinvelda | 84,06                    | 2355029 | 5101265 | 61,02                         |
| 0015r           | S. Martino al Tagliamento    | 74,86                    | 2354705 | 5099632 | 55,70                         |
| 0016r           | S. Martino al Tagliamento    | 69,14                    | 2354640 | 5098865 | 53,23                         |
| 0017r           | Valvasone                    | 58,78                    | 2354635 | 5095880 | 49,10                         |
| 0019r           | Spilimbergo                  | 122,15                   | 2359490 | 5112570 | 106,27                        |
| 0020r           | S. Giorgio della Richinvelda | 93,71                    | 2356569 | 5103650 | 70,15                         |
| 0021r           | S. Giorgio della Richinvelda | 85,00                    | 2357140 | 5102500 | 68,06                         |
| 0023r           | S. Martino al Tagliamento    | 70,55                    | 2356195 | 5098950 | 55,87                         |
| 0027r           | Camino al T.                 | 41,87                    | 2360120 | 5090555 | 36,99                         |
| 0028r           | Codroipo                     | 47,46                    | 2360385 | 5092440 | 40,89                         |
| 0029r           | Codroipo                     | 40,55                    | 2361840 | 5091260 | 36,78                         |
| 0030r           | Codroipo                     | 48,12                    | 2362480 | 5093585 | 41,14                         |
| 0031r           | Codroipo                     | 49,22                    | 2365162 | 5093150 | 38,55                         |
| 0033r           | Codroipo                     | 39,53                    | 2365920 | 5091105 | 33,97                         |
| 0034r           | Codroipo                     | 46,52                    | 2366073 | 5092470 | 36,65                         |
| 0035r           | Codroipo                     | 37,28                    | 2367395 | 5090770 | 31,47                         |
| 0036r           | Codroipo                     | 45,09                    | 2368005 | 5092077 | 34,46                         |
| 0037r           | Codroipo                     | 63,52                    | 2367082 | 5095535 | 40,10                         |
| 0038r           | Mereto di Tomba              | 75,09                    | 2368240 | 5097503 | 43,09                         |
| 0039r           | Lestizza                     | 49,13                    | 2371687 | 5093010 | 32,93                         |
| 0040r           | Bertiolo                     | 28,89                    | 2371480 | 5089070 | 26,36                         |
| 0042r           | Bertiolo                     | 39,26                    | 2370990 | 5091190 | 31,43                         |
| 0043r           | Lestizza                     | 44,7                     | 2370425 | 5092385 | 33,44                         |
| 0044r           | Lestizza                     | 51,42                    | 2371516 | 5093457 | 34,02                         |
| 0045r           | Talmassons                   | 34,11                    | 2373752 | 5089212 | 26,49                         |
| 0046r           | Lestizza                     | 42,53                    | 2374084 | 5091900 | 29,88                         |
| 0047r           | Lestizza                     | 48,62                    | 2375780 | 5093381 | 28,93                         |
| 0048r           | Mortegliano                  | 37,62                    | 2377015 | 5089540 | 25,38                         |
| 0049r           | Talmassons                   | 31,33                    | 2375320 | 5088555 | 24,94                         |
| 0051r           | Pozzuolo del Fr.             | 62,29                    | 2379957 | 5094229 | 28,56                         |
| 0053r           | Castions di St.              | 27,55                    | 2380690 | 5086700 | 20,60                         |
| 0054r           | Mortegliano                  | 35,41                    | 2381100 | 5088710 | 22,23                         |
| 0055r           | Mortegliano                  | 42,02                    | 2380885 | 5090102 | 23,45                         |
| 0056r           | Mortegliano                  | 52,28                    | 2382935 | 5091570 | 24,88                         |
| 0057r           | Gonars                       | 24,63                    | 2383336 | 5085110 | 17,79                         |
| 0058r           | Bicinicco                    | 35,11                    | 2384350 | 5087937 | 20,52                         |
| 0059r           | Pavia di Udine               | 58,1                     | 2384785 | 5092547 | 31,50                         |
| 0060r           | Bicinicco                    | 28,7                     | 2384996 | 5085966 | 18,24                         |
| 0062r           | Gonars                       | 22,15                    | 2386227 | 5084020 | 16,09                         |
| 0064r           | S.ta Maria La Longa          | 32,06                    | 2386732 | 5086364 | 17,70                         |
| 0065r           | Bagnaria                     | 18,79                    | 2389500 | 5082855 | 14,55                         |
| 0067r           | S. Vito al Torre             | 32,07                    | 2394125 | 5085715 | 16,41                         |
| 0071r           | Mossa                        | 55,39                    | 2406986 | 5086335 | 31,55                         |
| 0075r           | Gorizia                      | 45,72                    | 2409315 | 5086915 | 36,04                         |
| 0078r           | Manzano                      | 61,52                    | 2393120 | 5093690 | 27,68                         |
| 0079r           | Savogna d'Isonzo             | 43,13                    | 2409855 | 5083070 | 24,78                         |
| 0080r           | S. Giovanni al Nat.          | 48,26                    | 2397202 | 5089985 | 21,15                         |
| 0083r           | Cormons                      | 60,05                    | 2400760 | 5091348 | 48,26                         |
| 0084r           | Gorizia                      | 63,78                    | 2411370 | 5085505 | 32,55                         |
| 0085r           | Gorizia                      | 45,32                    | 2411090 | 5088086 | 41,37                         |
| 0087r           | Gorizia                      | 67,15                    | 2412515 | 5085705 | 30,28                         |
| 0088r           | Cormons                      | 37,13                    | 2399190 | 5087663 | 20,34                         |
| 0089r           | Gorizia                      | 80,41                    | 2412696 | 5088562 | 45,21                         |
| 0090r           | Gorizia                      | 75,15                    | 2413835 | 5087355 | 48,05                         |
| 0091r           | Mossa                        | 58,78                    | 2407275 | 5087824 | 38,73                         |
| 0092r           | Moraro                       | 41,82                    | 2403240 | 5087340 | 25,28                         |
| 0097r           | Cormons                      | 34,29                    | 2400165 | 5087380 | 18,96                         |
| 0098r           | Cormons                      | 44,21                    | 2401510 | 5089195 | 28,17                         |
| 0141r           | Moimacco                     | 108,97                   | 2392098 | 5105465 | 56,94                         |
| 0142r           | Premariacco                  | 95,69                    | 2392790 | 5099655 | 63,41                         |
| 0144r           | Remanzacco                   | 116,67                   | 2388055 | 5105210 | 55,69                         |

|       |                        |        |         |         |        |
|-------|------------------------|--------|---------|---------|--------|
| 0145r | Remanzacco             | 91,43  | 2389895 | 5101635 | 53,99  |
| 0146r | Faedis                 | 130,43 | 2390358 | 5109990 | 75,80  |
| 0147r | S. Pietro al Nat.      | 152,94 | 2402658 | 5107810 | 129,17 |
| 0148r | S. Pietro al Nat.      | 159,56 | 2402253 | 5108479 | 137,09 |
| 0151r | Mereto di Tomba        | 97,14  | 2368436 | 5101468 | 48,58  |
| 0153r | S. Vito di Fagagna     | 134,25 | 2370525 | 5106090 | 52,58  |
| 0154r | S. Vito di Fagagna     | 126,14 | 2369135 | 5105460 | 53,55  |
| 0155r | Mereto di Tomba        | 94,17  | 2370332 | 5101000 | 48,50  |
| 0156r | Mereto di Tomba        | 99,91  | 2371910 | 5102163 | 50,29  |
| 0157r | Coseano                | 110,46 | 2367200 | 5103795 | 52,39  |
| 0158r | Coseano                | 124,68 | 2364485 | 5105495 | 59,41  |
| 0159r | Dignano                | 100,56 | 2360390 | 5105400 | 86,58  |
| 0160r | Flaibano               | 82,7   | 2359896 | 5101525 | 66,33  |
| 0161r | Sedegliano             | 71,27  | 2363455 | 5097660 | 46,75  |
| 0163r | Medea                  | 26,23  | 2398270 | 5085862 | 14,92  |
| 0164r | Romans d'Isonzo        | 21,54  | 2398630 | 5082975 | 13,94  |
| 0167r | Gradisca d'Isonzo      | 27,54  | 2402110 | 5082497 | 18,90  |
| 0168r | Cormons                | 51,69  | 2399162 | 5091680 | 22,82  |
| 0170r | Dignano                | 111,43 | 2361700 | 5109415 | 101,76 |
| 0171r | Udine                  | 94,84  | 2382241 | 5099423 | 49,39  |
| 0175r | Basiliano              | 77,7   | 2372525 | 5098305 | 39,61  |
| 0180r | Pavia di Udine         | 69,01  | 2385342 | 5094550 | 39,65  |
| 0181r | Pavia di Udine         | 61,24  | 2388660 | 5093604 | 32,41  |
| 0188r | Campoformido           | 85,3   | 2376408 | 5099295 | 49,30  |
| 0189r | Pasian di Prato        | 96,71  | 2376344 | 5101310 | 49,85  |
| 0199r | Pinzano al Tagliamento | 166,62 | 2358075 | 5113880 | 99,77  |
| 0205r | Spilimbergo            | 133,45 | 2353923 | 5107242 | 70,40  |
| 0213r | Tricesimo              | 176,68 | 2383720 | 5113322 | 169,52 |
| A802  | Mortegliano            | 36,18  | 2377675 | 5089110 | 24,99  |
| A803  | Pozzuolo del Friuli    | 66,99  | 2378760 | 5095063 | 45,68  |
| A804  | Talmassons             | 27,56  | 2374160 | 5087560 | 23,77  |
| A808  | Valvasone              | 57,01  | 2355820 | 5094980 | 48,27  |
| A809  | Valvasone              | 51,59  | 2356700 | 5093300 | 42,01  |

Nel caso di studio, la sequenza di calcolo dell'analisi geostatistica è stata avviata generando una mappa preliminare dell'andamento del livello freaticometrico dell'APF utilizzando il metodo di interpolazione "minimum curvature". Tale operazione consente di definire qualitativamente le caratteristiche di continuità spaziale della variabile in studio rendendo possibile l'individuazione di un eventuale *trend* nei dati, cioè di una tendenza centrale di comportamento nella componente deterministica a grande scala, associata al concetto di media, del processo spaziale considerato. La mappa generata in relazione alla quota

freatimetrica media annua dell'APF ha evidenziato in tal modo un andamento decrescente da N verso S della variabile d'interesse nell'area di studio. La presenza di un *trend* sistematico di variabilità nello spazio rappresentato dalla direzione prevalente di flusso, è stata confermata dal caratteristico andamento parabolico del variogramma sperimentale dei dati campionari lungo tale direzione: un tale andamento, infatti, è sintomatico del fatto che le differenze tra i dati contengono differenze nella componente di tendenza centrale che aumentano all'aumentare della distanza reciproca  $h$  tra i punti di misura.

Tab. 3 – Le 134 stazioni piezometriche della bassa pianura facenti parte della rete sperimentale di monitoraggio.  
*Piezometric gauge network in the low plain.*

| ID | Comune Pozzo           | Quota bp (m slm) | X       | Y       | 1 LP (m slm) | 1 Data   | 2 LP (m slm) | 2 Data   | Falda |
|----|------------------------|------------------|---------|---------|--------------|----------|--------------|----------|-------|
| 57 | Aquileia               | 2,72             | 2393063 | 5069520 | 5,27         | 17/01/03 | 3,74         | 25/09/03 | A     |
| 58 | Aquileia               | 1,68             | 2393292 | 5069219 | 5,76         | 17/01/03 | 3,72         | 25/09/03 | D     |
| 59 | Codroipo               | 33,17            | 2366748 | 5089896 | 30,77        | 05/02/03 | 23,67        | 22/10/03 | Fr    |
| 60 | Fiumicello             | 2,75             | 2396808 | 5070383 | 4,69         | 21/01/03 |              | 24/09/03 | A     |
| 61 | Muzzana del Turgnano   | 9,47             | 2376641 | 5078186 | 12,02        | 04/02/03 | 11,00        | 01/10/03 | A     |
| 62 | Muzzana del Turgnano   | 5,98             | 2374449 | 5075168 | 8,02         | 04/02/03 | 6,49         | 01/10/03 | B     |
| 63 | Palazzolo dello Stella | 2,60             | 2371073 | 5071946 | 3,62         | 04/02/03 | 3,11         | 16/10/03 | C     |
| 64 | Pocenia                | 7,33             | 2372412 | 5076925 | 9,88         | 31/01/03 | 10,19        | 09/10/03 | B     |
| 65 | Pocenia                | 12,96            | 2373869 | 5081955 | 19,59        | 31/01/03 | 18,06        | 09/10/03 | C     |
| 66 | Pocenia                | 8,15             | 2372577 | 5078294 | 17,33        | 06/02/03 | 12,23        | 09/10/03 | B     |
| 67 | Porpetto               | 6,62             | 2381509 | 5079606 | 9,68         | 24/01/03 | 7,64         | 07/10/03 | A     |
| 68 | Talmassons             | 27,29            | 2371538 | 5088473 | 25,49        | 05/02/03 | 23,59        | 24/10/03 | Fr    |
| 69 | Torviscosa             | 4,54             | 2385502 | 5076133 | 8,11         | 11/02/03 | 8,11         | 15/10/03 | A     |
| 70 | Villa Vicentina        | 5,50             | 2394144 | 5072842 | 7,74         | 24/01/03 |              | 25/09/03 | B     |

Tab. 3 - Segue

|     |                        |       |         |         |       |          |       |          |    |
|-----|------------------------|-------|---------|---------|-------|----------|-------|----------|----|
| 71  | Villa Vicentina        | 5,68  | 2393902 | 5073721 | 9,76  | 24/01/03 | 6,70  | 25/09/03 | C  |
| 72  | Terzo d'Aquileia       | 3,65  | 2391142 | 5073811 | 6,20  | 17/01/03 | 6,20  | 25/09/03 | B  |
| 73  | Terzo d'Aquileia       | 4,54  | 2391323 | 5074034 | 8,11  | 17/01/03 | 6,58  | 27/09/03 | C  |
| 74  | San Giorgio di Nogaro  | 5,78  | 2381331 | 5075030 | 8,84  | 24/01/03 | 7,82  | 07/10/03 | B  |
| 75  | Ruda                   | 11,92 | 2395969 | 5077276 | 8,42  | 21/01/03 | 6,82  | 29/09/03 | Fr |
| 76  | San Giorgio di Nogaro  | 6,12  | 2379741 | 5075667 | 8,67  | 24/01/03 | 8,16  | 07/10/03 | A  |
| 77  | Muzzana del Turgnano   | 4,18  | 2374821 | 5073638 | 9,28  | 04/02/03 | 9,28  | 17/10/03 | B  |
| 79  | Porpetto               | 9,78  | 2378964 | 5078566 | 12,84 | 24/01/03 | 12,33 | 17/10/03 | A  |
| 80  | Teor                   | 3,68  | 2370972 | 5075851 | 1,58  | 13/01/03 | 0,68  | 16/10/03 | Fr |
| 81  | Pocenia                | 8,15  | 2372572 | 5078264 | 18,35 | 13/01/03 | 16,31 | 09/10/03 | B  |
| 82  | Pocenia                | 9,27  | 2372569 | 5078406 | 17,43 | 13/01/03 | 14,37 | 09/10/03 | C  |
| 84  | Aquileia               | 1,22  | 2393303 | 5069208 | 2,24  | 17/01/03 | 1,32  | 25/09/03 | A  |
| 85  | Fiumicello             | 2,96  | 2396804 | 5070396 | 5,51  | 21/01/03 |       | 24/09/03 | A  |
| 86  | Talmassons             | 27,80 | 2371816 | 5088414 | 27,80 | 05/02/03 | 25,80 | 24/10/03 | Fr |
| 87  | Talmassons             | 28,20 | 2371706 | 5088554 | 26,55 | 05/02/03 | 24,20 | 24/10/03 | Fr |
| 88  | Talmassons             | 28,40 | 2371874 | 5088563 | 25,80 | 05/02/03 | 24,90 | 24/10/03 | Fr |
| 89  | Terzo d'Aquileia       | 3,23  | 2391327 | 5074029 | 4,76  | 17/01/03 |       |          | A  |
| 90  | Terzo d'Aquileia       | 4,43  | 2391230 | 5074015 | 5,76  | 17/01/03 | 4,94  | 23/10/03 | A  |
| 91  | Villa Vicentina        | 5,09  | 2393912 | 5073698 | 6,11  | 24/01/03 |       | 25/09/03 | A  |
| 92  | Bagnaria Arsa          | 18,10 | 2386939 | 5082788 | 14,10 | 21/01/03 | 11,80 | 15/10/03 | Fr |
| 93  | Palazzolo dello Stella | 4,07  | 2371650 | 5072980 | 15,29 | 13/01/03 | 14,27 | 16/10/03 | H  |
| 94  | Cervignano del Friuli  | 9,47  | 2389631 | 5079572 | 12,53 | 22/01/03 |       | 29/09/03 | A  |
| 95  | Cervignano del Friuli  | 9,45  | 2389762 | 5079709 | 12,51 | 21/01/03 | 9,45  | 29/09/03 | A  |
| 96  | Cervignano del Friuli  | 4,73  | 2391270 | 5075665 | 8,81  | 17/01/03 | 7,79  | 29/09/03 | C  |
| 111 | Pocenia                | 9,00  | 2372895 | 5078093 | 19,20 | 13/01/03 | 16,14 | 09/10/03 | F  |
| 123 | Bagnaria Arsa          | 5,92  | 2388180 | 5078039 | 18,16 | 15/01/03 | 11,02 | 23/10/03 | B  |
| 124 | Aquileia               | 1,32  | 2389057 | 5068828 | 6,42  | 15/01/03 | 3,36  | 17/10/03 | A  |
| 125 | Aquileia               | 1,24  | 2387174 | 5068533 | 8,11  | 15/01/03 | 7,09  | 17/10/03 | H  |
| 126 | Teor                   | 4,82  | 2371037 | 5075874 | 9,92  | 13/01/03 | 8,90  | 16/10/03 | F  |
| 127 | Teor                   | 4,31  | 2371089 | 5075903 | 8,39  | 13/01/03 | 7,88  | 16/10/03 | D  |
| 128 | Pocenia                | 8,49  | 2372899 | 5078136 | 10,53 | 13/01/03 | 10,33 | 09/10/03 | A  |
| 129 | Terzo d'Aquileia       | 5,30  | 2391191 | 5073213 | 7,85  | 24/01/03 | 6,32  | 25/09/03 | A  |
| 130 | Terzo d'Aquileia       | 4,94  | 2391141 | 5073266 | 6,98  | 24/01/03 | 4,94  | 17/10/03 | B  |
| 131 | Cervignano del Friuli  | 3,97  | 2390670 | 5075732 | 9,07  | 17/01/03 |       | 23/10/03 | B  |
| 132 | Cervignano del Friuli  | 4,93  | 2390241 | 5077394 | 6,97  | 24/01/03 | 5,95  | 29/09/03 | A  |
| 133 | Cervignano del Friuli  | 5,40  | 2392585 | 5075764 | 7,44  | 24/01/03 |       | 29/09/03 | A  |
| 134 | Porpetto               | 9,87  | 2379013 | 5078576 | 13,95 | 24/01/03 | 12,42 | 17/10/03 | B  |
| 135 | San Giorgio di Nogaro  | 6,26  | 2379720 | 5075647 | 8,50  | 24/01/03 | 7,28  | 07/10/03 | A  |
| 136 | San Giorgio di Nogaro  | 6,68  | 2379719 | 5075646 | 8,72  | 24/01/03 | 8,72  | 07/10/03 | B  |
| 137 | Codroipo               | 26,00 | 2364642 | 5086718 | 24,92 | 06/02/03 |       |          | Fr |
| 138 | Bertiolo               | 18,21 | 2368792 | 5085279 | 29,43 | 28/01/03 | 25,35 | 22/10/03 | D  |
| 139 | Bertiolo               | 32,20 | 2368709 | 5089267 | 29,60 | 28/01/03 | 22,20 | 08/10/03 | Fr |
| 140 | Bertiolo               | 20,00 | 2368300 | 5086393 | 19,90 | 06/02/03 | 19,00 | 31/10/03 | Fr |
| 141 | Bertiolo               | 19,60 | 2368210 | 5086165 | 18,65 | 06/02/03 | 17,50 | 31/10/03 | Fr |
| 142 | Bertiolo               | 34,50 | 2370496 | 5090096 | 28,00 | 06/02/03 | 24,50 | 31/10/03 | Fr |
| 143 | Bertiolo               | 35,19 | 2370406 | 5090074 | 34,29 | 06/02/03 | 34,13 | 31/10/03 | Fr |
| 144 | Camino al Tagliamento  | 31,97 | 2360843 | 5087984 | 37,07 | 14/02/03 | 33,19 | 20/10/03 | B  |
| 145 | Camino al Tagliamento  | 32,20 | 2360777 | 5088299 | 30,70 | 14/02/03 | 28,20 | 20/10/03 | Fr |
| 146 | Camino al Tagliamento  | 33,54 | 2361574 | 5088504 | 38,64 | 14/02/03 |       | 20/10/03 | B  |
| 147 | Camino al Tagliamento  | 26,37 | 2359882 | 5086085 | 26,57 | 14/02/03 |       | 20/10/03 | A  |
| 148 | Camino al Tagliamento  | 27,22 | 2359884 | 5086086 | 36,40 | 14/02/03 | 33,34 | 20/10/03 | C  |
| 149 | Muzzana del Turgnano   | 6,26  | 2374553 | 5075519 | 9,32  | 05/02/03 | 6,77  | 01/10/03 | B  |
| 150 | Muzzana del Turgnano   | 5,32  | 2374318 | 5075310 | 8,58  | 04/02/03 | 5,83  | 01/10/03 | B  |
| 151 | Muzzana del Turgnano   | 5,63  | 2373734 | 5075161 | 6,65  | 31/01/03 | 6,14  | 01/10/03 | B  |
| 152 | Muzzana del Turgnano   | 8,99  | 2376628 | 5078071 | 12,05 | 31/01/03 | 11,54 | 01/10/03 | A  |
| 153 | Muzzana del Turgnano   | 9,30  | 2376552 | 5078335 | 13,38 | 31/01/03 | 12,36 | 01/10/03 | A  |
| 154 | Rivignano              | 15,07 | 2367491 | 5080938 | 12,87 | 06/02/03 | 12,97 | 22/10/03 | Fr |
| 155 | Rivignano              | 12,80 | 2367601 | 5080918 | 11,00 | 06/02/03 | 10,95 | 22/10/03 | Fr |
| 156 | Rivignano              | 12,47 | 2367833 | 5081032 | 10,37 | 06/02/03 | 10,37 | 22/10/03 | Fr |
| 157 | Rivignano              | 12,10 | 2367637 | 5081128 | 10,95 | 06/02/03 | 11,10 | 22/10/03 | Fr |
| 158 | Rivignano              | 13,10 | 2367156 | 5081244 | 11,60 | 06/02/03 | 11,70 | 22/10/03 | Fr |
| 159 | Rivignano              | 14,83 | 2367353 | 5081342 | 23,50 | 06/02/03 | 22,48 | 22/10/03 | D  |
| 160 | Varmo                  | 14,20 | 2363609 | 5081694 | 12,40 | 06/02/03 | 12,40 | 22/10/03 | Fr |
| 161 | Varmo                  | 19,50 | 2363402 | 5084090 | 17,40 | 06/02/03 | 17,00 | 22/10/03 | Fr |
| 162 | Varmo                  | 20,20 | 2363249 | 5084182 | 31,42 | 06/02/03 | 28,36 | 08/10/03 | D  |
| 163 | Gonars                 | 26,00 | 2382799 | 5085745 | 18,45 | 04/02/03 | 15,40 | 17/10/03 | Fr |
| 164 | Gonars                 | 25,60 | 2382865 | 5085644 | 17,62 | 11/02/03 | 15,54 | 17/10/03 | Fr |

Tab 3 - Segue

|     |                        |       |         |         |       |          |       |          |    |
|-----|------------------------|-------|---------|---------|-------|----------|-------|----------|----|
| 165 | Talmassons             | 26,80 | 2371555 | 5088309 | 25,80 | 05/02/03 | 24,50 | 24/10/03 | Fr |
| 166 | Talmassons             | 27,20 | 2371823 | 5088289 | 24,70 | 05/02/03 | 22,40 | 24/10/03 | Fr |
| 170 | Prececnico             | 2,35  | 2370589 | 5072264 | 3,88  | 27/05/03 | 5,41  | 16/10/03 | E  |
| 171 | Prececnico             | 2,40  | 2370537 | 5072248 | 3,42  | 27/05/03 | 4,95  | 16/10/03 | A  |
| 172 | Palazzolo dello Stella | 7,85  | 2368830 | 5076343 | 10,91 | 29/05/03 | 9,89  | 29/10/03 | H  |
| 173 | Lignano Sabbiadoro     | 0,92  | 2371414 | 5059461 | -1,88 | 06/06/03 | -2,18 | 29/10/03 | Fr |
| 174 | Latisana               | 2,06  | 2368587 | 5063302 | 6,14  | 06/06/03 |       | 29/10/03 | H  |
| 175 | Latisana               | 2,03  | 2368582 | 5063319 | 0,53  | 06/06/03 | 0,23  | 29/10/03 | Fr |
| 176 | Latisana               | 0,90  | 2368554 | 5063302 | -0,60 | 06/06/03 | -1,00 | 29/10/03 | Fr |
| 177 | Ronchis                | 9,27  | 2363962 | 5074629 | 12,33 | 11/06/03 | 11,31 | 29/10/03 | G  |
| 178 | Ronchis                | 10,42 | 2364067 | 5076935 | 17,56 | 11/06/03 | 16,03 | 29/10/03 | F  |
| 179 | Latisana               | 0,58  | 2368309 | 5064660 | 2,62  | 28/06/03 |       | 29/10/03 | H  |
| 180 | Latisana               | 1,35  | 2368330 | 5064627 |       | 28/06/03 |       | 29/10/03 | G  |
| 181 | Latisana               | 0,50  | 2368326 | 5064665 | -1,80 | 28/06/03 | -2,20 | 29/10/03 | Fr |
| 182 | Varmo                  | 16,38 | 2366861 | 5083590 | 15,68 | 01/07/03 | 15,68 | 22/10/03 | A  |
| 183 | Rivignano              | 13,82 | 2367022 | 5081635 | 13,02 | 19/08/03 | 13,02 | 22/10/03 | A  |
| 184 | Camino al Tagliamento  | 32,60 | 2361844 | 5088486 | 29,10 | 19/08/03 | 29,70 | 22/10/03 | Fr |
| 185 | Varmo                  | 25,10 | 2362303 | 5086363 | 22,30 | 19/08/03 | 23,00 | 22/10/03 | Fr |
| 186 | Aiello del Friuli      | 17,30 | 2390961 | 5082222 | 11,80 | 21/08/03 | 11,20 | 20/10/03 | A  |
| 187 | Tapogliano             | 18,40 | 2396620 | 5081470 | 8,90  | 21/08/03 | 9,80  | 25/10/03 | Fr |
| 188 | Aiello del Friuli      | 14,08 | 2392828 | 5080908 | 11,08 | 26/08/03 | 9,38  | 21/10/03 | A  |
| 189 | Campolongo al Torre    | 14,63 | 2394768 | 5080174 | 7,93  | 26/08/03 | 8,53  | 25/10/03 | Fr |
| 190 | Tapogliano             | 17,90 | 2395699 | 5081334 | 11,90 | 26/08/03 |       | 21/10/03 | Fr |
| 191 | Castions di Strada     | 19,30 | 2380268 | 5084673 |       |          | 15,30 | 09/09/03 | Fr |
| 192 | Porpetto               | 12,81 | 2380137 | 5081114 |       |          | 14,85 | 09/09/03 | C  |
| 193 | Castions di Strada     | 22,40 | 2378884 | 5086410 |       |          | 15,90 | 09/09/03 | A  |
| 194 | Castions di Strada     | 12,67 | 2378621 | 5080941 |       |          | 13,18 | 09/09/03 | A  |
| 195 | Castions di Strada     | 12,67 | 2378650 | 5080955 |       |          | 12,77 | 09/09/03 | A  |
| 196 | Varmo                  | 17,48 | 2362199 | 5084133 |       |          | 31,25 | 10/09/03 | D  |
| 197 | Varmo                  | 17,25 | 2362106 | 5083997 |       |          | 31,02 | 10/09/03 | D  |
| 198 | Varmo                  | 17,48 | 2362090 | 5084038 |       |          | 22,58 | 10/09/03 | A  |
| 199 | Varmo                  | 16,92 | 2362020 | 5084132 |       |          | 16,92 | 10/09/03 | A  |
| 200 | Varmo                  | 19,88 | 2361353 | 5084717 |       |          |       | 10/09/03 | A  |
| 201 | Camino al Tagliamento  | 26,90 | 2360010 | 5086187 |       |          |       | 10/09/03 | A  |
| 202 | Camino al Tagliamento  | 27,44 | 2360041 | 5086212 |       |          | 34,07 | 10/09/03 | D  |
| 203 | Gonars                 | 18,98 | 2383022 | 5084040 |       |          | 13,68 | 12/09/03 | A  |
| 204 | Carlino                | 3,25  | 2378984 | 5073864 |       |          | 4,27  | 17/09/03 | A  |
| 205 | Carlino                | 2,84  | 2379094 | 5073550 |       |          | 3,86  | 17/09/03 | A  |
| 206 | Carlino                | 2,84  | 2377161 | 5071020 |       |          | 7,94  | 17/09/03 | H  |
| 207 | Aquileia               | 2,27  | 2394111 | 5066970 |       |          | 4,31  | 18/09/03 | F  |
| 208 | Aquileia               | 3,70  | 2394090 | 5066900 |       |          |       | 18/09/03 | E  |
| 209 | Aquileia               | 1,46  | 2391970 | 5070856 |       |          | 4,62  | 25/09/03 | A  |
| 210 | Carlino                | 2,80  | 2377975 | 5069845 |       |          | 4,33  | 02/10/03 | F  |
| 211 | Carlino                | 2,34  | 2378421 | 5070207 |       |          | 10,50 | 02/10/03 | H  |
| 212 | Carlino                | 2,22  | 2378441 | 5070120 |       |          | 5,28  | 02/10/03 | F  |
| 213 | Carlino                | 1,20  | 2378473 | 5070088 |       |          | -0,10 | 02/10/03 | Fr |
| 214 | Varmo                  | 18,80 | 2361342 | 5083636 |       |          | 15,80 | 08/10/03 | Fr |
| 215 | Varmo                  | 17,29 | 2362122 | 5082859 |       |          | 12,29 | 08/10/03 | Fr |
| 216 | Camino al Tagliamento  | 27,96 | 2359381 | 5086096 |       |          | 25,66 | 08/10/03 | Fr |
| 217 | Camino al Tagliamento  | 33,96 | 2358785 | 5087798 |       |          | 29,56 | 08/10/03 | Fr |
| 218 | Camino al Tagliamento  | 41,82 | 2358334 | 5090575 |       |          | 36,42 | 08/10/03 | Fr |
| 219 | Codroipo               | 46,70 | 2358372 | 5092022 |       |          | 37,65 | 08/10/03 | Fr |
| 220 | S. Giorgio di Nogaro   | 5,40  | 2381416 | 5075263 |       |          | 8,46  | 28/10/03 | B  |

In tali condizioni di non stazionarietà della funzione *random* considerata e tenuto conto della numerosità delle misure disponibili, nonché delle caratteristiche e della scala del problema affrontato, si è ritenuto opportuno procedere all'esplicitazione diretta della superficie di tendenza prima di avanzare ulteriormente con il calcolo del variogramma. La successiva rimozione dai dati campionari di tale tendenza a grande scala (*detrending*), requisito fondamentale per l'analisi strutturale in condizioni diverse da quelle di non stazionarietà (Barbosa Landim et al., 2002; Kitanidis, 1997), è stata quindi condotta eseguendo un

*gridding* in modalità "polynomial regression" (Barbosa Landim & Corsi, 2001).

Modellizzando il *trend* con una superficie di primo grado, adattata alla "topografia" dell'insieme di dati sperimentali disponibili, è stato quindi possibile analizzare la correlazione spaziale con riferimento al *dataset* stabilizzato dei residui, cioè alle deviazioni dei singoli valori dalla superficie di tendenza utilizzata.

La costruzione del variogramma sperimentale omnidirezionale (Fig. 4a) è stata quindi realizzata sulla base dell'insieme disperso dei residui disponibili, introducendo *K*

intervalli di larghezza  $(\Delta h)_k$ ,  $(k = 1, \dots, K)$  e assegnando al variogramma, in corrispondenza di ciascun intervallo, la media delle differenze, elevate al quadrato, dei valori misurati tra i residui di tutte le possibili coppie di punti  $(D_{i,j}^2)$ .

Tab. 4 – Distribuzione dei pozzi di misura nelle falde della bassa pianura.  
*Number of water wells utilised for the hydraulic head measurements in the low plain multistrata aquifer system.*

| Falde           | Profondità (-m s.l.m.) | N° pozzi |
|-----------------|------------------------|----------|
| <b>Freatica</b> | <19                    | 43       |
| <b>A</b>        | 19-80                  | 37       |
| <b>B</b>        | 80-112                 | 21       |
| <b>C</b>        | 112-148                | 8        |
| <b>D</b>        | 148-179                | 8        |
| <b>E</b>        | 179-216                | 2        |
| <b>F</b>        | 216-262                | 6        |
| <b>G</b>        | 262-276                | 2        |
| <b>H</b>        | >276                   | 7        |

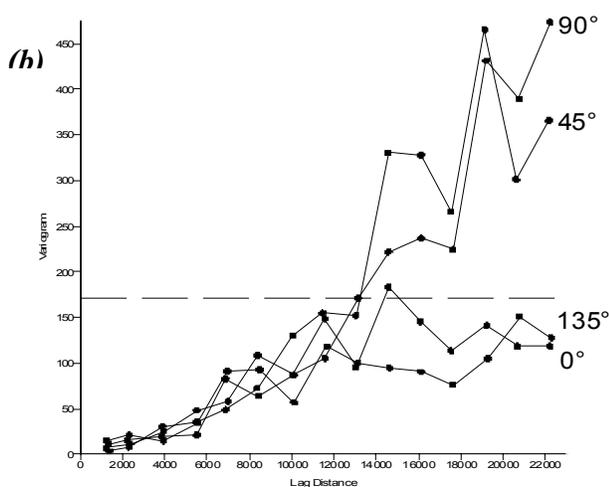
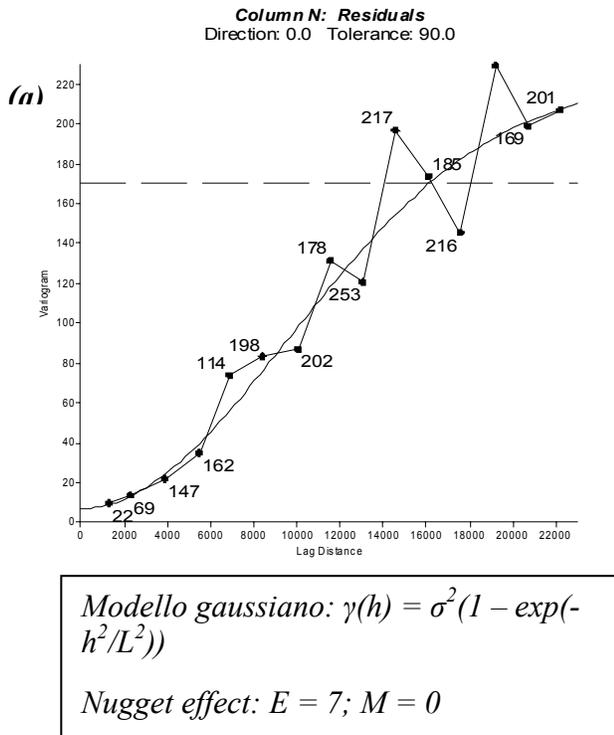


Fig. 4 – Stima della struttura di correlazione spaziale della quota del livello di falda del sistema freatico dell’alta pianura, condotta con riferimento al dataset dei residui derivante dall’operazione di detrending: (a) variogramma sperimentale omnidirezionale e variogramma teorico gaussiano sovrapposto; (b) confronto dei variogrammi sperimentali direzionali (0, 45, 90, 135°).

*Spatial correlation structure of the water table depth of the high plain phreatic aquifer, referred to the residuals coming from detrending: (a) omnidirectional experimental variogram and superimposed theoretical gaussian model; (b) directional experimental variograms (0, 45, 90, 135°).*

La scelta del numero  $K$  degli intervalli (*lags*) è risultata strettamente collegata al numero  $N(h_k)$  di differenze  $D_{i,j}^2$  ricadenti in ciascuno di essi: maggiore è il numero  $N(h_k)$  per ogni intervallo (almeno 30; Journel & Huijbregts, 1978), più attendibili sono i punti che definiscono il variogramma; maggiore è il numero  $K$  degli intervalli, maggiore è il numero di punti che compone il variogramma. Nel caso di studio, la spazatura non uniforme tra i dati campionari, riflettendosi nella variabilità del numero di coppie contenute in ciascun intervallo, ha implicato una procedura di assegnazione per tentativi successivi fino al raggiungimento di una distribuzione giudicata soddisfacente in tutti i settori del variogramma.

Nel contempo, nonostante la buona strutturazione spaziale manifestata dai residui relativi alla quota freaticometrica, è stato possibile riconoscere in essi una discontinuità di comportamento in funzione della direzione angolare. L’anisotropia del processo spaziale è stata quindi investigata valutando le differenze esistenti in variogrammi calcolati lungo specifiche direzioni individuate da un angolo di giacitura (misurato in senso antiorario a partire dalla direzione E-W) e da un intervallo angolare di tolleranza (misurato su entrambi i lati della direzione di interesse). Il raffronto reciproco dei variogrammi sperimentali direzionali (Fig. 4b), tracciati nelle direzioni rispettivamente di 0, 45, 90 e 135° con intervallo di tolleranza pari a 22.5°, ha evidenziato l’anisotropia del fenomeno in esame, il cui significato può essere ricercato tanto nella genesi dell’area, quanto nei meccanismi di alimentazione e deflusso della falda (Avanzini & Beretta, 1994). Naturalmente, per un dato insieme di punti di misura, i *lags* dei variogrammi direzionali contengono un minor numero di punti rispetto agli stessi *lags* del variogramma omnidirezionale: ciò costituisce un fattore limitativo per piccoli *datasets* o per dati strutturati secondo schemi non conformi ad una direzione di anisotropia.

Un variogramma teorico adeguato a riprodurre la variabilità spaziale dei residui è stato successivamente ricercato sia in relazione al variogramma sperimentale

omnidirezionale, sia modellizzando l'anisotropia evidenziata dai variogrammi direzionali; in quest'ultimo caso, in particolare, è stato creato un "variogramma medio" per le due direzioni di continuità spaziale massima e minima. Particolare attenzione è stata riposta nell'adattamento in corrispondenza della parte iniziale del variogramma, in quanto maggiormente influente ai fini dei successivi risultati del *kriging*. A tale proposito, l'esistenza di un'intercetta sull'asse delle ordinate (effetto *nugget*) indica la presenza di una variabilità residua imputabile sia ad errori di misura (sistematici e/o casuali), sia alla presenza di una struttura spaziale di correlazione a piccola scala, inferiore a quella dell'intervallo minimo di campionamento. Un valore elevato del *nugget* rispetto al *sill* diminuisce la capacità predittiva del modello ed aumenta l'effetto di liscciamento ("smoothing") introdotto dal *kriging*.

La scelta del variogramma teorico "migliore" è stata quindi supportata dalla fase di *cross-validation*. Poiché il variogramma costituisce lo strumento per stimare nello spazio una variabile regionalizzata  $Z(x)$ , è lecito infatti definire uno stimatore di variogramma basato sulla minimizzazione della stima dell'errore commesso. L'errore di *cross-validation* corrispondente alla stima della misura  $z(x_i)$  è definito dalla relazione:

$$e_i = z(x_i) - \hat{z}(x_i) \quad (1)$$

dove  $\hat{z}(x_i)$  è la stima tramite *kriging* di  $z(x_i)$  effettuata sulla base delle  $(n - 1)$  misure rimanenti. Per selezionare i parametri di un variogramma teorico, un criterio basato sulla semplice minimizzazione della somma degli errori al quadrato non è sufficiente, in quanto il modello risultante può produrre stime non realistiche delle varianze di *kriging*  $\sigma_k^2(x_i)$  nei vari punti  $x_i$ . Per ovviare a tale inconveniente, viene introdotto un errore (adimensionale) di *kriging* ridotto:

$$\tilde{e}^2 = \frac{e_i^2}{\sigma_k^2(x_i)} \quad (2)$$

Pertanto, la procedura standard di *cross-validation* per valutare un variogramma teorico è esprimibile attraverso la minimizzazione del cosiddetto "root-mean-squared error" di *kriging*:

$$\min \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \right)^{0,5} \quad (3)$$

con la condizione che l'analogo errore ridotto ("reduced root-mean-squared error" RMSE) approssimi per quanto possibile il valore unitario:

$$\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{e}_i^2 \right)^{0,5} \approx 1 \quad (4)$$

E' auspicabile inoltre che gli errori ridotti (2) abbiano distribuzione approssimativamente normale; in caso contrario, si può rendere necessaria una opportuna

trasformazione dei dati.

Un valore non accettabile del RMSE può essere migliorato modificando dapprima il valore di *range* e quindi, solo se necessario, imponendo minimi spostamenti al *nugget*. A tale proposito, un aumento del *range* o una diminuzione del *nugget* produce in genere un decremento nella varianza del *kriging* e quindi un incremento del RMSE. Gli errori di calibrazione sono invece relativamente insensibili a piccoli aggiustamenti del valore di *sill*.

Nel caso di studio, la *cross-validation* è stata effettuata valutando alcune proprietà statistiche del set di errori di stima (Tab. 5), tra le quali (adottando la terminologia specifica utilizzata dai *softwares Surfer* e *GeoEas*):

a) *Zscore mean*: media dell'errore adimensionale ridotto:

$$Zscore = \tilde{e}_i = e_i / \sigma_k(x_i) \quad (5)$$

la cui bontà è quantificata dalla vicinanza al valore 0 (affinchè non esistano errori sistematici);

b) *Zscore standard deviation*: deviazione standard dell'errore *Zscore*, la cui bontà è quantificata dalla vicinanza al valore 1 (affinchè l'errore sia coerente con la varianza stimata);

c) *Median abs. deviation* e *standard deviation* dei residui;

d) *Coefficiente angolare* della retta di regressione e *coefficiente di correlazione*  $R^2$  relativi al grafico  $\hat{Z} = f(Z)$  (*accuracy plot*) dei valori stimati  $\hat{z}(x_i)$  in relazione ai valori misurati  $z(x_i)$ ; tale grafico consente di visualizzare la maggiore o minore dispersione dei punti attorno alla retta a 45°, in particolare, bassi valori del coefficiente angolare della retta di regressione possono essere legate a valori estremi, derivare da un sottocampionamento di certe aree o essere poco significativi quando il *dataset* di dati in esame è troppo limitato; in tal senso, la *cross-validation* si pone come strumento d'analisi a posteriori utile nella guida al campionamento dei dati e nell'ottimizzazione delle reti di rilevazione.

Tab. 5 – Risultati della fase di "cross-validation" relativa alla quota freaticca media annua (m s.l.m.) del sistema acquifero indifferenziato dell'alta pianura.

*Cross-validation results related to the average annual water table elevation of the high plain aquifer system.*

| Parametro                        | Valore |
|----------------------------------|--------|
| Zscore mean                      | -0.086 |
| Zscore standard deviation        | 1.498  |
| Median abs. deviation            | 3.581  |
| Standard deviation               | 57.285 |
| Coefficiente angolare $Z^*=f(Z)$ | 0.4946 |
| Coefficiente $R^2$               | 0.3381 |

Al termine della fase di validazione, il modello teorico prescelto è risultato essere di tipo gaussiano (tipico di variabili spazialmente molto continue), i cui parametri ed il cui andamento in sovrapposizione al variogramma

sperimentale omnidirezionale sono visualizzati in Fig. 4a.

L'elaborazione è stata ultimata attraverso la stima dei residui nei punti non campionati utilizzando il *kriging* quale tecnica di interpolazione spaziale. Il *kriging* viene definito come tecnica di interpolazione stocastica lineare pesata a media mobile basata su un algoritmo generalizzato ai minimi quadrati, che utilizza i variogrammi come funzioni peso. Il principale vantaggio nell'uso di tale tecnica consiste non solo nella predizione che essa è in grado di fornire, ma soprattutto nelle informazioni relative alla bontà della stima, la quale viene assicurata da criteri di ottimizzazione quali:

a) il carattere "unbiased" della stima  $\hat{Z}(x_0)$  di  $Z(x_0)$ :

$$E[\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)] = 0 \quad (6)$$

b) la minimizzazione algebrica della varianza della stima:

$$\text{Var}[\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)] = E[(\hat{Z}(x_0) - Z(x_0))^2] = \min \quad (7)$$

La generazione del processo di inferenza sui residui, descritti da una funzione aleatoria stazionaria, ha pertanto consentito, attraverso la definizione di una opportuna griglia spaziale e la risoluzione del sistema lineare delle equazioni del *kriging* per ciascun nodo della griglia prescelta, di ottenere una mappa georeferenziata della distribuzione dei residui stessi sul territorio di studio.

### Carta delle isofreatiche

I risultati delle elaborazioni sono rappresentati dalla mappa delle isofreatiche (in m s.l.m.) riportata in Fig. 5.

La carta della distribuzione dello scarto quadratico medio (Fig. 6) mostra valori massimi nei settori immediatamente a ridosso dei rilievi, in conseguenza di una locale ridotta densità dei punti di misura.

La superficie piezometrica varia tra le quote 170 e 10 m s.l.m., che corrispondono per il non saturo a spessori compresi tra i 70-75 m nelle aree a Nord di Udine, ai piedi dell'anfiteatro morenico, e 0 m nel settore più meridionale prossimo alle risorgive come ben evidenziato dalla carta della soggiacenza (Fig. 7)

In generale la direzione di flusso prevalente avviene verso i quadranti meridionali; appaiono evidenti almeno due assi di drenaggio, impostati sui settori ad elevata permeabilità relativa corrispondenti al torrente Corno e al sistema idrografico Torre-Natisone-Isonzo. Nel settore centrale dell'alta pianura (Fig. 5), a Sud di Udine, è evidente la presenza di uno spartiacque sotterraneo dovuto ad un sollevamento della base del quaternario in corrispondenza di una scaglia tettonica che porta le molasse mioceniche in affioramento (Regione Autonoma FVG, 2004). Dall'esame del campo di moto ricostruito è possibile evidenziare i rapporti intercorrenti tra acque superficiali e sotterranee; in particolare si osserva come il Fiume Tagliamento contribuisca all'alimentazione della falda sia nel settore orientale (provincia di Udine) che nel settore occidentale (provincia di Pordenone) dell'alta pianura.

I gradienti idraulici più elevati, dell'ordine di  $8 \cdot 10^{-3}$ ,

sono riscontrabili nell'area centro-orientale in corrispondenza del sistema idrografico Torre-Natisone, mentre gradienti dell'ordine di  $1 \div 2 \cdot 10^{-3}$  si incontrano, procedendo verso meridione, in corrispondenza della zona delle risorgive.

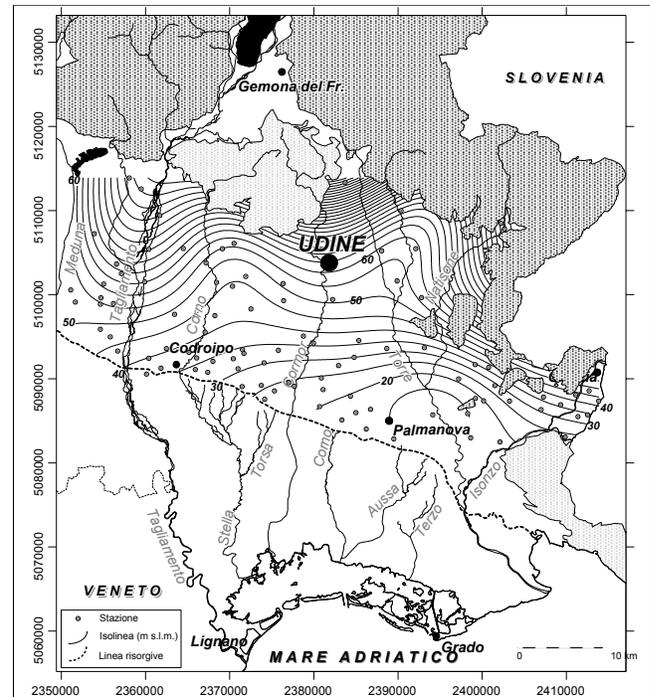


Fig. 5 – Carta dell'andamento freaticometrico (m s.l.m.) relativo alla falda dell'alta pianura.

*Isophreatimetric map of the high plain unconfined aquifer system. Dot symbols indicate the location of the piezometric gauge network.*

### Elaborazione dei dati piezometrici delle falde confinate della Bassa pianura

I dati piezometrici raccolti nel corso delle due campagne di misura condotte rispettivamente nei periodi gennaio-febbraio e settembre-ottobre 2003 sono stati elaborati con l'ausilio dei metodi geostatistici illustrati nel precedente paragrafo.

Ad eccezione della Falda A, raggiunta da 37 pozzi di misura (Tab. 4), il ridotto numero di stazioni di misura associate alle falde più profonde, ha motivato per queste ultime una analisi della correlazione spaziale dei dati senza alcuna operazione preliminare di *detrending*. La rimozione del *trend* precedentemente all'interpolazione spaziale geostatistica non è infatti opportuna nel caso in cui si disponga di *datasets* ridotti di dati misurati, oppure qualora i dati campionari presentino una distribuzione molto irregolare e con marcata variabilità locale.

L'analisi geostatistica relativa alla Falda A è stata invece condotta con riferimento al *dataset* dei residui derivanti dalla rimozione di una superficie di tendenza

polinomiale di 1° grado; tale superficie è stata quindi riassorbita nuovamente nell'ambito del processo di inferenza successivamente alla determinazione dei valori interpolati dei residui onde riottenere i dati piezometrici

originari. La Tab. 6 sintetizza i parametri dei variogrammi teorici adottati nell'ambito dell'analisi geostatistica dei livelli piezometrici del sistema confinato della BPF.

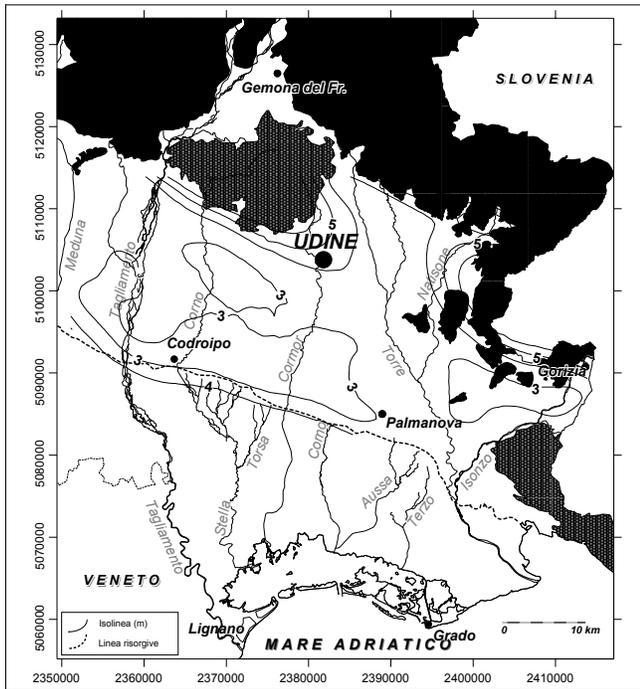


Fig. 6 – Carta della distribuzione dello scarto quadratico medio (m) relativo alla ricostruzione freatimetrica dell'alta pianura.  
Standard deviation map (m) of the high plain phreatimetry

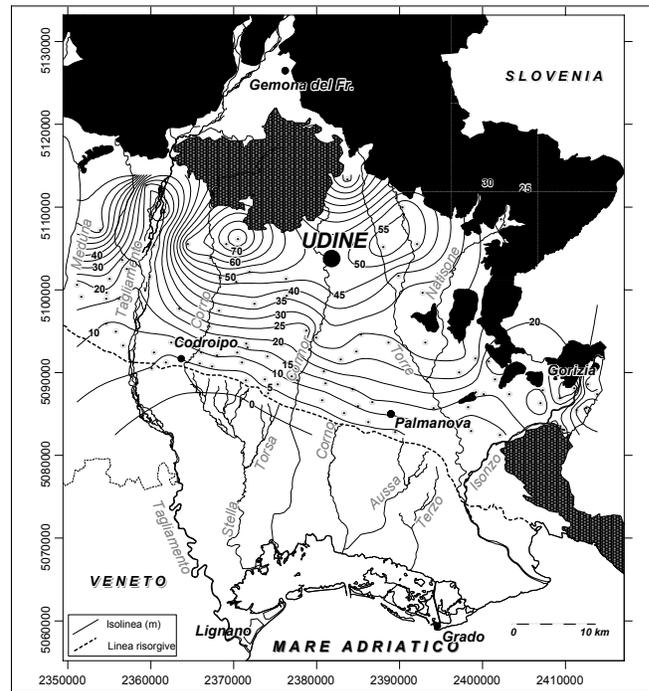


Fig. 7 – Carta della soggiacenza della falda freatica dell'alta pianura.  
Depth to water map (-m from the round surface) of the high plain aquifer system.

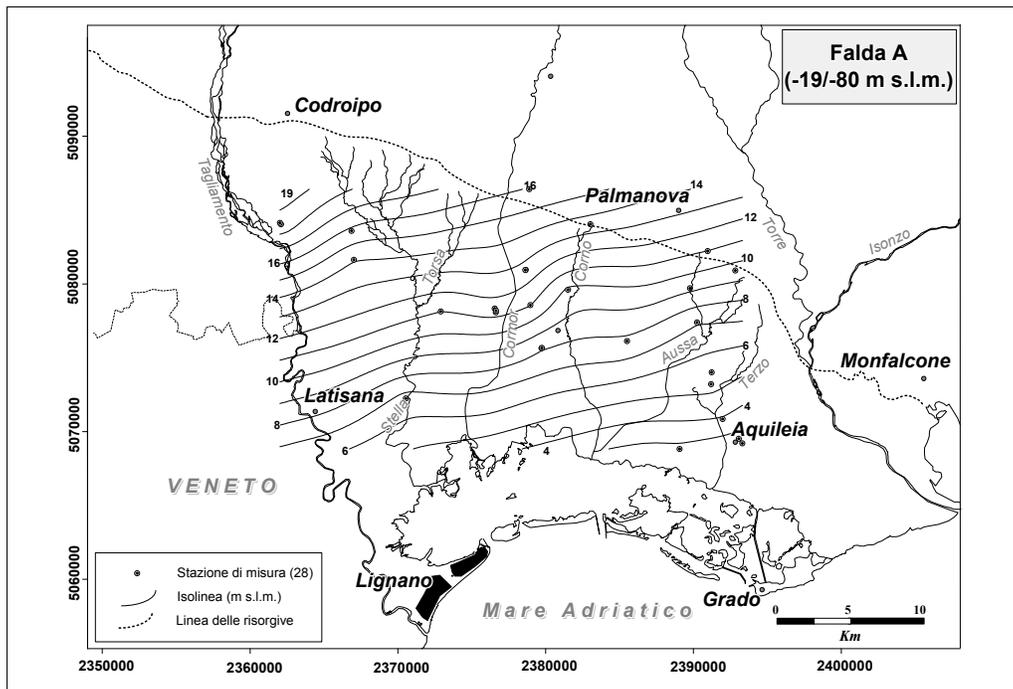


Fig. 8 – Falda A: carta piezometrica relativa al periodo settembre-ottobre 2003.  
Aquifer A: hydraulic head contour lines (September-October 2003).

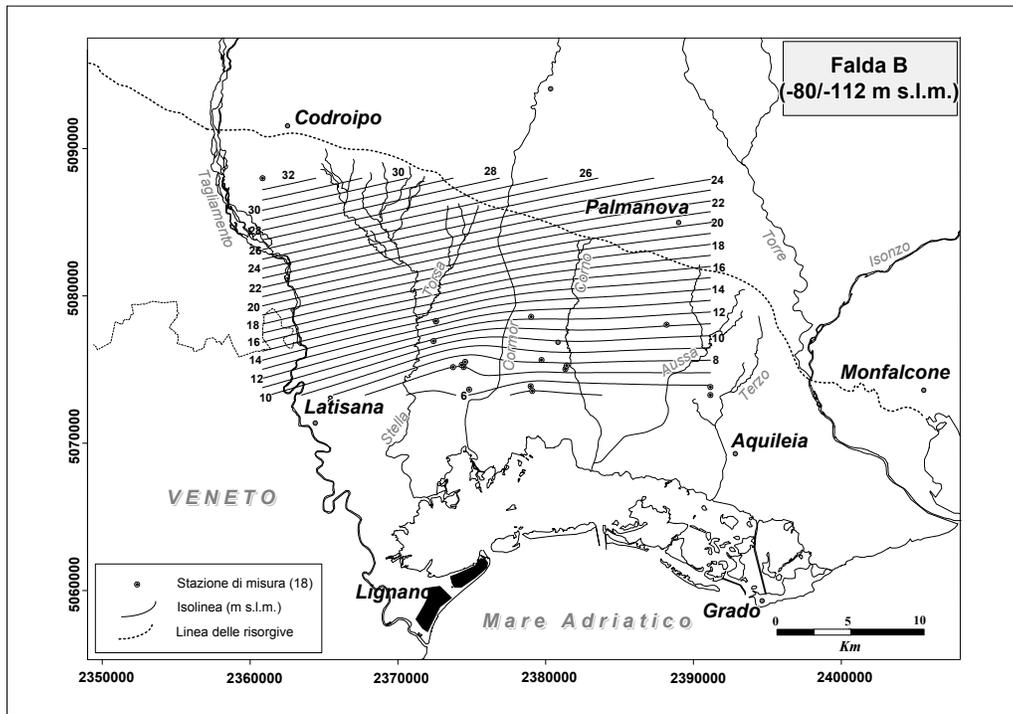


Fig. 9 – Falda B: carta piezometrica relativa al periodo settembre-ottobre 2003.  
*Aquifer B: hydraulic head contour lines (September-October 2003).*

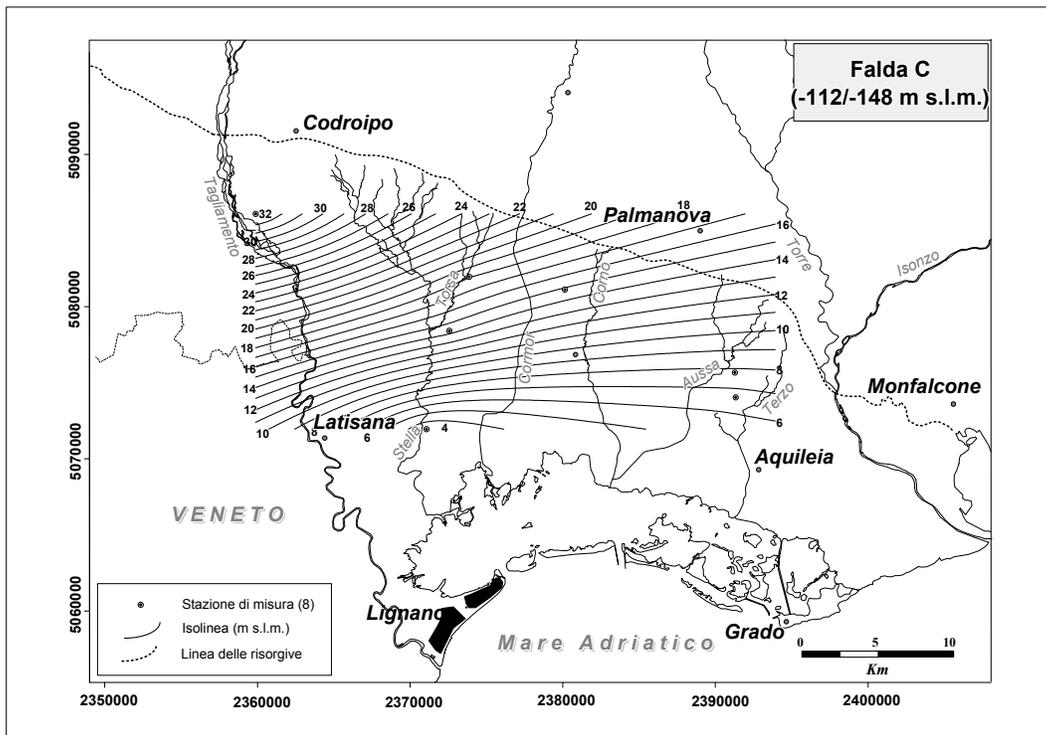


Fig. 10 – Falda C: carta piezometrica relativa al periodo settembre-ottobre 2003.  
*Aquifer C: hydraulic head contour lines (September-October 2003).*

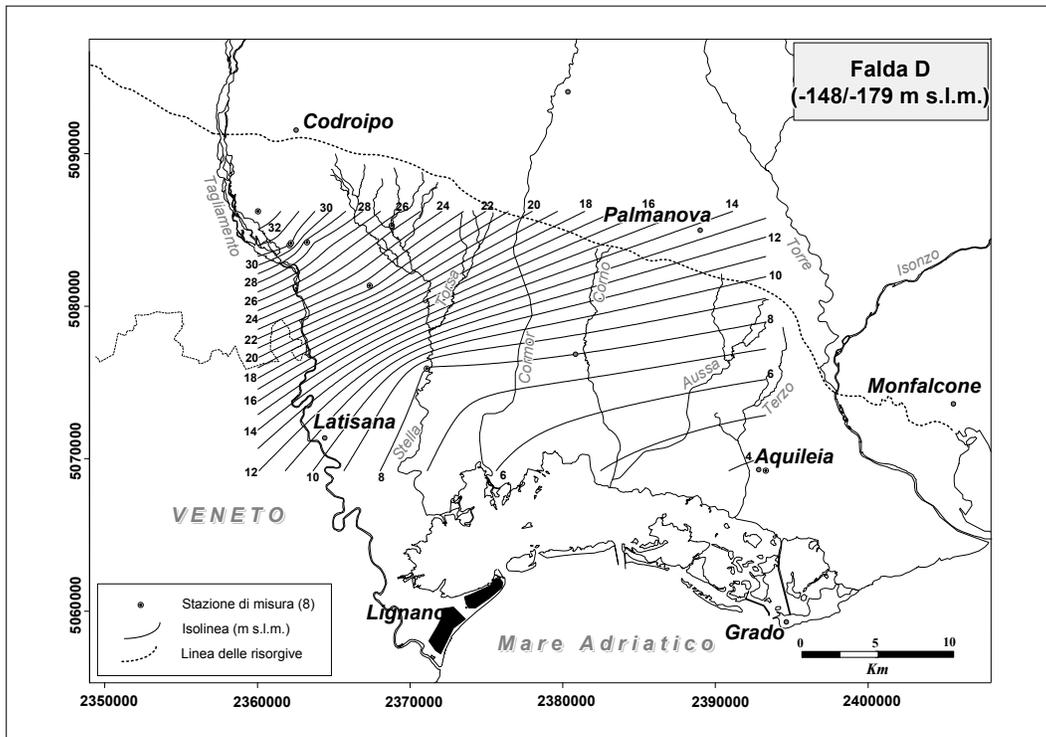


Fig. 11 – Falda D: carta piezometrica relativa al periodo settembre-ottobre 2003.  
*Aquifer D: hydraulic head contour lines (September-October 2003).*

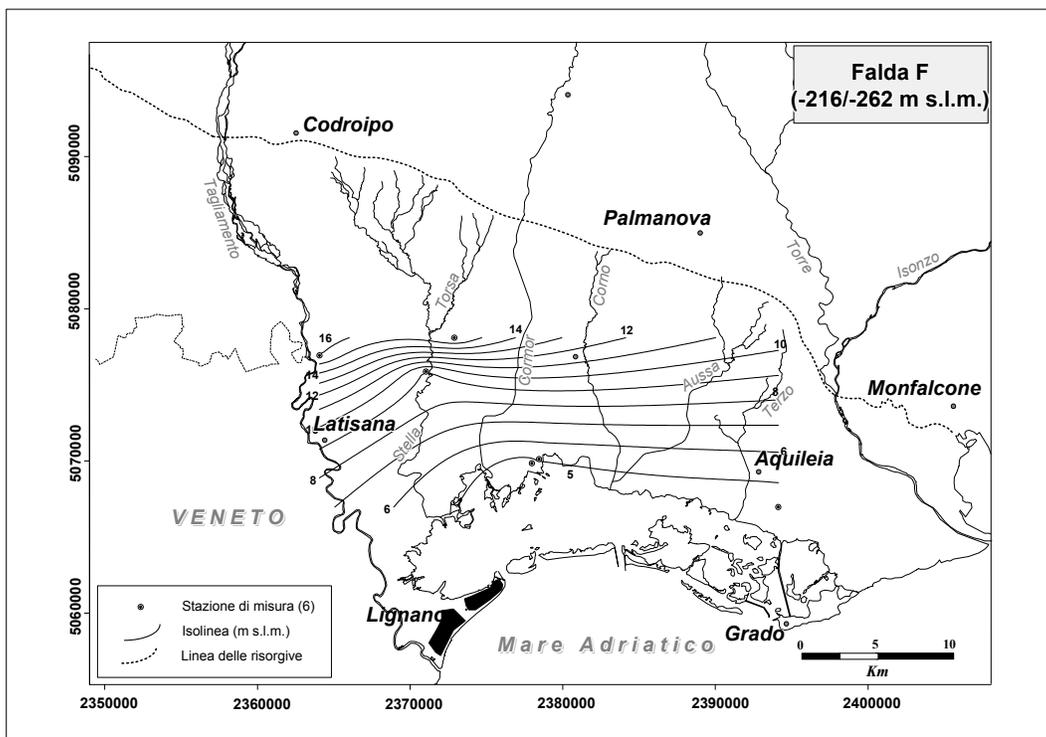


Fig. 12 – Falda F: carta piezometrica relativa al periodo settembre-ottobre 2003.  
*Aquifer F: hydraulic head contour lines (September-October 2003).*

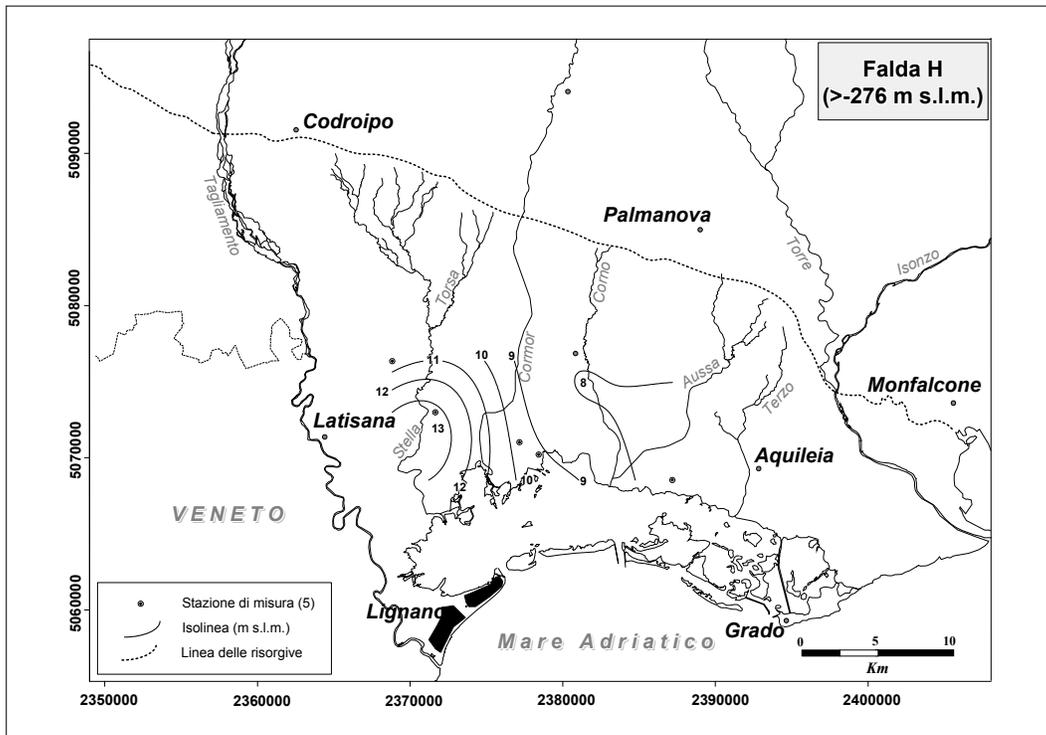


Fig. 13 – Falda H: carta piezometrica relativa al periodo settembre-ottobre 2003.  
 Aquifer H: hydraulic head contour lines (September-October 2003).

I risultati dell’elaborazione svolta trovano la loro sintesi grafica nelle carte piezometriche relative alle Falde A, B, C, D, F ed H (Fig. 8-13) e riferite al periodo settembre-ottobre 2003; durante questa campagna di misura si è potuto infatti disporre di un significativo incremento numerico e di una maggiore omogeneità di distribuzione dei punti di controllo rispetto alla campagna precedente eseguita nel periodo gennaio-febbraio 2003.

Per le Falde E e G, non è stato possibile redigere degli elaborati cartografici in considerazione del limitato numero di punti di misura a disposizione.

In ogni carta è indicata l’ubicazione dei punti di misura; il numero di pozzi utilizzati per ogni elaborazione è riportato in legenda; le isolinee (in m s.l.m.) sono tracciate con equidistanza pari a 1 m.

Nelle carte piezometriche delle Falde A, B, C, D ed F, è possibile riconoscere una direzione di deflusso preferenziale

ad andamento NNW-SSE. La rappresentazione relativa alle falde più profonde (oltre -200 m s.l.m.) è stata sicuramente condizionata dal limitato numero di dati disponibili, ma è significativo notare l’andamento peculiare della Falda H, riconducibile presumibilmente ad un diverso circuito di alimentazione.

Tab. 7 – Gradiente idraulico medio calcolato per le Falde A, B, C, D ed F del sistema acquifero confinato della bassa pianura.  
 Average hydraulic gradient calculated for Aquifers A, B, C, D and F of the low plain confined aquifer system.

| Falda | Profondità (m s.l.m.) | Gradiente (i)       |
|-------|-----------------------|---------------------|
| A     | -19 / -80             | $1,0 \cdot 10^{-3}$ |
| B     | -80 / -112            | $1,8 \cdot 10^{-3}$ |
| C     | -112 / -148           | $1,9 \cdot 10^{-3}$ |
| D     | -148 / -179           | $2,0 \cdot 10^{-3}$ |
| F     | -216 / -262           | $8,2 \cdot 10^{-4}$ |

Tab. 6 – Tipologia e parametri dei variogrammi teorici adottati nell’analisi geostatistica dei livelli piezometrici del sistema acquifero confinato della bassa pianura. [E = error variance (Nugget effect); M = micro variance (Nugget effect); S = scale; L = lenght; P = power; Sl = slope; A = anisotropy ratio; an = anisotropy angle].

Theoretical variograms referred to the hydraulic head geostatistical analysis of the low plain confined aquifer system.

| Acquifero | Variogramma teorico | Parametri   |
|-----------|---------------------|---|
| A         | Sferico             | E = 1.5; M = 0; S = 0.98; L = 6500; A = 1; an = 0           |
| B         | Power               | E = 3; M = 0; S = 4.5; L = 3500; P = 1.8; A = 2; an = 23.55 |
| C         | Lineare             | E = 0; M = 0; Sl = 0.004; A = 2; an = 5.688                 |
| D         | Lineare             | E = 0; M = 0; Sl = 0.009; A = 2; an = 16.85                 |
| F         | Lineare             | E = 0; M = 0; Sl = 0.002; A = 2; an = 179.1                 |
| H         | Gaussiano           | E = 2.1; M = 0; S = 30; L = 7500; A = 1; an = 0             |

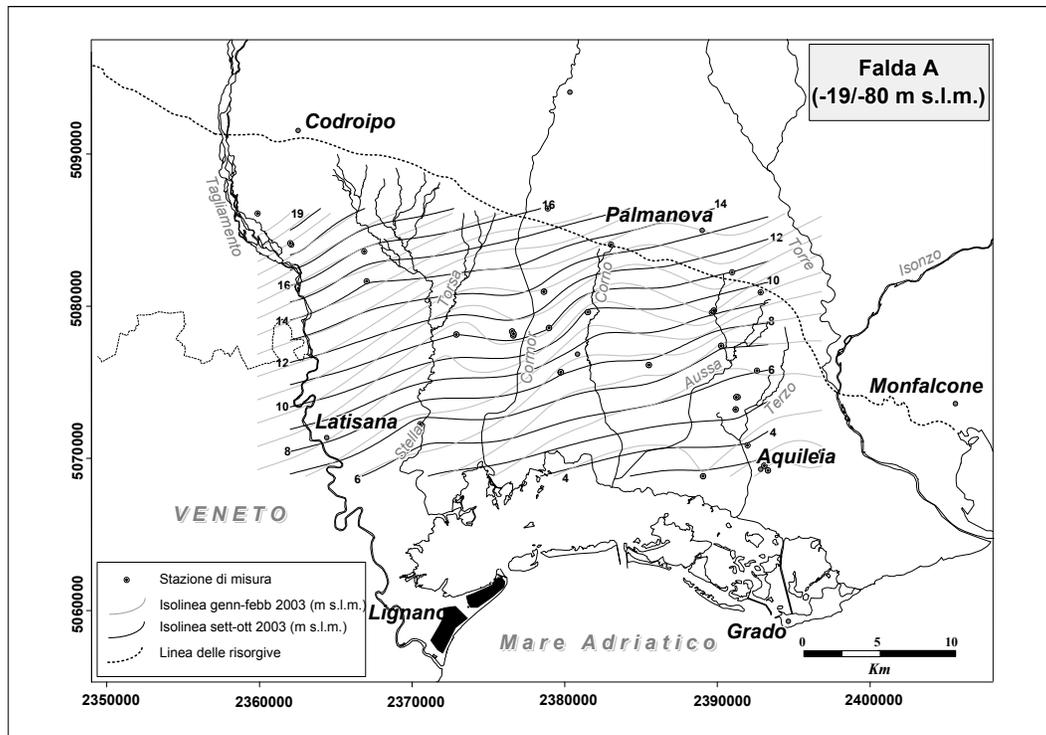


Fig. 14 – Falda A: confronto tra gli andamenti piezometrici relativi ai due periodi gennaio-febbraio 2003 e settembre-ottobre 2003.  
*Aquifer A: comparison of the hydraulic head distributions related to the periods January-February 2003 and September-October 2003.*

La Fig. 14 mostra il generale arretramento ed abbassamento (2-6 m) del livello piezometrico osservato durante la seconda campagna di misura; questo fenomeno particolarmente evidente in corrispondenza della Falda A più superficiale, si è verificato in conseguenza del periodo siccitoso estivo.

La realizzazione delle carte piezometriche ha consentito il calcolo del gradiente idraulico per le Falde A, B, C, D ed F, i cui valori sono riassunti in Tab. 7.

#### Dati climatici

Sono stati elaborati i dati pluviometrici e termometrici relativi a 61 stazioni di osservazione dell'ex Servizio Idrografico (Tab. 8). per ricavare la precipitazione media annua e l'evapotraspirazione reale media annua sull'area di studio al fine di stimare l'entità degli apporti diretti al sistema idrogeologico dell'alta pianura.

Tab. 8 – Le stazioni termo-pluviometriche della Pianura friulana prese in considerazione.  
*Rain and temperature gauges considered in the Friuli plain.*

| Codice stazione | Comune                | Quota (m slm) | X       | Y       | Precipitazione media annua (mm) | Temperatura media annua (°C) |
|-----------------|-----------------------|---------------|---------|---------|---------------------------------|------------------------------|
| B001            | Resia                 | 625           | 2396825 | 5129325 | 3053,1                          |                              |
| B002            | Gorizia               | 45            | 2411175 | 5087740 | 1379,6                          | 13,3                         |
| B003            | Lusevera              | 627           | 2387025 | 5130275 | 2934,4                          |                              |
| B004            | Vedronza              | 328           | 2385650 | 5124700 | 2312,9                          | 10,6                         |
| B005            | Tarcento              | 287           | 2383437 | 5120925 | 1756,6                          |                              |
| B006            | Taipana               | 389           | 2391750 | 5125100 | 2950,1                          |                              |
| B007            | Nimis                 | 388           | 2389887 | 5119300 | 2098,0                          |                              |
| B008            | Attimis               | 185           | 2390225 | 5114200 | 1901,9                          | 12,3                         |
| B009            | Reana del Rojale      | 174           | 2385345 | 5114580 | 1827,7                          |                              |
| B012            | Pulfero               | 203           | 2402025 | 5117375 | 2243,6                          |                              |
| B013            | Pulfero               | 188           | 2403100 | 5114425 | 2152,0                          |                              |
| B014            | Drenchia              | 694           | 2413675 | 5114450 | 2264,6                          |                              |
| B015            | Grimacco              | 253           | 2411325 | 5112350 | 2065,4                          |                              |
| B016            | Montemaggiore         | 957           | 2406800 | 5116750 | 2588,0                          | 8,8                          |
| B018            | Cividale del Friuli   | 132           | 2398190 | 5105575 | 1553,9                          | 11                           |
| B019            | Drenchia              | 724           | 2415225 | 5113275 | 2269,0                          |                              |
| D037            | S. Daniele del Friuli | 188           | 2365885 | 5113005 | 1497,1                          |                              |

|       |                           |     |         |         |        |      |
|-------|---------------------------|-----|---------|---------|--------|------|
| D038  | Pinzano al Tagliamento    | 200 | 2361300 | 5116325 | 1663,1 | 12,8 |
| D041  | Spilimbergo               | 135 | 2356250 | 5109480 | 1663,6 |      |
| D042  | S. Martino al Tagliamento | 72  | 2354370 | 5099565 | 1435,5 |      |
| E001  | Udine                     | 120 | 2380760 | 5105415 | 1531,9 |      |
| E002  | Udine                     | 121 | 2384360 | 5102725 | 1416,6 | 13   |
| E004  | Cormons                   | 52  | 2400805 | 5090200 | 1382,2 |      |
| E006  | Pozzuolo del Friuli       | 64  | 2384573 | 5093858 | 1316,4 |      |
| E007  | Mortegliano               | 41  | 2378905 | 5089830 | 1320,6 |      |
| E012  | Bicinicco                 | 37  | 2383135 | 5088545 | 1256,8 |      |
| E010  | Palmanova                 | 30  | 2388085 | 5085595 | 1224,5 |      |
| E013  | Castions di Strada        | 23  | 2379050 | 5085530 | 1251,1 |      |
| E011  | Gonars                    | 18  | 2385375 | 5083170 | 1260,5 |      |
| E014  | Castions di Strada        | 15  | 2377130 | 5082355 | 1180,9 |      |
| E015  | Cervignano del Friuli     | 3   | 2391045 | 5075760 | 1153,0 |      |
| E018  | S. Giorgio di Nogaro      | 5   | 2380970 | 5077730 | 1136,6 |      |
| E016  | Torviscosa                | 3   | 2385765 | 5076270 | 1196,2 | 13,2 |
| E026  | Fiumicello                | 3   | 2396705 | 5070200 | 1057,0 |      |
| E057  | Aquileia                  | 4   | 2392904 | 5069398 | 994,7  |      |
| E021  | Aquileia                  | 0   | 2396770 | 5066665 | 1177,2 |      |
| E022  | Grado                     | 1   | 2395000 | 5059390 | 970,9  | 14,2 |
| E020  | Marano Lagunare           | 3   | 2379315 | 5070690 | 1050,4 |      |
| E026  | Torviscosa                | 3   | 2383375 | 5070335 | 1072,9 |      |
| E023  | Bonifica Vittoria         | 2   | 2403040 | 5065620 | 985,9  | 13,4 |
| E029  | Moruzzo                   | 246 | 2375055 | 5109023 | 1608,7 | 12,3 |
| E030  | Rive d'Arcano             | 148 | 2367600 | 5112288 | 1540,0 |      |
| E031  | Flaibano                  | 100 | 2364810 | 5102171 | 1346,8 |      |
| E032  | Sedegliano                | 80  | 2360460 | 5099085 | 1348,7 |      |
| E037  | Lestizza                  | 47  | 2370555 | 5092805 | 1343,8 |      |
| E036  | Codroipo                  | 40  | 2363950 | 5092275 | 1181,2 |      |
| E038  | Talmassons                | 30  | 2374160 | 5088205 | 1198,5 | 13,4 |
| E039  | Varmo                     | 18  | 2363300 | 5082650 | 1023,2 |      |
| E040  | Rivignano                 | 11  | 2371525 | 5081600 | 1120,2 |      |
| E041  | Teor                      | 4   | 2370930 | 5075775 | 1162,4 |      |
| E044  | Latisana                  | 6   | 2365270 | 5070115 | 1042,8 |      |
| E045  | Precenico                 | 2   | 2369415 | 5064195 | 1003,8 |      |
| E046  | Palazzolo dello Stella    | 2   | 2372250 | 5066575 | 1007,7 |      |
| E048  | Lignano Sabbiadoro        | 1   | 2371835 | 5060490 | 1017,1 |      |
| E050  | Lignano Sabbiadoro        | 1   | 2373745 | 5060975 | 958,4  | 13,9 |
| G002  | Casarsa della Delizia     | 51  | 2356775 | 5092675 | 1350,9 |      |
| G003  | S. Vito al Tagliamento    | 30  | 2353590 | 5086530 | 1181,2 |      |
| V0302 | Portogruaro               | 6   | 2351499 | 5070658 | 1010,9 | 13,8 |
| V0303 | S.Michele al Tagliamento  | 6   | 2365161 | 5059300 | 998,0  |      |
| V0301 | S.Michele al Tagliamento  | 10  | 2361641 | 5076409 | 1132,0 |      |
| V0305 | Portogruaro               | 3   | 2360306 | 5061449 | 930,6  |      |

L'approccio prende spunto dalla ricostruzione della distribuzione delle precipitazioni medie annue sull'area effettuata analizzando le serie storiche di dati pluviometrici relative a 61 stazioni di osservazione dell'ex Servizio Idrografico. Per tali stazioni, ubicate all'interno ed immediatamente all'esterno della pianura friulana, sono stati considerati i valori dell'altezza di precipitazione annua (mm), sia pubblicati negli Annali Idrologici per il periodo 1974-1999, sia i dati inediti forniti direttamente dall'Unità Operativa Idrografica di Udine relativamente al periodo 2000-2003.

I valori campionari sono stati omogeneizzati e successivamente mediati sul trentennio 1974-2003 per ciascuna delle stazioni di misura. Analogamente a quanto esposto per i livelli di falda, l'elaborazione dei dati pluviometrici è stata eseguita con l'ausilio delle tecniche geostatistiche. In particolare, l'interpolazione preliminare dei dati disponibili mediante "minimum curvature", il conseguente riconoscimento di un trend di variazione spaziale in direzione Nord-Sud ed il significativo numero di

stazioni di controllo presenti sul territorio, hanno legittimato un'operazione di *detrending*; la superficie di tendenza è stata identificata anche in tal caso attraverso uno sviluppo polinomiale di 1° ordine. Il variogramma sperimentale omnidirezionale, il variogramma teorico relativo prescelto, i suoi parametri e le stime della *cross-validation* sono visibili in Fig. 15 e in Tab. 9 rispettivamente.

Tab. 9 - Risultati della fase di "cross-validation" relativa all'altezza di precipitazione media annua (mm) sulla Pianura friulana.

*Cross-validation results related to the average annual precipitation on the Friuli plain.*

| Parametro                        | Valore  |
|----------------------------------|---------|
| Zscore mean                      | -0.001  |
| Zscore standard deviation        | 0.954   |
| Median abs. deviation            | 54.339  |
| Standard deviation               | 106.826 |
| Coefficiente angolare $Z^*=f(Z)$ | 0.7213  |
| Coefficiente $R^2$               | 0.78    |

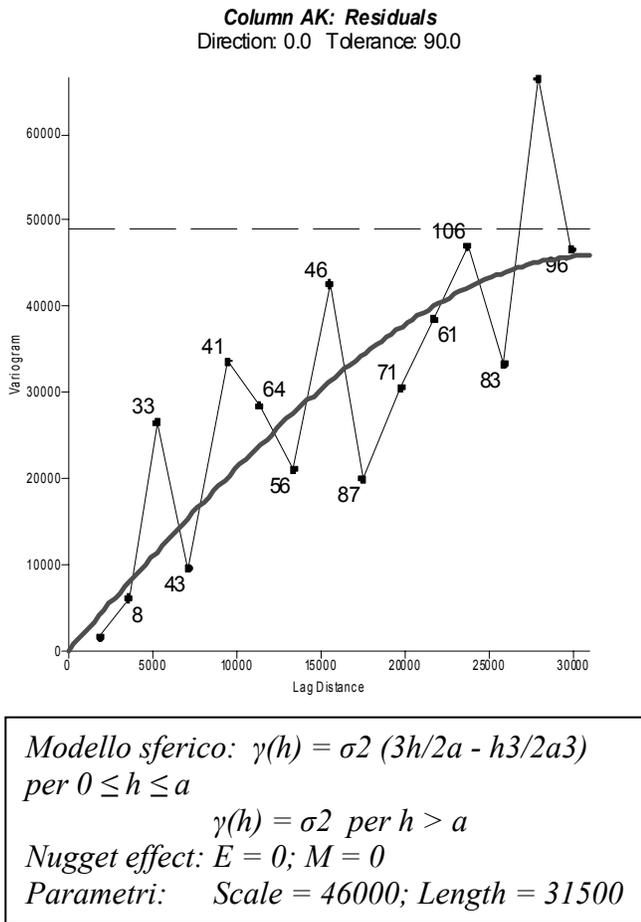


Fig. 15 - Stima della struttura di correlazione spaziale dell'altezza di precipitazione media annua (mm) sulla Pianura friulana, condotta con riferimento al dataset dei residui derivante dall'operazione di detrending: variogramma sperimentale omnidirezionale e variogramma teorico sferico sovrapposto.

*Spatial correlation structure of the average annual precipitation on the Friuli plain, referred to the residuals coming from detrending: omnidirectional experimental variogram and superimposed theoretical spherical model.*

Il risultato dell'elaborazione è sintetizzato nella mappa delle isoiete (Fig. 16). La carta evidenzia la notevole variabilità nell'area di studio della grandezza considerata: a partire dalla zona prealpina orientale, caratterizzata dalle massime precipitazioni (oltre 3.000 mm), i valori decrescono procedendo verso S, passando dai 1.900 mm a ridosso della zona prealpina orientale ai 1.000 mm lungo la fascia costiera. L'area dell'alta pianura risulta compresa tra le isoiete 1.800 e 1.200, quella della bassa pianura tra 1.200 e 1.000.

La precipitazione media annua è di 1.406 mm/anno sull'Alta pianura e di 1.109 mm/anno sulla Bassa pianura.

Il computo dell'evapotraspirazione reale (Er) è stato condotto a partire dalle 14 stazioni meteorologiche dislocate sul territorio di studio provviste contemporaneamente di

dati pluviometrici e termometrici, sulla base della procedura seguente:

- 1) calcolo, in corrispondenza di ciascuna stazione, delle precipitazioni medie mensili e della precipitazione media annua relativamente al periodo 1974-2003;
- 2) valutazione, sulla base dei dati desumibili dagli Annali Idrologici e dei dati inediti forniti dall'Unità Operativa Idrografica di Udine, delle temperature medie mensili e della temperatura media annua in corrispondenza delle predette stazioni nel periodo isocrono 1974-2003;

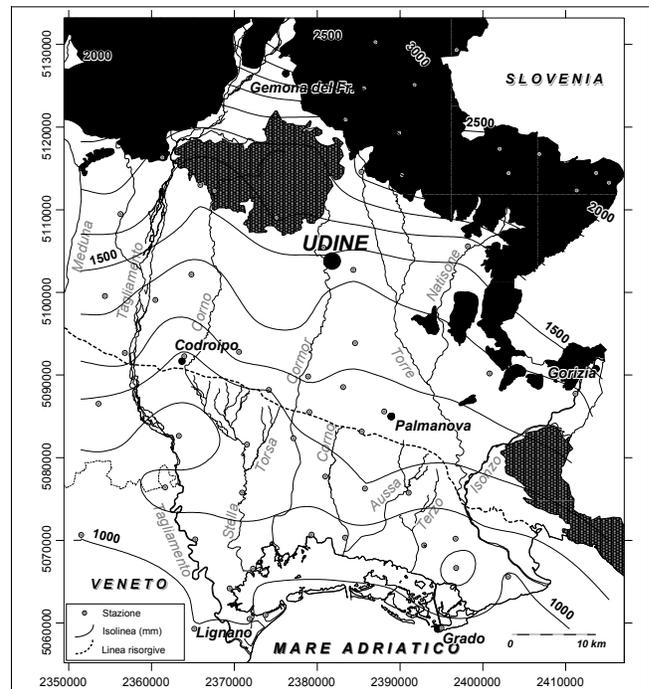


Fig. 16 – Carta delle isoiete.

*Map of distribution of the average annual precipitation on the Friuli plain. Dot symbols indicate the location of the rain gauges.*

- 3) calcolo, in corrispondenza di ciascuna stazione, della temperatura media annua corretta in funzione della precipitazione:

$$\bar{T}_C = \frac{\sum_i \bar{P}_i \cdot \bar{T}_i}{\sum_i \bar{P}_i} \tag{8}$$

essendo:  $\bar{T}_i$  = temperatura media mensile (°C);  $\bar{P}_i$  = precipitazione media mensile (mm);

- 4) estrapolazione algebrica dell'equazione della retta di interpolazione (regressione lineare) che descrive la variazione della temperatura corretta (in °C) con la quota altimetrica (in m s.l.m.):

$$\bar{T}_C = f(q) \tag{9}$$

I valori di temperatura corretta diagrammati in funzione della quota evidenziano una sostanziale omogeneità del

regime termometrico sull'area studiata e quindi i punti sono stati interpolati con un'unica retta di regressione lineare;  
 5) attribuzione, a ciascuna delle rimanenti 47 stazioni pluviometriche competenti all'area investigata, della temperatura ricostruita mediante il grafico (9);  
 6) calcolo, per ciascuna delle 61 stazioni pluviometriche considerate, del valore relativo di evapotraspirazione reale mediante la formula di Turc (1954):

$$Er = \frac{\bar{P}}{\sqrt{0.9 + \frac{\bar{P}^2}{L^2}}} \text{ (mm/anno)} \quad (10)$$

dove:  $\bar{P}$  = precipitazione media annua (mm) relativa alla stazione considerata;  $L = 300 + 25 T_C + 0,05 T_C^3$  = potere evaporante dell'atmosfera.

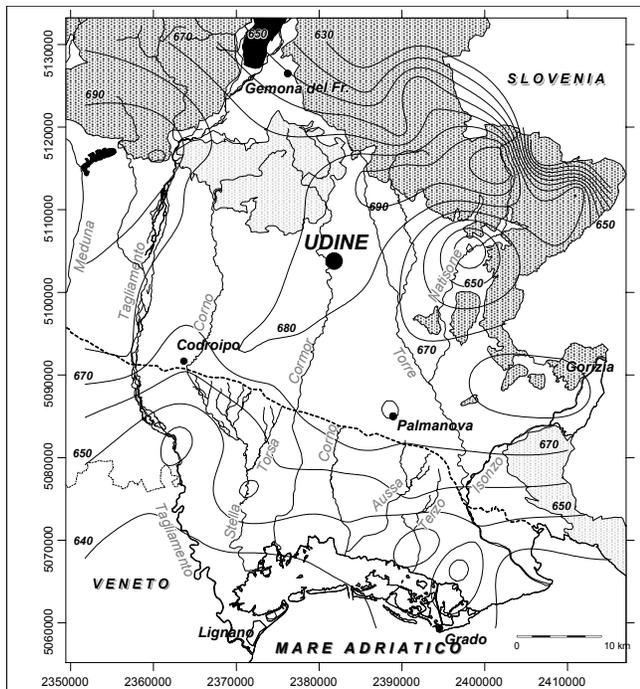


Fig. 17 – Mappa dell'evapotraspirazione (mm) nella Pianura friulana.

*Evapotranspiration map (mm) related to the Friuli plain.*

I valori di  $Er$  sono stati elaborati mediante le procedure geostatistiche già descritte; la Fig. 17 mostra la carta dell'evapotraspirazione media annua, in mm, sul territorio della Pianura friulana. Nella bassa pianura l'evapotraspirazione varia con un incremento da Sud verso Nord, mentre nell'alta pianura le variazioni avvengono in senso Est Ovest in un intervallo comparso tra 640 mm e 690 mm.

L'evapotraspirazione reale media annua, calcolata come media pesata sull'area, risulta pari a 675 mm nell'alta pianura ed a 652 mm nella bassa pianura. Si nota, in

particolare per l'alta pianura, che queste perdite costituiscono il 52% delle precipitazioni.

Data l'elevata permeabilità del materasso alluvionale dell'alta pianura, che determina in condizioni normali il pressoché totale assorbimento delle portate liquide superficiali, si può considerare una infiltrazione efficace coincidente con la precipitazione efficace e quindi pari a 731 mm/anno (839 milioni di  $m^3$ /anno).

### Valutazione della ricarica del sistema acquifero della bassa pianura

Una quantificazione diretta della ricarica di un acquifero comporta l'acquisizione di un'insieme complesso ed esteso di dati (afflussi e deflussi naturali, interazione tra corpi idrici superficiali e profondi, prelievi e restituzioni) difficilmente reperibili sul territorio e di regola corrispondenti a quantità coinvolte in processi sinergici di interazione.

Con riferimento alla bassa pianura, pertanto, l'entità della ricarica media annua del sistema acquifero è stata valutata in modo indiretto attraverso la piezometria, calcolando il volume d'acqua in uscita dall'acquifero indifferenziato dell'alta pianura.

Considerando la linea delle risorgive come lo sfioratore naturale della falda dell'alta pianura e suddividendo il territorio in opportuni settori sulla base della morfologia piezometrica delineata dalla carta delle isofreatiche, è stata calcolata per ogni settore la portata in uscita. Utilizzando i dati disponibili in letteratura (Gambolati, 1985; Gambolati & Pini, 1985a, 1985b), è stato scelto un valore medio di conducibilità idraulica ( $K$ ) pari a  $2,5 \cdot 10^{-3}$  m/s per l'acquifero freatico in prossimità della linea delle risorgive; in corrispondenza della sezione di calcolo sono stati valutati gli spessori del saturo sulla base della carta freatimetrica (Fig. 5) e della carta delle isopache del Quaternario (Regione Autonoma FVG, 2004; Calore et al., 1995; Cavallin & Martinis, 1980).

La sommatoria dei contributi di portata provenienti dai singoli settori ha consentito di quantificare in circa  $106 \text{ m}^3/\text{s}$  (corrispondenti a 3.343 milioni di  $m^3$ /anno) la portata totale in uscita dal sistema freatico dell'alta pianura tra i Fiumi Tagliamento ed Isonzo.

Tale dato è particolarmente significativo se confrontato con l'infiltrazione efficace calcolata precedentemente, che risulta pari a  $26,6 \text{ m}^3/\text{s}$ ; ne consegue dunque che l'alimentazione della falda freatica dell'Alta pianura proviene solo per il 25% dalle precipitazioni e per il restante 75% da altri apporti (perdite in subalveo dei corsi d'acqua).

La portata delle risorgive è stata valutata nel corso degli anni prevalentemente sulla base di stime (Consorzio di Bonifica Ledra-Tagliamento, 1960; Dal Piaz et al., 1965; Vecchia et al., 1968; De Marchi, 1930; Tonini, 1906; Feruglio, 1925), in valori compresi tra  $45 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $115 \text{ m}^3/\text{s}$ ; non essendo disponibili dati recenti di portata è stato assunto il valore medio di  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  calcolato sulla base di

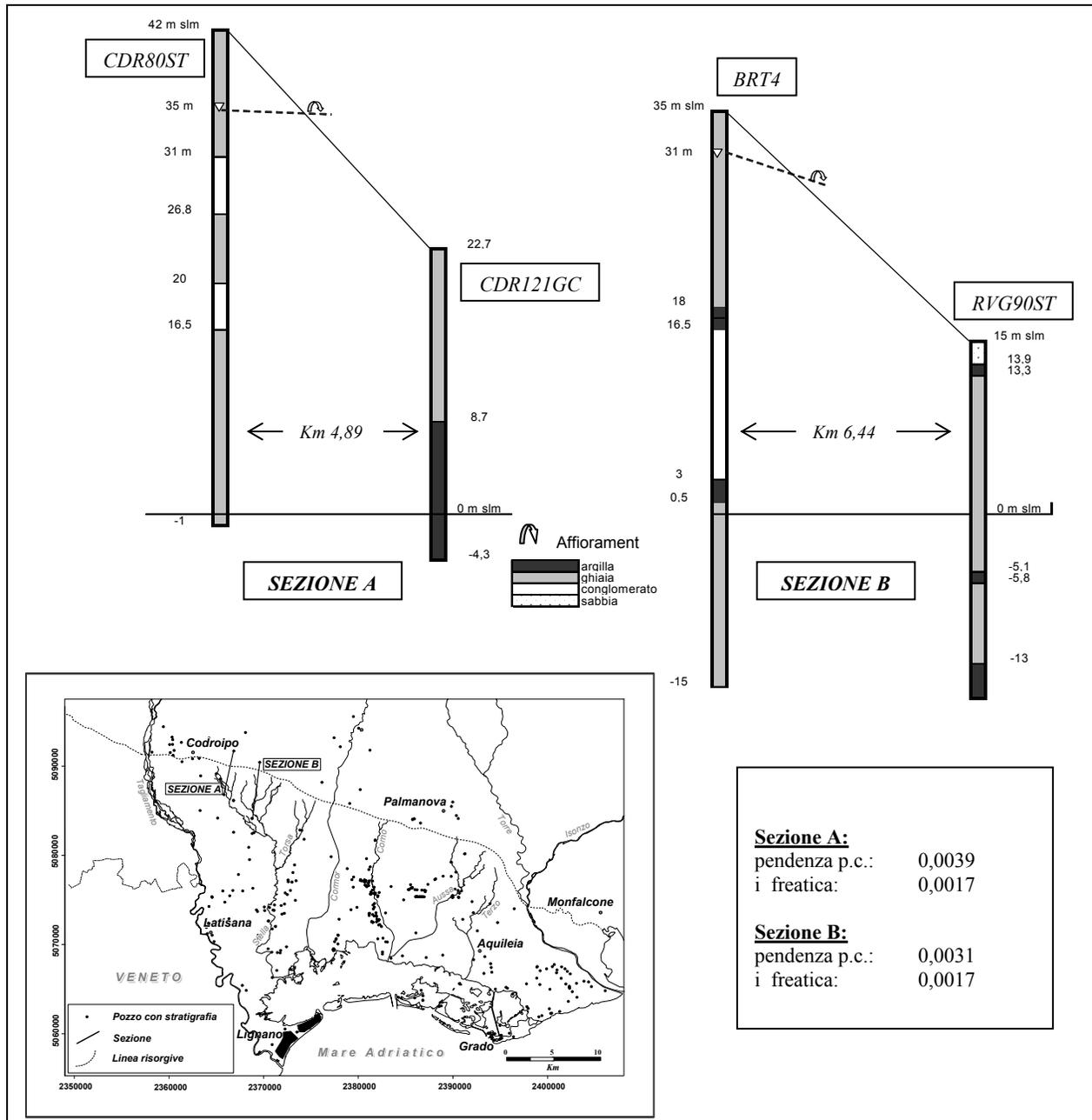


Fig. 18 - Sezioni idrogeologiche A e B tracciate a cavallo della linea delle risorgive nelle quali sono state ubicate le posizioni delle emergenze sulla base della pendenza del piano campagna (p.c.) e del gradiente idraulico (i).  
*The hydrogeologic section shows the position of spring line and the hydraulic gradient value (i).*

misure dirette (Consorzio di Bonifica Ledra-Tagliamento, 1982). Pertanto la portata in ingresso per via sotterranea nel sistema idrogeologico della BPF ammonta a circa 26 m<sup>3</sup>/s, pari a 820 milioni di m<sup>3</sup>/anno.

### Confronto tra ricarica e prelievi

Il sistema acquifero della bassa pianura è interessato da una rete capillare di pozzi idrici adibiti ad uso civile, industriale,

agricolo ed ittigenico (Granati et al., 2000); in alcuni Comuni, privi di una rete pubblica di acquedotto, i pozzi privati costituiscono l'unica fonte di approvvigionamento idrico.

Una valutazione del volume di acqua estratto annualmente dal sottosuolo della bassa pianura in Provincia di Udine (Granati et al., 2000), condotta sulla base dei dati di portata desumibili da un campione di circa 12000 pozzi, ha consentito di stimare in circa 701 milioni di m<sup>3</sup>/anno il

prelievo totale gravante sull'intero sistema acquifero, di cui 175 milioni di m<sup>3</sup>/anno, pari al 25%, dalla falda freatica + sistema di transizione e 526 milioni di m<sup>3</sup>/anno, pari al 75%, il volume idrico estratto annualmente dal solo sistema

acquifero confinato (Martelli et al., 2004). La Tab. 10 evidenzia la ripartizione di tale volume tra le singole falde del sistema confinato: l'84% del prelievo totale grava sulle Falde A e B più superficiali.

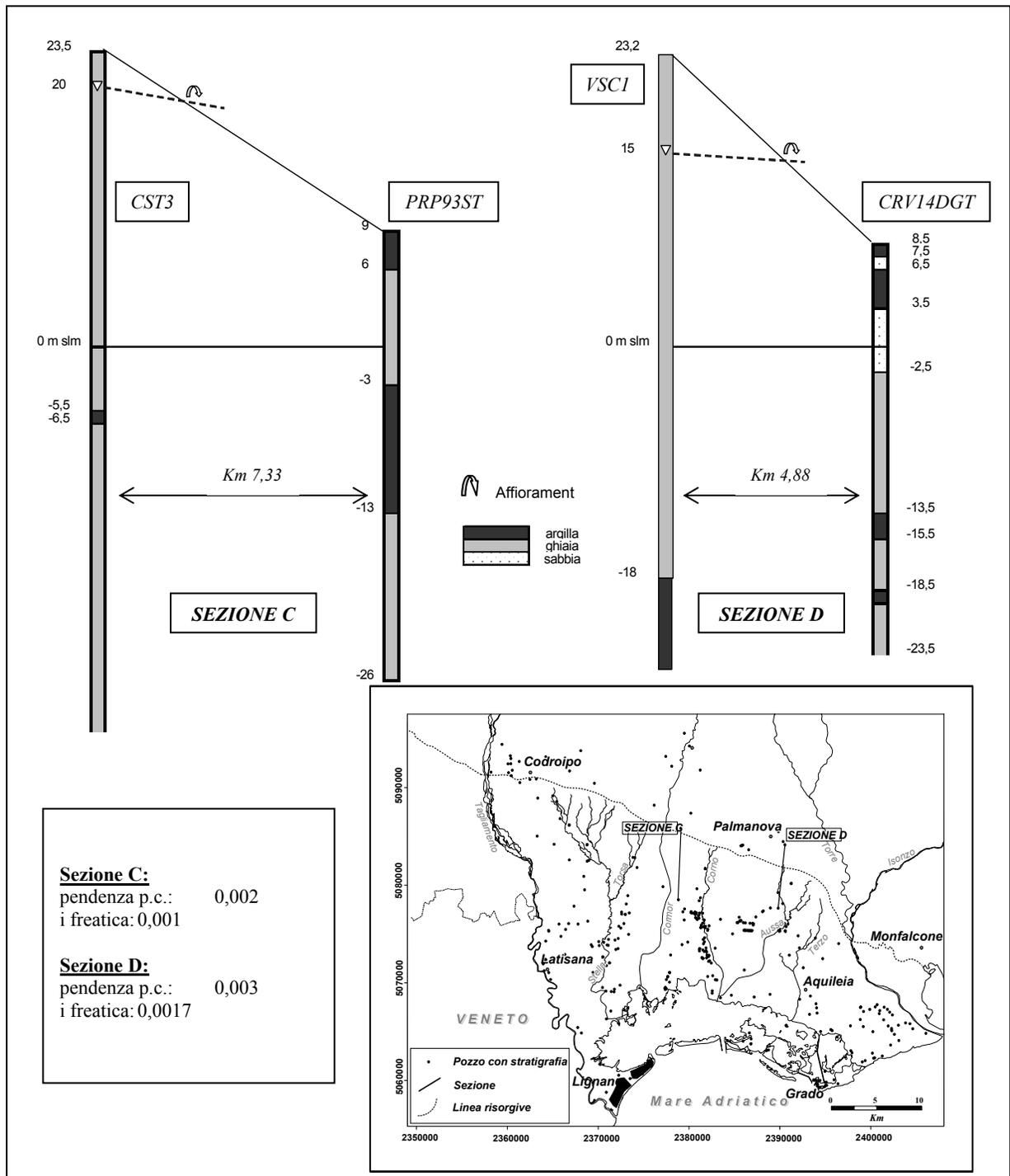


Fig. 19 - Sezioni idrogeologiche C e D tracciate a cavallo della linea delle risorgive nelle quali sono state ubicate le posizioni delle emergenze sulla base della pendenza del piano campagna (p.c.) e del gradiente idraulico (i).

The hydrogeologic section shows the position of spring line and the hydraulic gradient value (i).

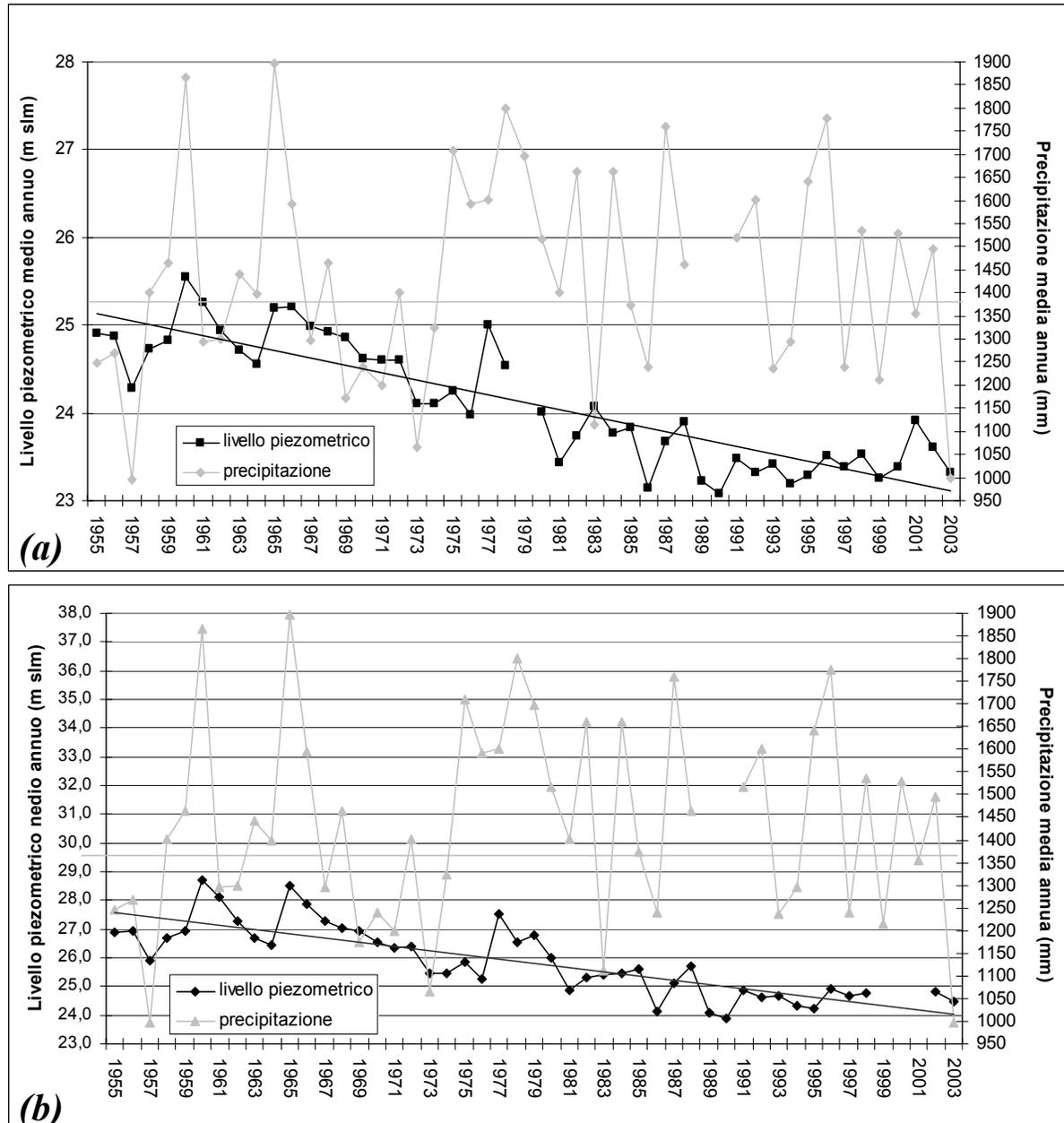


Fig. 20 – Altezza di precipitazione (mm) e quota del livello freaticometrico (m slm) nelle stazioni di (A) Mortegliano e (B) Talmassons (UD).

*Precipitation (mm) and water table level (m asl) in correspondence of the (A) Mortegliano (Udine) and (B) Talmassons (Udine) gauges.*

La portata che entra nella bassa pianura va ad alimentare l'intero sistema idrogeologico presente nel sottosuolo, cioè il sistema confinato multistrato, il sistema di transizione ed il sistema freatico. Questa affermazione deriva dall'analisi di alcune sezioni (Figg. 18-19) che sono state tracciate nella zona a cavallo della linea delle risorgive utilizzando dei pozzi a stratigrafia nota; è stato possibile infatti determinare, mediante i valori di gradiente idraulico ( $1,7 \cdot 10^{-3} \div 1,0 \cdot 10^{-3}$ ) della falda freatica in prossimità delle risorgive e di pendenza del piano campagna ( $3,9 \cdot 10^{-3}$

$\div 2,0 \cdot 10^{-3}$ ), sia la posizione delle risorgive in ogni sezione, che l'andamento dei livelli idrici a monte ed a valle di essa. Il confronto tra l'entità del prelievo, pari a 701 milioni di  $m^3$ /anno ed il volume in entrata al sistema acquifero della bassa pianura, pari a 820 milioni di  $m^3$ /anno, sottolinea pertanto l'incidenza del prelievo sulla ricarica attiva. Lo sfruttamento più marcato avviene nei confronti delle falde A e B ed è testimoniato dalla progressiva perdita di pressione che sta coinvolgendo numerosi pozzi ubicati nel settore settentrionale della Bassa pianura che attualmente non sono più risalienti.

Tab. 10 – Ripartizione del prelievo medio annuo nelle falde del sistema confinato della bassa pianura. Tutti i prelievi sono arrotondati al milione di m<sup>3</sup>/anno.

*Average annual groundwater volume drawn from the single levels of the low plain confined aquifer system.*

| Falde del sistema confinato | Prelievo (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /anno) |
|-----------------------------|---|
| A                           | 276   |
| B                           | 167   |
| C                           | 18  |
| D                           | 26  |
| E                           | 16  |
| F                           | 16  |
| G                           | 2   |
| H                           | 5   |

Nell'alta pianura l'incidenza dello sfruttamento è evidenziata dal confronto tra le tendenze manifestate sul lungo periodo dalle precipitazioni e dai livelli freaticometrici,

## Bibliografia

- Avanzini M. & Beretta G.P., 1994. "Un esempio di trattamento dei dati per la ricostruzione del sistema idrogeologico di un'area di pianura: approccio tradizionale e metodi geostatistici". *Quaderni Geol. Appl.*, 1: 187-224.
- Barbosa Landim P.M. & Corsi A.C., 2001. "Cálculo de superficies de tendencia, por regressão polinomial, pelo SURFER 6". UNESP, IGCE, Texto Didático 05, 11 pp.
- Barbosa Landim P.M., Sturaro J.R. & Caldeira Montero R., 2002. "Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada". UNESP, IGCE, Texto Didático 07, 12 pp.
- Bondesan A., Fontana A. 1999 "La geomorfologia della bassa pianura friulana sud-occidentale". *Proceeding of "Le Pianure. Conoscenza e salvaguardia: il contributo delle scienze della terra"*, 8-11 November 1999, Ferrara: 206-207.
- Boschian G. 1993 "Paleoidrografia della bassa pianura friulana tra i fiumi Tagliamento e Stella". *Il Quaternario*, 6 (1): 49-58.
- Calore C., Della Vedova B., Grassi S., Marson I., Nicolich R. & Squarci P., 1995. "A hydrothermal system along the coastal area of Friuli-Venezia Giulia region (NE Italy)". *Transactions of "Geothermal Resources Council - World Geothermal Congress"*, May 1995, Firenze, 2: 1269-1274.
- Cavallin A. & Martinis B., 1980. "I movimenti recenti ed attuali della regione friulana". In *Alto, Cronaca della SAF*, 42.
- Comel A., 1955. "Monografia sui terreni della pianura friulana. II. Genesi della pianura centrale connessa all'antico sistema fluvioglaciale del Tagliamento". *Nuovi Ann. Ist. Chim. Agr. Sperim. Gorizia*, 6, pp.217.
- Comel A., 1958. "Note illustrative della Carta Geologica delle Tre Venezie. Foglio 40 Palmanova". *Uff. Idrogr. Del Magistrato alle Acque, Sez. Geolog.*, 50 pp.
- Consorzio di Bonifica Ledra-Tagliamento, 1982. "Studio per la determinazione del bilancio idrologico dell'alta pianura friulana compresa tra i fiumi Isonzo e Tagliamento. Relazione". Reg. Aut. F.-V.G., Dir. Reg. LLPP, Consorzio Ledra-Tagliamento, Rapporto interno: 140 pp.
- Dal Piaz G., Fabris O. & Marzolo F., 1965. "Il Canale Libertà e le falde freatiche in sinistra e in destra Tagliamento. Aspetti geoidrologici ed economico-agrari". *Organizzazione Ledra-Tagliamento, Tip. Arti Grafiche Friulane, Udine*, 109 pp.
- Dal Prà A. & Antonelli R., 1978. "Indagini idrogeologiche sulle falde di subalveo di alcuni fiumi veneti e friulani". *Quaderni IRSA*, P/513, 34 (11): 265-279.
- Department of the Army, U. S. Army Corps of Engineers, 1997. "Engineering and design. Practical aspects of applying geostatistics at hazardous, toxic, and radioactive waste sites". *Technical Letter 1110-1-175*, Washington DC.
- Doro B. & D'Ambrosi C., 1954. "Ricerche chimiche, chimico-fisiche e geologiche sulle falde artesiane della Bassa Friulana, nello studio del nuovo acquedotto di Trieste". *Boll. Soc. Adr. di Sc. Nat.*, 68: 109-131.
- Feruglio E., 1925. "La zona delle risorgive del basso Friuli fra il Tagliamento e la Torre". *Ann. Staz. Chim. Agr. Sperim. Udine*, ser.3, 1, 346 pp.
- Freeze R.A. & Cherry J., 1979. "Groundwater". *Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey*, 604 pp.
- Gambolati G., 1985. "Modello agli elementi finiti per l'analisi delle risorse idriche sotterranee della regione Friuli-Venezia Giulia. 1. Analisi dei dati disponibili ed equazioni del modello". *Ist. Mat. Appl., Univ. Padova*, 44 pp.
- Gambolati G. & Pini G., 1985a. "Modello agli elementi finiti per l'analisi delle risorse idriche sotterranee della regione Friuli-Venezia Giulia. 2. Risoluzione del modello col metodo degli elementi finiti". *Ist. Mat. Appl., Univ. Padova*, 107 pp.
- Gambolati G. & Pini G., 1985b. "Modello agli elementi finiti per l'analisi delle risorse idriche sotterranee della regione Friuli-Venezia Giulia. 3. Simulazioni numeriche regionali". *Ist. Mat. Appl., Univ. Padova*, 16 pp.
- Gattinoni P., 2004. "Analisi della struttura spaziale di variabili idrogeologiche con tecniche geostatistiche". *Quaderni Geol. Appl.*, 11 (1): 51-63.
- Granati C., Martelli G. & Roda C., 2000. "Valutazione preliminare del volume di acqua estratta annualmente in Provincia di Udine dal sottosuolo della Bassa Pianura Friulana". *IGEA*, 15: 13-26.
- Granati C., Martelli G. & Roda C., 2001. "Characterisation of the Artesian Aquifers in the Friuli Plain (NE Italy) by Means of Low-Quality Hydrological Data". *Journal of Conference - EUG XI - Strasbourg - 8/12 April 2001*: 48.
- Journel A. G., Huijbregts Ch. J., 1978. "Mining Geostatistics". *Academic Press Inc. LTD., London*.
- Kitanidis P.K., 1997. "Introduction to geostatistics: applications in hydrogeology". *Cambridge University Press, Cambridge, UK*, 249 pp.
- Martelli G. & Roda C., 1998. "L'acquifero della Bassa Pianura Friulana in Comune di S. Giorgio di Nogaro". *Quaderni di Geologia Applicata*, 5 (1): 15-38.
- Martelli G., Granati C. & Roda C., 2003. "Distribution of coarse-grained sediments in the Friuli alluvial plain (Northern Italy) from the surface till the depth of 50 metres". *Quaderni di Geologia Applicata, Serie Aiga*, 2 (1): 131-146.

in due pozzi di osservazione ubicati in località Mortegliano e Talmassons, nella parte meridionale dell'alta pianura, in corrispondenza dei quali sono disponibili serie storiche di misure freaticometriche per un periodo isocrono superiore a 70 anni (1930-2004).

Per la bassa pianura non esistono serie storiche di misure piezometriche e quindi non è stato possibile evidenziare l'andamento di lungo periodo del livello piezometrico.

I grafici prodotti nella *Fig. 20*, mettono a confronto gli andamenti su base annua delle precipitazioni (in mm) e dei livelli freaticometrici (in m slm) medi dal 1955, anno a partire dal quale risultano sovrapponibili le serie di osservazioni. In entrambe le rappresentazioni, il *trend* negativo che caratterizza il livello freaticometrico a confronto col fatto che lo stesso non si rileva nelle precipitazioni, è presumibilmente una diretta conseguenza dell'incidenza degli emungimenti.

- Martelli G., Granati C. & Rossi S., 2004. "The multistrata aquifer system in the Low Friuli Plain (NE Italy)". In: Proceedings of ISES 2004, 8-10 Settembre 2004, Istanbul, Turkey: 267-274.
- Martinis B., 1957. "Osservazioni stratigrafiche sul sottosuolo di Lignano (Udine)". Riv. It. Pal., 63: 159-178.
- Mosetti F., 1983. "Sintesi sull'idrologia del Friuli-Venezia Giulia". Quaderni ETP, 6, 159 pp.
- Mosetti F. & Feruglio G.B., 1964a. "Schizzo dell'idrogeologia della Piana Friulana". Rass. Tecn. FVG, 5: 9-17.
- Mosetti F. & Feruglio G.B., 1964b. "Studio geognostico sul medio corso del Torrente Torre ed abbozzo geoidrologico-strutturale della piana nord-orientale del Friuli". Boll. Geof. Teor. Appl., 6 (22): 1-19.
- Mosetti F. & Mosetti P., 1985. "Nuove vedute sulla falda acquifera della Piana Friulana (Friuli-Venezia Giulia)". Quaderni ETP, 12: 1-27.
- Osservatorio Geofisico Sperimentale di Trieste, 1988a. "Studio idrogeologico e geofisico della bassa pianura friulana ubicata a Sud della linea delle risorgive e compresa tra il Torrente Cormor e il Golfo di Panzano. Rapporto preliminare." 21 pp.
- Osservatorio Geofisico Sperimentale di Trieste, 1988b. "Studio idrogeologico e geofisico della bassa pianura friulana ubicata a Sud della linea delle risorgive e compresa tra il Torrente Cormor e il Golfo di Panzano. Allegato 2: sondaggi geognostici."
- Osservatorio Geofisico Sperimentale di Trieste, 1988c. "Studio idrogeologico e geofisico della bassa pianura friulana ubicata a Sud della linea delle risorgive e compresa tra il Torrente Cormor e il Golfo di Panzano. Allegato 4: analisi geotecniche."
- Regione Lombardia and ENI Divisione AGIP, 2002 "Geologia degli acquiferi padani della Regione Lombardia" [Geology of the Po plain aquifers in the Lombardy region]. In Carcano C, Piccin A, S.E.L.C.A. Firenze
- Regione Emilia-Romagna, ENI-AGIP, 1998. "Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna". Edited by G. Di Dio, S.E.L.C.A., 120 pp.
- Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, 1971. "Carta delle curve isofreatiche, scala 1:100.000". Ass. LLPP, Serv. Idraulica.
- Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2004. "Carta del sottosuolo della Pianura friulana, scala 1:200.000".
- Stefanini S., 1972. "Le acque freatiche fra il Fiume Livenza ed il Torrente Torre (Friuli-Venezia Giulia)". Mem. Soc. Geol. It., 11: 343-365.
- Stefanini S., 1978. "La falda freatica nell'Alta Pianura friulana". Quaderni IRSA, 34 (14): 343-360.
- Stefanini S. & Cucchi F., 1976. "Gli acquiferi nel sottosuolo della provincia di Gorizia (Friuli-Venezia Giulia)". Quaderni IRSA, CNR P/342, 28 (13): 351-366.
- Stefanini S. & Cucchi F., 1977a. "Gli acquiferi nel sottosuolo della provincia di Udine (Friuli-Venezia Giulia)". Quaderni IRSA, CNR P/368, 34 (6): 131-147.
- Stefanini S. & Cucchi F., 1977b. "Le ghiaie nel sottosuolo della pianura veneta ad oriente del F. Piave". Quaderni IRSA, CNR P/365, 34 (3): 67-79.
- Vecchia O., De Wrachien D. & Magini A., 1968. "Le acque sotterranee nella Pianura Friulana Orientale". Tip. Ambrosini, Penne, 149 pp.