



PROVINCIA DI LATINA  
SETTORE ECOLOGIA E AMBIENTE



LABORATORIO  
INGEGNERIA DEGLI ACQUIFERI



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

PROGETTO MONITORAGGIO ACQUE SUPERFICIALI INTERNE  
E COSTIERE DELLA PROVINCIA DI LATINA

# Captazioni e risorsa idrica nel bacino di Mazzocchio

C. Alimonti - C. Perotto - C. Gazzetti - E. Marinucci

**L**acqua è la principale risorsa per l'Uomo. Essa disseta e pulisce. Essa ha alimentato macine e turbine, ha raffreddato componenti meccaniche o barre d'uranio, continua ad essere una importante via di comunicazione e di scambio tra popoli, paesi, economie. Per molto tempo si è pensato che l'acqua fosse una risorsa inesauribile. L'antropizzazione dei territori e l'evoluzione degli apparati produttivi ha coinciso con una scarsa attenzione alle problematiche ambientali, determinando, sui corsi d'acqua e sulle falde acquifere, fenomeni inquinanti o di impoverimento. La presente pubblicazione costituisce un esempio dei risultati ottenuti dall'integrazione degli studi del "Progetto monitoraggio acque superficiali interne e costiere" della Provincia di Latina con le attività di ricerca sugli interscambi tra acque superficiali e sotterranee nella Pianura Pontina condotti dalla Sapienza Università di Roma - Polo di Latina. Lo studio evidenzia come le azioni di tutela e di risanamento delle acque devono e possono essere calibrate tenendo conto delle portate fluenti, dei rapporti di scambio tra acque superficiali e sotterranee, delle azioni antropiche, oltre che della quantità e della distribuzione dei carichi inquinanti.



ISBN 978-88492-1174-0  
9 788849 211740

€ 24,00

[www.gangemieditore.it](http://www.gangemieditore.it)

C. Alimonti - C. Perotto - C. Gazzetti - E. Marinucci

Captazioni e risorsa idrica nel bacino di Mazzocchio



GANGEMI EDITORE





PROVINCIA DI LATINA  
SETTORE ECOLOGIA E AMBIENTE



LABORATORIO  
INGEGNERIA DEGLI ACQUIFERI



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

©  
Proprietà letteraria riservata  
**Gangemi Editore spa**  
Piazza San Pantaleo 4, Roma  
[www.gangemeditore.it](http://www.gangemeditore.it)

Nessuna parte di questa  
pubblicazione può essere  
memorizzata, fotocopiata o  
comunque riprodotta senza  
le dovute autorizzazioni.

ISBN 978-88-492-1174-0

PROGETTO MONITORAGGIO ACQUE SUPERFICIALI INTERNE  
E COSTIERE DELLA PROVINCIA DI LATINA

# Captazioni e risorsa idrica nel bacino di Mazzocchio

C. Alimonti - C. Perotto - C. Gazzetti - E. Marinucci

Si ringrazia il Consorzio di Bonifica dell'Agro Pontino e in particolare il Presidente Riccardo Maria Spagnolo, il Direttore Generale Stefano Salbitani e il vice Direttore dell'area tecnica Carlo Cervellin, per i dati e i preziosi suggerimenti forniti.

Un sentito ringraziamento anche ai proprietari dei pozzi e ai professionisti che ci hanno accompagnato illustrandoci le opere di captazione da loro realizzate.

## **In appendice**

Attività della Provincia di Latina per la tutela e la gestione delle risorse idriche  
– *prime applicazioni del bilancio idrico distribuito* –  
a cura di: C. Perotto - N. Valle - A. Vagnozzi

# Indice

- 7. **Prefazione**
- 9. **Introduzione**
- 11. **Caratteri generali della Piana Pontina**
  - 11. *Inquadramento geologico ed idrogeologico regionale*
  - 17. *Studi precedenti*
  - 19. *La bonifica idraulica*
- 25. **Il bacino di Mazzocchio e le opere di captazione**
  - 25. *Metodologia di acquisizione*
  - 25. *Campagna di caratterizzazione delle opere di captazione*
  - 30. *Modalità costruttive dei pozzi*
  - 38. *Analisi dei dati sul bacino di Mazzocchio*
- 47. **Aspetti idrogeologici del bacino di Mazzocchio**
  - 47. *Introduzione*
  - 49. *Caratteri locali della falda*
  - 53. *Abbassamento dei livelli statici e incidenza sui costi di estrazione*
- 57. **Modellazione numerica delle opere di captazione**
  - 57. *Strutturazione del modello*
  - 58. *Capacità di scambio tra acquiferi diversi*
  - 61. *Simulazione dei travasi indotti dalle opere di captazione*
- 67. **Interventi di riqualificazione dei pozzi**
  - 67. *Ripristino a favore dell'idrogeologia dell'area*
  - 72. *Ripristino a favore della produttività dei pozzi*
  - 76. *Analisi dei costi*
- 81. **Conclusioni**
- 85. **Raccolta delle misure sperimentali**
- 95. **Attività della Provincia di Latina per la tutela e la gestione delle risorse idriche**
  - 95. *Introduzione*
  - 96. *Approccio metodologico*
  - 101. *Spazializzazione dei dati meteo-climatici*
  - 106. *Applicazione della carta della copertura del suolo della Provincia di Latina nel bilancio idrico distribuito*
  - 110. *Breve nota sulla carta dei suoli di Latina*
  - 114. *Analisi del "deficit idrico" e dei fabbisogni irrigui*
  - 118. *Vulnerabilità degli acquiferi*
- 125. **Bibliografia**



# Prefazione

**L'**acqua è la principale risorsa per l'Uomo. Essa disseta e pulisce. Essa ha alimentato macine e turbine, ha raffreddato componenti meccaniche o barre d'uranio, continua ad essere una importante via di comunicazione e di scambio tra popoli, paesi, economie. Per molto tempo si è pensato che l'acqua fosse una risorsa inesauribile. L'antropizzazione dei territori e l'evoluzione degli apparati produttivi ha coinciso con una scarsa attenzione alle problematiche ambientali, determinando, sui corsi d'acqua e sulle falde acquifere, fenomeni inquinanti o di impoverimento. Nel momento in cui, iniziato il Terzo Millennio, l'Uomo della strada e gli Uomini delle Istituzioni s'interrogano sempre di più, e con affanno crescente, sulle sorti dell'ambiente e del suo precario equilibrio, studiare, capire, approfondire lo stato delle acque in un determinato contesto ambientale significa creare condizioni oggettive per azioni ed interventi di risanamento dei quali si avverte l'inderogabile necessità prima che il processo di eutrofizzazione abbia un epilogo irreversibile.

Espressione di una felice collaborazione intersettoriale (Settore Ecologia e Ambiente e Settore Pianificazione Urbanistica e Territoriale della Provincia) e con gli Enti di ricerca (Sapienza Università di Roma - Polo di Latina), questo studio muove nella direzione della conoscenza delle problematiche di uno dei bacini idrografici a drenaggio artificiale più interessanti e consistenti d'Italia, avanzando proposte e ipotesi per migliorarne lo stato. Mi auguro che l'intensa e profonda attività di ricerca posta in essere apra un dibattito profondo e innalzi la soglia d'attenzione sullo stato delle acque nel nostro territorio, affinché la Provincia e le altre istituzioni che su di esso interagiscono, siano protagoniste delle convergenze necessarie perché, sulla strada dei rimedi non si perda tempo ulteriore: l'Unione Europa considera il bacino idrografico pontino con grande interesse. Dobbiamo cogliere questa sensibilità e metterla a frutto.

**Armando Cusani**  
*Presidente della Provincia*



# Introduzione

**I**l presente studio si inquadra nelle attività che la Provincia di Latina sta svolgendo nell'ambito del "Progetto Monitoraggio acque superficiali Interne e Costiere" sulla produzione, impiego, diffusione, persistenza nell'ambiente ed effetti sulla salute umana delle cosiddette sostanze eutrofizzanti. A tale attività si associa il monitoraggio sullo stato di eutrofizzazione delle acque interne e costiere, ed in particolare la valutazione dello stato eutrofico delle acque dolci superficiali, delle acque di transizione e delle acque marine costiere. Tali competenze risultano attribuite alle Province dall'art. 106 della L.R. 14/99. Più in generale, con gli studi in corso, la Provincia mira alla definizione delle priorità d'azione e alla programmazione degli interventi per il risanamento delle acque superficiali e sotterranee, consapevole che le scelte e le strategie da adottare devono derivare da una conoscenza dettagliata dei processi che determinano la produzione dei carichi inquinanti, ma anche delle caratteristiche dei bacini idrografici e dei corpi idrici ricettori, per lo meno in termini di:

- sviluppo e continuità del reticolo idrografico;
- estensione e caratteristiche fisiche e di uso del territorio nei diversi bacini idrografici e idrogeologici;
- caratteristiche del deflusso naturale e/o artificiale nei corsi d'acqua;
- bilancio idrico;
- modalità di produzione e diffusione dei carichi inquinanti sul territorio.

Per lo svolgimento di queste attività, la Provincia ha integrato gli studi di base, svolti dal personale del Settore Ecologia e Ambiente e del Settore Pianificazione Urbanistica e Territoriale della Provincia di Latina, con i contributi derivanti da collaborazioni con gli Enti di Ricerca attivi sul territorio (ARPA Lazio, ENEA, Sapienza Università di Roma), specie per quanto riguarda l'analisi di fenomeni ambientali complessi e per l'elaborazione dei più efficaci approcci di studio e di intervento. La presente pubblicazione costituisce un esempio dei risultati ottenuti dall'integrazione degli studi del "Progetto monitoraggio" con le attività di ricerca sui rapporti di interscambio tra acque superficiali, sotterranee e opere di captazione nella Pianura Pontina che sta svolgendo il Laboratorio di Ingegneria degli Acquiferi della Sapienza Università di Roma - Polo di Latina. Gli studi effettuati, con riferimento all'area campione del bacino idrografico a drenaggio artificiale di Mazzocchio (circa 100 km<sup>2</sup>), hanno riguardato:

- il bilancio idrico del bacino;
- i rapporti di scambio tra circolazione idrica sotterranea e superficiale;
- l'influenza dei pozzi, ed in particolare delle loro caratteristiche costruttive, sul regime di scambio tra i diversi corpi idrici;
- l'elaborazione di proposte operative per l'adeguamento ambientale e la gestione dei pozzi presenti nell'area.

Lo studio evidenzia come le azioni di tutela e di risanamento delle acque debbano essere calibrate sul reale assetto idrologico dei diversi bacini, tenendo conto delle portate fluenti e dei rapporti di scambio tra acque superficiali e sotterranee, oltre che della distribuzione delle immissioni di carichi inquinanti. Si evidenzia, inoltre, come le captazioni e le opere idrauliche nell'area di bonifica hanno ripercussioni dirette sul bilancio idrico dei grandi acquiferi carbonatici dei Monti Lepini ed Ausoni ed influiscano in maniera determinante sulla quantità e la qualità del deflusso di base dei principali corsi d'acqua della Pianura Pontina.

*Avv. Massimo Giovanchelli*  
*Assessore Ambiente e Qualità della vita*



# I. Caratteri generali della Piana Pontina

## I.1. Inquadramento geologico ed idrogeologico regionale

La Pianura Pontina si estende, per circa 50 km di lunghezza e 20 di larghezza, tra i Monti Lepini e Ausoni a Nord-est e il Mar Tirreno a Sud-ovest e Sud-est; il limite nord-occidentale, puramente convenzionale, viene fatto di norma coincidere col corso del fiume Astura o con il canale delle Acque Alte.

Nel quadro dell'evoluzione geologica dell'Italia centrale, la Pianura Pontina costituisce la porzione meridionale di un'estesa area subsidente, al margine del Mar Tirreno, che si instaurò fra i primi contrafforti della catena appenninica e la costa a partire per lo meno dal Pliocene.

Da questo periodo e probabilmente sino a tutto il Pleistocene, il margine tirrenico della catena appenninica, presente nell'area attualmente occupata dalla Pianura Pontina, è stato dislocato da sistemi di faglie dirette ad andamento prevalentemente NW-SE e subordinatamente SW-NE, che hanno determinato la formazione di un profondo graben, colmato da sedimenti marini, fluvio palustri e in parte piroclastici.

La depressione si instaura quindi fra i rilievi appenninici emersi, monti Lepini e monti Ausoni, che presentano una successione carbonatica in facies laziale-abruzzese e l'attuale margine tirrenico, ove il substrato meso-cenozoico sepolto è costituito da una successione calcareo-silicico-marnosa in facies umbro-sabina, di età compresa fra il Cretacico e l'Eocene. Tale depressione fu colmata da sedimenti plio-pleistocenici che, coinvolti durante e dopo la loro deposizione in fasi tettoniche di-

stensive, ricalcano, almeno in parte l'assetto del substrato carbonatico sepolto (Bono P. *et alii*, 1980). Alcuni studi indicano che le fasi tettoniche del Pliocene superiore sono le maggiori responsabili dell'attuale assetto strutturale dell'area pontina. I dati stratigrafici ricavati da sondaggi profondi (Bay L. & Tartaglia G., 1970; Boni C., 1996; Conforto B. *et alii*, 1962; Consorzio Acque, 1992; Istituto Superiore di Sanità, 1942; Lombardi L., 1968; Novarese V., 1930) e da prospezioni geofisiche mostrano che il passaggio dall'alto strutturale dei monti Lepini e Ausoni alla depressione avviene attraverso una serie di faglie che ribassa a gradinata i calcari cretacei. La subsidenza, che deve essersi esplicata almeno fino ai tempi storici, rende conto del fatto che i sedimenti affioranti sono molto recenti. Infatti la pianura si è venuta delineando attraverso varie fasi tra processi di colmamento e tendenza a subsidenza, rese a volte più complesse dai fenomeni glacio-eustatici. Questa attività si è andata attenuando nel tempo ed attualmente sembra limitata ad una modesta subsidenza, localizzata in alcuni settori interni della piana.

I terreni di colmamento del graben pontino sono pertanto costituiti da sedimenti terrigeni quaternari, con spessori variabili da poche decine di metri, in prossimità delle dorsali carbonatiche dei monti Lepini e Ausoni, ad alcune centinaia di metri, nel settore centrale della piana, che ricoprono una serie di alti e bassi strutturali impostati nelle successioni carbonatiche e calcareo-silico marnose meso-cenozoiche (Parotto & Praturlon, 1975; Boni *et alii*, 1980).

I sondaggi profondi effettuati nel settore compreso tra

la Via Appia e i rilievi carbonatici (Sondaggi Mazzocchio 1, 2, 3, 5, 6 e 8, sintetizzati in Manfredini, 1990) evidenziano, a partire dall'alto:

- una formazione superiore di ambiente palustre o lacustre, per uno spessore massimo di circa 100 m, costituita da alternanze di argille torbose, sabbie, travertini e rari orizzonti conglomeratici;
- una formazione inferiore costituita prevalentemente da sabbie limose di ambiente marino, ricche di macrofossili, per uno spessore massimo di 200 m e attribuibili genericamente al Pleistocene.

Al di sotto di questi terreni sono presenti le successioni giurassico-cretaciche di altofondo carbonatico dei settori ribassati delle dorsali dei Monti Lepini ed Ausoni. Spostandosi verso il mare, a SW della Via Appia, i sondaggi profondi (Sondaggi Sabaudia, Pontinia e S. Donato, riportati in Conforto et. Alii, 1962 e in Camponeschi e Nolasco, 1983) e le indagini geofisiche effettuate dai diversi autori non individuano, sino ad oltre 1000 m di profondità, i termini calcarei giurassico-cretacici. In questo settore della piana, i sedimenti limoso-sabbiosi pleistocenici si sovrappongono su sedimenti calcarenitici e arenacei del Pliocene e del Miocene.

L'area di studio (Bacino di Mazzocchio) ricade nel settore più depresso della Pianura Pontina, compreso tra la via SS Appia e il Fiume Ufente, dove le quote del piano di campagna sono frequentemente al di sotto del livello del mare (valori negativi di oltre 1 m s.l.m.), con drenaggio attualmente assicurato dagli impianti di sollevamento delle acque (impianti idrovori di Mazzocchio e Forcellata).

L'evoluzione paleogeografica dell'area contenuta tra i Lepini e la Duna Antica non è stata studiata in dettaglio; tuttavia si può affermare che dopo l'impostazione della duna, che raggiungeva probabilmente i rilievi calcarei (la duna di Priverno) il livello marino, in connessione con l'ultimo glaciale (circa 40.000 anni fa), sia sceso di oltre 100 m (125 m al massimo). Ciò ha comportato una forte erosione sia dei rilievi calcarei che dei sedimenti, probabilmente sabbiosi, della zona di piana.

Si è quindi impostato uno sviluppato reticolo idrografico, controllato dalla tettonica della piattaforma calcarea e nella massa carbonatica si è instaurato un importante reticolo carsico che ha interessato le strutture carbonatiche anche nei livelli inferiori della serie, fino ad oltre 100 m sotto il livello attuale del mare. A seguito della progressiva risalita del livello marino la piana compresa tra la Duna Antica ed i Lepini si è andata col-

mando di depositi di origine lacustre e salmastra con episodi marini dovuti a periodiche invasioni del mare. Nel contempo, i gas connessi ai fenomeni vulcanici dell'apparato laziale, mescolati all'acqua dolce proveniente dai rilievi carbonatici, facevano sì che l'acqua termale ottenuta come prodotto, risalendo in superficie e perdendo anidride carbonica, lasciava precipitare il carbonato di calcio in eccesso dando luogo a lenti e livelli discontinui di travertino.

L'assetto idrografico naturale del territorio delle paludi pontine può essere efficacemente dedotto dalla figura 1.1, in cui viene riportato uno stralcio semplificato della mappa delle Paludi Pontine prima degli interventi di bonifica promossi da Pio VI (Rappini, 1778). Il territorio compreso tra la Via Appia e le pendici sud-orientali dei Monti Lepini, per morfologia e idrografia naturale ha costituito, perlomeno a partire dal Pleistocene superiore, un bacino palustre permanente verso cui confluivano sia le acque sotterranee dell'acquifero carsico dei Monti Lepini, sia le acque di ruscellamento superficiale dei versanti.

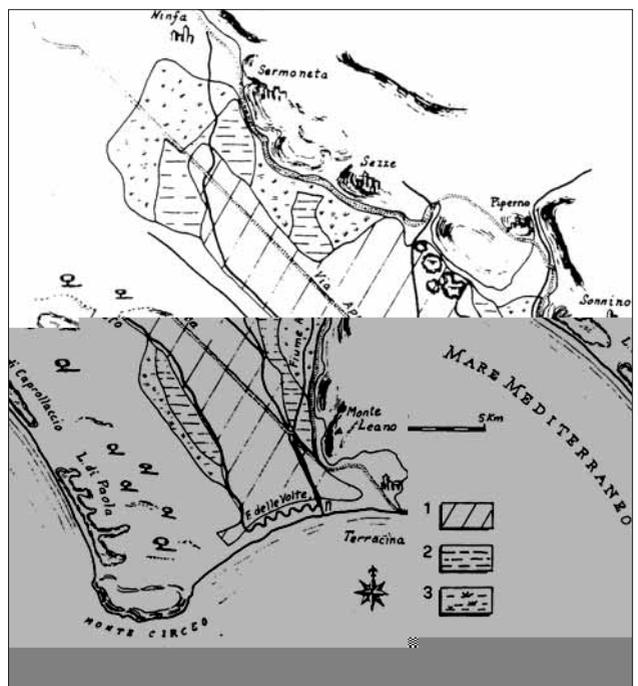


Figura. 1.1 – Le Paludi Pontine prima degli interventi di bonifica promossi da Pio VI nella seconda metà del XVIII secolo (Rappini, 1778 in Brunamonte et alii. 1994). Legenda: 1) palude permanente; 2) palude inondata ad ogni pioggia; 3) palude inondata in occasione di massime piogge.

L'idrografia attuale è il risultato delle opere idrauliche della bonifica delle Paludi Pontine che, essenzialmente determinano l'esistenza di un reticolo fluviale di due tipi:

- quello naturale con corsi d'acqua (Amaseno, Ufente) che dalla catena carbonatica arrivano alla costa tra Terracina e il Circeo;
- quello artificiale di bonifica (Canale pedemontano, Linea Pio, Selcella Canale della Botte, Canale della Striscia, Canale Schiazza ecc.) che confluisce, direttamente (acque medie ed alte) o tramite impianti di sollevamento (acque basse), nel reticolo naturale.

L'idrografia di superficie interagisce ampiamente con le acque sotterranee. La Piana Pontina ospita un esteso sistema acquifero, caratterizzato da una circolazione idrica complessa che si sviluppa su più livelli, con differenti modalità di circolazione.

Nel settore pedemontano, al contatto tra i depositi fluvio palustri e i calcari mesozoici, si collocano le principali emergenze degli acquiferi carsici ospitati dalle dorsali carbonatiche, con portate complessive nell'ordine dei  $14.5 \text{ m}^3/\text{s}$  per i Monti Lepini e di  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  per i Monti Ausoni.

Le portate emergenti dalle dorsali carbonatiche costituiscono la principale fonte di alimentazione del deflusso di base dei corsi d'acqua della Pianura Pontina ed in particolare del settore pedemontano, indicativamente compreso tra la base delle dorsali carbonatiche ed il Fiume Sisto.

In quest'area assume un significato rilevante la presenza della falda in pressione contenuta nelle successioni carbonatiche sepolte al di sotto dei terreni sabbiosi e argillosi marini e fluvio palustri. Tale acquifero, idraulicamente connesso con le adiacenti strutture dei Monti



Immagine della Pianura Pontina.

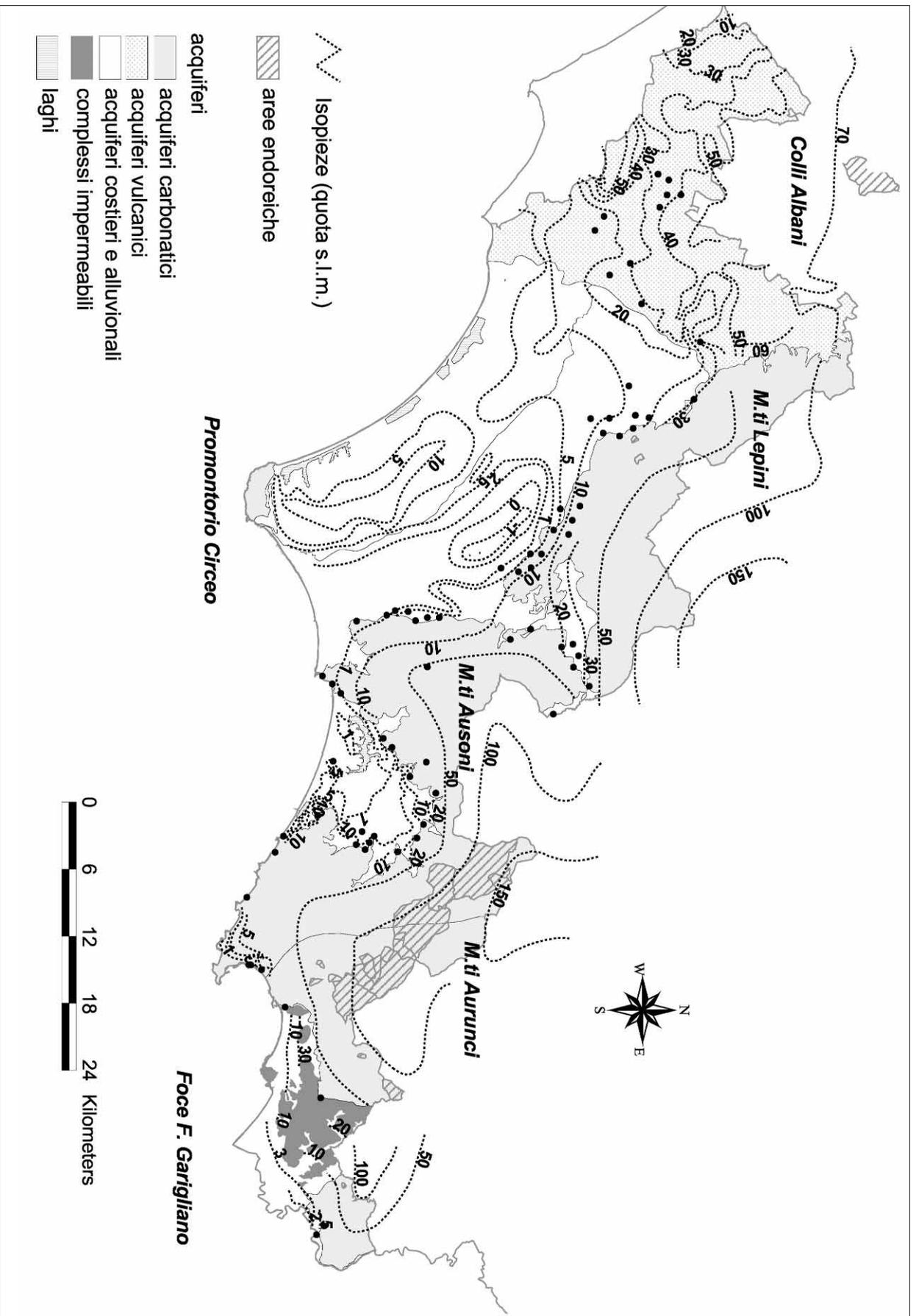


Figura 1.2 – Schema idrogeologico della Provincia di Latina (Alimonti et al., 2005)

Lepini ed Ausoni, alimenta le falde contenute nei terreni di copertura che frequentemente sono di tipo artesiano.

Pertanto, malgrado i terreni affioranti, dotati di bassa permeabilità, garantiscano valori modesti di infiltrazione efficace (nell'ordine di qualche l/s/km<sup>2</sup>), le captazioni presenti nell'area sono caratterizzate da produttività elevata.

Tuttavia, negli ultimi anni, l'aumento delle captazioni e la presenza ancora molto diffusa di pozzi artesiani con boccapozzo libero e, quindi, deflusso continuo delle acque di falda, ha provocato evidenti abbassamenti della superficie piezometrica, con conseguenze non ancora quantificate sia sulla circolazione idrica e conseguentemente sulla subsidenza indotta nei terreni, sia sul regime delle portate emergenti dalle dorsali carbonatiche. Inoltre, l'abbassamento della superficie piezometrica nel settore pedemontano e l'aumento delle velocità di flusso delle acque sotterranee indotto dagli emungimenti risultano essere una delle principali cause all'origine dei fenomeni di crollo e sprofondamento (sinkhole) che ca-

ratterizzano alcuni settori della Pianura Pontina.

Restano, in generale, ancora poco conosciuti i rapporti tra le diverse circolazioni idriche nei vari settori della Pianura Pontina.

Purtroppo, mentre appare sufficientemente chiara nel suo insieme la situazione strutturale della regione (figura 1.2), assai pochi sono gli elementi che permettono di conoscere l'esatto assetto strutturale della Pianura Pontina. In quest'area, qualunque schema si voglia oggi proporre, per la scarsità degli elementi disponibili, non può che rappresentare un'ipotesi di lavoro.

Alcuni autori (Funicciello R. & Parotto M., 1978), in particolare, propongono un'interpretazione che mette in evidenza alcuni aspetti delle condizioni stratigrafiche e strutturali, in parte già chiaramente definiti ed in parte solo ipotizzabili.

È stata ipotizzata una fase tettonica liassica di apertura del substrato che ha originato la differenziazione degli ambienti sedimentari; tale differenziazione di ambienti sedimentari a diverso grado di subsidenza

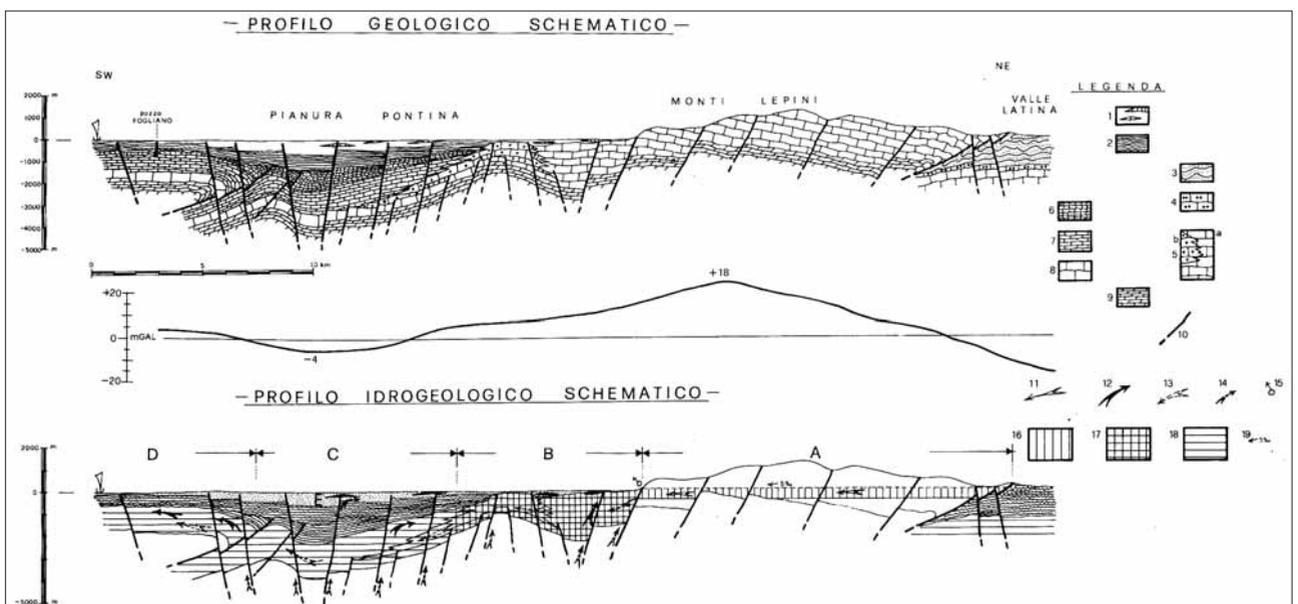


Figura. 1.3 – Profili geologici ed idrogeologici: 1. Depositi quaternari e travertini. 2. Depositi argillosi plio-pleistocenici. 3. Flysch del Miocene sup. (Valle Latina). 4. Calcareni langhiane della Valle Latina. 5 A. Serie carbonatica mesozoica della piattaforma lepina. 5 B. Ipotetica serie mesozoica del margine occidentale della piattaforma lepina. 6. Marne siliciche e detritiche, prevalentemente paleogene. 7. Serie liassico-cretacea di facies "Sabina". 8. Calcari detritico organogeni del Lias inf.-medio di facies "Sabina". 9. Dolomie infraliassiche. 10. Faglie distensive e sovrascorrimenti. 11. Prevalente direzione di scorrimento delle acque carsiche. 12. Prevalente direzione di flusso del circuito idrotermale. 13. Direzione di lento movimento delle acque carsiche nel Graben pontino prodotto da gradienti di pressione dei gas. 14. Venute gassose calde ed acide di diversa origine. 15. Sorgenti. 16. Dominio del circuito carsico lepino. 17. Acque miscelate. 18. Dominio del circuito idrotermale. 19. Gradiente idraulico medio (Boni C. et al., 1980).

comporta infatti, lungo le fasce di separazione, l'apertura di linee di debolezza del substrato che restano variamente attive durante l'intero ciclo sedimentario e che possono venire particolarmente riattivate durante le successive fasi tettoniche distensive (genesì del Graben pontino).

Alla luce di ciò assume, quindi, particolare importanza, il fatto che nella regione pontina, come in altre località appenniniche, ubicate ai margini della piattaforma carbonatica, le manifestazioni idrotermali e le anomalie geochimiche sembrano particolarmente concentrate là dove antiche linee tettoniche liassiche sono state riprese da una tettonica distensiva recente.

Si possono quindi ora meglio comprendere i seguenti complessi litologici con caratteri idrogeologici così definiti (vedi figura. 1.3):

- La parte emersa della struttura lepina molto permeabile, che contiene la falda principale dell'intera zona esaminata, interessata da un vistoso processo carsico.
- La parte ribassata sotto la Pianura Pontina della stessa struttura carbonatica mesozoica, che contiene una ricca falda imprigionata da modesti spessori di sedimenti impermeabili quaternari, alimentata lateralmente dall'acquifero della dorsale emersa.
- Un substrato (a permeabilità mediamente molto bassa) che contiene presumibilmente livelli evaporitici e che potrebbe quindi influenzare il chimismo delle acque. Ciò sarebbe favorito dal dilavamento ad opera delle acque calde e ricche di gas in circolazione attraverso il reticolo di faglie normali che ha dato origine al Graben, visibile direttamente solo al margine nord-orientale, ma molto probabilmente ramificato nella profondità dei depositi carbonatici sepolti sotto la pianura

### Il circuito idrotermale della pianura pontina

Il circuito idrotermale è caratterizzato da un chimismo delle acque praticamente omogeneo di tipo bicarbonato-calcico. Le acque che risultano meno mineralizzate hanno una salinità totale inferiore a 300 mg/l; circa la metà delle acque sorgive presentano una salinità inferiore ad 1 g/l; le punte massime di mineralizzazione raggiungono 3-4 g/l. A tutte le acque maggiormente mineralizzate si associa un elevato contenuto gassoso, elevati tenori di cloruri e solfati, temperature all'emergenza superiori alla media locale e generalmente proporzionali alla mineralizzazione.

Tutte le acque maggiormente mineralizzate emergono

o in corrispondenza o a SO delle principali linee di dislocazione. Si tratta evidentemente di acque provenienti dal ciclo carsico che, prima di emergere attraverso pozzi e sorgenti, si miscelano con acque più calde o mineralizzate che certamente circolano, di preferenza, nel reticolo di grandi faglie normali del Graben pontino.

Il fenomeno di miscelazione assume proporzioni imponenti se si considera che la maggioranza delle acque sorgive, in prossimità dell'emergenza, muta sensibilmente la sua composizione, anche se il cambiamento non è tale da modificare completamente i caratteri originari, sempre riconoscibili. Le modalità della miscelazione dipendono ovviamente dalle condizioni idrodinamiche locali e dai rapporti fra le portate dei due cicli (Boni C. *et alii*, 1980).

Nel settore centrale della Pianura Pontina, i terreni quaternari più epidermici sono stati attraversati da numerosi pozzi. Si tratta di depositi eterogenei: tufi vulcanici -soprattutto nel settore nord occidentale- sabbie dunari, sabbie ed argille marine, depositi lagunari e lacustri, sedimenti alluvionali e detritici. Le falde idriche contenute in questi terreni hanno, conseguentemente, caratteristiche molto variabili che rispecchiano l'eterogeneità dei tipi litologici: negli orizzonti più permeabili si trovano acquiferi, anche considerevoli, direttamente alimentati per infiltrazione verticale dalle aree di affioramento, che tuttavia, possono ricevere apporti provenienti dalla falda delle vulcaniti albane e dalla falda dei carbonati.

Pur trascurando l'analisi dei caratteri delle diverse falde contenute nei sedimenti quaternari è tuttavia necessario sottolineare che questi acquiferi, soprattutto nelle aree più prossime al margine del rilievo lepino hanno ricevuto in passato e ricevono ancora apporti di acque calde mineralizzate risalenti lungo le fratture del basamento. A giudicare dall'estensione dei travertini affioranti e dalla frequenza degli orizzonti travertinosi, intercalati a varie profondità nei depositi quaternari, si può ritenere che l'apporto di acque calde e sovrassature di provenienza profonda, sia stato in passato e resti ancora un fenomeno molto diffuso in un vasto settore della pianura.



Figura. 1.4 – Panorama del bacino idrografico di Mazzocchio. Sullo sfondo i Monti Lepini.

## I.2. Studi precedenti

### Analisi gravimetriche

Negli anni tra il 1948 e il 1956 furono eseguite ricerche di idrocarburi lungo la fascia costiera del Lazio. Le ricerche furono svolte dapprima nell'area meridionale (Pianura Pontina), quindi più a settentrione nella zona compresa tra Ladispoli, Fregene e l'abitato di Roma. Esse comprendevano, inizialmente, un rilievo gravimetrico e indagini geologiche di superficie lungo il contatto fra i calcari mesozoici dei monti Lepini e i terreni alluvionali della pianura Pontina e avevano lo scopo di individuare l'eventuale esistenza, lungo tale contatto, di lembi di terreni post-cretacici, che potessero illuminare sulla litologia e la stratigrafia dei sedimenti terziari presenti sotto le alluvioni della pianura.

La gravimetria mise già allora in evidenza delle anomalie localizzate dovute ad irregolarità tettoniche. In vicinanza delle zone montagnose le anomalie positive vennero interpretate quali continuazioni sub-superficiali delle formazioni calcaree dei Lepini. Una vasta depressione gravimetrica attraversa più ad ovest tutta la zona

esplorata con andamento NNE-SSO da Cisterna, attraverso Latina, fino al lago Caprolace con due minimi: uno tra borgo Podgora e Cisterna, l'altro presso il lago Caprolace. Una forte anomalia positiva ricade nei pressi della costa subito a NO del lago di Fogliano e un'altra anomalia positiva, di cui non si poté determinare la

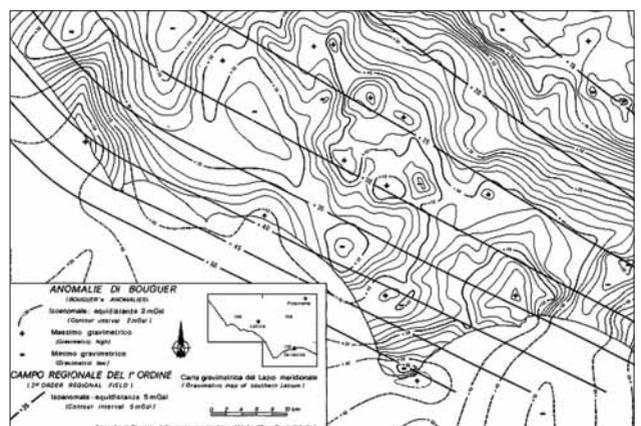


Figura. 1.5 – Anomalie di Bouguer e Campo Regionale del I ordine del Lazio Meridionale (Da Di Filippo M. & Toro B., 1980).

chiusura in mare, è in corrispondenza dell'estremo orientale del rilievo stesso.

In base alle conclusioni cui si pervenne con il rilievo gravimetrico si ubicò nella zona di Fogliano (Lombardi L., 1968) (sede della anomalia gravimetrica positiva più vistosa e più lontana dai Lepini) un sondaggio. La perforazione fu sospesa per motivi di carattere tecnico, allorché fu raggiunta la profondità di circa 1.000 m. Nello stesso tempo si iniziò uno studio geoelettrico e si eseguì una prospezione sismica a riflessione della Pianura Pontina per determinare l'andamento sul substrato.

Gli studi seguenti furono tutti basati sul rilievo degli anni '50 che presentava una densità di stazioni gravimetriche, (una stazione ogni 2 km<sup>2</sup>), idonea per la ricerca geofisica di quegli anni, ma tale da non permettere ulteriori analisi. Tra l'altro, all'epoca la precisione dei gravimetri e le potenzialità di calcolo non consentivano un dettaglio maggiore.

Studi recenti (Capelli *et alii*, 2002) hanno consentito di apprezzare con maggior dettaglio gli effetti gravimetrici prodotti da strutture estese e profonde che interessano l'area indagata.

Il Campo Regionale del I ordine è stato elaborato su una superficie molto più ampia di quella in studio. Nello specifico è stato utilizzato il Campo Regionale del I ordine elaborato nel lavoro *Analisi gravimetrica delle strutture geologiche del Lazio Meridionale* (pubblicato nel 1980). Il campo regionale presenta un decremento della gravità da SO verso NE; con un gradiente orizzontale elevato vicino alla linea di costa e minore nell'interno. Tale andamento è l'effetto di variazioni di densità a livello crostale (vedi figura 1.5). Sono evidenti numerose aree a contatto tra massimi e minimi in cui il gradiente gravimetrico orizzontale risulta notevolmente accentuato: questo è l'indizio del fatto che le strutture non sono molto profonde. Dallo spessore della fascia ad elevato gradiente si può ipotizzare la profondità delle strutture nel sottosuolo.

### Campagne geoelettriche

Di notevole interesse, sono le numerose campagne geofisiche con metodo geoelettrico condotte negli ultimi cinquant'anni nell'Agro Romano e Pontino (Cas. Mezz., 1961), con approccio di scala variabile in funzione degli scopi della ricerca.

Vengono di seguito riportati i risultati più importanti di alcuni studi che, per estensione e concezione, costituiscono i fondamenti del tema trattato.

Nel 1952-53 venne eseguita dalla *Compagnie Générale de Géophysique* nell'Agro Romano una campagna di sondaggi elettrici che ha messo in evidenza la sovrapposizione di tre orizzonti aventi differenti caratteristiche elettriche:

- un orizzonte superiore resistente che viene designato come ricoprimento recente, la cui resistività è in generale compresa tra 30 e 70 ohm-m, ma raggiunge talvolta i 300 ohm-m.
- un orizzonte conduttore la cui resistività varia fra 2 e 15 ohm-m.
- un substrato resistente.

In figura 1.6 sono riportate le curve del livello del letto del ricoprimento recente secondo la interpretazione della *Compagnie*. Per quanto riguarda l'interpretazione dei sondaggi elettrici le perforazioni eseguite hanno permesso di accertare che l'orizzonte superiore elettricamente resistente (ricoprimento recente) è costituito da terreni piroclastici e dalle sabbie delle formazioni post-calabriere.

Nell'orizzonte conduttore sono stati compresi due orizzonti dei quali il superiore ha una resistività che può raggiungere i 15 ohm-m, mentre quello inferiore ha una resistività compresa tra 2 e 3 ohm-m. Le perforazioni eseguite hanno confermato che l'orizzonte elettricamente conduttore è rappresentato dalle argille del Calabriano o del Pliocene. In definitiva, quindi, le curve di livello della base del ricoprimento recente indicano la superficie limite superiore della parte più argillosa del

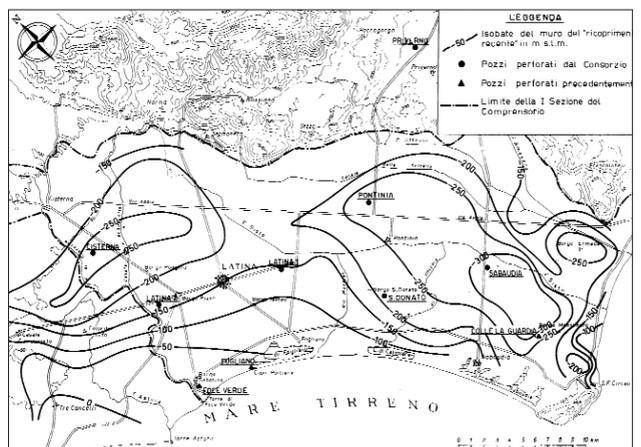


Figura 1.6– Ricostruzione del “muro di ricoprimento recente” secondo l'interpretazione della *Compagnie Générale de Géophysique*, effettuata in base ai sondaggi elettrici.

Calabriano o del Pliocene.

Sempre nel 1952-53 venne eseguita dalla *Compagnie* una nuova campagna in cui i sondaggi elettrici ricoprivano una superficie di circa 700 km<sup>2</sup>. I sondaggi situati sui primi contrafforti dei Lepini mostravano variazioni della resistività dei calcari cretaci da 500 e 4.000 ohm-m. Tali variazioni sono da mettere in relazione con la presenza di acque circolanti all'interno dei calcari. I nuovi sondaggi elettrici hanno confermato, nella maggior parte della Pianura Pontina, la presenza di tre orizzonti sovrapposti aventi differenti caratteristiche elettriche (figura 1.7):

- un orizzonte superiore resistente, definito “ricoprimento recente”, di resistività compresa fra 15 e 100 ohm-m;
- un “orizzonte conduttore” la cui resistività varia fra 2,5 e 25 ohm-m;
- un “substrato resistente” di resistività superiore a 100 ohm-m;

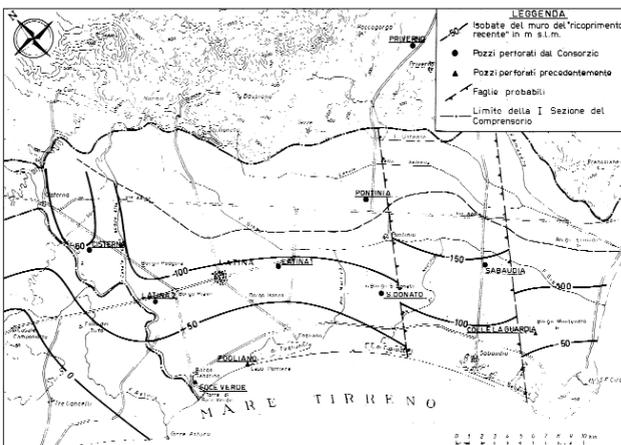


Figura. 1.7– Ricostruzione del “muro di ricoprimento recente” secondo l’interpretazione dei sondaggi elettrici con i risultati delle perforazioni. (Conforto B., Di Ricco G. & Sappa M., 1962)

Il “ricoprimento recente” comprende l’insieme dei terreni più superficiali, elettricamente resistenti, che si trovano in genere al di sopra della formazione elettricamente conduttiva e, in alcune parti della pianura, direttamente al di sopra del “substrato resistente”. Tale ricoprimento è costituito esclusivamente o quasi, dai terreni del Pleistocene (Siciliano e Post-Siciliano). La resistività del ricoprimento recente, pur variando fra 15 e 100 ohm-m, è in genere compresa fra 25 e 50 ohm-m e corrisponde alla resistività del complesso sabbioso-tufaceo-argilloso incontrato con i pozzi *Latina 1* e *Latina*

*na 2*, *Cisterna*, *Fogliano*, *Foce Verde*.

La resistività di tale ricoprimento scende al di sotto dei 25 ohm-m in prossimità degli affioramenti cretaci dei Lepini dove, come ha messo in evidenza il pozzo *Pontinia*, le formazioni del Pleistocene sono prevalentemente argillose e supera i 50 ohm-m solo nella zona a SE, in corrispondenza della quale il Pleistocene è rappresentato prevalentemente da formazioni sabbiose (pozzi *Saubaudia* e *Colle La Guardia*). Secondo l’interpretazione della *Compagnie*, lo spessore del ricoprimento, che si riduce talvolta a poche decine di metri, raggiunge un massimo di 300 m.

Il letto del ricoprimento ha un andamento piuttosto irregolare: nella Pianura Pontina sono state messe in evidenza due grandi depressioni.

La più settentrionale, presso Cisterna, si prolunga oltre il limite occidentale della piana, ed ha una profondità di circa 300 m. La parte più profonda della seconda depressione è collocata a NE di Saubaudia. All’estremità SE della Pianura Pontina l’interpretazione dei sondaggi elettrici aveva messo in evidenza altre tre piccole depressioni. Le perforazioni hanno confermato la presenza di tali depressioni, causate probabilmente da dislocazioni tettoniche, fenomeni erosivi e subsidenza (vedi figura 1.7).

### I.3. La bonifica idraulica

#### I.3.1. Cenni storici

Nell’evoluzione del paesaggio pontino la componente antropica ha svolto un ruolo determinante, esercitando un’azione significativa su un intervallo temporale ben superiore agli ultimi decenni. Per evidenziare correttamente gli effetti di questi interventi, rispetto a quelli connessi ai processi naturali agenti nell’area, è necessario delineare in sintesi la successione delle opere realizzate.

Nel corso degli ultimi due millenni numerosi furono i tentativi, a partire da quelli condotti dai Volsci, di recuperare all’agricoltura e agli insediamenti questa vasta area pianeggiante prossima a Roma. Nell’antichità l’intervento di bonifica più completo e duraturo venne avviato dai Romani. La realizzazione di una serie articolata di opere sui principali corsi d’acqua, in parte giunte sino al XVIII secolo (Nicolay M.N., 1800), fanno supporre che già allora fossero state individuate le principali cause dell’impaludamento dell’area.

La costruzione della via Appia, la principale arteria di

comunicazione di Roma con l'Italia meridionale, con un tracciato rettilineo di circa 33 km (corrispondente alla via Appia attuale) testimonia l'efficacia degli interventi condotti. L'ubicazione della *Regina Viarum*, attraverso la principale zona paludosa, indica inoltre che erano state raggiunte conoscenze significative sull'assetto geologico dell'area, molto probabilmente acquisite anche con indagini nel sottosuolo. Le testimonianze storiche e letterarie sull'entità degli interventi sono tuttavia scarse e contraddittorie ed anche gli studiosi moderni non sono concordi sui risultati conseguiti dall'amministrazione romana (D'Erme V. *et alii*, 1984).

La disgregazione dell'Impero e, conseguentemente, la cessazione degli interventi di manutenzione devono aver provocato in breve tempo il ritorno dell'area pontina alle condizioni originarie. I tentativi successivi furono volti al ripristino delle opere esistenti e alla realizzazione di interventi anche ingenti, tra i quali lo scavo del canale Portatore, del Sisto, con la rettifica del fiume Antico per far defluire le acque del Ninfa. Alla fine del XVIII secolo prese l'avvio un nuovo significativo piano di bonifica promosso nel 1776 dal Papa Pio VI; esso venne realizzato sotto la direzione dell'ingegnere Gaetano Rappini nel corso di circa 20 anni (Rappini G., 1777). Si procedette al restauro e alla ricostruzione della via Appia, nel tratto Tor Tre Ponti-Terracina, alla riorganizzazione del reticolo idrografico e ad un nuovo assetto del territorio, che in molti tratti essenziali si è mantenuto sino ad oggi. Tra le varie opere furono escavati il Linea Pio, il Canale di Na-

vigazione, il Condotto Pio e le fosse Migliare.

Nuovi alvei vennero assegnati ai fiumi Ufente, Amaseno, Portatore, Sisto, Cavata, Ninfa ed ai canali Schiazza, Selcella e Botte. Nel secolo successivo i vari interventi furono volti essenzialmente al mantenimento in efficienza e al miglioramento della rete idraulica definita dal Rappini. Nel 1862 si costituì il "Consorzio idraulico della Bonificazione Pontina" da cui, attraverso varie trasformazioni e ridenomiazioni si originarono i due enti "Consorzio di Bonifica di Latina" e "Consorzio della Bonificazione Pontina", attualmente unificati nel "Consorzio di Bonifica dell'Agro Pontino" preposto al mantenimento delle opere di bonifica (De Vito, 1980). All'inizio del '900 entrò in funzione la prima idrovora (Barra Caracciolo, 1907), poi integrata con altri due impianti, che insieme drenavano circa 15 km<sup>2</sup> di terreni nella zona più depressa della pianura.

La trasformazione definitiva delle aree paludose si compì a partire dalla fine degli anni Venti (figure 1.8 e 1.9), sino allo scoppio della Seconda Guerra Mondiale, con la "Grande Bonifica Integrale" che portò a rilevanti trasformazioni ambientali e ad una profonda ristrutturazione di tutto il reticolo di drenaggio (Prampolini N., 1939).

Vennero separate e fatte defluire in modo indipendente le acque provenienti dai bacini esterni (acque alte) e quelle delle aree poste a quote sufficientemente elevate (acque medie). Nelle zone depresse, con quote prossime o inferiori al livello del mare, si realizzarono 22 impianti idrovori che assicurano tuttora il drenaggio

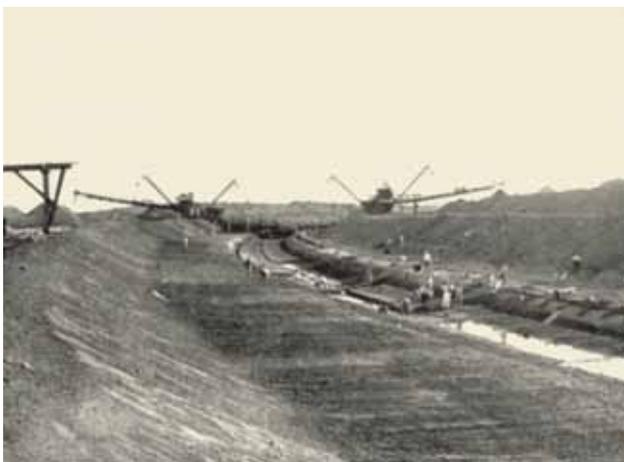


Figura. 1.8 - Scavo meccanico del Canale Mussolini attualmente noto come Canale delle Acque Alte. (fonte: Consorzio di Bonifica dell'Agro Pontino)



Figura. 1.9 - Draga a secchie per lo scavo dei canali (azionata con motore Diesel). (fonte: Consorzio di Bonifica dell'Agro Pontino)

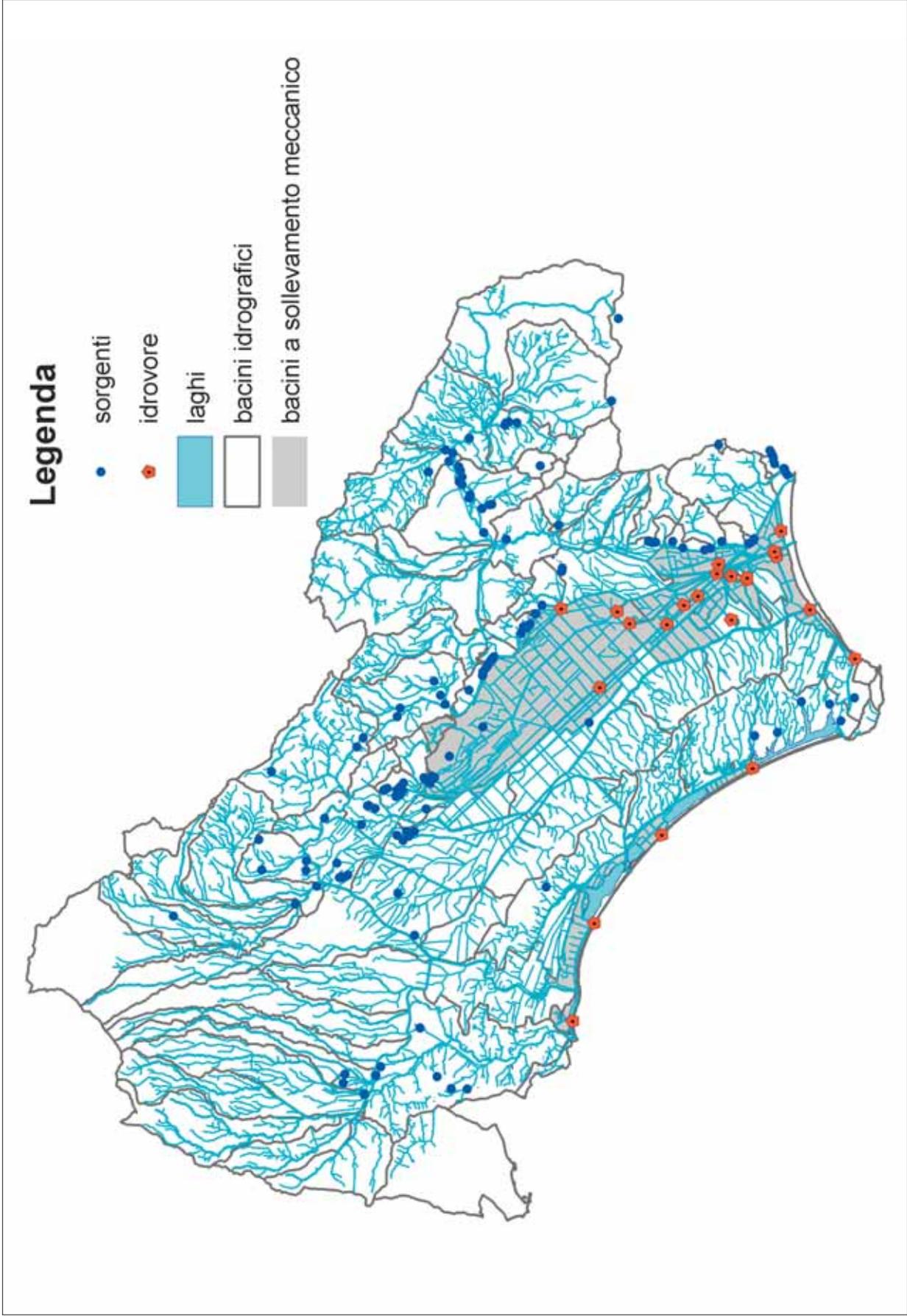


Figura 1.10 – Attuale schema dell'idrografia della bonifica pontina



Canale Selcella. Sullo sfondo l'idrovora di Mazzocchio.

artificiale di circa 200 km<sup>2</sup>. I terreni bassi presso il litorale vennero rialzati con la messa in posto di 10 milioni di metri cubi di riporti. Furono, inoltre, aumentati il numero e la funzionalità degli sbocchi a mare dei corsi d'acqua naturali ed artificiali.

### I.3.2. L'attuale idrologia della Pianura Pontina

La bonifica idraulica delle Paludi Pontine ha sostanzialmente modificato il regime naturale delle acque superficiali della Piana, escludendone tutte quelle che prima vi pervenivano dal confine N e NO.

Ciò fu ottenuto parzialmente con la costruzione del grande canale delle acque alte, il quale, raccogliendo al suo inizio i deflussi del fosso di Sermoneta e del fosso Carella, dopo un percorso di circa 6 km in direzione media verso NO, piega a SO, taglia la via Appia al km 59 e

prosegue immettendosi nell'antico alveo del torrente Moscarello, opportunamente corretto ed ampliato, sboccando in mare presso Torre di Foce Verde.

Nel suo cammino esso raccoglie tutte le acque superficiali che gli pervengono dalla destra, tra cui quelle del torrente Teppia, del Fosso di Cisterna, nonché di un altro collettore artificiale di acque alte (Fosso Spaccasassi) che, con inizio dalla confluenza del Fosso della Ficocchia col Fosso Leschione, presso Torre di Padiglione, allaccia alcuni fossi e torrenti provenienti dai Colli Albani e ne percorre le pendici a mezza costa.

Il collettore delle acque alte, fin quasi alla confluenza con il Fosso Spaccasassi, ha portata perenne, ma di ordine trascurabile durante il periodo estivo, cosicché non vi si può fare alcun affidamento per l'irrigazione dei terreni dell'Agro Pontino. Nella parte situata a S del col-

lettore delle Acque Alte, le acque superficiali provenienti dalle pendici dei monti Lepini e Ausoni sono in gran parte raccolte da altri sistemi di canali di “acque alte” convergenti verso il Canale Portatore.

La Piana Pontina è, inoltre, solcata da una fitta ed organica rete di collettori di acque medie e basse; le prime fanno capo in prevalenza al Rio Martino (Canale delle Acque Medie), al canale Linea Pio e al Fiume Sisto; le seconde in maggioranza al Canale Selcella e agli altri collettori principali dei bacini a prosciugamento meccanico. Le depressioni intorno ai laghi costieri sono servite da reti autonome di acque basse; tali acque vengono sollevate a mezzo di piccoli impianti idrovori.

È importante evidenziare che nella rete dei colatori di bonifica si riversano anche le acque delle sorgenti pedemontane. Tali acque che, durante la stagione estiva, costituiscono il deflusso di base dei principali corsi d'acqua rappresentano la più importante fonte di approvvigionamento per gli usi irrigui.

Nella realizzazione della bonifica idraulica fu, infatti, già prevista l'utilizzazione a scopo irriguo di tali risorse mediante sbarramenti mobili entro i colatori al fine di rialzare i livelli dell'acqua in essi contenuta durante la stagione irrigua e regimarne, quindi, i deflussi.

Per quanto riguarda le acque derivanti dal ruscellamento delle precipitazioni, l'entità della parte di queste acque di scolo che può venire utilizzata a fini produttivi è molto scarsa; infatti, essa è limitata ad una frazione delle acque contenute nei colatori di bonifica alla fine della primavera ed a quella, molto esigua, che perviene nel periodo estivo (Conforto D. *et alii*, 1962). Il regime dei deflussi è condizionato dalla necessità di mantenere nei co-

latori un determinato livello che non può essere alzato, in quanto è necessario conservare un “franco di coltivazione” che garantisca il mantenimento di una zona di areazione, indispensabile per lo svilupparsi delle colture. Negli ultimi anni si rileva un forte inquinamento dei corpi idrici superficiali e della falda freatica ad opera degli scarichi puntuali e diffusi connessi con lo sviluppo residenziale e produttivo degli ultimi decenni.

Di contro, normative europee sempre più restrittive in merito alla qualità degli alimenti e alle modalità di coltivazione spingono gli operatori agricoli e industriali ad una minore flessibilità nella scelta della “bontà” dell'acqua, orientando la loro ricerca, più di prima, verso le meno vulnerabili falde profonde, più sicure dal punto di vista qualitativo.

È emblematico il fatto che molti agricoltori affrontino le spese per garantirsi l'approvvigionamento idrico mediante la realizzazione di pozzi, anche in territori dove il Consorzio di Bonifica garantisce l'uso dei canali a fini irrigui.

Allo stato attuale, la situazione della Pianura Pontina è quantomeno allarmante: studi recenti (Ventura *et alii*, 2001) sull'area (688 km<sup>2</sup>) indicano infatti uno sfruttamento della risorsa idrica con portate medie annue pari a circa 1.500 l/s per uso industriale e 3.400 l/s per uso agricolo e domestico. Si deve considerare che il fabbisogno irriguo, concentrato nel periodo estivo, assume valori di punta che raggiungono i 15.000 l/s.

Si comprende, quindi, come un'attenta valutazione delle problematiche relative al prelievo di acqua si imponga, anche nell'ottica di migliorare le dinamiche che regolano l'entità degli emungimenti stessi, in uno stato di evidente elevato sfruttamento della risorsa idrica.



## II. Il bacino di Mazzocchio e le opere di captazione

### II.1. Metodologia di acquisizione

Lo studio ha interessato l'area del bacino a drenaggio artificiale di Mazzocchio; in particolare le indagini sperimentali hanno riguardato:

- la rilevazione delle caratteristiche dei pozzi e dei livelli idrici delle falde acquifere;
- la misura delle portate drenate dall'impianto idrovoro e negli alvei dei principali fossi.

I risultati dello studio sono stati associati ai primi dati qualitativi ricavati dal progetto monitoraggio della Provincia.

Per quanto riguarda la conoscenza del sottosuolo, le informazioni disponibili si limitano a perforazioni realizzate per scopi di ricerca o per la caratterizzazione idrodinamica di campi pozzi industriali o di acquedotti.

Per le finalità dello studio, è risultato utile condurre una campagna di rilevamento su un campione statisticamente rappresentativo di pozzi che non si limitasse alla sola acquisizione dei livelli idrici e di campioni di acqua per analisi chimiche, ma che tenesse conto anche delle tecniche esecutive del pozzo, del suo schema costruttivo, delle tipologie di utilizzo e stima delle portate emunte.

La misura della portata sollevata dall'idrovoro di Mazzocchio è stata effettuata grazie alla collaborazione del *Consorzio di Bonifica dell'Agro Pontino*, che ha fornito i tabulati con le ore di funzionamento delle pompe. Tale misura risulta fondamentale per la verifica del bilancio idrologico e quindi, per la comprensione dell'entità degli scambi tra acque superficiali e sotterranee all'

l'interno del bacino suddetto.

Sulla base dei dati sperimentali acquisiti, integrati con i dati meteorologici delle stazioni del *Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale* e tenendo conto delle caratteristiche morfopedologiche dell'area, è stato possibile stilare il bilancio idrico del bacino.

### II.2. Campagna di caratterizzazione delle opere di captazione

Le misure sono state effettuate nella primavera-estate 2003 e integrate, con campagne di aggiornamento nell'anno successivo. In generale, si è cercato di far coincidere i periodi dei rilievi sperimentali con il periodo di "morbida", in cui secondo l'esame delle medie stagionali (Istituto Superiore di Sanità, 1942; Mouton J., 1977), i livelli piezometrici dell'acquifero profondo raggiungono le quote maggiori.

Come supporto cartografico, è stata utilizzata la Carta Tecnica Regionale del Lazio alla scala 1:10.000.

Le misure piezometriche relative ai pozzi censiti sono state riferite alla quota (in m s.l.m.) del boccapozzo. Tale quota è stata a sua volta corretta tenendo conto dell'altezza del boccapozzo (BP) stesso sul piano-campagna (PC).

L'opportunità di rilevare il dato sperimentale rispetto al BP, deriva dalla necessità di poter disporre di un punto di riferimento univoco, dovendo ripetere e confrontare nel tempo le misure dei livelli statici e/o dinamici della falda all'interno di un determinato pozzo.

Sono stati rilevati ed analizzati in tutto 96 pozzi, distri-

**Ubicazione e georeferenziazione del campione**

**Caratteristiche tecniche del pozzo**

**Descrizione qualitativa dello stato dell'opera**

**Qualità delle acque captate dal pozzo**

Figura 2.1 – Esempio di scheda utilizzata per le annotazioni in campagna relative ai pozzi.

buiti in modo sufficientemente uniforme sull'area, ed appartenenti a differenti tipologie di utenza. In fig. 2.1 è riportata la scheda di censimento impiegata. Il campione studiato rappresenta una aliquota stimabile tra il 5 e il 10% del totale dei pozzi presenti nell'area, stimati tra 1000 e 2000 (si consideri che nell'archivio provinciale dei pozzi denunciati ai sensi della L. 275/93 risultano in quest'area 838 captazioni).

I pozzi censiti sono riportati in fig. 2.2 assieme a quelli derivati dagli studi svolti dall'Istituto Superiore di Sanità (1942) e del Consorzio Acque (1992).

### II.2.1 Uso, profondità e anno di costruzione

Da una prima analisi dei dati rilevati si nota che, sul campione, il numero di nuovi pozzi presenta un valore costante di circa 14 pozzi ogni dieci anni. Le perforazioni

raggiungono, comunque, un picco negli anni '70 in coincidenza degli incentivi della *Cassa del Mezzogiorno* e valori trascurabili negli anni Quaranta. In questa prima analisi emerge come il valore cumulato di fig. 2.3 cresca in modo costante, ad eccezione dell'ultimo intervallo rappresentativo di soli tre anni, in cui i valori attesi potrebbero far aumentare notevolmente il trend. Per quanto riguarda la distribuzione dei pozzi in funzione delle profondità raggiunte (fig. 2.4), si rileva una prevalenza di pozzi con profondità comprese tra 40 e 70 metri.

Se si confronta l'istogramma di fig. 2.4 con la distribuzione sul territorio degli stessi pozzi (Fig. 2.5) si evince che le profondità raggiunte sono molto variabili e che la variabilità riscontrata non dipende dall'ubicazione dei pozzi.

Tale variabilità è da attribuire al fatto che la perforazio-

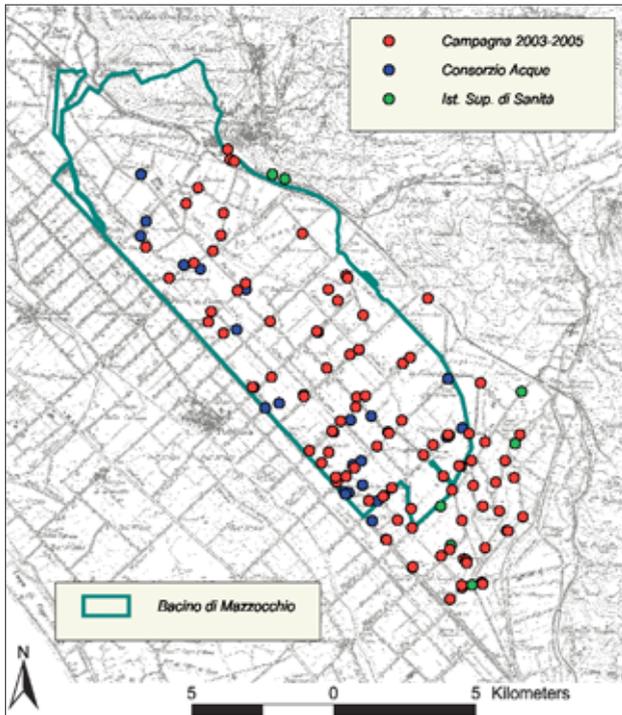


Fig. 2.2 – Ubicazione dei pozzi rilevati nell'area d'interesse (in rosso), in relazione a quelli di due studi precedenti (Istituto Superiore di Sanità – 1942; Consorzio Acque – 1992).

ne di un pozzo prescinde dalla presentazione di un progetto esecutivo che inquadri l'opera in un contesto idrogeologico di area vasta. Quindi, le profondità raggiunte sono in funzione quasi sempre delle diverse circostanze presentatesi al momento della perforazione.

Il più delle volte le scelte dipendono dai costi di realizzazione del pozzo; non è un caso, infatti, che il picco dell'istogramma in fig. 2.4 ricada proprio al di sotto dei 50 m, profondità oltre la quale usualmente, variano i costi di messa in opera del pozzo.

In conseguenza di quanto detto i pozzi interessano orizzonti acquiferi con differente litologia (fig. 2.6).

Dalla distribuzione dei pozzi per anno di perforazione e per profondità raggiunta (fig. 2.7) si evidenzia come, con il passare degli anni, si sia preferito cercare l'acqua più in profondità. Ciò è stato senza dubbio incentivato, a parità di profondità della falda raggiunta, dallo sviluppo delle tecnologie di perforazione e completamento dei pozzi ma soprattutto dall'esigenza di dover captare acque con caratteristiche chimico-fisiche idonee al tipo di utilizzo e in particolare prive di contaminazione.

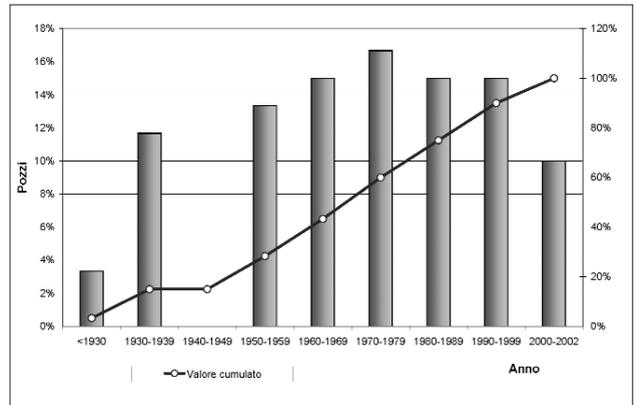


Fig. 2.3 – Percentuale dei pozzi in relazione all'anno di costruzione.

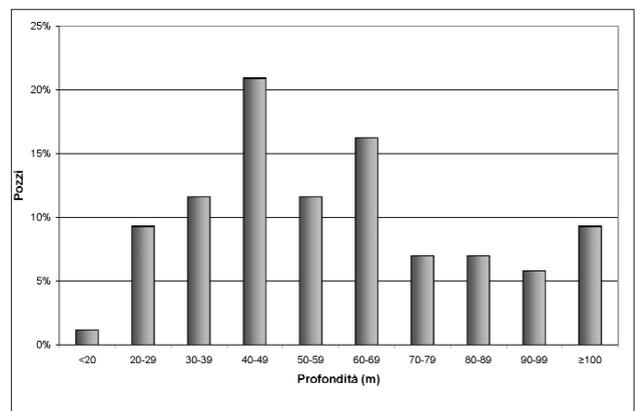


Fig. 2.4 – Percentuale di pozzi in funzione delle profondità.

Questo aspetto viene evidenziato nel diagramma di fig. 2.8 nel quale si confronta la profondità dei pozzi con il loro utilizzo. Si può osservare come per l'impiego domestico viene prelevata principalmente acqua a profondità comprese tra 20 e 60 m, mentre, per uso irriguo, il prelievo si concentra a profondità superiori.

Il settore zootecnico sembra approvvigionarsi indifferentemente dalla profondità. Negli anni si osserva, comunque, un trend generale di progressivo approfondimento delle captazioni sia ad uso zootecnico che irriguo. L'uso prevalente dei pozzi (fig. 2.9) è indirizzato al settore domestico (41%) e al settore agricolo-zootecnico (41%) mentre il 14% del campione riguarda pozzi non utilizzati ed infine il 4% dei pozzi è destinato ad uso potabile.

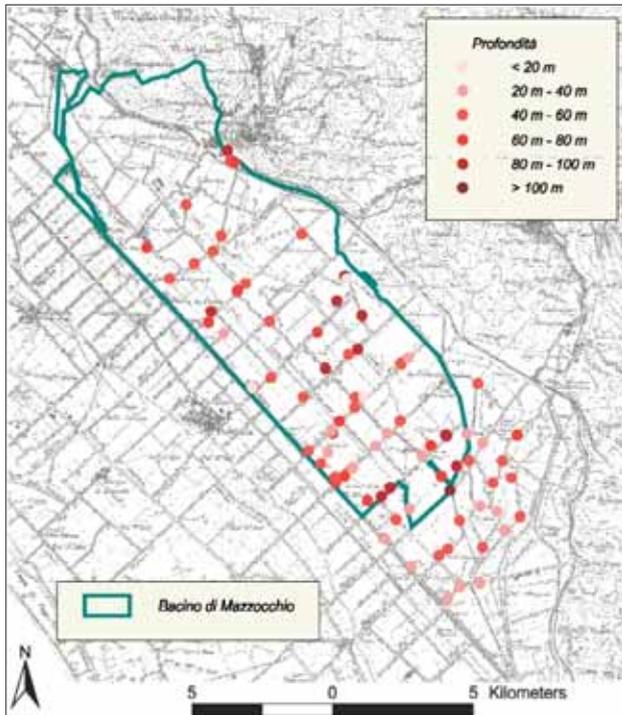


Fig. 2.5 – Ubicazione e profondità dei pozzi nell'area di studio.

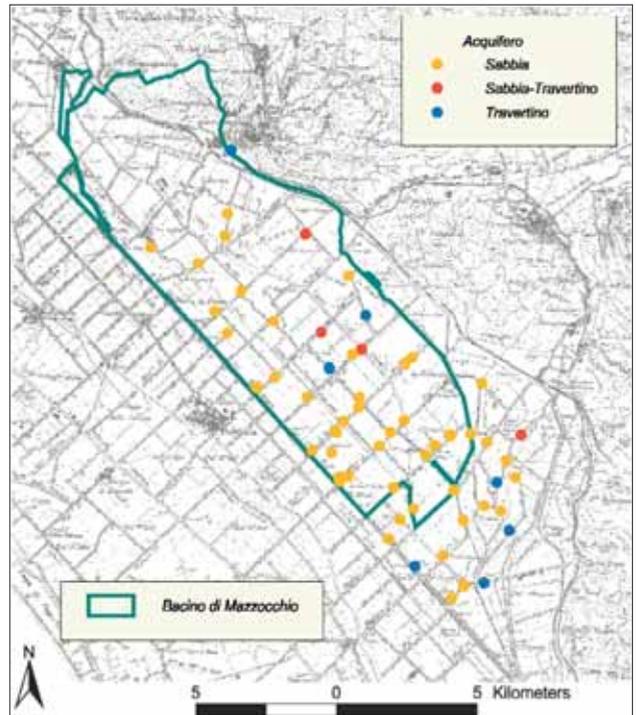


Fig. 2.6 – Ubicazione dei pozzi distinti per litologia dell'acquifero interessato.

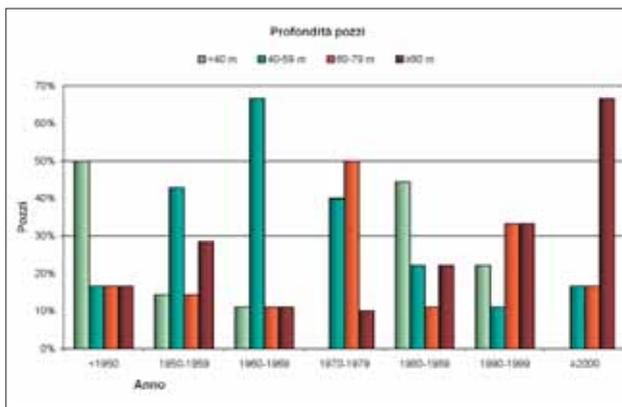


Fig. 2.7 – Percentuale di pozzi in funzione delle profondità, in relazione all'anno di realizzazione”.

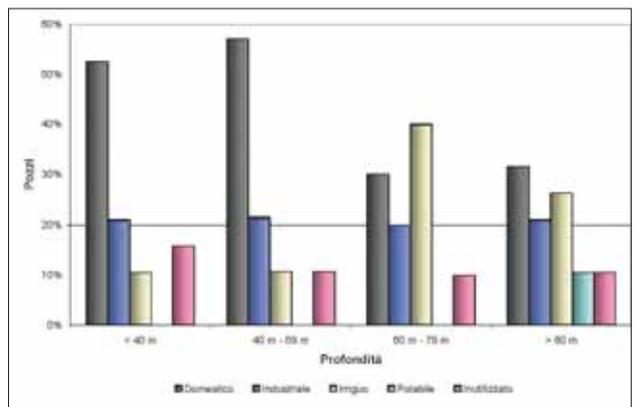


Fig. 2.8 – Percentuale di pozzi in funzione delle profondità, in relazione all'uso”.

## II.2.2 Livelli statici e dinamici e caratteristiche delle acque

Tra le misure effettuate “in situ” è stata rilevata la quota piezometrica in pozzo. In alcuni casi non è stato possibile ottenere delle misure dirette dei livelli statici rappresentati dalla quota piezometrica. In molti pozzi che presentano condizioni di naturale venuta a giorno della

falda al di sopra del *piano campagna* (artesianesimo della falda), con acqua in continuo scorrimento, a causa della particolare struttura dei boccapozzi (fig. 2.10) si è potuto misurare solo la portata effluente, il diametro del tubo di eduazione e la sua quota (che rappresenta il livello dinamico ormai stabilizzato della falda).

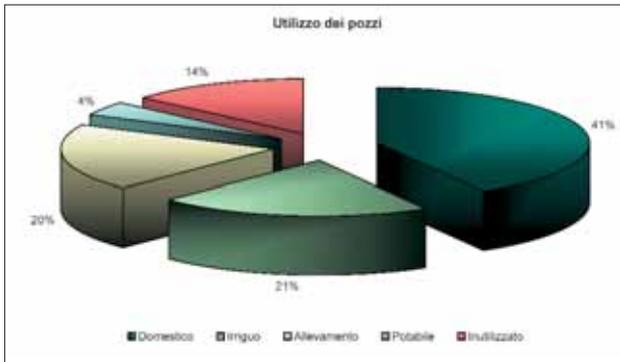


Fig. 2.9 – Percentuali relative al tipo di utilizzo delle captazioni idriche esaminate.

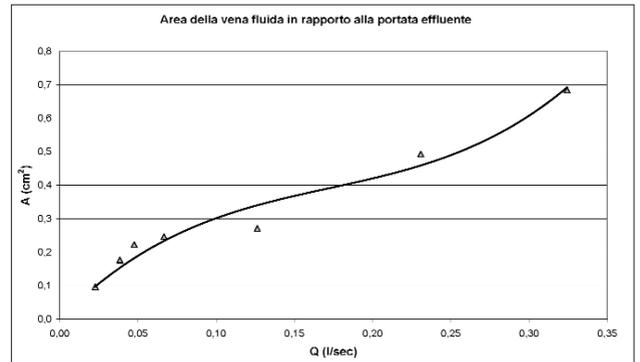


Fig. 2.11 – Grafico sperimentale in cui è rappresentata la legge che lega la portata effluente dal tubo di diametro noto all'area della vena fluida contenuta in esso.



Fig. 2.10 – Due diversi tipi di boccapozzo chiusi all'estremità, rispettivamente con foro e tubo di eduazione. In questo genere di casi l'acqua viene fatta sgorgare permanentemente.

In questi casi è possibile ricostruire la quota piezometrica statica della falda in pressione a partire dalla misura della quota piezometrica dinamica, della portata  $Q$  effluente dal pozzo artesiano con falda traboccante e del diametro  $df$  del tubo di eduazione. A tal fine è stata messa a punto una relazione semiempirica che consente di stimare la perdita di carico idraulico  $\Delta h$  dovuta alla fuoriuscita della portata stessa  $Q$  dal pozzo. Tale grandezza, sommata al livello (dinamico) osservato nel pozzo, dà un'indicazione approssimativa dell'altezza piezometrica della falda, ovvero del livello statico che si otterrebbe se fosse possibile chiudere il foro di eduazione ed aspettare la stabilizzazione della risalita di acqua all'interno del pozzo.

La relazione semiempirica è stata elaborata ricorrendo a misure sperimentali in laboratorio; di seguito in figura 2.11, si riporta la curva relativa ad una tubazione di diametro  $df = 4 \text{ cm}$ , che mette in relazione la portata misurata con l'area della vena fluida, dalla quale si calcola il  $\Delta h$  tramite relazioni basate sul teorema di Bernoulli (Arredi F. 1969).

Avendo a disposizione sia il valore del livello statico misurato in situ, sia quello indiretto derivato dal livello dinamico e dalla  $Q$ , si è verificato il procedimento sui dati di campagna, fornendo una stima dell'errore commesso pari a circa il 20%.

In genere, i valori del livello statico, stimati come precedentemente descritto, approssimano per difetto quelli reali (perdite di carico secondarie) ad eccezione dei casi di portate consistenti per le quali risultano stimati per eccesso (perdita di validità della legge); essi sono stati, quindi, considerati solamente come misure a supporto dei dati tratti dalle misure dirette.

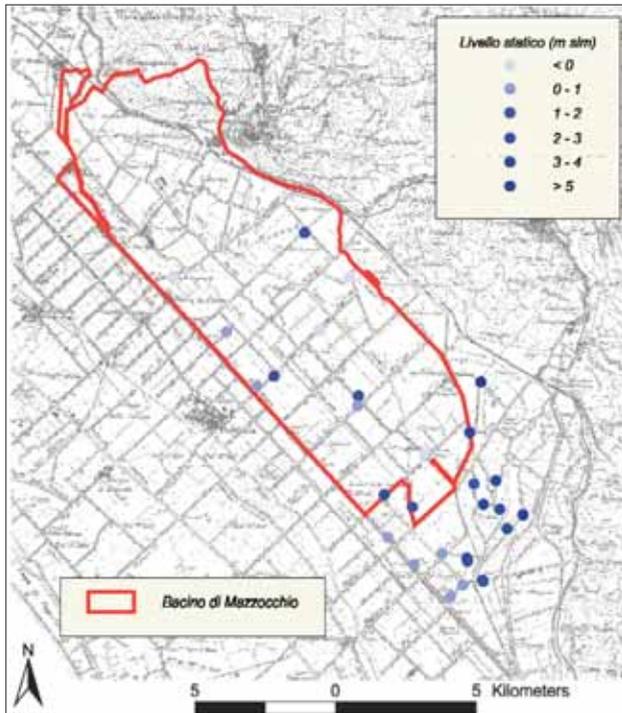


Fig. 2.12 – Livelli statici delle falde intercettate dai pozzi nell'area di studio.

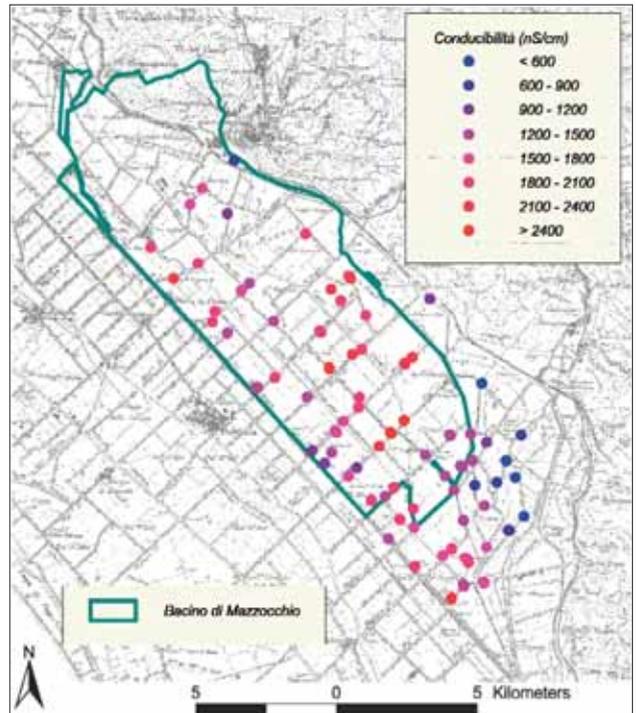


Fig. 2.13 – Conducibilità delle acque ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) captate dai pozzi nell'area di studio.

Oltre ai rilievi delle quote piezometriche (fig. 2.12) sono state eseguite delle misure del grado di mineralizzazione delle acque mediante la rilevazione della conducibilità elettrica.

Si deve comunque tenere conto del fatto che la conducibilità è funzione, oltre che del contenuto salino totale anche del tipo di sale disciolto. Di fatto ogni sale conferisce all'acqua una "conducibilità specifica". La concentrazione corretta di sali disciolti si otterrebbe, quindi, utilizzando come campioni di taratura, miscele in diverse proporzioni ottenute dalle acque più dolci e da quelle più salate presenti nello stesso acquifero. Pertanto, le considerazioni che seguono, non vogliono definire chimicamente gli acquiferi analizzati, ma dare esclusivamente delle indicazioni rispetto alla qualità delle acque e alla loro origine.

Nella fig. 2.13 sono riportati i valori relativi alle misure in situ.

### II. 3. Modalità costruttive dei pozzi

Come già accennato, l'assenza di una normativa e l'approccio prettamente empirico con cui vengono realiz-

zati i pozzi determina l'esistenza di diverse tipologie di esecuzione e di completamento delle opere di captazione (fig. 2.14).

Il metodo di perforazione a percussione è stato fino a qualche anno fa il più utilizzato e continua ad essere adottato frequentemente, per i bassi costi e la sempli-



Fig. 2.14 – Impianto di perforazione a rotazione automontato con tavola rotary e pompa del fango, "fatto in casa" da un artigiano locale.

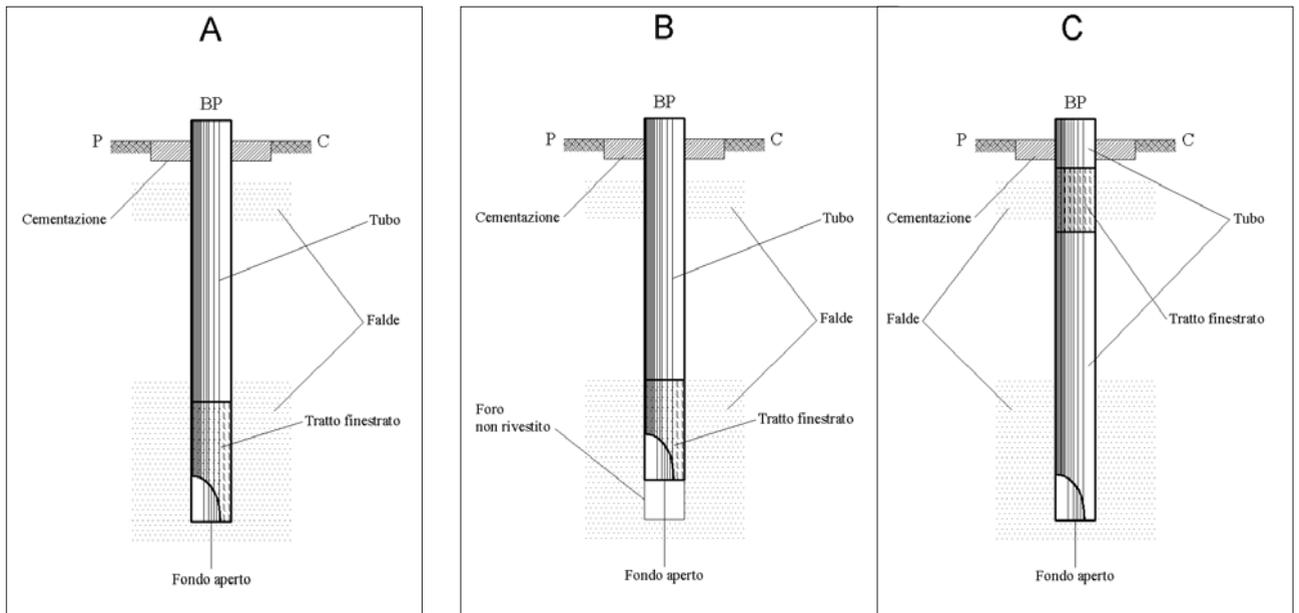


Fig. 2.15 – Schema di pozzo in acquiferi prevalentemente sabbiosi, con filtro punzonato, senza dreno e aperto alla base (A).

Fig. 2.16 – Schemi di due differenti tipi pozzo in acquiferi prevalentemente sabbiosi, con filtro punzonato, senza dreno e aperto alla base (B, C).

cità degli impianti. Purtroppo però, le velocità di avanzamento in foro sono molto basse (si arriva ad alcuni giorni per pozzi di media profondità), soprattutto quando si incontrano le frequenti intercalazioni travertinose di cui la piana abbonda. È per questo motivo che, in questi ultimi anni, ha preso piede il metodo a rotazione con circolazione diretta di fango: la maggior laboriosità nella preparazione all'escavazione, viene ripagata da elevate velocità di perforazione (5÷6 ore per perforare i primi 50 m).

### II.3.1 Schemi costruttivi

Da questa campagna sono emersi in tutto 15 differenti schemi costruttivi di pozzo, adottati a prescindere dall'assetto idrogeologico locale.

In molti casi, anche in presenza di pozzi con tratto finestrato, non si rileva la presenza del dreno all'esterno della tubazione. La ragione di questo è da ricercare nella modalità esecutiva del foro, realizzato utilizzando la tubazione di manovra del pozzo come tubo di rivestimento.

Nell'eseguire tale operazione, se si prevede (per la vicinanza ad altri pozzi di cui si conoscono le caratteristiche) di non incontrare un vero e proprio banco di materiale lapideo su cui ammorsare la tubazione, essa viene precedentemente munita di filtro (di norma, si tratta di

filtri a punzonatura rettangolare, "a ponte" o "a persiana"), altrimenti viene infissa senza filtro ed eventualmente finestrata "in opera" (fig. 2.15).

Naturalmente, sono state rilevate alcune varianti, come nei casi in cui, per l'elevato attrito laterale, l'infissione si è arrestata ad una certa quota e si è continuato a scavare "fuori scarpa" ancora per qualche metro di profondità (fig. 2.16 schema B). In altri casi, anziché perforare fuori scarpa, si è optato di finestrare la parte superiore dei tubi, captando l'acqua dalla falda superficiale (fig. 2.16 schema C).

Nel caso di pozzi con filtro e materiale drenante la messa in opera delle tubazioni (interne alla camicia esterna o protette dai fanghi di circolazione), oltre a non presentare il rischio di deformazioni o rotture delle stesse, consente di fare scelte più oculate in fase di completamento, come ad esempio decidere la lunghezza ottimale dei filtri in relazione alla potenza dell'acquifero. A fronte dei molteplici vantaggi in fatto di efficienza di filtrazione, è richiesta in questo caso una maggiore capacità tecnica da parte degli operatori, proprio per la maggiore complessità del sistema di perforazione e di esecuzione dei lavori. Si osserva, però, che la quasi totalità dei dreni osservati è costituita da ghiaia calcarea di pezzatura uniforme, con diametro dell'ordine dei 3÷4 mm. Il dreno ideale dovrebbe essere, invece, costituito

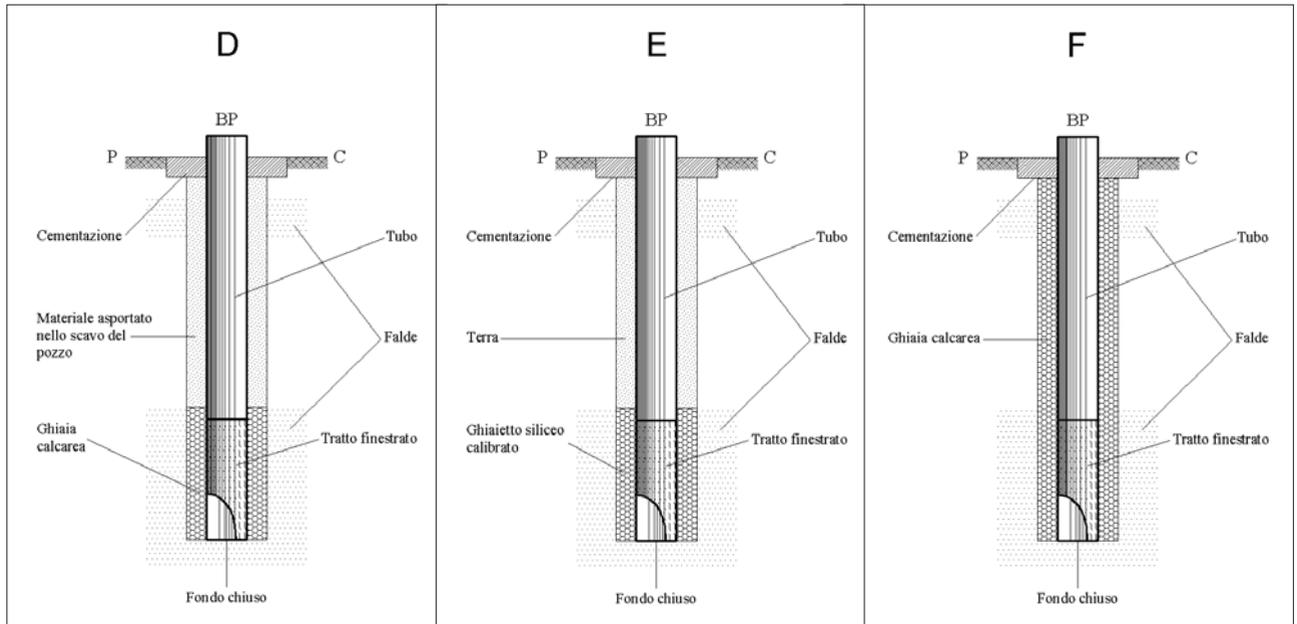


Fig. 2.17 – Schemi di tre differenti tipi pozzo in acquiferi prevalentemente sabbiosi, provvisti di filtro, materiale drenante e chiusi alla base. Il dreno, in tutti i casi, non è stato cementato nella porzione sommitale, ma ricoperto con materiale ad alta permeabilità (D, E, F).

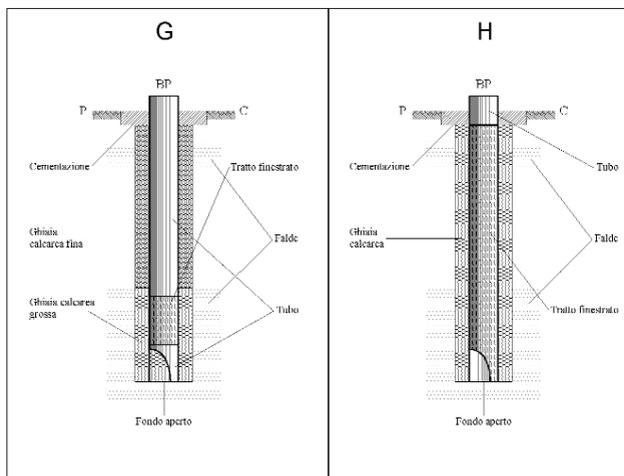


Fig. 2.18 – Schemi di due differenti tipi pozzo in acquiferi prevalentemente sabbiosi, provvisti di filtro, materiale drenante (nel primo caso anche interno al tubo) e aperto alla base (G, H).

da ghiaietto siliceo, così da evitare la sua possibile alterazione, con granulometria fissata in funzione di quella dei terreni. Inoltre, in quasi tutti i casi osservati non è presente alcun isolamento idraulico né tra le diverse falde, né nella parte superiore. Si è anche riscontrato, a seconda dei casi, il riempimento fino in superficie dell'intercapedine tubo-foro con il materiale asportato in fase

di scavo (fig. 2.17 schema D) o con terra (fig. 2.17 schema E) o addirittura, con lo stesso materiale drenante (fig. 2.17 schema F), tutti in genere, compattati con operazioni di pistonaggio.

In alcuni casi, per aumentare la superficie di filtrazione e/o drenaggio, il fondo del pozzo è stato lasciato aperto ed inghiaiato internamente, (fig. 2.18 schema G); in altri casi, la tubazione è stata finestrata per tutta la sua lunghezza e il dreno posizionato lungo tutta la colonna. (fig. 2.18 schema H).

Nel caso di pozzi sprovvisti di filtro la loro esecuzione è unicamente legata alla presenza di uno strato di materiale lapideo su cui viene appoggiata o incastrata la tubazione. La presenza di livelli travertinosi consente di emungere portate apprezzabili, senza eccessivo trasporto solido, anche da questo tipo di captazione.

Uno schema spesso realizzato consiste nel completamento del pozzo con un rivestimento parziale, facendo affidamento sulla capacità di autosostentamento dalla roccia stessa (fig. 2.19 schema D). Un'altra tecnica molto utilizzata consiste nell'utilizzare gli strati lapidei più compatti, solamente per ammorzare il tubo e non per sfruttarne la capacità filtrante nei confronti dell'acqua; a tale scopo vi è, all'estremità inferiore del tubo, una specie di "scarpa" formata da denti o scanalature. In questi casi ad opera terminata si procede all'immissione

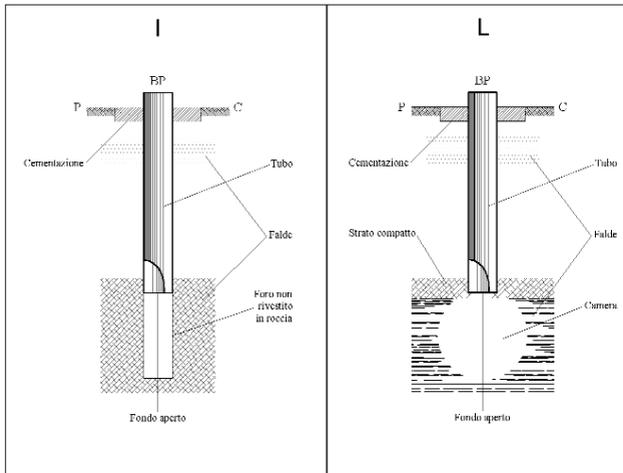


Fig. 2.19 – Schemi di due differenti tipi pozzo sprovvisto di filtro e aperto alla base, il primo in acquifero costituito da materiale lapideo, il secondo in acquifero sabbioso, ammorzato solamente su intercalazioni lapidee, con camera di raccolta dell'acqua (I, L).

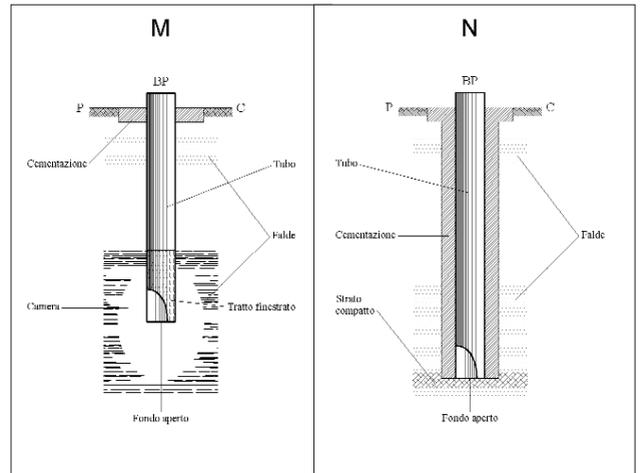


Fig. 2.20 – Schemi di due differenti tipi pozzo aperto alla base. Il primo è provvisto di filtro in acquifero prevalentemente sabbioso, con camera di raccolta dell'acqua; il secondo è ammorzato su intercalazioni lapidee ed è completamente cementato (M, N).

di aria in pressione: così facendo, il fondo del foro risulta essere sede di un processo di erosione spinto, e si viene a creare una vera e propria “camera” (fig. 2.19 schema L). Il ruolo di questa camera è in fase di pompaggio sia quello di bacino di sedimentazione per le particelle pesanti, sia quello di aumentare la superficie filtrante acquifero-pozzo.

In quest'ultimo caso infatti, a parità di portata, si riduce la velocità del deflusso nell'acquifero, il che migliora le prestazioni del pozzo anche quando le permeabilità sono basse. L'impiego dell'aria compressa d'altronde, presenta senza dubbio il vantaggio di pulire il fondo-foro dai detriti di perforazione. Una delle prerogative della “perforazione ad aria”, è proprio lo sfruttamento della capacità di facile reperimento del fluido di perforazione e la sua bassa densità, che porta ad elevate velocità di avanzamento in foro. Tuttavia, l'abuso di tale tecnica può determinare eccessivi sgrottamenti con conseguente rischio di franamento e intasamento del pozzo. Vi sono poi delle varianti anche a questo schema, che propongono la camera a fondo foro accoppiata ad una tubazione finestrata (fig. 2.20 schema M): l'azione del filtro viene letteralmente vanificata o, comunque, circoscritta alla piccola area della parete adiacente della camera, se questa non è già franata.

Va evidenziato, infine, che solo in uno schema (fig. 2.20 schema N) è stata riscontrata la presenza di un qualche tentativo di isolamento del pozzo, anche se ciò ha com-

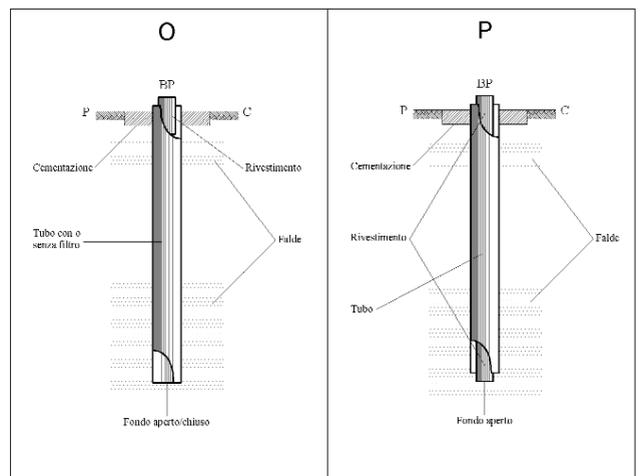


Fig. 2.21 – Schemi di due differenti tipi di rivestimento del pozzo: parziale e totale. Nel primo caso, il rivestimento può riguardare tubi con e senza filtro, quindi aperti, o meno, alla base; nel secondo caso, riguarda solamente tubi senza filtro, aperti sul fondo (O, P).

portato la cementazione dell'intera colonna; non è un caso che tale pozzo sia poco profondo ed intercetti quindi un'acqua di qualità scadente.

Per concludere, vanno ancora citati i casi che comprendono alcune opere di captazione appartenenti alle categorie descritte e che dipendono solo in parte, dal tipo di schema adottato. Si tratta di pozzi rivestiti successivamente, in modo parziale (fig. 2.21 schema O) o comple-

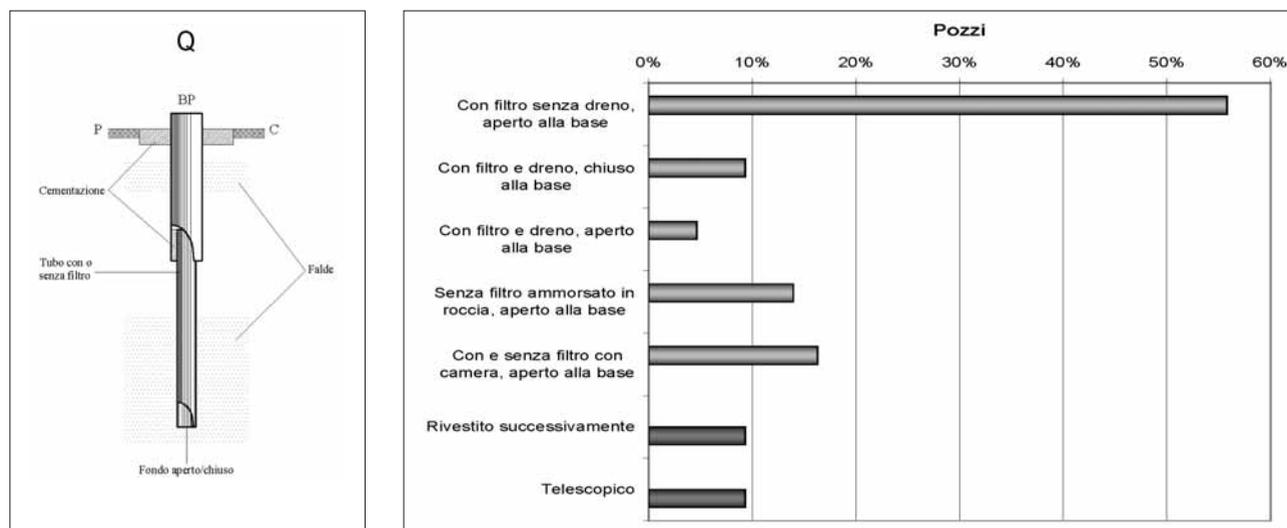


Fig. 2.22 – Schema di pozzo telescopico: un tubo a diametro inferiore viene introdotto nel primo e si prosegue la perforazione. Alla fine, si cementa lo spazio tra i due (Q).

Fig. 2.23 – Distribuzione percentuale delle diverse tipologie di pozzi riscontrate nell'area d'indagine.

to (fig. 2.21 schema P); in questi casi, sono stati recuperati i pozzi in cui le tubazioni erano ormai rese inutilizzabili dall'azione meccanica o corrosiva dell'acqua, rivestendoli internamente con tubi nuovi di materiali con migliori caratteristiche di composizione e resistenza.

Altro schema complementare ai primi, è quello del pozzo telescopico. Tale sistema è stato utilizzato prettamente nella perforazione a percussione, risultando necessario quando le profondità da raggiungere erano molto maggiori di quelle ottenute con una sola tubazione. L'attrito laterale indotto dalla spinta del terreno, accumulatosi nell'avanzamento della perforazione, rendono l'approfondimento dei tubi impossibile; l'unico modo per superare questo inconveniente è proseguire con un tubo di diametro inferiore, passante internamente al primo. La continuità meccanica ed idraulica tra i due tubi è stata effettuata in tutti i casi tramite cementazione; cementazione di cui, anche stavolta, non si ha traccia all'esterno dei tubi stessi (fig. 2.22 schema Q).

Ovviamente, anche queste ultime situazioni non sono indice di un responsabile approccio alla perforazione; la mancata contestualizzazione dell'opera nella complessa realtà idrogeologica rende la sua esecuzione un metodo invasivo che turba gli equilibri in atto, con particolare riferimento ai rapporti di interscambio tra acquiferi diversi.

### II.3.2 Uso, profondità e anno di costruzione

La distribuzione delle tipologie costruttive dei pozzi pre-

cedentemente descritte mostra un netto prevalere del primo schema (A), che costituisce più del 50% del campione osservato (fig. 2.23 e 2.24). Si può, quindi, comprendere come la presenza continua di terreni a carattere sabbioso e l'incertezza di poter incontrare uno strato lapideo di adeguata consistenza e potenza abbia favorito la scelta di installare filtri.

Il fatto, poi, che siano presenti un buon numero di pozzi senza dreno (tubi ciechi ammorsati in roccia, con camera a fondo-foro con e senza filtro) conferma che il tipo di perforazione prevalentemente utilizzato sia quello a percussione, con infissione diretta dei tubi.

Ma se la distribuzione di questi schemi presenta un andamento generale abbastanza definito in termini di percentuali, non è la stessa cosa in termini di ubicazione sul territorio; la fig. 2.24 mostra ancora come non vi siano, di fatto, aree circoscritte nelle quali viene utilizzato uno specifico schema. Tale circostanza può essere giustificata analizzando diversi fattori.

In primo luogo l'anno di costruzione discrimina fortemente il metodo di perforazione e le tecnologie utilizzate (fig. 2.25). I pozzi realizzati mediante infissione diretta dei tubi prevalgono sul campione in tutto l'arco di tempo considerato e tendono a diminuire negli ultimi anni in relazione all'aumento della diffusione del metodo di perforazione a rotazione che rende economicamente più accessibile la realizzazione di pozzi con filtro rivestito da materiale drenante. La tecnica di creare una

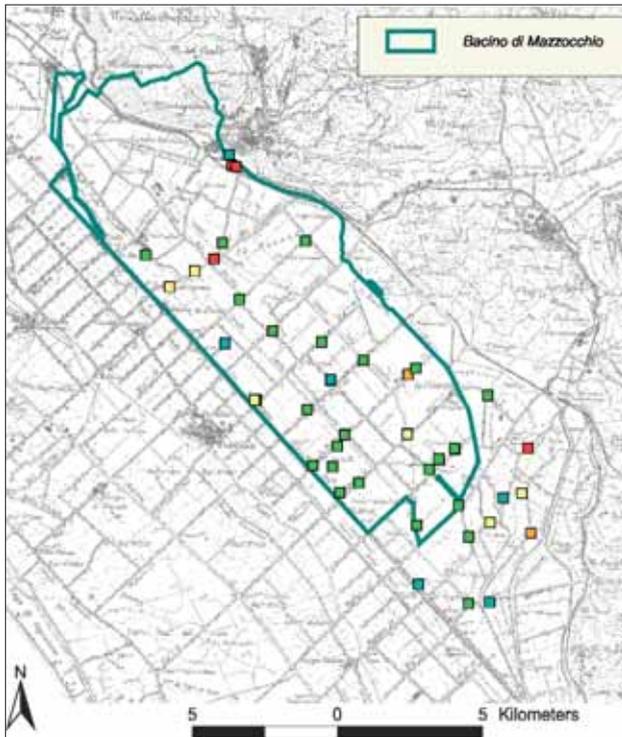


Fig. 2.24 – Distribuzione dei diversi schemi di pozzi rilevati nell'area d'indagine.

camera a fondo-foro con aria compressa, era già stata abbandonata agli inizi degli anni Settanta.

Nella fig. 2.26 sono state messe in relazione le tipologie costruttive delle captazioni con le profondità da esse raggiunte. Si può notare che i pozzi più profondi presentano migliori caratteristiche costruttive.

Emerge, inoltre, come l'esigenza di acque con migliori caratteristiche chimico-fisiche, come nel caso di industrie zootecniche, abbia determinato il riadeguamento di molti pozzi, in funzione dei requisiti richiesti (fig. 2.27). Paradossalmente ciò non accade per l'approvvigionamento domestico, dove gli utenti sono disposti ad adattarsi a caratteristiche chimico-fisiche delle acque più scadenti. La ragione principale sta nella portata estratta che nel caso d'uso domestico consente un trattamento anche economico che nel caso d'uso irriguo o allevamento diventa impossibile per le elevate portate.

Le più alte percentuali di pozzi con filtro e materiale drenante riscontrate nel settore irriguo possono essere spiegate se si considera il fatto che gli impianti di irrigazione ad aspersione e nebulizzazione dell'acqua possono facilmente ostruirsi e che, pertanto, l'eliminazione

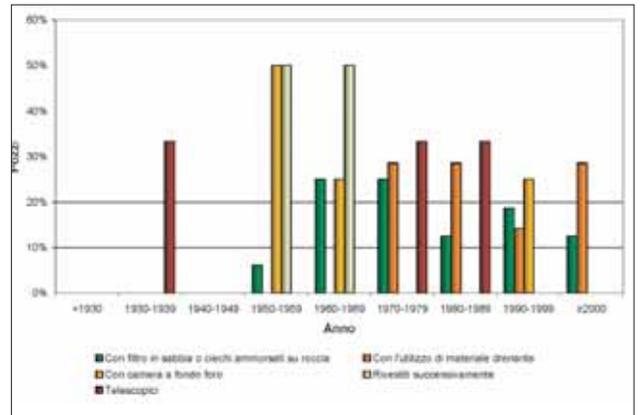


Fig. 2.25 – Distribuzione dei pozzi per anno di realizzazione, in relazione agli schemi adottati”.

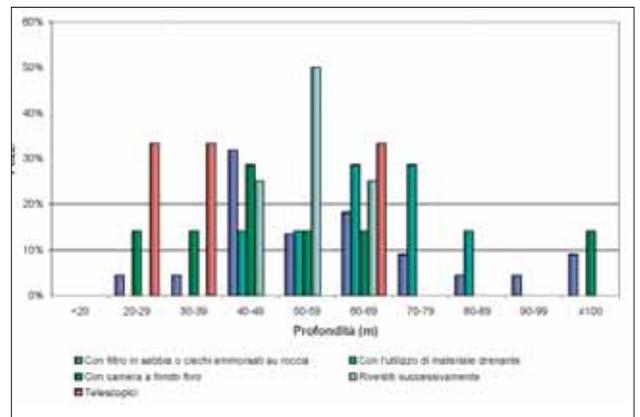


Fig. 2.26 – Distribuzione dei pozzi per profondità raggiunte, in relazione agli schemi adottati”.

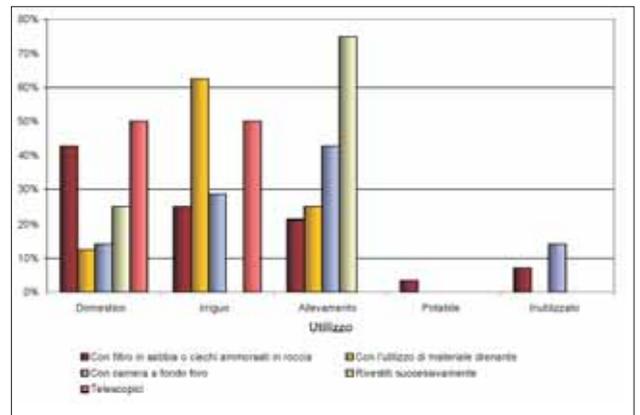


Fig. 2.27 – Distribuzione dei pozzi per tipologia di utenza, in relazione agli schemi adottati”.



Fig. 2.28 – Filtro anticalcare utilizzato in un'impianto di irrigazione ad aspersione. Si possono notare il boccapozzo sigillato e la valvola di mandata dell'acqua.

delle particelle solide assume un ruolo di primaria importanza. Non di rado, anche per gli usi irrigui, risulta necessaria la realizzazione di impianti per l'eliminazione del calcio ed altri elementi che possono precipitare in soluzione (fig. 2.28).

Nel settore zootecnico, dove prevale l'interesse per le caratteristiche chimiche e biologiche dell'acqua: a parità di "purezza" della falda intercettata, l'attenzione viene concentrata sui materiali costituenti le tubature al fine di evitare sospensioni ferrose.

### II.3.3 Materiali e diametri dei tubi

Più volte si è accennato alle caratteristiche dei tubi utilizzati. Spesso, con questa dicitura ci si è riferiti a due aspetti fondamentali: tipo di materiale e diametro uti-

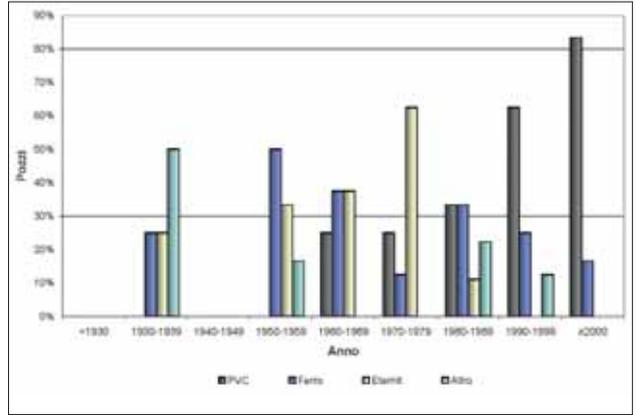


Fig. 2.29 – Distribuzione dei pozzi per anno in relazione al materiale dei tubi”.

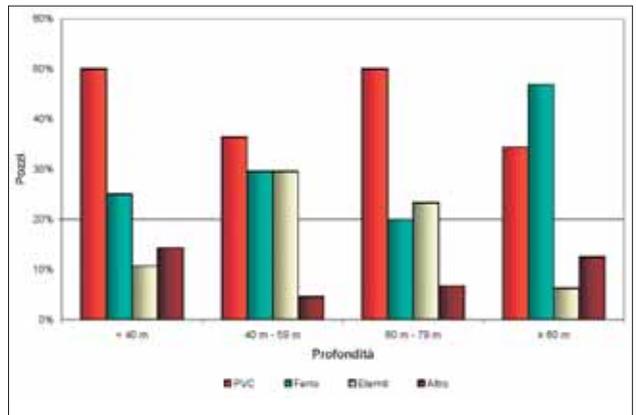


Fig. 2.30 – Distribuzione dei pozzi per profondità, in relazione al materiale dei tubi”.

lizzato. I materiali predominanti riscontrati sono l'acciaio, l'eternit ed il PVC, talvolta l'ottone, la ghisa, l'acciaio zincato e il cemento.

Si rileva che nel tempo (fig. 2.29) il massiccio utilizzo dell'acciaio e dell'eternit è stato gradualmente sostituito da quello del PVC.

Ciò è accaduto prevalentemente per due motivi. In primo luogo per l'effetto cancerogeno riconosciuto all'amianto componente dell'eternit che ha comportato la necessità di chiudere o rivestire tali pozzi. In secondo luogo per ragioni di carattere economico. Infatti, il PVC garantisce a costi relativamente contenuti la realizzazione di tubature di rivestimento sostanzialmente atossiche, durature e resistenti anche per profondità elevate (fig. 2.30)

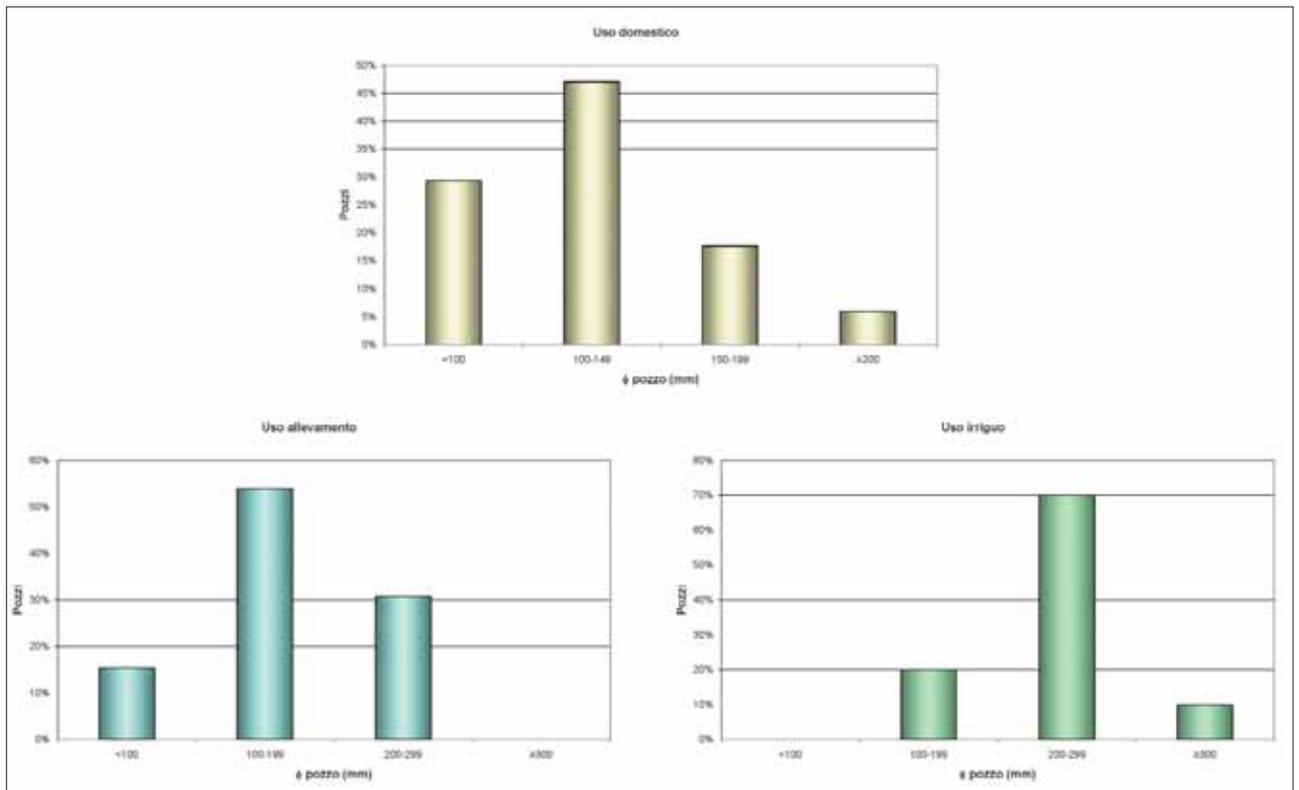


Fig. 2.31 – Distribuzione dei pozzi per diametro dei tubi, a seconda del tipo di utilizzo.

Per quanto riguarda i diametri, il campo di variabilità è ampio e si va da un minimo di 60 mm ad un massimo di 1.000 mm. Tali grandezze sono subordinate esclusivamente al tipo di utilizzo, da cui dipendono le portate di emungimento e da queste ultime, quando la pompa è sommersa, la dimensione della pompa. La fig. 2.31 mostra chiaramente tale andamento. I pozzi di diametro maggiore sono quelli ad uso irriguo in congruenza con le elevate portate di esercizio richieste nei periodi di punta.

#### II.3.4. Pompe e regimi

Nella caratterizzazione di un pozzo, la pompa ricopre un ruolo di primaria importanza, al pari degli altri elementi menzionati: in quanto da essa dipende l'effettivo utilizzo della captazione.

Dall'analisi dei dati risulta che le dimensioni delle pompe sono in linea con il tipo di utenza.

Purtroppo, non è stato possibile raccogliere altri dati, se non in alcuni casi in cui si conoscono anche le portate di esercizio e i volumi annui di acqua estratti. Tali elementi risulteranno di valido supporto nella stima quantitativa

dei regimi di utilizzo idrico.

I dati evidenziano come il 50% dei pozzi non equipaggiati con una pompa fissa (8% del campione) sono di tipo artesiano (falda traboccante), dove l'acqua viene sfruttata per deflusso naturale. Ciò significa che solamente il 4% dei pozzi in uso viene sfruttato prevalentemente per deflusso naturale di acqua.

Per quanto riguarda le pompe installate, queste sono di tre tipologie: esterne al pozzo ad asse orizzontale e interne al pozzo, sommerse e ad asse verticale (fig. 2.32). Indipendentemente dalla loro potenza, esse possono essere azionate da motori elettrici o diesel; spesso, quando il pozzo è ubicato lontano dalle abitazioni in aree disagiate, la pompa viene azionata mediante il motore del trattore (fig. 2.33). Per quanto riguarda le captazioni ad uso domestico, che nell'area risultano essere prevalenti, queste risultano in genere equipaggiate con pompe di bassa potenza (fig. 2.34).

Le portate di esercizio risultano, infatti, molto basse in quanto gli impianti idraulici delle abitazioni sono muniti di serbatoi (generalmente di 50÷100 l) ed autoclavi.

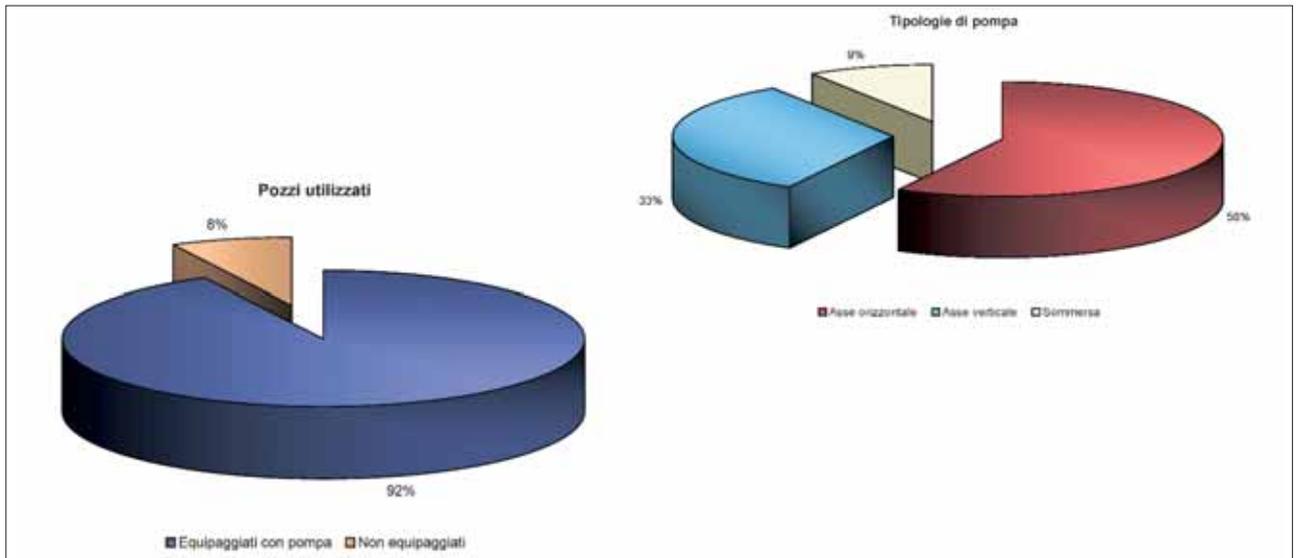


Fig. 2.32 – Percentuali relative al numero di pozzi equipaggiati sul totale di quelli regolarmente utilizzati e alle relative tipologie di pompa adottata.

Ciò vale anche nel settore zootecnico, dove l'emungimento viene dilazionato nel tempo utilizzando serbatoi con volumi variabili da 1000 a 3000 litri.

In campo agricolo tale principio non vale (fig. 2.35); le portate di esercizio aumentano in relazione alla necessità di disporre di portate istantanee da 5 a oltre 20 l/s per garantire l'irrigazione di aree di alcuni ettari in 1 o 2 giorni.

#### II.4 Analisi dei dati sul bacino di Mazzocchio

Per la comprensione delle dinamiche dei deflussi superficiali e sotterranei di un bacino a drenaggio artificiale quale quello di Mazzocchio risulta di fondamentale importanza poter disporre della misura a scala giornaliera delle portate sollevate dall'impianto idrovoro. Tali portate, infatti, dovrebbero rispondere alla seguente relazione di bilancio:

$$Q_s = P - E_{vr} - P_{rl} + T_s + Q_e$$

dove:

$Q_s$  = portate sollevate dall'impianto idrovoro

$P$  = Precipitazioni

$E_{vr}$  = perdite per evaporazione ed evapotraspirazione

$P_{rl}$  = volumi prelevati dal bacino

$T_s$  = apporti al deflusso superficiale di acque sotterranee

$Q_e$  = apporti di acque superficiali da altri bacini



Fig. 2.33 – Particolare dell'accoppiamento trattore-pompa ad asse verticale: il motore del trattore viene preventivamente separato dall'albero e collegato al gruppo rotore della pompa.

La valutazione della precipitazione efficace e del fabbisogno irriguo, decritta sinteticamente nel presente paragrafo, è stata effettuata ricorrendo alla metodologia sviluppata in occasione degli studi per il Piano dell'Uso Compatibile della risorsa idrica (PUC) delle Autorità dei Bacini Regionali del Lazio e del Fiume Tevere (Gazzetti et. al., 2005; Alimonti et. al., 2005).

La ricostruzione spaziale della distribuzione delle precipitazioni e delle temperature massime, minime e medie mensili, necessaria alla stima dell'evapotraspirazione, è

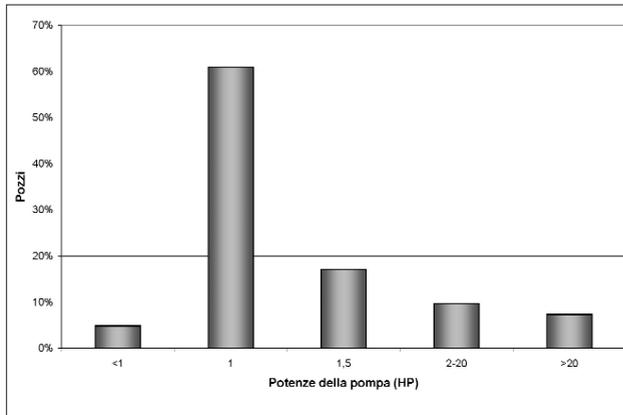


Fig. 2.34 – Distribuzione dei pozzi per potenza della pompa”.

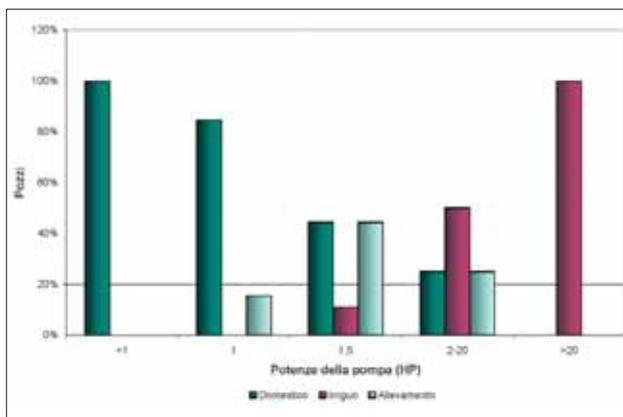


Fig. 2.35 – Distribuzione dei pozzi per potenza della pompa, in relazione al tipo di utilizzo”

stata effettuata a partire dai dati delle stazioni termopluviometriche del Servizio Idrografico e Mareografico regionale, mediante approccio geostatistico. La procedura di seguito brevemente descritta (Raspa G., 2004; Alimonti et al., 2005) consente di ottenere mappe con un elevato grado di attendibilità.

La metodologia applicata per la spazializzazione delle precipitazioni utilizza il kriging in FAI-k (Matheron e Delfiner 1977, Wakernagel 1995, Bruno e Raspa 1994, Chilès e Delfiner 2000), che ha validità in condizioni non stazionarie, che sono più generali, e si presta bene ad essere resa automatica.

Per quanto riguarda le temperature, generalmente correlate in maniera inversa alla quota del terreno, la procedura integra nella operazione di stima le misure sperimentali con il DEM (che diventa così una variabile ausiliaria) che può, nella misura in cui tale correlazione si

esplica, apportare un miglioramento alla accuratezza dei risultati. La corrispondente versione del metodo è nota in letteratura come kriging in FAI-k con deriva esterna.

Il modello proposto per la stima delle precipitazioni efficaci schematizza la superficie in un sistema suolo/vegetazione a singolo strato, coincidente con l'altezza di radicazione della vegetazione.

L'evapotraspirazione reale viene ottenuta come risultato del bilancio tra afflusso meteorico, acqua potenzialmente evapotraspirata dalle piante (evapotraspirazione colturale) e disponibilità reale di acqua nel suolo secondo il seguente schema concettuale:

$$\begin{aligned} E_{Tr} &= E_{Tc} && \text{se } P + U_i \geq E_{Tc} \\ E_{Tr} &= P + U_i && \text{se } P + U_i \leq E_{Tc} \end{aligned}$$

Dove:

$E_{Tr}$  = Evapotraspirazione reale del periodo

$E_{Tc}$  = Evapotraspirazione colturale che è assimilabile all'Evapotraspirazione reale di una data area se non superiore all'acqua disponibile data dalle precipitazioni e dal quantitativo ricavabile dal suolo (frazione di AWC), equivalente al fabbisogno idrico della coltura nel periodo

$U_i$  = Volume di acqua utilizzabile dalle piante (frazione di AWC) contenuto nel suolo all'inizio del periodo

L'Evapotraspirazione colturale ( $E_{Tc}$ ) o fabbisogno idrico della coltura viene determinata moltiplicando l'evapotraspirazione potenziale ( $E_{TP}$ ), che rappresenta l'acqua evaporata in un certo periodo di tempo da un terreno vasto, coperto da una vegetazione fitta, bassa, omogenea, in piena attività di sviluppo, ottimamente rifornita di acqua e che ombreggi completamente il terreno (esempio: *Festuca Arudinacea*), per i coefficienti colturali ( $K_c$ ), che esprimono la proporzionalità tra l'evapotraspirazione della coltura di riferimento (*Festuca Arudinacea*) rispetto a quella della coltura presente nel periodo in esame:

$$E_{Tc} = E_{TP} * K_c$$

L'AWC (Available Water Capacity) esprime il volume di acqua che può essere trattenuto nel suolo tra  $-30$  e  $-1500$  kPa e corrisponde al volume d'acqua potenzialmente utilizzabile dalle piante. Tale parametro è stato ricavato direttamente dalle informazioni associate alla "Carta Pedologica della Provincia di Latina" [Provincia di Latina, 2004].

Le serie di dati meteorologici che presentano un livello di affidabilità adeguata sono solamente le temperature massime e minime e le precipitazioni. Pertanto si è deciso di utilizzare il modello di Hargreaves - Samani (Hargreaves G.H. & - Samani Z.A., 1985).

La scelta della formula di Hargreaves - Samani:

$$ETP = 0.0023 (T_{media} + 17.8) (T_{max} - T_{min}) 0.5 RA$$

è stata effettuata tenendo conto del fatto che, in condizioni di dati carenti e/o limitati alle sole temperature, tale modello di stima sembra fornire dati sufficientemente affidabili e in prima approssimazione confrontabili con quelli ottenuti mediante l'applicazione di modelli più complessi (FAO, 1992; Droogers P. & Allen R.G., 2002). Dall'equazione di bilancio sul bacino ci proponiamo di determinare l'entità del travaso sotterraneo dall'acquifero in pressione a partire dalla stima dei volumi d'acqua che vengono convogliati nel bacino e dalla conoscenza dei volumi d'acqua sollevati dall'impianto idrovoro.

#### II.4.1 Acquisizione ed analisi dei dati di portata dell'Idrovora di Mazzocchio

Attualmente, presso l'idrovora di Mazzocchio non è presente un misuratore delle portate sollevate. Tuttavia il Consorzio di Bonifica dell'Agro Pontino registra con cadenza variabile, da giornaliera a settimanale, le ore di funzionamento di ognuno dei sette "gruppi" di elettropompe sommerse da 6000 l/s ricavando di routine le portate cumulate mensili sollevate dall'impianto (vedi Tab 1).

Con la collaborazione del Consorzio di Bonifica dell'Agro Pontino, è stato ricostruito l'idrogramma giornaliero delle portate sollevate dall'impianto (vedi Fig 2.36) L'operazione ha richiesto una laboriosa attività di lettura ed analisi degli schedari, e nei casi più controversi, il confronto sistematico con i dati giornalieri di precipitazione registrati dalle stazioni pluviometriche del Servizio Idrografico e Mareografico Regionale.

Per svolgere le considerazioni contenute nel presente studio, è stato preso come riferimento l'anno 1995, caratterizzato da valori di piovosità medi (1048 mm/anno sul bacino, pari a 108,3 milioni di metri cubi). In tale anno la portata complessiva sollevata (vedi Tab 2) è stata pari a 100,5 milioni di metri cubi.

Il confronto a scala giornaliera tra le portate sollevate e le piogge (vedi Fig. 2.37) consente di ricavare alcune interessanti considerazioni:

Mese	Tempo pompaggio (h)	Volume sollevato (Mmc)	Portata media (mc/s)
Gennaio	533	11,5	4,30
Febbraio	465	10,0	4,15
Marzo	385	8,3	3,1
Aprile	628	13,6	5,23
Maggio	584	12,6	4,71
Giugno	534	11,5	4,45
Luglio	417	9,0	3,36
Agosto	405	8,7	3,27
Settembre	488	10,5	4,07
Ottobre	501	10,8	4,04
Novembre	573	12,4	4,78
Dicembre	1.289	27,8	10,40
<b>Totale</b>	<b>6.802</b>	<b>146,9</b>	<b>4,66</b>

Tab. 1 – Valori cumulati mensili delle portate sollevate dall'impianto idrovoro di Mazzocchio (dati elaborati da Carlo Cervellin del Consorzio di Bonifica dell'Agro Pontino).

- la risposta pressoché istantanea dell'idrogramma a precipitazioni anche di entità molto modesta evidenzia le caratteristiche di bassa permeabilità dei terreni affioranti;
- il tempo che intercorre tra gli eventi meteorici e i picchi di portata dell'impianto è nell'ordine di 2 giorni dall'inizio dell'evento, ad esclusione di eventi di intensità particolarmente elevata;
- anche nei periodi aridi, con assenza di pioggia protratta per oltre un mese, la portata sollevata giornalmente presenta in media valori compresi tra 1,5 e 2 m<sup>3</sup>/s che devono essere attribuiti a trasferimento di acque dai bacini limitrofi o ad apporti di acque sotterranee.

La possibilità di disporre dell'idrogramma giornaliero delle portate consente di operare una scomposizione dello stesso per riuscire a discriminare le portate dovute al ruscellamento delle precipitazioni dalle portate del deflusso di base connesso ai possibili apporti di acque sotterranee.

La presenza della vasca di raccolta e quindi di una laminazione delle portate aumenta il livello di approssimazione delle stime che comunque rimangono significative. Per la scomposizione dell'idrogramma si proceduto depurandolo dai picchi di portata riconducibili ad eventi meteorici: a partire dai valori di portata giornaliera depurati è stato calcolato il valore rappresentativo del deflusso di base per i diversi intervalli temporali rappre-

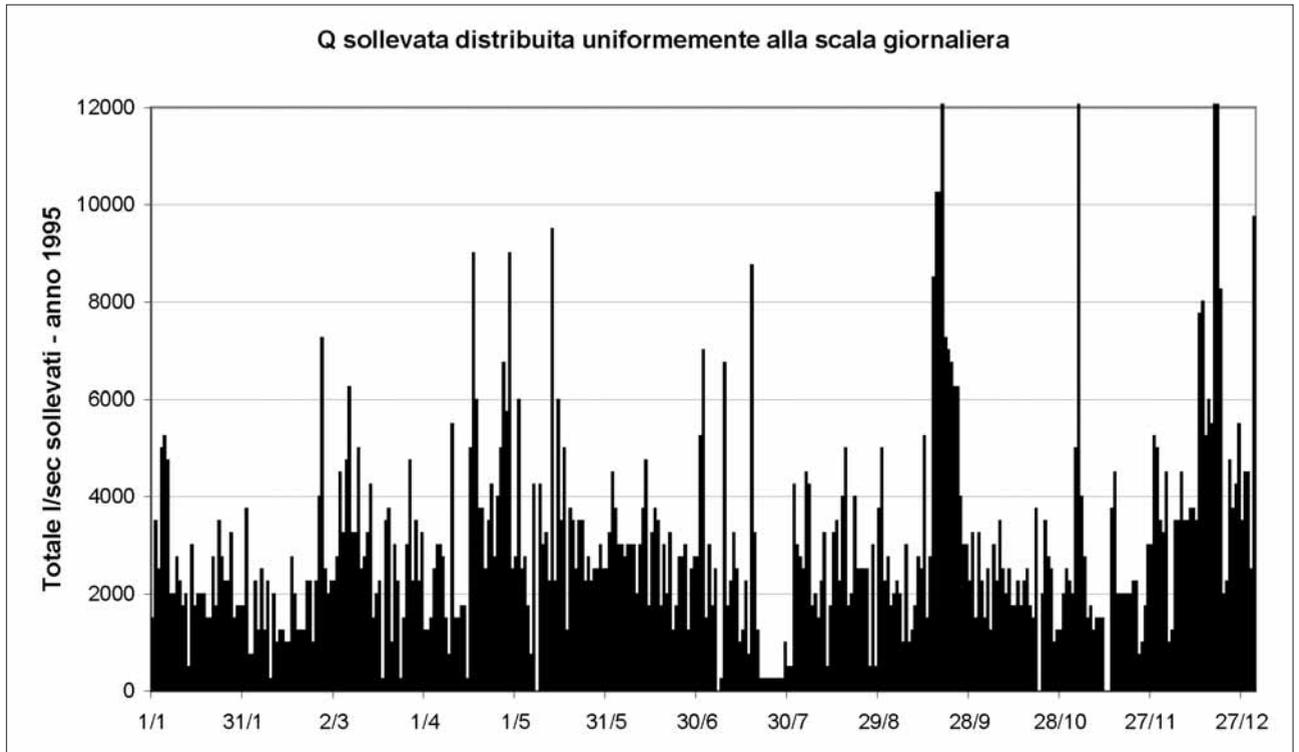


Fig. 2.36 – Diagramma delle portate medie giornaliere sollevate dall'impianto idrovoro di Mazzocchio nell'anno 1995.

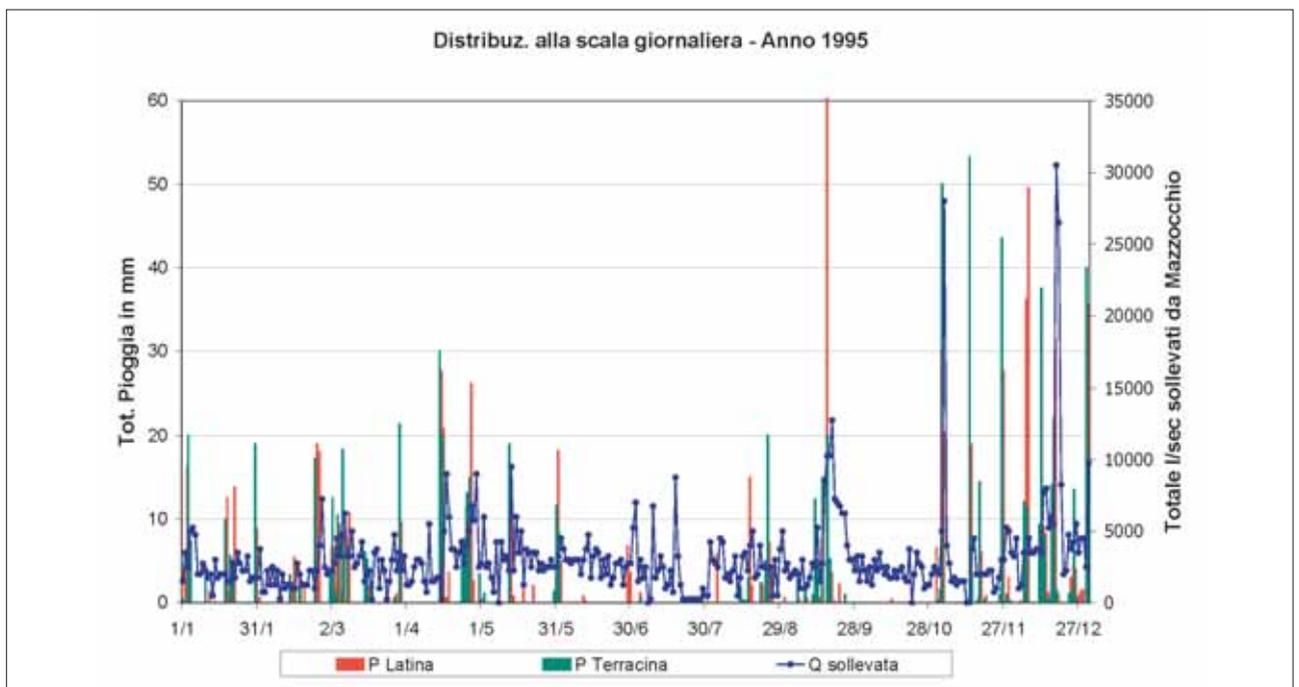


Fig 2.37 – Idrogramma delle portate giornaliere sollevate dall'impianto idrovoro di Mazzocchio confrontato con gli idrogrammi delle precipitazioni registrate dalle stazioni pluviometriche di Latina e Terracina nell'anno 1995.

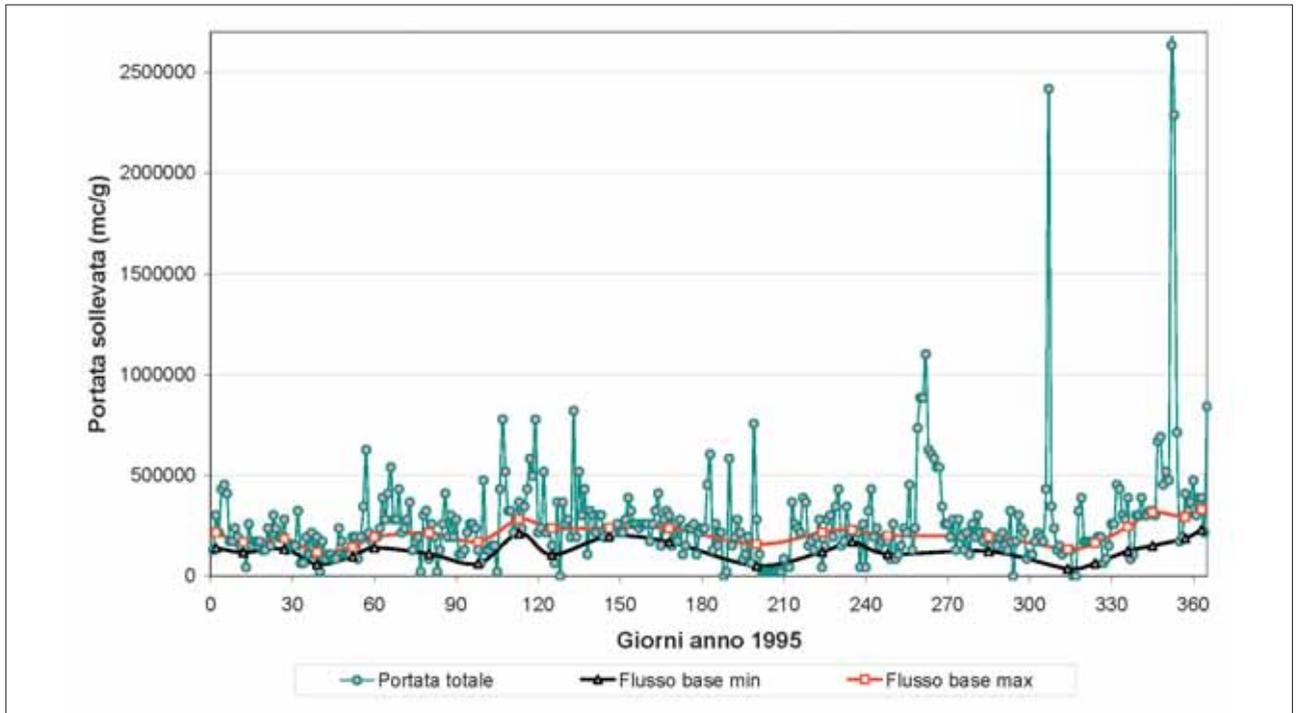


Fig 2.38 – Scomposizione dell'idrogramma delle portate giornaliere sollevate dall'impianto idrovoro di Mazzocchio.

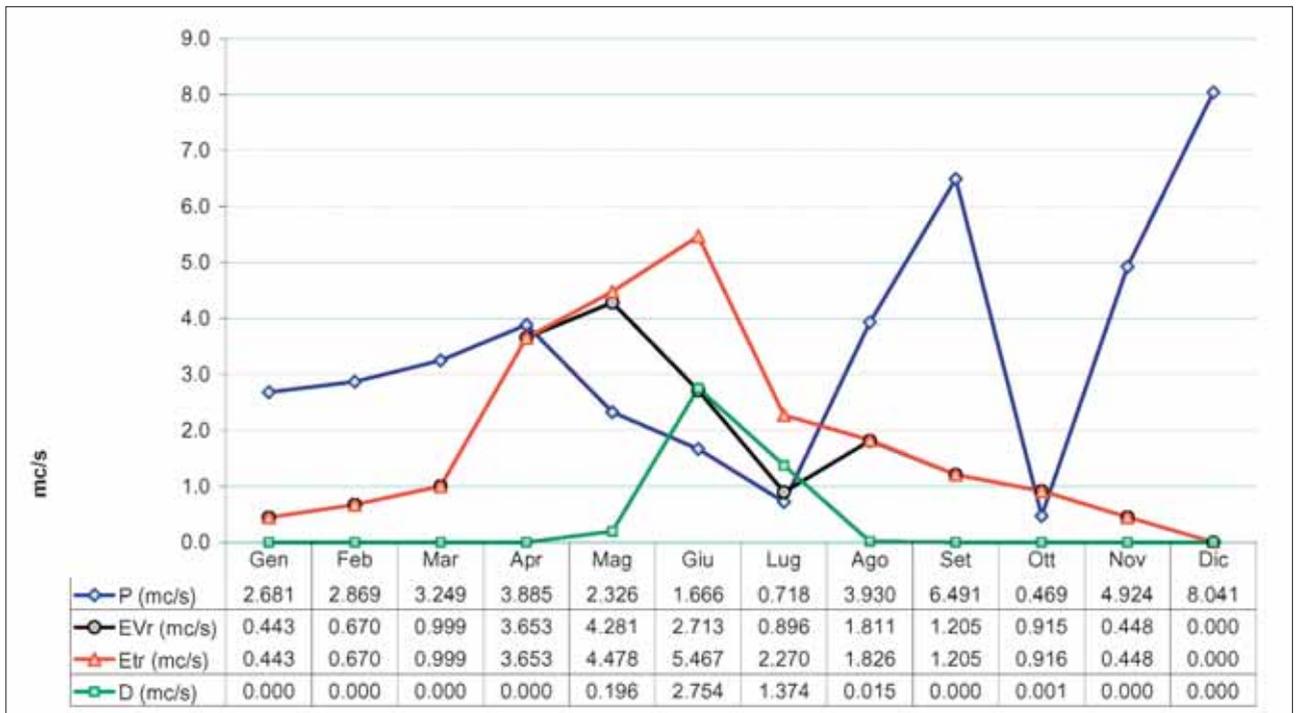


Fig. 2.39 - Confronto dei valori mensili di Precipitazione (P), Evapotraspirazione Culturale (ETr) e Evapotraspirazione Reale (EVR) nei mesi dell'anno 1995, per il bacino di Mazzocchio.



Idrovora di Mazzocchio.

sentativi secondo due criteri:

- il primo consiste nella semplice media mobile (Tab 2 –  $Q_{b1}$  e Fig. 2.38 - Flusso di base massimo);
- il secondo, più cautelativo, sottrae dai valori precedenti l'entità della deviazione standard relativa all'intervallo, mantenendo la curva stimata del deflusso di base sempre in corrispondenza dei valori minimi giornalieri (Tab 2 –  $Q_{b2}$  e Fig. 61 – flusso di base minimo).

#### II.4.2 Considerazioni sul bilancio idrico

Per valorizzare il risultato ottenuto dall'analisi dell'idrogramma delle portate sollevate dall'idrovora di Mazzocchio risulta fondamentale operare un confronto con i valori delle precipitazioni efficaci e dei fabbisogni irrigui nel bacino, precedentemente descritti.

Nella figura 2.39 sono stati diagrammati i valori medi dei parametri climatici calcolati per il bacino di Mazzocchio. Si osserva che nell'anno di riferimento il bacino è carat-

terizzato da un lungo periodo di deficit idrico. Le condizioni di deficit vengono evidenziate dallo scarto esistente tra la linea dell'Evapotraspirazione colturale ( $E_{Tr}$  - domanda idrica teorica ottimale della vegetazione naturale e coltivata nelle condizioni meteo-climatiche locali) e la linea dell'Evapotraspirazione reale ( $E_{Vr}$ ) i cui valori sono condizionati dalla effettiva disponibilità idrica (precipitazioni + acqua contenuta nel suolo).

La differenza tra  $E_{Vr}$  e  $E_{Tr}$ , in aree coltivate irrigate, esprime il deficit idrico indicativo dei fabbisogni irrigui.

Il confronto delle precipitazioni efficaci con le portate sollevate necessita di alcune considerazioni preliminari:

- 1 il Canale Selcella rappresenta, all'interno del bacino idrografico, il punto di recapito più basso in cui convergono, oltre alle acque di ruscellamento, tutte le acque della falda superficiale (freatica);
- 2 la falda profonda è di tipo artesiano, con valori di cari-



Idrovora di Mazzocchio. Veduta della vasca di raccolta.



Particolare derivazione dal fiume Linea Pio verso il bacino idrografico di Mazzocchio.

- co mediamente maggiori di quelli relativi alla falda freatica, pertanto, è da escludere un processo di filtrazione dalla falda superiore verso quella inferiore;
- 3 per quanto detto nei punti precedenti, i volumi di precipitazione efficace dovrebbero essere comparabili con quelli sollevati dall'impianto idrovoro;
- 4 inoltre, occorre tenere conto del fatto che nell'anno considerato, durante il periodo che va dal mese di maggio a quello di agosto, il Consorzio ha immesso nel bacino un apporto consistente di acque dai bacini adiacenti (derivazioni dai fiumi Cavata, Cavatella, linea Pio ed Ufente), non precisamente quantificabili.

Pertanto il bilancio è stato realizzato seguendo la procedura descritta nel seguito.

In primo luogo è stato effettuato il confronto tra portata sollevata e precipitazione efficace escludendo il periodo maggio-agosto in cui le portate risultavano alterate da apporti esterni non misurati. Tale confronto indica un surplus di portata sollevata di 7,5 milioni di metri cubi negli otto mesi considerati (vedi tabella 2). Tenendo conto di quanto detto nei punti 1-2-3, tale surplus, pari a circa 0,36 mc/s, costituisce la portata media degli apporti per travaso sotterraneo dalla falda profonda e dagli acquiferi adiacenti che, quindi, ammonterebbero ad un vo-

lume di 11,4 milioni di metri cubi nell'arco dell'anno. Effettuando il confronto tra portata sollevata e precipitazione efficace utilizzando il totale dei volumi sollevati nell'arco dell'anno, ossia tenendo conto anche dei mesi del periodo estivo in cui sono presenti immissioni a scopo irriguo dai bacini adiacenti, il surplus di portata sollevata aumenta a 30,1 milioni di metri cubi.

La differenza tra il valore misurato sperimentalmente e quello stimato (30,1 – 11,4 milioni di metri cubi) pari a 18,7 milioni di metri cubi è rappresentativo del volume immesso dalle derivazioni dai fiumi Cavata, Cavatella, linea Pio ed Ufente nei mesi estivi al netto delle acque uti-

lizzate per l'irrigazione, pari a 1,8 mc/s, nel periodo maggio-agosto.

I valori ricavati dall'analisi del bilancio idrico, ancorché affetti da inevitabili approssimazioni indotte dalla qualità dei dati sperimentali disponibili, risultano comunque indicativi dell'ordine di grandezza dei volumi idrici che possono essere coinvolti negli scambi tra i diversi corpi idrici. Ciò ha consentito, come vedremo nei capitoli successivi, di sviluppare un modello concettuale dell'acquifero e di tentare di quantificare gli effetti indotti sulla circolazione idrica sotterranea e superficiale ad opera delle numerose captazione presenti nell'area.

Anno 1995	$P_e$ Mm <sup>3</sup>	$Q_s$ Mm <sup>3</sup>	$Q_{b1}$ Mm <sup>3</sup>	$Q_{b2}$ Mm <sup>3</sup>	$R_1$ Mm <sup>3</sup>	$R_2$ Mm <sup>3</sup>
Gennaio	6,0	8,0	6,1	4,2	1,9	3,8
Febbraio	5,3	4,7	4,4	2,9	0,3	1,8
Marzo	6,0	8,6	6,8	3,6	1,8	5,0
Aprile	0,6	8,7	6,9	4,3	1,8	4,4
Maggio	0,0	8,4	7,6	4,9	0,8	3,5
Giugno	0,0	7,4	7,3	5,2	0,1	2,2
Luglio	0,0	5,2	5,1	1,8	0,1	3,4
Agosto	5,7	7,3	7,1	4,7	0,2	2,6
Settembre	13,7	8,4	6,2	3,5	2,2	5,0
Ottobre	0,0	6,5	6,2	4,0	0,3	2,6
Novembre	11,6	9,1	4,6	1,7	4,5	7,4
Dicembre	21,5	18,1	9,4	5,6	8,7	12,5
<b>Totale anno</b>	<b>70,4</b>	<b>100,5</b>	<b>77,8</b>	<b>46,4</b>	<b>22,7</b>	<b>54,1</b>

Tab. 2 – Valori cumulati mensili del deflusso di base e del ruscellamento ricavati dalla scomposizione dell'idrogramma giornaliero delle portate sollevate dall'idrovora di Mazzocchio nell'anno 1995 e confronto con le piogge efficaci.  $P_e$ : precipitazione efficace;  $Q_s$ : portata sollevata dall'idrovora;  $Q_{b1}$ : stima massima del deflusso di base;  $Q_{b2}$ : stima minima del deflusso di base;  $R_1$ : stima minima del ruscellamento;  $R_2$ : stima massima del ruscellamento.



# III. Aspetti idrogeologici del bacino di Mazzocchio

## III.1. Introduzione

Sulla base degli studi sperimentali realizzati e delle precedenti considerazioni sul Bacino di Mazzocchio (fig. 3.1) possono essere individuate almeno tre circolazioni idriche sotterranee parzialmente interconnesse:

- l'acquifero carsico in pressione, ospitato nelle formazioni calcaree meso-cenozoiche sepolte al di sotto dei sedimenti terrigeni marini e continentali quaternari e in continuità con gli acquiferi carsici delle dorsali carbonatiche dei Monti Lepini ed Ausoni;
- una falda in pressione, localizzata nelle successioni sedimentarie quaternarie e alimentata esclusivamente per travaso sotterraneo dall'acquifero carsico sepolto e dall'adiacente dorsale carbonatica dei Monti Lepini;
- la falda superficiale, ospitata prevalentemente negli orizzonti più permeabili dei sedimenti limno-palustri, alimentata dall'infiltrazione delle precipitazioni ed in parte da fenomeni di drenanza dall'acquifero in pressione.

Per quanto riguarda i livelli statici della falda più superficiale, si osserva che questi risultano imposti dalla profondità degli alvei dei canali di bonifica, che devono garantire un franco di coltivazione dei suoli superiore ai 40 cm.

A tutt'oggi, malgrado siano state realizzate nell'area centinaia di perforazioni, le stratigrafie disponibili sono in numero limitato e in genere poco dettagliate. Gli stessi dati dei sondaggi della serie Mazzocchio citati da numerosi autori (Manfredini 1990, Consorzio Acque 1992, Boni et alii 1980) non sono mai stati pubblicati se non in modo parziale.

Tuttavia, le informazioni disponibili consentono di ricostruire il seguente schema stratigrafico di sintesi.

A partire dall'alto, si riconosce uno spessore variabile tra 40 e 50 m (localmente possono essere raggiunti spessori di 100 m) di sedimenti prevalentemente limno-palustri costituiti da alternanze di limi e argille, con lenti di torbe, argille, travertini e sabbie. Nell'insieme, la bassa permeabilità verticale di questi sedimenti, costituisce un ostacolo alla filtrazione delle acque della falda profonda in pressione verso l'alveo dei canali di bonifica. Nelle porzioni più superficiali la presenza di uno spessore insaturo (determinato, come detto, dalle opere di bonifica), consente l'infiltrazione di parte delle acque piovane e quindi la ricarica di una falda freatica che, come evidenziato dall'analisi dell'idrogramma giornaliero delle portate sollevate dall'idrovora di Mazzocchio (fig. 2.37) fluisce in tempi relativamente brevi nei colatori di bonifica.

Ai fini applicativi all'interno della successione dei depositi quaternari di colmamento della piana è utile, in questo settore, porre un limite convenzionale tra la falda superficiale e quella profonda in corrispondenza della profondità in cui i pozzi cominciano a presentare livelli piezometrici superiori al PC o comunque a quelli della falda libera. Il limite è definito convenzionale in quanto, come verrà evidenziato nel paragrafo successivo, l'alimentazione prevalente dal basso (acquifero carbonatico sepolto) determina il progressivo incremento dei livelli piezometrici procedendo in profondità.

Nel campione di pozzi analizzato risulta, comunque, evidente che sino a profondità di almeno 35 m dal pia-

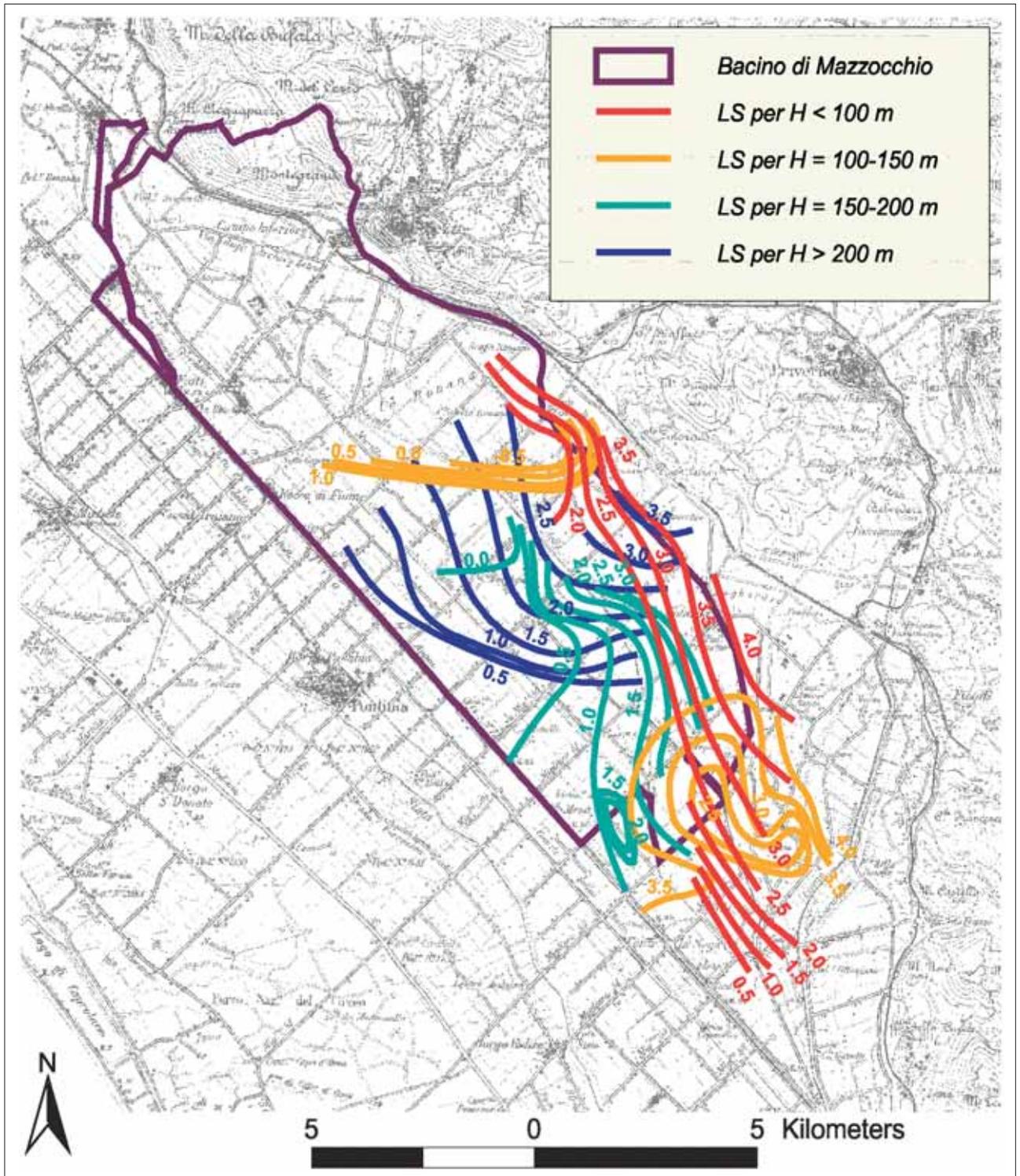


Fig. 3.1 – Carta piezometrica tematica. Le quote sono espresse in m slm; le linee tratteggiate raffigurano le curve isopiezometriche presunte, mentre H in legenda rappresenta la differenza tra la quota del fondo-pozzo e quella del tetto dei calcari cretacei.

no di campagna (p.c.) non sono state riscontrate condizioni di artesianesimo e che per profondità contenute entro pochi metri dal p.c. non si osservano variazioni del livello statico rispetto a quello imposto dall'orizzonte acquifero più superficiale.

Ciò fa presupporre che i livelli argillosi presenti nelle successioni limno-palustri superficiali esercitano un ruolo determinante nel contenere il potenziale deflusso della falda in pressione verso la falda superficiale, drenata dal reticolo di bonifica.

Del resto il bilancio idrico del bacino evidenzia, comunque, la presenza di un eccesso di almeno 360 l/s di acque, rispetto alla pioggia efficace, che indicherebbe significativi apporti di acque profonde. Tale apporto deve ragionevolmente essere ricondotto a fenomeni di:

- fuoriuscita spontanea di acqua dai pozzi artesiani non opportunamente sigillati (vedi par. 2);
- travaso sotterraneo dovuto all'interconnessione dei livelli acquiferi profondi con quelli superficiali, indotto artificialmente da perforazioni e pozzi non correttamente realizzati;
- travasi sotterranei naturali.

### III.2. Caratteri locali della falda

Nel quadro idrogeologico così delineato, appare interessante approfondire le modalità della circolazione idrica dell'acquifero ospitato nei depositi quaternari della pianura pontina.

I livelli freaticometrici nei terreni quaternari sono influenzati dal tipo di percorso seguito nel moto di filtrazione dell'acqua proveniente dalla falda dei calcari e dalla conseguente perdita di carico idraulico. Premesso ciò, lo stato della falda intercettata dall'opera di captazione che non raggiunge i calcari, è funzione delle sue condizioni al contorno: profondità del tetto dei calcari stessi, profondità del pozzo (la loro differenza dà il percorso di filtrazione dell'acqua) e le permeabilità dei terreni attraversati.

Pertanto, per la ricostruzione e l'analisi della superficie piezometrica non risulta opportuno trattare le misure relative ai livelli statici nei vari pozzi, come se ci si riferisse ad un'unica falda avente sempre lo stesso carico piezometrico verticale, ma occorre correlare i livelli statici dei pozzi con condizioni al contorno paragonabili, ovvero confrontare tra di loro pozzi che drenano a profondità equivalenti rispetto al tetto dei calcari sepolti. In questo modo è possibile ottenere le quote del-

la superficie piezometrica mettendo, così, in luce le variazioni di quota di tale superficie al variare delle profondità dei carbonati stessi. Il vantaggio di tale procedura è che in questo modo le variazioni di quota della piezometrica ricostruita tengono conto del percorso filtrante dell'acqua attraverso i terreni interessati; se tale percorso è suddiviso in tratti, conoscendo il livello statico attribuito ad ognuno di essi, è possibile ricavare dalle considerazioni di massima sulla permeabilità media di ogni singolo tratto. Ciò può essere effettuato in maniera inversa, fissando in partenza le permeabilità in gioco per tarare il procedimento e per verificarne l'attendibilità dei risultati.

In tale maniera si è ottenuta la *Carta piezometrica tematica* dell'area di studio (fig. 3.1), differenziata a seconda dei vari intervalli di profondità del tetto dei calcari cretacei rispetto al fondo dei pozzi esaminati. Tale rappresentazione mette in luce le relazioni tra i carichi idraulici e gli andamenti piezometrici posseduti dai vari livelli, discriminati dal diverso spessore dei terreni attraversati dall'acqua proveniente dalla falda carsica in pressione.

Nella carta tematica sono state distinte quattro "fasce" a cui corrispondono diverse configurazioni geometriche dell'acquifero: si va da uno spessore del ricoprimento recente minore di 100 m (pozzi profondi e/o substrato carbonatico superficiale) ad uno maggiore di 200 m (pozzi superficiali e/o substrato carbonatico profondo). Si fa notare che i pozzi osservati variano all'incirca da una profondità di 10 m ad una di 110 m, mentre il tetto dei calcari può trovarsi, nelle zone più depresse, anche a 300 m di profondità. È ovvio, quindi, che per la classificazione nella fascia di appartenenza il parametro che incide maggiormente è rappresentato dalla profondità del substrato.

È interessante innanzitutto notare come i vari livelli statici, appartenenti a fasce adiacenti, siano tra di loro raccordati, a confermare la continuità verticale delle falde. La prima fascia ( $D_p \leq 100$  m), essendo la meno potente ed avendo quindi il carico idraulico più prossimo a quello nei calcari, mostra infatti un andamento abbastanza uniforme. Ciò può essere anche dovuto alla facilità di ricarica laterale della falda in prossimità del settore di NE, favorita dalla vicinanza ai monti Lepini, che compensa rapidamente gli eventuali emungimenti. La stessa cosa non si può dire per le due fasce intermedie ( $100 \text{ m} < D_p \leq 150 \text{ m}$  e  $150 \text{ m} < D_p \leq 200 \text{ m}$ ); in particolare, la seconda presenta due "bassi", uno a NO e l'altro SE, che contrastano con l'andamento generale. Il

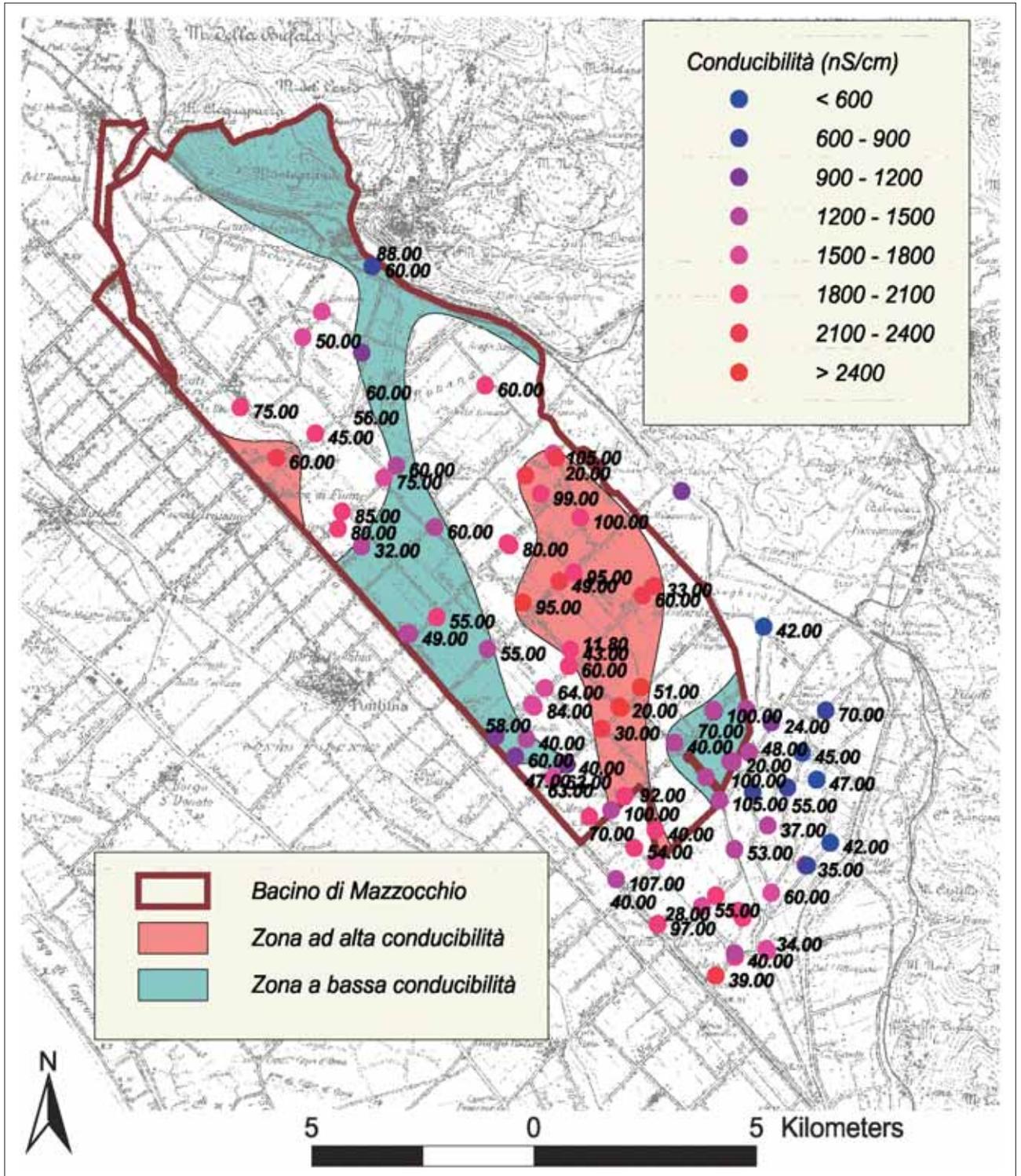


Fig. 3.2 – Mappa della conducibilità dell'area di studio: accanto ad ogni pozzo è specificata la relativa profondità (in m).

primo si riscontra anche nelle ultime due fasce ed è probabilmente riconducibile ai forti emungimenti delle attività industriali presenti nell'area.

Per il secondo, pur trovandosi in prossimità di un'area a forte prelievo idrico come quella industriale di Mazzocchio, non si può escludere che le quote piezometriche più basse siano riconducibili ad un minore isolamento delle falde profonde.

La quarta ed ultima fascia ( $D_p > 200$  m) evidenzia come la circolazione idrica negli orizzonti superiori subisce il condizionamento delle opere di bonifica tendendo a drenare verso il punto di recapito principale delle acque superficiali costituito dall'ultimo tratto d'alveo del Canale Selcella. Si osservi (fig. 3.1) come in questo settore le isopieze accennano ad arretrare.

Ulteriori conferme, al modello di circolazione ipotizzato, derivano dai valori di conducibilità rilevati nelle acque captate (fig. 3.2). L'interpretazione dei dati raccolti in campagna ha permesso di tracciare una mappa della conducibilità elettrica rappresentativa dell'area di studio; sul totale del campione esaminato, il valore massimo riscontrato è stato 2630 mS/cm, il minimo 360 mS/cm, con una media di 1601 mS/cm. Nella fig. 3.2 si evidenzia una zona centrale con falde idriche sotterranee caratterizzate da alta conducibilità (valore massimo 2630 mS/cm, minimo 1800 mS/cm, valor medio 2053 mS/cm).

Spesso le acque captate (anche a distanza di poche decine di metri) presentano facies di mineralizzazione diverse, sottolineate da proprietà organolettiche ed incrostazioni caratteristiche. Non di rado ad acque manifestamente sulfuree si alternano acque a carattere ferroso; ciò a confermare ulteriormente la natura lentiforme e la connessione per vie preferenziali dei vari livelli acquiferi. Inoltre, si può notare come la variabilità delle profondità raggiunte dalle captazioni e dello spessore dei terreni tra il fondo dei pozzi ed il substrato carbonatico, non influisca sul contenuto salino all'interno dell'area di appartenenza. Questo è coerente con un'alimentazione della falda principalmente dal basso verso l'alto, caratteristica che giustifica una variazione in profondità del carico idraulico, ma non della conducibilità.

Sono state rilevate zone a minore conducibilità (valore massimo 1360 mS/cm, minimo 360 mS/cm, valor medio 1027 mS/cm) in alcuni settori delle aree a ridosso dei versanti lepini, dove l'assetto strutturale non favorisce probabilmente i citati fenomeni di miscelazione con fluidi profondi.

Lungo il pedemonte le numerose sorgenti che riversano le loro acque nei vari canali (fosso Brivolco, fosso Ceriara, fosso dei Gricilli, ecc.) presentano una mineralizzazione molto variabile (circa la metà delle acque sorgive hanno salinità inferiore ad 1 g/l, con punte massime di 3-4 g/l; BONI C. *et alii*, 1988). Il fenomeno di miscelazione assume proporzioni imponenti se si considera che, la maggioranza delle acque dell'acquifero carsico lepino muta sensibilmente la sua composizione nei settori prossimi al graben pontino, anche se il cambiamento non è tale da modificarne completamente i caratteri originari (BONI C. *et alii*, 1980).

Negli ultimi anni in conseguenza dell'aumento dei prelievi idrici e della forte variabilità dei regimi pluviometrici sono stati osservati fenomeni di abbassamento piezometrico e indizi di aumento della conducibilità probabilmente riconducibile ad un incremento del richiamo di acque profonde. Per quanto riguarda i livelli piezometrici, il confronto con i dati storici (vedi fig. 3.3) mostra come negli anni '70 nell'area di interesse il livello statico raggiungesse quote dell'ordine di 5 m s.l.m., con ampi settori caratterizzati da condizioni di artesianesimo.

Se si tiene conto che nella zona ad E del Canale Selcella compresa tra le Migliare 47 e 53, sede di importanti giacimenti di torba ed interessata per anni dal fenomeno della subsidenza, secondo i dati disponibili (Brunamonte & Serangeli, 1996), dal 1977 al 1986 si sono verificate variazioni massime del livello topografico valutate intorno a  $0,3 \div 0,4$  m, con un tasso medio di abbassamento di 2,1 cm/anno, si può ipotizzare che all'epoca dello studio di MOUNTON le quote del piano campagna erano superiori a quelle attuali di oltre 0,5 m, con quota, nei punti più ribassati, intorno a -1,3 m slm. Affinché la falda fosse traboccante, anche il livello statico doveva risultare maggiore di tali valori, e ciò trova conferma nel fatto che, nella *carta piezometrica*, la zona con falda traboccante è tutta contenuta tra le curve isopiezometriche con quota 0 e 5 m s.l.m..

Dal quadro delineatosi si può dedurre che:

- la maggior parte della zona con falda traboccante presentava il piano campagna a quote mediamente di 2-3 m s.l.m., limitando inferiormente il livello statico della falda a tali quote;
- ai margini di tale zona le quote del piano campagna variavano tra i 4 ed i 5 m s.l.m. verso i monti Lepini e tra i 3 e 4 m s.l.m. verso la via Appia, confermando tali intervalli come limiti superiori di quota del livello statico suddetto.

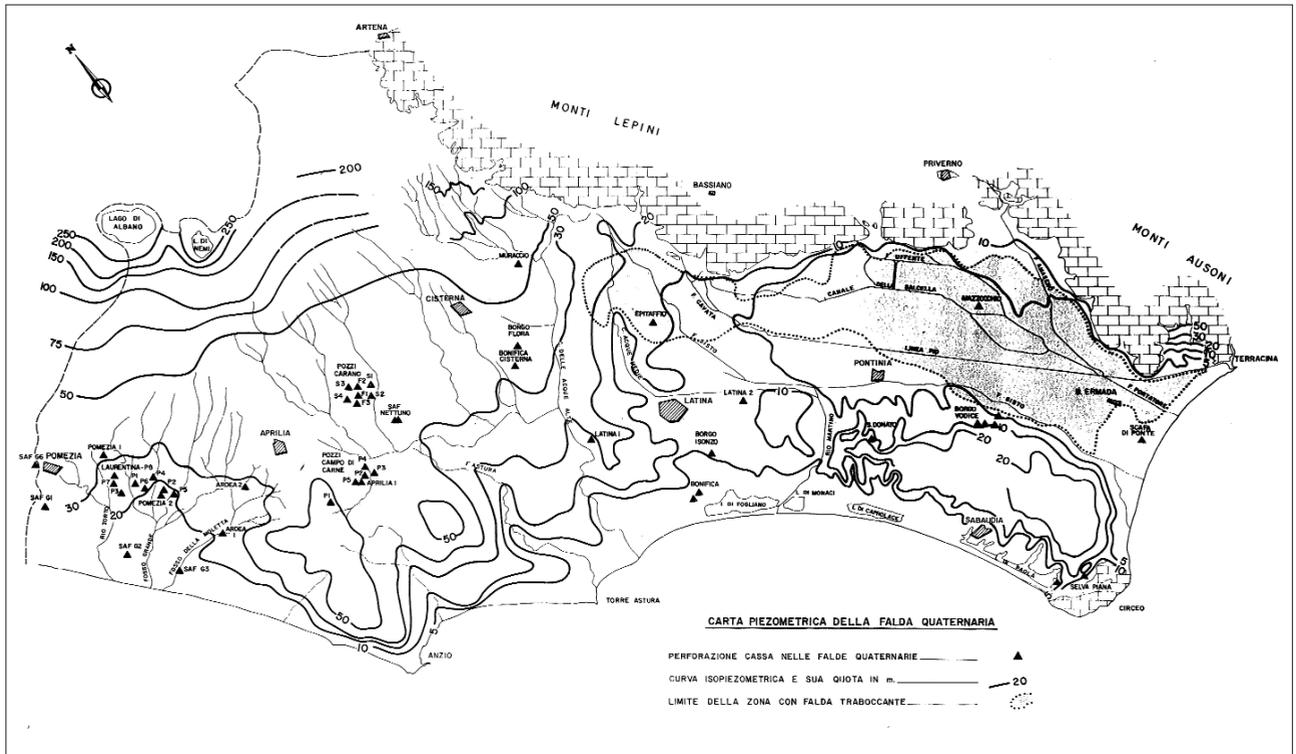


Fig. 3.3 – Carta piezometrica della falda quaternaria, così chiamata in Mouton (1977), poiché intercettata negli interstrati sabbiosi del complesso quaternario prevalentemente argilloso. Nella maggior parte della depressione essa non solo è in carico ma addirittura traboccante.

Ciò premesso, il confronto con i dati piezometrici acquisiti nelle ultime campagne di misura evidenzia che, in vicinanza del versante lepino il livello statico della falda si trova ad una quota superiore ai 4 m s.l.m., comparabile con quello delle misure del '77; lo stesso non può dirsi procedendo verso la via Appia dove il livello statico si attesta a quote inferiori 0,5 m s.l.m. e può raggiungere in prossimità di aree a forte prelievo valori fino a -0,5 m s.l.m.. In questo caso l'abbassamento della superficie piezometrica rispetto a quella degli anni '70 risulta evidente con valori che possono variare da un minimo di 1,5 m ad un massimo di 3,5 m.

Ciò è evidenziato anche dalla minore estensione dell'attuale area con falda traboccante (figura 3.4). Nel settore occidentale dell'area di studio l'abbassamento appare più marcato con perdita di condizioni di artesianesimo anche in aree poste al di sotto di 1 m s.l.m., ciò come detto, può essere messo probabilmente in relazione con un forte aumento dei prelievi per scopi agricoli e industriali.

In sintesi, il nuovo limite dell'attuale zona con falda tra-

boccante si assesta intorno ai 2÷3 m s.l.m. di quota, ad eccezione dei tratti in prossimità dei rilievi, dove il carico idraulico è ovviamente maggiore, e di un'ampia fascia ad O. Nel primo caso tale quota torna nel range dei 4÷5 m s.l.m. (e ciò è in accordo con le considerazioni sulla minor perdita negli anni, del carico idraulico a monte della falda), mentre nel secondo essa scende sotto 1 m s.l.m.. Da queste informazioni sembra lecito dedurre quindi che la falda, rispetto al '77, abbia subito complessivamente un abbassamento minimo di 1 m, che può arrivare a toccare localmente i 3 m, in alcune zone particolarmente sfruttate. Tale conclusione è cautelativa rispetto alla precedente (abbassamento di 1,5÷3,5 m) e può per questo essere considerata come una stima per difetto dell'abbassamento della falda dal 1977 ad oggi.

Nel valutare le considerazioni esposte si deve tenere conto del fatto che i livelli piezometrici considerati sono quelli rilevati in pozzi che interessano le porzioni più superficiali dell'acquifero (profondità dell'ordine di 40-100 m). Nel caso di pozzi profondi, intestati nel substrato

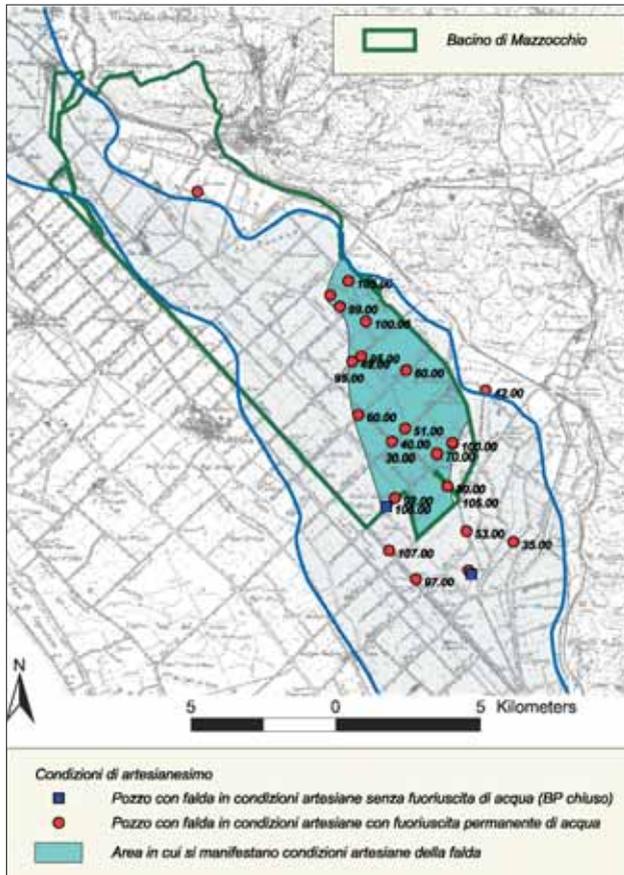


Fig. 3.4 – Zona di artesianesimo nell'area di studio. Con la linea blu sono evidenziati i limiti della zona con "falda traboccante" relativi ad uno studio del 1977 (Mouton). Accanto ai pozzi sono indicate le relative profondità in m.

carbonatico, ovviamente i carichi piezometrici risultano più elevati (tra 10 e 3 m s.l.m.). A maggior ragione il confronto tra i dati del '70 e quelli attuali risulta interessante in quanto l'area caratterizzata dalla presenza di pozzi con falda traboccante risulta ridotta malgrado la tendenza (vedi cap. II) all'approfondimento dei pozzi. Tale situazione giustifica la tendenza alla diminuzione della portata delle sorgenti pedemontane riscontrata negli ultimi anni.

Già in passato (Mouton J, 1977), erano stati previsti mediante modelli analogici i cali di portata delle singole sorgenti nell'ipotesi di emungimenti sistematici nella zona di piana ad una distanza dagli affioramenti calcarei compresa tra 2 e 4 km. I risultati sono riportati nella tabella 3:

Emungimento previsto da perforazioni (l/sec)	Caduta complessiva di portata delle sorgenti (l/sec)	Caduta di portata in percentuale rispetto alla portata media (%)
1.700	1.310	7,1
900	700	3,8
670	540	2,9

Tab. 3 – Previsione delle portate sorgive nell'ipotesi di attivazione di pozzi nella fascia pedemontana (Mouton J., 1977).

Tali variazioni in termini di portata, pur risultando accettabili in un contesto di analisi costi-benefici, di fatto testimoniano una dipendenza diretta del regime delle sorgenti pedemontane dalla captazione degli acquiferi nella Pianura Pontina.

Il quadro si fa, però, più allarmante se si considera che rispetto alle stime dei modelli elaborati negli anni '70 (MOUTON J., 1977), attualmente risultano (Ventura *et alii*, 2001):

- prelievi di acque sotterranee nell'ordine degli 864 l/s per gli usi civili idropotabili direttamente dalla struttura idrogeologica dei Monti Lepini
- prelievi di acque superficiali e sotterranee nell'ordine di 4900 l/s per gli usi agricoli e industriali nel territorio della Pianura Pontina.

Del resto gli studi in corso (Provincia di Latina - "Progetto Monitoraggio acque superficiali Interne e Costiere") evidenziano indizi di abbassamento delle portate delle sorgenti basali dei Monti Lepini ed Ausoni rispetto ai valori di riferimento storici (CONSORZIO ACQUE, 1992).

### III.3. Abbassamento dei livelli statici e incidenza sui costi di estrazione

L'abbassamento della superficie piezometrica ha come primo, evidente effetto sul pozzo stesso, l'aumento della prevalenza della pompa. Nell'area di studio si rileva un aumento minimo medio della prevalenza delle pompe nei pozzi nell'ordine di 1 m.

Per dare un'idea della spesa energetica annuale dovuta all'aumento della prevalenza di 1 m, per quelle che sono le tipologie costruttive dei pozzi esaminati è stata svolta un'analisi in termini di consumi elettrici; la tecnologia del prelievo di acqua è stata resa omogenea riportando ogni singolo caso a quello di un pozzo munito di pompa elettrica. In tal caso, se  $Q_j$  è la portata complessiva di tutti i pozzi equipaggiati di pompa, appartenenti ad una data categoria di utenza (settore agricolo, industriale, domestico, ecc.) la potenza totale supplementare necessaria all'emungimento, è data dalla:

$$P_i = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_i \cdot \Delta H}{\eta_i} \quad a)$$

in cui  $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$  rappresenta la densità dell'acqua,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  l'accelerazione di gravità e  $Q_i$  la portata emunta. L'efficienza media delle pompe  $\eta$ ; si può porre pari a 0,5.

Per definire la fascia tariffaria di appartenenza (tariffario ENEL in vigore dal 1 Ottobre 2003), si è fatto riferimento al valore medio di potenza  $\pi_i$  dei pozzi.

Se mediamente le pompe sono in funzione per  $n$  ore al giorno e si considera un *coefficiente di utilizzazione mensile* pari a  $\eta = 0,8$  che tenga conto dei giorni di sosta dovuti a manutenzione o rottura, il consumo mensile per ogni utente, nel suo settore di appartenenza, vale<sup>1</sup>:

$$C_i = p_i \cdot \eta \cdot (h_i \cdot 30) \quad b)$$

Si può quindi calcolare, in riferimento al campione esaminato, il costo totale annuale del surplus di energia necessaria per l'emungimento idrico, a causa dell'abbassamento di 1 m del LS, per ogni categoria di utenza:

$$\$(E_i) = \alpha_i \cdot \eta \cdot P_i \cdot \tau_i \quad c)$$

con:

$\alpha_i$  : costo dell'energia elettrica<sup>2</sup> per kWh;

$\eta$  : coefficiente di riduzione delle ore di funzionamento delle pompe;

$\tau_i$  : ore di esercizio in un anno.

Si ottiene un incremento di spesa energetica complessivo pari a 120.000 €/anno/m

Con riferimento al campione analizzato, una prima idea dell'entità del danno economico indotto dall'abbassamento di 1 m della superficie piezometrica è stimato in circa 120.000 /anno, a prescindere dalle tipologie degli schemi costruttivi adottati. Ci proponiamo in seguito di studiare in dettaglio la variazione di tale spesa in funzione delle scelte tecnologiche (questa volta a parità di quota del livello statico); ciò permetterà di avere un quadro completo in cui siano chiare le incidenze dei singoli danni e i loro rapporti.

Un altro aspetto da considerare è che il progressivo abbassamento della superficie piezometrica, ha indotto gli abitanti ad adottare alcuni espedienti per poter continuare a sfruttare l'artesianesimo della falda e la conseguente, naturale, venuta a giorno dell'acqua dagli stessi pozzi (fig. 3.5). In alcuni punti, infatti, la quota della piezometrica si è abbassata fin sotto il piano-campagna, rendendo possibile tale fuoriuscita spontanea di acqua solamente con un sottoscavo della piazzola che costituisce il basamento del boccapozzo, portandola sotto la superficie topografica stessa. In questo modo, anche da questi pozzi l'acqua continua a risalire a giorno, per entrare a monte dei canali drenati artificialmente dall'idrovora<sup>3</sup>. Questa aliquota di acqua, captata dalla falda profonda, viene quindi messa in condizione di sgorgare continuamente e di fatto, non essendo utilizzata in alcun modo, viene completamente perduta. Essa va a costituire una parte non trascurabile che, sommata al quantitativo di acqua regolarmente emunto per i vari scopi, concorre al depauperamento della falda stessa, con il conseguente, inesorabile abbassamento precedentemente descritto.

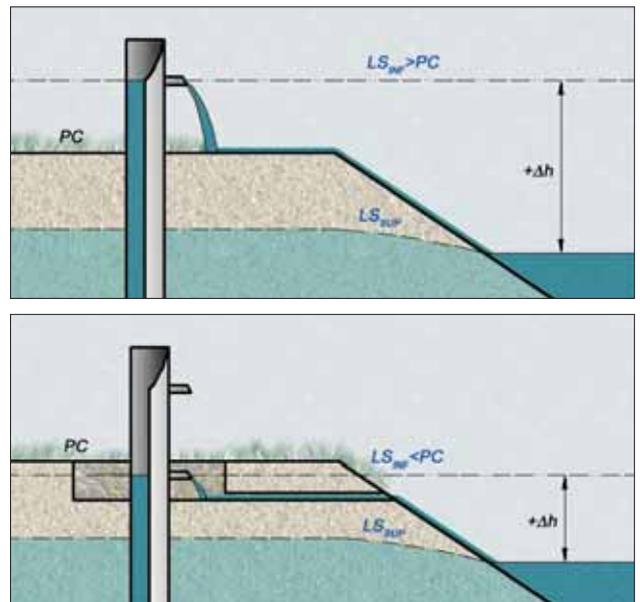


Fig. 3.5 – Schema di due particolari condizioni di artesianesimo della falda profonda: in A il livello statico della falda inferiore  $LS_{inf}$  è maggiore del piano campagna PC, in B è al di sotto, rimanendo, comunque, superiore al LS della falda superficiale  $LS_{sup}$ . Anche in questa seconda situazione, quindi, la falda inferiore viene considerata artesianica, provocando il riversamento delle acque profonde nel reticolo di scolo artificiale.

Nel complesso, i pozzi che captano acqua nella zona della falda artesianiana sono all'incirca un quarto del campione esaminato. Questo dato è abbastanza allarmante se si pensa che solamente due di questi sono risultati pozzi regolarmente sigillati.

La portata effluente da tali pozzi è stata misurata e rappresentata in fig. 3.6; si tratta prevalentemente di pozzi per utilizzo domestico, lasciati aperti come fontane ad ornamento dei giardini o perché la loro chiusura rappresenterebbe una spesa "inutile".

La maggior parte dei pozzi eroga una media di 0,46 l/s di acqua, con punte intorno ai 2,5 l/s. Ma se le singole portate non sono abbondanti, esse assumono notevole importanza in termini di portata complessiva. Delle 96 captazioni considerate il 23%, costituito da pozzi artesianiani, eroga nel complesso un totale di 9,65 l/s. Considerando che il campione esaminato rappresenta una aliquota stimabile grossolanamente tra il 5 e il 10% dei pozzi presenti nell'area, ciò significa che, rimanendo invariati tali regimi, nella zona della falda artesianiana esaminata si perdono ogni anno, mediamente, più di 4,5 milioni di metri cubi di acqua proveniente dalla falda profonda. Tale perdita va a costituire tra l'altro, una spesa "energetica" dovuta al sollevamento di questa ulteriore ali-

quota di acqua da parte delle idrovore che drenano i canali in cui essa si riversa. Il costo totale dell'energia necessaria per lo smaltimento è stato stimato prendendo come riferimento l'impianto idrovoro di Mazzocchio che, secondo i dati forniti dal *Consorzio di Bonifica dell'Agro Pontino*, con le sue 7 elettropompe ed una portata di esercizio complessiva di 42.000 l/sec, serve una superficie di 9.650 Ha, permettendo all'acqua di compiere un salto di 5,5 m di dislivello.

Un impianto con tali caratteristiche è in grado di sollevare i 4.5 milioni di metri cubi di acqua in eccesso in trenta ore circa. Considerando che la potenza  $P_M$  delle pompe idrovore è direttamente proporzionale al valore della prevalenza  $\Delta H$  e a quello della portata  $Q_M$  di acqua sollevata, secondo la relazione (a), l'idrovora suddetta ( $\Delta H = 5,5 \text{ m}$  e  $Q = 42 \text{ m}^3/\text{sec}$ ) necessita di una potenza di 2.266 kW.

Pertanto, l'inaccortezza di lasciare i boccapozzo aperti, comporta un surplus di spesa annuale pari al costo necessario per acquistare 68.000 kW.

Con riferimento all'anno 1995 tale portata rappresenta circa il 4,5% del volume totale sollevato. Tale fenomeno incrementa pertanto le spese energetiche di un valore consistente.

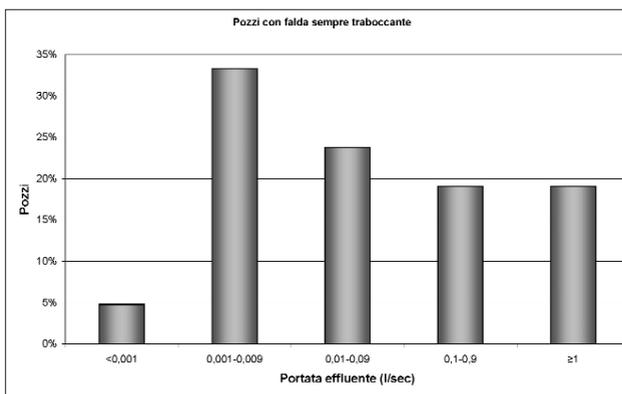


Fig. 3.6 – Istogramma "n° di pozzi-portata effluente".

## Note

- <sup>1</sup> La valutazione dei prelievi agricoli in termini di tempi e periodi di sfruttamento si è basata su un'attenta analisi della richiesta idrica di ogni singola coltura, opportunamente pesata in base alla percentuale di area coltivata. Per i prelievi industriali e domestici invece, ci si è riferiti ai dati dichiarati dai proprietari delle opere censite.
- <sup>2</sup> Dal tariffario ENEL in vigore dal 1 ottobre 2003 (già calcolato nella tabella XI).
- <sup>3</sup> Il concetto di artesianesimo è stato esteso dalla condizione-definizione in cui il LS della falda in pressione è maggiore del PC, a quella in cui tale LS è comunque maggiore del LS della falda superficiale (in cui l'acqua fuoriuscita naturalmente dal pozzo si riversa direttamente, o indirettamente attraverso i canali delle *Acque Basse*); con tale espediente le misure acquisite sono state rese confrontabili a quelle relative alla falda traboccante dello studio del 1977.



# IV. Modellazione numerica delle opere di captazione

## IV.1. Strutturazione del modello

Dai dati stratigrafici, dagli schemi idrici e dai valori delle caratteristiche idrodinamiche degli acquiferi, calcolati dai diversi autori (Carlomagno A., 1995; Consorzio Acque, 1992; Mouton J., 1977; Sapio G., 1995), e dal riscontro con le misure effettuate nella presente campagna, è possibile definire il modello concettuale che verrà utilizzato (fig. 4.1) per la simulazione numerica delle opere di captazione e la ricostruzione degli scambi idrici tra i diversi acquiferi.

A partire dal basso, la falda profonda, in pressione, costituita da sabbia (genericamente definita “acquifera”) ed argilla in diverse proporzioni, sabbia argillosa e rari banchi travertinosi, viene schematizzata come un mezzo poroso isotropo ed omogeneo con permeabilità media di  $1,7 \cdot 10^{-3}$  m/s e porosità efficace compresa tra il 3 e il 5 %.

Per simulare l'effetto complessivo di separazione idraulica esercitato dai diversi orizzonti argillosi che caratterizzano la successione dei terreni quaternari, nel modello vengono rappresentati come un unico orizzonte a bassa permeabilità ( $1 \cdot 10^{-9}$  m/s) tra -11 e -32 m dal piano campagna, in corrispondenza della fascia in cui può essere individuato il limite convenzionale tra acquiferi superficiali con falda libera e quelli profondi confinati o semi-confinati.

L'acquifero superficiale, costituito in prevalenza da alternanze di argille torbose, sabbie, travertini e rari orizzonti conglomeratici, è stato simulato come un mezzo isotropo omogeneo uniforme con permeabilità media di  $1,3 \cdot 10^{-3}$  m/s.

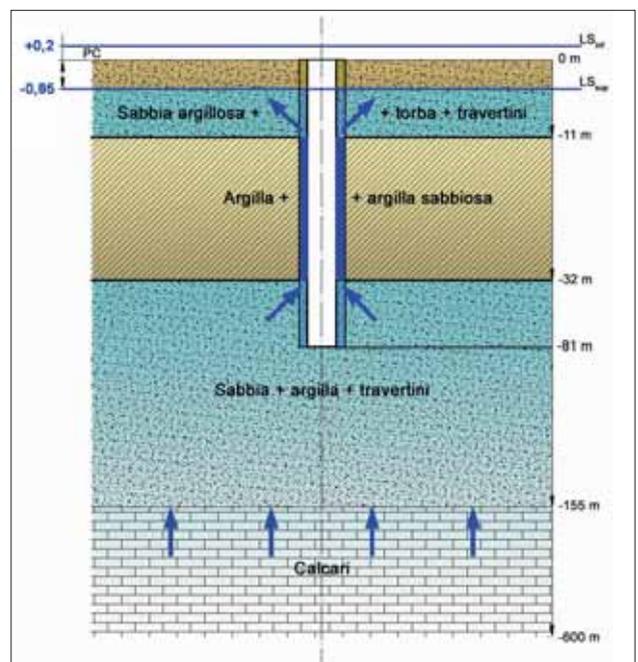


Fig. 4.1 – Schema della circolazione idrica indotta da un errato schema costruttivo del pozzo. L'acqua, proveniente dall'acquifero profondo messo in carico dai calcari, si incanala nell'intercapedine foro-pozzo, per defluire poi in quello superficiale. In figura sono riportati anche i livelli statici riferiti alle due falde: superficiale (LSsup) e profonda (LSinf).

Al letto degli acquiferi considerati è situato il circuito carsico ospitato nel substrato calcareo mesozoico, in continuità idraulica con l'acquifero dei Monti Lepini, che "mette in carico" tutto il sistema dei depositi quaternari della Pianura Pontina nel settore pedemontano. Per quanto riguarda i livelli piezometrici dell'acquifero carsico sepolto, le informazioni disponibili sono relative alle quote di trabocco delle sorgenti pedemontane, comprese tra i circa 3 m s.l.m. del Gruppo Sardellane e i circa 30 m s.l.m. del Gruppo Ninfa, e ad alcuni pozzi profondi nei quali sono stati riscontrati livelli statici che si attestano tra 10-11 m s.l.m. nel settore settentrionale dell'area studiata e 2-3 m s.l.m. nella zona di Cotarda.

Nelle simulazioni numeriche dell'acquifero si fa riferimento ai valori medi dei livelli statici rilevati nella campagna di studi sperimentali; tali livelli sono, pertanto, riferiti a perforazioni che non raggiungono il substrato calcareo ed attraversano solo parzialmente l'acquifero profondo, semiconfinato, dei depositi quaternari.

Il livello statico della falda superficiale è mediamente situato alla quota di 0,85 m sotto il livello del piano campagna, mentre il livello statico rilevato nei pozzi che interessano la falda profonda si assesta mediamente intorno a 0,2 m al di sopra di esso (condizioni artesiane). Il livello statico preso a riferimento, tenendo conto delle profondità medie dei pozzi, viene simulato nel modello come carico imposto (constant head) ad una profondità di 81 m. Tale semplificazione introduce una sottostima del carico piezometrico della falda inferiore. Infatti, nella realtà il livello piezometrico di 0,2 m sul PC è dato dal contributo lungo tutto lo spessore attraversato dal pozzo.

Per quanto riguarda la simulazione degli effetti indotti dai pozzi sugli acquiferi, l'obiettivo del presente studio è di quantificare il travaso di acque dalla falda profonda in pressione verso la falda superficiale. In particolare, l'analisi mira a quantificare gli scambi idrici indotti dai diversi tipi di interconnessione tra falda superficiale ed artesiane, correlati con le modalità costruttive delle opere di captazione descritte nel capitolo II.

I valori necessari a caratterizzare il modello fluidodinamico sono: il diametro esterno della tubazione di rivestimento e del foro. Tali grandezze, infatti, individuano univocamente lo spazio (intercapedine) che viene attraversato dall'acqua nel suo moto di filtrazione da un acquifero all'altro; a questo proposito sono

state scelte le dimensioni comuni alla maggior parte dei pozzi: 250 mm per il diametro del tubo di rivestimento e 500 mm per il diametro di perforazione. Il materiale di riempimento può essere costituito da ghiaietto calcareo di pezzatura media 2,5 mm (se è materiale drenante), con permeabilità di  $2,4 \cdot 10^{-2}$  m/s e porosità efficace del 25%, o da terreno sabbioso-argilloso rimaneggiato (se è il terreno asportato in fase di escavazione), con permeabilità pari a  $3,1 \cdot 10^{-4}$  m/s e porosità efficace del 15%.

Se l'intercapedine non è presente può verificarsi, comunque, un drenaggio preferenziale alle spalle della tubazione di rivestimento nei terreni rimaneggiati (fascia allentata) a causa del particolare metodo di perforazione utilizzata per la realizzazione del pozzo. Lo spessore di tale fascia può essere ragionevolmente considerato, nella peggiore delle ipotesi, di circa 100 mm, con permeabilità (e porosità efficace) medie che variano da un minimo corrispondente a quella dello strato argilloso indisturbato, fino ad un massimo che può essere considerato pari ai valori nel terreno sabbioso-argilloso rimaneggiato, asportato in fase di escavazione.

#### IV.2. Capacità di scambio tra acquiferi diversi

La *drenanza* (*leakage*) è definita come il flusso scambiato per unità di superficie attraverso un setto a ridotta permeabilità (DI MOLFETTA A., 2000):

$$\frac{Q_v}{S} = \frac{K \cdot (H - h)}{L} = c \cdot (H - h) \quad d)$$

essendo  $Q_v$  la portata verticale di alimentazione,  $H$  il carico idraulico dell'acquifero alimentante,  $h$  il carico idraulico dell'acquifero alimentato e  $c$  la *conduttanza idraulica* dell'acquitardo che li separa, pari al rapporto tra la conducibilità idraulica  $K$  e lo spessore  $L$  dell'acquitardo stesso. Nella pratica, molto spesso, per misurare la capacità di scambio tra due acquiferi contigui, si usa il parametro:

$$B = \sqrt{\frac{T}{c}} \quad e)$$

definito come *fattore di fuga*, vale a dire la radice

quadrata del rapporto fra la trasmissività dell'acquifero e la conduttanza idraulica dell'acquitarzo. Poiché nella (d)  $c$  compare al denominatore, se ne deduce che il fattore di fuga è inversamente proporzionale alla drenanza; maggiore è il valore di  $B$ , maggiore è il grado di confinamento dell'acquifero.

Ciò va specificato poiché nel particolare contesto idrogeologico dell'area in studio, lo strato argilloso che separa, nella quasi totalità dell'area esaminata, l'acquifero inferiore in pressione da quello superiore freatico, di fatto non permetterebbe naturalmente lo scambio di acqua tra le due falde.

Infatti, sulla base dei parametri petofisici definiti nel modello concettuale il fattore di fuga per l'acquifero inferiore in relazione allo strato argilloso che lo confina superiormente risulta pari a  $22.000 \text{ m}^2$ , molto maggiore del massimo che si ha in genere per alti gradi di confinamento ( $3.000 \text{ m}^2$ ); questo indica che lo strato argilloso confina significativamente la falda profonda. La situazione cambia se si considera che la messa in opera dei pozzi per acqua, per i motivi che sono stati precedentemente citati (modalità di esecuzione unita ad un numero elevato di opere di captazione), ha apportato delle modifiche all'equilibrio idrogeologico dell'intera area pontina non più trascurabili.

Le numerose intercapedini foro-tubazione che non sono state opportunamente cementate e/o sono state riempite di materiale molto più permeabile rispetto ai terreni preesistenti, vanno oggi a costituire una fitta rete di canali verticali che, di fatto, mette in comunicazione la falda profonda con quella superficiale. Come già visto, lo strato impermeabile argilloso assume le proprietà di un acquitarzo e l'acqua proveniente dalla falda in pressione, nel suo moto preferenziale ascendente, perde carico idraulico per raggiungere poi una situazione di equilibrio con la falda freatica.

È fondamentale far notare che tale circostanza è indipendente dagli emungimenti e dalla loro entità, poiché esiste a prescindere da essi, essendo state apportate delle modifiche alla configurazione idrogeologica di base; è altresì vero che conseguentemente a tale fatto, le misure dei livelli di falda sono nella realtà influenzate da questo nuovo equilibrio e quindi condizionate dalla presenza delle suddette intercapedini.

I pozzi realizzati senza l'isolamento tra le diverse circolazioni idriche inducono un flusso idrico attraverso gli orizzonti argillosi che separano fisicamente la circolazione idrica profonda da quella superficiale. Tale

flusso rappresenta una perdita permanente per la falda profonda in pressione, che inesorabilmente riversa le sue acque in quelle della falda superficiale, drenata a sua volta dai canali di bonifica. Oltre, quindi, alla perdita in termini di risorsa, tale configurazione contribuisce da un lato all'abbassamento della superficie piezometrica media della falda profonda negli anni, e dall'altro determina un incremento della spesa energetica per il sollevamento di questa ulteriore aliquota di acqua.

L'entità dei travasi indotti dai pozzi dipende prevalentemente dalla geometria e dai materiali di riempimento delle intercapedini foro-tubazione e dalla posizione dei filtri.

Dagli schemi costruttivi dei pozzi, si possono estrapolare quattro principali tipi di connessione tra gli acquiferi: tramite l'intera tubazione di rivestimento, tramite l'intercapedine riempita con materiale drenante, tramite la stessa intercapedine riempita, in questo caso, con terreno di riporto ed infine, tramite la fascia allentata di terreno adiacente alla tubazione di rivestimento.

#### Intera tubazione di rivestimento

Facendo riferimento agli schemi di pozzo descritti nel II capitolo, questo tipo di interazione è riscontrabile nello schema "tipo H", in cui all'intera colonna di materiale drenante è stata affiancata l'intera lunghezza del tubo filtrata. In questa situazione le due falde vengono messe in contatto direttamente da un vero e proprio condotto costituito dal pozzo, con l'unica perdita di carico rappresentata dal passaggio dell'acqua attraverso il dreno dalla falda inferiore all'interno del tubo prima, e quindi da questi alla falda superiore; tale perdita è praticamente trascurabile considerando che il dreno ha per definizione una permeabilità molto alta e che il tragitto della filtrazione è pari a due volte lo spessore del dreno stesso (mediamente  $500 \text{ mm}$ ).

Anche se di fatto il volume interessato dal flusso idrico è costituito da tutto il complesso tubazione-dreno (fig. 4.2), schematicamente verrà considerato solamente quello della sola tubazione, che opponendo una resistenza nulla, rende trascurabile l'apporto verticale di acqua attraverso il dreno.

#### Intercapedine riempita con materiale drenante

Questa situazione riflette il caso degli schemi "tipo F" ed "tipo G", in cui le falde sono tenute in comunica-

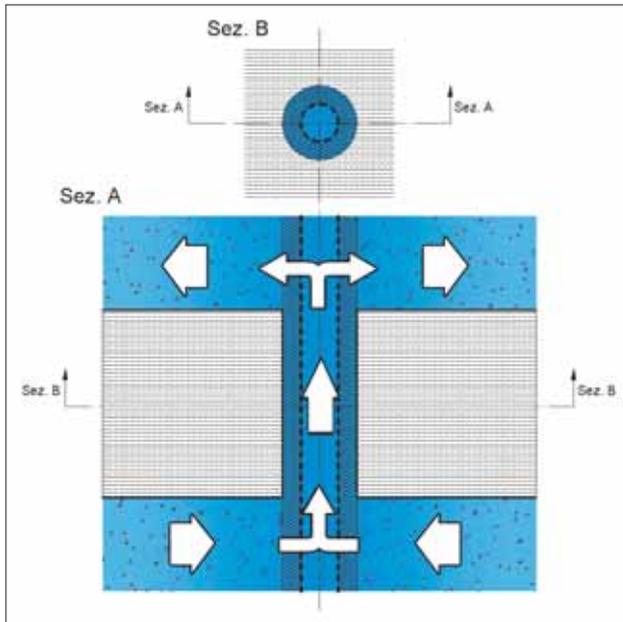


Fig. 4.2 – Connessione tra falda profonda e falda superficiale attraverso la via preferenziale nel banco argilloso, costituita dall'intera tubazione di rivestimento; le aree di colore blu sono quelle interessate dal flusso idrico.

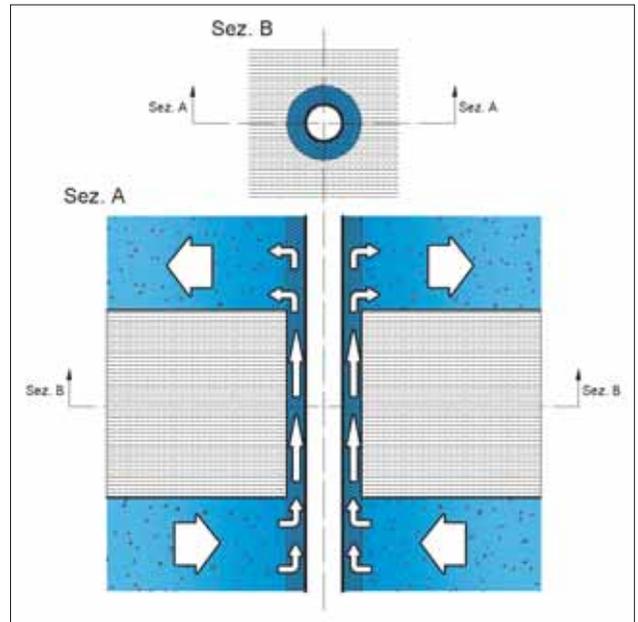


Fig. 4.3 – Connessione tra falda profonda e falda superficiale attraverso la via preferenziale nel banco argilloso, costituita dall'intercapedine foro-tubazione riempita con materiale drenante; le aree di colore blu sono quelle interessate dal flusso idrico.

zione solamente dall'intercapedine foro-tubazione, riempita con lo stesso materiale utilizzato come dren, e non dalla tubazione stessa, poiché i filtri sono limitati solamente all'acquifero inferiore.

Il flusso viene totalmente incanalato nel volume dell'intercapedine; quindi la lunghezza del percorso che l'acqua deve compiere all'interno del dren, questa volta, è quella corrispondente allo spessore dello strato argilloso (fig. 4.3). La perdita di carico idraulico, di conseguenza, non è più trascurabile e dipende dalla permeabilità del dren, minore di quella dei terreni acquiferi.

#### Intercapedine riempita con terreno di riporto

Questo caso riflette gli schemi "tipo D" e "tipo E" ed è identico al precedente, tranne per il fatto che il materiale che riempie l'intercapedine è costituito da terreno, solitamente lo stesso asportato in fase di perforazione (fig. 4.4). Ne consegue che il volume interessato dal flusso non varia; differisce invece la permeabilità: sicuramente non così elevata come quella di un dren, ma comunque molto maggiore di quella dello strato argilloso, essendo tale terreno di

riporto, costituito dall'insieme rimaneggiato dei terreni asportati (di permeabilità variabile).

#### Fascia allentata di terreno adiacente alla tubazione di rivestimento

È la situazione riscontrata più frequentemente (schemi tipo A, B, I, L ed M) determinata dal metodo di perforazione che prevede l'infissione diretta della tubazione di rivestimento; quest'ultima, oltre ad essere battuta in testa, viene spesso agganciata ad un giracolonne che, sottoponendo la colonna a rotazione, aiuta l'avanzamento della colonna stessa a fondo pozzo. Tali sollecitazioni e rimaneggiamenti del terreno interessato dallo scavo, ne provocano un forte allentamento; si viene quindi a generare una "fascia" attorno alla tubazione (fig. 4.5) in cui, lo scarico in termini di tensioni e l'aumento di porosità, hanno prodotto un significativo incremento della permeabilità. In questo caso, a differenza degli altri, la struttura del sistema non è ben definita e la difficoltà sta nell'ipotizzare il tipo di flusso che si viene a generare; inoltre, è possibile che si vengano a formare dei canali di deflusso preferenziali, così come nulla può dirsi sulla capacità del

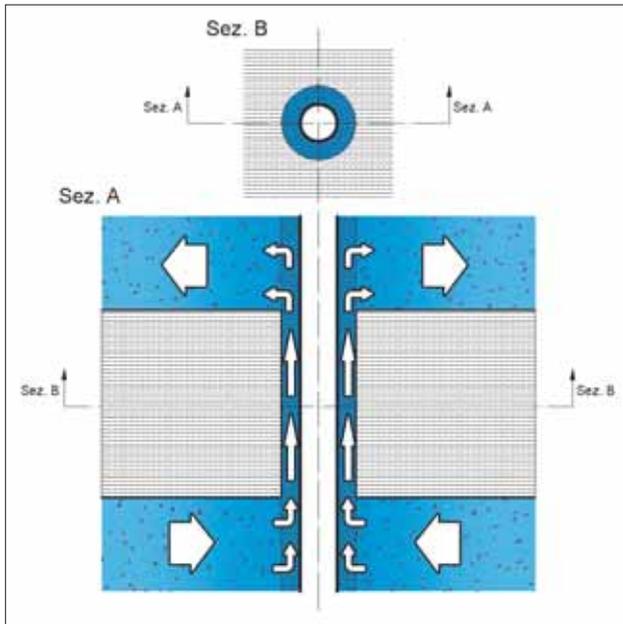


Fig. 4.4 – Connessione tra falda profonda e falda superficiale attraverso la via preferenziale nel banco argilloso, costituita dall'intercapedine foro-tubazione riempita con terreno di riporto; le aree di colore blu sono quelle interessate dal flusso idrico.

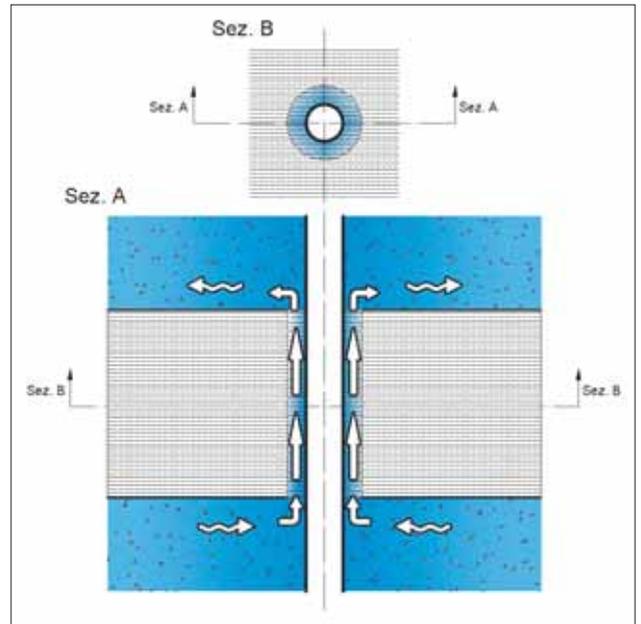


Fig. 4.5 – Connessione tra falda profonda e falda superficiale attraverso la via preferenziale nel banco argilloso, costituita dalla fascia allentata di terreno, adiacente alla tubazione di rivestimento; le aree di colore blu sono quelle interessate dal flusso idrico.

terreno, plastico per definizione, di ristabilire in parte le condizioni iniziali riducendo lo spessore della fascia; tale dinamica può essere al contrario ostacolata dal continuo flusso dell'acqua, che potrebbe trascinare via le particelle limose ed argillose, accrescendo al contrario il fenomeno di allentamento. Il problema è stato quindi affrontato con un'analisi della "sensibilità", variando dimensioni e permeabilità di questa fascia allentata di terreno, per poterne valutare gli effetti ai fini del calcolo del flusso al suo interno.

### IV.3. Simulazione dei travasi indotti dalle opere di captazione

Per la simulazione numerica dell'acquifero nelle condizioni descritte, è stato utilizzato il codice "Modflow" (Mc DONALD M.G. & HARBAUGH A.W., 1988), tramite il quale è possibile simulare il flusso delle acque in un mezzo poroso-permeabile, non omogeneo e anisotropo in condizioni stazionarie e transitorie. Il codice è basato su un modello numerico per la risoluzione delle equazioni di flusso alle differenze finite con blocchi centrati.

Il modello concettuale elaborato (fig. 4.1) è stato riportato in Modflow su una griglia tridimensionale formata sul piano orizzontale da 31 per 31 blocchi di 0,5 m di lato e verticalmente da 4 "layers", che riproducono la stratigrafia al di sopra del substrato calcareo. Le dimensioni sul piano x-y del modello sono volutamente ridotte, poiché la sua elaborazione è incentrata sulla stima dell'entità dei flussi verticali indotti dalle varie possibili configurazioni. Al contorno del primo layer (corrispondente al terreno acquifero, sede della falda superficiale), nonché, su tutta la superficie del quarto layer (corrispondente alla falda profonda al di sotto di 81 m dal PC), è stata applicata una condizione di carico imposto; il carico è mantenuto costante, in quest'ultima formazione, dalla ricarica fornita dalla falda carsica sottostante e nella prima formazione dal drenaggio dei canali di bonifica. In tale maniera è possibile simulare la perdita di carico dovuta alla filtrazione attraverso il terzo layer, che rappresenta l'acquifero profondo interessato dalla maggioranza dei pozzi presenti nell'area.

Sono state eseguite cinque simulazioni: quattro relative alle corrispondenti tipologie di connessione tra

	Originario	Corretto
$K_{dr}$	2,40E-02	2,21E-02
$K_{lr}$	3,10E-04	2,85E-04
$K_{fa1}$ (s = 1 cm)	1,00E-09	3,27E-11
$K_{fa1}$ (s = 3 cm)	1,00E-09	1,06E-10
$K_{fa1}$ (s = 5 cm)	1,00E-09	1,88E-10
$K_{fa1}$ (s = 10 cm)	1,00E-09	4,40E-10
$K_{fa2}$ (s = 1 cm)	1,00E-06	3,27E-08
$K_{fa2}$ (s = 3 cm)	1,00E-06	1,06E-07
$K_{fa2}$ (s = 5 cm)	1,00E-06	1,88E-07
$K_{fa2}$ (s = 10 cm)	1,00E-06	4,40E-07
$K_{fa3}$ (s = 1 cm)	3,10E-04	1,01E-05
$K_{fa3}$ (s = 3 cm)	3,10E-04	3,27E-05
$K_{fa3}$ (s = 5 cm)	3,10E-04	5,84E-05
$K_{fa3}$ (s = 10 cm)	3,10E-04	1,36E-04

Tab. 4 – Valori di conducibilità idraulica equivalente in m/s attribuiti alla cella delle griglia di calcolo utilizzata per simulare la presenza del pozzo secondo diversi spessori ipotizzati della fascia allentata

falde precedentemente descritte ed una quinta riferita allo stato originario (strato argilloso impermeabile). Ciò ha permesso di calcolare, per ognuna delle tipologie, il flusso scambiato tra i due acquiferi e conseguentemente di effettuare un opportuno bilancio con la situazione relativa alle falde indisturbate.

Nel modello le diverse condizioni riferite alle prime tre tipologie di opere sono state imposte modificando i parametri di dimensione, permeabilità e porosità efficace della cella centrale dei primi tre layers, corrispondenti alla porzione di acquifero attraversata dai pozzi. Per quanto riguarda la dimensione, il perimetro della cella è stato imposto uguale a quello della circonferenza del dreno del pozzo; in tale maniera si è ottenuta una superficie di scambio tra celle equivalente alla superficie di filtrazione dalla falda verso il dreno e viceversa.

La conducibilità idraulica equivalente della cella centrale da introdurre nei calcoli del modello numerico per simulare l'effetto del pozzo è stata calcolata mediante la seguente relazione:

$$K_{cella} = K_{nota} \cdot \frac{A_{nota}}{A_{cella}} \quad f)$$

dove:

$K_{cella}$  = conducibilità idraulica della cella equivalente  
 $K_{nota}$  = conducibilità idraulica del dreno  
 $A_{cella}$  = area della cella equivalente  
 $A_{nota}$  = area reale del dreno

Nel caso di interconnessione tramite l'intera tubazione si ha il contemporaneo passaggio di acqua sia all'interno della tubazione che all'interno dell'intercapedine riempita dal dreno. Ciò significa che il moto di filtrazione verticale avviene in due mezzi a permeabilità diversa: quella del dreno e quella, infinita, della tubazione. Per tale motivo, non ha senso parlare di conducibilità idraulica equivalente, poiché il parametro determinante è costituito dal diametro del pozzo. Nella seguente tabella XIII sono riportate le conducibilità di ogni tratto drenante e le rispettive correzioni in conducibilità equivalenti di cella ( $K_{dr}$ : conducibilità del dreno;  $K_{lr}$ : conducibilità del terreno di riporto;  $K_{fa}$ : conducibilità della fascia allentata).

Per quanto riguarda la simulazione relativa alla connessione tramite la fascia allentata di terreno rimaneggiato, come già anticipato, sono stati considerati tre valori di permeabilità relativi alla fascia di terreno allentata adiacente alla tubazione di rivestimento (uno minimo, uno medio ed uno massimo, rispettivamente di  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s,  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s e  $3,1 \cdot 10^{-4}$  m/s); la stessa cosa è stata fatta per quattro possibili spessori  $s$  di tale fascia (vedi Tab 4).

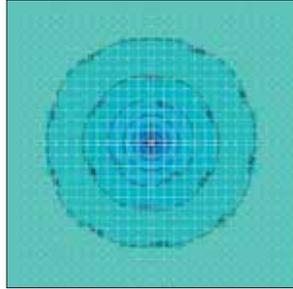


Fig. 4.6 – Altezza piezometrica (m s.l.m.) nel primo layer, riferita alla falda superficiale (l'altezza massima si ha al centro per l'influenza del flusso ascendente dell'acqua); al contorno è evidenziata in blu la condizione di carico fisso (di Dirichlet) imposta. L'equidistanza delle isopiezometriche è di 2,5 cm. Escludendo la cella centrale, con dimensioni variabili a seconda della simulazione, la griglia ha passo di 0,5 m.

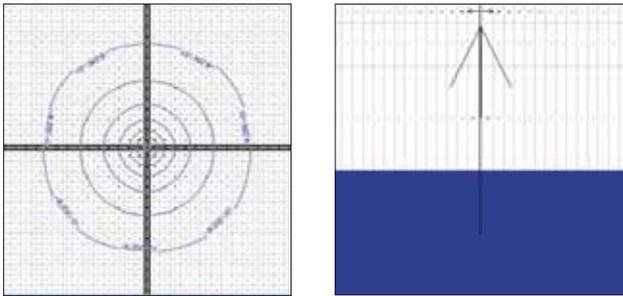


Fig. 4.7 – Altezza piezometrica (m s.l.m.) e vettori di flusso risultati dalla simulazione; al contorno, in pianta, è evidenziata in blu la condizione di carico fisso (di Dirichlet) imposta alla falda superficiale, così come su tutta la superficie, in sezione, alla falda profonda in corrispondenza del quarto layer. Escludendo la cella centrale, con dimensioni variabili a seconda della simulazione, la griglia ha passo di 0,5 m.75

Nelle figure 4.6 e 4.7, prodotte a titolo esemplificativo, si osserva la variazione del carico piezometrico indotto sulla falda superficiale dalla presenza di un pozzo che interconnette gli acquiferi tramite l'intera tubazione (caso più critico, corrispondente allo schema di fig. 4.2).

Come si può osservare, l'innalzamento della superficie piezometrica della falda superficiale è significativa, nell'ordine dei 10 cm, ad una distanza di 2 m dal pozzo. Sempre in riferimento al caso dell'intera tubazione drenante, nella figura 4.7 è riportata in sezione la distribuzione dei carichi imposti e l'andamento dei vettori che rappresentano le linee di flusso in corrispondenza dell'opera.

Nell'esempio illustrato la portata di acqua effluente nella tubazione e nell'intercapedine del pozzo, dalla falda profonda a quella superficiale, è pari a circa 146.000 m<sup>3</sup>/anno.

Nella tabella 5 si riportano i valori del travaso calcolato per le diverse tipologie di pozzi rilevati nell'area.

Per quanto riguarda i risultati desunti dalla simulazione relativa alla connessione tramite la fascia allentata di terreno rimaneggiato fino ad una conducibilità idraulica della fascia allentata mediamente prossima ad  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s non si hanno apprezzabili incrementi di portata. Oltre tale soglia la portata del travaso raggiunge valori che assumono una sempre maggiore im-

portanza al crescere dello spessore di detta fascia. Tale travaso, sebbene si verifichi comunque in presenza di minori permeabilità, di fatto ha entità trascurabile; è altresì da notare che per il massimo spessore ipotizzato (100 mm) in relazione alla massima permeabilità, considerata comparabile a quella del caso in cui si ha un'intercapedine riempita con terreno rimaneggiato, la stima della perdita idrica si avvicina proprio a quest'ultimo caso.

Le grandezze così calcolate, sono state rapportate alla scala del campione secondo il numero di schemi costruttivi dei pozzi, corrispondenti alle determinate tipologie di connessione indotta. Considerando i dati statistici riguardanti le percentuali reali di opere di captazione idrica precedentemente citati, è stata, quindi, stimata l'incidenza relativa ai quattro tipi di connessione sulle perdite totali di acqua nell'intera area esaminata. Si ricorda che il campione studiato rappresenta una aliquota stimabile tra il 5 e il 10% del totale dei pozzi presenti nell'area (variabile tra i 1000 e 2000 circa); è pertanto possibile dedurre la perdita idrica totale dalla falda profonda, come riportato nella seguente tabella 6.

La perdita idrica totale stimata dalla falda profonda oscilla quindi tra i 3,7 e i 7,5 Mm<sup>3</sup>/anno. È fondamentale far notare (fig 4.8) che al raggiungimento di tale valore contribuisce prevalentemente la configurazio-

Simulazione		Travasamento indotto dalla falda artesianiana a quella superficiale (m <sup>3</sup> /anno)
Acquifero indisturbato (senza presenza di pozzi)		0
Connessione tramite l'intera tubazione e dreno		146.327
Connessione tramite l'intercapedine con dreno		2.261
Connessione tramite l'intercapedine con terreno di riporto		27
Connessione tramite la fascia allentata di terreno rimaneggiato		
s = 1 cm	K = 1·10 <sup>-9</sup> m/s	0
	K = 1·10 <sup>-6</sup> m/s	0
	K = 3,1·10 <sup>-4</sup> m/s	5
s = 3 cm	K = 1·10 <sup>-9</sup> m/s	0
	K = 1·10 <sup>-6</sup> m/s	0
	K = 3,1·10 <sup>-4</sup> m/s	16
s = 5 cm	K = 1·10 <sup>-9</sup> m/s	0
	K = 1·10 <sup>-6</sup> m/s	0
	K = 3,1·10 <sup>-4</sup> m/s	28
s = 10 cm	K = 1·10 <sup>-9</sup> m/s	0
	K = 1·10 <sup>-6</sup> m/s	0
	K = 3,1·10 <sup>-4</sup> m/s	56

Tab. 5 – Travaso sotterraneo dalla falda in pressione verso quella superficiale calcolato per i fenomeni di interconnessione idraulica indotti dalle differenti tipologie di pozzi presenti nell'area.

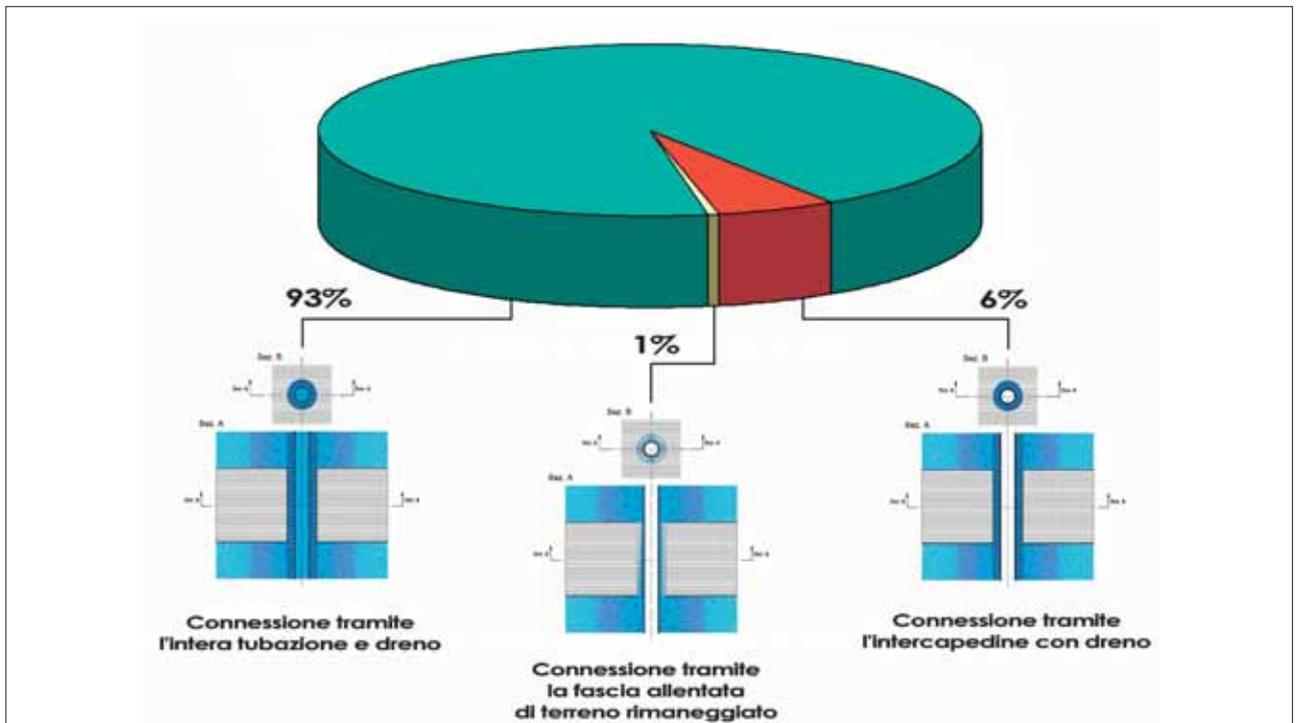


Fig 4.8 – Percentuale della perdita idrica sull'area analizzata, in relazione al tipo di schematizzazione (identificata dal tipo di connessione) adottata.

Tipo di connessione	% dei pozzi sul campione	Perdita idrica sul campione (m <sup>3</sup> /anno)	Perdita idrica totale sull'area esaminata	
			Stima minima (m <sup>3</sup> /anno)	Stima max (m <sup>3</sup> /anno)
Tutta la tubazione	2,4	348.397	3.483.965	6.967.930
Intercapedine con dreno	9,5	21.530	215.298	430.596
Intercapedine con terra	4,8	131	1.309	2.619
Fascia allentata	83,3	2.297	22.969	45.937
Totale	100	372.354	3.723.541	7.447.062

Tab. 6 – Perdita idrica totale dalla falda profonda ottenuta estrapolando i dati ricavati sul campione alla stima del numero totale dei pozzi presenti nell'area

ne di connessione tramite l'intercapedine riempita con il dreno; al contrario, per quanto riguarda la connessione tramite la fascia allentata di terreno (calcolata considerando una portata corrispondente ai valori medi analizzati di spessore e permeabilità della fascia stessa), se pur presente in un'alta percentuale (83%) di casi riscontrati nel campione esaminato, di fatto è trascurabile rispetto alla perdita totale.

Tali travasi provocano annualmente la perdita di una quantità di risorsa idrica mediamente pari al 5% di tutta l'acqua emunta per i vari usi sullo stesso territorio e contribuisce in maniera significativa all'abbassamento

generale del livello statico medio della falda profonda. Tali risorse, di fatto, devono essere considerate come un'ulteriore flusso in uscita dal bilancio idrico degli adiacenti acquiferi carbonatici, con ripercussioni sul regime delle portate delle sorgenti pedemontane.

Si deve considerare infine, come anticipato, l'aumento della spesa "energetica" dovuta al sollevamento di questa ulteriore aliquota di acqua da parte dell'idrovora di Mazzocchio. Con considerazioni analoghe a quelle effettuate nel capitolo III, è possibile valutare un incremento annuo di spesa energetica compreso tra i 112.000 ed i 224.000 kW.



# V. Interventi di riqualificazione dei pozzi

Nel corso della trattazione del presente lavoro, si è avuto modo di comprendere quali e quante siano le problematiche innescate da un'errata politica in fatto di esecuzione ed utilizzo di una qualsiasi opera di captazione idrica.

Si passa infatti da inefficienze in termini di produttività, con conseguenze cruciali in ambito economico (soprattutto privato) che riguardano in piccolo il pozzo stesso, fino a vere e proprie ripercussioni sul bilancio idrico generale dell'intera area pontina, se si considera il contributo complessivo di tutte le singole entità, con un ammontare che in questo caso interessa più da vicino il bilancio pubblico (comuni, consorzi, ecc.).

In tale quadro, assume notevole rilevanza l'ipotesi di specifici e mirati interventi di riqualificazione atti ad arrestare, e qualora non fosse possibile a limitare, fenomeni dannosi arrecati da particolari malfunzionamenti dei pozzi. Tali interventi devono naturalmente essere associati ad un'analisi costi-benefici che ne confermi l'effettiva "fattibilità".

A titolo di ciò, si può citare il fatto, abbastanza emblematico, che attualmente nell'area esaminata della Pianura Pontina la percentuale di pozzi inutilizzati è consistente; questo rappresenta un motivo di riflessione, poiché la dismissione di tali captazioni non avrebbe nessuna ripercussione negativa sull'approvvigionamento idrico, a fronte del danno idrogeologico che, al contrario, comporta la loro presenza, conseguentemente alle perdite idriche lungo le intercapedini forotubazione, ad esempio. A tutt'oggi, questi pozzi sono numerosissimi su tutto il territorio e nulla si fa per in-

tervenire, complice probabilmente il fatto di non essere a conoscenza dell'entità del danno da essi arrecato. Di seguito vengono riportate le possibili modalità di intervento nei confronti dei principali problemi che sono emersi in questo studio e che comportano perdite in termini di risorsa idrica ed economica; laddove la perdita non è trascurabile e non è possibile intervenire (per qualsiasi tipo di ragione) sarà necessaria un'operazione di "chiusura" del pozzo e rimpiazzo con una nuova opera, progettata questa volta per il particolare contesto in cui essa si colloca.

## V.1. Ripristino a favore dell'idrogeologia dell'area

Molti sono i dissesti idrogeologici provocati dall'intervento antropico, rappresentato in questa sede dalla messa in opera di pozzi per acqua. Nel corso del presente studio sono stati rilevati in particolare sotto la forma di: perdite di risorsa idrica attribuibile ai pozzi da cui l'acqua fuoriesce in modo artesiano e connessione dei diversi acquiferi dovuta alla presenza di intercapedini foro-tubazione.

Quest'ultima situazione, provoca in particolare un'ulteriore perdita dovuta al flusso dell'acqua dalla falda profonda in quella superficiale, nonché una parte dell'abbassamento misurato del livello statico della falda profonda, per la conseguente diminuzione di carico idraulico indotta. Gli interventi in questa direzione sono stati suddivisi per la diversa tipologia di applicazione.

### Impermeabilizzazione delle intercapedini foro-tubazione

È stato calcolato precedentemente come a causa delle intercapedini foro-tubazione si verificano perdite idriche che, in media, interessano volumi di 16÷31 milioni di m<sup>3</sup>/anno, con ovvie ripercussioni in termini di dispersione della risorsa idrica e ancor peggio, in ambito idrogeologico. L'obiettivo principale è quindi quello di isolare la falda inferiore in produzione da quella superiore; la difficoltà è però rappresentata dal fatto che contemporaneamente non si deve arrecare alcun danno ai pozzi stessi, dovendo essi tornare in funzione nonché all'ambiente. Tale operazione inoltre è complicata dal fatto che, anche se fossero presenti i filtri in corrispondenza della falda superficiale, non è sufficiente formare un "tappo" all'interno della tubazione con boiaccia cementizia scesa in pozzo per gravità; in questo modo infatti si eliminerebbe la venuta diretta dell'acqua della suddetta falda nel pozzo, ma non il passaggio dell'acqua da una falda all'altra, attraverso l'intercapedine alle spalle della tubazione.

Per di più, salvo pochissimi casi esaminati, le finestre non sono situate all'altezza della falda superficiale ma, al contrario, nella parte inferiore della tubazione, spesso lontani dalla zona di interesse, quindi è ancor più difficile arrivare a cementarla iniettando la boiaccia solamente dai filtri presenti. Si rende pertanto necessario, nella maggior parte dei casi, un intervento preventivo di finestrazione in opera della tubazione (fig. 5.1), nel tratto in cui l'intercapedine foro-tubazione interessa l'orizzonte impermeabile, per renderlo accessibile per l'operazione di cementazione.

Tale operazione deve essere fatta in pressione affinché la boiaccia cementizia penetri in profondità nel terreno impermeabile fino all'intercapedine, al fine di aumentare l'entità dell'efficienza dell'isolamento.

Perciò è bene usare boiacche cementizie fluide e poco viscosi; quindi la miscela è costituita da una sospensione stabile formata da acqua, eventuali additivi, bentonite<sup>1</sup> e cemento. L'aggiunta di bentonite all'acqua va fatta prima di procedere alla miscelazione con il cemento. Per aumentare la "pompabilità" della sospensione può essere utile aggiungere un fluidificante nel dosaggio opportuno; inoltre conviene operare con rapporti acqua/cemento oltre il 70% e con cemento di tipo superventilato.

Si deve fare attenzione al fatto che la boiaccia cementizia non si comporta come una soluzione colloidale ma

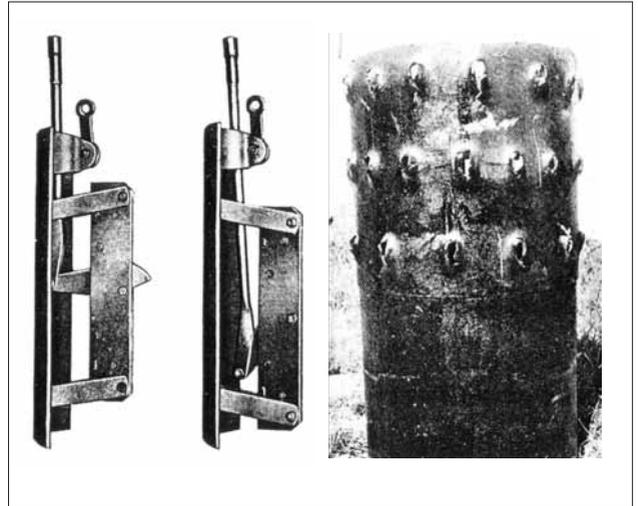


Fig. 5.1 – Finestratore meccanico, con particolare di un filtro finestrato in opera.

come una miscela di un materiale inerte (cemento) ed acqua, perciò sotto pressione l'acqua tende ad essere espulsa da tale miscela. Ciò è molto importante quando si realizzano tali cementazioni operando a pressioni elevate perché l'acqua viene spinta in falda abbastanza velocemente, mentre il cemento tende ad accumularsi attorno ai filtri intasandoli immediatamente e se si continua il pompaggio si può creare un tappo di cemento nel pozzo rendendo vana l'operazione. Per eliminare tale inconveniente conviene aggiungere alla boiaccia cementizia dei prodotti che combattono l'acqua libera, come per esempio alcuni polimeri (poliacrilato di sodio); in questo modo l'acqua rimane legata ai grani del cemento. Dato che in questi casi difficilmente la boiaccia pompata nella falda tenderà a ritornare nel pozzo, le operazioni sono semplici e sarà sufficiente l'utilizzo di un packer<sup>2</sup>. Nella pratica, si scende nel pozzo il packer munito inferiormente di un tubo forato di appoggio; esso deve venire a trovarsi poco sopra del letto della falda superficiale da isolare e pertanto il tubo di ancoraggio deve essere di lunghezza sufficiente. Se si usa il packer ad espansione, gravandolo con il peso della batteria delle aste, esso tende ad allargarsi. Poiché il tetto della falda inferiore da isolare spesso si trova molto distante dal fondo del foro è consigliabile riempire parzialmente il fondo pozzo con materiale inerte per evitare tubi di appoggio di lunghezza eccessiva. Quando il packer è ben sistemato, attraverso di esso

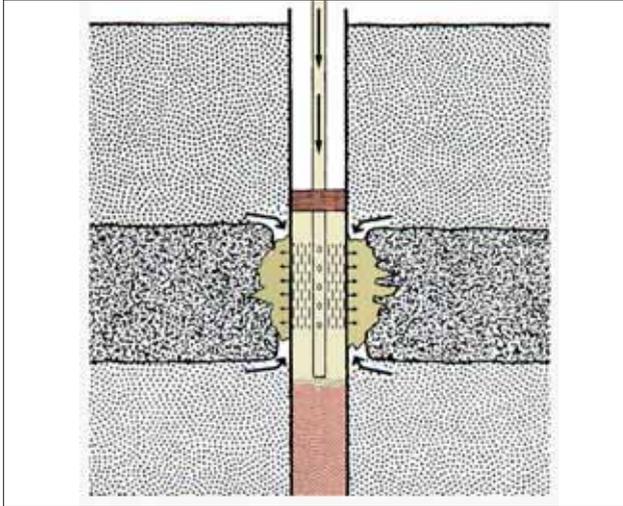


Fig. 5.2 – Cementazione dell'intercapedine foro-tubazione, attraverso le finestrate effettuate in opera lungo tutto lo spessore dello strato impermeabile.

viene iniettata la boiaccia cementizia con pressioni di iniezione tra 2 e 10 bar, necessarie a contrastare la pressione idrostatica della pressione d'acqua sovrastante<sup>3</sup> (fig. 5.2). È evidente che si avrà un aumento iniziale della pressione in quanto la boiaccia deve aprirsi le vie di passaggio attraverso il terreno, quindi si avrà una diminuzione della pressione che rimarrà stabile a un certo valore per poi risalire nuovamente per indicare che ormai la presa è avvenuta. Dopo aver terminato l'operazione di cementazione, si estrae la batteria delle aste con il packer, avendo l'accortezza di fare un lavaggio con fango o acqua all'interno delle aste per eliminare qualsiasi deposito di cemento. Quindi si perfora il tappo di cemento all'interno della tubazione e si asporta il materiale inerte, attivando una circolazione diretta o inversa di aria compressa (Chiesa G., 1991).

Metodi più complessi consentono di evitare di colmare il volume basale del pozzo e prevedono l'uso di un utensile con doppio anello isolante ad espansione. È il metodo del doppio packer, l'attrezzo è formato da due packer distanziati l'un l'altro di una lunghezza poco superiore allo spessore del terreno da isolare. Tale attrezzo è divisibile in due parti ed i packer sono dotati di cunei dentati che, allargandosi, si incastrano nella tubazione di rivestimento permettendo così la loro espansione. Nella figura 5.3 è rappresentato lo schema sopra descritto; il packer inferiore è collegato alla batteria delle sole aste mediante un *attacco a baionetta*, mentre il

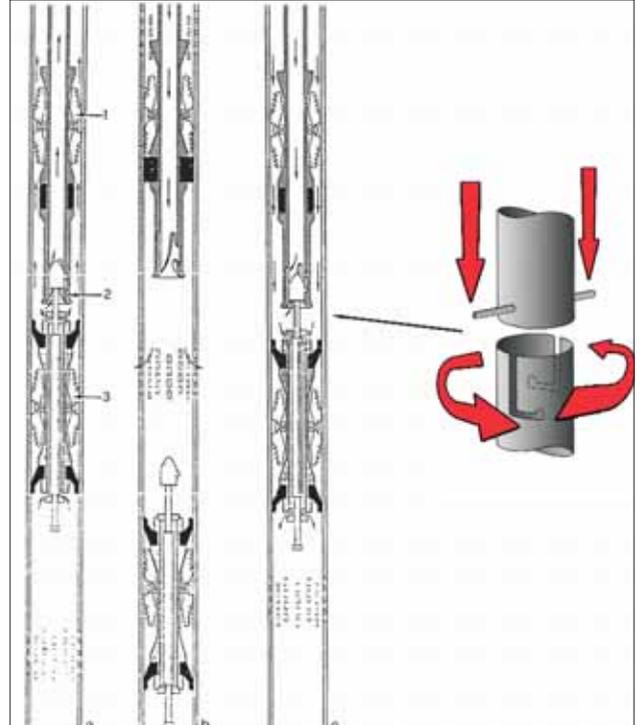


Fig. 5.3 – Doppio packer per cementazioni "intermedie": 1. packer superiore; 2. attacco a baionetta; 3. packer inferiore. a) discesa dell'attrezzatura; b) cementazione; c) estrazione attrezzatura. Sulla destra è illustrato il particolare funzionamento dell'attacco a baionetta.

packer superiore è fissato alle aste. Dopo avere fissato il packer inferiore, si alza la batteria e si fissa il secondo packer; terminata la cementazione, dopo aver effettuato un lavaggio si libera il packer superiore e si aggancia quello inferiore e quindi si estrae il tutto. Si possono usare anche doppi packer gonfiabili installati su una batteria di aste e poste alla distanza desiderata.

Un altro sistema di impermeabilizzazione dell'intercapedine foro-tubazione tramite cementazione, è quello che può essere realizzato operando all'esterno della tubazione stessa. Per lavorare all'esterno della colonna è necessario verificare se le condizioni logistiche lo permettono perché si tratta di perforare lo spazio anulare occupato dal dreno o il terreno immediatamente circostante (entro un raggio di 1÷2 metri). L'obiettivo delle perforazioni di piccolo diametro è raggiungere la quota dell'orizzonte da isolare e cementare con tubi manchette iniettando la miscela cementizia. La scelta dell'intervento all'esterno o a margine del dreno è più

prudente quando la larghezza dello spazio anulare è insufficiente, considerando le restrizioni operative indotte dai piccoli diametri di perforazione utilizzabili per questo tipo di operazioni (60÷76 mm) e dalle deviazioni dalla verticalità della colonna, che vanno sempre verificate preventivamente. A titolo d'esempio si ricordi che il raggio di propagazione di una iniezione con tubi manchette in un materiale con porosità  $n = 0.3$  e permeabilità alla miscela  $K = 10^{-5} \text{ m/s}$ , con un carico idraulico di 25 m, dopo 30 minuti è  $r = 1 \text{ m}$ . L'applicazione di uno dei metodi descritti è stata condotta a partire dal 1985 per recuperare i numerosi pozzi dell'acquedotto di Milano esclusi dalla distribuzione all'utenza a causa della contaminazione delle falde contenute nell'acquifero tradizionale. Gli interventi sono stati eseguiti dopo una verifica sperimentale su 5 pozzi di tipologia differente nei quali si riscontrava l'inquinamento da solventi organoalogenati (Puppini U., 1997). Individuati i pozzi con le caratteristiche adatte e verificato il loro stato, si estrae l'impianto di sollevamento, si ripristina la continuità della luce della tubazione con calibri a goccia per consentire la posa della nuova colonna al suo interno e infine si fissa una chiusura a tenuta stagna sulla testa della colonna esistente. Attraverso questa si avvia l'iniezione a bassa pressione (5-10 bar) che va a interessare tutte le sezioni filtranti esistenti fino alla profondità di appoggio della nuova tubazione. La testa stagna è munita di una valvola di sfiato dell'aria che viene lasciata aperta finché il cemento non occupa l'intera intercapedine tra le due colonne. Il pompaggio dura finché non è stato superato almeno il 30% del volume del foro e quindi si chiude la valvola fino a raggiungere una sovrappressione di 1-2 bar rispetto a quella di pompaggio. Per evitare di perforare tutta la colonna di cemento, in alcuni casi, dopo avere posato una colonna cieca di minore diametro nel tratto da cementare, l'iniezione è stata fatta nello spazio anulare tra le due colonne. Successivamente è stata ripresa la perforazione fino a 160 metri di profondità attraverso un acquifero multistrato. Infine il nuovo pozzo è stato completato con filtri a luce continua e posa di setti di isolamento di argilla. In altri casi si è proceduto con il sistema tradizionale d'iniezione separata con packer.

Altri metodi, più complessi, prevedono l'estrazione o la distruzione della colonna esistente e, talvolta, anche dei materiali che colmano l'intercapedine. Le incognite che influiscono sul successo dell'operazione sono

molte: stato della tubazione, qualità delle cementazioni effettuate, verticalità del pozzo. Nel caso che la tubazione sia in PVC è possibile distruggerla a rotazione con uno scalpello tricono lavorando con un basso regime di giri senza caricare la batteria di aste. Prima di iniziare la distruzione è necessario colmare il foro con fango bentonitico. Nel caso di colonne di metallo si può tentarne l'estrazione dalla testa o dall'interno del pozzo, colmato con fango di cui si può tentare la circolazione attraverso i filtri per interessare l'intercapedine foro-pozzo e ridurre la resistenza per attrito. Il sollevamento può avvenire direttamente dalla superficie per trazione diretta con la taglia della sonda o per rotazione e sollevamento tramite una morsa idraulica; queste operazioni possono essere coadiuvate dalla precedente o contemporanea applicazione di un moto vibratorio alla colonna. In alternativa, nei pozzi profondi si può applicare la forza di sollevamento ad una certa profondità, tagliando o punzonando la colonna tramite un utensile di presa appena sopra o in corrispondenza dei filtri e, successivamente, al fondo del pozzo, e sollevando con la batteria di aste. Questi metodi richiedono tempi di messa a punto abbastanza lunghi e l'uso di molta cautela nell'esecuzione.

### Chiusura dei pozzi abbandonati

Il numero di pozzi abbandonati rappresenta il 14% del totale del campione; tale presenza si traduce di fatto, per i motivi precedentemente trattati, in una perdita continua di acqua di circa 3.5 milioni  $\text{m}^3/\text{anno}$  su tutta l'area esaminata. In questo caso quindi si rende necessaria un'operazione di chiusura dei pozzi, atta ad arrestare le fuoriuscite di acqua dalla falda profonda sia all'esterno, attraverso la tubazione, sia nella falda superficiale, attraverso l'intercapedine foro-tubazione; ciò, contrariamente al caso precedente, può essere fatto con una certa libertà di azione, dato che non si deve preservare alcuna funzionalità del pozzo.

Non è sufficiente cementare la parte interna della tubazione di rivestimento, ma si deve operare in modo che venga cementato anche il dreno in corrispondenza dei filtri ed un tratto di terreno acquifero. A questo punto però sorge nuovamente il problema dell'intercapedine che mette in collegamento i due acquiferi; bisognerà quindi, anche in questo caso, ricorrere ad un finestratura in opera del tratto interessato e ad una successiva iniezione di boiaccia attraverso i nuovi "fil-

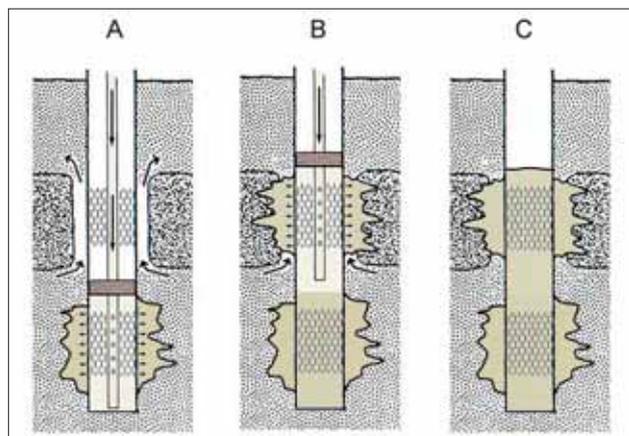


Fig. 5.4 – Chiusura di un pozzo abbandonato: A) cementazione dei filtri esistenti (e del dreno se presente), dopo averli eventualmente allargati in opera; B) cementazione dell'intercapedine forotubazione, attraverso le finestrate effettuate in opera lungo tutto lo spessore dello strato impermeabile, utilizzando come materiale inerte sul fondo la boiaccia precedentemente scesa nella tubazione; C) pozzo completamente cementato ed isolato.

tri”, atta a sigillare l'intercapedine suddetta. Il metodo più conveniente da utilizzare in questo caso è quello illustrato in cui, al posto della sabbia, vi è la boiaccia precedentemente pompata per chiudere il fondo del pozzo (fig. 5.4); se i filtri esistenti nella parte inferiore del pozzo sono molto distanti dal tratto in corrispondenza dell'intercapedine da finestrare in opera, tanto da dover utilizzare una gran quantità di boiaccia per riempire la tubazione tra i due tratti filtrati, si può sostituire ad essa del materiale inerte, che va quindi ad intervallare le due cementazioni. In realtà, dato che il pozzo verrà abbandonato, si potrebbe addirittura operare solamente la seconda cementazione (per isolare l'intercapedine) come nel caso della figura 5.2, lasciando definitivamente all'interno della tubazione il “tappo” di cemento che sigilla il pozzo.

Da quanto accennato anche in precedenza, risulta comunque chiaro che il miglior tipo di miscela con cui operare in questi casi è la boiaccia bentonitica. Dato che tale tipo di boiaccia non indurisce nel tempo o indurisce molto poco, non è possibile intercalare ad essa l'immissione di materiale granulare. Pertanto tutto il pozzo deve essere riempito con tale boiaccia; per questo tale metodo è ritenuto idoneo a cementare i pozzi dei quali non si conosce il posizionamento dei filtri. A tale soluzione può essere aggiunta, nelle fasi di colmamento della tubazione interna, della barite allo scopo di farne aumentare la den-

sità. Per ottenere 1 m<sup>3</sup> di boiaccia si devono mescolare 100-120 kg di bentonite in 800 litri di acqua e a questa soluzione colloidale si aggiungono 600 kg di barite.

La boiaccia bentonitica può essere immessa nel pozzo o per caduta libera (tubi da 80 mm) o mediante pompaggio (tubi da 50 mm). È importante ricordare che, quando si attua una cementazione, si deve porre attenzione al chimismo dell'acqua della falda; infatti un'acqua ricca di ioni calcio fa diminuire notevolmente l'effetto colloidale e quindi tamponante della bentonite sodica, mentre un'acqua ricca di ioni solfato rallenta o annulla la presa della boiaccia cementizia. Si devono pure considerare eventuali contaminanti presenti nell'acqua, molti dei quali non sono noti e non se ne conosce l'influenza che possono avere sul cemento o sulla bentonite (Chiesa G., 1991).

Perciò è sempre consigliabile prima di eseguire la cementazione, quando è economicamente conveniente e le caratteristiche dell'acqua di falda sfavorevoli a tale operazione, sostituire parzialmente l'acqua del pozzo con acqua potabile. Ciò può farsi pompando in pressione dell'acqua potabile nella tubazione, partendo dal fondo e risalendo alla superficie. Per facilitare l'operazione di cementazione in pressione è consigliabile, prima d'iniziare tale intervento, allargare le finestrate dei filtri creandone delle nuove con adatti finestratori in pozzo; questo perché molto spesso le finestrate originarie dei filtri possono essere parzialmente intasate.

#### Chiusura dei BP aperti da cui fluisce artesianamente l'acqua

Si è visto in precedenza come ogni anno vengano perduti più di 4.5 Mm<sup>3</sup> di acqua proveniente dalla falda profonda, per la mancata chiusura dei boccapozzo dei pozzi che erogano spontaneamente. In questo caso l'intervento è semplice e soprattutto a costo quasi zero; solo questo di per sé legittimerebbe un intervento quanto mai obbligato, atto ad arrestare un tale spreco di acqua assolutamente ingiustificato.

Si tratta di sigillare completamente i boccapozzo aperti con delle opportune saldature, cementazioni o quant'altro (dipendentemente dal tipo di materiale di cui essi sono costituiti); operazioni mirate in ogni caso a rendere gestibile il flusso di acqua che esce spontaneamente dal pozzo, ad esempio installando contemporaneamente delle valvole sui tubi di eduazione. L'intervento che alla lunga si potrebbe rivelare il migliore dal punto di vista economico, può anche essere rappresentato dalla collo-

cazione di serbatoi per la raccolta di questa aliquota di acqua, che va quindi a costituire una riserva di risorsa idrica aggiuntiva nei periodi di magra; ciò non influenza assolutamente il bilancio idrico globale, poiché l'acqua raccolta sostituisce quella che verrebbe emunta artificialmente, mentre diminuisce il carico idraulico dell'eventuale autoclave che deve mettere in circolo l'acqua per i vari servizi. L'efficacia di quest'ultimo intervento andrebbe comunque studiata di caso in caso, a seconda del carico idraulico effettivo della falda, dell'escursione stagionale del livello statico, ecc.

## V.2. Ripristino a favore della produttività dei pozzi

Le principali finalità degli interventi di recupero e ristrutturazione di un pozzo esistente sono:

- restituire efficienza al pompaggio;
- migliorare la qualità delle acque captate.

Condizione necessaria per l'intervento sui pozzi esistenti è la verifica preliminare della sua fattibilità. Tale verifica viene condotta con i metodi correnti, dopo che la scelta del pozzo è stata fatta in base a studi idrogeologici e idrochimici eseguiti in precedenza. In generale ciò che rende questi interventi convenienti è il fatto che la costruzione di nuove opere di captazione comporta la necessità di tollerare anche ulteriori oneri -non indifferenti- dovuti all'installazione di nuovi impianti ed infrastrutture.

In particolare, si rende necessario eseguire un'analisi dello stato di fatto (ispezione della tenuta di materiali e giunzioni con indagine televisiva, prova di portata a gradini per verificare l'efficienza dell'opera, esame visivo delle condizioni dei manufatti di servizio ecc.) e, in seguito, eventuali prove di strato per verificare i valori idrogeologici e idrochimici di progetto.

Con le opportune cautele, la verifica di efficienza serve ad indicare lo stato del pozzo e, possibilmente in presenza di un piezometro di un pozzo di osservazione esterno a quello in esame, per definire quanta parte delle perdite di carico dipende dal pozzo e quanta invece dipende dalle caratteristiche dell'acquifero attraversato.

Gli interventi possono essere suddivisi in tre tipologie principali in relazione all'impegno complessivo, economico e gestionale, che comportano:

- recupero dell'esistente con o senza riqualificazione di-

mensionale;

- ristrutturazione con riqualificazione dimensionale;
- abbandono (chiusura completa) e rimpiazzo con una nuova opera.

### Recupero dei pozzi con o senza riqualificazione dimensionale

A questo gruppo appartengono tutte le operazioni finalizzate a restituire efficienza all'opera; ciò si traduce nel determinare le cause dell'ingresso delle frazioni fini nel pozzo, nell'eliminarle, nell'intervenire ritubando la colonna filtrante, nell'escludere i filtri ammalorati ecc. I metodi per ottenere questi scopi sono diversi da caso a caso ma possono essere ricondotti a:

- sviluppo con mezzi meccanici o ad aria compressa per eliminare i materiali decantati, con le procedure solitamente usate per l'attivazione dei pozzi nuovi;
- lavaggio e controlavaggio con additivi chimici;
- ritubaggio della colonna esistente senza esclusione di filtri, reintegrazione di dreno, costruzione o ricostruzione di isolamenti ecc.

L'ultima tipologia di intervento comporta una variazione della dimensione e delle caratteristiche delle opere ma non della loro profondità; essa è utilizzata prevalentemente quando le tubazioni esistenti, specialmente nei tratti filtrati, hanno subito un'azione di corrosione, tanto da determinare un consistente trasporto solido attraverso le finestrate degli stessi filtri che compromette la qualità dell'acqua captata. L'intervento è favorito dal fatto che le finestrate in questo caso sono solitamente più larghe quindi, la sabbia tende sì, a rimanere intrappolata tra la vecchia tubazione e la nuova, con filtri di finestrate più piccole, ma più difficilmente si costipa, rendendo in poco tempo impermeabile il tutto. Uno dei problemi a sfavore di tale metodo è che, a causa della riduzione delle dimensioni della tubazione, esso comporta spesso la necessità di sostituire una parte o tutto l'impianto di sollevamento che equipaggia il pozzo.

Per acque aggressive, è importante il materiale della tubazione con cui il pozzo viene ritubato. I filtri costruiti con materiale resistente alla corrosione, anche se molto costosi, alla lunga vengono a costare meno di quelli normali: una vera economia non è quella che si ha tenendo conto del solo costo iniziale o di acquisto di un prodotto o di un manufatto.

Nel caso di condizioni ossidanti, e quindi quando il con-

tenuto di ossigeno disciolto nell'acqua è molto grande, è conveniente usare filtri in acciaio inossidabile che sono molto resistenti in tali condizioni; questo tipo di acciaio infatti richiede l'esposizione all'aria in modo da ottenere la sua più alta resistenza alla corrosione. Ciò poiché l'ossigeno atmosferico si combina con la superficie del metallo formando una pellicola protettiva quasi invisibile (la superficie diventa opaca) e se tale pellicola rimane intatta, il metallo viene a trovarsi in condizioni di passività e la sua resistenza alla corrosione è molto elevata.

Esistono diversi tipi di acciai inossidabili; il tipo più comune è l'AISI 304 contenente il 18% di cromo, 1,8% di nichel, il 72% di ferro e lo 0,08% di carbonio. Il contenuto di nichel e cromo rende tale acciaio resistente alla corrosione, mentre il contenuto di carbonio lo rende saldabile (con elettrodi speciali). Se si opera in base all'*indice di stabilità Ryznar*<sup>4</sup>  $I_R$  si possono usare i seguenti acciai:  $7 < I_R < 8$  acciaio comune,  $I_R < 12$  acciaio inox AISI 304,  $I_R < 15$  acciaio inox AISI 316.

È importante ricordare che la corrosione di una tubazione per pozzi avviene in condizioni di continua immersione in acqua e tali condizioni differiscono notevolmente dalla corrosione che si ha in strutture superficiali, alternativamente bagnate ed asciutte. Le misure eseguibili per risolvere il problema della corrosione dei filtri devono essere sempre fatte in ambiente sommerso in acqua; per esempio, alcuni rivestimenti protettivi che danno buoni risultati in strutture in superficie, non hanno avuto una buona riuscita in ambiente sommerso in acqua.

Molto resistenti alla corrosione sono i tubi in PVC; i tubi in ABS, sempre in materiale plastico, sono meccanicamente molto resistenti. Sia i tubi in ABS che in PVC speciale hanno però lo svantaggio di costare quasi come quelli in acciaio inossidabile ed inoltre hanno grossi spessori che riducono così il loro diametro interno. I tubi in vetroresina sono sufficientemente resistenti, ma sono molto costosi ed inoltre sono pesantissimi in quanto sono di grosso spessore; si deve poi considerare il fatto che in corrispondenza delle finestrate dei filtri essi tendono a "sfaldarsi".

Per quanto riguarda i sistemi di sviluppo, come è noto, per i pozzi nuovi essi servono a rimuovere la frazione fine contenuta negli acquiferi per facilitare l'afflusso al pozzo dell'acqua di falda. Nel caso di un pozzo in funzione da tempo, si presume che l'acquifero si sia sviluppato a sufficienza durante l'esercizio. Gli interventi

di ripristino dell'efficienza riguardano dunque soprattutto i materiali messi in opera nel terreno (colonna filtrante, dreno, isolamenti ecc.) interessati da un'azione di incrostazione che nel tempo, potrebbe aver inficiato l'efficienza del pozzo. Per i vari tipi di prodotti da usare, l'attrezzatura ed il metodo operativo sono quasi sempre i medesimi: l'operazione consiste nel:

- versare l'acido o il prodotto da usare nel pozzo in quantità tale da "coprire" tutta la parte filtrante;
- lasciare il tutto in riposo per un po' di tempo (1-2 ore);
- mescolare per qualche minuto usando il tubo d'immissione;
- lasciare in riposo per altre 2-3 ore;
- pistonare il pozzo per 10-20 min;
- pulire e spurgare il pozzo.

Il metodo migliore consiste nell'impiego di un piccolo tubo, possibilmente in plastica e mai in acciaio zincato che raggiunga quasi il fondo del pozzo, per versare il prodotto necessario; se si usano degli acidi, questi non devono mai essere versati rapidamente nel pozzo perché in seguito alla loro reazione chimica si può avere una formazione di gas che può fare eruttare fuori dal pozzo una parte di acido, con conseguente pericolo per l'operatore. Si deve tener presente che l'acido tende a pulire quasi sempre la zona meno intasata e che se anche si ripete l'operazione più volte, tale zona sarà sempre la via preferenziale per il suo passaggio.

L'operazione di copertura dei filtri va fatta a gradini di non oltre 1,5-2,0 m a partire dal fondo; l'acido normalmente è più pesante dell'acqua e perciò tende a spiarzarla mescolandosi con essa. Quando si è versato il volume di acido richiesto, si versa nel pozzo dell'acqua in volume sufficiente a spiazzare a sua volta tutto l'acido dal tubetto, cercando contemporaneamente di agitare l'acido nel pozzo con il tubetto stesso.

Nel caso di trattamento per rimuovere i ferrobatteri si deve ricordare che l'intasamento dei filtri e del dreno non è dovuto solo alla presenza del materiale organico prodotto dai batteri, ma anche alla presenza di prodotti inorganici d'ossidazione del ferro e del manganese, generalmente associati con questi organismi. Inoltre, si ha pure presenza d'incrostazioni di natura calcarea. Perciò è sempre consigliabile fare più trattamenti, iniziando dalla clorazione così da mettere "a nudo" altri tipi d'incrostazioni; dopo ogni trattamento, che può essere ripetuto più volte, si deve spurgare bene il pozzo

dato che il cloro e l'acido cloridrico o altri composti non devono mai trovarsi nel pozzo contemporaneamente. In generale si dovrebbe seguire la seguente metodologia al fine di ripristinare le condizioni inizialmente in falda:

- trattamento con acido cloridrico, con eventuale aggiunta di acido idroacetico;
- dopo avere agitato l'acqua nel pozzo, se ne estrae una quantità pari al volume contenuto al suo interno;
- se tale acqua ha un pH > 3 si deve ripetere l'operazione;
- quindi si immette nel pozzo una soluzione all'1% di cloro;
- si ripete il secondo punto;
- si determina quindi la concentrazione di cloro nell'acqua estratta; se essa è inferiore al 10% della concentrazione originaria, si devono ripetere le ultime operazioni.

#### Ristrutturazione dei pozzi con riqualificazione dimensionale

Di questo gruppo fanno parte le opere di ristrutturazione con approfondimento del pozzo originario. In questo caso l'intervento consiste essenzialmente nel riutilizzare il pozzo esistente come guida della perforazione di approfondimento, escludendone le sezioni filtranti. Pertanto le tecnologie mobilitate sono di diverso tipo e il sistema operativo è più complesso perché è articolato in una prima fase di isolamento e in una seconda fase di perforazione, completamento e sviluppo del pozzo ristrutturato. Naturalmente tale intervento, per ovvi motivi tecnologici, può essere effettuato solamente nei pozzi con diametri che possano permettere il facile accesso soprattutto delle attrezzature di perforazione. La fase di esclusione viene realizzata cementando i filtri esistenti come già visto in precedenza, nel caso della chiusura dei pozzi abbandonati; in tal caso però l'operazione deve avvenire con una cura ancora maggiore, poiché il pozzo deve rimanere in funzione. A tal proposito, si fa notare che, in particolare, se si vuole interessare un certo volume del terreno circostante il pozzo è necessario contrastare la pressione litostatica della pila di sedimenti sovrastanti; in tal caso la pressione necessaria alla rottura del terreno è maggiore di quella di spiazzamento e dipende dal gradiente della pressione litostatica dei sedimenti sovrastanti il punto d'iniezione che, per effetto-arco, è inferiore alla pressione litostatica totale. Il gradiente della pressione di rottura è circa  $Ds_v = 0,23 \text{ kg/cm}^2$  al metro<sup>5</sup>.

Rispetto a quelli già visti, esistono numerosi altri metodi per lo spiazzamento di miscela nelle formazioni detritiche o nei dreni artificiali. Un metodo abbastanza semplice per spiazzare la miscela nel dreni esterno ai pozzi agendo dall'interno della colonna consiste nel gettare a gravità un fluido isolante a bassa viscosità nel pozzo fino a occludere per metà il filtro da escludere. Si lascia stabilizzare il livello e, dopo la pausa necessaria alla presa del primo getto, si riprende occludendo tutto lo spessore del filtro e raggiungendo la quota della base del filtro sovrastante (se presente), che si presume corrispondere a un livello acquifero separato da quello sottostante con un livello acquifero da ripristinare.

In seguito è necessario ripetere la stessa operazione in due fasi sul filtro superiore. Con il primo getto si fa scendere la boiaccia anche attraverso il dreni e, per controllare se questo avviene, bisogna iniettare la stessa portata della prima fase e controllare l'evoluzione della pressione fino al valore limite. Contemporaneamente si confrontano i tempi di discesa del livello della boiaccia misurati nella fase precedente, che dovrebbero essere minori se la miscela scende attraverso il dreni perché è più permeabile del terreno naturale. L'incertezza può derivare da due fatti:

- generalmente il cemento si dispone nelle vie di minore resistenza che in un acquifero sono rappresentate da piani naturali orizzontali o suborizzontali sede del flusso laminare della falda o dai *giunti di strato*;
- la permeabilità verticale del dreni può essere inferiore a quella orizzontale dell'acquifero.

Meno laboriosamente si può procedere con due sole fasi di getto, la prima fino a sovrastare il filtro profondo, la seconda quello più superficiale. In ogni caso si rende comunque necessario riperforare il cemento per approfondire il pozzo. Tale operazione consiste in una normale perforazione in cui il foro esistente viene utilizzato come guida; sarà importante a questo punto la posa in opera dei nuovi filtri ed eventualmente (se i diametri di perforazione lo permettono) del materiale drenante. Per quanto riguarda il materiale da utilizzare per i filtri, si rimanda al caso del recupero dei pozzi senza riqualificazione dimensionale; per il dreni, il discorso è più complesso.

Una volta scesa nel pozzo la nuova tubazione di rivestimento con relativo tratto filtrato (si può ritubare completamente il tratto iniziale del pozzo con la vecchia tubazione o, talvolta, cementare ad essa la nuova come se

costituisse la parte inferiore di un pozzo telescopico), non è infatti consigliabile immettere il ghiaietto per gravità; in questi casi infatti le intercapedini foro-tubazione sono piccole e si formerebbero “ponti” o ostruzioni che fermano la ghiaia a quote più elevate di quella prevista, lasciando scoperte delle parti di parete del pozzo, con conseguente interruzione del dreno.

Per la messa in opera del ghiaietto in casi come questo, in cui il pozzo è rivestito da una doppia tubazione, la testa-pozzo deve essere perfettamente stagna e le aste utilizzate per discendere la tubazione filtrante devono arrivare fino al fondo del pozzo; la tubazione filtro deve essere dotata in alto di un breve tratto di filtri con piccole aperture e tale tratto deve trovarsi a una quota leggermente superiore alla scarpa della prima tubazione di rivestimento.

Si pompa nel pozzo, attraverso l'intercapedine, dell'acqua mescolata con la ghiaia del dreno ed il flusso di ritorno dell'acqua, dopo essere passato attraverso i filtri, passa entro le aste fino alla superficie. Durante tutta l'operazione si deve tenere sotto controllo la pressione della pompa; quando la ghiaia arriva alla sommità dei filtri infatti essa subisce un leggero aumento che, continuando l'alimentazione, ad un certo momento avviene brusco; ciò sta ad indicare che la ghiaia è arrivata alla sommità del piccolo filtro posto in alto. A questo punto l'alimentazione della ghiaia deve essere interrotta, in quanto l'inghiaiamento è terminato. Di solito, quando si interrompe tale alimentazione, una parte della ghiaia sta ancora cadendo lungo l'intercapedine in alto; essa innalza il dreno fino a raggiungere una quota di sicurezza in modo che, anche se avviene un assestamento del ghiaietto, si è sicuri che tutti i filtri siano inghiaiati.

La scelta della tipologia del materiale costituente il dreno, come visto è importantissima poiché di fatto incide sulla durata di tutto il sistema filtrante, determinando alla lunga l'effettiva efficienza del pozzo; essa deve essere fatta dipendentemente dal tipo di terreno acquifero e dal chimismo dell'acqua captata. È importante rimarcare che, durante l'analisi eseguita nel presente lavoro, è emerso che il problema maggiore è costituito dal ghiaietto, di natura essenzialmente calcarea e quindi facilmente “attaccabile” da parte delle acque aggressive, abbondanti nella Pianura Pontina. La preferenza va invece data ad un ghiaietto siliceo calibrato, che ha un'ottima resistenza rispetto agli agenti chimici delle acque mineralizzate e che può essere facilmente sele-

zionato secondo la granulometria del terreno interessato, con i vari metodi a disposizione.

### Chiusura dei fondo-pozzo aperti

Spesso sono state incontrate situazioni in cui la tubazione di rivestimento o quella filtrante sono state messe in opera senza “fondello di fondo” sia perché si è cercato di approfondire di qualche metro il pozzo con tale tubazione nelle perforazioni a percussione, sia perché nel fondo del pozzo si è formato un deposito di detriti che non ha consentito l'installazione di tale tubazione alla quota voluta nelle perforazioni a circolazione, o semplicemente perché si è pensato che in tal modo sarebbe stata captata una maggior quantità di acqua. Specialmente quest'ultima “credenza” è sicuramente da sfatare; l'apporto di acqua dal fondo è infatti trascurabile in confronto a quello del tratto filtrante, mentre influisce sensibilmente sulla qualità delle acque captate, poiché viene vanificato in parte il ruolo dei filtri di trattenere le particelle solide.

In questi casi si deve provvedere a sigillare l'estremità inferiore della tubazione di rivestimento affinché non ci sia una “venuta” di sabbia dal fondo durante il pompaggio del pozzo. Il fenomeno non è comunque molto rilevante, specialmente perché con il passare degli anni, con regimi di portata estratta costanti, si raggiunge un certo equilibrio per il quale, come visto, si ha trascinamento di solidi in sospensione solamente per particolari condizioni delle acque di falda (abbassamento o innalzamento improvviso del livello statico); tale operazione quindi è giustificata se è a basso costo e su questa linea, può essere fatta con diverse modalità, a seconda della profondità del pozzo stesso.

Nei pozzi poco profondi la soluzione consiste nel preparare un impasto quasi solido (con poca acqua) di cemento o di calce con il quale vengono riempiti dei piccoli sacchi (possibilmente di carta) che poi vengono gettati nel pozzo; in seguito si provvede a spaccarli usando qualche attrezzo pesante in modo che il cemento o la calce assorbano acqua e facciano così presa formando un massello duro e compatto (si può usare anche il cemento o la calce asciutta).

Se i pozzi sono molto profondi, conviene procedere con un getto di boiaccia cementizia con l'aiuto di un tubo di getto. Anche l'immissione di palline d'argilla per un tratto di circa 1 m può dare buoni risultati.

Una nota particolare va fatta per i pozzi provvisti di camera a fondo foro. Per i motivi elencati in precedenza,

tale schema è infatti scadente per quanto concerne la qualità dell'acqua captata, nonché pericoloso per la stabilità del pozzo stesso. In questo caso si ritiene opportuno riempire completamente la "camera" con del materiale inerte (sabbia); l'operazione deve essere fatta in pressione, in modo da ristabilire in parte le condizioni originarie del terreno, stabilizzando contemporaneamente le pareti della "camera". Poiché questi pozzi solitamente non sono molto profondi, a questo punto il recupero più ragionevole è l'approfondimento dell'opera di captazione, con le operazioni elencate in precedenza.

### Chiusura dei pozzi e rimpiazzo con una nuova opera

Gli interventi per l'esclusione dei filtri, la reintegrazione di dreno e la costruzione (o ricostruzione) di isolamenti devono essere fortemente giustificati dalla ragionevole certezza che avranno esito positivo e che il rapporto tra costi e benefici resti basso, altrimenti è opportuno orientarsi verso la ristrutturazione globale o il rifacimento dell'opera.

In tal caso, le modalità di chiusura del pozzo sono le stesse indicate per i pozzi abbandonati. Il rifacimento normalmente risulta facilitato dal fatto che si conoscono a priori le caratteristiche dei terreni acquiferi e non, interessati dalla nuova perforazione, per cui le scelte tecniche possono essere effettuate con maggior garanzia di successo; questo è vero tanto più si decide di operare in prossimità della vecchia opera, facendo atten-

zione a rispettare una certa distanza da essa, ricordando che i pozzi presentano sempre variazioni della verticalità e che il nuovo foro potrebbe quindi intersecare la vecchia tubazione. Le modalità di escavazione sono quelle classiche, facendo particolare attenzione alle specifiche problematiche legate all'idrogeologia dell'area, alla particolare distribuzione delle falde e al chimismo delle acque captate; ciò è da tenere presente in tutte fasi della messa in opera del nuovo pozzo (e su ciò si è già avuto modo di soffermarsi in precedenza): dalla scelta del fango nella fase di escavazione (se a rotazione), a quella della boiaccia cementizia, dei filtri e del dreno, nella fase di completamento.

## V.3. Analisi dei costi

### V.3.1. Rapporto costi-benefici tra le modalità d'intervento

L'effettivo vantaggio nell'attuare un tipo di intervento invece di un altro, non è quasi mai quantificabile a priori; i fattori di incertezza sono molteplici e contingenti al singolo caso tanto che, per far fronte ad identiche problematiche, si utilizzano diverse metodologie al variare delle caratteristiche costruttive del pozzo e/o del contesto in cui esso è collocato.

In ogni caso, ricerche sistematiche e studi approfonditi

	Tipologia di connessione										
	1		2		3		4				
	Schemi costruttivi										
	H	C	F	G	D	E	A	B	I	L	M
Finestra in opera		X					X	X	X	X	X
Cementaz. packer singolo/doppio		X					X	X	X	X	X
Iniezioni esterne di boiaccia			X	X	X	X					
Perforazione tappo di boiaccia	X	X					X	X	X	X	X
Cementaz. filtri/dreno esistenti	X	X									
Perforaz. terreno completa/parziale		X							X	X	X
Tubaggio completo/parziale		X							X	X	X
Messa in opera del dreno		X							X	X	X
Cementazione completa del pozzo		X							X	X	X
Chiusura fondo-pozzo	X						X	X			
Riempimento camera di fondo										X	X
Lavaggio chimico dei filtri							X	X			

Tab. 7 – Operazioni di recupero dei pozzi per i differenti schemi costruttivi esaminati

(Puppini U., 1997) sull'efficienza dei diversi tipi di intervento, hanno messo in evidenza definiti campi di applicabilità che meglio sembrano adeguarsi alle specifiche modalità; tali analisi consentono infatti di definire con degli opportuni valori, i rapporti esistenti tra gli interventi stessi a seconda della valutazione di efficienza richiesta. Il confronto in tal modo dà anche un indice dell'efficienza dell'intervento, rivelandosi così di valido aiuto soprattutto per i casi di pratica applicabilità.

La prima valutazione dei costi viene fatta come confronto tra le diverse opzioni descritte in precedenza ed il costo dell'esecuzione di un pozzo nuovo considerato pari ad 1, tramite l'*indice dei costi esecutivi*  $I_C$ . Il costo annuale di un eventuale depurazione dell'acqua per l'erogazione all'utenza può essere quantificato in 0,4÷0,7 volte quello di esecuzione di un pozzo nuovo. La seconda valutazione dei costi si base sull'*indice di rendimento*  $I_R$  definito come il rapporto tra la portata specifica prima e dopo l'intervento stesso.

Nel caso di abbandono, chiusura e rifacimento l' $I_R$  è indipendente dalle modalità esecutive del pozzo nuovo; quest'ultimo può infatti avere portata specifica inferiore o superiore a quella di riferimento per il variare delle caratteristiche dell'acquifero e delle modalità costruttive del pozzo. È necessario sottolineare che gli obiettivi degli utenti non sono riferiti al rendimento (inteso come portata specifica) bensì al volume estraibile nell'unità di tempo.

La qualità dell'acqua, considerando quella di riferimento pari ad 1, può essere indicizzata tramite l'*indice di efficacia dell'intervento*  $I_E$ . Uno degli obiettivi di questo tipo di interventi è il miglioramento delle caratteristiche idriche dell'acqua captata finalizzato al fabbisogno della domanda idrica; per questo tali analisi mostrano l'efficacia dell'intervento di ripristino anche in relazione alla concentrazione massima ammissibile indicata dalle norme per l'uso alimentare dell'acqua.

Tra gli interventi in grado di risolvere le problematiche legate alla comunicazione tra diverse falde e alla qualità della risorsa idrica, laddove è possibile scegliere la metodologia da impiegare, la ristrutturazione con esclusione totale dei filtri esistenti e approfondimento presenta il migliore rapporto tra costi e benefici.

### V.3.2. Valutazione del costo totale della riqualificazione

Il concetto di analisi costi-benefici è stato introdotto per poter definire nella fattispecie, il tipo di intervento ottimale da associare ad ogni singolo caso che è stato incontrato nel presente studio. In base alle considerazioni effettuate nel precedente paragrafo infatti, agli schemi costruttivi dei pozzi esaminati, sono state abbinate le specifiche modalità di intervento. In quest'ottica si è preferito programmare di intervenire, come accennato, con le opportune azioni di ristrutturazione con esclusione totale dei filtri esistenti e approfondimento del pozzo; tale scelta naturalmente, dipende dalle alternative che il particolare caso offre. Nei casi in cui non si è ritenuto possibile tale ripiego, si è optato infatti per il rifacimento del pozzo, mentre per quelli in cui i danni arrecati non sono ingenti, sono stati pianificati dei semplici interventi di lavaggio chimico dei filtri e del dreno, di chiusura del fondo-pozzo, ecc.

Si perviene così alla tabella 7, in cui sono state riportate schematicamente tutte le operazioni di massima di recupero dei pozzi relative ad ogni possibile schema costruttivo, riferibile ad una delle opere di captazione esaminate. Tale tabella è puramente indicativa e per questo non deve essere necessariamente interpretata in chiave assoluta: come già anticipato, si rimarca che nella realtà, ogni operazione di ripristino viene influenzata dalle molteplici condizioni "ambientali" non previste che si incontrano in fase di esecuzione.

Si possono ora quantificare le spese necessarie per il

	Costo a schema costruttivo											
	1		2		3		4					Tot.
	H	C	F	G	D	E	A	B	I	L	M	
Singolo	8,8	23	8,8	8,8	8,8	8,8	10,4	10,4	21,6	21,7	21,7	-
Campione	19	102	19	19	19	39	486	23	240	242	97	1.286
Bacino	295	1.538	295	295	295	589	7.300	347	3.612	3.637	1.455	19.363

Tab. 8 – Costo delle operazioni di recupero delle diverse tipologie di pozzo esaminate

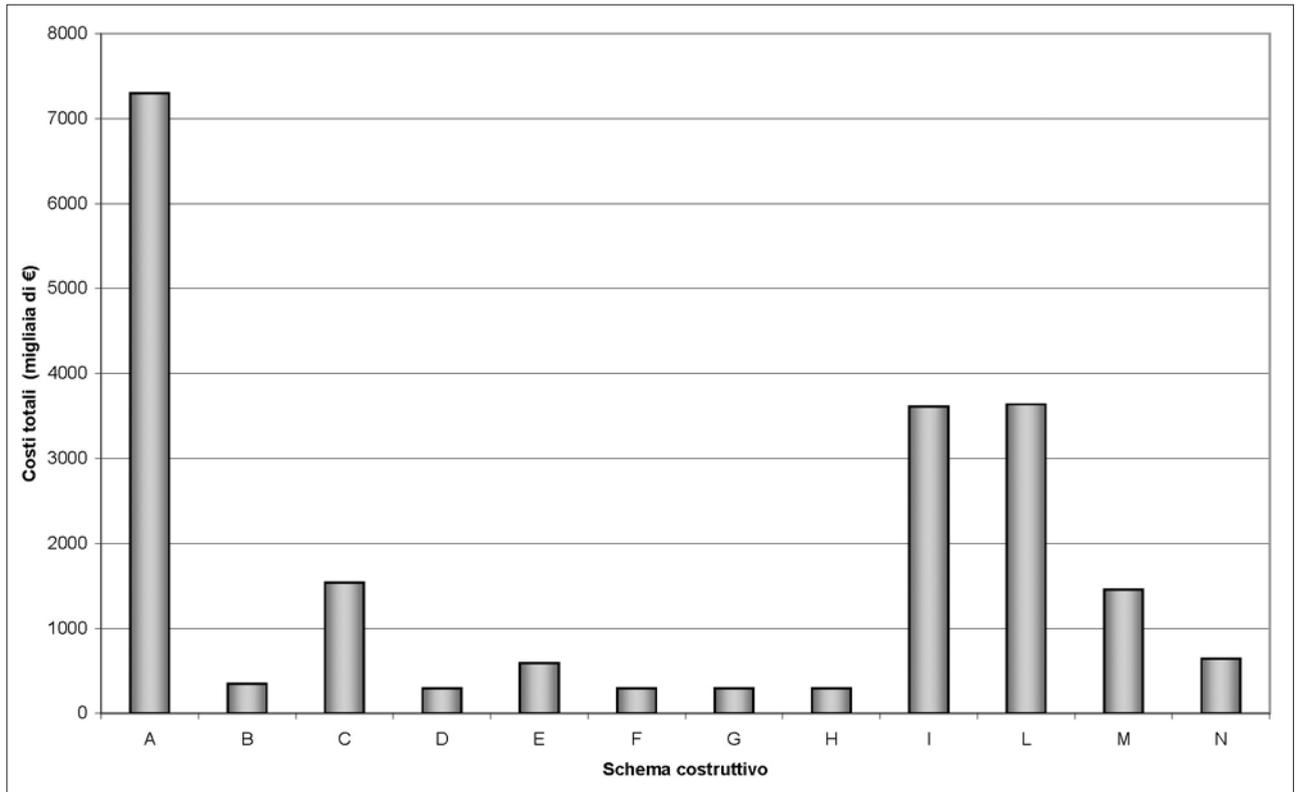


Fig. 5.5 – Costi totali degli interventi di ripristino dei pozzi, in relazione allo schema costruttivo, per l'area esaminata della Pianura Pontina.

ripristino dei pozzi esaminati nel presente studio. Ai costi previsti<sup>6</sup> per ogni singola operazione, vanno aggiunte le cosiddette spese fisse (allestimento cantiere leggero/pesante, trasporto dei materiali, ecc.), che sono state calcolate, dipendentemente dal parametro considerato, a corpo o a pozzo. Sono stati considerati anche gli eventuali sovrapprezzi dovuti a perforazioni particolari (in roccia, conglomerato e manufatti, o oltre determinate profondità), noleggi, impiego di componenti e materiali speciali (tubazioni e filtri di acciaio inox AISI 304, zincatura a caldo, filtri a ponte acciaio bitumato, ecc.), prove in corso di esecuzione (campionamenti specifici) ed infine lavori speciali (smalti-

mento residui, oneri per la sicurezza, ecc.).

Dalla tabella 8 si evince che, singolarmente, la spesa media per il ripristino di un pozzo si attesta sui 14.330 €, con un minimo di 8.780 € per il rinnovamento degli schemi G e H, ad un massimo di 22.790 € per lo schema C.

Il peso dato al singolo schema costruttivo, relativo ai costi di intervento, cambia alla scala del campione (e quindi per il totale dei pozzi dell'area esaminata), poiché di fatto, le spese maggiori che devono essere sostenute riguardano, data l'alta percentuale di presenza, lo schema costruttivo A (circa 7.300.000 €, seguito dagli schemi I e L (oltre i 3.600.000 €) e quin-

% presenza	Ripristino	Singolo	Costi (€)	
			Campione	Tot.
14	Pozzi abbandonati	8.300	111.552	1.673.280
23	BP da sigillare	200	44.16	66.240

Tab. 9 – Costi per le operazioni di recupero dei pozzi abbandonati e per la sigillatura dei boccapozzo

di dalle altre tipologie; si noti come, le spese relative al ripristino dello schema C, che singolarmente sono le più elevate, sul totale dei costi di intervento sfiorano invece una percentuale di poco superiore al 7% (fig. 5.5). Nel calcolo sono stati quindi considerati gli ulteriori recuperi (non contemplati nella tabella 8, poiché non dipendono dallo schema costruttivo) dei pozzi abbandonati (14% sul totale del campione) e dei BP da sigillare (23%).

Sostituendo quindi un 14% delle spese totali calcolate nella tabella 8 con il totale dei costi per il ripristino dei pozzi abbandonati e sommando quello dei BP da sigillare (tab. 9), si ottiene definitivamente la stima indicativa delle spese totali che devono essere effettuate in quest'area della Pianura Pontina per il ripristino ottimale delle opere di captazione idrica, pari a 19.200.000 €.

## Note

<sup>1</sup> La quale aggiunta, solitamente al 2-4% in peso nella cementazione normale, riduce il ritiro del massello di cemento, fa diminuire la densità della boiaccia (a parità di rapporto acqua/cemento), la resistenza meccanica del massello (di poca importanza nei pozzi per acqua, dato lo scopo essenzialmente di isolare le falde), il tempo di presa e fa aumentare il volume di boiaccia ottenibile con la medesima quantità di cemento, con notevole risparmio economico (oltre il 25%).

<sup>2</sup> Un packer non è altro che un manicotto di gomma che si espande per spinta assiale o per gonfiamento con aria compressa quando si opera a piccole profondità.

<sup>3</sup> Per esempio, se il livello statico è a -10 m e la base del filtro a -60 m, la pressione necessaria è pari a circa 5 bar.

<sup>4</sup>  $I_R = 2 \cdot pH_r - pH_s = S - C - pH_r$ ; con  $pH_r$  = valore del pH reale,  $pH_s$  = valore del pH d'equilibrio, se l'acqua è satura di  $CaCO_3$ ,  $C$  = funzione della concentrazione degli ioni  $Ca^{2+}$ , come durezza calcica,  $S$  = funzione di TDS (solidi disciolti).

<sup>5</sup> Per esempio, a 100 m di profondità sono necessari circa 23 bar di pressione per ottenere la rottura del terreno e la formazione di fessure planari iniettabili.

<sup>6</sup> Come riferimento è stato considerato il *Prezziario pozzi per acqua 2003* dell'A.N.I.P.A. (Associazione Nazionale Idrogeologia Pozzi Acqua).



# Conclusioni

Il bacino idrografico di Mazzocchio occupa il settore pedemontano della Pianura Pontina, tra la Via Appia e le pendici dei Monti Lepini. Con i suoi 103 km<sup>2</sup> di superficie costituisce il più esteso tra i bacini a drenaggio artificiale della Bonifica Pontina.

I limiti del bacino sono costituiti, verso i Monti Lepini, dal reticolo di scolo delle acque alte costituito dal Fosso Brivolco-Fiume Ufente, verso i settori più elevati della Pianura Pontina dagli alvei della linea di drenaggio costituita dal Fiume Cavata-Cavatella-Linea Pio. Tali corsi d'acqua impediscono l'accesso al bacino delle acque di ruscellamento dai settori adiacenti, più alti in quota. Nella porzione centrale il piano topografico presenta quote da poco superiori a inferiori al livello del mare, fino a circa -1,5 m s.l.m.

Il drenaggio delle acque all'interno del bacino è assicurato dal Canale Selcella il cui alveo presenta profondità che raggiungono nella parte terminale, in prossimità dell'impianto idrovoro di Mazzocchio, i -4 m s.l.m. Verso questo settore confluiscono pertanto tutte le acque sia derivanti dal ruscellamento che dal drenaggio delle falde acquifere superficiali. Le acque vengono quindi rilanciate verso mare dall'impianto idrovoro capace di sollevare una portata complessiva di 42 m<sup>3</sup>/s.

Risulta ancora rilevante evidenziare che durante i mesi estivi, indicativamente tra maggio e fine agosto, il Consorzio deriva verso il bacino, al fine di garantire le disponibilità idriche per gli usi irrigui, portate cospicue (3-4 m<sup>3</sup>/s) dal sistema idrico Cavata-Cavatella-Linea Pio e dal Fiume Ufente.

Il regime delle portate sollevate dall'idrovora evidenzia

la presenza di un deflusso di base che, pur escludendo il contributo dei citati apporti estivi, si mantiene nell'ordine dei 1000 l/s. Tale deflusso di base deve essere giustificato come derivante dal drenaggio delle acque sotterranee.

È stato pertanto preso in considerazione l'assetto idrogeologico del sottosuolo. I dati acquisiti hanno consentito di ricavare la schematizzazione presentata qui di seguito.

A partire dal basso si riconosce un acquifero in pressione ospitato in sedimenti di natura prevalentemente sabbiosa e sabbioso-argillosa in diverse proporzioni, con rari banchi travertinosi. Tale acquifero presenta una permeabilità media di  $1,7 \cdot 10^{-3}$  m/s e trasmissività nell'ordine di  $3,4 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s.

Al tetto di questo acquifero sono presenti, a varie quote e in maniera più o meno continua diversi orizzonti argillosi che idealmente possono essere considerati come un unico orizzonte a bassa permeabilità ( $1 \cdot 10^{-9}$  m/s) tra -11 e -32 m dal piano campagna, in corrispondenza di tale fascia si identifica, nella maggior parte dei casi esaminati, il limite di separazione tra gli acquiferi superficiali a falda libera e quelli profondi di tipo confinato o semi-confinato.

L'acquifero superficiale risulta costituito in prevalenza da alternanze di argille torbose, sabbie, travertini e rari orizzonti conglomeratici, con permeabilità media di  $1,3 \cdot 10^{-3}$  m/s.

Al letto degli acquiferi considerati, nel substrato calcareo mesozoico, è situato il circuito carsico in continuità idraulica con l'acquifero dei Monti Lepini, il quale "met-

te in carico” tutto il sistema dei depositi quaternari della Pianura Pontina nel settore pedemontano.

Il livello statico della falda superficiale è imposto dalle opere di drenaggio della bonifica e mantenuto mediamente a circa 0,85 m sotto il livello del piano campagna. Il livello statico rilevato nei pozzi che interessano la falda profonda è generalmente più alto, e nei settori topograficamente più bassi determina la presenza di condizioni di artesianesimo.

Il carico idraulico della falda in pressione dipende direttamente dai livelli piezometrici dell’acquifero carsico sepolto in cui si registrano quote comprese tra 10-11 m s.l.m. nel settore settentrionale dell’area studiata e 2-3 m s.l.m. nella zona di Cotarda.

In questo contesto, la realizzazione di pozzi per acqua con modalità non adeguate ha comportato l’aumento dei travasi sotterranei dalla falda profonda verso quella superficiale e quindi indotto modifiche nella complessa circolazione idrica sotterranea. Lo studio condotto ha avuto pertanto l’obiettivo di quantificare l’impatto delle opere di captazione rispetto:

- alle portate incautamente trasferite dalla falda inferiore verso quella superiore e da questa al reticolo di drenaggio della bonifica;
- alla modifica delle portate e della genesi delle acque drenate dal Canale Selcella;
- alla perdita di risorse idriche pregiate dalla struttura lepina, con conseguente riduzione delle portate sorgive.

A tutto questo si deve aggiungere la valutazione del danno economico derivante dall’aumento dei volumi idrici confluenti verso l’impianto idrovoro, con conseguente incremento delle spese energetiche per il sollevamento.

Il censimento e la caratterizzazione delle opere di captazione ha consentito di classificare i pozzi presenti nell’area secondo 15 differenti schemi costruttivi, a loro volta raggruppabili, dal punto di vista del danno ambientale ed economico, nelle seguenti quattro tipologie:

- pozzi non isolati, con finestatura e dreno per tutta la lunghezza della colonna. Il loro numero è valutabile nell’area di studio tra 24 e 48 pozzi, ciascuna di queste opere determina mediamente una perdita di 0,15 Milioni di  $m^3$ /anno di acque della falda profonda con una perdita complessiva di 3,5 – 7 Milioni di  $m^3$ /anno;
- pozzi finestrati in corrispondenza del solo acquifero profondo, ma con dreno lungo tutta la colonna, il loro numero è valutabile nell’area di studio tra 95 e 190

pozzi, ciascuna di queste opere determina mediamente una perdita di 2.261  $m^3$ /anno, con una perdita complessiva di risorse dalla falda idrica profonda pari a 0,21 – 0,43 Milioni di  $m^3$ /anno;

- pozzi finestrati in corrispondenza dell’acquifero profondo e con dreno lungo l’intera tubazione ma costituito dal terreno apostato durante la perforazione, circa 48 – 96 pozzi che determinano una perdita complessiva di 0,001 – 0,003 Milioni di  $m^3$ /anno;
- pozzi realizzati mediante infissione diretta della tubazione di rivestimento, senza dreno e finestrati solo in profondità, circa 800 – 1600 pozzi che determinano una perdita complessiva di 0,022 – 0,046 Milioni di  $m^3$ /anno.

Si deve comunque considerare che gli ultimi due schemi, a fronte di un minore impatto ambientale, non rispettano comunque criteri di corretta realizzazione poiché non presentano il dreno e il setto di impermeabilizzazione. Tali elementi sono indispensabili per assicurare una buona efficienza ed una lunga vita dell’opera nonché la ricostituzione dell’isolamento idraulico ante opera.

Alla luce delle considerazioni fin qui svolte è stato possibile calcolare con un elevato grado di dettaglio il bilancio idrico del bacino per l’anno di riferimento (1995) così come sintetizzato nella tabella 10.

Il bilancio idrico annuo sintetizzato nella tabella è stato chiuso rispetto al volume annuo sollevato dall’idrovoro di Mazzocchio e pertanto non esplicita i valori dei prelievi idrici prevalentemente a scopo irriguo (circa 11,38 Milioni di  $m^3$ /anno con portate che nel mese di giugno possono raggiungere i 3  $m^3$ /s). Tali prelievi insistono prevalentemente sulle risorse idriche della falda profonda e sulle acque derivate da altri bacini comunque alimentati dal deflusso di base dei Monti Lepini.

A tal proposito lo studio evidenzia come l’attuale regime dei prelievi ha determinato il progressivo abbassamento dei livelli statici della falda profonda, riducendo l’estensione dell’area di artesianesimo. Dal confronto con i dati del 1970 risultano abbassamenti fino a valori dell’ordine dei 3,5 metri.

Al fine di ridurre l’impatto antropico indotto sulla falda profonda sono stati valutati gli interventi da eseguire. Il costo complessivo di tali interventi ammonta a poco più di 20 milioni di euro. Ma si deve considerare che la maggior parte della perdita di risorsa idrica sotterranea, cir-

ca il 90%, è indotta dai boccapozzo aperti e dai pozzi realizzati secondo la tipologia 1. Gli interventi di bonifica per tali situazioni ammonta a circa 3,5 milioni di euro. Si evidenzia così come con una spesa pari al 10% del totale si possa ottenere una riduzione di più del 50% delle perdite idriche. Tale spesa in termini generali può essere in parte ammortizzata dal recupero economico legato alla minor spesa energetica (circa 150 MW all'anno in meno) per il sollevamento delle acque. Per il risanamento della restante parte dei pozzi poiché i costi sono troppo elevati rispetto al beneficio atteso si ritiene utile procedere alla sostituzione progressiva degli stessi man mano che questi raggiungono delle condizioni di esercizio proibitive. La realizzazione dei nuovi pozzi dovrà essere eseguita secondo degli schemi predefiniti che rispettino i criteri di corretta progettazione ed esecuzione.

Gli studi svolti avendo consentito di identificare gli elementi di base del bilancio idrico del bacino e di effettuare la loro quantificazione permettono di discriminare nel regime delle portate del canale Selcella le diverse provenienze, con differenti caratteristiche chimico-fisiche, delle acque circolanti. Ciò risulta determinante al fine di effettuare ed interpretare correttamente le risultanze del monitoraggio qualitativo delle acque e quindi di dimensionare e programmare gli interventi di risanamento sul bacino. Tale bacino presenta già oggi parametri di qualità delle acque scadenti (come dal Piano di Tutela delle acque della Regione Lazio) che dopo aver provveduto al risanamento dei pozzi, e quindi alla riduzione dell'apporto dalla falda profonda, potrebbe vedere un ulteriore peggioramento qualora non si provvedesse in tempi adeguati agli interventi necessari alla riduzione dei carichi inquinanti.

	PARAMETRO	Mm <sup>3</sup> /anno	Mm <sup>3</sup> /s
A	Portata sollevata dall'idrovora	100,5	3,19
B	Precipitazione efficace (P - Evr)	70,4	2,23
C	Ruscellamento misurato	54,1	1,72
D	Infiltrazione efficace falda sup (B - C)	16,3	0,52
E	Apporti da altri corsi d'acqua (al netto degli usi)	18,7	0,59
F	Apporti sotterranei della falda profonda di cui:	11,4	0,36
	<i>F1 dai boccapozzo artesiani</i>	<i>4,5</i>	<i>0,14</i>
	<i>F2 dalle interapedini e dai filtri</i>	<i>5,55</i>	<i>0,18</i>
	<i>F3 travasi naturali verso la falda superficiale e il selcella</i>	<i>1,35</i>	<i>0,04</i>

Tab. 10 – Sintesi del bilancio idrico del bacino di Mazzocchio.



# Raccolta delle misure sperimentali

ID	Longitudine (UTM 33)	Latitudine (UTM 33)	C.T.R.	Anno costruzione	Quota (m s.l.m.)	Profondità (m da p.c.)	Altezza (m da p.c.)
C1	340469	4589194	401140	1993	0,10	80,00	0,15
C2	340417	4589226	401140	1934	0,50	-	0
C3	341157	4590298	401140	1973	0,10	99,00	0,58
C4	341447	4591177	401100	1950	-0,40	105,00	0,75
C5	344330	4590374	401140	-	5,00	-	-
C6	341508	4591087	401100	-	-0,40	20,00	0,45
C7	340825	4590692	401100	-	0,40	-	0,4
C8	342050	4589782	401140	2001	-0,40	100,00	0,75
C9	343710	4588299	401140	-	1,20	33,00	0,25
C10	343445	4588098	401140	1973	0,60	60,00	1,1
C11	341908	4588585	401140	2000	1,50	95,00	1,2
C12	341581	4588404	401140	1990	-0,30	49,00	0,9
C13	339965	4586928	401140	1968	4,00	55,00	-
C14	341829	4586911	401140	-	1,60	43,00	0,5
C15	342125	4586952	401140	-	1,50	11,80	-
C16	341790	4586563	401140	1973	0,60	60,00	-0,05
C17	340765	4587929	401140	1933	0,90	95,00	0,4
C18	340156	4585027	401140	1963	3,30	58,00	-
C19	341262	4586074	401140	1978	0,80	64,00	-
C20	340839	4584966	401140	1980	2,80	40,00	-
C21	341446	4584121	414020	1999	1,80	63,00	-
C22	342534	4585184	401140	1934	1,60	30,00	-
C23	341008	4585668	401140	1999	2,40	84,00	-
C24	340967	4585720	401140	-	2,40	25,00	-
C25	343411	4586093	401140	1954	0,30	51,00	0,7
C26	342923	4585680	401140	1980	0,20	20,00	-
C27	342961	4585640	401140	1934	0,20	40,00	-0,4
C28	341741	4584432	414020	1960	1,50	40,00	-
C29	341127	4583931	414020	1997	3,00	63,00	-
C30	341087	4584097	414020	2002	3,00	47,00	-
C31	340591	4584593	414020	1934	4,20	60,00	-
C32	342256	4583271	414020	-	2,50	70,00	-
C33	342750	4583421	414020	1950	2,00	100,00	0,4
C34	344173	4584883	414020	1950	0,00	40,00	0,3
C35	344507	4585227	411140	1998	0,30	70,00	-
C36	345780	4585625	411140	-	3,70	40,00	1
C37	345059	4585560	411140	1992	1,40	100,00	0,9
C38	345045	4585598	411140	2003	1,40	100,00	0,5
C39	343267	4582594	414020	1970	1,40	54,00	-
C40	343769	4582314	414020	1924	3,00	-	-
C41	345493	4584479	414020	1934	3,80	20,00	-
C42	345425	4584491	414020	-	3,80	100,00	-
C43	342858	4581910	414020	1963	2,40	107,00	1
C44	342876	4581899	414020	-	2,40	40,00	0,15
C45	343057	4583726	414020	-	0,00	92,00	0,8
C46	343742	4582982	414020	-	3,00	40,00	0,35
C47	344875	4584135	414020	1982	0,80	80,00	0,4
C48	345178	4583642	414020	1982	2,40	105,00	-
C49	344790	4581334	414020	1962	1,00	55,00	0,25
C50	345101	4581557	414020	-	0,50	60,00	-
C51	345108	4579815	414020	1966	1,00	39,00	0,15
C52	345530	4580225	414020	-	1,00	40,00	0,28

## Captazioni e risorsa idrica nel bacino di Mazzocchio

ID	Longitudine (UTM 33)	Latitudine (UTM 33)	C.T.R.	Anno costruzione	Quota (m s.l.m.)	Profondità (m da p.c.)	Altezza (m da p.c.)
C53	345522	4580307	414020	1993	1,00	25,00	-
C54	346232	4580398	414020	-	2,60	34,00	-0,55
C55	346261	4580345	414020	-	2,30	34,00	-0,73
C56	347676	4582707	414030	1965	4,80	42,00	0,43
C57	347107	4582217	414030	1938	3,40	35,00	0
C58	347154	4582204	414030	1985	3,40	35,00	-0,45
C59	346352	4581620	414020	1953	3,40	60,00	-
C60	346848	4582904	414030	-	3,30	35,00	-0,5
C61	346718	4583912	414030	1954	5,00	55,00	-0,7
C62	346346	4585329	401140	1984	4,10	24,00	-
C63	347045	4584676	414030	-	5,00	45,00	-
C64	347371	4584081	414030	-	5,20	47,00	-
C65	346269	4583079	414020	1950	4,20	37,00	0,1
C66	345527	4582576	414020	1970	2,50	53,00	-0,65
C67	345932	4583807	414020	-	4,40	-	0,8
C68	345855	4584678	414020	-	4,00	48,00	-
C69	338213	4587249	401130	1973	4,00	49,00	0
C70	338156	4587262	401130	-	4,00	20,00	-
C71	338824	4587613	401130	-	3,30	55,00	0
C72	337137	4589156	401130	1988	3,50	32,00	0,25
C73	337913	4590911	401090	1965	3,50	60,00	-
C74	339910	4592657	401090	-	3,20	60,00	0
C75	337631	4590648	401090	-	3,60	75,00	-
C76	336698	4589910	401130	-	3,80	85,00	-
C77	336603	4589546	401130	-	3,60	80,00	-
C78	336094	4591619	401090	1960	5,10	45,00	0
C79	336758	4592048	401090	1983	3,60	56,00	-
C80	337042	4592597	401090	1975	5,80	60,00	-
C81	337136	4593368	401090	2000	9,50	-	-
C82	338778	4589571	401130	-	3,00	60,00	-
C83	347574	4585589	401150	-	7,00	70,00	-
C84	346185	4587410	401140	-	4,80	42,00	-0,1
C85	334400	4592182	401090	1970	4,50	75,00	-
C86	335814	4593712	401090	1974	7,00	50,00	-
C87	336238	4594268	401090	1912	9,40	-	0,6
C88	337373	4595255	401090	1980	21,00	60,00	-
C89	337523	4595197	401090	2000	22,00	70,00	-
C90	337277	4595614	401090	-	33,00	88,00	-
C91	335216	4591086	401090	-	4,70	60,00	0,65
C92	345600	4581219	414020	-	1,00	-	1,35
C93	345686	4581175	414020	-	2,50	-	0,5
C94	345701	4581079	414020	-	2,00	-	0,85
C95	343789	4580928	414020	1950	2,40	97,00	1,2
C96	343800	4580942	414020	1995	2,40	28,00	-

## Captazioni e risorsa idrica nel bacino di Mazzocchio

Codice	Utilizzo	
	Uso	Regime
C1	Irriguo	(solo soccorso)
C2	Inutilizzato	
C3	Domestico	
C4	Potabile	(giardino/orto)
C5	Potabile	
C6	Inutilizzato	
C7	Inutilizzato	
C8	Domestico	(giardino/orto)
C9	Domestico	
C10	Domestico	
C11	Potabile	(fontana che getta in un laghetto)
C12	Domestico	
C13	Domestico	(giardino/orto)
C14	Domestico	
C15	Inutilizzato	
C16	Inutilizzato	
C17	Domestico	(e giardino/orto)
C18	Industriale	(allevamento bovini) e domestico
C19	Domestico	(e giardino/orto)
C20	Domestico	
C21	Industriale	(allevamento bovini) e domestico
C22	Domestico	(solo servizi igienici)
C23	Irriguo	
C24	Domestico	(e giardino/orto)
C25	Irriguo	
C26	Domestico	
C27	Inutilizzato	
C28	Industriale	(allevamento bovini) e domestico
C29	Domestico	
C30	Industriale	(allevamento bovini) e domestico
C31	Domestico	
C32	Industriale	(allevamento bovini) e domestico
C33	Domestico	
C34	Domestico	(è un maneggio)
C35	Irriguo	
C36	Domestico	(solo servizi igienici)
C37	Inutilizzato	
C38	Industriale	(allevamento bovini)
C39	Domestico	
C40	Domestico	(e giardino/orto)
C41	Industriale	(allevamento bovini) e domestico
C42	Industriale	(allevamento bovini) e domestico
C43	Domestico	
C44	Inutilizzato	
C45	Inutilizzato	
C46	Inutilizzato	
C47	Industriale	(allevamento bovini) e domestico
C48	Industriale	(allevamento bovini) e domestico

Codice	Utilizzo	
	Uso	Regime
C49	Domestico	(e giardino/orto)
C50	Domestico	(e giardino/orto)
C51	Industriale	(allevamento bovini) e domestico
C52	Domestico	
C53	Domestico	(è un agriturismo)
C54	Domestico	
C55	Industriale	(allevamento bovini) e domestico
C56	Domestico	
C57	Domestico	
C58	Domestico	
C59	Domestico	
C60	Inutilizzato	
C61	Domestico	
C62	Domestico	(e giardino/orto)
C63	Domestico	(e giardino/orto)
C64	Industriale	(allevamento bovini) e domestico
C65	Industriale	(allevamento bovini) e domestico
C66	Industriale	(allevamento bovini) e domestico
C67	Domestico	
C68	Domestico	(è un bar)
C69	Domestico	(giardino/orto)
C70	Irriguo	
C71	Industriale	(allevamento bovini)
C72	Irriguo	(anche serre)
C73	Irriguo	(carciofi e piselli)
C74	Irriguo	
C75	Inutilizzato	
C76	Irriguo	(anche serre)
C77	Irriguo	
C78	Domestico	
C79	Irriguo	(serra di pomodori)
C80	Irriguo	
C81	Irriguo	
C82	Irriguo	(un'azienda agricola)
C83	Industriale	(allevamento bovini) e domestico
C84	Domestico	(e giardino/orto)
C85	Irriguo	
C86	Irriguo	
C87	Potabile	
C88	Irriguo	(carciofi e kiwi)
C89	Irriguo	(carciofi e kiwi)
C90	Irriguo	
C91	Industriale	(allevamento maiali)
C92	Irriguo	
C93	Industriale	(allevamento bovini) e domestico
C94	Inutilizzato	
C95	Domestico	(giardino/orto)
C96	Domestico	(e giardino/orto)

## Captazioni e risorsa idrica nel bacino di Mazzocchio

Codice	Data	Quota (m slm)	Liv stat (m pc)	Quota LS (m slm)	Liv din (m pc)	Quota LD (m slm)	Q del LD (l/s)
C1	21-mag-03	0,10	0,14	-0,04	-	-	-
C2	21-mag-03	0,50	0,55	-0,05	-	-	-
C3	21-mag-03	0,10	-1,1	1,20	-0,38	0,48	0,13
C4	22-mag-03	-0,40	-1,13	0,73	-0,6	0,2	0,094
C5	21-mag-03	5,00	-	-	-	-	-
C6	22-mag-03	-0,40	0,65	-1,05	-	-	-
C7	22-mag-03	0,40	-0,48	0,88	-0,2	0,6	0,025
C8	22-mag-03	-0,40	-2,64	2,24	-0,6	0,2	0,4
C9	22-mag-03	1,20	-	-	-	-	-
C10	22-mag-03	0,60	-	-	-0,85	1,45	2,5
C11	23-mag-03	1,50	-	-	-1,05	2,55	1,2
C12	22-mag-03	-0,30	-2,72	2,42	-0,8	0,5	0,375
C13	22-mag-03	4,00	-	-	-	-	-
C14	23-mag-03	1,60	0,05	1,55	-	-	-
C15	25-mag-03	1,50	-	-	-	-	-
C16	23-mag-03	0,60	0,15	0,45	0,65	-0,05	0,065
C17	23-mag-03	0,90	-	-	-	-	-
C18	03-giu-03	3,30	-	-	-	-	-
C19	23-mag-03	0,80	-	-	-	-	-
C20	03-giu-03	2,80	-	-	-	-	-
C21	03-giu-03	1,80	-	-	-	-	-
C22	03-giu-03	1,60	-	-	-	-	-
C23	03-giu-03	2,40	-	-	-	-	-
C24	03-giu-03	2,40	-	-	-	-	-
C25	03-giu-03	0,30	-1,08	1,38	-0,55	0,85	0,093
C26	03-giu-03	0,20	-	-	-	-	-
C27	03-giu-03	0,20	0,16	0,04	0,4	-0,2	0,006
C28	03-giu-03	1,50	-	-	-	-	-
C29	03-giu-03	3,00	-	-	-	-	-
C30	03-giu-03	3,00	-	-	-	-	-
C31	03-giu-03	4,20	-	-	-	-	-
C32	04-giu-03	2,50	-	-	-	-	-
C33	04-giu-03	2,00	-0,1	2,1	-	-	-
C34	04-giu-03	0,00	0,4	-0,4	-	-	-
C35	04-giu-03	0,30	-	-	0	0,3	1,1
C36	04-giu-03	3,70	0,27	3,43	-	-	-
C37	04-giu-03	1,40	-1,72	3,12	-0,75	2,15	0,17
C38	04-giu-03	1,40	-3,69	5,09	-0,5	1,9	0,64
C39	05-giu-03	1,40	-	-	-	-	-
C40	04-giu-03	3,00	-	-	-	-	-
C41	05-giu-03	3,80	-	-	-	-	-
C42	05-giu-03	3,80	-	-	-	-	-
C43	05-giu-03	2,40	-2,70	4,10	-0,9	3,3	0,143
C44	05-giu-03	2,40	1,45	0,95	-	-	-
C45	05-giu-03	0,00	-1,37	1,37	-0,7	0,7	0,12
C46	05-giu-03	3,00	1,7	1,3	-	-	-
C47	05-giu-03	0,80	-1,55	2,35	-0,4	1,2	0,2
C48	05-giu-03	2,40	-	-	-	-	-
C49	06-giu-03	1,00	0,65	0,35	-	-	-
C50	06-giu-03	0,50	-	-	-	-	-
C51	09-giu-03	1,00	0,2	0,8	-	-	-
C52	09-giu-03	1,00	0,82	0,18	-	-	-

## Captazioni e risorsa idrica nel bacino di Mazzocchio

Codice	Data	Quota (m slm)	Liv stat (m pc)	Quota LS (m slm)	Liv din (m pc)	Quota LD (m slm)	Q del LD (l/s)
C53	09-giu-03	1,00	-	-	-	-	-
C54	09-giu-03	2,60	1,34	1,26	-	-	-
C55	09-giu-03	2,30	1,06	1,24	-	-	-
C56	09-giu-03	4,80	0,5	4,3	-	-	-
C57	09-giu-03	3,40	0,4	3	-	-	-
C58	09-giu-03	3,40	-0,04*	3,44*	0,45	2,95	0,086
C59	09-giu-03	3,40	-	-	-	-	-
C60	09-giu-03	3,30	1,15	2,15	-	-	-
C61	09-giu-03	5,00	1,2	3,8	-	-	-
C62	10-giu-03	4,10	-	-	-	-	-
C63	10-giu-93	5,00	-	-	-	-	-
C64	10-giu-03	5,20	-	-	-	-	-
C65	10-giu-03	4,20	1,1	3,1	-	-	-
C66	10-giu-03	2,50	-0,15*	2,65*	0,65	1,85	0,143
C67	10-giu-03	4,40	2,4	2	-	-	-
C68	10-giu-03	4,00	-	-	-	-	-
C69	11-giu-03	4,00	3,75	0,25	-	-	-
C70	11-giu-03	4,00	-	-	-	-	-
C71	11-giu-03	3,30	2,2	1,1	-	-	-
C72	11-giu-03	3,50	2,85	0,65	-	-	-
C73	12-giu-03	3,50	-	-	-	-	-
C74	12-giu-03	3,20	1,2	2	-	-	-
C75	12-giu-03	3,60	-	-	-	-	-
C76	12-giu-03	3,80	-	-	-	-	-
C77	12-giu-03	3,60	-	-	-	-	-
C78	13-giu-03	5,10	-	-	-	-	-
C79	13-giu-03	3,60	-	-	-	-	-
C80	13-giu-03	5,80	-	-	-	-	-
C81	13-giu-03	9,50	-	-	-	-	-
C82	13-giu-03	3,00	-	-	-	-	-
C83	16-giu-03	7,00	-	-	-	-	-
C84	16-giu-03	4,80	0,36	4,44	-	-	-
C85	17-giu-03	4,50	-	-	-	-	-
C86	17-giu-03	7,00	-	-	-	-	-
C87	17-giu-03	9,40	-	-	-0,6	10	0,067
C88	17-giu-03	21,00	-	-	-	-	-
C89	17-giu-03	22,00	-	-	-	-	-
C90	17-giu-03	33,00	-	-	-	-	-
C91	18-giu-03	4,70	5,05	-0,35	-	-	-
C92	19-giu-03	1,00	-1,77*	2,77*	-1,25	2,25	0,092
C93	19-giu-03	2,50	0,1	2,4	-	-	-
C94	19-giu-03	2,00	-0,37	2,37	-	-	-
C95	19-giu-03	2,40	-	-	-1,1	3,5	2
C96	19-giu-03	2,40	2,1	0,3	-	-	-

\* Dedotte.

## Captazioni e risorsa idrica nel bacino di Mazzocchio

Codice	Data misura	T (°C)	pH	Conducibilità (mS/cm)
C1	21-mag-03	16	7	1810
C2	21-mag-03	19	7	1850
C3	21-mag-03	17	7	1810
C4	22-mag-03	17	7	1590
C5	21-mag-03	14	7	1010
C6	22-mag-03	16	8	2150
C7	22-mag-03	15	7,5	2200
C8	22-mag-03	15	7	1920
C9	22-mag-03	17	7	2200
C10	22-mag-03	16	7	2160
C11	23-mag-03	17	7,5	2060
C12	22-mag-03	16	8	2300
C13	22-mag-03	15	7	1460
C14	23-mag-03	17	7	2040
C15	25-mag-03	-	-	-
C16	23-mag-03	15	6,5	1900
C17	23-mag-03	15	7,5	2500
C18	03-giu-03	16	7	1170
C19	23-mag-03	17	7,5	1750
C20	03-giu-03	17	7,5	1500
C21	03-giu-03	18	7	1800
C22	03-giu-03	17	7	2200
C23	03-giu-03	15	7	1650
C24	03-giu-03	17	7	1600
C25	03-giu-03	16	7	2500
C26	03-giu-03	20	7	2400
C27	03-giu-03	15	7	2630
C28	03-giu-03	18	6,5	1200
C29	03-giu-03	-	-	-
C30	03-giu-03	-	-	-
C31	03-giu-03	17	7	1150
C32	04-giu-03	18	7	1900
C33	04-giu-03	18	7	1300
C34	04-giu-03	17	7	1290
C35	04-giu-03	-	-	-
C36	04-giu-03	20	7	1430
C37	04-giu-03	16	7	1100
C38	04-giu-03	17	7	1360
C39	05-giu-03	18	7	2050
C40	04-giu-03	-	7,5	1580
C41	05-giu-03	19	7,5	1250
C42	05-giu-03	18	7	1280
C43	05-giu-03	17	7	1430
C44	05-giu-03	-	-	-
C45	05-giu-03	17	7	2100
C46	05-giu-03	17	7,5	2060
C47	05-giu-03	16	7	1360
C48	05-giu-03	18	7	1490

Codice	Data misura	T (°C)	pH	Conducibilità (mS/cm)
C49	06-giu-03	18	7	1780
C50	06-giu-03	20	7,5	1900
C51	09-giu-03	18	7,5	2280
C52	09-giu-03	18	7	1840
C53	09-giu-03	19	7,5	1300
C54	09-giu-03	20	7	1735
C55	09-giu-03	20	7	1730
C56	09-giu-03	20	7	500
C57	09-giu-03	-	7	1260
C58	09-giu-03	-	7	890
C59	09-giu-03	-	7	1550
C60	09-giu-03	-	-	-
C61	09-giu-03	-	6,5	900
C62	10-giu-03	-	7,5	1030
C63	10-giu-93	-	7	440
C64	10-giu-03	16	7	470
C65	10-giu-03	19	7	1320
C66	10-giu-03	-	7	1400
C67	10-giu-03	-	6,5	700
C68	10-giu-03	20	7	1340
C69	11-giu-03	-	7,5	1350
C70	11-giu-03	-	7,5	1240
C71	11-giu-03	-	7,5	1960
C72	11-giu-03	-	7	1440
C73	12-giu-03	18	7,5	1450
C74	12-giu-03	20	7,5	1910
C75	12-giu-03	20	7,5	1660
C76	12-giu-03	20	7,5	1840
C77	12-giu-03	20	7,5	1890
C78	13-giu-03	20	7,5	1860
C79	13-giu-03	-	-	-
C80	13-giu-03	-	-	-
C81	13-giu-03	20	7	940
C82	13-giu-03	20	7	1450
C83	16-giu-03	19	7	640
C84	16-giu-03	17	6,5	360
C85	17-giu-03	19	7	1810
C86	17-giu-03	19	7	1660
C87	17-giu-03	-	8	1790
C88	17-giu-03	19	7	830
C89	17-giu-03	-	-	-
C90	17-giu-03	-	-	-
C91	18-giu-03	19	7	2140
C92	19-giu-03	19	7	1920
C93	19-giu-03	19	7	1700
C94	19-giu-03	-	7,5	2100
C95	19-giu-03	16	7	1880
C96	19-giu-03	20	7	2050

## Captazioni e risorsa idrica nel bacino di Mazzocchio

Codice	Tipo pompa	Potenza (HP)	Profondità (m dal BP)	φ pozzo/filtro (mm)	Rivestimento
C1	Sommersa	60	6	250	pvc
C2	Assente -	-	-	100	ghisa
C3	Asse orizz.	1	-	120	ferro
C4	Assente -	-	-	-	ferro
C5	Assente -	-	-	-	-
C6	Assente -	-	-	-	-
C7	Assente -	-	-	-	ferro
C8	--	-	-	170	pvc
C9	Asse vert.	1	-	100	ferro-etermit
C10	Asse orizz.	2	-	250	pvc
C11	Assente -	-	-	150	pvc
C12	--	-	-	-	pvc
C13	Sommersa	1	15	-	-
C14	Asse orizz.	1,5	-	-	-
C15	Assente -	-	-	-	-
C16	Asse orizz.	1	-	-	ottone
C17	Asse orizz.	0,5	-	80	ferro-etermit
C18	Asse orizz.	1	-	-	etermit
C19	Asse vert.	1	-	-	ferro-etermit
C20	Asse orizz.	1	-	-	pvc
C21	Asse vert.	-	-	-	-
C22	Asse orizz.	1	-	270	ferro
C23	Asse vert.	-	-	60	pvc
C24	Asse vert.	1	-	100	etermit
C25	Asse vert.	-	-	80/60	pvc
C26	Asse orizz.	-	-	-	-
C27	Assente -	-	-	100	ferro-pvc
C28	Asse orizz.	-	-	160	pvc
C29	Asse vert.	1,5	-	140	pvc
C30	Asse orizz.	-	-	-	-
C31	Asse orizz.	1	-	-	-
C32	Asse orizz.	-	-	-	-
C33	Asse orizz.	1	-	-	ottone
C34	Asse orizz.	1,5	-	300	pvc
C35	Sommersa	-	20	-	ferro
C36	Asse orizz.	1	-	100	ferro-pvc
C37	Assente -	-	-	250	pvc
C38	Asse orizz.	1	-	-	-
C39	Asse orizz.	1	-	-	-
C40	Asse orizz.	1	-	-	-
C41	Asse orizz.	1,5	-	-	-
C42	Asse vert.	-	-	100	ferro
C43	Asse orizz.	0,75	-	120	ferro
C44	Assente -	-	-	-	ferro
C45	Asse orizz.	1	-	120	pvc
C46	Assente -	-	-	100	ferro
C47	Asse orizz.	-	-	150	acciaio zincato
C48	Asse orizz.	-	-	80	etermit

Codice	Tipo pompa	Potenza (HP)	Profondità (m dal BP)	φ pozzo/filtro (mm)	Rivestimento
C49	Asse orizz.	1	-	-	-
C50	Asse orizz.	1	-	100	ferro
C51	Asse orizz.	1,5	-	-	-
C52	Asse orizz.	1	-	-	-
C53	Asse orizz.	-	-	100	pvc
C54	--	-	-	100	pvc
C55	Asse orizz.	-	-	-	-
C56	Asse orizz.	1	-	80	ferro-etermit
C57	Asse orizz.	1	-	100	ferro
C58	--	-	-	-	-
C59	Asse orizz.	1	-	120	ferro
C60	Assente -	-	-	-	pvc-ferro
C61	Asse orizz.	1	-	-	cemento
C62	Sommersa	-	22	60	ferro
C63	Asse orizz.	1,5	-	250	ferro
C64	Asse vert.	-	-	80	etermit
C65	Asse vert.	-	-	100	etermit
C66	Asse orizz.	1,5	-	-	cemento
C67	Asse orizz.	-	-	-	-
C68	Asse orizz.	-	-	120	etermit
C69	Asse orizz.	1	-	260	pvc
C70	Asse vert.	2	-	-	etermit-ferro
C71	Asse orizz.	1	-	260	pvc
C72	Asse orizz.	1,5	-	200	pvc
C73	Asse vert.	-	-	250	pvc
C74	Asse vert.	-	-	250	etermit
C75	Asse vert.	-	-	250	etermit
C76	Asse vert.	-	-	260	pvc
C77	Asse vert.	-	-	100	etermit
C78	Asse vert.	1	-	200	pvc
C79	Asse vert.	-	-	500	etermit
C80	Asse vert.	-	-	200	ferro
C81	Asse vert.	-	-	200	ferro
C82	Asse vert.	-	-	250	ghisa
C83	Asse orizz.	1	-	100	pvc
C84	Asse orizz.	1	-	100	pvc
C85	Asse vert.	50	-	100	pvc
C86	Asse vert.	50	-	-	-
C87	Assente -	-	-	250	ferro
C88	Sommersa	18	40	250	pvc
C89	Asse vert.	-	-	-	pvc
C90	Asse vert.	-	-	250/220	-
C91	Sommersa	10	14	250/180	pvc-ferro
C92	Assente -	-	-	100	pvc
C93	Asse orizz.	1,5	-	100	pvc
C94	Assente -	-	-	80	pvc
C95	Assente -	-	-	120	ferro
C96	Sommersa	-	-	1000	cemento

## Captazioni e risorsa idrica nel bacino di Mazzocchio

Data	Pioggie Terracina (mm)	Pioggie Latina (mm)	Portata media giornaliera sollevata (m <sup>3</sup> /s)
1/1/1995	0,3	0,0	1,5
2/1/1995	0,0	4,2	3,5
3/1/1995	20,0	16,4	2,5
4/1/1995	7,4	0,8	5,0
5/1/1995	0,0	0,0	5,3
6/1/1995	0,0	0,0	4,8
7/1/1995	0,0	0,0	2,0
8/1/1995	0,0	0,0	2,0
9/1/1995	0,0	0,0	2,8
10/1/1995	4,5	0,0	2,3
11/1/1995	0,0	0,0	1,8
12/1/1995	0,0	1,4	2,0
13/1/1995	0,0	0,0	0,5
14/1/1995	0,0	0,2	3,0
15/1/1995	0,0	0,0	1,8
16/1/1995	0,0	0,0	2,0
17/1/1995	0,0	0,0	2,0
18/1/1995	10,0	0,0	2,0
19/1/1995	0,0	12,6	1,5
20/1/1995	5,6	1,2	1,5
21/1/1995	5,1	0,6	2,8
22/1/1995	0,0	13,8	1,8
23/1/1995	0,0	0,0	3,5
24/1/1995	0,0	0,0	2,8
25/1/1995	0,0	0,0	2,3
26/1/1995	0,0	0,0	2,3
27/1/1995	0,0	0,0	3,3
28/1/1995	0,0	0,0	1,5
29/1/1995	0,0	0,0	1,8
30/1/1995	19,0	0,0	1,8
31/1/1995	0,0	8,8	1,8
1/2/1995	0,0	0,6	3,8
2/2/1995	0,0	0,0	0,8
3/2/1995	0,0	0,0	0,8
4/2/1995	0,0	0,0	2,3
5/2/1995	0,0	0,0	1,3
6/2/1995	0,0	0,0	2,5
7/2/1995	0,0	0,0	1,3
8/2/1995	0,0	0,0	2,3
9/2/1995	0,4	0,8	0,3
10/2/1995	0,0	0,8	2,0
11/2/1995	0,0	0,0	1,0
12/2/1995	0,0	0,0	1,3
13/2/1995	3,3	0,0	1,3
14/2/1995	0,0	2,4	1,0
15/2/1995	1,5	5,4	1,0
16/2/1995	0,0	0,0	2,8
17/2/1995	2,0	3,6	2,0
18/2/1995	0,0	0,0	1,3
19/2/1995	0,0	1,8	1,3
20/2/1995	0,0	0,0	1,3
21/2/1995	0,0	0,0	2,3
22/2/1995	0,0	0,0	2,3
23/2/1995	17,3	0,0	1,0
24/2/1995	0,0	19,0	2,3
25/2/1995	0,0	18,0	4,0
26/2/1995	0,0	0,0	7,3
27/2/1995	0,0	0,0	2,5
28/2/1995	0,0	0,0	2,0
1/3/1995	3,3	0,0	2,3
2/3/1995	12,6	6,8	2,3

Data	Pioggie Terracina (mm)	Pioggie Latina (mm)	Portata media giornaliera sollevata (m <sup>3</sup> /s)
3/3/1995	1,0	6,6	2,8
4/3/1995	10,5	1,8	4,5
5/3/1995	0,0	9,4	3,3
6/3/1995	18,3	1,4	4,8
7/3/1995	0,0	7,8	6,3
8/3/1995	6,6	0,0	3,3
9/3/1995	0,0	10,8	3,3
10/3/1995	0,0	0,0	5,0
11/3/1995	0,0	0,0	2,5
12/3/1995	0,0	0,0	2,8
13/3/1995	0,0	0,0	3,3
14/3/1995	0,0	0,0	4,3
15/3/1995	6,1	0,0	1,5
16/3/1995	5,2	0,6	2,0
17/3/1995	0,0	2,0	2,3
18/3/1995	0,0	0,0	0,3
19/3/1995	0,0	0,0	3,5
20/3/1995	0,0	0,0	3,8
21/3/1995	0,0	0,0	1,0
22/3/1995	0,0	0,0	3,0
23/3/1995	0,0	0,0	2,3
24/3/1995	0,0	0,0	0,3
25/3/1995	0,0	0,0	1,5
26/3/1995	0,0	0,0	3,0
27/3/1995	0,4	0,6	4,8
28/3/1995	0,0	1,0	2,3
29/3/1995	21,4	0,2	3,5
30/3/1995	0,0	9,6	2,3
31/3/1995	0,0	0,0	3,3
1/4/1995	0,0	0,0	1,3
2/4/1995	0,0	0,0	1,3
3/4/1995	0,0	0,0	1,5
4/4/1995	0,0	0,0	2,5
5/4/1995	0,0	0,0	3,0
6/4/1995	0,0	0,0	3,0
7/4/1995	0,0	0,0	2,8
8/4/1995	0,0	0,0	1,5
9/4/1995	0,0	0,0	0,8
10/4/1995	0,0	0,0	5,5
11/4/1995	0,0	0,0	1,5
12/4/1995	0,0	0,0	1,5
13/4/1995	0,0	0,0	1,8
14/4/1995	30,0	0,0	1,8
15/4/1995	20,0	27,8	0,3
16/4/1995	0,0	20,8	5,0
17/4/1995	0,0	0,6	9,0
18/4/1995	0,0	3,6	6,0
19/4/1995	0,0	0,0	3,8
20/4/1995	0,0	0,0	3,8
21/4/1995	0,0	0,0	2,5
22/4/1995	0,1	0,0	3,5
23/4/1995	7,0	0,0	4,3
24/4/1995	7,7	7,6	2,8
25/4/1995	13,1	11,4	4,0
26/4/1995	15,0	8,6	5,0
27/4/1995	0,0	26,2	6,8
28/4/1995	0,0	2,6	5,8
29/4/1995	0,0	0,0	9,0
30/4/1995	3,4	0,0	2,5
1/5/1995	0,0	0,4	2,8
2/5/1995	1,1	0,4	6,0

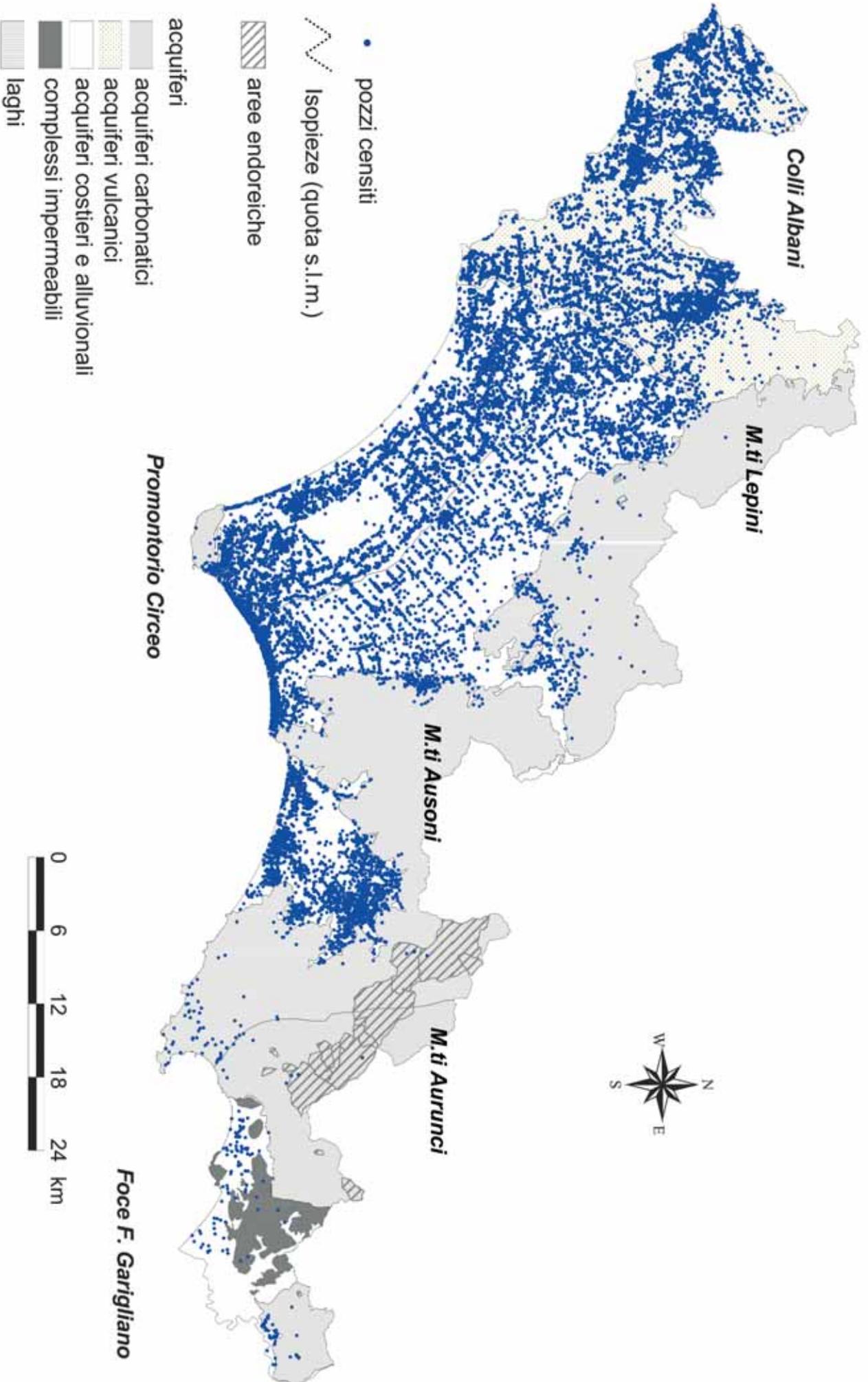
Data	Pioggie Terracina (mm)	Pioggie Latina (mm)	Portata media giornaliera sollevata (m <sup>3</sup> /s)
3/5/1995	0,0	0,0	2,5
4/5/1995	0,0	0,0	2,8
5/5/1995	0,0	0,0	1,8
6/5/1995	0,0	0,0	0,8
7/5/1995	0,0	0,0	4,3
8/5/1995	0,1	0,0	0,0
9/5/1995	0,0	0,0	4,3
10/5/1995	0,0	0,0	3,0
11/5/1995	0,0	0,0	3,3
12/5/1995	19,0	0,0	2,3
13/5/1995	0,1	13,6	9,5
14/5/1995	0,0	0,8	2,3
15/5/1995	0,0	0,0	6,0
16/5/1995	0,0	0,0	3,5
17/5/1995	0,0	0,0	5,0
18/5/1995	0,0	1,6	1,3
19/5/1995	0,0	0,0	3,8
20/5/1995	0,0	0,0	3,5
21/5/1995	0,0	0,0	2,5
22/5/1995	0,0	2,0	3,5
23/5/1995	0,0	0,0	3,5
24/5/1995	0,0	0,0	2,3
25/5/1995	0,0	0,0	2,8
26/5/1995	0,0	0,0	2,3
27/5/1995	0,0	0,0	2,5
28/5/1995	0,0	0,0	2,5
29/5/1995	0,0	0,0	3,0
30/5/1995	1,4	0,0	2,5
31/5/1995	11,6	3,2	2,5
1/6/1995	8,4	18,2	3,3
2/6/1995	0,0	5,0	4,5
3/6/1995	0,0	0,0	3,8
4/6/1995	0,0	0,0	3,0
5/6/1995	0,0	0,0	3,0
6/6/1995	0,0	0,0	2,8
7/6/1995	0,0	0,0	3,0
8/6/1995	0,0	0,0	3,0
9/6/1995	0,0	0,0	3,0
10/6/1995	0,0	0,0	2,0
11/6/1995	0,0	0,8	3,0
12/6/1995	0,0	0,2	3,8
13/6/1995	0,0	0,0	4,8
14/6/1995	0,0	0,0	1,8
15/6/1995	0,0	0,0	3,3
16/6/1995	0,0	0,0	3,8
17/6/1995	0,0	0,0	3,5
18/6/1995	0,0	0,0	1,8
19/6/1995	0,0	0,0	3,0
20/6/1995	0,0	0,0	2,0
21/6/1995	0,0	0,0	3,3
22/6/1995	0,0	0,0	1,3
23/6/1995	0,0	0,0	1,8
24/6/1995	0,0	0,0	2,8
25/6/1995	0,0	0,0	2,8
26/6/1995	0,0	0,0	3,0
27/6/1995	0,0	0,0	1,3
28/6/1995	0,0	0,0	2,5
29/6/1995	0,0	6,8	2,8
30/6/1995	0,0	3,6	2,8
1/7/1995	0,0	0,0	5,3
2/7/1995	0,0	0,0	7,0

## Captazioni e risorsa idrica nel bacino di Mazzocchio

Data	Pioggie Terracina (mm)	Pioggie Latina (mm)	Portata media giornaliera sollevata (m <sup>3</sup> /s)
3/7/1995	0,0	0,0	1,5
4/7/1995	0,5	1,2	3,0
5/7/1995	0,0	0,0	1,8
6/7/1995	0,0	0,0	2,5
7/7/1995	0,0	0,0	0,0
8/7/1995	0,0	0,0	0,3
9/7/1995	0,0	0,0	6,8
10/7/1995	0,0	0,0	1,8
11/7/1995	0,0	0,0	2,3
12/7/1995	0,0	0,0	3,3
13/7/1995	0,0	0,0	2,5
14/7/1995	0,0	0,0	1,0
15/7/1995	0,0	0,0	1,3
16/7/1995	0,0	0,0	2,3
17/7/1995	0,0	0,0	0,8
18/7/1995	0,0	0,0	8,8
19/7/1995	0,0	0,0	3,3
20/7/1995	0,0	0,0	1,3
21/7/1995	0,0	0,0	0,3
22/7/1995	0,0	0,0	0,3
23/7/1995	0,0	0,0	0,3
24/7/1995	0,0	0,0	0,3
25/7/1995	0,0	0,0	0,3
26/7/1995	0,0	0,0	0,3
27/7/1995	0,0	0,0	0,3
28/7/1995	0,0	0,0	0,3
29/7/1995	0,0	0,0	1,0
30/7/1995	0,0	0,0	0,5
31/7/1995	0,0	0,2	0,5
1/8/1995	0,0	0,0	4,3
2/8/1995	0,0	0,0	3,0
3/8/1995	0,0	0,0	2,8
4/8/1995	0,0	5,8	2,5
5/8/1995	0,0	0,0	4,5
6/8/1995	0,0	0,0	4,3
7/8/1995	0,0	0,0	1,8
8/8/1995	0,0	0,0	2,0
9/8/1995	0,0	0,0	1,5
10/8/1995	0,0	0,0	2,3
11/8/1995	0,0	0,0	3,3
12/8/1995	0,0	0,0	0,5
13/8/1995	1,8	2,0	1,8
14/8/1995	0,3	0,0	3,3
15/8/1995	0,2	0,0	3,5
16/8/1995	3,0	0,0	2,3
17/8/1995	0,0	15,0	4,0
18/8/1995	0,0	2,0	5,0
19/8/1995	0,0	0,0	1,8
20/8/1995	0,0	0,0	2,0
21/8/1995	2,4	0,0	4,0
22/8/1995	0,0	2,2	2,5
23/8/1995	5,0	0,0	2,5
24/8/1995	20,0	0,0	2,5
25/8/1995	0,0	7,2	2,5
26/8/1995	0,0	4,6	0,5
27/8/1995	0,0	0,0	3,0
28/8/1995	0,0	0,0	0,5
29/8/1995	0,0	0,0	3,8
30/8/1995	0,0	0,0	5,0
31/8/1995	0,0	0,6	2,3
1/9/1995	0,0	0,0	2,8

Data	Pioggie Terracina (mm)	Pioggie Latina (mm)	Portata media giornaliera sollevata (m <sup>3</sup> /s)
2/9/1995	0,0	0,0	1,8
3/9/1995	0,0	0,0	2,0
4/9/1995	0,0	0,0	2,3
5/9/1995	4,0	0,0	2,0
6/9/1995	0,0	0,4	1,0
7/9/1995	0,0	0,0	3,0
8/9/1995	2,1	0,8	1,0
9/9/1995	0,0	0,6	1,3
10/9/1995	0,0	0,0	1,8
11/9/1995	1,0	0,0	2,8
12/9/1995	12,4	0,0	2,5
13/9/1995	5,2	4,8	5,3
14/9/1995	0,0	0,6	1,5
15/9/1995	15,0	7,6	2,8
16/9/1995	0,0	0,0	8,5
17/9/1995	20,0	167,0	10,3
18/9/1995	5,2	0,0	10,3
19/9/1995	0,0	3,6	12,8
20/9/1995	0,0	0,2	7,3
21/9/1995	0,0	0,0	7,0
22/9/1995	0,0	2,2	6,8
23/9/1995	0,0	0,0	6,3
24/9/1995	1,0	0,0	6,3
25/9/1995	0,0	0,0	4,0
26/9/1995	0,0	0,0	3,0
27/9/1995	0,0	0,0	3,0
28/9/1995	0,0	0,0	2,3
29/9/1995	0,0	0,0	3,3
30/9/1995	0,0	0,0	1,5
1/10/1995	0,0	0,0	3,3
2/10/1995	0,0	0,0	2,3
3/10/1995	0,0	0,0	1,5
4/10/1995	0,0	0,0	2,5
5/10/1995	0,0	0,0	1,3
6/10/1995	0,0	0,0	3,0
7/10/1995	0,0	0,0	2,3
8/10/1995	0,0	0,0	3,5
9/10/1995	0,0	0,0	2,5
10/10/1995	0,0	0,0	2,0
11/10/1995	0,0	0,0	2,5
12/10/1995	0,0	0,0	1,8
13/10/1995	0,0	0,4	1,8
14/10/1995	0,0	0,0	2,3
15/10/1995	0,0	0,0	1,8
16/10/1995	0,0	0,0	2,3
17/10/1995	0,0	0,0	2,5
18/10/1995	0,0	0,0	1,8
19/10/1995	0,0	0,0	1,5
20/10/1995	0,0	0,0	3,8
21/10/1995	0,0	0,0	0,0
22/10/1995	0,0	0,0	2,0
23/10/1995	0,0	0,0	3,5
24/10/1995	0,0	0,0	2,8
25/10/1995	0,0	0,0	2,5
26/10/1995	0,0	0,0	1,0
27/10/1995	0,0	0,0	1,3
28/10/1995	0,0	0,0	1,3
29/10/1995	0,0	0,0	2,0
30/10/1995	0,0	0,0	2,5
31/10/1995	0,2	6,6	2,3
1/11/1995	1,6	0,0	2,0

Data	Pioggie Terracina (mm)	Pioggie Latina (mm)	Portata media giornaliera sollevata (m <sup>3</sup> /s)
2/11/1995	50,0	30,2	5,0
3/11/1995	0,0	20,4	28,0
4/11/1995	0,0	0,0	4,0
5/11/1995	0,0	0,0	2,8
6/11/1995	0,0	0,0	1,5
7/11/1995	0,0	0,0	1,8
8/11/1995	0,0	0,0	1,3
9/11/1995	0,0	0,0	1,5
10/11/1995	0,0	0,0	1,5
11/11/1995	0,0	0,0	1,5
12/11/1995	0,0	0,0	0,0
13/11/1995	53,3	0,0	0,0
14/11/1995	3,1	19,0	3,8
15/11/1995	0,0	0,0	4,5
16/11/1995	0,2	0,0	2,0
17/11/1995	14,5	0,8	2,0
18/11/1995	0,0	6,0	2,0
19/11/1995	0,4	0,0	2,0
20/11/1995	0,0	0,8	2,0
21/11/1995	0,0	0,0	2,3
22/11/1995	0,0	0,0	2,3
23/11/1995	0,0	0,0	0,8
24/11/1995	0,0	0,0	1,0
25/11/1995	1,0	0,0	1,8
26/11/1995	43,6	0,2	3,0
27/11/1995	0,0	27,8	3,0
28/11/1995	1,0	0,2	5,3
29/11/1995	0,2	3,0	5,0
30/11/1995	0,0	0,2	3,5
1/12/1995	0,0	0,0	3,3
2/12/1995	0,0	0,0	4,5
3/12/1995	0,0	0,0	1,0
4/12/1995	0,0	0,2	1,3
5/12/1995	12,1	0,0	3,5
6/12/1995	11,4	36,2	3,5
7/12/1995	0,0	49,6	4,5
8/12/1995	0,0	0,0	3,5
9/12/1995	0,0	0,0	3,5
10/12/1995	0,0	0,0	3,8
11/12/1995	9,3	0,0	3,8
12/12/1995	37,6	7,2	3,5
13/12/1995	7,9	9,0	7,8
14/12/1995	0,5	8,2	8,0
15/12/1995	0,2	1,2	5,3
16/12/1995	14,1	0,6	6,0
17/12/1995	22,2	5,2	5,5
18/12/1995	1,5	31,4	30,5
19/12/1995	0,0	1,0	26,5
20/12/1995	0,0	0,0	8,3
21/12/1995	0,0	0,0	2,0
22/12/1995	0,0	0,0	2,3
23/12/1995	1,1	0,0	4,8
24/12/1995	1,3	3,0	3,8
25/12/1995	13,6	4,4	4,3
26/12/1995	0,5	4,0	5,5
27/12/1995	0,0	0,8	3,5
28/12/1995	0,0	1,4	4,5
29/12/1995	0,0	1,6	4,5
30/12/1995	40,0	0,0	2,5
31/12/1995	17,1	35,6	9,8



# Attività della Provincia di Latina per la tutela e la gestione delle risorse idriche

(a cura di C. Perotto, A. Vagnozzi & N. Valle)

## Introduzione

(C. Perotto, A. Vagnozzi & N. Valle)

Un importante compito delle Province è quello della programmazione e del governo del territorio come previsto dall'art 20 del testo Unico degli Enti Locali. La Provincia di Latina, in questi ultimi anni, sta delineando gli indirizzi generali di assetto del proprio territorio a forte valenza ambientale, attraverso il redigendo Piano Territoriale Provinciale Generale, sulla base di una approfondita conoscenza degli aspetti ambientali, urbanistici-territoriali, socio-economici, ecc.

I Settori Ecologia e Ambiente e Pianificazione Urbanistica e Territoriale hanno voluto cogliere tale opportunità per attivare sinergie finalizzate alla creazione di metodologie condivise di studio ed analisi di tipo multifattoriale che cerca di superare la così detta pianificazione "per compartimenti stagni" che più volte ha portato alla coesistenza, in uno stesso territorio, di attività contrastanti e talvolta incompatibili, sia tra di loro che con l'ambiente circostante.

Il fatto risulta quanto mai vero nel caso delle risorse idriche superficiali e sotterranee la cui caratterizzazione qualitativa e quantitativa non può ormai prescindere da approfondite valutazioni sugli usi antropici del territorio che necessariamente si traducono in prelievi, fabbisogni e scarichi. Del resto la disponibilità di risorse idriche di qualità concorre in maniera determinate a definire il tipo e la quantità di attività presenti in un dato territorio.

Un esempio della stretta interrelazione esistente tra ri-

sorse idriche, equilibri ambientali e attività antropica si ritrova proprio nel bacino idrico di Mazzocchio, analizzato nella presente pubblicazione, dove il bilancio idrico, gli usi del territorio e le esigenze di tutela ambientale non possono essere valutati separatamente in quanto strettamente interdipendenti.

Volendo fare un esempio, se consideriamo la possibilità di usare le acque di un dato canale e/o fiume per l'irrigazione di una determinata area dobbiamo valutare:

- il quantitativo di acqua necessario,
- la disponibilità idrica in quel dato periodo, funzione, in genere, del deflusso di base, sostenuto dai corpi idrici sotterranei, e della presenza di altri usi,
- l'adeguatezza delle caratteristiche qualitative delle acque, dipendente dal tipo e dalla quantità degli scarichi immessi e della portata del corso d'acqua in cui essi si diluiscono;
- le esigenze ambientali, igienico-sanitarie e gli usi del tratto a valle ecc..

Considerazioni analoghe possono essere svolte nel caso di insediamenti residenziali e/o industriali.

Per rispondere a questo tipo di problematiche le attività del Settore Ambiente nel campo dello studio, del monitoraggio e della tutela quali-quantitativa delle acque concorrono ad aumentare la conoscenza e diventano strumenti di ausilio per la programmazione e pianificazione di una trasformazione sostenibile del territorio provinciale; così come le Banche Dati e le cartografie tematiche più proprie della pianificazione urbanistica costituiscono documenti indispensabili per lo studio dei corpi idrici.

In questa appendice vengono sinteticamente descritti alcuni dei tematismi di base di largo interesse nell'ambito degli studi volti alla tutela e gestione delle risorse idriche sviluppati dalla Provincia di Latina.

Dopo alcuni cenni metodologici verranno trattati i seguenti argomenti:

- disponibilità e analisi spazializzata dei dati meteo-climatici nel territorio provinciale
- la carta dell'uso del suolo e la sua correlazione con i censimenti ISTAT e le idroesigenze colturali nell'ambito dell'analisi idrologica
- il ruolo idrologico del suolo (Carta dei suoli della Provincia di Latina)
- alcune applicazioni pratiche dell'analisi idrologica distribuita

### Approccio Metodologico (P. Sarandrea)

Ai fini della pianificazione territoriale e della tutela delle risorse idriche l'analisi idrologica deve consentire di confrontare in maniera oggettiva e per ogni porzione del territorio le risorse idriche disponibili con i prelievi e i fabbisogni antropici ed ambientali secondo la nota relazione:

$IE + \text{Afflussi sotterranei} - \text{Prelievi} - \text{Deflussi naturali} = \Delta S$   
dove:

- $IE = P - Evr - R = \text{Infiltrazione efficace}$
- $P = \text{precipitazione}$ ;  $Evr = \text{evapotraspirazione reale}$ ;  
 $R = \text{Ruscellamento}$
- $\Delta S = \text{variazione di volume sotterraneo immagazzinato}$ .

Riflettendo sul significato dei diversi termini dell'equazione del bilancio idrico si può agevolmente dedurre che la disponibilità delle risorse idriche può variare in funzione:

- 1 delle variazioni dell'infiltrazione efficace conseguenti a:  
variazioni climatiche  
eventuali modificazioni del territorio
- 2 del regime e della distribuzione dei prelievi di acque sotterranee per:  
usi agricoli  
usi civili idropotabili (acquedotti)  
usi industriali
- 3 di eventuali grandi opere, gallerie, dighe, deviazione di corsi d'acqua ecc. che possono modificare il regime dei travasi sotterranei e dei deflussi naturali.

Escludendo le grandi opere per cui sono sempre richieste valutazioni specifiche, per l'analisi nel bilancio idrico del peso dei fattori antropici e territoriali si fa ri-

ferimento alla procedura sviluppata in occasione degli studi per il Piano dell'Uso Compatibile della risorsa idrica (PUC) delle Autorità dei Bacini Regionali del Lazio e del Fiume Tevere (Merloni G., 2004; Capelli et. al., 2005).

In termini operativi, per poter rispondere alle esigenze di gestione delle risorse idriche, il calcolo del bilancio idrico deve essere effettuato:

- con un dettaglio temporale giornaliero o perlomeno stagionale, capace di cogliere la variabilità dei fattori meteo-climatici e di domanda idrica;
- con un dettaglio spaziale paragonabile a quello della variabilità dei fattori morfologici, litologici, pedologici e di uso del suolo caratteristici dell'area, nel nostro caso si è utilizzata una griglia regolare con celle di 250 m di lato.

Il modello proposto analizza la ripartizione degli afflussi meteorici in evapotraspirazione, ruscellamento ed infiltrazione efficace a scala mensile schematizzando il sistema suolo/vegetazione come un singolo strato con spessore coincidente con l'altezza di radicazione delle piante. Non si prende in considerazione il deflusso dal suolo verso l'insaturo e quindi la percolazione sino al saturo e vengono operate le seguenti semplificazioni:

- viene ritenuta trascurabile l'evaporazione della porzione di precipitazioni intercettate dalle foglie, valutabile nell'ordine di alcuni mm/anno;
- non si considera il processo di evaporazione dal suolo e il richiamo di acque capillari in quanto, tali fenomeni comportano perdite di entità significativamente inferiore all'ordine di grandezza dell'errore insito nella misura degli afflussi e nel calcolo del ruscellamento;
- non si tiene conto degli afflussi nevosi (eventuale modello di accumulo-fusione) in quanto le nevicate interessano solo limitate porzioni dell'area di studio e per periodi di durata paragonabili alla scala temporale utilizzata nel lavoro.

Il bilancio d'acqua simulato nel sistema suolo/vegetazione per ogni singola porzione di territorio si basa sulla seguente equazione:

$$Ie_{\text{anno}} = \sum (P_{\text{mese}} - EVR_{\text{mese}} - R_{\text{mese}} + Endo_{\text{mese}})$$

dove

$Ie$  = infiltrazione efficace

$P_{\text{mese}}$ ;  $EVR_{\text{mese}}$  e  $R_{\text{mese}}$  = Precipitazioni, Evapotraspirazione e Ruscellamento mensili

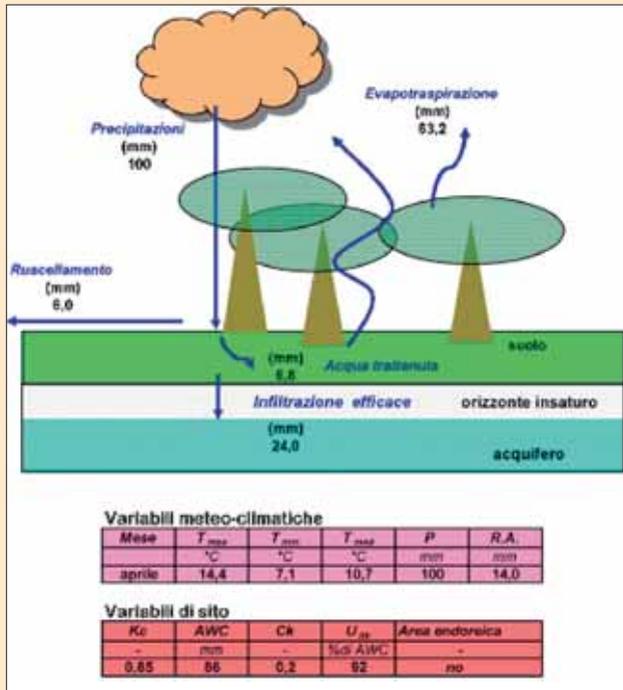


Fig.1 – Schema di calcolo dell'infiltrazione efficace a scala annua, a partire da dati a scala mensile – T = temperature massime, minime e medie; P = precipitazione; R.A. = radiazione solare netta extra atmosferica; Kc = coefficiente di ruscellamento di Kennessey; CK = coefficiente culturale; U<sub>ini</sub> = acqua contenuta nel terreno, espressa come frazione di AWC, all'inizio del periodo (Fonte: Gazzetti et. al., 2005)

$Endo_{mese}$  = contributo del ruscellamento nelle aree endoreiche o pseudo-endoreiche.

L'evapotraspirazione viene calcolata come il risultato del bilancio tra afflusso meteorico, acqua potenzialmente evapotraspirata dalle piante (evapotraspirazione colturale) e disponibilità reale di acqua nel suolo secondo il seguente schema concettuale:

$$E_{vr} = E_{Tr} \quad \text{se } P + U_i \geq E_{Tr}$$

$$E_{vr} = P + U_i \quad \text{se } P + U_i \leq E_{Tr}$$

Dove:

$E_{vr}$  = Evapotraspirazione reale del periodo

$E_{Tr}$  = Evapotraspirazione colturale, equivalente al fabbisogno idrico della coltura nel periodo

$U_i$  = Volume di acqua utilizzabile dalle piante (frazione di AWC) contenuto nel suolo all'inizio del periodo

L'Evapotraspirazione colturale o fabbisogno idrico della coltura, viene determinata moltiplicando l'evapotraspirazione potenziale (ETP) per i coefficienti culturali ( $K_C$ ):

$$E_{Tr} \text{ (Evapotraspirazione colturale)} = ETP * K_C$$

dove:

$E_{Tr}$  = Evapotraspirazione Colturale che è assimilabile all'Evapotraspirazione reale di una data area se non superiore all'acqua disponibile data dalle precipitazioni e dal quantitativo ricavabile dal suolo (frazione di AWC)

ETP = Evapotraspirazione potenziale che rappresenta l'acqua evaporata in un certo periodo di tempo da un terreno vasto, coperto da una vegetazione fitta, bassa, omogenea, in piena attività di sviluppo, ottimamente rifornita di acqua e che ombreggi completamente il terreno (esempio: Festuca Arundinacea);

$K_c$  = Coefficiente culturale che esprime la proporzionalità tra l'evapotraspirazione della coltura di riferimento (Festuca Arundinacea) rispetto a quella della coltura presente.

LAWC (Available Water Capacity) esprime il volume di acqua che può essere trattenuto nel suolo tra -30 e -1500 kPa e corrispondente al volume d'acqua potenzialmente utilizzabile dalle piante. Tale parametro è stato ricavato direttamente dalle indicazioni associate alla "Carta Pedologica della Provincia di Latina" [Provincia di Latina, 2004].

Il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale è stato effettuato disponendo di serie di misure meteo-climatiche che possono essere ritenute adeguate solamente per le temperature massime e minime e per le precipitazioni. Per tale motivo, è stato applicato il modello di Hargreaves - Samani (Hargreaves G.H. & - Samani Z.A., 1985):

$$ETP = 0.0023 (T_{media} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5} RA$$

Per la stima del ruscellamento è stato utilizzato il noto metodo sviluppato da Kennessey (1930) che, data la relativa semplicità di implementazione e il diffuso utilizzo, può essere applicato con una certa attendibilità e confidenza con il valore dei risultati.

Il metodo calcola, per una definita porzione di territorio, il coefficiente di deflusso.

Tale coefficiente deriva dalla somma di tre componenti dovute: all'acclività dei versanti, alla permeabilità dei terreni affioranti, alla copertura vegetale.

Il ruscellamento (R) è calcolato a scala annuale come sommatoria dei contributi mensili, mediante la seguente relazione:

$$R_{\text{anno}} = \sum (P_{\text{mese}} - \text{EVR}_{\text{mese}}) * \text{CK}$$

Dove:

R = ruscellamento;

$P_{\text{mese}}$  = precipitazioni mensili;

$\text{EVR}_{\text{mese}}$  = evapotraspirazione mensile;

CK = coefficiente di Kennessey.

Per la determinazione del contributo all'infiltrazione efficace dovuto alla presenza di aree endoreiche ("ENDO"), il ruscellamento calcolato sulle celle dei versanti interni delle aree endoreiche viene cumulato e computato come afflusso distribuito sulle celle delle aree depresse che, in condizioni di permeabilità favorevoli, divengono aree di infiltrazione concentrata.

Per lo studio dei fabbisogni idrici e dei prelievi, l'approccio proposto (Ventura et al., 2000; Gazzetti et al., 2005) consente di ottenere valutazioni significative integrando le informazioni di uso del territorio (carta dell'uso del suolo) con le tecniche di bilancio distribuito, i dati dei censimenti ISTAT e le banche dati provinciali delle concessioni idriche.

Il fabbisogno irriguo delle diverse colture individuate viene ricavato dal valore del deficit idrico del suolo coltivato, tenendo conto:

- delle caratteristiche climatiche (pioggia e temperatura);
- del fabbisogno culturale ricavato come prodotto dell'evapotraspirazione potenziale per il coefficiente culturale specifico ( $K_c$ );
- del volume di acqua utile per le piante disponibile nel suolo, funzione dell'AWC e del bilancio tra afflussi meteorici ed evapotraspirazione reale, calcolato a scala mensile.

L'esigenza idrica dell'industria può essere valutata in funzione del tipo di attività produttiva svolta e del numero di addetti presenti nell'industria.

L'idroesigenza per gli usi residenziali si ricava agevolmente a partire dalle dotazioni medie per abitante.

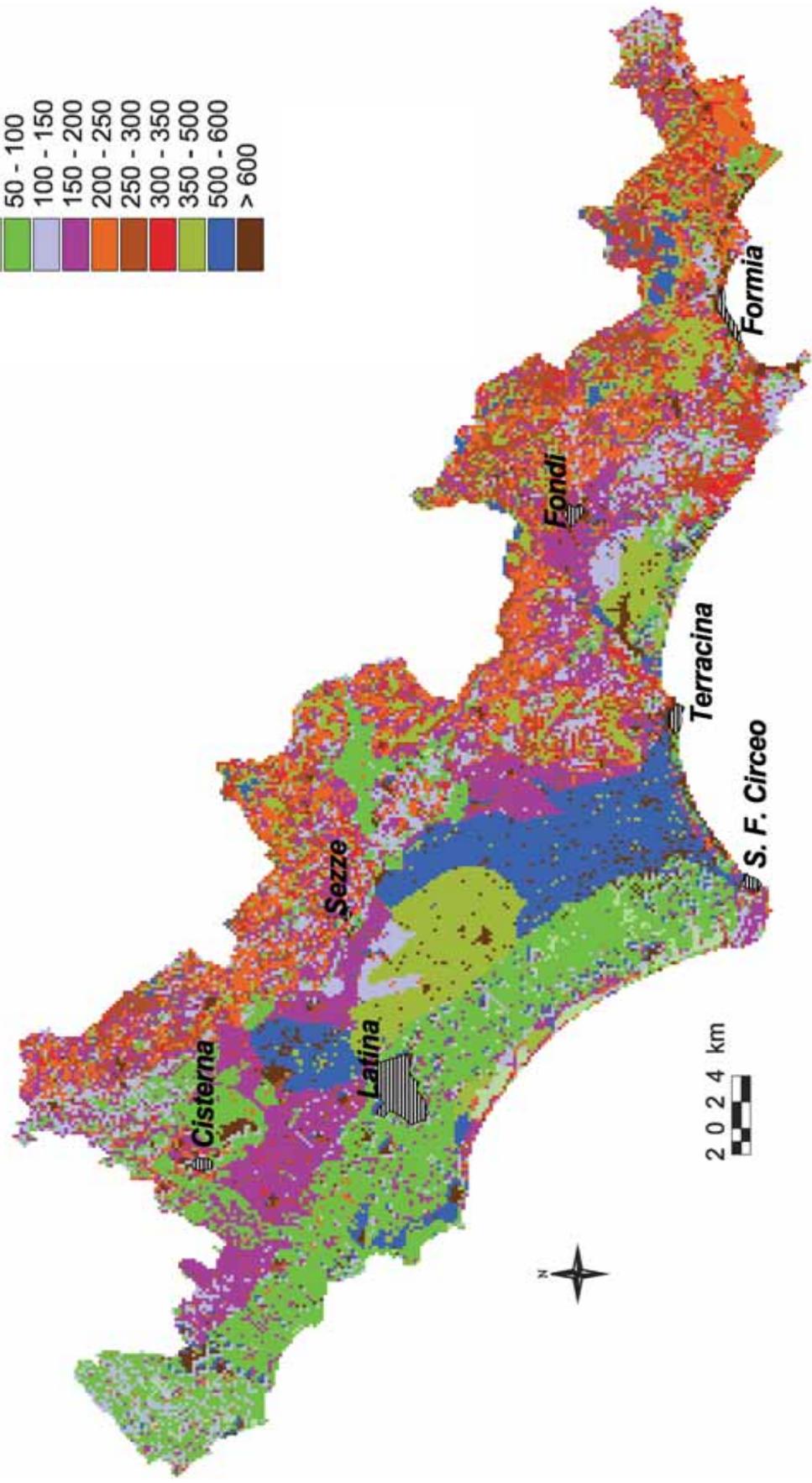
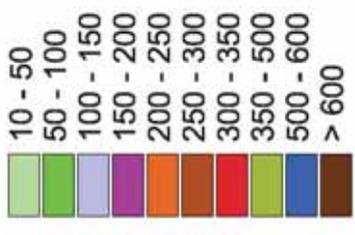
Mediante comuni operazioni in ambiente GIS è possibile quindi associare ad ogni elemento individuato sul territorio (carta dell'uso del suolo di dettaglio) i valori di fabbisogno idrico ricavati, ottenendo una rappresentazione significativa della distribuzione dell'idroesigenza. Il prelievo operato sui diversi corpi idrici può essere quindi ottenuto dal confronto tra le dotazioni idriche note con il fabbisogno.

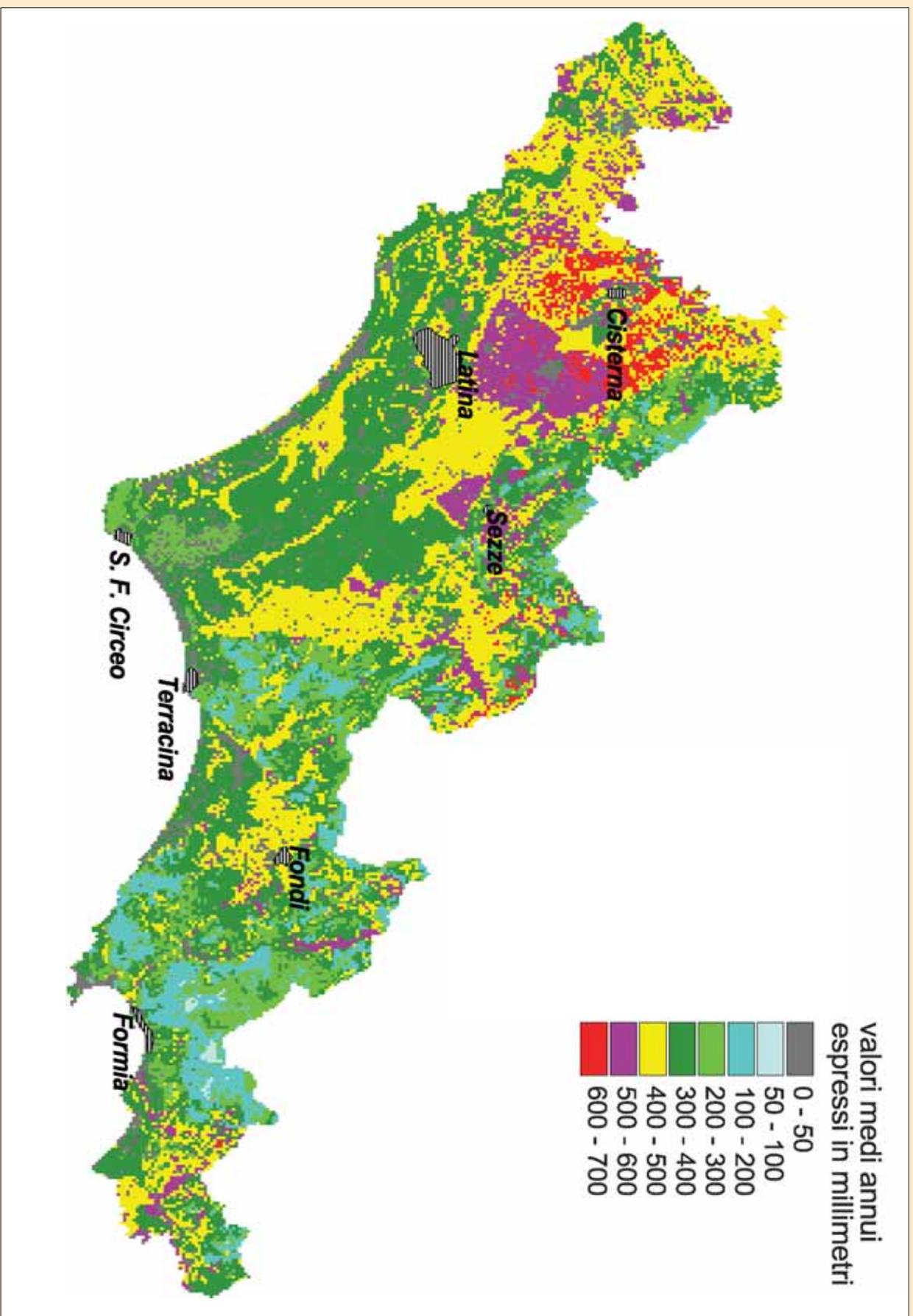
La chiusura del bilancio idrico richiede a questo punto l'integrazione delle conoscenze stratigrafiche, geostutturali e idrodinamiche dell'ambito geologico considerato, valutate in rapporto ai livelli piezometrici, alle caratteristiche fisico-chimiche delle acque e al regime delle portate delle sorgenti, così come in parte mostrato nella presente pubblicazione.

La valutazione del bilancio idrico di dettaglio di tutti i corpi idrici di interesse per la provincia di Latina potrà essere progressivamente sviluppata nei prossimi anni anche grazie alla graduale acquisizione e predisposizione da parte degli uffici provinciali delle conoscenze di base necessarie riguardanti (Gazzetti & Ventura, 2005):

- **i fattori meteo-climatici** – è necessaria la disponibilità di serie di misure sperimentali delle precipitazioni (pioggia e neve), delle temperature e di altri parametri climatici quali l'umidità relativa, la radiazione solare e la velocità del vento;
- **i fattori morfologici, lito-pedologici e territoriali** – i processi idrologici naturali sono fortemente condizionati da alcune caratteristiche del territorio quali: la morfologia, la natura e lo spessore dei suoli, la litologia del substrato, la tipologia, densità e distribuzione della vegetazione (naturale e/o coltivata), la distribuzione e la tipologia delle opere umane nonché dagli interventi antropici sul deflusso delle acque;
- **i fattori idrogeologici** – il bilancio deve poter essere riferito ad un acquifero o ad un sistema di acquiferi con limiti definiti da un modello concettuale supportato da adeguate serie di misure dei regimi di deflusso delle aste fluviali, delle sorgenti puntuali e lineari e dei livelli piezometrici.

valori medi annui  
espressi in millimetri





Evapotraspirazione media annua (periodo 1983-1995).

## Spazializzazione dei dati meteo-climatici (G. Raspa)

### Metodologia

Come illustrato nel precedente paragrafo, ai fini del calcolo della ripartizione degli afflussi meteorici e quindi dell'infiltrazione efficace (IE), il territorio della provincia di Latina più una fascia esterna larga una quindicina di chilometri è stato suddiviso in celle di 250 x 250 m di lato per un totale di oltre 90 mila celle. Il calcolo distribuito dell'infiltrazione, del ruscellamento e dell'evaporazione impone, per ogni cella, la stima delle grandezze a struttura spaziale, quali le precipitazioni e le temperature (massime, medie e minime) misurate nelle stazioni meteo disponibili sul territorio. La scala temporale alla quale i fenomeni sono stati ricostruiti è quella mensile su un periodo di tredici anni: dal 1983 al 1995 per un totale di 156 mesi.

Le informazioni meteo utilizzate provengono dalle stazioni del Servizio Idrografico regionale (ex Compartimenti di Roma e Napoli). Si tratta di 60 stazioni su cui sono disponibili, con un 25% di lacune, i dati delle precipitazioni; di esse solo 24 contengono anche i dati di temperatura, con una più elevata percentuale di lacune (quasi il 50%). A queste 24 stazioni se ne aggiungono altre due contenenti dati di sole temperature.

Nel complesso la rete di misure meteo-climatiche del territorio provinciale e delle aree adiacenti di interesse, risulta relativamente omogenea con alcune significative lacune:

- 1 Nel territorio provinciale, caratterizzato per circa il 20% da quote superiori a 500 m, solo due stazioni sono poste ad una quota superiore ai 450 m s.l.m.: Norma (472 m s.l.m) e Lenola (470 m s.l.m.).
- 2 Manca una rete di sensori per la misura della radiazione solare, della velocità del vento e dell'umidità relativa.
- 3 I dati rilevati non sono quasi mai disponibili in tempo reale. Pertanto, allo stato attuale, non è possibile effettuare in tempi utili la necessaria correlazione tra misure quali-quantitative effettuate sui corsi d'acqua e regime degli afflussi. Il problema può essere superato mediante:
  - un opportuno accordo tra l'amministrazione provinciale e gli uffici idrografici competenti;
  - l'integrazione della rete di stazioni meteo-climatiche.

L'aspetto fondamentale di un'operazione di ricostruzione è la sua accuratezza, in quanto da questa dipende la qualità dei risultati discendenti dalla ricostruzione. Normalmente la ricostruzione spaziale di un parametro ambientale è tanto più accurata quanto più numerose sono le misure di cui si dispone e tanto minore è la sua variabilità all'interno dell'area di lavoro.

Nel nostro caso, poiché si è dovuto fare uso dell'informazione disponibile, non è stato possibile controllare la qualità delle ricostruzioni, nel senso di fare assumere ad esse l'accuratezza voluta, ma si è cercato invece di effettuare le stime con il massimo dell'accuratezza. Il problema è stato quindi affrontato impiegando metodologie di stima che sappiano tenere conto della variabilità spaziale del parametro da ricostruire, sfruttandone le correlazioni.

Questo tipo di metodologie, come è noto, sono quelle geostatistiche, ormai di corrente uso nella ricostruzione e nella modellizzazione dei fenomeni ambientali (Raspa G., 2005). L'individuazione della specifica metodologia e delle modalità della sua messa a punto hanno tenuto conto della necessità di integrare la metodologia di stima con quella del calcolo, cella per cella, del bilancio idrico.

In base a quanto detto sopra, è stato necessario produrre  $156 \times 4 = 624$  mappe stimate (piogge e temperature massime, minime medie mensili di 13 anni). Quest'ultime, in quanto input della procedura di calcolo del bilancio, dovevano essere disponibili sequenzialmente, man mano che procedeva il calcolo. Per non rendere oltremodo pesante la procedura, è stato ritenuto conveniente generare *off line* tutte le stime per renderle fruibili all'occorrenza, ognuna, su un file separato.

Poiché non è possibile pensare di generare interattivamente un così elevato numero di mappe, la metodologia geostatistica di ricostruzione è stata resa automatica. Inoltre, poiché le variabili di studio (temperatura e precipitazioni) sono tra di loro di natura diversa e presentano, ognuna, andamenti diversi nei diversi mesi dell'anno, è necessario che la metodologia di stima abbia il più possibile carattere generale, in maniera da interpretare e modellizzare ogni tipologia di variabilità spaziale. La metodologia geostatistica più adatta è risultata il *kriging in FAI-k* (Matheron e Delfiner 1977, Waker-nagel 1995, Chilès e Delfiner 2000), che ha validità in condizioni non stazionarie (che sono quelle più generali) e si presta bene ad essere resa automatica. Inoltre, poiché la temperatura a terra è generalmente correla-

ta in maniera inversa alla quota del terreno, il coinvolgimento del DEM (che diventa così una variabile ausiliaria) nella operazione di stima, nella misura in cui tale correlazione si esplica, apporta un miglioramento alla accuratezza della stima.

Il *kriging in FAI-k* è in grado di integrare nell'algoritmo di stima, senza comprometterne l'automatismo, una o più variabili ausiliarie di questo tipo. La corrispondente versione del metodo è nota in letteratura come *kriging in FAI-k con deriva esterna*. La deriva esterna è, in questo caso, rappresentata dal DEM. Il lettore interessato troverà nella bibliografia citata ampie descrizioni della metodologia. La stima è stata effettuata con l'ausilio di un codice di calcolo non commerciale.

### Risultati

Più che alla illustrazione delle mappe ottenute, che offrirebbe scarsi spunti di discussione, questo punto è dedicato all'esame dell'accuratezza delle ricostruzioni. Questa è valutata mediante la cross-validazione (CV) che, come è noto, è un'operazione che consiste nella stima del parametro oggetto della ricostruzione nei punti in cui esso è noto e nel confronto del valore ottenuto con quello misurato.

In realtà la CV è una operazione non direttamente legata alla stima effettuata per la ricostruzione delle mappe, come lo è invece la *varianza di stima*, ma ne costituisce un buon riferimento in quanto consente di evidenziare, mediante il confronto diretto stime-misure, le prestazioni del modello selezionato per la stima. Per ogni punto di misura (stazione), per ognuno dei 156 mesi e per ognuno dei quattro parametri oggetto della ricostruzione, è stata effettuata la CV nelle stesse condizioni operative in cui sarà poi effettuata la stima sulle celle.

Le condizioni consistono nel modello di *FAI-k*, nel modello di covarianza generalizzata e il vicinaggio (o *neighbourhood*) di stima. I risultati sono di seguito illustrati. I dati di precipitazione presentano, come è stato detto, circa il 25% di lacune, le quali sono distribuite nel tempo e nello spazio in maniera da rendere disponibili per la stima, mese per mese, un numero di misure variabile da 40 a 50.

Una volta effettuate le stime di CV, per ciascuna stazione è stata calcolata, su tutti i mesi informati, la deviazione standard degli errori rapportata al livello delle precipitazioni (DSR). Essa presenta un range di variazione da 0.19 a 0.58 con il 30% dei valori inferiore

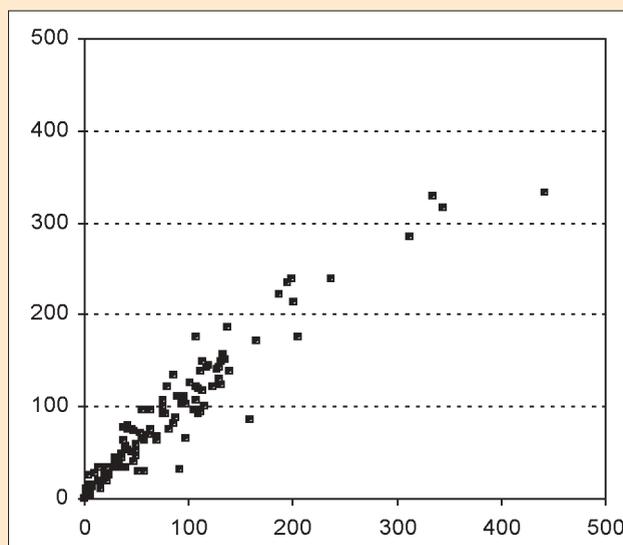


Fig.1 – Scatterplot di cross-validazione delle precipitazioni mensili relative alla stazione di Fondi. Metodo di stima: kriging in FAI-k.

a 0.25, il 50% inferiore a 0.30 e l'80% inferiore a 0.35. A titolo d'esempio si riporta nella fig.1 lo scatterplot stime/misure relative ad una stazione a cui corrisponde un'accuratezza media. Si tratta della stazione di Fondi (5m slm) a cui corrisponde un valore della DSR di 0.25.

Il confronto stime misure riguarda le precipitazioni di 11 anni (mancano gli anni 1986 e 1995).

Quanto alle temperature, come era normale aspettarsi, i risultati delle cross-validazioni sono stati, per i tre parametri oggetto della ricostruzione, qualitativamente molto simili e per questo i risultati verranno mostrati solo per uno di essi: la temperatura massima. A causa delle molte lacune si rendono disponibili per la stima, mese per mese, da un minimo di 9 ad un massimo di 18 dati, mediamente meno di un terzo di quelli disponibili per la ricostruzione delle precipitazioni. Ma siccome le temperature presentano una maggiore regolarità spaziale, la cross-validazione esibisce DSR più piccole: il range varia da 0.02 a 0.19 con il 30% dei valori inferiore a 0.06 e il 70% inferiore a 0.10. Per la stazione di Fondi, che dispone dei dati di nove anni (mancano gli anni 1984-86 e 1995), la DSR è di 0.04. Lo scatterplot corrispondente è riportato nella fig. 2A. Come è stato detto sopra, la ricostruzione delle temperature è stata effettuata coinvolgendo nella stima il DEM e ciò ha portato ad un miglioramento della stima.

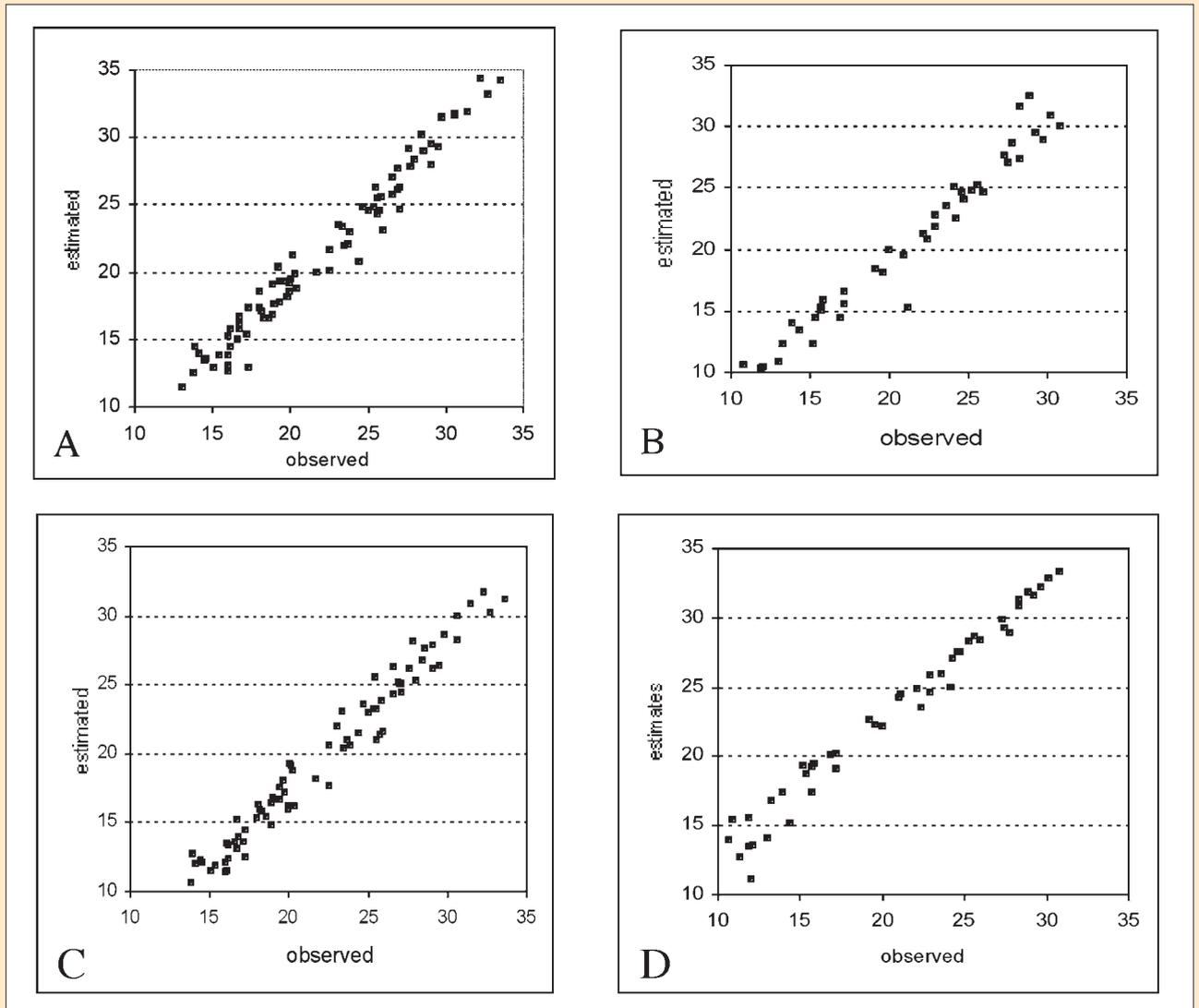
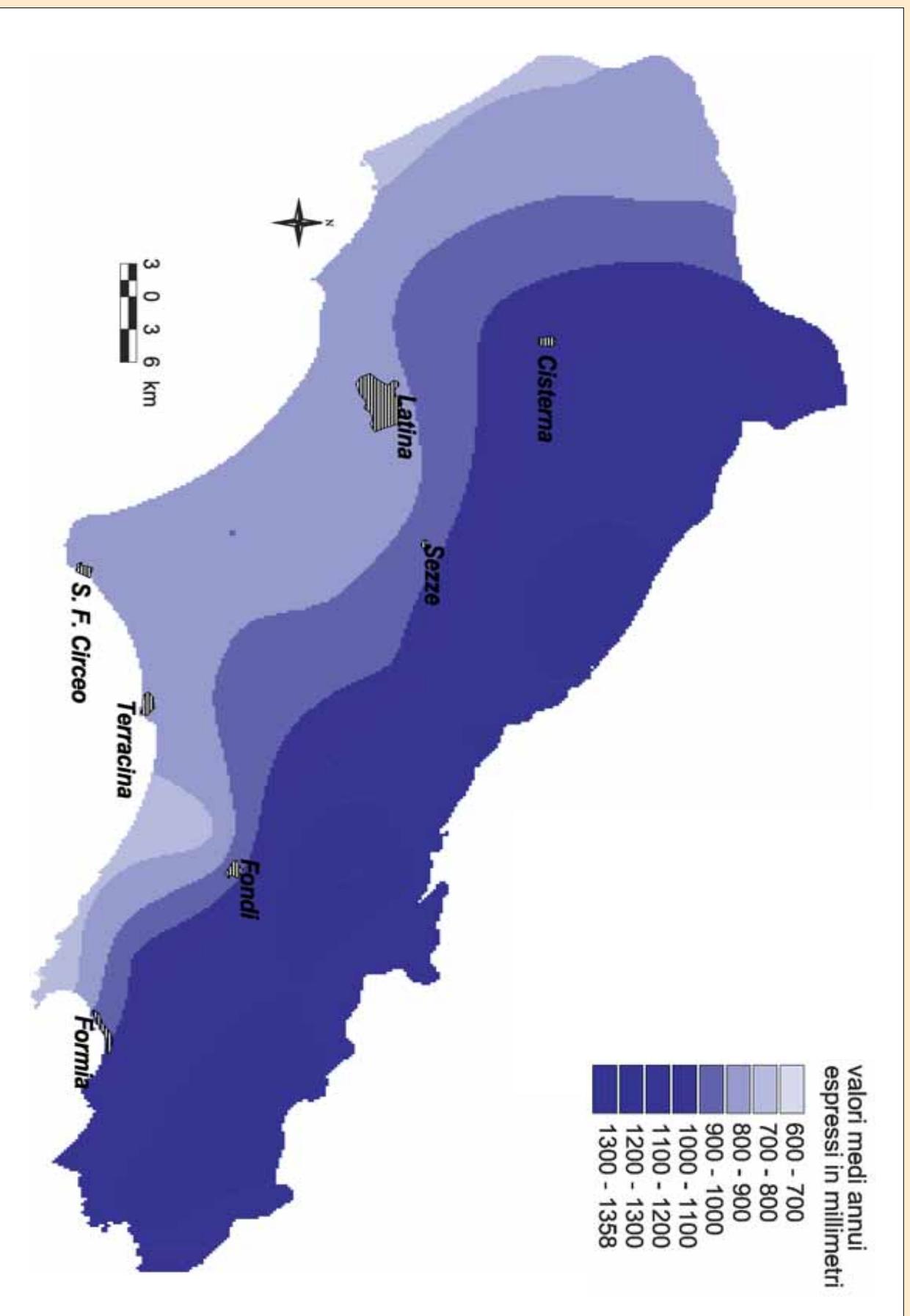


Fig.2 – Scatterplot di cross-validazione delle temperature massime mensili. Metodo di stima: kriging in FAI-k con deriva esterna - A) stazione di Fondi; B) stazione di Lenola - e kriging in FAI-k senza deriva esterna - C) stazione di Fondi; D) stazione di Lenola.

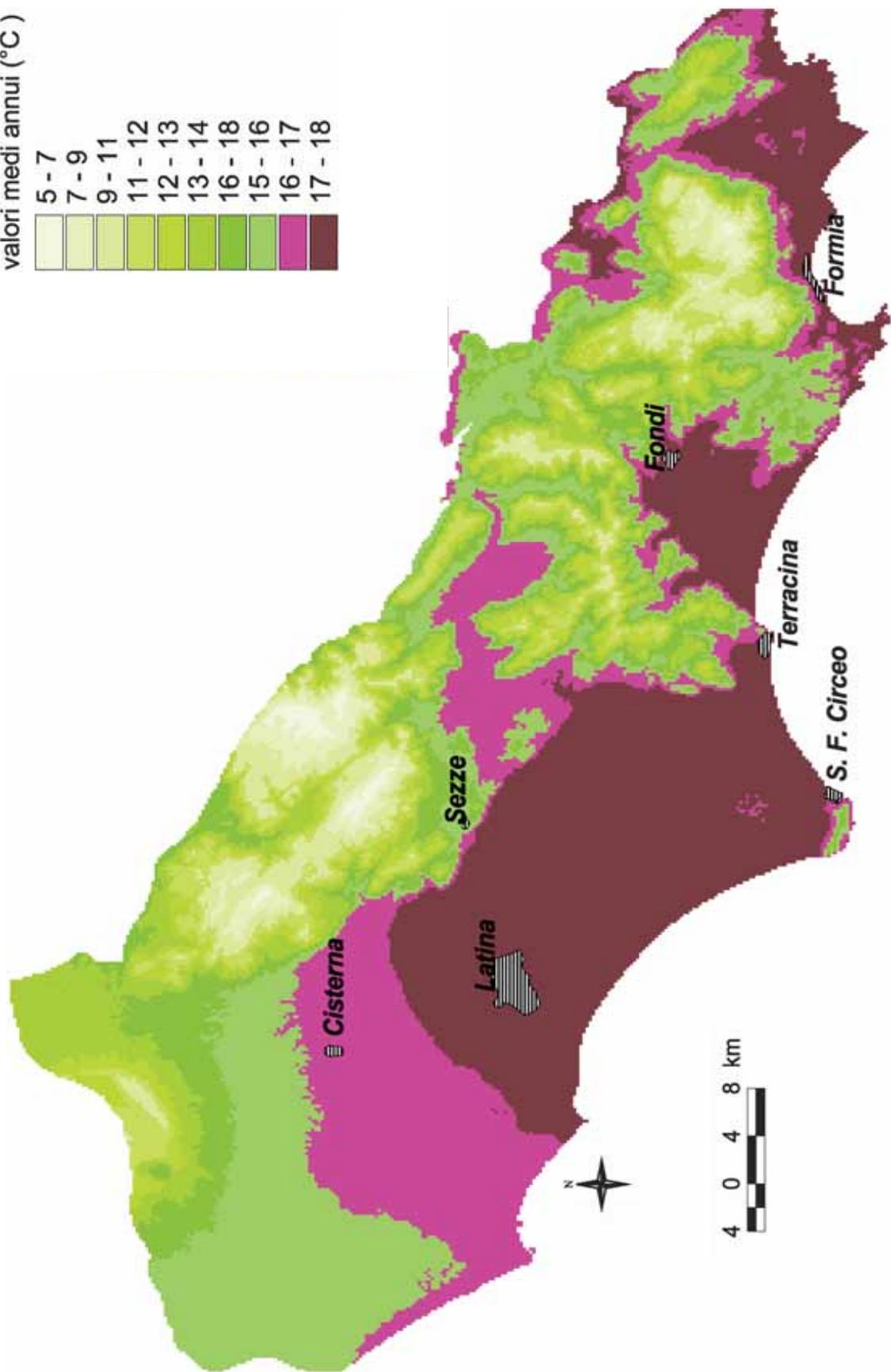
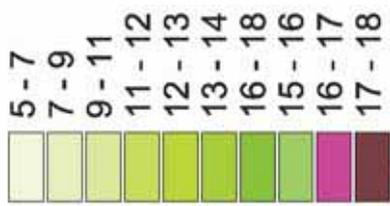
Infatti, senza il contributo di questa variabile ausiliaria si sarebbe ottenuta una stima più scadente, come mostra lo scatterplot di cross-validazione ottenuto con i dati della sola temperatura (fig.2C), dove vi si osserva una sottostima sistematica.

Se invece si considera una stazione in quota, per es. Lenola, localizzata a 470 msl, la stima senza la variabile ausiliaria presenta una sistematica sovrastima (fig.2D), quando invece la stima effettuata con il contributo del DEM si presenta corretta (fig.2A e B).



Precipitazioni medie annue (periodo 1983-1995).

valori medi annui (°C)



## Applicazione della carta della copertura del suolo della Provincia di Latina nel bilancio idrico distribuito

(G. Casciaro, M. Chiota e P. Sarandrea)

Per la redazione della Carta della Copertura del suolo della Provincia di Latina in scala 1:10.000 si è fatto riferimento alle specifiche del noto programma CORINE LAND COVER della Comunità Europea.

La classificazione è di tipo gerarchico in cui le coperture del suolo vengono classificate per livelli di approfondimento successivi. Nelle pagine seguenti viene riportata la classificazione a tre livelli secondo CORINE, dove:

- *il primo livello prevede solo cinque classi: territori artificiali, agricoli, foreste e ambienti semi-naturali, zone umide e superfici acquatiche, che consentono di distinguere fra territori più antropizzati e territori più naturali.*
- *il secondo livello distingue quindici sottoclassi, 4 per la prima, 4 per la seconda, 3 per la terza, 2 per la quarta e 2 per la quinta.*
- *il terzo livello porta a 44 il numero complessivo delle classi.*

Tale codifica è stata implementata con le sottoclassi al terzo e quarto livello, evidenziate in grigetto per quelle implementate dalla Regione Lazio (a cui si sono apportate modifiche relative alle estensioni) e un tono di grigio più chiaro per quelle implementate dalla Pro-

vincia di Latina, come raccomandato dall'ETC- L.C. (Centro Tematico per il Land Cover dell'Unione Europea), con voci aggiuntive, per meglio rispondere alle caratteristiche legate alla maggiore scala e al territorio preso in considerazione per il caso specifico della Provincia di Latina. Inoltre si segnala il caso delle Dune dove si è voluto evidenziarle dalle spiagge per una maggiore naturalità intrinseca rispetto alle spiagge, quest'ultime nella quasi totalità associate ad attrezzature di stabilimenti balneari.

*I dati di base utilizzati per la redazione della carta della copertura del suolo, sono:*

- 1 Ortofoto a colori ad alta risoluzione volo anno 2000
- 2 Carta tecnica regionale (CTR) in scala 10.000 aggiornata al 1990.
- 3 *Bibliografia costituita da studi di settore recenti, eseguiti alla medesima scala o di maggior dettaglio, utilizzati come confronto e verifica della fotointerpretazione*

Il processo per la redazione della carta ha seguito una elaborazione del dato per step successivi per arrivare al prodotto finale e cioè: interpretazione, lettura di confronto con i dati bibliografici, verifiche a campione sul territorio. Tale processo è rappresentato graficamente nel diagramma di figura 1.

Nella Prima Fase l'elemento determinante per la qualità del prodotto è l'esperienza del fotointerprete, che opera



Fig.1 – Fasi della procedura utilizzata per la redazione della Carta della Copertura del Suolo.

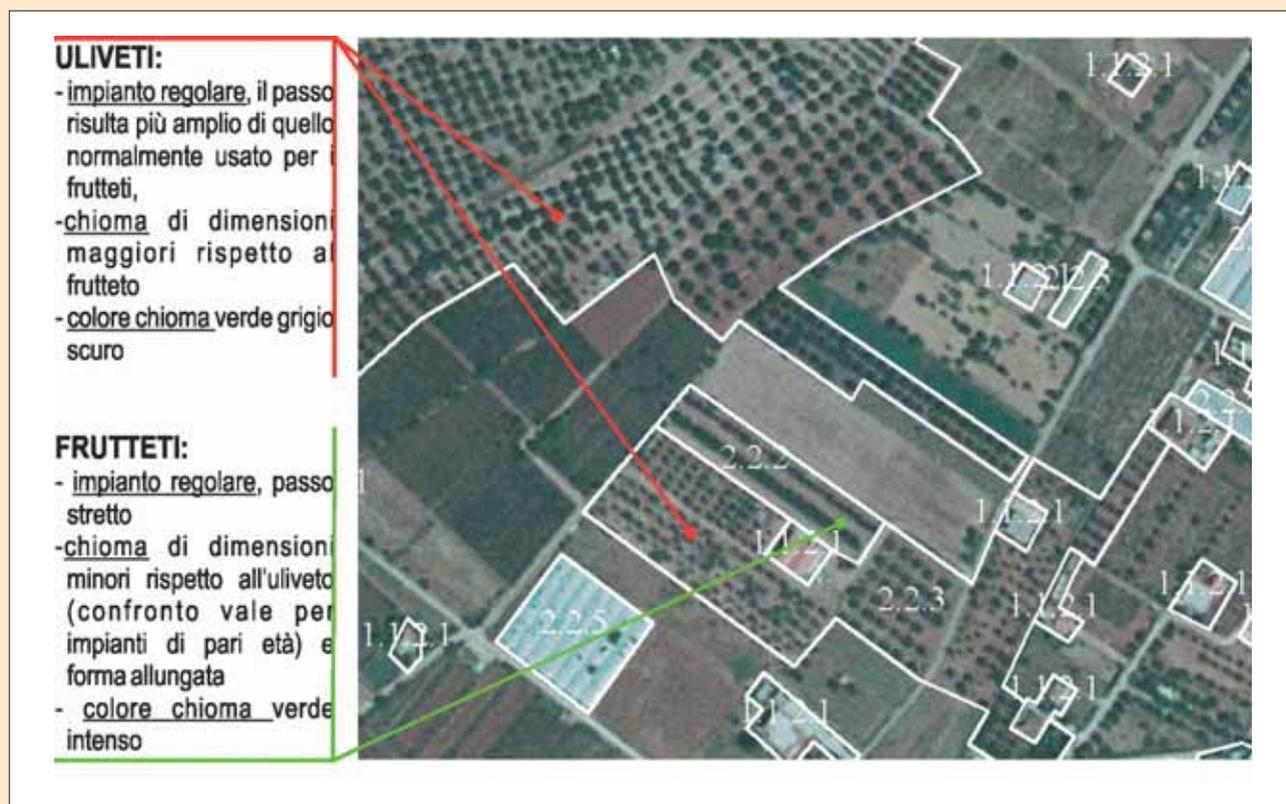


Fig.2 – Fase di fotointerpretazione. Esempi sui caratteri riconoscibili distintivi di una cultura.

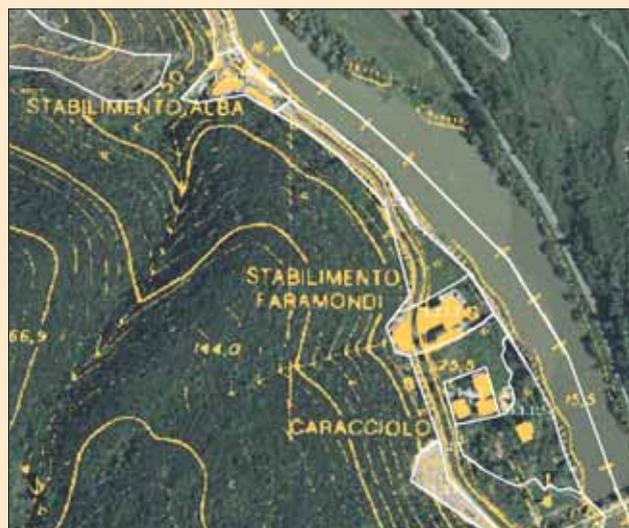


Fig.3 – Fase di fotointerpretazione, confronto con la CTR, identificazione di stabilimenti termali vicino al fiume Liri-Garigliano nel territorio comunale di Castelforte.

in ambiente GIS (AutocadMap, ArcView GIS, etc).

A titolo esemplificativo viene riportata in figura 2 una immagine ove sono presenti sia i frutteti che gli uliveti, sulla quale è possibile notare come la distinzione tra frutteti e uliveti non sia sempre di facile lettura. Infatti i parametri distintivi sono costituiti principalmente dalla chioma (dimensione, forma, regolarità) e dalla regolarità del sesto dell'impianto, parametri influenzati naturalmente dall'età dell'impianto. È evidente quindi come l'esperienza e la conoscenza del territorio da parte del fotointerprete siano fattori decisivi per la buona riuscita della fotointerpretazione.

L'uso del Confronto con la CTR, nello specifico della toponomastica, è stato utilizzato per l'individuazione di alcuni usi, ad esempio per Cimiteri, Cava, Idrovore, Campeggi ecc.

In figura 3 viene riportato il caso della zona di Castelforte relativo agli stabilimenti termali che in assenza della toponomastica sarebbero stati confusi con l'edificato.

In merito alla implementazione delle informazioni da fonte bibliografica, si è proceduto ad una raccolta dati su studi specifici, talvolta realizzati per finalità diverse, da altri Enti tra i quali si citano:

- Carta Vegetazionale del Parco Nazionale del Circeo;
- Carta Vegetazionale del Parco Naturale Regionale degli Aurunci;
- Carta delle UTI (Unità Territoriali Idroesigenti) della Autorità dei Bacini Regionali del Lazio;
- Piani di assetto silvo-pastorale 2000-2006 di Campodimele, Itri, Campello;

Il primo passo è consistito naturalmente nella verifica della possibilità di omogeneizzazione delle voci di legenda e nella verifica dell'aggiornamento del dato rispetto a quanto visibile sulle ortofoto.

Una volta implementate e perfezionate le fasi sopra descritte, la carta può essere considerata collaudata e validata e quindi si può procedere alla ulteriore elaborazione del dato, inteso come:

- elaborazione di carte tematiche derivate.
- interfaccia con i vari sottosistemi che compongono il SIT (Insediativo, Socio-Economico, Naturale, Relazionale, ecc) e con gli altri Settori che costituiscono l'Ente Provincia;

La carta della copertura del suolo costituisce un tema di base fondamentale per moltissime elaborazioni in campo ambientale e socio-economico, l'uso dell'ambiente GIS facilita enormemente l'elaborazione dei dati (si parla di un territorio di 2.250 kmq suddiviso in più di 56000 poligoni) e la produzione di tematismi derivati, oltre ai previsti successivi aggiornamenti e approfondimenti.

Una delle prime applicazioni della Carta della copertura del suolo all'analisi del Sistema ambientale ha riguardato il bilancio idrogeologico della Provincia di Latina. Infatti, come riportato da diversi autori (FAO, 1990, Lauciani E. et al., 1999, Ventura et al., 2000, Gazzetti et al., 2005) il calcolo del bilancio idrogeologico in aree caratterizzate da elevato grado di antropizzazione, con ampio sviluppo degli usi agricoli, residenziali e industriali, necessita di informazioni sugli usi antropici e le coperture naturali del territorio derivabili dalla Cartografia della copertura del suolo opportunamente valutate in base alle caratteristiche di idroesigenza

In altri termini è necessario analizzare l'uso reale del suolo in funzione dell'idroesigenza della copertura vegetale e delle attività antropiche presenti. Nella specifica cartografia tematica derivata per il calcolo distribuito del bilancio idrogeologico vengono distinte le attività produttive, le tipologie colturali e vegetazionali naturali e i diversi usi del suolo a cui possono essere associate specifiche esigenze idriche. Le diverse classi individuate vengono indicate come Unità Territoriali Idroesigenti - U.T.I. - (Ventura et al., 2000).

Nella rielaborazione della carta delle U.T.I. dalla Carta della copertura del suolo, è opportuno mantenere suddivisi gli usi del territorio a cui possono corrispondere differenti gradi di impermeabilizzazione. In tal modo, mediante opportune operazioni in ambiente G.I.S. è possibile effettuare valutazioni dei coefficienti di ruscellamento e valutazioni per la stima dell'infiltrazione efficace.

La caratterizzazione delle Unità Territoriali Idroesigenti è stata effettuata associando a ciascuna classe di copertura del suolo uno specifico "coefficiente colturale". Il coefficiente colturale ( $K_c$ ) esprime la proporzionalità tra l'evapotraspirazione della coltura di riferimento (*Festuca Arudinacea*) rispetto a quella della coltura considerata e viene misurato sperimentalmente nei diversi contesti fisico-climatici. Per i territori agricoli, i coefficienti colturali sono ricavati dal lavoro di Doorenbos J. e Pruitt W.A.O. pubblicato sul quaderno FAO n° 24 del 1977 (*Guidelines for prediction Crop water requirements*). Tali coefficienti sono funzione dello stadio vegetativo delle diverse specie vegetali nonché delle condizioni climatiche dell'area in cui le specie si sviluppano. La validità dei coefficienti colturali utilizzati è confermata da prove sperimentali compiute in diverse zone del mondo.

I coefficienti colturali non forniti dalle tabelle FAO sono stati ottenuti da altre pubblicazioni scientifiche (Lauciani E. et alii, 1999; Motawi A., 1993) e/o attraverso medie in funzione della "somiglianza colturale" delle specie vegetali considerate.

I coefficienti  $K_c$  per le specie vegetali in ambienti naturali sono stimati partendo dall'assunto che la vegetazione naturale sfrutta l'acqua che ha a disposizione non necessitando di irrigazione. Si ipotizza che il fabbisogno idrico della vegetazione naturale sia uguale o minore alla quantità di acqua precipitata e trattenuta nel suolo. Considerando che:

- nei periodi vegetativi si ha la massima esigenza idrica, l'evapotraspirazione delle piante può essere posta coincidente con l'evapotraspirazione potenziale dun-

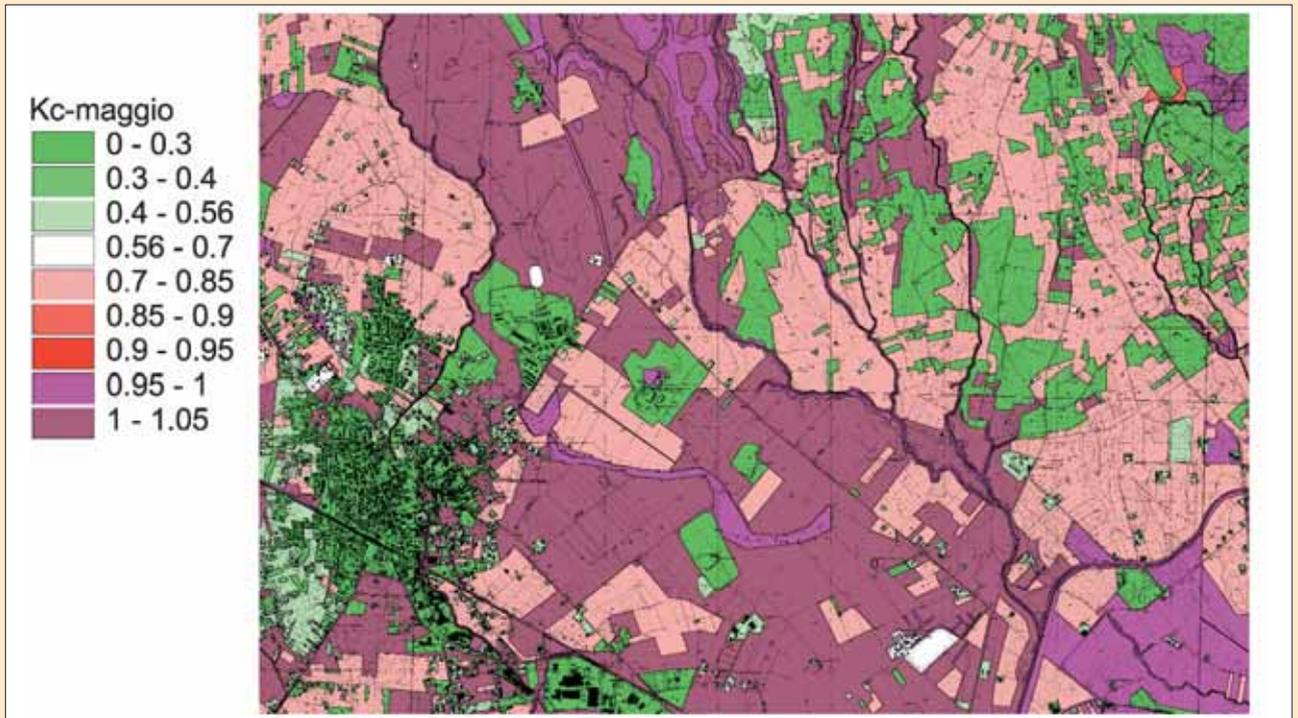


Fig.4 – Stralcio esemplificativo del valore dei coefficienti culturali (KC) nel mese di maggio.

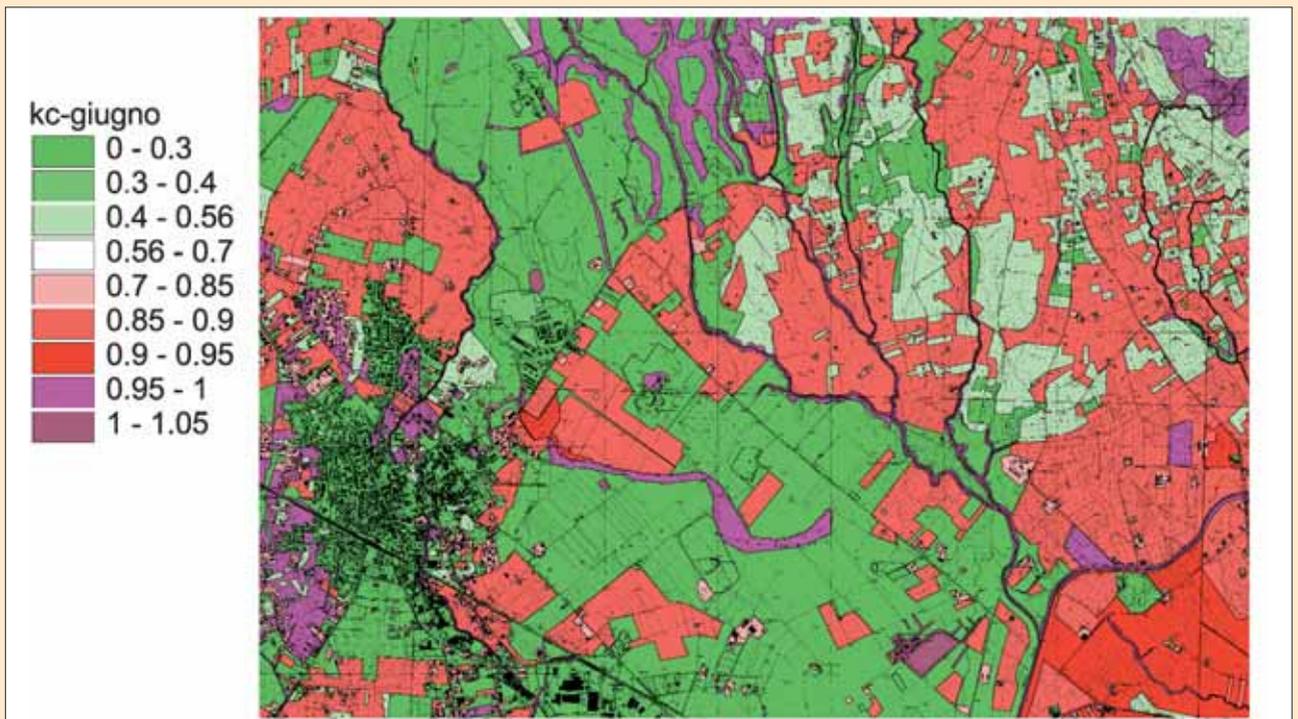


Fig.5 – Stralcio esemplificativo del valore dei coefficienti culturali (KC) nel mese di giugno.

que il coefficiente attribuito è pari a 1.

- nei periodi non vegetativi l'evapotraspirazione reale è minore di quella potenziale; il coefficiente utilizzato è  $K_c = 0.3$  (FAO, 1990; Lauciani et alii., 1999).

Per quanto concerne le aree dove l'evapotraspirazione può essere ritenuta nulla o trascurabile (aree urbanizzate in genere), a queste è stato assegnato un coefficiente colturale pari a zero.

Associando a ciascuna classe della carta delle UTI i coefficienti colturali individuati sono state ricavate quindi 12 mappe relative a ciascun mese dell'anno.

Per l'individuazione dei diversi valori di  $K_c$  da associare alle classi di Copertura del suolo si è fatto riferimento agli studi realizzati per il Piano per l'Uso Compatibile della risorsa idrica dell'Autorità dei Bacini Regionali del Lazio (vedi anche Merloni G., 2004, e C. Gazzetti, A. Loy, R. Mazza, S. Rossi & P. Sarandrea, 2005) opportunamente modificati per adattarli alla realtà territoriale della Provincia di Latina.

### Breve nota sulla carta dei suoli di Latina (Antonia Arnoldus-Huyzendveld)

Il presente testo si riferisce all'inventario dei suoli di Latina, effettuato dalla Digiter S.r.l. nel 2002-2003, per conto della Provincia di Latina, *Area delle Politiche Ambientali e Territoriali, Settore Pianificazione Urbanistica e Territoriale*. La carta, con un livello di dettaglio pari alla scala 1:75.000, è attualmente disponibile su GIS, con un corredo di due banche dati (profili e unità cartografiche) consultabili in formato Access. I dati raccolti e approfonditi fanno principale riferimento ai due volumi dell'Università di Amsterdam pubblicati più di un decennio fa: il ben noto "The soils of southern Lazio and adjacent Campania" di Sevink, Rimmelzwaal & Spaargaren del 1984 e il poco diffuso "The soils of the Agro Pontino" di Sevink, Duivenvoorden & Kamermans del 1991. Questi due volumi sono corredati da carte pedologiche in scala 1:100.000, che nel complesso coprono quasi l'intera provincia di Latina.

La finalità del progetto è stata la creazione di una carta dei suoli dell'intero territorio provinciale di Latina. Nella prima fase (2002) è stata impostata, in base ai contenuti del volume del 1984, una banca dati dei profili dei suoli considerati rilevanti per il territorio provinciale. Successivamente, le due carte pedologiche (1984, 1991) sono state digitalizzate per renderle disponibili su GIS. In parallelo è stata creata una banca dati delle unità cartografiche, composta da tutte le unità presenti nella Provincia. I dati sono stati ripresi sia dalle legende che dai testi delle due pubblicazioni. Per quanto disponibile, ad

codice (composta da vecchio...)	Descrizione
	Pianure fluviali, subpianeggianti
E1 (E1a, E1b)	(pianure bonificate) – suoli molto profondi, a tessitura fine ( <i>Gleyi-Vertic Cambisols</i> )
E2 (E1c)	(pianure bonificate) – suoli profondi, a tessitura fine ( <i>associazione di Chromi-Vertic Luvisols, Chromi-Vertic Cambisols</i> )
E3 (E1d)	(con materiale vulcanico) - suoli molto profondi, a tessitura fine ( <i>Cutani-Chromic Luvisols</i> )
E4 (m04, E2f)	(pianure fluvio-colluviali) – suoli molto profondi, a tessitura fine, in parte a drenaggio lento ( <i>associazione di Vertic Luvisols, Eutri-Chromic Vertisols, Eutri-Vertic Cambisols</i> )
E5 (e06, g03)	(con materiale vulcanico), talvolta leggermente ondulati, suoli molto profondi, a tessitura fine, a drenaggio lento ( <i>Eutric Vertisols</i> )

Tabella I: Carta dei Suoli della Provincia di Latina, unità cartografiche afferenti alle pianure fluviali (pedo-paesaggio E)

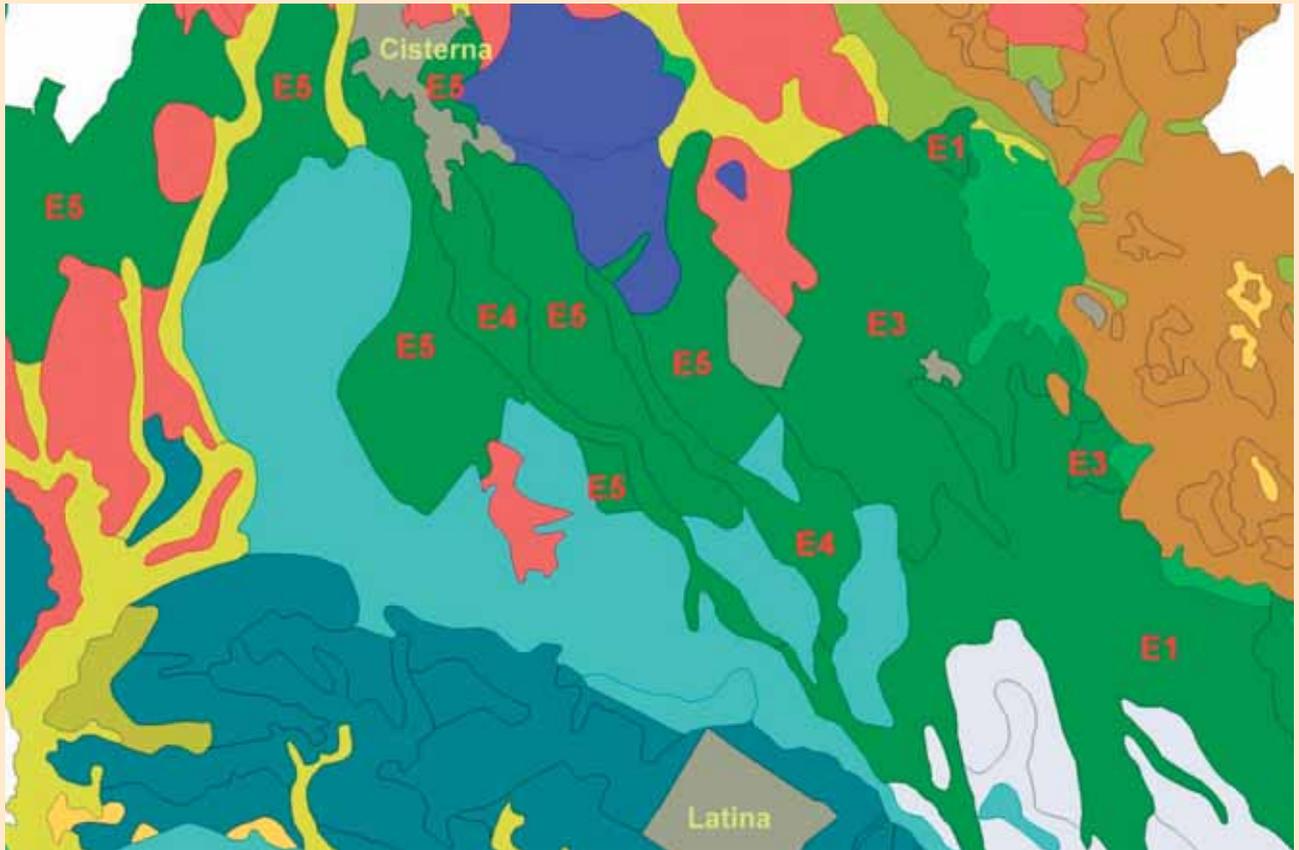


Fig. 1: Stralcio della Carta dei Suoli tra Latina e Cisterna, con i codici delle pianure fluviali (pedo-paesaggio E). Superficie circa 25 x 15 km.

ogni unità cartografica è stato assegnato un profilo di riferimento. Al fine di completare la cartografia, nel 2003 è stato eseguito il rilevamento ex-novo della carta pedologica delle zone di Aprilia, Cisterna, Cori e delle Isole Pontine. Inoltre sono stati aggiunti i dati relativi ai suoli del Parco del Circeo. Per buona parte delle zone non comprese nei volumi pubblicati è stato possibile fare riferimento alle unità cartografiche esistenti. L'ultimo passo è stato la creazione di una legenda valida per l'intero territorio provinciale, con la riduzione del numero delle unità cartografiche a poco più di 100.

È stata riportata, a titolo d'esempio, la sottodivisione del singolo pedo-paesaggio delle pianure fluviali (E) in unità cartografiche (Tabella I). Nella prima colonna sono indicati tra parentesi i codici di riferimento alle carte esistenti: *Sevink et al., 1984* (lettera iniziale maiuscola) e *Sevink et al., 1991* (lettera iniziale minuscola).

Si completa il sovrastante elenco con uno stralcio della

carta della zona tra Latina e Cisterna, con la sottodivisione dei pedo-paesaggi in unità cartografiche, in cui solo le unità afferenti alle pianure fluviali (E, cfr. Tabella I) sono indicate con i relativi codici.

L'impostazione della legenda si è basata su alcune considerazioni relative alla cartografia pedologica in generale. Una carta come quella dei suoli, che raffigura la distribuzione di un comparto ambientale che costituisce l'interfaccia tra la società ed il mondo biologico e geologico, trova la sua applicazione nella pianificazione e gestione del territorio, sia essa di tipo naturalistico, agricolo, urbanistico, archeologico o geo-ambientale. Per essere utilizzabile in tali ambiti, la Carta dei Suoli deve fornire non solo i dati tecnico-scientifici strettamente pedologici, ma anche le informazioni necessarie per la valutazione delle influenze reciproche tra i vari comparti ambientali (suolo, aria, acqua, vegetazione) e tra il suolo e la società (uso e gestione del suolo). Per tali scopi nella legenda della Carta del Suolo della

Captazioni e risorsa idrica nel bacino di Mazzocchio  
*Attività della Provincia di Latina per la tutela e la gestione delle risorse idriche*

Provincia di Latina  
 Area delle Politiche Ambientali e Territoriali  
 Settore di Pianificazione Urbanistica e Territoriale

**Elaborazione dei dati pedologici della provincia di Latina**

**E5** tipo di suolo paesaggio Pianure fluviali transizionali al paesaggio vulcanico tornare indietro

WRB (1988) Eutric Vertisols  
 FAO (1974) Chromic Vertisols

ID 117 % stima sup. 10 classif. FAO Chromic Vertisols  
 profilo di riferimento 0/1 profilo corrispondente parzialmente ai suoli dell'unità cartografica  
 doppio click sul profilo per accedere alla maschera profilo

spess. effettivo SINTACS dem. app. conduc. idraulica  
 molto profonda 1.2 0.40

AWC	cod. AWC SINTACS	valori classe AWC SINTACS	AWC suolo
B		175-200 mm/m	185

Banca dati Carta pedologica  
 Banca dati profili  
 Relazione Tecnico-scientifica  
 Esci dalla banca dati

Fig.2 – Schermata DB Suoli della Provincia di Latina.

Provincia di Latina vengono forniti i seguenti parametri: il pedo-paesaggio di appartenenza; il codice dell'unità cartografica ed i codici di riferimento delle due carte originarie; le caratteristiche principali dei suoli (tessitura, pietrosità, profondità, pendenza); la classificazione secondo la *World Reference Base for Soil Resources* (F.A.O. Isric 1998) e la Capacità d'Uso del suolo dominante all'interno dell'unità cartografica. Nel database delle unità cartografiche (fig. 2) vengono elencati, per ogni singolo suolo che compone le diverse unità della legenda, i dati relativi alla tessitura, alla pendenza, al drenaggio, alla profondità e alla pietrosità. Sono stati aggiunti i dati richiesti per l'applicazione di modelli per lo studio della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi e alcuni altri parametri pedologici ritenuti utili per la modellazione del territorio, specificatamente l'AWC, la capacità del suolo di trattenere acqua. La conoscenza di tale caratteristica risulta indispensabile per il calcolo del bilancio idrogeologico distribuito come descritto nel capitolo dedicato agli "Aspetti metodologici".

È stata realizzata, inoltre, una banca dati dei profili pedologici disponibili, con l'indicazione del profilo di riferimento di ciascuna unità cartografata.

Per quanto riguarda lo studio della vulnerabilità degli acquiferi l'inserimento del suolo tra gli elementi di valutazione trova giustificazione nella sua capacità di "filtro biologico", in quanto i processi interni fisici, chimici e biologici esercitano un effetto tampone sul deterioramento della qualità delle acque e dell'aria. Il suolo assume inoltre un ruolo di elemento chiave nella regolazione e divisione dei flussi idrici superficiali, quindi nel controllare la maggiore o minore intensità dell'erosione idrica. I dati pedologici richiesti per l'applicazione del modello SINTACS<sup>1</sup>, per esempio, sono: la percentuale di sostanza organica, la percentuale di argilla e la percentuale di limo. Considerato che non viene specificato a quale parte del suolo si riferiscono questi dati, si è scelto di fornire la percentuale di sostanza organica dell'orizzonte superiore, e le percentuali modali di argilla e limo dell'intero profilo. I valori sono stati ripresi dai profili di riferimento oppure sono stati stimati attraverso modelli presenti in letteratura o in base alla esperienza di campo.

Si osserva che i parametri richiesti dal modello SINTACS non sono sufficienti per valutare, nella modellazione territoriale finalizzata a stabilire il rischio d'inquinamento,

<sup>1</sup> Il metodo SINTACS (Civita M., De Maio M., 1997) è una evoluzione del metodo statunitense DRASTIC, messo a punto per le aree mediterranee, al fine di creare la carta della vulnerabilità intrinseca (o geologica) all'inquinamento, uno strumento operativo che permette di valutare la suscettibilità del sottosuolo a filtrare un inquinante idrotrasportato.

Riserva idrica	Descrizione	Classe AWC del suolo per il modello SINTACS	Codice AWC del suolo per il modello SINTACS
> 200 mm/m	Molto alta	> 200 mm/m	9
150-200 mm/m	Alta	175-200 mm/m	8
		150-175 mm/m	7
100-150 mm/m	Moderata	125-150 mm/m	6
		100-125 mm/m	5
50-100 mm/m	Bassa	75-100 mm/m	4
		50-75 mm/m	3
< 50 mm/m	Molto bassa	25-50 mm/m	2
		< 25 mm/m	1

Tabella II: Classi AWC

il ruolo del suolo nel ciclo delle acque. In pratica, il modello SINTACS non distingue tra un suolo di 10 cm sovrapposto alla roccia carbonatica e un suolo vulcanico più profondo di un metro. Indubbiamente, la quantità di sostanza organica e la granulometria sono fattori determinanti nella capacità del suolo di depurare le acque “di passaggio” - dalla pioggia alla falda. Ma conta anche, e sicuramente di più, la quantità di terra nella quale si svolge il processo depurativo (il “volume del filtro biologico”) e il rapporto tra la fase liquida e la fase solida nello strato attivo. Presumendo che all’interno del programma SINTACS quest’ultimo fattore è coperto dall’elaborazione dei dati granulometrici, rimane da identificare un valido parametro per il “volume del filtro”.

Si è pertanto proposto di introdurre nella modellazione la “capacità idrica del suolo” (AWC), in origine un indicatore del volume d’acqua che il terreno può contenere, ma probabilmente anche il migliore parametro *indiretto* per il volume di terra “attiva”. Nella banca dati delle

unità cartografiche è stato indicato il codice relativo al valore della capacità idrica (Available Water Capacity: AWC), determinato per l’intero suolo, fino allo strato o all’orizzonte che impedisce il contatto con la falda più profonda oppure, se assenti, fino alla profondità di 150 cm (vedi tabella). Ai suoli sotto l’influenza della falda superficiale, è stata assegnata la classe di riserva idrica più alta (9). Se non era disponibile il valore determinato in laboratorio, il calcolo dell’AWC della terra fine è stato effettuato con l’utilizzo del programma “Soil Water Characteristics” (<http://hydrolab.arsusda.gov/soilwater/index.htm>), che si basa sulle percentuali di sabbia e argilla<sup>2</sup>. Nel calcolo dell’AWC sono state considerate, inoltre, la profondità utile e la pietrosità del profilo. In base al confronto con i dati ricavati in laboratorio sono state applicate le seguenti correzioni ai valori calcolati dal modello: un aumento di 30% per i suoli vulcanici del Vulcano Laziale e di Roccamonfina e per i suoli torbosi, e una diminuzione di 10% / 30% nel caso di presenza di un contrasto tessiturale nel profilo del suolo.

<sup>2</sup> Nell’ultima versione, 6.02.70, anche sulla percentuale di sostanza organica, la pietrosità, la salinità e la compattezza del profilo.

## Prime applicazioni del bilancio idrico distribuito

### Analisi del “deficit idrico” e dei fabbisogni irrigui (C. Gazzetti, A. Loy, S. Rossi)

Nella metodologia di calcolo del bilancio idrico l'evapotraspirazione colturale (ETr), valutata mediante l'uso dei coefficienti colturali (Kc) applicati alle diverse classi di uso del suolo, esprime il fabbisogno idrico teorico totale della vegetazione (spontanea e coltivata) presente nell'area studiata.

Tale fabbisogno, nei limiti delle disponibilità idriche, viene soddisfatto dalla frazione delle precipitazioni meteoriche immagazzinate nei pori del suolo caratterizzati da dimensioni sufficientemente grandi da consentire la rimobilizzazione da parte degli apparati radicali delle piante dell'acqua trattenuta. Tale caratteristica del suolo, come spiegato nel precedente capitolo, è definita come AWC (Available Water Capacity) che esprime il volume di acqua che può essere trattenuto nel suolo, tra -30 e -1500 kPa, e potenzialmente utilizzabile dalle piante.

L'evapotraspirazione reale (EVr) valutata tenendo conto del bilancio idrico del suolo costituisce, qualora come nel nostro caso non si tenga conto degli apporti irrigui, il valore approssimato del consumo idrico reale della vegetazione presente (spontanea e coltivata) in condizioni naturali, ovvero tenendo conto della disponibilità effettiva di acqua nel suolo in funzione del regime delle precipitazioni, delle temperature e della domanda idrica delle piante.

La differenza tra ETr e EVr (vedi fig. 1) consente quindi di ricavare il “deficit idrico” del sistema suolo-vegetazione che, a seconda che si considerino le aree coltivate irrigate o le aree con vegetazione non irrigata, assume un significato differente. Nel primo caso, il deficit idrico è indicativo dei fabbisogni irrigui, nel secondo caso, il deficit rappresenta un valore teorico che può essere indicativo di condizioni di sofferenza della vegetazione (appassimento di alcune specie vegetali) o della tendenza in un dato territorio all'instaurazione di associazioni vegetali naturali con idroesigenze significativamente inferiori a quelle considerate.

Questo tipo di informazioni ambientali disponibili ad elevata scala di dettaglio (spaziale e temporale) presenta diverse possibilità di applicazione, per esempio:

- per la pianificazione dell'irrigazione e delle tipologie colturali;
- per la salvaguardia della vegetazione naturale dagli in-

cendi mediante l'individuazione delle situazioni di stress idrico;

- come ausilio per la redazione di carte della vegetazione potenziale.

Nella figura che segue (fig. 2) si riporta a titolo esemplificativo il deficit idrico calcolato nell'area di Mazzocchio per i mesi di maggio e giugno 1995.

Nell'ambito della gestione delle risorse idriche risulta interessante la rappresentazione dei valori dei diversi parametri in forma cumulata su tutto il territorio provinciale (Fig. 3) e sui diversi bairi idrografici (Fig. 4)

I valori mensili medi del periodo 1983-1995 delle Piogge, dell'Evapotraspirazione reale (EVr) e del ruscellamento (R) calcolati per l'intero territorio provinciale (Fig. 3) consentono di ricavare alcune significative considerazioni:

- le precipitazioni presentano: valori massimi (oltre 400 mm/mese) tra Ottobre e Novembre, valori medi (200-300 mm/mese) tra Dicembre e Aprile; valori minimi (inferiori a 100 mm/mese) tra Luglio e Agosto;
- tra Maggio e agosto, l'evapotraspirazione eguaglia e/o supera i valori di precipitazione;
- il volumi di ruscellamento, ad esclusione di eventi piovosi concentrati di forte intensità, sono quasi trascurabili nel periodo compreso tra Maggio e Agosto.

Nella lettura dei dati riportati in Fig.3 si deve comunque tenere conto del fatto che i dati cumulati si riferiscono alla media complessiva dei valori dell'intero territorio che comprende sia le aree montane che quelle costiere. Pertanto, risulta evidente che a scala globale, le maggiori precipitazioni riscontrabili sulle dorsali compensano il deficit di afflussi caratteristico delle aree costiere.

Nella figura che segue (Fig. 4) vengono evidenziati i dati relativi ai singoli bairi.

Si osserva che nell'anno di riferimento, i territori dei bairi idrografici riportati in figura 4 sono caratterizzati da un lungo periodo di deficit idrico. Le condizioni di deficit vengono evidenziate dallo scarto esistente tra la linea dell'Evapotraspirazione colturale (ETr - domanda idrica teorica ottimale della vegetazione naturale e coltivata nelle condizioni meteo-climatiche locali) e la linea dell'Evapotraspirazione reale (EVr) i cui valori sono condizionati dalla effettiva disponibilità idrica (precipitazioni + acqua contenuta nel suolo).

Le condizioni di deficit idrico peculiari dei diversi bairi sono funzione delle caratteristiche climatiche, della

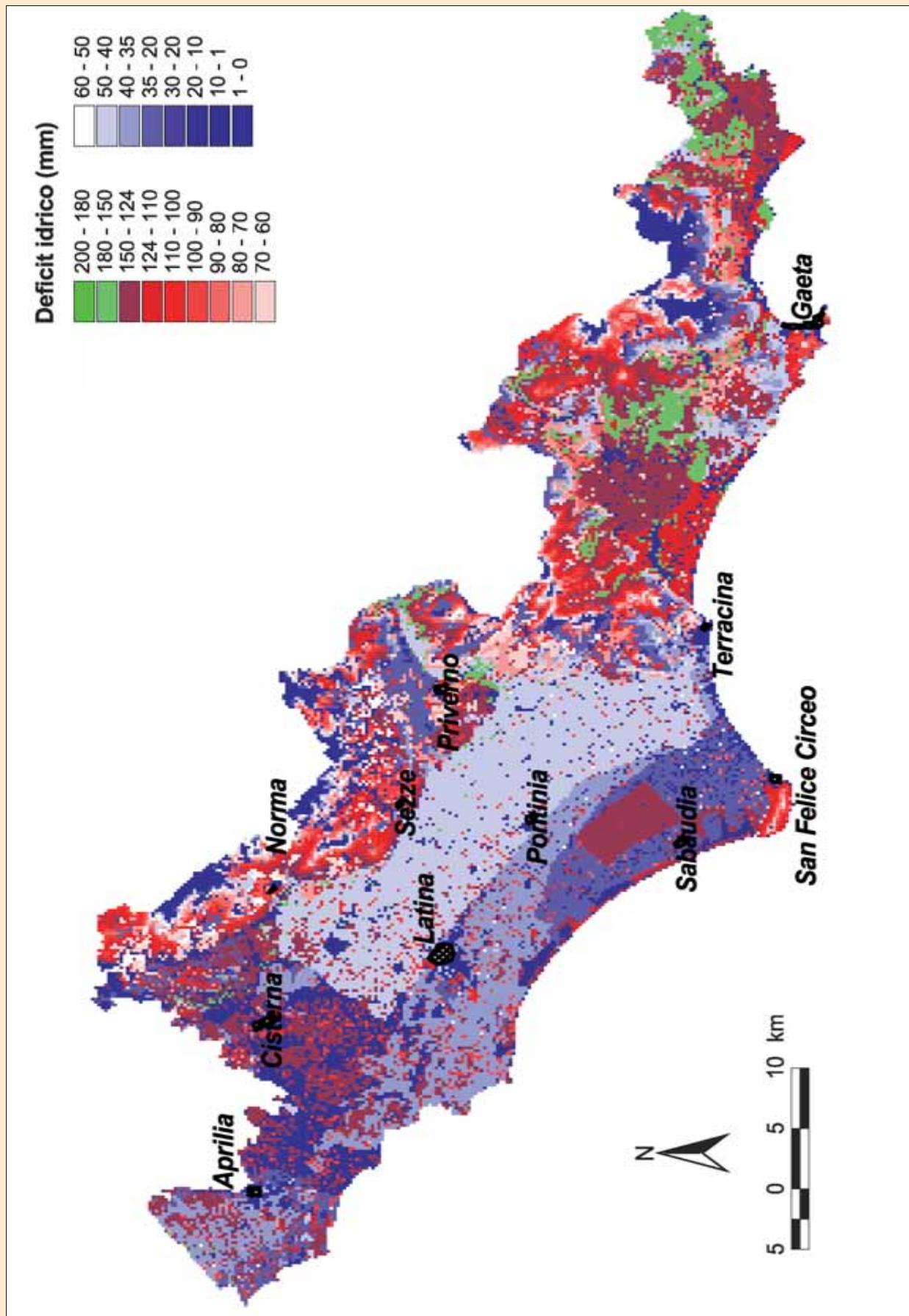


Fig.1 – Deficit idrico del sistema suolo-vegetazione calcolato sul territorio della Provincia di Latina per il mese di agosto dell'anno 1993.

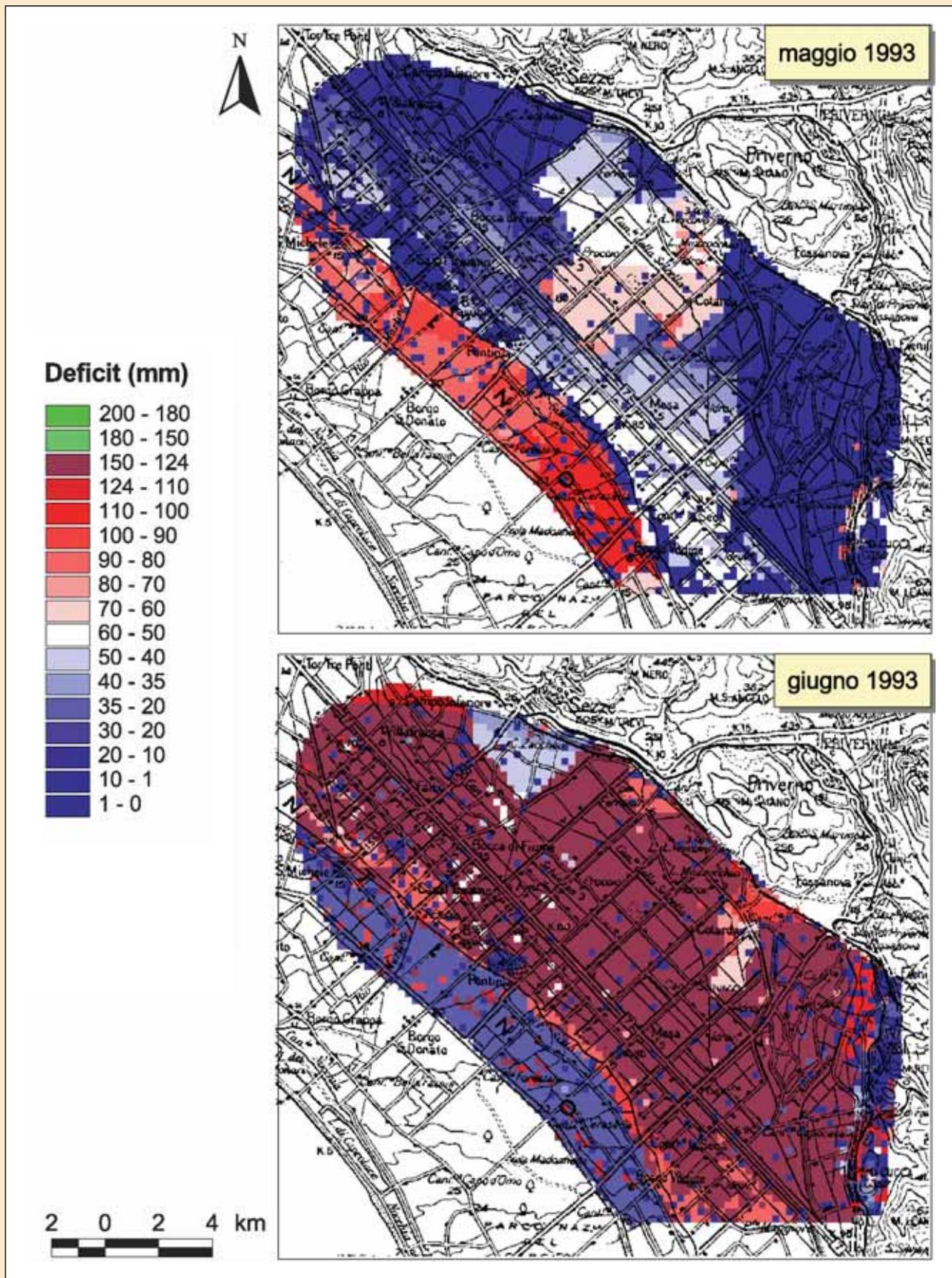


Fig. 2 – Confronto delle condizioni di deficit-idrico (assimilabile alla domanda irrigua) nell'area del bacino di Mazzocchio nei mesi di maggio e giugno dell'anno 1993.

Captazioni e risorsa idrica nel bacino di Mazzocchio  
*Attività della Provincia di Latina per la tutela e la gestione delle risorse idriche*

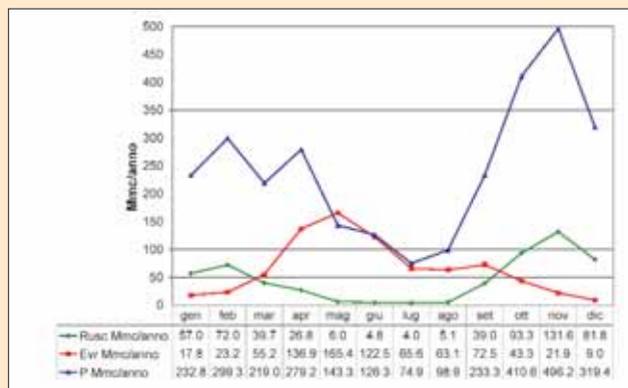


Fig.3 – Confronto tra Precipitazioni (P), Evapotraspirazione reale naturale (Evr) Ruscamento (Rusc) – I valori riportati sono le medie dei valori calcolati sulle singole celle nell'intero territorio provinciale.

natura e dello spessore del suolo e del tipo di vegetazione presente. Negli esempi riportati in figura 4 si può rilevare che per il bacino del Rio d'Itri, poco coltivato e esteso su aree montane con piovosità relativamente più elevata, e per il bacino del F. Astura, caratterizzato dalla presenza di suoli spessi, le condizioni di deficit idrico si riscontrano tra maggio e settembre. Per i bacini dal Selcella e del F. Sisto, ricadenti nella Pianura Pontina e caratterizzati da agricoltura intensiva il periodo di deficit va da aprile a settembre.

Considerazioni analoghe possano essere svolte su ogni porzione elementare della griglia di calcolo.

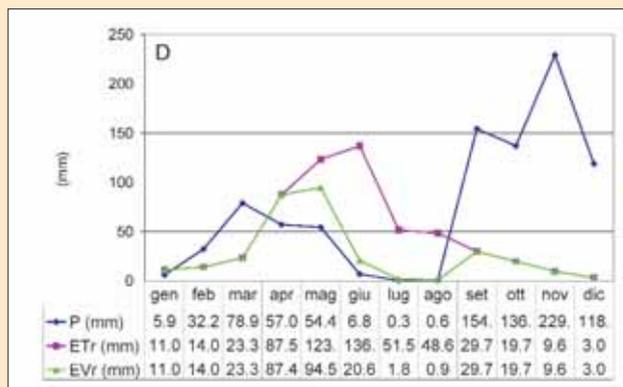
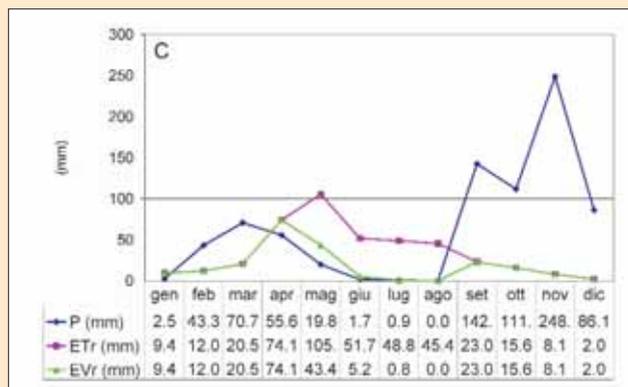
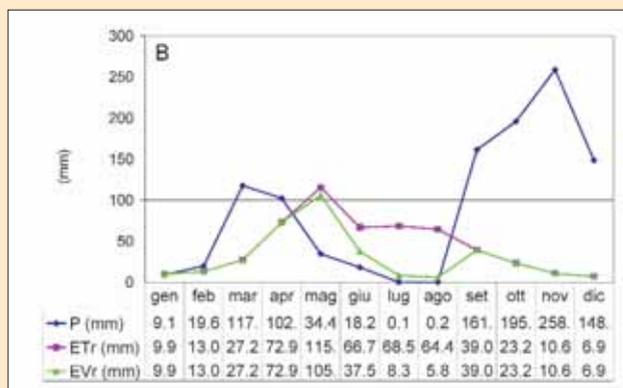
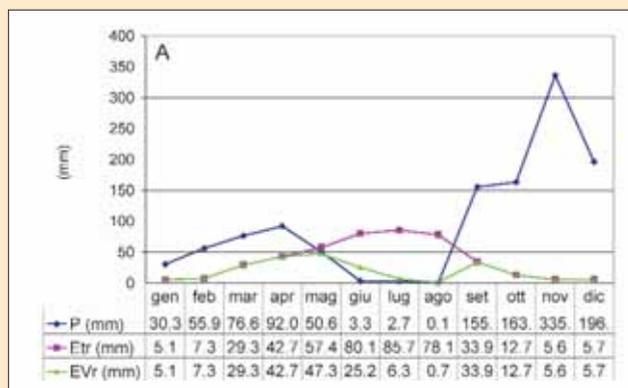


Fig. 4 – Confronto dei valori mensili di Precipitazione (P), Evapotraspirazione Culturale (ETr) e Evapotraspirazione Reale (Evr) nei mesi dell'anno 1993, per alcuni bacini – A) Rio d'Itri; B) F. Astura; C) F. Sisto (bacini sulla duna antica); D) Canale Selcella.

**Vulnerabilità degli acquiferi (C. Alimonti, C. Gazzetti, C. Perotto, G. Raspa, P. Sarandrea)**

La vulnerabilità di un bene esposto ad un evento pericoloso di determinata intensità viene comunemente definita come il grado di compromissione del bene in conseguenza dell'accadimento dell'evento. Il prodotto tra la sua probabilità di accadimento (P), la vulnerabilità del bene (V) e il valore economico di quest'ultimo (E) fornisce la misura del rischio, secondo la nota relazione  $R = P*V*E$ .

A differenza dei rischi naturali, dove il fattore determinante consiste nel calcolare la probabilità di accadimento degli eventi in funzione della loro intensità, nella valutazione del rischio per gli acquiferi, essendo l'evento pericoloso quasi sempre provocato da azioni umane e quindi prevedibile, quantificabile e controllabile, il fattore naturale determinante è costituito dal grado di vulnerabilità, sia intrinseca che specifica, dell'acquifero.

Nello sviluppo dei piani territoriali Provinciali urbanistici e ambientali, operanti ad una scala di 1:50000 si utilizza in genere la determinazione della vulnerabilità intrinseca, trattando quella specifica solo in casi parti-

colari. Ad ogni modo, l'individuazione della vulnerabilità deve consentire di tenere conto, nella pianificazione territoriale: a) del grado di protezione delle falde acquifere; b) delle quantità di risorse in gioco; c) del danno potenziale, anche in termini di confronto tra diversi acquiferi; d) del grado di indeterminazione nelle valutazioni, in relazione alla qualità dei dati utilizzati e alla rilevanza del problema affrontato.

In quest'ottica, nel tentativo di fornire uno strumento quantitativo per valutare e confrontare il grado di vulnerabilità, sia all'interno di un singolo acquifero che tra acquiferi differenti, si è cercato di integrare il metodo dei punteggi (caratteristico di procedure di largo uso come il SINTACS (Civita M., De Maio M., 1997) con i valori numerici dei parametri del bilancio idrogeologico calcolato per i diversi settori degli acquiferi.

Appare evidente che i fattori considerati nel calcolo dell'infiltrazione efficace coincidono con i parametri che generalmente vengono indicizzati nelle più comuni formulazioni per la definizione della vulnerabilità intrinseca di un acquifero.

In termini schematici si può ritenere che, a parità di al-

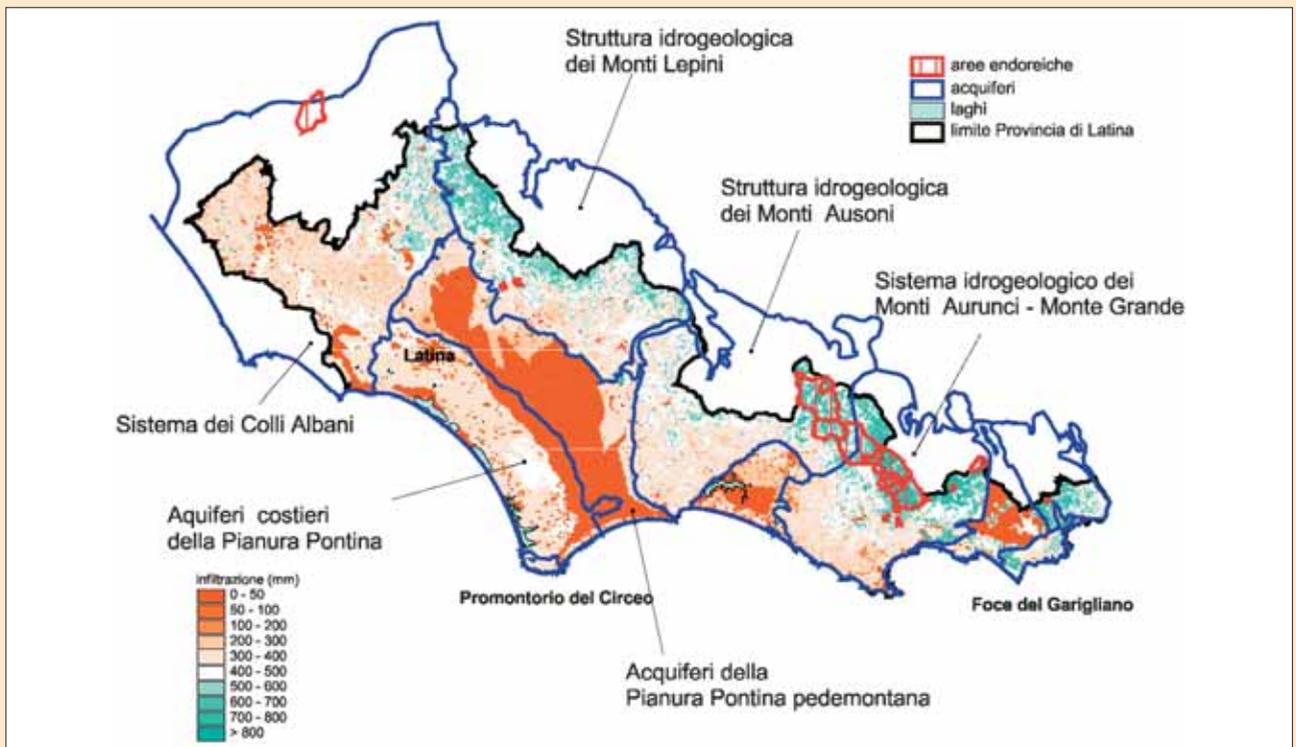


Fig. 1 – Carta dell'Infiltrazione efficace.

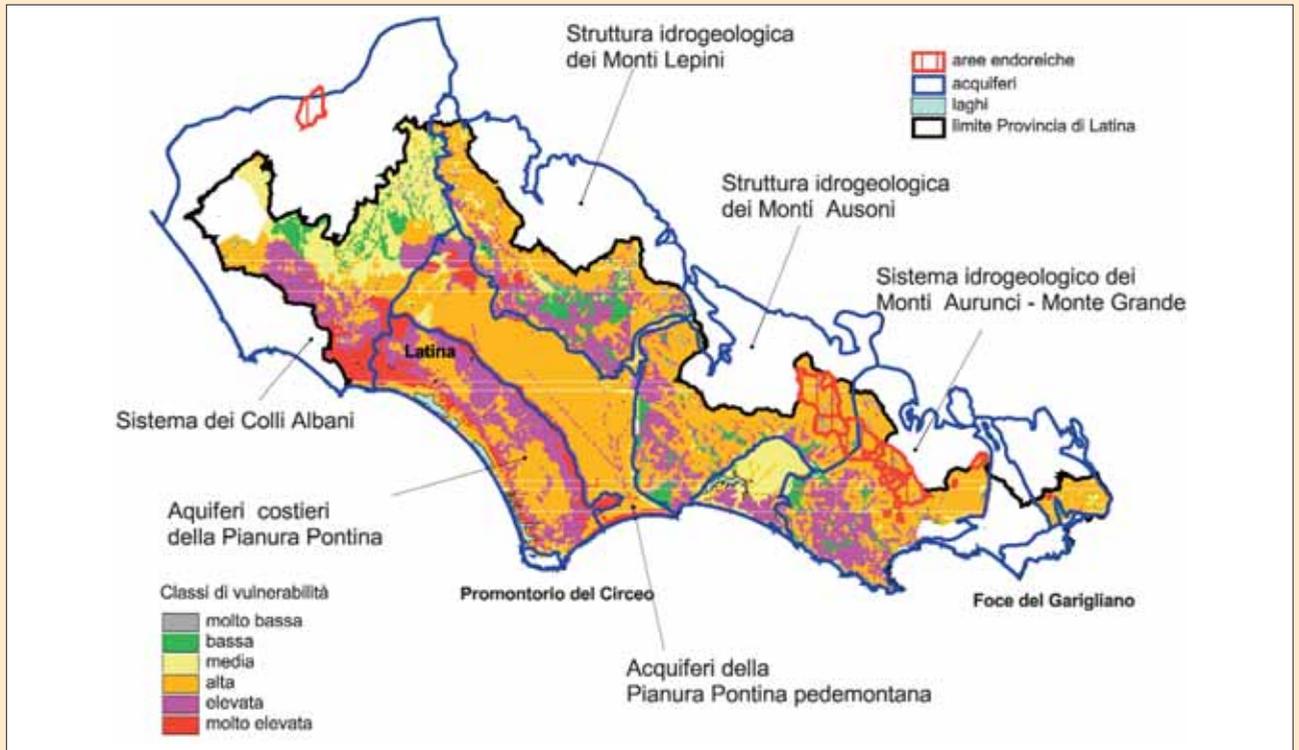


Fig.2 – Applicazione della procedura SINTACS agli acquiferi della Provincia di Latina (Catalano G. & Gerardi A., 2004) – Per i commenti vedi testo.

tri fattori (soggiacenza, capacità di scambio del suolo e dell'acquifero insaturo), il grado di esposizione di un determinato settore di un acquifero risulta direttamente proporzionale alla quantità di risorsa potenzialmente coinvolta, dipendente dall'infiltrazione efficace e dall'afflusso sotterraneo dai settori adiacenti.

La conoscenza dei volumi esposti nell'ambito della cartografia della vulnerabilità è infatti di notevole rilevanza in applicazioni inserite nella pianificazione territoriale di area vasta, dove si ha l'esigenza di confrontare i risultati ottenuti spesso in tempi diversi in acquiferi con potenzialità significativamente differenti.

I metodi parametrici consistono essenzialmente nella valutazione qualitativa, tradotta in un punteggio, di una serie di parametri d'ingresso la cui incidenza è controllata da una serie di pesi moltiplicatori.

Tra i metodi parametrici più diffusi in Italia il S.I.N.T.A.C.S. (Civita M., De Maio M., 1997 e 2000) prende in considerazione:

1 **La Soggiacenza:** profondità della superficie piezometrica misurata rispetto al piano campagna.

2 **L'Infiltrazione efficace:** percentuale della precipitazione che raggiunge la falda

3 **L'effetto di autodepurazione del Non saturo:** dovuto ai processi fisici (filtrazione e dispersione in particolare) e chimici (reattività chimica dei minerali componenti e processi di biodegradazione e volatilizzazione) che impediscono o attenuano il processo di diffusione dell'inquinante

4 **La Tipologia della copertura:** intesa come suolo vero e proprio in cui si esplicano processi che possono attenuare l'importanza dell'impatto

5 **Le caratteristiche idrodinamiche e geometriche dell'Acquifero**

6 **La Conducibilità idraulica:** definita come la capacità di spostamento attraverso il mezzo saturo dell'acqua di falda (e quindi dell'inquinante)

7 **L'acclività della Superficie topografica:** da cui dipende, insieme alla copertura del suolo, l'entità del ruscellamento

La Carta della Vulnerabilità intrinseca viene ottenuta determinando per ogni cella la sommatoria dei 7 parametri considerati ciascuno moltiplicato per il proprio peso.

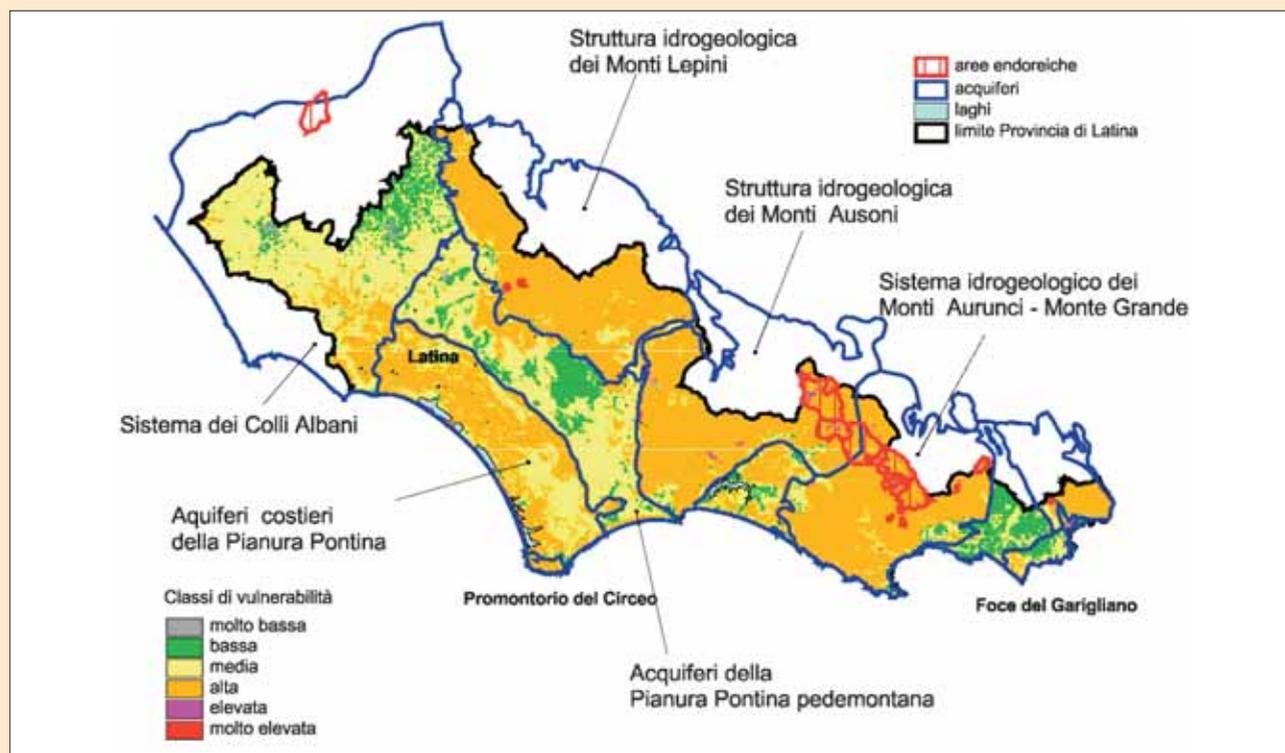


Fig. 3 – Applicazione della procedura SINTACS al territorio della Provincia di Latina, con introduzione dell'infiltrazione efficace calcolata secondo la procedura descritta nel capitolo 5, in sostituzione dei parametri 2 (Infiltrazione), 5 (Acquifero) e 7 (Superficie topografica).

$SINTACS = S W_s + I W_i + N W_n + T W_t + A W_a + C W_c + S W_s$

L'indice ottenuto viene normalizzato, così da ottenere una scala di valori da 0 a 100 (per una più approfondita trattazione del metodo si rimanda alla numerosa bibliografia esistente).

La vulnerabilità intrinseca degli acquiferi della Provincia di Latina ricavata dalla semplice applicazione della metodologia parametrica, senza particolari accorgimenti fornisce i risultati riportati nella figura 2 (Catalano G. & Gerardi A., 2004).

Se si tiene conto delle caratteristiche geometriche e delle potenzialità dei diversi sistemi acquiferi i risultati ottenuti evidenziano soprattutto il peso della soggiacenza della falda trascurando quasi completamente gli aspetti quantitativi delle risorse idriche presenti.

In tale maniera, nell'analisi globale della vulnerabilità delle risorse idriche della Provincia di Latina, gli esigui acquiferi superficiali della Pianura Pontina Pedemontana (nel presente studio non vengono mai presi in considerazione gli acquiferi profondi confinati) risultano a

vulnerabilità alta, allo stesso livello di gran parte delle dorsali carbonatiche, e di molti settori degli acquiferi ospitati nei depositi sabbiosi costieri. Alla stessa maniera, l'importante circolazione idrica ospitata nelle piroclastiti dei versanti meridionali e occidentali dei Colli Albani risulta classificata in valori di vulnerabilità da medi a bassi.

Considerazioni analoghe possono essere ricavate confrontando i valori di vulnerabilità calcolati per gli acquiferi costieri della Pianura Pontina, con quelli calcolati per gli acquiferi delle dorsali carbonatiche. Negli acquiferi costieri la vulnerabilità intrinseca presenta valori molto elevati, connessi con la presenza di formazioni porose permeabili con falda posta a profondità nell'ordine dei 10-20 m dal piano di campagna. Tali valori risultano però sovrastimati, se confrontati con quelli attribuiti agli acquiferi carbonatici, dove, anche trascurando la presenza di inghiottitoi carsici e aree endoreiche (dati non elaborati nel lavoro di Catalano & Gerardi) gli elevati valori di ricarica media annua indicano velocità di infiltrazione e tempi di percorrenza relativamente brevi, cui dovrebbero corrispondere valori di vulnerabilità sensi-

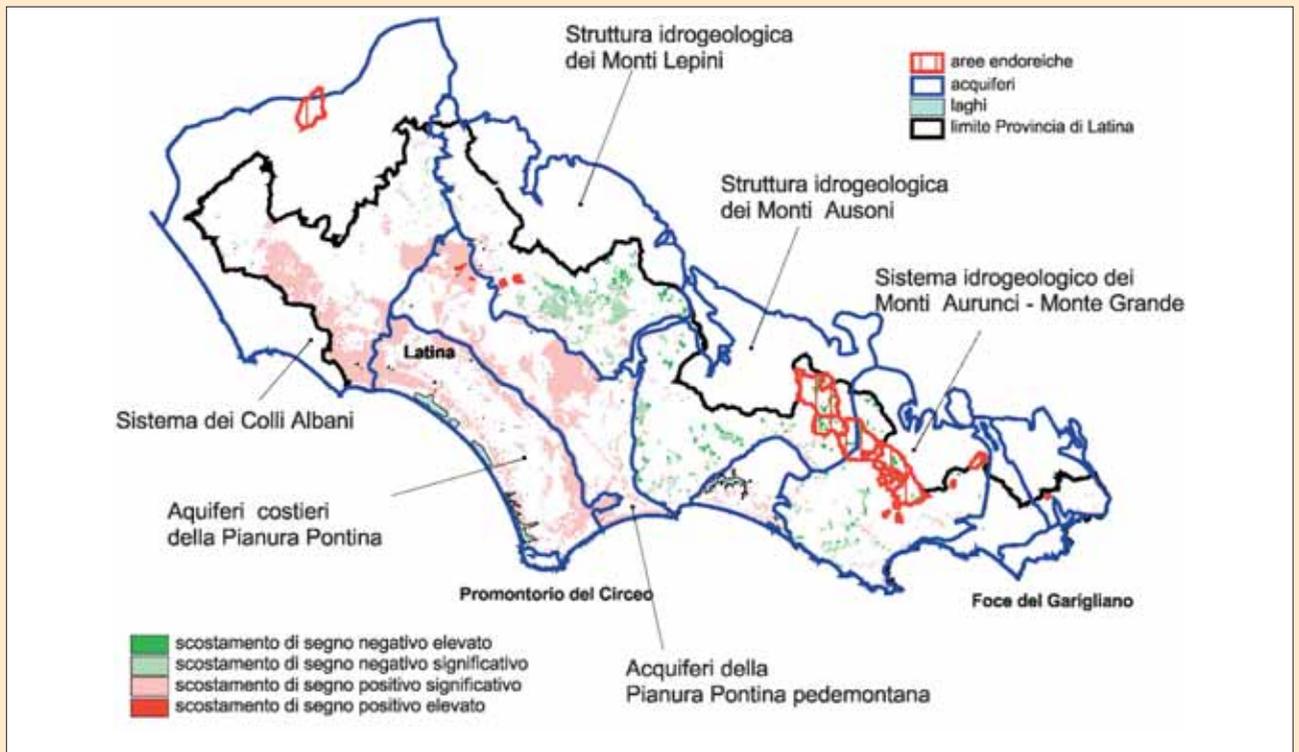


Fig.4 - Differenza tra le vulnerabilità di figura 2 e 3 – Per i commenti vedi testo.

bilmente maggiori rispetto alle quantità di risorse idriche esposte negli acquiferi costieri.

Nel complesso, si può ritenere che la procedura di stima utilizzata riportata in fig. 2 fornisca risultati significativi quando applicata per valutare le differenze di vulnerabilità in singoli sistemi acquiferi, ma che può risultare lacunosa, nel caso si abbia l'esigenza di confrontare differenti contesti idrogeologici.

Per superare i limiti di un approccio essenzialmente schematico, nella valutazione della vulnerabilità si è ipotizzato che l'infiltrazione efficace, calcolata in maniera distribuita con la metodologia descritta nel paragrafo precedente, può sintetizzare in un unico parametro ed in maniera quantitativa i fattori indicati ai punti 2 (Infiltrazione), 5 (Acquifero) e 7 (Superficie topografica) della procedura SINTACS. Tale sostituzione non costituisce una variazione concettuale della procedura, ma una proposta metodologica per la quantificazione dei fattori Infiltrazione efficace e Superficie topografica (morfologia). Per quanto riguarda le caratteristiche idrodinamiche e geometriche dell'Ac-

quifero, inglobando tale parametro nella ricarica dell'acquifero calcolata secondo la metodologia indicata, si è inteso ridurre al minimo il grado di soggettività generalmente associato alla mancanza di un sufficiente numero di osservazioni sperimentali, specie negli acquiferi carbonatici.

Si è quindi tentata l'applicazione della metodologia di calcolo dell'infiltrazione efficace distribuita descritta precedentemente, al tema della vulnerabilità degli acquiferi introducendola nella metodologia SINTACS per la definizione dei parametri di cui ai punti 2, 5 e 7 della stessa, relativamente ai soli acquiferi non confinati (fig.3).

Il confronto tra i risultati delle due cartografie (Fig.4) è stato ottenuto mediante una sottrazione in ambiente GIS, dopo aver effettuato una normalizzazione dei punteggi e sostituito un valore da 1 a 6 alle classi qualitative di vulnerabilità individuate. Nella figura 4 sono state evidenziate le differenze maggiori di 2 punti (due classi).

Le modifiche introdotte comportano una più marcata diversificazione dei valori di vulnerabilità stimati nei diversi sistemi idrogeologici, con valori significativamente minori negli acquiferi prevalentemente porosi (sco-

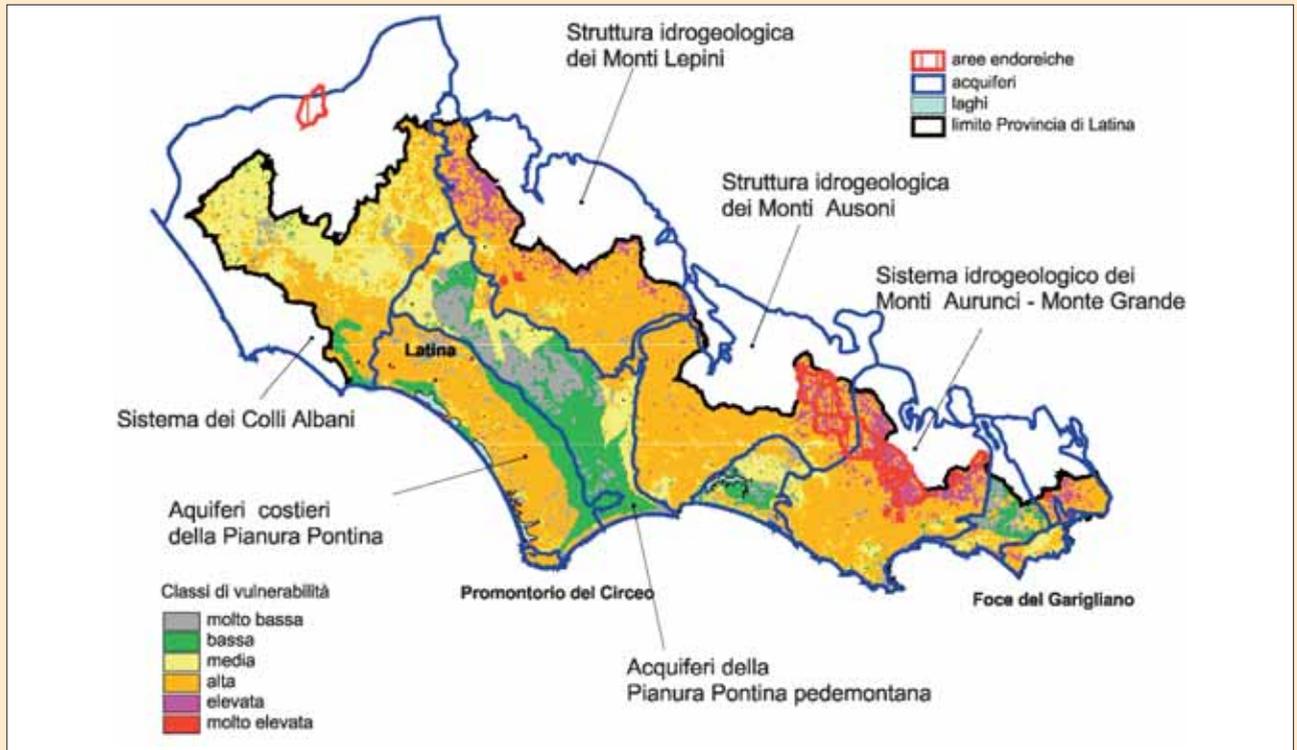


Fig. 5 – Carta della vulnerabilità degli acquiferi pesata rispetto all'infiltrazione efficace distribuita

stamento di segno positivo) e valori tendenzialmente maggiori negli acquiferi carsici fratturati (scostamento di segno negativo).

In questi termini, la mappa ottenuta (fig.3) può risultare più significativa ai fini di una lettura comparativa della vulnerabilità delle risorse idriche della Provincia, in quanto discrimina maggiormente gli acquiferi con maggiore quantità di risorse rinnovabili. Rimangono, tuttavia, alcune incongruenze con i dati sperimentali, specie per quanto riguarda la discriminazione delle aree a maggiore ricarica negli acquiferi carbonatici e la differenziazione della vulnerabilità degli acquiferi dei Colli Albani che risulta ancora paragonabile a quella ricavata per i piccoli acquiferi superficiali ospitati nelle formazioni a bassa permeabilità (area di Formia, Pianura Pontina, Piana di Fondi).

Una maggiore diversificazione dei valori di vulnerabilità degli acquiferi è stata ottenuta utilizzando il parametro infiltrazione efficace calcolato cella per cella come fattore di moltiplicazione dei punteggi precedentemente calcolati e operando successivamente la normalizzazione e la discretizzazione in 6 classi dei valori ottenuti (fig. 5)

L'introduzione di questo fattore determina una modulazione, sulla base delle diverse potenzialità degli acquiferi, dei valori di vulnerabilità stimati rendendoli più confrontabili.

Rispetto alla carta di vulnerabilità ottenuta dalla semplice applicazione della metodologia parametrica, il confronto con la carta di fig.2, ottenuto mediante la procedura precedentemente descritta, mostra differenze significative (fig.6) evidenziando una distribuzione della vulnerabilità, in alcuni casi, completamente capovolta. Si osservi, ad esempio, la distribuzione dei valori di vulnerabilità da alta a molto elevata negli acquiferi carbonatici e vulcanici o, viceversa, dei valori bassi o molto bassi negli acquiferi della Pianura Pontina.

Le considerazioni esposte mostrano come la valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi, basata su criteri parametrici può fornire risultati differenti a seconda del dettaglio dei dati utilizzati e, soprattutto, del modo in cui viene considerata l'infiltrazione efficace.

Appare evidente che la definizione della vulnerabilità richiede la risoluzione di due problemi:

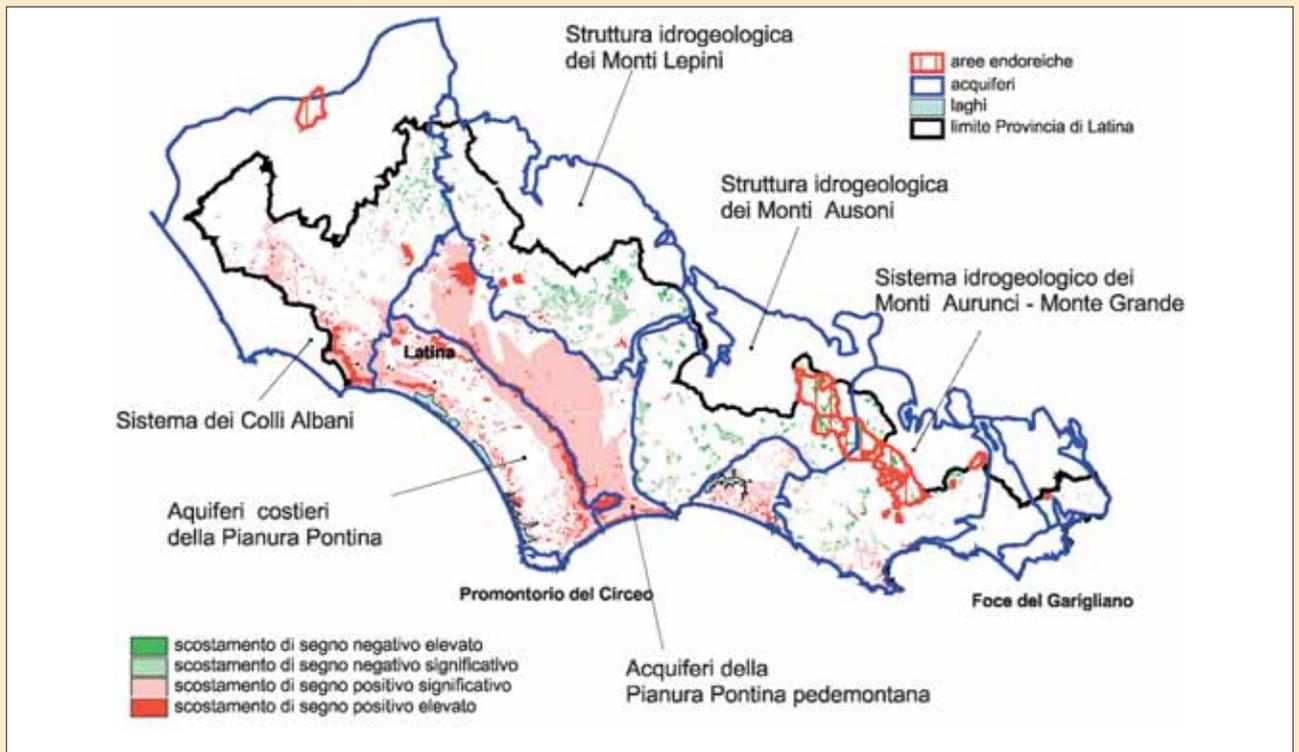


Fig. 6 - Differenza tra le vulnerabilità di figura 2 e 3 – Per i commenti vedi testo.

1 la quantificazione del grado di protezione dell'acquifero considerato, in termini di facilità con cui può essere raggiunto da eventuali sostanze inquinanti;

2 la quantificazione delle risorse esposte.

I metodi parametrici tradizionali concentrano l'attenzione prevalentemente sulla prima tipologia di problemi, così come evidenziato dalla carta di fig.2. Pertanto, la lettura di carte di questo tipo deve essere sempre associata a quella di carte dell'infiltrazione efficace (vedi fig. 1). Il tentativo di sintetizzare in un'unica cartografia la valutazione del grado di protezione con la quanti-

ficazione delle risorse esposte ha fornito risultati interessanti, anche se ancora approssimativi e prettamente di tipo qualitativo, specie per quanto riguarda la quantificazione dimensionale e numerica della vulnerabilità espressa e il volume di risorsa che può essere associato ai diversi settori dell'acquifero.

Da questo punto di vista può essere utile integrare il calcolo distribuito dell'infiltrazione efficace con la modellazione della circolazione idrica sotterranea per valutare l'impatto in termini quantitativi sull'acquifero delle risorse potenzialmente compromesse in ogni settore.



# Bibliografia

- ALIMONTI C., RASPA G., GAZZETTI C., PEROTTO C., SARANDREA P. (2005) – *Valutazione della vulnerabilità degli acquiferi della pianura Pontina mediante tecniche di bilancio distribuito con metodi geostatistici*. Atti del convegno Aquifer Vulnerability and Risk, 2nd International Workshop, Colorno, 21-22-23 Settembre 2005.
- ARREDI F. (1969) – *Costruzioni idrauliche*. Unione Tipografico-Editrice Torinese, 1, Torino.
- BARRA CARACCILO (1907) – *Progetto di massima per le opere di compimento della bonifica delle Paludi Pontine*. Tip. Elzeviriana, Roma.
- BAY L. & TARTAGLIA G. (1970) – *L'approvvigionamento idrico della Piana Pontina all'inizio degli anni settanta*. Cassa per il Mezzogiorno, Roma.
- BIESKE E. (1968) – *Filtri punzonati e filtri a ponte, con e senza prefiltra di granaglia*. Technische Berichte, J.F. Nold & Co. (in tedesco), 30, Stockstadt.
- BLANC A.C. (1936) – *Sulla stratigrafia quaternaria dell'Agro Pontino e della Bassa Versilia*. Boll. Soc. Geol. It., 55, 375-396, Roma.
- BLANC A.C., CONFORTO B., DI RICCO G. & SAPPÀ M. (1961) – *Indagini sulle acque sotterranee dell'Agro Romano e Pontino*. Prima parte: Agro Romano. Cassa per il Mezzogiorno, Roma.
- BONI C. (1968) – *Utilizzazione delle riserve idriche permanenti per regolare il regime delle sorgenti di trabocco*. Geologica Romana, 7, 405-415, Roma.
- BONI C. (1996) – *2° rapporto sulla consulenza tecnica scientifica relativa all'attività del Comitato di coordinamento dei progetti 29/280, 29/281, 29/282 del sistema idrico pontino*. Amm. Provinciale di Latina, Roma.
- BONI C., BONO P. & CAPPELLI G. (1986) – *Schema idrogeologico dell'Italia centrale*. Mem. Soc. Geol. It., 35, 991-1012.
- BONI C., BONO P. & CAPPELLI G. (1988) – *Carta dei sistemi idrogeologici del territorio della Regione Lazio, scala 1:200.000*. Regione Lazio, Univ. degli Studi "La Sapienza", Roma.
- BONI C., BONO P., CALDERONI G., LOMBARDI S. & TURI B. (1980) – *Indagine idrogeologica e geochemica sui rapporti tra ciclo carsico e circuito idrotermale nella Pianura Pontina (Lazio meridionale)*. Geol. Appl. e Idrog., 15, 203-247, Bari.
- BONO P., CARBONI M.G. & ESU D. (1980) – *Analisi petrografica e paleogeologica dei sondaggi Mazzocchio nella Pianura Pontina*. (Relazione inedita, citata in: M. MANFREDINI 1990). Roma.
- BOROLI ACHILLE & ADOLFO (1974) – *Matematica-Fisica*. In: "Enciclopedia Italiana delle Scienze". Istituto Geografico De Agostini, 2, Novara.
- BRUNAMONTE F. & SERANGELI S. (1996) – *Evoluzione naturale ed intervento antropico nello sviluppo dei fenomeni di subsidenza nella Pianura Pontina*. Mem. Soc. Geol. It., 51, 823-836.
- BRUNAMONTE F. & SERVA L. (1990) – *Subsidenza e distribuzione dei terreni ad elevata componente organica nella Pianura Pontina (Lazio meridionale)*. Geol. Applicata e Idrog., 25, 235-264.
- BRUNO R. & RASPA G. "La Pratica della Geostatistica non Lineare-Il Trattamento dei Dati Spaziali". Ed. Guerini, 1994.
- CAMPONESCHI B. & NOLASCO F. (1983) – *Le risorse naturali della Regione Lazio. Monti Lepini e Pianura Pontina*. Regione Lazio, 8, Roma.
- CANCELLI A. (1986) – *Aspetti geotecnici della subsidenza*. In A. ZAVATTI (a cura di): "Ambiente: protezione e risanamento", 1, 769-803. Pitagora Editrice, Bologna.
- CAPELLI G., SALVATI R., GARELLO M. & COLUMBRI A. (2002) – *Progetto Sinkhole del Lazio*. Regione Lazio & Dip. Di Scienze Geologiche, Univ. degli Studi di Roma TRE, Roma.
- CARBOGNIN L. (1986) – *La subsidenza indotta dall'uomo nel mondo. I casi più significativi*. Boll. Ass. Min. Subalpina, 23 (4), 433-468.
- CAPELLI G., MAZZA R., GAZZETTI C. (a cura di). (2005) - Quaderni di tecniche di protezione ambientale N. 78 ( Strumenti e strategie per la tutela e l'uso compatibile della risorsa idrica nel Lazio – Gli acquiferi vulcanici - a cura di Capelli G., Mazza R & Gazzetti C.). Pitagora Editrice Bologna, 2005.
- CARLOMAGNO A. (1995) – *Aggiornamento ed integrazione indagini geotecniche*. Piano Regolatore Generale, Comune di Pontinia.

- CATALANO G. & GERARDI A. (2004) – Applicazione del metodo SINTACS agli acquiferi della Provincia di Latina. Attività di ricerca svolte nell'ambito della predisposizione del Piano di Tutela della Regione Lazio (DGR 687/04).
- CELICO P. (1981) – *Metodologia di calcolo e possibilità di utilizzazione dei principali parametri idrodinamici dell'acquifero carbonatico dei Monti Lepini (Lazio meridionale)*. Memorie e Note dell'Istituto di Geol. Appl., 16, Napoli.
- CELICO P. (1983) – *Idrogeologia dei massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale*. Quaderni della Cassa per il Mezzogiorno, 4 (2), Roma.
- CESTELLI GUIDI C. (1978) – *Riflessi della subsidenza dei suoli sulla stabilità delle opere ed interventi di salvaguardia*. Atti Convegno: "I problemi della subsidenza nella politica del territorio e della difesa del suolo", Pisa, novembre 1978, 8, 72-82.
- CHIESA G. (1991) – *Pozzi per acqua*. Biblioteca Tecnica Hoepli, Milano.
- CHILÈS J. P. E DELFINER P. (1999) – *Geostatistics. Modelling Spatial Uncertainty*. Wiley Series in Probability and Statistics, 1999.
- CIVITA M., DE MAIO M. (1997): SINTACS Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia e automazione, *Pitagora Ed.*, Bologna, 191 pp.
- CIVITA M., DE MAIO M. (2000): Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5, *Pitagora Ed.*, Bologna, 226 pp.
- CLARK L. & TURNER D.A. (1983) – *Experiments to assess the hydraulic efficiency of well screens*. *Groundwater*, 21 (3), 270-286.
- COLOMBO P. & COLLESELLI F. (1996) – *Elementi di geotecnica*. Zanichelli Editore, Bologna.
- CONFORTO B. (1955) – *Contributo alla conoscenza idrogeologica della fascia costiera laziale*. *Geotecnica*, 6, 278-295.
- CONFORTO B., DI RICCO G. & SAPPÀ M. (1962) – *Indagine sulle acque sotterranee dell'Agro Romano e Pontino*. Seconda parte: Agro Pontino. Cassa per il Mezzogiorno, Roma.
- CONSORZIO ACQUE (1992) – *Schemi idrici del Lazio meridionale*. Assessorato Lavori Pubblici e Informatica, Regione Lazio.
- D'ERME V., MAMMUCCARI R. & TRASTULLI P.E. (1984) – *Le Paludi Pontine*. Newton Compton Editori, Roma.
- DE MARSILY G. (1986) – *Quantitative Hydrogeology*. Academic Press, San Diego, California.
- DE VITO L. (a cura di) (1980) – *Studio idraulico delle utilizzazioni delle risorse idriche nel Comprensorio Pontino*. 128 pp. Regione Lazio, Roma.
- DI FILIPPO M. & TORO B. (1980) – *Analisi gravimetrica delle strutture geologiche del Lazio meridionale*. *Geologica Romana*, 19, 285-294, Roma.
- DI MOLFETTA A. (2000) – *Ingegneria degli acquiferi* (dispense del corso). Facoltà di Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio, Politeko, Torino.
- DROOGERS P. & ALLEN R.G., 2002 - *Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions*. *Irrigation and Drainage Systems* 16: 33-45, 2002.
- FABBRICATORE G. (1994) – *Elettrotecnica e applicazioni: reti, macchine, misure, impianti*. Liguori, Napoli.
- FAO (1990) - *Report on the Expert Consultation on procedures for revision of FAO: Guidelines for prediction of crop water requirements*. FAO Roma 28-31 maggio 1990. Smith M.
- FETTER C.W. (1994) – *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- FUNICELLO R. & PAROTTO M. (1978) – *Il substrato sedimentario nell'area dei Colli Albani: considerazioni geodinamiche e paleogeologiche sul margine tirrenico dell'Appennino Centrale*. *Geologica Romana*, 17, 233-287, Roma.
- GAZZETTI C., LOY A., ROSSI S., SARANDREA P., VENTURA G. (2005) – *Calcolo di parametri naturali del bilancio idrogeologico*. Capelli G., Mazza R. Gazzetti C. (a cura di) – Strumenti e strategie per la tutela e l'uso compatibile della risorsa idrica nel Lazio. Quaderni di tecniche di protezione ambientale n. 78, 81-94. Pitagora Editrice, Bologna.
- GAZZETTI C., VENTURA G. (2005) – *Strumenti conoscitivi e metodologie per la definizione del bilancio idrogeologico*. Capelli G., Mazza R. Gazzetti C. (a cura di) – Strumenti e strategie per la tutela e l'uso compatibile della risorsa idrica nel Lazio. Quaderni di tecniche di protezione ambientale n. 78, 81-94. Pitagora Editrice, Bologna.
- HARGREAVES G.H. & SAMANI Z.A. (1985) – *Reference Crop Evapotranspiration from Temperature*. *Appl. Eng. Agric.*, vol. 1, no 2: 96-99, 1985.
- IPPOLITO F., NICOTERA P., LUCINI P., CIVITA M. & DE RISO R. (1993) – *Geologia tecnica*. UTET Libreria, Torino.
- ISTITUTO SUPERIORE DI SANITÀ (1942) – *Approvvigionamento idrico dell'Agro Pontino*. *Rendiconti Ist. Sup. di Sanità*, 5 (1), Roma.
- JÜRGEN H. (1972) – *German Institute reports well-screen efficiency tests*. *The Johnson Driller's Journal*, July/August.
- KENNESSEY (1930) – *Lefolyasi téniszok és retenciok*. *Vizugy, Koziemènyek*.
- LOMBARDI L. (1968) – *Il pozzo Fogliano nei pressi di Latina e la paleogeografia dell'area*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 87, 13-18, Roma.
- MANFREDINI M. (1967) – *Problemi idrogeologici della piana costiera laziale a sud dei Colli Albani*. *L'Industria Mineraria*, 6, 229-237, Roma.
- MANFREDINI M. (1990) – *Idrografia pleistocenica della bassa valle del F. Tevere (Italia centrale)*. *Il Quaternario*, 3 (1), 39-59, Roma.
- MARINUCCI E., ALIMONTI C. & GAZZETTI C. (2004) – *Studio sul possibile recupero di pozzi per acqua nella Pianura Pontina*. Atti Convegno: "Problemi di geoingegneria: sondaggi e perforazioni", indetta dall'Associazione Nazionale Ingegneri Minerari, delle Georisorse e delle Geotecnologie, in collaborazione con l'Università di Bologna "Alma Mater Studiorum", "GEOfluid 2004", Piacenza, 9 ottobre 2004, 81-96
- MARINUCCI E., ALIMONTI C. & GAZZETTI C. (2005) – *Perdita idrica indotta dalle captazioni di acque sotterranee: il caso della Pianura Pontina*. Atti Convegno: "Aquifer Vulnerability and Risk, 2<sup>nd</sup> International Workshop - 4<sup>th</sup> Congress on the Protection and Management of Groundwater", Parma, 21-23 Settembre 2005
- MERLONI G. (2004) – *La pianificazione della risorsa idri-*

- ca nei bacini regionali del Lazio” in “*Il governo delle risorse idriche*”. – Sermoneta 9-11-2006. – a cura di G. Panizzi.
- MESSIA B. (1986) – *Cause naturali ed antropiche del fenomeno di subsidenza nell’area della Pianura Pontina: tentativo di valutazione*. Tesi di laurea inedita. Dip. Scienze della Terra, Univ. degli Studi “La Sapienza”, Roma.
- MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI (1934) – *Le sorgenti italiane: elenco e descrizione*. Istituto Poligrafico dello Stato, 3, Roma.
- MINISTERO DELL’AGRICOLTURA, INDUSTRIA E COMMERCIO (1892) – *Lazio. Idrografia*. Memorie illustrative della Carta Idrografica d’Italia, 4, Roma.
- MOUNTON J. (1977) – *Contributo allo studio delle acque sotterranee dell’Agro Pontino e Romano*. Atti Convegno: “L’acqua per la Pianura Pontina: situazione e prospettive”, Latina, 115-156.
- NICOLAY N.M. (1800) – *De’ bonificamenti delle terre Pontine Libri IV: opera storica, critica, legale, economica, idrostatica, compilata da N.M. Nic. Romano e corredata di ogni genere di documenti, piante topografiche, profili, etc.* 426 pp. nella Stamperia Paglierini, in Roma.
- NOVARESE V. (1930) – *Trivellazione profonda nell’Agro Pontino*. Boll. Regio Ufficio Geol. d’It., 55, nota XI, Roma.
- NOVARESE V. (1942) – *Le sorgenti dell’Amaseno*. Boll. Regio Ufficio Geol. D’It., 67, nota I, Roma.
- NOVARESE V. (1943) – *Il Miocene della Valle Latina*. Boll. Regio Ufficio Geol. D’It., 68, nota III, Roma.
- PRAMPOLINI N. (1939) – *La bonifica idraulica delle Paludi Pontine*. Roma.
- PROVINCIA DI LATINA (2004) – “Progetto monitoraggio acque superficiali interne e costiere”. Relazione inedita.
- PUPPINI U. (1997) – *Esempi di ristrutturazione e recupero dei pozzi esistenti per un migliore utilizzo delle risorse idriche sotterranee. Tecnologie e costi*. Atti Convegno: “Aspetti economici relativi all’approvvigionamento e alla gestione delle acque sotterranee”, Milano, 10 dicembre 1997. Ingegneria e Geologia degli Acquiferi, 9, 69-72.
- RAPPINI G. (1777) – *Relazione e voto dell’ingegnere Gaetano Rappini sopra il disseccamento delle Paludi Pontine alla Santità di S.M. Papa Pio VI*. Riproduz. anastatica dell’originale. Roma, 1983.
- RAPPINI G. (1778) – *Pianta delle Paludi Pontine*. Incisa a Roma da G. Chigi il 14 febb. 1778. Roma.
- RASPA G.. (2005) – *Fattori meteo-climatici per il bilancio idrogeologico*. Quaderni di tecniche di protezione ambientale N. 78 (Strumenti e strategie per la tutela e l’uso compatibile della risorsa idrica nel Lazio – Gli acquiferi vulcanici - a cura di Capelli G., Mazza R & Gazzetti C.). Pitagora Editrice Bologna, 2005
- REMIDDI R. (1911) – *Memorie storiche e tecniche sulla bonifica delle Paludi Pontine*. Tip. dell’Unione Editrice, Roma.
- SAPIO G. (1955) – *Caratteristiche geotecniche dei terreni organici*. Geotecnica 2, 227-246.
- SERVIZIO GEOLOGICO D’ITALIA (1989) – *Carta Geologica d’Italia, scala 1:100.000. Foglio 159*, Roma.
- SILVESTRONI P. (1994) – *Fondamenti di chimica*. Masson S.p.A Editoriale Veschi, Milano.
- TANCREDI G. (2002) – *Stabilità dei pendii* (dispense del corso). Facoltà di Ingegneria per l’Ambiente ed il Territorio, Univ. degli Studi “La Sapienza”, Roma.
- TRAMPOLINI, N. (1939). *La bonifica idraulica delle Paludi Pontine*. Roma.
- TULIPANO L. (2000) – *Idrogeologia applicata* (dispense del corso). Facoltà di Ingegneria per l’Ambiente ed il Territorio, Univ. degli Studi “La Sapienza”, Roma.
- VENTURA G., GAZZETTI C., LOY A., ROSSI S., SARANDREA P. (2000) – *La valutazione dei prelievi nel bilancio idrogeologico per la gestione dello sfruttamento degli acquiferi*. Atti della “Giornata mondiale dell’acqua; Roma, 22 Marzo 2000.
- VENTURA G., GAZZETTI C., SARANDREA P. & ROSSI S. (2001) – *Compatibilità dei regimi di captazione delle fonti di approvvigionamento idropotabile previsti al 2015 con i bilanci idrogeologici degli acquiferi*. Autorità dei Bacini Regionali del Lazio, Roma (Rapporto inedito).
- WAKERNAGEL (1995) – *Multivariate Geostatistics*. Springer, 1995.

Finito di stampare nel mese di dicembre 2006

GANGEMI  EDITORE SPA - ROMA

[www.gangemieditore.it](http://www.gangemieditore.it)