

F. BALDACCI (*), L. BELLINI (**), G. RAGGI (*)

LE RISORSE IDRICHE SOTTERRANEE DELLA PIANURA PISANA

1. INTRODUZIONE.....	pag. 243
2. CARATTERI ORO-IDROGRAFICI.....	» 245
3. CENNI CLIMATICI.....	» 250
4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO ED EVOLUZIONE PALEOGEOGRAFICA.....	» 256
5. IL SISTEMA ACQUIFERO DELLA PIANURA PISANA.....	» 266
5.1. Lineamenti idrogeologici.....	» 266
5.2. Acquifero multistrato confinato (Amc).....	» 273
5.2.1. Ricostruzione litostratigrafica.....	» 275
5.2.2. Condizioni piezometriche.....	» 282
5.2.3. Caratteristiche idrochimiche.....	» 285
5.3. Schemi di alimentazione dell'Amc.....	» 290
5.3.1. Ricarica diretta.....	» 291
5.3.2. Ricarica indiretta.....	» 291
6. BILANCI IDROLOGICI.....	» 298
6.1. Premessa.....	» 298
6.2. Elementi di bilancio.....	» 300
6.2.1. Afflussi.....	» 300
6.2.2. Temperature.....	» 301
6.2.3. Evapotraspirazione.....	» 301
6.2.4. Coefficienti di deflusso.....	» 302
6.3. Risultati di bilancio.....	» 304
7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	» 308

Riassunto - La Pianura di Pisa è lo sbocco, idrologico ed idrogeologico, di un complesso sistema di bacini fluviali (Arno, Serchio e bacini minori tra questi compresi e/o che in essa direttamente confluiscono); l'insieme di questi ultimi è stato definito come "Bacino idrografico della Pianura di Pisa".

(*) Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pisa, Via S. Maria, 53, Pisa.

(**) Via V. Vallerio, n.3, Torino. Lavoro eseguito nell'ambito dei Programmi del C.N.R.- Centro di Studio per la Geologia Strutturale e Dinamica dell'Appennino. Con il contributo dei fondi MURST 40% - Progetto Genesi ed Evoluzione delle Pianure dell'Italia peninsulare (Resp. P.R. Federici).

Dopo un suo inquadramento ed una sua caratterizzazione, fisio-climatici, geologico-paleogeografici e morfo-strutturali, è stato definito il **Sistema acquifero della Pianura Pisana (Sap)**, "sistema aperto" composto da:

- **Complesso acquifero della Pianura Pisana**, dove ha sede un **Acquifero multistrato confinato (Amc)**
- **Strutture idrogeologiche "incassanti"**

Dell'**Amc** è stata effettuata una ricostruzione lito-stratigrafica e piezometrica, nonché una caratterizzazione idrochimica.

Su queste basi sono stati determinati i rapporti geometrici e funzionali tra le varie strutture idrogeologiche che costituiscono il **Sap**; sono stati inoltre individuati vari *Settori di alimentazione* (diretta o indiretta) dell'**Amc**, che svolge il ruolo di "recapito" finale di tutto il **Sistema**.

La discarica complessiva del **Sap** è in gran parte artificiale, dai pozzi che attingono all'**Amc**; ciò determina condizioni piezometriche che ne limitano la naturale discarica a mare, provocando fenomeni di intrusione salina.

La valutazione delle risorse idriche sotterranee, mediante metodologie di bilancio che, come è noto, prevedono la quantificazione dei principali elementi idroclimatici (e quindi delle Disponibilità idriche globali), è stata affrontata distinguendo i contributi provenienti dai vari *Settori di alimentazione*; le differenti condizioni fisiografiche ed idrogeologiche di questi ultimi hanno portato ad un diverso grado di approssimazione nelle stime effettuate.

Viene infine proposto (per il **Sap**) un *Modello concettuale* della ricarica proveniente dall'esterno, nel quale sono stati introdotti dati quantitativi, aventi anch'essi diverso significato e grado di approssimazione, tratti dalla Letteratura e da studi inediti degli Autori.

Abstract - Underground water resources on the Pisa Plane. The Pisan Plain represents the final part (both hydrological and hydrogeological) of a complex hydrographic system made up chiefly by the Arno and the Serchio Basins, and, subordinately, by some smaller tributary basins directly joining the plain.

After a detailed assessment of the physiographic, climatic, geological, paleogeographic and morfo-structural features of the "Pisan plain hydrographic basin", the **Pisan Plain Aquifer System (Sap)** has been defined; this "open system" consist of:

- **Plain Complex Aquifer**, made up of a **Confined Multistratum Aquifer (Amc)**
- **Substratum Hydrogeological Structures**

A litho-stratigraphic and piezometric reconstruction of **Amc**, as well as its hydrochemical character, was made.

The structural and functional relationship among the different elements of the **Sap** has been determined; the different "Recharge Areas" of the **Amc**, which represents the "meeting point" of the system, have been defined.

The discharge of the **Sap** is mostly artificial by a lot of wells drilled in the **Amc**. The water pumped from the **Amc** produces a draw-down which causes a marine sea-water intrusion phenomena.

The budget of underground water resources has been calculated for each feeding areas.

At least, a Conceptual Model for the external recharge of the **Sap** is proposed; this model combines quantitative data obtained both from literature and unpublished works of the Authors.

Key Words: Regional hydrogeology; Coastal, alluvial and delta plain aquifer; Water resources; Hydrographic and hydrogeological basins; Aquiferous structures and systems; Confined multistratum aquifer; Hydrologic and hydrogeological budget.

1. INTRODUZIONE

La pianura costiera e fluviodeltizia che prende il nome dalla città di Pisa, corrispondente alla parte terminale del corso dell'Arno e del Serchio (vedi fig. 1 e 2a-b), fin dai tempi preistorici e nei diversi habitat imposti dalla sua più recente evoluzione paleogeografica, è stata sede di insediamenti umani e crocevia di comunicazioni, che ne hanno profondamente modificato il paesaggio naturale; in particolare le grandi opere di bonifica e di sistemazione idraulico-agraria, iniziate nel periodo romano-imperiale, vi hanno reso il sistema di drenaggio quasi completamente artificiale, rettificando anche i suddetti corsi d'acqua.

In epoca moderna, i rapidi incrementi demografici, accompagnati dalla crescita dei centri urbani (si confrontino in proposito le carte corografiche delle figg. 2a-b) e delle attività produttive (commerciali, turistiche, agricole ed industriali), hanno reso sempre più pressanti le rispettive richieste di approvvigionamento idrico.

Per contro, l'accelerato sviluppo industriale e le nuove pratiche di fertilizzazione chimica introdotte in agricoltura hanno provocato, soprattutto negli ultimi decenni, gravi e diffusi fenomeni di inquinamento delle acque superficiali e sotterranee, riducendo drasticamente le risorse sfruttabili per i vari usi.

Gli irrazionali emungimenti in prossimità del litorale hanno inoltre innescato ulteriori fenomeni di inquinamento, dovuti alla intrusione di acque marine.

Le falde freatiche superficiali, peraltro scarsamente produttive e maggiormente vulnerabili, sono divenute pressochè inutilizzabili; si è così intensificato lo sfruttamento di quelle "artesiane"⁽¹⁾, a profondità crescenti con l'aumento dei fabbisogni ed il parallelo perfezionamento delle tecniche di perforazione dei pozzi.

Mancano d'altra parte, sui rilievi adiacenti alla pianura, sorgenti in grado di fornire apprezzabili contributi all'approvvigionamento di grandi nuclei urbani come Livorno e Pisa, seppure ad uso strettamente idropotabile; inoltre le condizioni di estremo degrado in cui si trovano i due maggiori corsi d'acqua (Arno in particolar modo), che solcano la Pianura pisana, non consentono di integrare, a costi contenuti, le

⁽¹⁾ La definizione di "artesiane" (falda in pressione fluente al di sopra del piano di campagna), con la quale sono state storicamente denominate le falde della Pianura di Pisa (M. CANAVARI, 1928; I. DINI, 1976; L. TREVISAN e E. TONGIORGI 1953), è attualmente impropria, a causa del generale abbassamento piezometrico provocato dagli intensi emungimenti.

insufficienti risorse sotterranee con la potabilizzazione di acque superficiali.

Per tutto quanto sopradetto, un sempre maggiore interesse si è rivolto alle falde acquifere profonde⁽²⁾, che sono state intensamente sfruttate, spesso oltre i limiti delle loro potenzialità, causando estese ed accentuate depressioni piezometriche (fino a 5-6 metri sotto il livello medio marino). Ciò ha provocato crescenti rischi di inquinamento per il drenaggio di acque dalla superficie, nonché il depauperamento delle riserve idriche, in assenza di una qualsivoglia verifica di compatibilità a scala regionale tra gli emungimenti in atto e i cicli naturali di rinnovamento delle risorse.

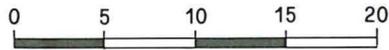
Questo studio si prefigge pertanto di fornire un contributo alla valutazione delle risorse idriche "artesiane" della Pianura Pisana, attraverso metodologie di bilancio, una volta definite le modalità della loro alimentazione.

Per quanto non siano stati specificamente affrontati, tra le varie e complesse problematiche coinvolte negli studi sull'approvvigionamento idrico, gli aspetti idrodinamici, da un lato, e quelli gestionali dall'altro, riteniamo che i risultati conseguiti debbano rappresentare un'indispensabile base conoscitiva per impostare qualsiasi pianificazione e ottimizzazione nella ricerca e nello sfruttamento delle falde sotterranee; potranno inoltre derivarne i criteri guida per proteggerle dagli inquinamenti ed eventualmente per incrementare le loro potenzialità, attraverso procedimenti di ricarica artificiale.

2. CARATTERI ORO-IDROGRAFICI

La Pianura di Pisa, con la sua propaggine costiera versiliese (vedi fig. 2a e tav. 1 f.t.), è il terminale del complesso sistema idrografico Arno-Serchio, fiumi attualmente indipendenti tra loro e da gran parte di quelli originati dai rilievi che delimitano la pianura stessa. È da notare infatti che, a valle della stretta di Ripafratta, il bacino del Serchio coincide con i suoi argini artificiali; ciò si verifica anche per l'Arno a valle della confluenza con il Fiume Era, con l'eccezione del Torrente Zambra (Valle di Calci) e di alcuni torrenti minori, che scendono dalla terminazione sud-orientale dei Monti Pisani.

(2) Gli acquiferi finora maggiormente sfruttati sono riferibili a due orizzonti, conosciuti nell'uso corrente, più che nella limitata letteratura, come "Primo acquifero artesiano in sabbia" (sopostante) e "Primo acquifero artesiano in ghiaia".



Si configurano in tal modo ampie aree di drenaggio (naturale ed artificiale), in gran parte frapposte ai bacini dell'Arno e del Serchio (vedi fig. 1), che possiamo definire, nel loro insieme, come "Bacino idrografico della pianura di Pisa".

La pianura costiera di cui si tratta è il risultato dell'accumulo dei depositi fluvio-palustri dei suddetti sistemi idrografici, nonché di quelli eolico-transizionali dei lidi e delle dune litoranei, nell'insieme progredienti verso il mare aperto.

L'evoluzione paleogeografica della Pianura Pisana e, specificamente, quella paleoidrografica dei Fiumi Arno e Serchio, a partire da antiche superfici di regressione marina, legate soprattutto ad abbassamenti glacio-eustatici del livello del mare, è stata ricostruita in un recente lavoro di FEDERICI e MAZZANTI (1988); a questi Autori, nonché a DELLA ROCCA *et al.* (1987), si rimanda anche per una sua puntuale definizione storica, amministrativa, fisico-geografica e geomorfologica.

Nell'ambito del presente studio idrogeologico, ci limitiamo ora a descrivere brevemente i lineamenti fisiografici della Pianura stessa e dei rilievi montuosi che la inquadrano, mentre la sua storia geologica verrà riassunta nel paragrafo che segue.

L'area pianeggiante, di forma nell'insieme trapezoidale, si restringe notevolmente dalla costa verso l'interno, dove confluiscono le Valli di Bientina, dell'Arno e del suo affluente di sinistra Fiume Era; su questo lato, posto a circa 30 km dal mare, la piatta superficie alluvionale si trova a quote intorno ai 15 metri s.l.m.. La debole pendenza (0,05%) dei depositi fluvio-palustri provoca, anche attualmente, vasti ristagni di acqua, con tendenza alla formazione di nuove aree paludose, nonostante le opere di canalizzazione e di bonifica effettuate nel corso dei secoli. Tali fenomeni di difficoltoso drenaggio superficiale sono accentuati, verso il mare (zone della Costanza e di Castagnolo-Coltano), dallo sbarramento rappresentato dal complesso sistema di lidi e dune litoranei, sopraelevati di pochi metri (le quote non superano in genere i 3 m s.l.m.) rispetto alla piana alluvionale ed alle interposte depressioni ("lame"). I lidi ("cotoni") corrispondono ad antiche barre costiere, successivamente emerse, e sono allungati secondo la direzione delle precedenti linee di riva; le dune ("tomboli") sono più frammentarie, legger-

Fig. 2 a,b - Inquadramento fisiografico della Pianura di Pisa. Si noti la grande estensione e diffusione dei centri e nuclei abitati nella situazione attuale (a), rispetto a quella del 1850 (b).

a - Da: Carta generale del Territorio; REGIONE TOSCANA-SELCA FIRENZE, 1988.

b - Da: Carta Geometrica della Toscana di G. Inghirami (1850), ricavata dal vero nella proporzione di 1:200.000 e dedicata a S.A.I. Leopoldo II; SELCA FIRENZE, 1988.

mente più elevate, e la loro origine eolica le rende relativamente indipendenti dalla direzione del litorale.

Alla serie di tali cordoni sabbiosi, che coprono una fascia costiera larga 5-6 Km, seguono, verso l'interno e prevalentemente a sud dell'Arno, più pronunciati rilievi (quote massime intorno ai 15-18 m), di più antica origine eolica (Palazzetto, Castagnolo e Isola di Coltano), e attualmente incisi in forme più complesse rispetto a quelle dei suddetti cordoni litoranei. Nella pianura alluvionale retrodunare, i depositi limo-sabbiosi di esondazione "formano aree leggermente rilevate nei confronti di quelle che furono occupate dai paduli e dai sedimenti alluvionali più fini" (DELLA ROCCA *et al.*, 1987).

L'ampiezza della spiaggia attuale è mediamente crescente, nei due sensi opposti, a partire da Bocca d'Arno, con massimi intorno a 180 metri tra Bocca di Serchio e Fosso della Bufalina, verso Nord, e intorno a 100 metri presso Calambrone; la tendenza evolutiva della spiaggia stessa varia soprattutto in relazione alla sua posizione rispetto alle foci del Serchio e dell'Arno, nonché al *drift* divergente a partire dalla foce del secondo (Autori vari - Atlante delle Spiagge Italiane; CNR, S.E.L.C.A. - Firenze, 1984): all'arretramento, tra Bocca di Serchio e Lido di Tirrenia, si contrappone un avanzamento, nei tratti Bocca di Serchio - Fosso della Bufalina e Lido - Calambrone.

È da mettere in rilievo, per le sue relazioni con le depressioni piezometriche, che la Piana di Pisa è attualmente interessata da una notevole subsidenza, che varia tra valori puntuali minimi di pochi mm/anno a massimi di 10-20 mm/anno (Ibidem).

Sul lato settentrionale (in destra idrografica del F. Serchio), la pianura si prolunga, come già accennato, nella Bassa Versilia restringendosi in corrispondenza del Lago di Massaciuccoli, di origine retrodunare; questo è collegato al mare attraverso il Fosso della Bufalina, che funziona alternativamente da emissario e da immissario, in rapporto soprattutto alla bassa e all'alta marea, oltre che al bilancio idrologico del lago stesso.

Verso nord-ovest, la Pianura è chiusa dalla pronunciata dorsale che dai Monti Pisani (culminazione a quota 917 del M. Serra) si estende ai Monti D'Oltre Serchio (quote massime intorno ai 200 m); i due gruppi montuosi sono separati dalla Valle di Ripafratta, attraverso la quale passa il Serchio proveniente dalla Pianura di Lucca. La fascia pedemontana dei Monti Pisani-Monti d'Oltre Serchio presenta caratteri di sovralluvionamento, dovuti a più fasi di innalzamento glacio-eustatico del livello marino; lungo di essa tratti con ripide pareti calcaree si alternano a tratti che si raccordano a meno ripidi versanti montuosi

attraverso estesi apparati detritico-alluvionali, talvolta conformati a cono di deiezione e/o terrazzati.

L'ampia Valle di Bientina, un tempo percorsa dal Paleo-Serchio e successivamente in parte occupata dall'omonimo Lago attualmente bonificato ("Alveo del Lago di Bientina"), separa a sua volta i Monti Pisani dalle Cerbaie; il Lago — padule di Bientina, originato dallo sbarramento alluvionale da parte dell'Arno, è stato definitivamente prosciugato nel 1859, con la realizzazione del sistema di canali Emissario di Bientina — "Botte" di S. Giovanni alla Vena — Arnaccio, che sboccano direttamente in mare presso Calambrone (Livorno).

Le Colline delle Cerbaie, caratterizzate da forme terrazzate in fase avanzata di smantellamento, con superfici sommitali raccordantisi tra di loro (quote massime poco superiori ai 100 m) e debolmente inclinate verso la Valle morta di Bientina, costituiscono l'interfluvio tra la valle stessa e quella dell'Usciana, appartenente al bacino idrografico dell'Arno.

Verso sud, il limite fisiografico della pianura è rappresentato dalla scarpata ("Gronda dei Lupi") del "Terrazzo di Livorno", di abrasione marina, e dalle Colline Pisane; queste ultime sono, come le Cerbaie, rilievi marcatamente difformi dai Monti Pisani, sia per gli interfluvi a sommità frequentemente spianate, sia per le valli ampiamente alluvionate fino alle loro testate. Sulle Colline Pisane, lo spartiacque tra il "Bacino della Pianura di Pisa" e quello del Fiume Fine si mantiene in gran parte a quote poco superiori ai 150 metri; alle due estremità (occidentale ed orientale) di tale spartiacque, il paesaggio torna ad assumere nuovamente un aspetto montuoso, appunto sulla catena costiera dei Monti Livornesi e sui Monti di Casciana T. (propaggine settentrionale dei M. di Castellina), che culminano rispettivamente alle quote 462 di M. Lecceta e 498 di P.gio Palmorelle.

La fascia meridionale della Pianura Pisana è segnata da blande ondulazioni (quote massime intorno ai 20-30 metri, con dislivelli rispetto all'adiacente pianura alluvionale di 10-15 m), costituite da depositi eolici e fluvio-palustri antichi (Pleistocene sup.), disposte a festone unitamente alle collinette retrodunari della fascia costiera, cui sono geneticamente correlabili. Il dislivello di questi rilievi, che si presentano attualmente in forme terrazzate e sovralluvionate, è probabilmente il risultato sia dell'originario accumulo eolico, che della successiva erosione fluviale.

I corsi d'acqua originati dai Monti Pisani e dalle colline omonime sono stati canalizzati nei loro tratti di pianura e a loro volta convogliati nella fitta rete di fossi e canali che anticamente servivano, oltre che

all'irrigazione, come idrovie e come forza motrice. Recentemente (1972) sono state completate le opere di allacciamento dello Scolmatore del Fiume Arno, immediatamente a valle della confluenza con il Fiume Era e dell'abitato di Pontedera; il tracciato del nuovo canale, che era stato realizzato negli anni 1960-66, in tutto il suo tratto pedecollinare è adiacente, in destra orografica, all'antico Fosso Reale.

La rete di drenaggio artificiale collega tra di loro anche il Serchio e l'Arno, ed entrambi i fiumi con il mare.

Per mezzo di tali opere di canalizzazione sono state quasi del tutto eliminate le aree palustri ("Paduli"), che occupavano soprattutto la fascia retrodunare a sud dell'Arno.

Come già accennato, nei tratti terminali dell'Arno e del Serchio l'andamento spiccatamente meandriforme è stato rettificato, con interventi compiuti tra il 1300 e il 1700; numerosi sono anche i meandri abbandonati, per effetto della naturale evoluzione di questo tipo di alveo fluviale.

3. CENNI CLIMATICI

Sulla base dei dati rilevati alle stazioni del Servizio Idrografico e Mareografico del Ministero dei LL.PP. - Sezione di Pisa (Annali Idrologici - Parte I, 1951-1980) e degli studi eseguiti da F. Rapetti e S. Vittorini (1988 e 1989), riguardanti soprattutto la fascia costiera, è possibile definire un quadro delle caratteristiche climatiche della Pianura Pisana e dei rilievi montuosi adiacenti.

La *Temperatura* media annua, riferita al periodo 1951-80, oscilla dai 14.8°C delle stazioni di Pontedera e Pisa, ai 15.1°C di Viareggio, fino ad arrivare ai 15.4°C di Livorno. Pur considerando che l'elevata temperatura di Livorno dipende anche dall'"isola di calore" prodotta dalla sua zona industriale, questi valori denotano una progressiva diminuzione di questo elemento climatico dal litorale verso l'interno. In fig. 3 sono diagrammati i valori medi mensili di temperatura (riportati in tab. 1) delle stazioni sopracitate. L'escursione termica annua, in accordo con l'azione mitigatrice del mare, va dai circa 15°C sulla costa, ai 16°C per la stazione di Pisa, fino ad arrivare a più di 18°C a Pontedera. In fig. 4 è riportato invece l'andamento delle temperature annue per la stazione di Pisa nel periodo considerato; la variabilità è compresa tra un minimo di 13.3°C del 1956 ed un massimo di 16.0°C del 1961 ($\Delta T = 2.7^\circ\text{C}$); il trend risulta positivo anche se l'aumento medio è molto contenuto (circa 0.006°C/anno).

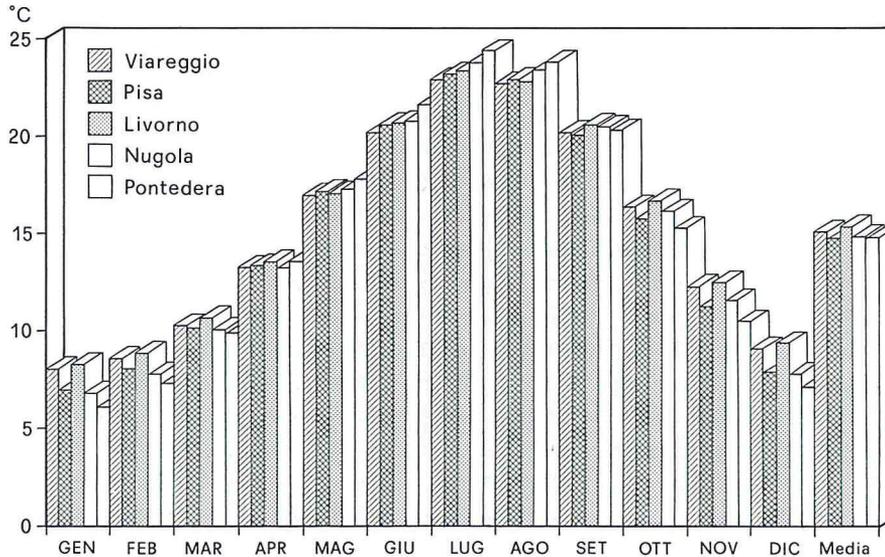


Fig. 3 - Temperature medie mensili del periodo 1951-1980.

Tab. 1 - Temperature medie mensili ed annue del periodo 1951-1980.

STAZIONE	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	MEDIA
Viareggio	8.1	8.6	10.3	13.3	17.0	20.2	22.9	22.7	20.2	16.4	12.3	9.1	15.1
Pisa	7.0	8.1	10.2	13.4	17.2	20.6	23.2	22.9	20.1	15.8	11.3	7.9	14.8
Livorno	8.3	8.9	10.7	13.6	17.1	20.7	23.4	22.8	20.6	16.7	12.5	9.4	15.4
Nugola	6.8	7.8	10.1	13.3	17.3	20.8	23.8	23.4	20.5	16.2	11.6	7.8	14.9
Pontedera	6.1	7.3	9.9	13.6	17.8	21.6	24.4	23.8	20.3	15.3	10.5	7.1	14.8

La distribuzione delle *Pioggie* è controllata prevalentemente dal sistema dei rilievi che contornano la pianura, in rapporto alla predominante provenienza delle masse d'aria umida dai quadranti occidentali, come è messo in evidenza dallo stereogramma dell'afflusso meteorico medio annuo riferito allo stesso periodo 1951-80 (fig. 5). In linea generale l'incremento delle precipitazioni si ha trasversalmente all'allineamento dei principali rilievi (Monti Pisani e Monti D'Oltre Serchio), per cui i valori minimi (tab. 2) si rilevano presso le stazioni di Livorno (783 mm) e S. Rossore (888 mm), mentre quelli massimi si registrano presso Asciano Pisano (1116 mm) e Monte Serra (1294 mm); nella parte centrale della pianura e, più a sud, nella fascia pedecollinare (sulla pro-

secuzione della valle dell'Arno), le differenze sono meno marcate e i valori di precipitazione oscillano dai 938 mm di Pisa ai 961 mm di Mortaiolo. Per quanto riguarda il regime delle piogge, l'istogramma della fig. 6, in cui sono riportate le precipitazioni medie mensili della stazione di Pisa, mostra un andamento con un massimo principale in autunno, un massimo secondario in inverno ed un minimo in estate; più in particolare, a partire dal mese di Ottobre, che risulta il più piovoso (122 mm), si ha una graduale e regolare diminuzione fino al mese meno piovoso (Luglio 26 mm), mentre il successivo incremento avviene in un periodo più breve (Luglio-Ottobre). Il regime pluviometrico è quindi di tipo submediterraneo, in buonaccordo con le caratteristiche a scala regionale (regime tipo AIPE — Rapetti e Vittorini, 1989). L'intensità oraria delle precipitazioni ha anch'essa carattere stagionale, con piogge a bassa intensità (<5 mm/h) durante i primi mesi dell'anno, e a maggiore intensità (>10 mm/h), tra Agosto e Ottobre. Nel diagramma della fig. 7 è riportato l'andamento pluriennale delle precipitazioni a Pisa, sempre per il periodo 1951-1980; le fluttuazioni sono notevoli, con ordine di grandezza che non si discosta molto dal valore medio (938); il trend è leggermente positivo e indica un aumento tendenziale di circa 0.8 mm/anno.

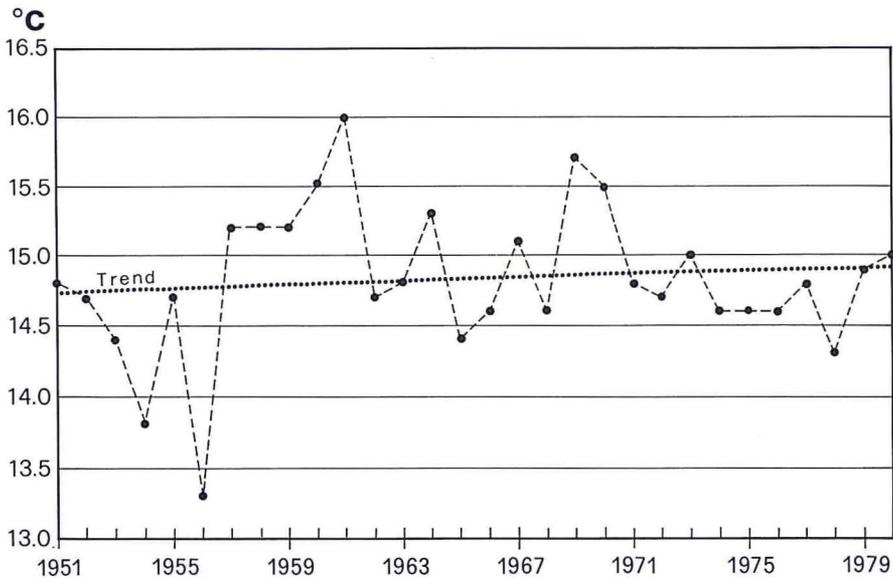


Fig. 4 - Andamento delle temperature alla stazione di Pisa nel periodo 1951-1980.

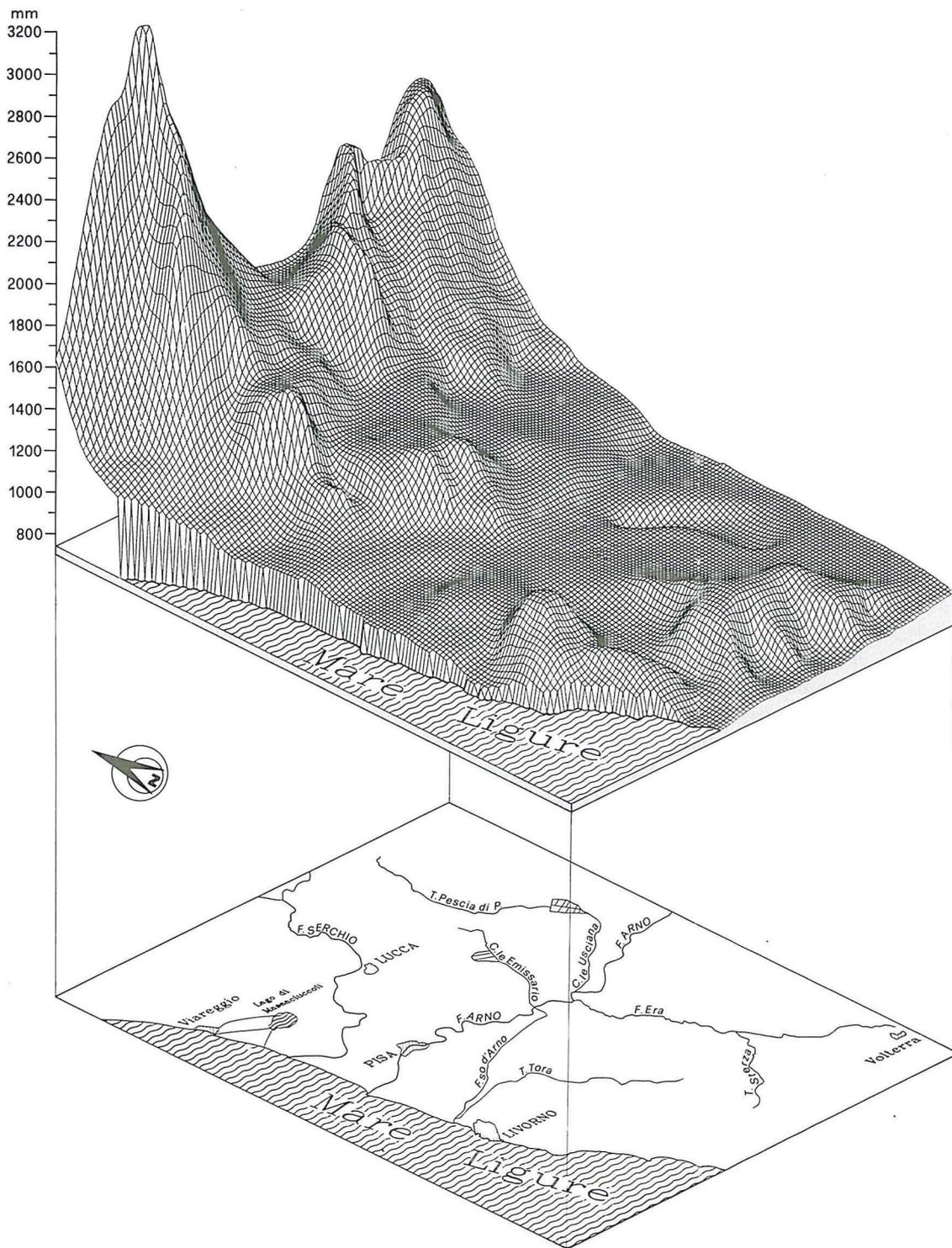


Fig. 5 - Afflusso meteorico medio annuo del periodo 1951-1980 sulla Pianura di Pisa e zone limitrofe. Stereogramma elaborato da M. Allagosta e F. Mazzarini.

Tab. 2 - Precipitazioni medie annue del periodo 1951-1980. L'ubicazione delle stazioni pluviometriche è nella fig. 5 e nella tav. 1 f.t.

STAZIONE	QUOTA m s.l.m.	PIOGGE mm	ANNI DI esercizio
Livorno	3	783	30
Nugola	19	964	30
Mortaiolo	8	961	29
Pontedera	14	960	30
S. Giovanni alla V.	16	953	29
Montemagno	190	1090	27
Monte Serra	918	1294	25
Asciano Pisano	137	1116	30
Torre del Lago	1	929	27
Viareggio	3	1024	30
Migliarino P.	3	1026	28
S. Rossore	4	888	30
Pisa	6	938	30
Coltano	1	952	28

Il regime dei *Venti* alla stazione anemometrica di S. Rossore (Luglio 1975 - Giugno 1977; Rapetti e Vittorini, 1978) è caratterizzato da frequenze prevalenti per i settori del II quadrante, con punte massime per quelli provenienti da ESE e da SE. L'intensità maggiore si ha invece per i venti provenienti dal III quadrante e soprattutto per quelli da W e WSW; si possono quindi considerare "regnanti" i venti di terra e "dominanti" quelli di mare. Le variazioni stagionali più salienti riguardano soprattutto i venti del III quadrante, con minimo in primavera e massimo in inverno. Questi caratteri sono dovuti alla presenza di una bassa pressione invernale sul Mediterraneo centro-occidentale, che innesca celle cicloniche e quindi venti anche di forte intensità (di Ponente e di Libeccio); il sensibile gradiente barico che si instaura in seguito al riscaldamento, ed alla conseguente bassa pressione nel bacino di Firenze, genera inoltre una costante circolazione di brezze durante l'estate.

I venti che più frequentemente sono accompagnati da precipitazioni si dispongono da oriente, in corrispondenza di perturbazioni provenienti dai settori nord-occidentali, ed è con tali venti che si raggiunge la massima piovosità.

* * *

In conclusione, l'elaborazione dei dati termopluviometrici, sulla

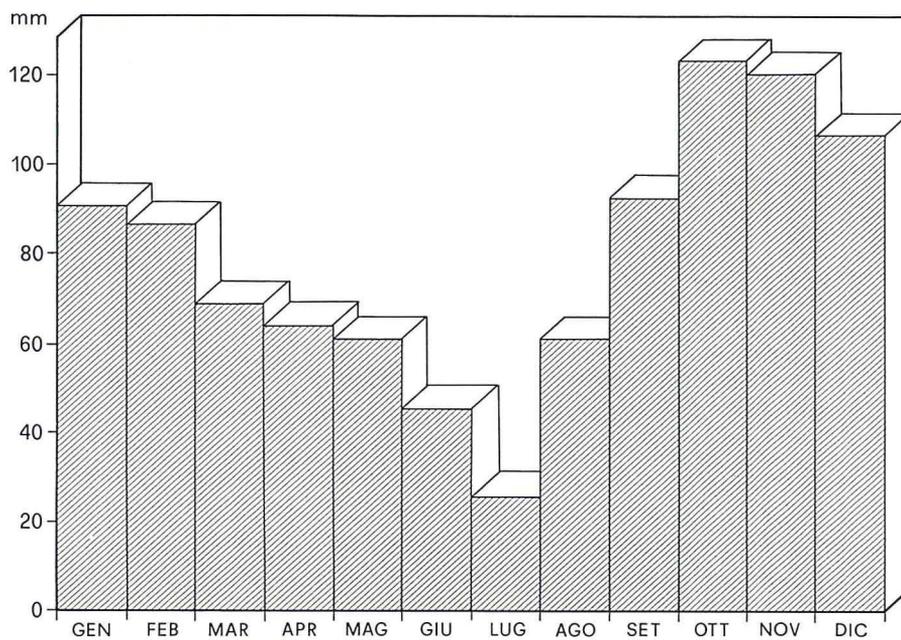


Fig. 6 - Precipitazioni medie mensili alla stazione di Pisa nel periodo 1951-1980.

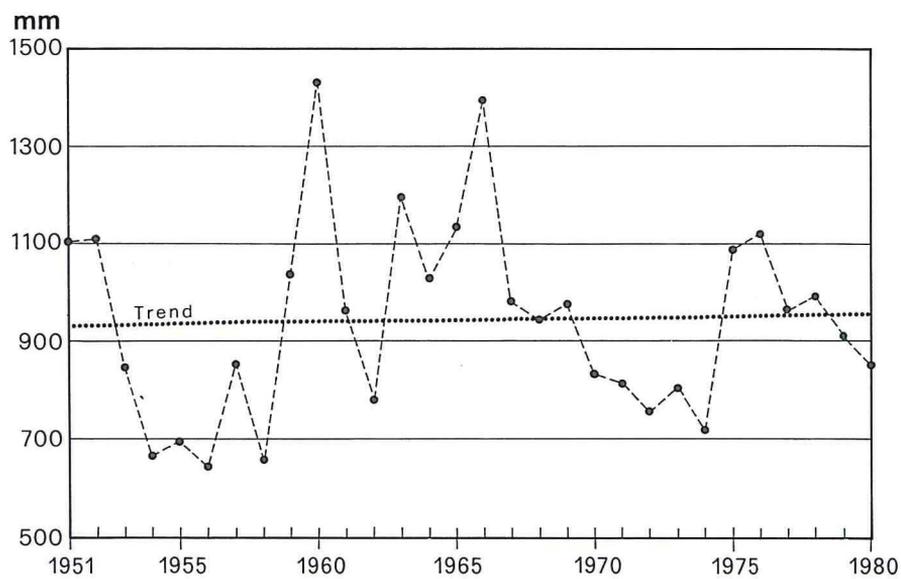


Fig. 7 - Andamento delle precipitazioni registrate alla stazione di Pisa nel periodo 1951-80.

base della classificazione climatica del Thornthwaite (Rapetti, Tomei e Vittorini, 1987), consente di osservare che la fascia litoranea a sud dell'Arno e il suo entroterra ricadono nel tipo "subumido" (C2), con indice di umidità globale (Im) inferiore a 20. Sul margine meridionale della pianura e sui modesti rilievi adiacenti (Colline Pisane - Monti Livornesi), si risente di un limitato effetto di versante, con valori dell'indice Im che si mantengono intorno a 20 (tipo "umido" B1); le barriere orografiche costituite, verso nord-est, dai Monti Pisani e dai Monti d'Oltre Serchio, determinano invece un più accentuato incremento dell'indice Im fino a valori superiori a 60, cui corrisponde il tipo "umido" (B3).

4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO ED EVOLUZIONE PALEOGEOGRAFICA

I depositi marini, transizionali e continentali, che hanno colmato un'antica depressione strutturale ("Bacino Pisano-Versiliese", individuatosi nel Miocene superiore) dando origine alla Pianura Pisana, sono delimitati e poggiano sugli stessi complessi litologici affioranti sui rilievi montuosi che la racchiudono. Nello Schema geologico della fig. 8 sono rappresentati i suddetti complessi litologici, oltre a quello della pianura, ordinati secondo la loro sovrapposizione geometrica, mentre le varie unità litostratigrafiche che li compongono sono riportate nella tabella 3 delle pagine seguenti, unitamente alla loro classificazione idrogeologica.

Sui Monti Pisani, che delimitano il Bacino Pisano-Versiliese sul lato nord-est, sono presenti le rocce più antiche (Permo-Carbonifero) dell'Appennino settentrionale, costituenti il "basamento" toscano; questo, unitamente alla sua "copertura" terrigena, è stato attribuito ad un complesso metamorfico filladico-quarzitico di età paleozoico-triassica (Verrucano s.l.), cui si sovrappongono le formazioni della "copertura" calcareo-silicea mesozoica, anch'essa metamorfica. L'insieme di questi terreni, appartenenti alla *Successione toscana metamorfica*, è sormontato da un'analoga *Successione non metamorfica* (Falda toscana), composta da una sezione basale prevalentemente carbonatica, di età mesozoica, cui segue un *Complesso terrigeno* (preflysch-flysch arenaceo Scaglia-Macigno), la cui sedimentazione si protrae fino all'Oligocene.

Le formazioni appartenenti al "basamento" toscano ed alla sua "copertura" (terrigena e calcareo-silicea, anch'essa metamorfica), tradizionalmente considerate autoctone, sono strutturate in due unità tettoniche principali (*Unità di S. Maria del Giudice* sovrapposta all'*Unità di*

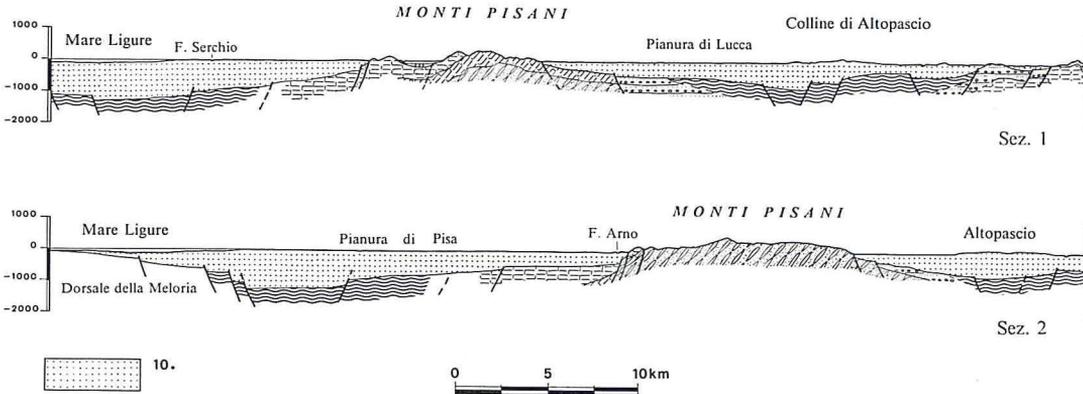
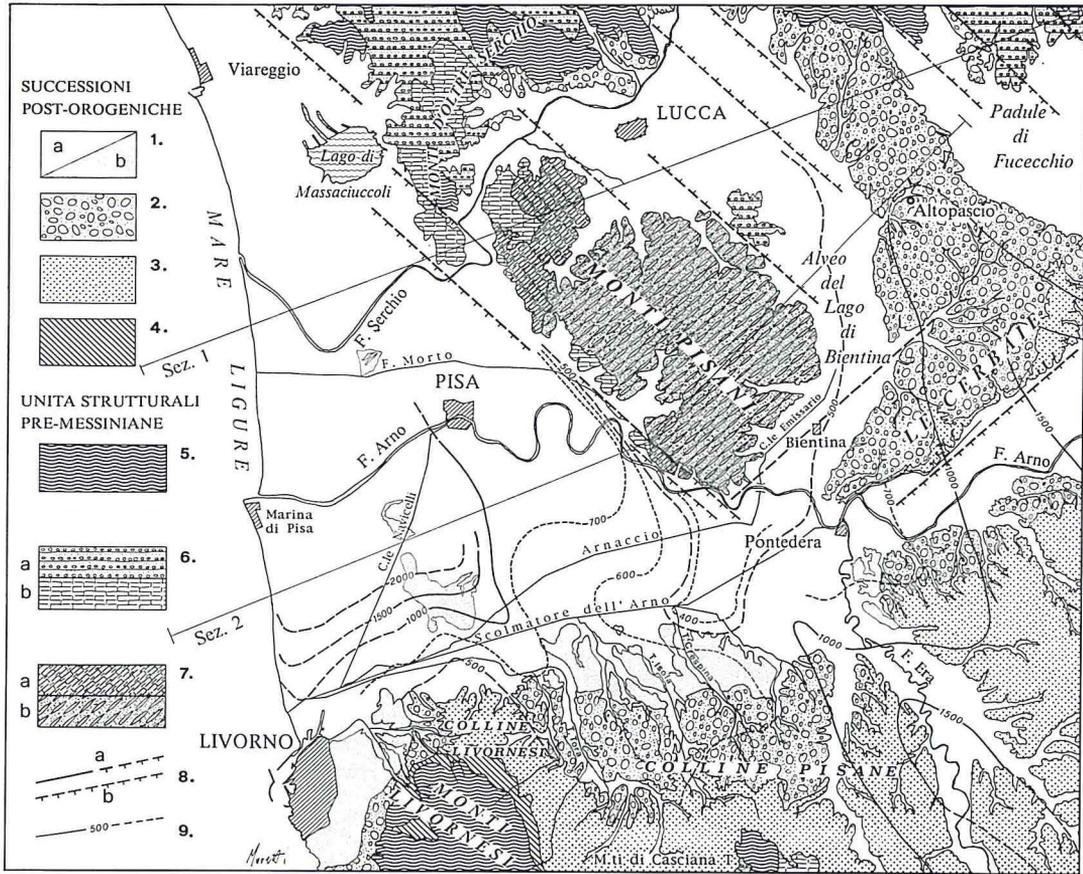


Fig. 8 - Schema geologico delle pianure di Pisa e di Lucca. LEGENDA 1. Depositi continentali e litoranei: a - Depositi alluvionali ed eolici olocenici; b - Depositi eolici e fluvio-colluviali (Pleistocene sup.); 2. Depositi alluvionali e fluvio-lacustri (Rusciniiano ? - Pleistocene medio); 3. Depositi marino-transizionali (Pliocene inf.-medio e Pleistocene inf.); 4. Depositi marini e continentali (Miocene sup.); 5. **Unità liguri indifferenziate**; 6. **Unità toscane non metamorfiche** (Falda Toscana): a - Complesso preflysch-flysch arenaceo Scaglia-Macigno (Cenomaniano-Oligocene); b - Gruppo delle formazioni mesozoiche calcareo-siliceo-marnose (Trias sup. - Cretaceo inf.); 7. **Unità toscane metamorfiche dei Monti Pisani**: a - "Copertura" calcareo-silicea (Trias sup. - Terziario); b - Complesso filladico-quarzitico comprendente il "basamento" toscano e la sua copertura terrigena (Verrucano s.l.; Paleozoico-Trias medio); 8. Faglie dirette e loro prosecuzione o sepolte (trattini sul blocco abbassato); 9. Isobate del tetto del substrato pre-messiniiano (in metri sotto il livello del mare; da: GHELARDONI *et al.*, 1968); 10. Depositi marino-transizionali e continentali, neogenici e quaternari, indifferenziati (sezioni).

Tab. 3 - Schema di classificazione idrogeologica delle rocce.

STRATIGRAFIA		Prevalenti caratteristiche di Permeabilità	
		Formazioni Geologiche	Unità Idrogeologiche
SUCCESSIONI POST-OROGENICHE			
DEPOSITI CONTINENTALI			
s	- Sabbie di spiaggia attuale (Olocene)	P II	P-p/1
d ₂	- Sabbie eoliche dei lidi e delle dune litoranei (Olocene)	P III	
a ₃	- Depositi alluvionali prevalentemente limo-argillosi (Olocene)	P IV	
pc	- Depositi fluvio palustri, di interduna-retroduna e di colmata, da sabbiosi-limosi a limo-argillosi, talvolta torbosi (Olocene). Nei fogli Pisa (104) e Lucca (105) sono state usate le sigle "c", "p" e "l", rispettivamente per "Terreno di colmata", "Terreno palustre" e "Terreno torboso".	Im	i/1
a ₂	- Depositi alluvionali prevalentemente sabbiosi-limosi (Olocene).	P III	P-s/1
a ₁	- Depositi alluvionali di fondovalle, prevalentemente ghiaiosi-ciottolosi (Olocene).	P I-II	P-p/2
at	- Depositi alluvionali dei con di deiezione e o terrazzati, prevalentemente ghiaiosi-ciottolosi, con matrice limo-sabbiosa in varie proporzioni (Olocene).	P I-II	P-p/3
d _{1b}	- Depositi eolici, sabbiosi ("Sabbie dell'Isola di Coltano"; Pleistocene sup.).	P III	
d _{1a}	- Depositi eolici, fluviali e colluviali, sabbiosi, sabbiosi-limosi e limo-sabbiosi ("Sabbie e limi di Vicarello" e "Sabbie di Ardenza"; Pleistocene sup.).	P III-IV	P-s/2
DEPOSITI MARINI, TRANSIZIONALI E CONTINENTALI			
Qt	- Depositi alluvionali e fluvio-lacustri, ciottolosi-ghiaiosi-sabbiosi; la formazione è talvolta costituita prevalentemente da sabbie e da limi-sabbiosi, che contengono, dispersi in strati o in lenti elementi più grossolani; scarse e discontinue sono le intercalazioni limo-argillose (Conglomerati di Casa Poggio ai Lecci; Pleistocene medio-sup.). La sigla "Qt" corrisponde al Foglio 105-Lucca; nel Foglio 112-Volterra sono state usate rispettivamente la sigla "Q1v" e "Q1f".	P II-III	P-s/3
Qcal	- Depositi marino-transizionali sabbiosi e limo-argillosi, con rare intercalazioni di calcari detritico-organogeni (Sabbie ed argille ad Arctica e Sabbie di Nugola Vecchia; Pleistocene inferiore).	P IV	
Ps	- Depositi marino-transizionali prevalentemente sabbiosi fini, con livelli da limo-sabbiosi a limo-argillosi e rare intercalazioni arenacee, calcarenitiche e, principalmente alle Cerbaie, conglomeratiche ("Sabbie gialle"; Pliocene medio).	P III	P-si/2
Pag	- Depositi marino transizionali prevalentemente argillosi e limo-sabbiosi, con intercalazioni sabbiose ("Argille azzurre e cenerine"; Pliocene inferiore - medio).	Im	
Mg	- Argille, con lenti di gesso e di salgemma, sabbie e conglomerati; talvolta intercalazioni di tripoli alla base della formazione (Miocene superiore).	Im-S	i/2
Mag	- Argille e marne sabbiose (Argille a Pycnodonta navicularis; Miocene superiore).	Im-P	
UNITÀ STRUTTURALI PRE-MESSINIANE			
UNITÀ OLIOLITIFERA			
pb	- Argilliti e calcari silicei a "Palombini" (Cretaceo inf.).	Im S	Sd-si/1
L	- Gabbri e breccie di Gabbro	Sd III	
Σ	- Serpentiniti	Sd III	Sd-s /1
UNITÀ DEL FLYSCH CRETACEO			
mcC	- Flysch calcareo-marnoso di Monteverdi M.mo (Cretaceo sup.)	Sd III	Sd-s /2
cb	- Argilliti e siltiti con intercalazioni arenacee e calcaree, e con livelli di breccie e breccie argillose (Cretaceo sup.).	Im S	Sd-si/2
UNITÀ DEL FLYSCH DI MONTE LA POGGIA			
al	- Flysch calcareo marnoso con livelli di breccie (Eocene inf. - medio Paleocene sup.).	Sd III	Sd-s /3
alb	- Argilliti, siltiti e marne, con intercalazioni di arenarie calcarifere e con livelli di breccie argillose; banchi di brecciole, liditi, calcari a grana fine ed arenarie nella parte basale della formazione (Cretaceo sup.).	Im S	Sd-si/3
UNITÀ TOSCANE NON METAMORFICHE (FALDA TOSCANA)			
mg	- Arenarie quarzoso-felspatiche, con intercalazioni siltitiche e argillitiche (Macigno; Oligocene)	Sd III	Sd-s /4
Sp	- Siltiti argillose con intercalazioni calcaree e calcarenitiche; nella parte alla della formazione, breccie e microbreccie calcaree con intercalazioni di siltiti e siltiti argillose (bn) (Scaglia toscana; Cenomaniano?-Oligocene).	Im S	Sd-si/4

COMPLESSO ACQUIFERO DELLA PIANURA DI PISA

STRUTTURE IDROGEOLOGICHE "INCASSANTI"

mac	- Calcari litografici e sublitografici, selciferi, in strati di spessore variabile, fino a grossi banchi; nella parte alta della formazione sono presenti orizzonti o intercalazioni di calcareniti a grana fine (Maiolica; Titonico-Cretaceo inferiore).	Sc I	Sc-p /1
di	- Radiolariti in strati da centimetrici a decimetrici, con interstrati e intercalazioni marmo scistose (Diaspri; Kimmeridgiano - Titonico p.p.).	Sd III	Sd-s /5
Gcs	- Calcari e calcareniti (più rare), selciferi, in strati di spessore variabile, fino a banchi dell'ordine del metro, cui si intercalano rari straterelli di marne fogliettate (Calcarea selcifero superiore; Oxfordiano-Kimmeridgiano).	Sc II	Sc-p /2
Gm	- Marne, marne calcaree, calcari marnosi e, subordinatamente, calcari, sostituiti nella parte alta della formazione da radiolariti e marne silicee, con sporadiche intercalazioni di calcari selciferi (Marne a Posidonia; Dogger).	Im-S	Sd-si/5
Cs	- Calcari selciferi stratificati, con interstrati argillo-marnosi (Calcarea selcifero inferiore Lias medio-sup.).	Sc II	Sc-p /3
Gc	- Calcari, spesso nodulari, stratificati o a lastre, con rari interstrati argillitici (Rosso ammonitico; Sinemuriano).	Sc II	
Gcm	- Calcari massicci o grossolanamente stratificati, al tetto della formazione (Calcarea massiccio; Hettangiano).	Sc I	
Tc	- Calcari, talvolta marnosi, calcari dolomitici e dolomie in strati di spessore variabile da centimetrico a decimetrico fino a banchi di circa 2 metri, cui si alternano strati marnosi, anch'essi eterometrici (Calcari e marne a Rhaetavicula contorta; Retico).	Sd II	
Tcv	- Calcari dolomitici di solito brecciati e/o a cellette, con brecce poligeniche o a prevalenti elementi calcareo-dolomitici, eterometriche nella parte basale della formazione (Calcarea cavernoso s.l.; Norico-Retico).	M I	
UNITÀ TOSCANE METAMORFICHE (MONTI PISANI)			
pmg	- Metarenarie quarzoso-feldspatiche-micacee alternate a filladi e scisti ardesiaci (Pseudomacigno; Eocene?-Oligocene).	Sd III	Sd-s /6
sc	- Scisti sericitici (Pseudoscaglia; Cretaceo-Eocene p.p.).	Im-S	Sd-si/6
d	- Radiolariti sottilmente stratificate (Diaspri; Malm).	Sd III	Sd-s /6
csp	- Calcari ad Entrochi, raramente selciferi, massicci o grossolanamente stratificati (Malm).	Sc II	Sc-p /4
mp	- Marne e calcari marnosi (Lias - Dogger).	S-Im	Sd-si/7
cs	- Calcari stratificati con liste e noduli di selce e con sottili intercalazioni argillo e marmo-scistose (Lias).	Sc II	Sc-p /5
m	- Calcari massicci, ceroidi, talvolta con liste e noduli di selce al tetto della formazione (Marmi; Lias).	Sc I	
gr	- Dolomie e calcari dolomitici stratificati, spesso in grossi banchi (Grezzoni; Norico-Retico).	Sc II	
Tqz	- Filladi sericitico-cloritiche con straterelli quarzificati, cui seguono (dal basso) quarziti fini con sedimentazione incrociata e quarziti a grana variabile; al tetto si trovano fitte alternanze di filladi e quarziti (Quarziti di Monte Serra; Carnico).	Im-S	Sd-si/7
Tcg	- Conglomerati grossolani, prevalentemente quarzosi (Anageniti), sormontati da filla di quarziticche a grana variabile e da conglomerati a grana più fine (Formazione della Verruca; Trias medio).	S Im	Sd-s/2
BASAMENTO PALEOZOICO			
Pbr	- Filladi ricche di frammenti silicei angolosi, passanti a brecce, cui si intercalano discontinue bancate conglomeratiche (Brecce di Asciano; ?Permico).	Im-S	Sd-si/8
Psc	- Alternanze di conglomerati quarzosi, a grana molto variabile, filladi e scisti grafitosi (Scisti di S. Lorenzo; Carbonifero superiore - Permico inferiore).	Im-S	
Pf	- Alternanze di filladi (più frequenti) e di quarziti piuttosto massicce (Filladi e quarziti di Buti; ?Carbonifero).	Im-S	

Note

* Inteso in senso estensivo, comprendente cioè le sue due propaggini nelle Valli di Ripafratta e di Bientina.

- Le sigle formazionali corrispondono in genere a quelle che compaiono nella nuova edizione dei Fogli della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000; nei casi in cui siano state usate sigle diverse per una stessa formazione affiorante in Fogli differenti, esse sono riportate alla fine delle singole descrizioni litologiche. Sono riportate anche alcune denominazioni e sigle formazionali derivanti dalla più recente cartografia geologica a scala 1:25.000.

- Per il Foglio 112 (Livorno), ancora in vecchia edizione, sono state adottate le sigle e le definizioni formazionali dei Fogli adiacenti.

- L'ordine di sovrapposizione dei depositi olocenici, in gran parte coevi, non rispecchia rigorosamente la successione stratigrafica.

- Il numero d'ordine delle Unità idrogeologiche indica, per serie omologhe, la loro posizione geometrica dall'altro verso il basso.

Monte Serra; RAU e TONGIORGI, 1974), che affiorano rispettivamente nella parte nord-occidentale e sud-orientale dei Monti Pisani; anche la *Successione toscana non metamorfica*, che affiora quasi esclusivamente sulla terminazione nord-occidentale dei M. Pisani stessi e sui Monti d'Oltre Serchio, è scomposta in almeno due sottounità strutturali sovrapposte (GIANNINI e NARDI, 1965).

Le due successioni a Serie toscana, coinvolte nel ciclo orogenico alpino, sono in gran parte coeve e si sono deposte nello stesso dominio paleogeografico marino, a substrato continentale (Dominio toscano).

Le *Unità alloctone liguri*, che completano l'edificio strutturale appenninico a falde di ricoprimento sovrapposte, affiorano sui Monti Livornesi e, unitamente ad un limitato "nucleo" calcareo mesozoico appartenente alla Falda toscana, sui Monti di Casciana Terme.

Le Colline Pisane, che limitano a sud la pianura e che si addossano a questi due ultimi rilievi montuosi, sono costituite da formazioni depositatesi all'estremità meridionale della depressione tettonica pisana-versiliese, nel corso di più cicli sedimentari neoautoctoni (Miocene superiore - Pleistocene medio); si tratta in prevalenza di complessi limo-argillosi e sabbiosi-ghiaiosi di ambiente da marino franco a continentale, a vario grado di cementazione e alternate fra loro in diverse proporzioni. Tali successioni sedimentarie mio-pleistoceniche hanno subito blande deformazioni plicative⁽³⁾, di entità decrescente dalle più antiche alle più recenti, e presentano una generale debole immersione degli strati verso la pianura dell'Arno, per effetto di sollevamenti in blocco e di basculamenti; esse sono state inoltre interessate, almeno fino al Pleistocene medio (LAZZAROTTO *et al.*, 1990; MARRONI *et al.*, 1990), da una ripresa dei movimenti tettonici lungo gli stessi sistemi di faglie dirette, che hanno originato i loro bacini di sedimentazione.

Il termine sommitale delle successioni neoautoctone delle Colline Pisane è rappresentato da depositi alluvionali e fluviolacustri del Pleistocene medio (Qt), che si prolungano oltre la Valle dell'Arno fino alle Cerbaie, dove giacciono, con lieve discordanza angolare, direttamente sulle "Sabbie gialle" del Pliocene medio (Ps). La struttura monoclinale delle Cerbaie, immergente con debole inclinazione verso la Valle di Bientina (quadrante nord-occidentale), è presumibilmente troncata, sul

⁽³⁾ Nelle più recenti ricostruzioni dell'evoluzione tettonica post-collisionale della Toscana marittima (BOCCALETTI *et al.*, 1991) le deformazioni duttili, precedentemente associate alle strutture a faglie dirette, vengono messe in relazione ad eventi compressivi, nell'ambito della più generale distensione crostale che ha dato origine ai bacini sedimentari continentali e marini neogenico-quadernari.

suo lato più rialzato (sud-orientale), da una o più faglie dirette, sepolte sotto i depositi alluvionali della Valle dell'Arno; in un recente lavoro di Dallan (1988) una analoga faglia diretta, di minor rigetto, viene ipotizzata in corrispondenza del Rio Ponticelli. In base ad uno studio inedito sulla geologia del sottosuolo lungo la trasversale Piana di Lucca-Le Cerbaie-Valle dell'Arno, B. Monteforti (comunicazione orale) arriva alla conclusione che anche il margine occidentale del rilievo di cui si tratta sia interessato da un sistema di faglie dirette, anch'esse di minor rigetto.

Secondo gli Autori sopracitati non si può escludere che l'attività tettonica distensiva post e tardo-orogenetica, ben documentata fino al Pleistocene medio, prosegua in Epoca attuale, come è testimoniato dai fenomeni di subsidenza che interessano la Pianura di Pisa.

I depositi marini e continentali mio-plio-pleistocenici affioranti sui margini meridionale e orientale della Pianura Pisana sono dunque, almeno parzialmente, in continuità con i corrispondenti livelli che si approfondiscono nel suo sottosuolo, ove formano il substrato dei sedimenti marino-transizionali e fluvio-palustri di età pleistocenica superiore ed olocenica.

Le dune che emergono dalla pianura alluvionale nella zona di Coltano-San Piero a Grado e al Palazzetto (vedi stereogramma della fig. 9 e Schema idrogeologico della tav. 1 f.t.), riferite al Pleistocene superiore, sono lembi residui di un più esteso cordone di antichi "tom-boli" costieri che, in vari episodi successivi, impedendo lo sbocco al mare dei corsi d'acqua, favorivano la formazione di paludi e stagni nella bassa pianura dell'Arno; queste plaghe sabbiose, attualmente smembrate da successive fasi erosive, si ricollegano, almeno parzialmente, alle dune recenti sul lato del mare e, verso l'interno, sono in diacronia con le sabbie eoliche e marine intercalate ai limi fluvio-palustri del sottosuolo. Origine solo in parte analoga hanno le coeve "Sabbie di Vicarello", che si sono depositate in corrispondenza di una antica linea di costa del mare pleistocenico, al margine delle Colline Pisane; alla sedimentazione di queste hanno infatti contribuito, oltre ai depositi litoranei, quelli fluviali e colluviali della fascia pedecollinare.

Nella stessa fig. 8 è rappresentato, limitatamente al settore sud-orientale della Pianura Pisana, l'andamento generale del substrato pre-messiniano, tratto dalla ricostruzione che ne hanno fatto GHELARDONI *et al.* (1968), con limitate modifiche derivanti da un più recente lavoro di FANCELLI *et al.* (1986), che lo definiscono "substrato profondo"⁽⁴⁾; le

(4) Gli Autori definiscono inoltre "Substrato intermedio" e "Substrato superiore" della Pianura di Pisa i depositi delle successioni neoautoctone di età compresa rispettivamente dal Miocene sup. al Pleistocene inf. e dal Pleistocene medio all'Olocene.

isobate ne mettono in evidenza il progressivo approfondimento verso la parte centrale della pianura, dove i depositi neogenici e quaternari raggiungono uno spessore di oltre 2000 metri: sul lato nord-orientale è osservabile una marcata scarpata, fino alla profondità di oltre 700 metri, che conferma la presenza di un sistema di faglie dirette, a direzione appenninica, presso il bordo sud-occidentale dei Monti Pisani; sul margine meridionale il maggiore, ma più graduale, approfondimento del "substrato profondo" è da mettere in relazione alla linea tettonica trasversale Livorno-Pistoia, che chiude verso sud la fossa tettonica Pisana-Versiliese.

La complessa storia deformativa di questo importante elemento tettonico, a direzione circa SW-NE, esula dalle finalità del presente studio; in questa sede ci limitiamo ad osservare che esso svincola le strutture disgiuntive sugli opposti blocchi del "Substrato profondo", giustapprendendo longitudinalmente il "Graben" della Pianura Pisana e l'"Horst" dei Monti Pisani, rispettivamente l'"Horst" e il "Graben" dei Monti Livornesi e della Valdera.

Le sezioni in calce alla fig. 8 mostrano, oltre alla strutturazione distensiva generale dalla costa al Padule di Fucecchio, l'alto strutturale della Meloria (sez. 2), che delimita sul lato sud-occidentale la fossa tettonica Pisana-Versiliese, sepolta dai depositi neogenici-quaternari del Mar Ligure.

Per quanto riguarda la natura del "Substrato profondo", in base agli studi sopracitati ed a considerazioni di carattere strutturale a scala regionale, è possibile la ricostruzione riportata nelle sezioni della fig. 8; a partire dalla dorsale sepolta della Meloria (la cui litologia non è conosciuta), cioè dal mare verso l'interno, si ha:

— una fascia costituita dai terreni appartenenti alle *Unità Liguri*, sulla prosecuzione settentrionale della dorsale dei Monti Livornesi;

— una fascia più interna, ove sono presenti le rocce delle *Successioni Toscane*; tra queste ultime sembrano essere nettamente predominanti le formazioni carbonatiche della Falda toscana. Il complesso filladico-quarzitico (Verrucano s.l.) è stato raggiunto dal sondaggio Zannone 1 (GHELARDONI *et al.*, 1968) in corrispondenza della soglia che, raccordando gli alti strutturali dei Monti Pisani e di Casciana Terme, separa il bacino Pisano-Versiliese da quello della Val d'Era.

* * *

Per tracciare ora un quadro sintetico dell'evoluzione paleogeografica

della Pianura Pisana, è necessario fare riferimento, oltre che ai dati di sottosuolo, a quanto sopraesposto sui lineamenti geologici dei rilievi montuosi che la inquadrano; le brevi note che seguono sono tratte, con lievi modifiche, dal lavoro di Federici e Mazzanti precedentemente citato.

La Pianura Pisana si inserisce, come si è detto, in una vasta depressione tettonica di forma sub-trapezoidale, in gran parte sottomarina, situata sul prolungamento sud-orientale del "graben" del F. Magra; tale struttura distensiva post-orogonica, a direzione appenninica, attiva a partire dal Miocene sup., è delimitata a nord-est dalla morfostruttura positiva dei Monti Pisani - Monti d'Oltre Serchio, ad ovest dalla dorsale sommersa della Meloria e, verso sud, termina in corrispondenza della linea trasversale Livorno-Pistoia.

Nel Miocene superiore la regione pisana è interessata da una prima trasgressione marina, testimoniata anche dai depositi presenti sulle colline omonime, al margine sud-occidentale della pianura: ai conglomerati basali seguono argille lagunari, quindi sedimenti evaporitici, comprendenti strati di gesso intercalati ad argille, ed infine sabbie, argille e conglomerati, depositi in un bacino ristretto e con acque poco profonde.

Nel Pliocene inferiore si instaurano condizioni di più intensa e generale subsidenza, che determinano una seconda e più estesa trasgressione marina; i depositi legati a questa fase oltrepassano pertanto i limiti del precedente ciclo ed arrivano a poggiare direttamente sulle rocce del substrato pre-neogenico. Il bacino marino, sotto forma di un profondo ed ampio golfo, mantiene la stessa configurazione anche nel corso del Pliocene medio; su questo braccio di mare la sedimentazione, dapprima prevalentemente argillosa, evolve gradualmente in facies sabbiosa.

Nel Pliocene medio si verifica una regressione generalizzata che porta, nel Pliocene superiore (non si conoscono in Toscana depositi di questa età), alla completa emersione del Valdarno inferiore ed alla incisione dei precedenti depositi marini, dando origine ad un primo complesso reticolo di valli fluviali, che prefigurano il sistema idrografico Arno-Serchio.

Nel corso del Pleistocene assumono grande importanza le oscillazioni eustatiche del livello del mare, collegate con le vicende dei cicli glaciali, ed i conseguenti spostamenti della linea di costa, controllati anche dai movimenti tettonici. A questa fase della evoluzione paleogeografica appartengono i depositi salmastri e marini del Pleistocene inferiore, presenti nel sottosuolo della Pianura Pisana ed anche affioranti sulle Colline omonime.

Alla fine del Pleistocene inferiore il mare si ritira nuovamente, scoprendo una vasta area pianeggiante, che nei tempi successivi sarà percorsa dal Paleo-sistema idrografico, drenante i bacini dell'Arno e del Serchio; dall'apporto solido di questi corsi d'acqua inizia la costruzione della pianura alluvionale e costiera ("Substrato superiore" degli Autori sopracitati). A questo proposito, una prima importante fase di sedimentazione è rappresentata dai depositi alluvionali e fluvio-lacustri del Pleistocene medio-sup. affioranti, in forme terrazzate, sulle Cerbaie e sui margini delle Colline Pisane; essi sono il risultato del trasporto fluviale del Paleo-Arno, che nel frattempo aveva superato la stretta della Gonfolina, del Paleo-Serchio, nonché dei loro affluenti, che scendevano dai Monti Pisani, dalle Colline omonime e da quelle Livornesi⁽⁵⁾. Le complesse interferenze tra i vari sistemi idrografici e fluvio-lacustri, combinate con gli alterni processi di sedimentazione e di erosione, questi ultimi legati ai cicli climatici e di ringiovanimento, hanno determinato forti variazioni di composizione e di granulometria (e quindi di permeabilità) nei suddetti depositi pleistocenici.

Nella successiva evoluzione sedimentaria della pianura è importante ricordare, ancora ai fini pratici dell'origine degli acquiferi, la fase alluvionale riferibile al Wurm II, messa in evidenza (nel sottosuolo) da un insieme di depositi ciottolosi grossolani ("Conglomerati dell'Arno e del Serchio da Bientina"; Segre, 1955), tra i cui elementi sono riconoscibili quarziti e calcari cristallini provenienti dai Monti Pisani e dalle Apuane; essi devono essere stati trasportati appunto dal "Paleo-Serchio da Bientina", che confluiva nell'Arno nei pressi di Calcinaia e proseguiva il suo corso in una fascia adiacente le Colline Pisane. A questa fase appartengono inoltre i coni di deiezione, formati dai ripidi torrenti che scendevano dai Monti Pisani; sul versante orientale di questi, i corsi d'acqua raggiungevano direttamente l'alveo del Paleo-Serchio nella Valle di Bientina, mentre la Pianura Pisana separava presumibilmente quelli del versante sud-occidentale dal corso del Paleo-Arno, a valle della confluenza con il Paleo-Serchio.

Una ricostruzione stratigrafica schematica del sottosuolo della bassa Pianura Pisana, tra la città e Tombolo, è rappresentata nello stereogramma della figura 9; esso mette in evidenza la complessità del sistema deposizionale marino-transizionale-continentale, nel quale si

⁽⁵⁾ Non è da escludere, su questo "versante", un apporto di depositi alluvionali provenienti da un più esteso bacino idrografico che si attestava, oltre la Val d'Era, alla dorsale Monticiano-Roccastrada.

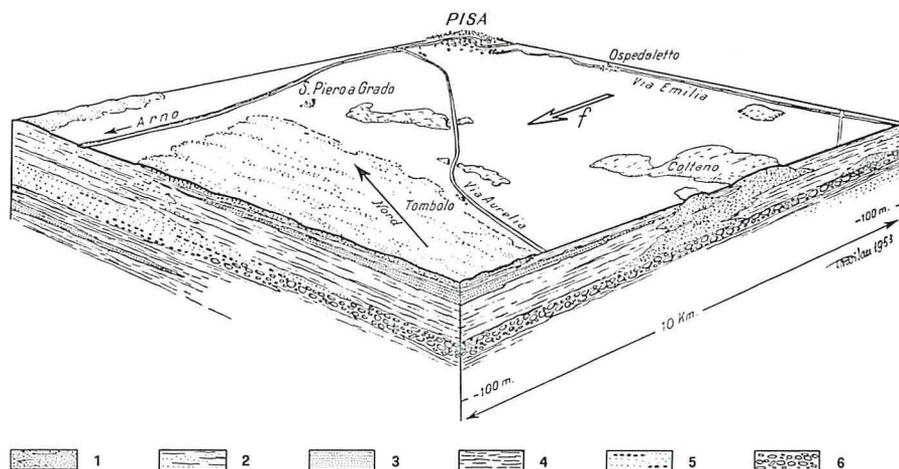


Fig. 9 - Stereogramma del sottosuolo della Pianura di Pisa a sud dell'Arno, tra Pisa e Tombolo (Da L. TREVISAN e E. TONGIORGI, 1953).
 LEGENDA 1. Sabbie eoliche; 2. Argille e sabbie fluviali; 3. Sabbie marine; 4. Argille palustri; 5. Sabbie fluviali; 6. Ciottoli fluviali (Paleo-Serchio).

originano ripetute alternanze ed eteropie tra depositi a granulometria molto variabile.

In conclusione, nell'area della Pianura Pisana si sono succedute fasi in cui prevaleva una sedimentazione marina o lagunare-salmastro, con forti spessori di sabbie, limi ed argille, e fasi continentali nelle quali l'apporto di depositi più grossolani da parte dei corsi d'acqua era talvolta predominante.

Nelle fasi più antiche di alluvionamento sono più sviluppati i depositi ghiaiosi-ciottolosi del Paleosistema idrografico Arno-Serchio, distribuiti prevalentemente in ampi alvei di tipo fiumara; nelle fasi più recenti, durante le quali l'Arno ed il Serchio si sono resi gradualmente indipendenti, il trasporto solido è prevalentemente sabbioso-limoso, da parte di corsi d'acqua meandriformi e/o ad isole fluviali, con granulometrie maggiori nei depositi di canale rispetto a quelli di esondazione.

Alla progradazione e all'aggradazione della pianura hanno contribuito i depositi di spiaggia e quelli dei lidi e delle dune litoranei; gli spostamenti diacroni della linea di riva sono quindi segnati, al di sotto delle coperture limo-argillose di origine retrodunare e alluvionale, da allineamenti di depositi sabbiosi, collegati a quelli che affiorano attualmente lungo la costa e sul margine meridionale della pianura.

5. IL SISTEMA ACQUIFERO DELLA PIANURA PISANA

5.1. *Lineamenti idrogeologici*

Per definire le condizioni idrogeologiche al contorno della complessa successione acquifera, che ha sede nel sottosuolo della Pianura Pisana, è stato elaborato lo Schema della Tavola 1 f.t., finalizzato all'impostazione dei bilanci idrologici, una volta individuate le strutture e le aree di assorbimento attraverso le quali essa viene alimentata.

Lo studio è stato condotto sulla base dei rilevamenti geologici pubblicati a scala 1:25.000 (RAU e TONGIORGI, 1974; LAZZAROTTO *et al.*, 1990; MARRONI *et al.*, 1990) e della Cartografia ufficiale italiana a scala 1:100.000, integrati da osservazioni sul terreno e dalla fotointerpretazione.

La classificazione idrogeologica delle formazioni geologiche affioranti nell'area considerata (riportate nella prima colonna della tabella 3, in ordine cronologico e di sovrapposizione tra le varie Unità tettoniche, dall'alto verso il basso) è stata eseguita tenendo conto delle loro caratteristiche litologiche, del loro grado di alterazione e fessurazione, dei fenomeni carsici, della densità e tipo di drenaggio superficiale, nonché delle manifestazioni sorgentizie.

In base ai suddetti fattori ed informazioni indirette sulla permeabilità delle rocce, si è operata una prima distinzione tra le formazioni i cui litotipi possono essere considerati, almeno in prima approssimazione, idraulicamente omogenei, e quelle costituite invece da un'alternanza di litotipi impermeabili e a diverso tipo e grado di permeabilità.

Le formazioni del primo gruppo (omogenee o prevalentemente omogenee) sono state suddivise, secondo il "*tipo di permeabilità*", come segue:

- P - Primaria
- Sd - Secondaria decrescente
- Sc - Secondaria crescente
- M - Mista

Ne è stato poi stimato il "*grado di permeabilità*" relativa, secondo la seguente scala decrescente:

- I - Da molto elevata ad elevata
- II - Da elevata a mediocre
- III - Da mediocre a bassa
- IV - Da bassa a molto bassa

fino a:

- Im - Praticamente impermeabili

In questo schema classificativo, le formazioni geologiche vengono definite in termini idrogeologici ed individuate da sigle binarie, composte da lettere e da numeri romani, che indicano rispettivamente il "tipo" e il "grado" di permeabilità: ad esempio alla sigla "Sc II" corrisponde una formazione con un grado "Da elevato a mediocre" di permeabilità, di tipo "Secondaria crescente".

Nella scala di permeabilità relativa sono stati adottati "gradi" comprensivi e in parte coincidenti, per tener conto del fatto che tale caratteristica è talvolta variabile nell'ambito di una stessa formazione (Formazioni a "permeabilità variabile"). In alcuni casi di estrema variabilità, l'attribuzione del "grado di permeabilità" è stato duplice e, comprendendo anche l'indicazione formazionale, si è usata la seguente notazione: Qt / P II-III.

Nelle formazioni disomogenee (o prevalentemente disomogenee) appartenenti al secondo gruppo, le modalità di circolazione sotterranea e il grado di permeabilità relativa sono molto variabili, e quindi non confrontabili con le rispettive caratteristiche di quelle omogenee. Per tali formazioni, litologicamente e strutturalmente complesse, dove litotipi impermeabili sono cioè associati, come si è detto, con litotipi a diverso tipo e grado di permeabilità, è stato pertanto adottato un diverso criterio classificativo, espresso dalla tabella che segue.

GRADO	TIPO	Primaria (P)	Secondaria (S)
Alta: prevalenza di litotipi permeabili		P Im	S Im
Media: equivalenza di litotipi imperm. e perm.		P-Im	S-Im
Bassa: prevalenza di litotipi impermeabili		Im P	Im S
Im: praticamente impermeabili			

Come si vede, vengono considerati solo i due fondamentali tipi di permeabilità: Primaria (P) e Secondaria (S). I gradi di permeabilità relativa sono inoltre meno comprensivi e ridotti a tre: Alta, Bassa e Media; essi sono determinati rispettivamente dalla predominanza dei litotipi permeabili, di quelli impermeabili, o dalla loro equivalenza. Nelle corrispondenti sigle viene anteposto il simbolo di permeabilità o

di impermeabilità (ad esempio: P Im significa "Alta" permeabilità con litotipi a permeabilità primaria prevalenti su quelli impermeabili, mentre Im S significa "Bassa" permeabilità con prevalenza di litotipi impermeabili su quelli a permeabilità secondaria), oppure i due simboli vengono separati da un trattino, nel caso di un grado di permeabilità "Media" (P-Im; S-Im).

Sono state poi identificate le *Unità Idrogeologiche*⁽⁶⁾ cartografate nello Schema della Tavola 1 f.t. (seconda colonna della stessa tabella 3) ancora in termini di tipo e grado di permeabilità, ma con una notevole semplificazione rispetto alle due diverse classificazioni formazionali: non sono state cioè considerate le associazioni di litotipi permeabili ed impermeabili e, limitandoci ancora a due tipi di permeabilità, i gradi (oltre all'Impermeabile "i") sono tre, definiti nel modo seguente:

- p - Permeabile
- s - Semipermeabile
- si - da Semipermeabile ad Impermeabile

In altri termini, sono state adottate *Unità Idrogeologiche* molto comprensive, ma nell'insieme sufficientemente omogenee (almeno rispetto alle prevalenti caratteristiche di permeabilità) e funzionali alle previste esigenze dei bilanci d'acqua; le singole notazioni divengono in questo caso, ad esempio, P-p, Sd-p, Sc-p, etc., per esprimere Unità aventi permeabilità rispettivamente di tipo "P", "Sd" e "Sc", con grado "p", etc..

Nella tabella che segue vengono riassunti i criteri della classificazione idrogeologica completa delle rocce, comprendente cioè entrambe le categorie (*Formazioni geologiche* ed *Unità idrogeologiche*) prese in considerazione.

Lo "Schema di classificazione idrogeologica delle rocce" della tabella 3, impostato analogamente alla Legenda dello "Schema Idrogeologico"⁽⁷⁾ della Tav. 1 f.t., mette in evidenza la bipartizione tra *Formazioni geologiche* ed *Unità idrogeologiche*, e come tra di loro non vi sia, in qualche caso, una stretta corrispondenza.

Le prime sono suddivise in varie Unità strutturali mantenendo,

⁽⁶⁾ La precedente classificazione formazionale, oltre a costituire la base per la definizione delle Unità idrogeologiche ora considerate, può essere utilizzata per studi idrogeologici a carattere diverso e/o di maggiore dettaglio rispetto al presente lavoro.

⁽⁷⁾ Non si è tenuto conto delle suddivisioni lito e cronostatigrafiche più dettagliate introdotte nella letteratura e nella cartografia più recenti, ma non rilevanti ai fini della definizione delle Unità idrogeologiche.

TABELLA SINTOTTICA DELLA CLASSIFICAZIONE IDROGEOLOGICA DELLE ROCCE

		(Prevalenti caratteristiche di permeabilità)		
		Tipo	Grado	
i n o i	Omogenee o prevalentemente omogenee	P - Primaria	I - Da molto elevata ad elevata	
		Sd - Secondaria decrescente	II - Da elevata a mediocre	
		Sc - Secondaria crescente	III - Da mediocre a bassa	
		M - Mista	IV - Da bassa a molto bassa	
z		Im - Praticamente impermeabili		
a m r o	Disomogenee o prevalentemente disomogenee	<u>P - Primaria</u>	<u>S - Secondaria</u>	
		P Im	S Im	Alta : prevalenza di litotipi permeabili
		P-Im	S-Im	Media: equivalenza di litotipi imperm. e permeabili
F		Im P	Im S	Bassa : prevalenza di litotipi impermeabili
Unità Idrogeologiche		P - Primaria	p - Permeabili	
		Sd - Secondaria decrescente	s - Semipermeabili	
		Sc - Secondaria crescente	si - Da semipermeabili a imperm.	
		i - Praticamente impermeabili		

salvo rare eccezioni, le denominazioni e le sigle della cartografia al 100.000 del Servizio Geologico d'Italia.

Le seconde sono state invece raggruppate in relazione alla loro appartenenza a: 1) Depositi della Pianura di Pisa e delle Valli di Ripafratta e Bientina, nonché degli apparati alluvionali intra-pedemontani dei rilievi montuosi adiacenti; 2) Formazioni dei rilievi montuosi stessi⁽⁸⁾. Esse sono contrassegnate da un numero d'ordine, che indica

⁽⁸⁾ Le coperture superficiali dei versanti montuosi sono state omesse, in quanto non modificano sostanzialmente gli schemi della circolazione sotterranea che alimenta gli acquiferi confinati della pianura.

la loro posizione geometrica, dall'alto verso il basso, per serie omologhe. Questi due insiemi corrispondono, per quanto riguarda il ruolo idrogeologico svolto, rispettivamente a:

1) **Complesso acquifero della Pianura Pisana**, comprendente ovviamente, oltre a quelli affioranti, i depositi del sottosuolo (**Acquifero multistrato confinato**; vedi successivo paragrafo 5.2.1.).

2) **Strutture idrogeologiche "incassanti"**⁽⁹⁾, che possono essere in collegamento idraulico con l'Amc, direttamente, o attraverso gli apparati alluvionali intra-pedemontani, nonché quelli delle Valli di Ripafratta e Bientina.

Si fa notare come gli apparati alluvionali intra-pedemontani, che costituiscono il **Complesso acquifero della pianura di Pisa** in senso lato, facciano parte di entrambi i sopradetti domini fisiografici.

Lo "Schema Idrogeologico della Pianura di Pisa" è delimitato (linea di costa e pianure di fondovalle escluse), dallo spartiacque morfologico dell'insieme di bacini fluviali che, dai rilievi montuosi adiacenti, confluiscono direttamente nella Pianura di Pisa e nelle sue due appendici verso la Pianura di Lucca (Valli di Ripafratta e di Bientina); esso corrisponde pertanto in gran parte al "Bacino idrografico della Pianura di Pisa" precedentemente definito.

Tale spartiacque superficiale corre quasi completamente su rocce da impermeabili a scarsamente permeabili, in corrispondenza delle quali possiamo quindi assumere che esso coincida o mediamente corrisponda (come risultato di una compensazione tra opposti scostamenti) a quello sotterraneo; in caso contrario, gli scarti devono comunque essere di entità limitata, e trascurabili gli errori che possono derivarne, anche rispetto alle approssimazioni insite nelle metodologie di bilancio adottate e ai volumi d'acqua complessivamente coinvolti nella ricarica delle falde "artesiane" della Pianura Pisana.

⁽⁹⁾ Nella letteratura idrogeologica francese (J. MARGAT e S. RAMON, 1975), vengono definiti "incassanti" gli acquiferi costituiti da roccia in posto sui versanti di una valle, contrapposti a quelli che hanno sede nei depositi alluvionali di fondovalle. Il termine, inusuale in quella italiana, viene qui proposto nella seguente accezione più estensiva: rocce o strutture idrogeologiche "incassanti", comprendenti quindi, oltre ad acquiferi, anche acquicludi e acquitardi; esso viene riferito inoltre non soltanto ai versanti di una valle, ma anche a quelli prospicienti una pianura pedemontana o costiera, come quella di cui si tratta.

Solo in due limitati tratti dove affiorano rocce carbonatiche, molto permeabili e sede di una intensa circolazione sotterranea profonda, si verificano apprezzabili discrepanze tra bacino idrografico ed idrogeologico.

Il primo tratto si trova all'estremità Sud-orientale del bacino, in corrispondenza dei Monti di Casciana Terme; questo rilievo costituisce infatti l'area di assorbimento dell'alimentazione locale (l'altra componente derivando da circuiti regionali, più profondi) delle sorgenti termo-minerali di Casciana Terme (CHIOSTRI *et al.*, 1969; DAL PIAZ *et al.*, 1950), situate nell'adiacente bacino del T. Cascina. Lo spartiacque idrogeologico è quindi interno rispetto a quello morfologico, determinando così una "uscita" sotterranea dal "Bacino della Pianura di Pisa". Al contrario, si verificano "entrate" nel bacino stesso, quantificate da NARDI *et al.* (1987) in $6,6 \times 10^6$ mc/a pari a circa 220 l (sec), provenienti dalla Valle del Guappero (Bacino del Fiume Serchio).

Per i restanti affioramenti carbonatici (terminazione nord-occidentale dei Monti Pisani e Monti d'Oltre Serchio), gli scostamenti dello spartiacque superficiale da quello sotterraneo sono da considerare ininfluenti.

Lo spartiacque superficiale del "Bacino idrografico" preso in considerazione può dunque essere approssimato, per quasi tutto il suo perimetro, ad un "limite a flusso nullo" (vedi figura 18 del par. 6.3.), analogamente alle sue due chiusure costiere, rispettivamente verso la Pianura versiliese (Fosso della Bufalina-Lago di Massaciuccoli) e il Terrazzo di Livorno; queste ultime sono infatti disposte circa parallelamente alle linee di flusso sotterraneo, dirette nell'insieme ortogonalmente alla linea di costa.

Nella Pianura di Pisa confluiscono peraltro dai Bacini dell'Arno e del Serchio, oltre a quelle superficiali, acque sotterranee per mezzo di falde confinate di subalveo: dal primo direttamente; dal secondo attraverso la Pianura di Lucca e, a valle di questa, il duplice collegamento con le Valli di Ripafratta e di Bientina.

Le tre sezioni in corrispondenza delle valli medesime (Arno, Serchio-Ripafratta e Bientina), che completano il perimetro dello Schema idrogeologico, assumono quindi il significato di "uscita" dal "Bacino idrogeologico della Pianura di Lucca" (vedi anche NARDI *et al.*, 1987) e da quello dell'Arno, mentre rappresentano un'"entrata" per il bacino idrogeologico della Pianura di Pisa.

Gli acquiferi confinati della pianura, inoltre, ricevono apporti da una circolazione profonda, alimentata da strutture idrogeologiche carbonatiche (situate sulla prosecuzione sud-orientale delle Apuane; vedi

successivo par. 5.3.), che sbocca nei campi idrotermali di San Giuliano e Uliveto Terme (Baldacci e Raggi, 1982).

All'interno del Sistema acquifero, le falde dell'**Amc** vengono alimentate (vedi anche Schema della ricarica nella fig. 18), sia dalle **Strutture idrogeologiche "incassanti"**, (ricarica laterale e profonda), sia attraverso il **Complesso acquifero della Pianura di Pisa** (apparati detritico-alluvionali intra-pedemontani; cordoni dunari costieri e dune antiche; depositi eolico-fluviali della fascia pedecollinare meridionale; nel secondo caso la ricarica si effettua, oltreché per infiltrazione diretta delle acque meteoriche, dai corsi d'acqua e dalle loro falde di subalveo.

L'Arno e il Serchio, nella parte centrale della pianura (dove la copertura limo-argillosa raggiunge spessori fino a circa 50 metri), sono idraulicamente ben separati dalle falde confinate; si possono quindi ammettere soltanto limitati fenomeni di drenanza discendente originati dai due fiumi, dovuti alle attuali condizioni di depressione piezometrica. Ciò sembra confermato dall'assenza di apprezzabili fenomeni di inquinamento, che altrimenti ne deriverebbero.

Condizioni alquanto diverse si verificano nei tratti pedemontani e costieri dei suddetti corsi d'acqua, dove invece la copertura permeabile e semipermeabile dell'**Amc** ha spessori più limitati, e ciò potrebbe determinare più accentuati fenomeni di drenanza, verso le sottostanti falde "artesiane".

Il *Bacino idrografico della Pianura Pisana* è infine delimitato dalla linea di costa ("limite a potenziale imposto"), attraverso la quale dovrebbero scaricarsi, in condizioni naturali, le falde "artesiane" dell'**Amc**; le loro attuali condizioni piezometriche (vedi successivo paragrafo 5.2.2.) indicano invece che la discarica è essenzialmente artificiale, attraverso i numerosi pozzi che attingono, nella pianura di Pisa, alle falde stesse.

In conclusione, da quanto sopra esposto viene identificato il **Sistema acquifero della Pianura di Pisa (SaP)**, attraverso la definizione dei suoi limiti, dei suoi elementi costituenti e delle loro interconnessioni, nonché dei loro rapporti funzionali in termini di ricarica-discardica.

Il **SaP** ammette, come si è visto, importanti contributi dall'esterno, provenienti dai Bacini idrogeologici del Serchio e dell'Arno, oltre che da una circolazione profonda, fino ai circuiti idrotermali; esso può essere pertanto definito come un "Sistema acquifero aperto".

Le modalità della sua alimentazione interna verranno esaminate nello specifico par. 5.3.

5.2. *Acquifero multistrato confinato (Amc)*

In questo paragrafo viene esaminata, la successione sedimentaria della Pianura Pisana, che costituisce un **Acquifero multistrato confinato (Amc)**; si tralasciano invece le sue propaggini intramontane che, insieme alle **Strutture idrogeologiche "incassanti"**, verranno successivamente esaminate nel paragrafo 5.3., che tratta degli schemi di alimentazione dell'**Amc** medesimo.

Dal presente studio è escluso inoltre l'orizzonte superficiale (fino a profondità di 20-50 metri dal p.c.) prevalentemente limo-argilloso, che funziona nell'insieme da copertura impermeabile della struttura acquifera confinata; tale orizzonte in realtà comprende anche terreni a permeabilità generalmente bassa, sede di falde freatiche (talvolta sospese) o in pressione (almeno parzialmente), che hanno però un limitato interesse pratico.

Per la ricostruzione litostratigrafica e piezometrica dell'**Amc**, nonché per la caratterizzazione idrochimica delle sue falde "artesiane", sono stati selezionati complessivamente 153 pozzi, sulla base di precedenti inventari effettuati per conto delle Amministrazioni Comunale (1985) e Provinciale (1988) di Pisa; la loro ubicazione, con il rispettivo numero d'ordine, è indicata nella tav. 1 f.t.. Nella tabella 4 della pagina seguente sono riportate le relative profondità e i dati piezometrici, mentre i risultati delle analisi chimiche sono sintetizzati nelle tabelle (A e B) annesse.

È da notare che la mancanza di punti d'acqua in quasi tutta la fascia costiera, dovuta ai vincoli territoriali, civili e militari, vigenti per le Tenute di S. Rossore e di Tombolo, vi ha posto notevoli limiti alla ricostruzione stratigrafica ed ha reso del tutto ipotetica quella piezometrica.

Gli acquiferi più profondi presi in considerazione, costituiti dai depositi alluvionali e fluvio-lacustri del Pleistocene medio-sup. (corrispondenti in affioramento a Qt/P III-II), si trovano a profondità intorno ai 200 metri dal piano di campagna, limite inferiore della nostra indagine.

Il substrato di questi depositi, appartenente alle successioni neogeniche-quadernarie di origine prevalentemente marina e transizionale ("Substrato intermedio" di FANCELLI *et al.*, 1986, comprendente in affioramento le formazioni da Mag a Qcal), non è stato finora sufficientemente esplorato, in modo da consentirne un'affidabile definizione litostratigrafica. Alcuni pozzi che ne hanno attraversato la parte superiore (fino ad una profondità massima, in un unico pozzo, di 285 metri), hanno incontrato prevalentemente depositi limo-sabbiosi di ambiente

Tab. 4 - Elenco pozzi.

Pozzo n°	Profon- dità ⁽¹⁾ (m)	Livello piezo- metrico ⁽²⁾ (m s.l.m)	Pozzo n°	Profon- dità ⁽¹⁾ (m)	Livello piezo- metrico ⁽²⁾ (m s.l.m)	Pozzo n°	Profon- dità ⁽¹⁾ (m)	Livello piezo- metrico ⁽²⁾ (m s.l.m)
1 •	30,00	-1,40	53	151,00		110	268,00	-2,05
2 •	44,00		54	180,00	-11,20	111 ♦		
3	16,00		57 •	197,40		112	126,00	
4	49,50		58	195,50	-3,00	113 • ♦		
5 • ♦		3,10	59	28,00	7,00	114	101,70	
6		2,50	60 ♦	60,00		115	97,20	
7	46,20		61 •	60,00	-5,25	116	154,00	-2,50
8 • ♦	44,50	-2,00	61B •	203,50		117 ♦	131,00	
9	42,50	0,30	63 • ♦	69,00	-2,10	118 ♦	116,00	-2,95
10		3,10	64	56,60		119	114,00	
11		-1,45	65	195,00	-4,00	120	262,50	
12		0,30	66	153,50		121 •	64,20	
13	163,90	1,05	67 •	141,00		124 • ♦	40,60	
14	53,00		68 •	223,00		128	44,20	-3,45
15	53,50		69 •	36,00		129 • ♦	62,00	-3,45
16 •	39,00		70	44,30		130		-5,00
17 • ♦	37,00		71 •	41,60		131 • ♦		
18 • ♦	26,00	4,00	72 • ♦	48,00		134	84,00	
20		3,00	73 •	147,00	-6,90	135	44,00	
21 ♦			74	144,50	-4,85	137		-5,00
22 • ♦	71,00	-0,95	76 •	123,50	-6,20	138 •	51,00	
23 •	80,20		77	125,00	-6,75	139	54,30	
24 •	23,50		78 • ♦	40,00		140 • ♦		
25 •	61,60		79	86,40		141		-3,90
26	165,00		80 •	116,00		143 • ♦		
27 • ♦	55,00		81 •	64,00		144 ♦		-4,05
28 • ♦	201,90	-0,95	82 •	117,00	-3,50	145 •		-4,00
29	52,00		83	112,00		149	41,00	
30	171,80		84	127,00	-5,00	150	170,40	
31	131,00		85 •	127,00	-4,00	152	135,00	
32	117,00		86 •	44,00		154	38,00	
33	59,00	-2,10	87 • ♦	215,00	-2,00	155	35,00	
34 • ♦	70,70		88 • ♦	48,00		156	190,00	
35 •	63,00	-2,05	89	55,00		157	56,00	
37	35,00		90	95,00		158	179,00	
38	26,50		91 • ♦	34,70		160	47,50	-9,50
39 •	27,56		92 • ♦	32,00	-4,40	161		-7,05
40	58,50	-2,00	93	264,50		162	25,00	
41 •	142,00		95 • ♦	109,00	-4,40	163	64,00	-3,00
42	143,00		96 •	111,00	-4,55	164	24,00	
43 •	148,20	-2,35	98	37,40	-4,60	165	65,00	-3,00
44	132,00		99	71,00		169	43,00	
45	53,00		102	58,00		170	43,00	
46 •	133,00	-2,95	103	48,00		171	48,70	
47	59,00		104	218,00		172	47,00	
48 •	218,00	-2,55	105	147,00		173 ♦	49,50	
49	53,00		106 • ♦	101,00	-3,05	174 • ♦	54,50	-2,00
50	56,00	-2,15	107	151,00	-3,50	175 ♦	46,50	
51 • ♦	174,50	-2,45	108	104,00		176	50,00	
52	164,00		109 ♦	105,50		177	55,00	

(1) Tutti i pozzi di cui si conosce la profondità sono a stratigrafia nota

(2) Il livello piezometrico risulta da un valore medio dei mesi di ottobre 1984 - 1985 - 1986

• Analisi chimiche 1984 (n. 55)

♦ Analisi chimiche 1987 (n. 34)

marino-transizionale, confermando le informazioni indirette derivanti dalle conoscenze geologiche della zona. In base a questi scarsi dati puntuali disponibili non è pertanto ipotizzabile un immediato interesse pratico del "Substrato intermedio", sia per quanto riguarda le caratteristiche di permeabilità sia, presumibilmente, per la qualità delle acque; ciò vale a maggior ragione per il substrato più antico, preneogenico ("Substrato profondo").

5.2.1. Ricostruzione litostratigrafica

La ricostruzione litostratigrafica del sottosuolo della Pianura Pisana, al fine di definire la geometria e le caratteristiche granulometriche (e quindi, almeno in prima approssimazione, di permeabilità) della sua struttura acquifera, ha presentato notevoli difficoltà interpretative, a causa soprattutto della complessità degli originari sistemi deposizionali (fluvio-lacustre e marino-transizionale-eolico), che comportano frequenti passaggi laterali e verticali delle litofacies. Ad essi si deve comunque far riferimento quando, come nel nostro caso, i dati geognostici puntuali siano insufficienti (si veda in proposito, nella tav. 1 f.t., il numero complessivo e la distribuzione dei pozzi a stratigrafia nota) e non siano disponibili dati derivanti da prospezioni geofisiche; la diversa profondità dei pozzi, inoltre, determina una diminuzione di informazione verso i livelli inferiori della successione acquifera.

Le stratigrafie utilizzate, infine, sono di diversa provenienza e spesso compilate da non esperti con terminologia poco rigorosa ed ambigua, che le rende tra di loro non confrontabili; in questi casi si è resa pertanto necessaria una loro revisione e reinterpretazione.

L'evoluzione paleogeografica della Pianura Pisana, precedentemente tratteggiata, assume quindi particolare importanza in quanto ha fornito una indispensabile chiave interpretativa per la ricostruzione dell'**Acquifero multistrato confinato**, a partire dai dati puntuali e dalle loro correlazioni; nelle sezioni interpretative che lo rappresentano (vedi fig. 10 e tav. 1 f.t., quest'ultima con le relative tracce), la scala delle altezze è esagerata (1:2.500-50.000 e 1:3.750-50.000 nei rispettivi elaborati originari), al fine di rendere più evidenti le correlazioni dei livelli acquiferi e la loro geometria.

Le sezioni litostratigrafiche suddette sono il risultato di una notevole semplificazione (anche in relazione alla prevista scala di riproduzione), riguardante sia la granulometria dei corpi acquiferi e di quelli che funzionano invece come strati confinanti o semiconfinanti (acquicludi

e acquitardi), sia la loro geometria. È da tenere presente, inoltre, che il passaggio laterale e verticale tra i vari litotipi avviene talvolta in modo molto sfumato, mentre nelle sezioni esso viene necessariamente rappresentato come un limite netto di permeabilità.

Nella tabella 5 sono riportate le tre Unità idrogeologiche nelle quali, indipendentemente dall'origine dei depositi, è stata schematizzata la successione acquifera; con il rispettivo grado di permeabilità relativa, sono indicati anche alcuni coefficienti di permeabilità (K) delle due Unità acquifere, ottenuti (GAGLIARDI e RAGGI, 1985) attraverso prove di portata eseguite in zone di particolare interesse per gli usi potabili (Campi pozzi degli acquedotti di Pisa-Pierdicino e Cascina). Tali parametri devono essere perciò considerati puramente indicativi delle caratteristiche medie dell'Amc. Il valore più elevato ($K = 4 \times 10^{-2}$ m/s) è stato riscontrato in corrispondenza dei depositi appartenenti ad un cono di deiezione sepolto del Torrente Zambra-Calci (adiacente ai M.ti Pisani), costituito principalmente da ghiaie con matrice sabbiosa; non sono però disponibili dati specifici relativi ai depositi del Paleo-Serchio.

Tab. 5 - Unità idrogeologiche dell'Acquifero multistrato confinato della Pianura Pisana e relativi caratteri di permeabilità.

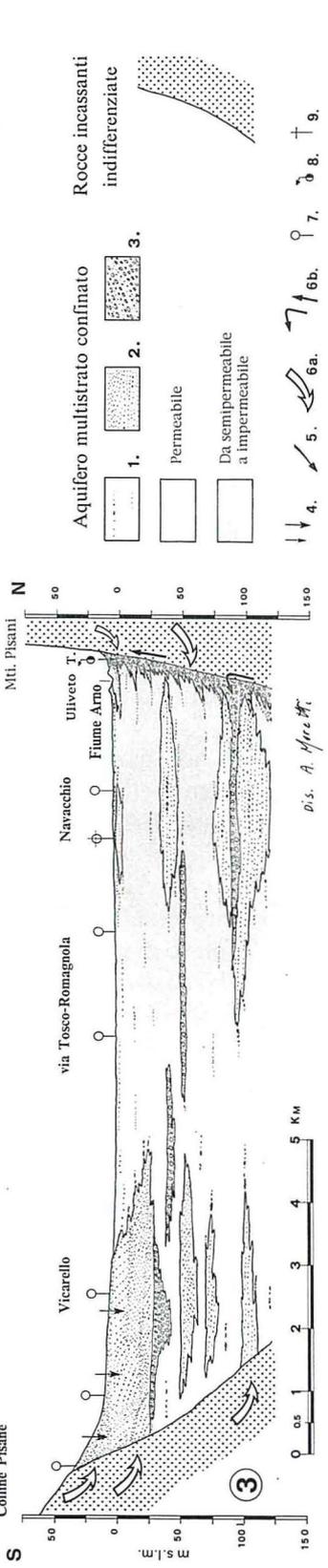
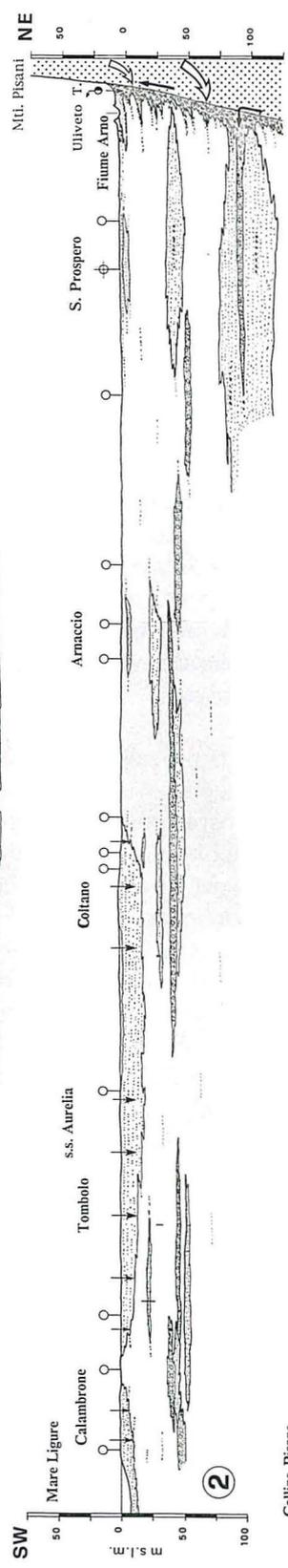
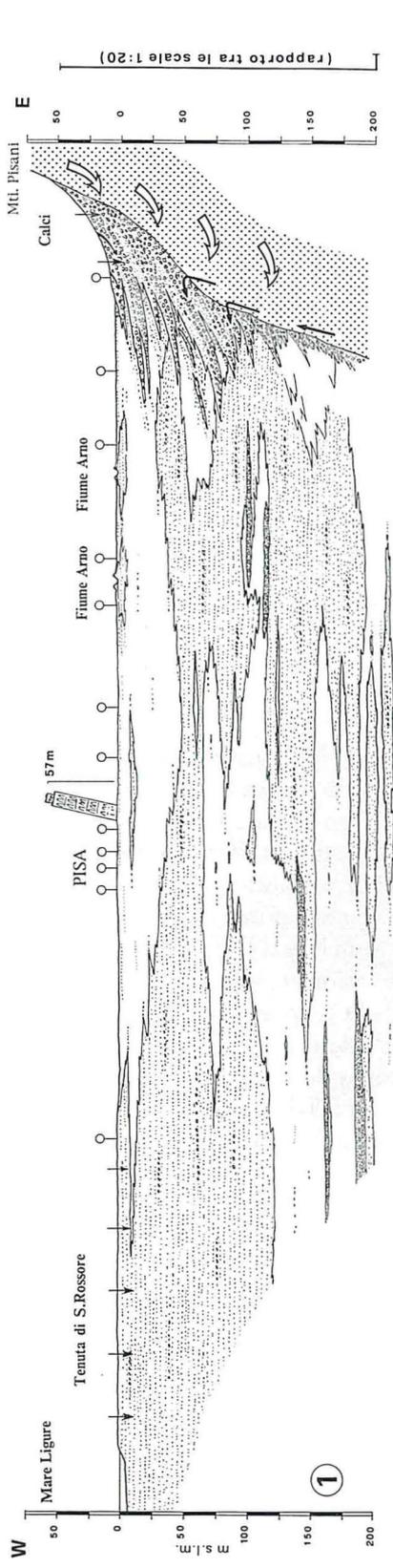
UNITÀ IDROGEOLOGICHE	PERMEABILITÀ PRIMARIA
Acquiferi	
SABBIE: con granulometria da fine a molto fine (prevalentemente medio fine), talvolta limose, con intercalazione sia limo-argillose che sabbiose grossolane, fino a ghiaiose ciottolose.	Variabile da media, a bassa, a molto bassa: K dell'ordine di 10^{-5} - 10^{-4} m/sec
CIOTTOLI E GHIAIE: di dimensioni e litologia diverse, talvolta con matrice sabbiosa in varie proporzioni, talvolta intercalati a livelli francamente sabbiosi.	Elevata con massimi nei depositi ciottolosi dei cono di deiezione sepolti dei Monti Pisani: K dell'ordine di 10^{-3} e 10^{-2} m/sec
Acquicludi o Acquitardi	
ARGILLE E LIMI: argille e argille limose, limi e limi argillosi, talvolta con frazione sabbiosa fine, contenenti straterelli e lenti sabbiosi e torbosi.	Da semipermeabili a praticamente impermeabili

Le sezioni ben evidenziano, nonostante le schematizzazioni effettuate, la notevole complessità della struttura idrogeologica, con corpi acquiferi stratiformi (orizzontali o suborizzontali) più frequenti nella parte centrale della pianura, mentre ai suoi margini essi assumono spessori più rilevanti e geometrie più complicate; la continuità laterale degli acquiferi è molto variabile, e si possono osservare anche litosomi lenticolari, almeno sul piano delle sezioni stesse. Queste caratteristiche geometriche del complesso acquifero "artesiano", unitamente a quelle granulometriche, ne determinano una marcata anisotropia idraulica verticale ed orizzontale.

Le condizioni idrostratigrafiche illustrate nelle sezioni della fig. 10, nonché in altre eseguite per completare il reticolo su tutta la pianura (ma non riprodotte in questo lavoro), configurano come si è già accennato, al di sotto della "copertura impermeabile" (indifferenziata nelle sezioni) e per profondità massime di circa 200 metri, un **Acquifero multistrato confinato (Amc)**; esse possono essere così sintetizzate, a partire dall'alto verso il basso:

a) Orizzonte acquifero prevalentemente sabbioso, esteso per gran parte della pianura, che contiene la "Prima falda artesianiana in sabbie" (DINI, 1976); nell'area prospiciente la Valle di Ripafratta, i primi strati acquiferi confinati corrispondono invece ai depositi ghiaiosi di paleoalvei del Serchio. Gli spessori sono estremamente variabili, con massimi intorno ai 130 metri in corrispondenza degli apparati dunari ed in particolare di quelli antichi. Le profondità del "tetto delle sabbie" raggiungono massimi di circa 50 metri, presso la periferia nord-orientale di Pisa, e diminuiscono progressivamente dall'interno della pianura verso la fascia costiera, dove l'acquifero sabbioso si raccorda alle dune antiche, "emergendo" dalla copertura impermeabile e funzionando così da aree di alimentazione, con falda a pelo libero, della "Prima falda artesianiana". Sul margine nord-orientale della pianura, i livelli acquiferi sabbiosi sono collegati con i conii detritico-alluvionali, situati alla base dei Monti Pisani; attraverso questi ricevono anche, come già accennato, un contributo di acque dalla circolazione idrotermale. Nella fascia meridionale i dati sono insufficienti a stabilire con buona approssimazione la geometria degli acquiferi sabbiosi ed in particolare i loro rapporti con l'*Unità delle "Sabbie e limi di Vicarello"* (P-s/2). Nella zona ad est di Pisa i corpi sabbiosi di questo orizzonte sono più articolati e si saldano, anche se in modo discontinuo, con gli acquiferi del sottostante orizzonte "b".

b) In questo orizzonte sono associati depositi ghiaiosi-ciottolosi, di



Rocce incassanti indifferenziate

origine prevalentemente alluvionale, e depositi a dominante sabbiosa. Il più alto livello acquifero ghiaioso-ciottoloso è costituito dai “Conglomerati dell’Arno e del Serchio da Bientina”, che si sviluppano, con notevole estensione e con spessori variabili fino ad oltre 10 metri, nella fascia meridionale della pianura, a profondità comprese (da monte a valle) da circa 40 metri a circa 60 metri dal piano di campagna. Nella parte centro-settentrionale della pianura, a profondità maggiori, si incontrano ancora livelli ghiaiosi-ciottolosi, più discontinui, che sono stati però raggiunti da un limitato numero di pozzi e non se ne conoscono sufficientemente i limiti areali; si tratta probabilmente in gran parte, oltre che di ghiaie marine (Romagnoli, 1957), di depositi fluviali in paleoalvei più ristretti rispetto a quelli dei “Conglomerati dell’Arno e del Serchio da Bientina”, ma probabilmente anch’essi legati al Paleosistema idrografico Arno-Serchio. Nella parte settentrionale della pianura, gli strati acquiferi grossolani divengono più discontinui e si approfondiscono progressivamente verso nord-ovest, fino a circa 180 metri dal piano di campagna.

I rapporti tra l’**Amc** e gli apparati alluvionali intrapedemontani sono diversi sugli opposti “versanti” della pianura:

— Nella fascia adiacente ai Monti Pisani gli acquiferi confinati sono in collegamento idraulico con i coni di deiezione sepolti, che si trovano allo sbocco delle principali valli.

— Al margine delle Colline Livornesi-Pisane, l’**Amc** può essere in collegamento con gli acquiferi confinati di subalveo degli affluenti, nonché con gli apparati sabbiosi eolico-alluvionali-colluviali delle “Sabbie di Vicarello e dell’Isola di Coltano” (rispettivamente d1a/ P III-IV e d1b/ P III).

In entrambi i casi si stabiliscono comunque connessioni idrauliche anche tra l’**Amc** e le **Strutture idrogeologiche incassanti**.

È da osservare infine come nelle sezioni i livelli sabbiosi (di origine marina, fluviale ed eolica) appaiano in generale più continui, oltre che

Fig. 10 - Sezioni lito-stratigrafiche interpretative attraverso la Pianura di Pisa.
 LÉGENDA 1. Argille e limi; 2. Sabbie; 3. Ciottoli e ghiaie; 4. Ricarica superficiale per infiltrazione diretta delle acque meteoriche; 5. Ricarica subalveare; 6. Ricarica laterale (a) e profonda (b), dalle strutture idrogeologiche “incassanti”; 7. Pozzi a stratigrafia nota, sulle sezioni e proiettati; 8. Sorgente termominerale; 9. Incontro delle sezioni 2 e 3.
 Per le caratteristiche di permeabilità dell’acquifero multistrato confinato e per le tracce delle sezioni si vedano rispettivamente la tabella 5 e la fig. 18.

più potenti, di quelli ghiaiosi-ciottolosi (prevalentemente fluviali); ciò può essere dovuto anche alla loro diversa orientazione rispetto all'allungamento dei depositi di canale o di fiumara, la cui geometria potrebbe essere adeguatamente rappresentata solo in un modello tridimensionale.

Schematizzando ulteriormente le condizioni litostratigrafiche sopradescritte, si può osservare che nella parte superiore della struttura idrogeologica sono nettamente dominanti gli acquiferi sabbiosi, mentre quella inferiore è caratterizzata dalla presenza di quelli ghiaiosi-ciottolosi, a permeabilità più elevata. La superficie sommitale dei due insiemi è rappresentata rispettivamente negli stereogrammi "a" (tetto delle "sabbie") e "b" (tetto delle "ghiaie") della fig. 11.

È da mettere in evidenza che queste superfici non corrispondono al limite fisico di un unico acquifero, ma all'involuppo superiore di una pluralità di corpi permeabili più o meno continui (eventualmente collegati fuori dal piano delle sezioni), sfalsati in senso sia orizzontale che verticale.

È evidente l'interesse pratico dell'andamento delle due superfici in quanto, al contrario delle sezioni, forniscono informazioni bidimensionali sulle profondità alle quali mediamente si incontrano quelli che, seguendo la letteratura e l'uso corrente, ma ponendo nuovamente l'accento sul fatto che non si tratta di corpi acquiferi continui, verranno di seguito denominati:

- "*Primo acquifero artesiano in sabbia*"
- "*Primo acquifero artesiano in ghiaia*"

Dallo stereogramma "a" si vede che il "tetto delle sabbie" è piuttosto accidentato, con profondità massime (intorno ai 50 metri dal piano di campagna) in una grande depressione chiusa, situata a nord-est di Pisa; depressioni minori (25-30 metri) sono centrate in una fascia a sud-ovest di Pisa. Gli acquiferi sabbiosi, che come detto si raccordano agli apparati dunari costieri, non sembrano invece collegarsi, verso sud, con le "Sabbie e limi di Vicarello" (d1a/P III-IV), che bordano la fascia prospiciente le Colline pisane. Sul margine nord-occidentale della pianura, i primi livelli acquiferi che si incontrano nelle perforazioni sono ghiaiosi-ciottolosi e appartengono agli apparati alluvionali sepolti del Serchio e dei torrenti minori che scendono dai Monti Pisani. Essi si collegano verosimilmente con il *Primo acquifero artesiano in sabbia*; il tetto dei due complessi è stato pertanto raccordato nello stereogramma.

(Stereogrammi elaborati da
M. Allagosta e F. Mazzarini)

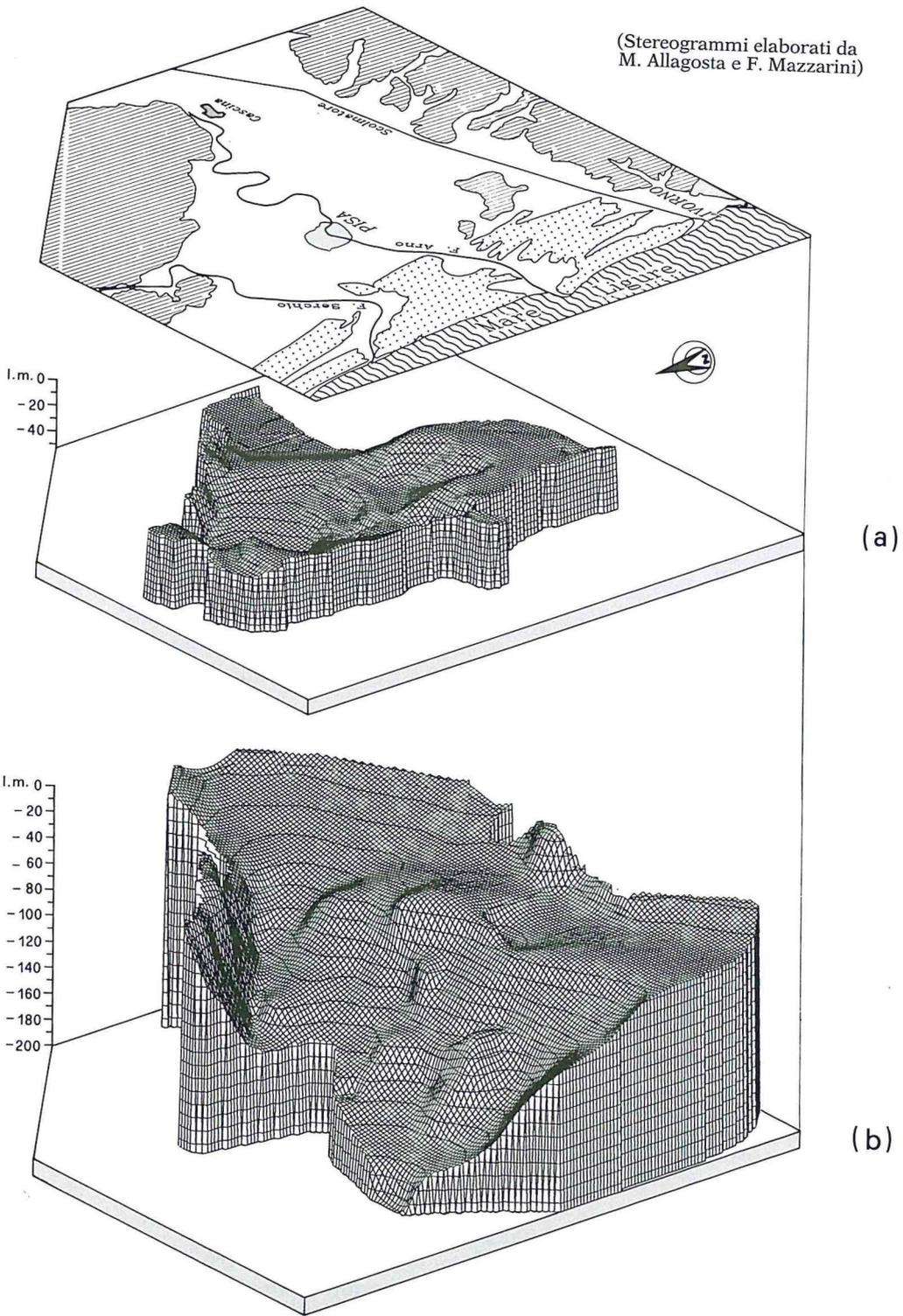


Fig. 11 - Stereogrammi del tetto del "Primo acquifero artesiano in sabbia" (a) e del "Primo acquifero artesiano in ghiaia" (b).

L'andamento del "tetto delle ghiaie" è nell'insieme debolmente acclive verso il quadrante nord-occidentale, in corrispondenza della fascia meridionale della pianura; tale approfondimento diviene più marcato in tutta la sua parte centro-settentrionale (dall'isobata di m 50 fino a quella di m 180), con ondulazioni allungate secondo il pendio. La superficie è complicata inoltre da due piccole depressioni chiuse, alla periferia sud-ovest di Pisa (segnate dalle isobate di 110 metri e 140 metri), la seconda delle quali è affiancata da un piccolo rilievo, individuato dall'isobata di 90 metri. A partire dalla zona di Cascina si individua una "valle", allungata in direzione circa NW-SE, adiacente al margine dei Monti Pisani; essa potrebbe rappresentare una fase di reincisione da parte del Paleo-Arno-Serchio, in una delle fasi di ripresa dei fenomeni erosivi, legate a mutamenti delle condizioni climatiche e a variazioni del livello del mare. Per quanto riguarda l'estensione areale dei depositi grossolani, essi sono in genere presenti nei settori centro-meridionali della pianura fino al margine delle Colline Pisane, in accordo con l'antico tracciato del Paleo-Arno-Serchio; sembra invece sufficientemente documentata la loro scomparsa, in profondità, nel settore a nord di Pisa, dove invece si trovano i depositi ghiaiosi-ciottolosi del "Paleo-Serchio da Ripafratta" appartenenti, come già accennato, al *Primo acquifero artesiano in sabbia*.

5.2.2 Condizioni piezometriche

La "Carta piezometrica" della fig. 12 è rappresentativa delle pressioni medie relative alle falde "artesiane" sovrapposte, che hanno sede nella complessa struttura acquifera della Pianura Pisana; essa è stata inoltre ottenuta mediando le quote (metri s.l.m.) misurate nei mesi di Ottobre degli anni 1984, 1985 e 1986 (BALDACCI *et al.*, 1988), ed è pertanto indicativa delle condizioni di transizione tra i minimi livelli annuali (fine estate) e l'inizio della ricarica autunnale-invernale.

Bisogna innanzitutto precisare che non sarebbe stata possibile una ricostruzione piezometrica dei singoli strati acquiferi, in quanto essi vengono di solito messi in comunicazione dai pozzi; inoltre le misure non corrispondono, esclusi pochi casi, ad una situazione statica, bensì dinamica, dovuta ai prolungati periodi di sfruttamento delle falde, in relazione ai vari usi ed aree di prelievo. I consumi sono massimi, ovviamente, nei mesi estivi, quando gli usi agricoli si sommano a quelli industriali e civili, questi ultimi più continui. Solo in pochi casi è stato possibile effettuare misure su pozzi nei quali erano stati momentanea-

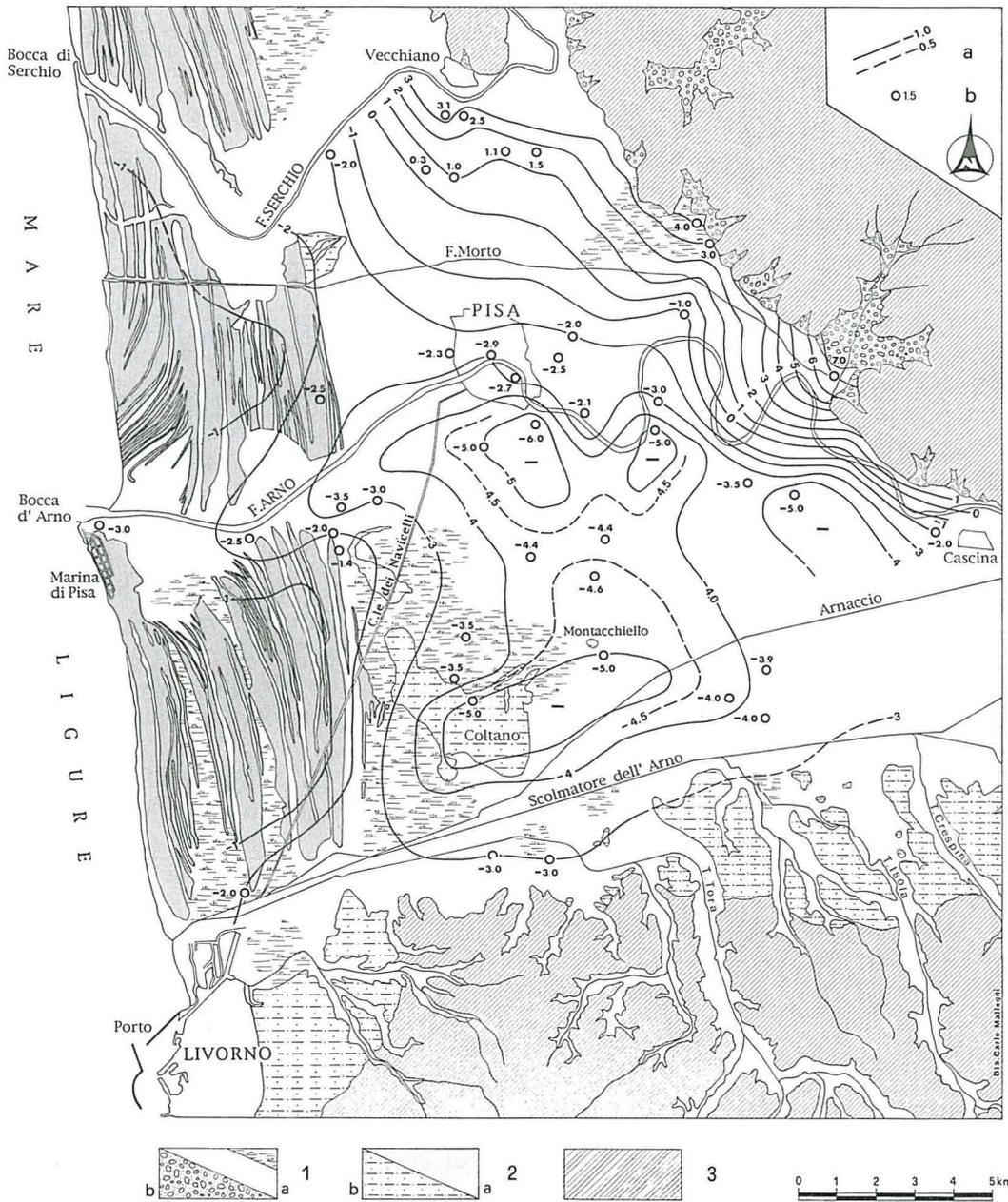


Fig. 12 - Carta piezometrica delle falde "artesiane"; livelli dinamici medi dei mesi di Ottobre negli anni 1984, 1985 e 1986.

LEGENDA a - Pozzi e relative quote piezometriche; b - Isopieze (metri s.l.m.). **Complesso acquifero della Pianura Pisana:** 1a. Depositi alluvionali recenti ed attuali prevalentemente limo-argillosi; localmente depositi fluvio-palustri e di colmata (con soprassegno); 1b. Depositi alluvionali dei con di deiezione e/o terrazzati, prevalentemente ghiaiosi-ciottolosi, con matrice limo-sabbiosa in varie proporzioni; 2a. Sabbie eoliche dei lidi e delle dune litoranee; 2b. Sabbie eoliche, eolico-palustri, fluviali e colluviali; 3. Rocce "incassanti".

mente interrotti gli emungimenti; ciò non ha però sostanzialmente modificato le generalizzate condizioni dinamiche che si registrano su quasi tutta la pianura.

Come in tutte le strutture acquifere multistrato di pianura fluvio-costiera anche nel caso in esame dovrebbe verificarsi, in condizioni naturali, un lieve generale gradiente piezometrico, e quindi un flusso sotterraneo, dall'interno verso il mare. I lidi e le dune litoranei interrotti in corrispondenza del Serchio, dell'Arno e del Paleo-Arno-Serchio, che rappresentano aree di ricarica e quindi di rilievo piezometrico, dovrebbero peraltro deviare e incanalare il deflusso verso "selle" piezometriche determinate dalle suddette interruzioni, funzionando inoltre da sbarramento dell'intrusione di acqua marina.

La configurazione illustrata in figura mostra invece, alle spalle della fascia costiera, un complesso insieme di estese ed accentuate depressioni piezometriche, che sono evidentemente l'effetto di intensi emungimenti, verso le quali viene artificialmente richiamato il deflusso sotterraneo. A questo proposito è da mettere in rilievo l'ampia depressione che occupa tutta la parte centro-meridionale della pianura ed è articolata, a sud di Pisa, in tre minimi (fino a valori di 6 metri sotto il livello del mare); questi corrispondono ad aree di intenso prelievo, per l'acquedotto comunale di Pisa (Le Rene, Riglione-Pierdicino) e per la tenuta di Coltano. Un'altra accentuata depressione piezometrica, di 3 metri sotto il livello del mare, è osservabile nel pozzo situato in sinistra di Bocca d'Arno, nell'area FIAT di Marina di Pisa.

La mancanza di punti d'acqua non ha reso inoltre possibile una ricostruzione piezometrica nella fascia costiera, e quindi di verificarne le presumibili situazioni di alto, almeno relativo; ci siamo pertanto limitati a registrare un graduale innalzamento, pur restando nei valori negativi, verso le due maggiori zone di dune costiere, situate sulle opposte sponde dell'Arno.

Anche nella fascia meridionale della pianura, dove sono state registrate quote ben al di sotto del livello del mare (3-4 metri) nei limitati pozzi a disposizione, la ricostruzione piezometrica è in gran parte ipotetica; non si possono pertanto trarre indicazioni sugli effetti di una possibile ricarica derivante dai paleoalvei dei principali corsi d'acqua che, dalle Colline Pisane, affluiscono alla Pianura di Pisa.

Analoghe considerazioni valgono per la parte più interna della pianura, dove confluiscono le Valli di Bientina, dell'Arno e dell'Era.

La superficie piezometrica tende invece a risalire nettamente verso il margine nord-orientale della pianura, adiacente ai Monti Pisani ed ai Monti d'Oltre Serchio. Solo in questa fascia si raggiungono infatti

quote piezometriche al di sopra del livello del mare, con settori conici divergenti che, riflettendo in modo più o meno marcato le forme degli apparati alluvionali dei principali torrenti che scendono dai Monti Pisani, ne esprimono aree di alimentazione alle falde artesiane dell'Amc.

Un ben evidente settore conico divergente è presente allo sbocco della Valle di Ripafratta, ed è quindi da mettere in relazione con una alimentazione proveniente dalla falda confinata di subalveo del Fiume Serchio; non sono comunque da escludere importanti contributi più profondi, derivanti dalle strutture idrogeologiche incassanti (vedi successivo par. 5.3.2.).

Esula dagli scopi di questo studio un'analisi delle variazioni piezometriche stagionali, nonché delle loro correlazioni con i cicli della ricarica, in rapporto alle aree di alimentazione e di prelievo; ciò sarebbe comunque estremamente problematico, data la scarsità quali-quantitativa di dati riguardanti i vari fattori in gioco, tra di loro variamente interferenti; il confronto con il precedente studio di GAGLIARDI e RAGGI (1995) indica peraltro una sostanziale stabilità dei livelli di falda durante l'anno.

5.2.3. *Caratteristiche idrochimiche*

Per la definizione delle principali caratteristiche chimiche delle acque sotterranee della Pianura di Pisa sono stati utilizzati dati inediti (GAGLIARDI e RAGGI, 1985) relativi a prelievi effettuati in 55 pozzi, nel periodo Gennaio-Febbraio 1984, integrati da un controllo relativo ad alcuni parametri (conducibilità, durezza, alcalinità totale, cloruri e ferro), eseguito nel Giugno-Luglio del 1987 (BALDACCINI *et al.*, 1988) su 34 pozzi, 25 dei quali già censiti nella precedente indagine; il confronto tra dati relativi a stagioni diverse è in qualche misura ammissibile, date le limitate variazioni piezometriche annuali (vedi par. precedente). Al momento del prelievo è stata misurata anche la temperatura delle acque. I risultati delle analisi chimiche, eseguite presso i laboratori della U.S.L. n. 12 di Pisa, sono riportati nelle Tabelle A e B allegate. Nella prima serie di analisi erano stati determinati anche solfati, bicarbonati, sodio, potassio, magnesio e calcio. I pozzi campionati in entrambe le campagne sono indicati con apposita simbologia, come precedentemente accennato, nella tab. 4 e nella Tav. 1 f.t..

I dati relativi al 1984 sono stati rappresentati graficamente, riportando i valori sul diagramma a losanga di Piper (fig. 13); da questo si

può notare una notevole dispersione dei punti, che rende problematica una caratterizzazione idrochimica complessiva delle falde "artesiane" della Pianura. Ciò è dovuto alla miscelazione di acque di origine diversa e che circolano, a vari livelli, in acquiferi con differenti caratteristiche litologiche e granulometriche.

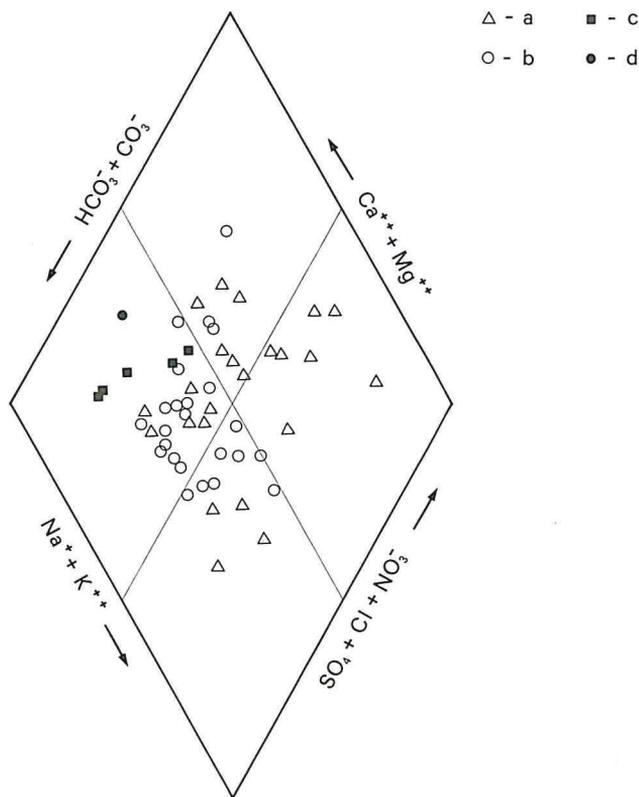


Fig. 13 - Diagramma delle facies idrochimiche secondo Piper (Gennaio-Febbraio 1984).
 LEGENDA a - "Primo acquifero artesiano in sabbia"; b - "Primo acquifero artesiano in ghiaia" e falde profonde; c - Falda della fascia pedemontana (Monti Pisani); d - "Falda di Filettole".

Le acque presentano in generale un elevato contenuto salino, con una notevole variabilità dei rapporti caratteristici fra gli ioni. Ciò può essere messo in relazione all'influenza di fattori diversi, che agiscono nei vari settori della pianura: litologia, apporti idrotermali, intrusione di acqua marina e, probabilmente, locali fenomeni di inquinamento.

Una migliore caratterizzazione del chimismo si può ottenere considerando separatamente, ancora con riferimento alla fig. 15, le acque appartenenti ad acquiferi più omogenei.

- La facies idrochimica dei campioni provenienti dalla fascia pedemontana dei Monti Pisani, ad esclusione dei settori adiacenti le sorgenti idrotermali (S. Giuliano e Uliveto T.) e di quello allo sbocco della valle di Ripafratta, è chiaramente bicarbonato-calcaica e magnesiaca con valori della mineralizzazione bassi, rispetto a quelli medi delle rimanenti aree della pianura. Ciò conferma che si tratta di acque derivanti da circuiti brevi e poco profondi, in depositi alluvionali del “primo acquifero artesiano”, che localmente è costituito però in prevalenza da depositi grossolani; questi sono inoltre ben alimentati rispettivamente dagli apparati detritico-alluvionali pedemontani (Monti Pisani) e dalla falda confinata di subalveo del Serchio.
- Le acque campionate nel “Primo acquifero artesiano in sabbia” coprono un campo di facies idrochimiche piuttosto ampio: si passa da acque carbonatiche-sodiche e potassiche delle zone a Sud ed Est di Pisa, a solfato-clorurate-alcaline che si trovano nelle aree urbane e a Nord di Pisa; in queste ultime è riconoscibile la miscelazione con le acque solfato-clorurato-alcaino terrose (così classificate in recenti lavori di S. Grassi e G. Fanelli, 1990 e di S. Grassi et al., 1992) ad alto contenuto di solfati e bicarbonati, provenienti dal sistema idrotermale di S. Giuliano Terme. È da sottolineare la presenza di cloruri di origine marina, ben documentabile però soltanto nella parte meridionale della fascia costiera; non è invece possibile giungere a conclusioni univoche a questo proposito, a causa della scarsità di dati disponibili, nel resto della fascia costiera. In alcuni casi l'elevato contenuto in cloruri, da imputarsi probabilmente a fenomeni di inquinamento, determina locali modificazioni del campo di appartenenza.
- Caratteri sensibilmente differenti presentano le acque campionate negli acquiferi sabbiosi e ghiaiosi più profondi (“Primo acquifero artesiano in ghiaie”). Quasi tutti i punti si collocano infatti nei campi delle acque bicarbonato-alcaline e bicarbonato-alcaino terrose; fanno eccezione i campioni prelevati nelle zone costiere, dove è più evidente la contaminazione di cloruri provenienti dalla intrusione di acqua di mare, soprattutto a carico delle falde più profonde.

Sulla base dei risultati analitici, che non presentano importanti variazioni nei due periodi di campionamento, è possibile fare alcune considerazioni sulla distribuzione areale dei più significativi parametri chimici, indipendentemente dall'orizzonte acquifero di appartenenza; questa semplificazione è in qualche caso giustificata da una comune origine del contenuto salino, oltre al fatto che gran parte dei pozzi mettono in comunicazione acquiferi situati a diversa profondità.

Il dato saliente è rappresentato da un aumento della durezza, dell'alcalinità, dei solfati e, seppur meno accentuatamente, dei cloruri, a valle delle principali zone di risalita e di emergenza delle acque termominerali, lungo il margine sud-occidentale dei Monti Pisani. A queste si alternano zone con valori di concentrazione decisamente minori, coincidenti con i maggiori apparati alluvionali pedemontani (coni di deiezione di Calci e di Asciano), e quindi con una diluizione dovuta ad una ricarica di acque dolci superficiali.

I cloruri sono generalmente in concentrazione elevata, e raggiungono i valori massimi, come si è visto, nella fascia costiera meridionale; in questa area si potrebbe ipotizzare una maggiore intrusione di acqua marina lungo un corridoio di minor carico piezometrico, corrispondente alla terminazione meridionale degli apparati dunari costieri (si veda la carta piezometrica della fig. 12). Gli elevati valori dei cloruri sono generalmente associati a quelli di durezza e alcalinità.

Si riscontrano inoltre alti valori del contenuto in ferro, fino a punte massime di circa 16 mg/l, in un ampio settore della pianura in sinistra del F. Serchio; questi valori possono essere spiegati con una circolazione a contatto di livelli torbosi nei depositi palustri di retroduna e di interduna. Ciò è confermato dalla presenza in queste acque di elevate concentrazioni di azoto ammoniacale e ione bicarbonato, strettamente correlati al ferro in queste situazioni di ambiente fortemente riducente.

Nelle restanti zone della pianura si registrano spesso valori tra loro discordanti, da porre in relazione con fenomeni di inquinamento locale, probabilmente dovuti anche a pozzi privi di adeguata cementazione.

Nella fig. 14 sono stati infine diagrammati i rapporti fra conducibilità e cloruri, relativi alle due campagne del 1984 e del 1987, con distinte le acque campionate nei due orizzonti acquiferi confinati sopraccitati. Il rapporto è, nei due casi, minore per la "Prima falda artesianiana in sabbia", ma i dati disponibili non permettono di fornire una motivata spiegazione al riguardo. La situazione sembra inoltre peggiorare passando dal 1984 al 1987; la minore pendenza delle curve di correlazione denota infatti un aumento generalizzato della concentrazione dello ione cloro rispetto al contenuto salino globale,

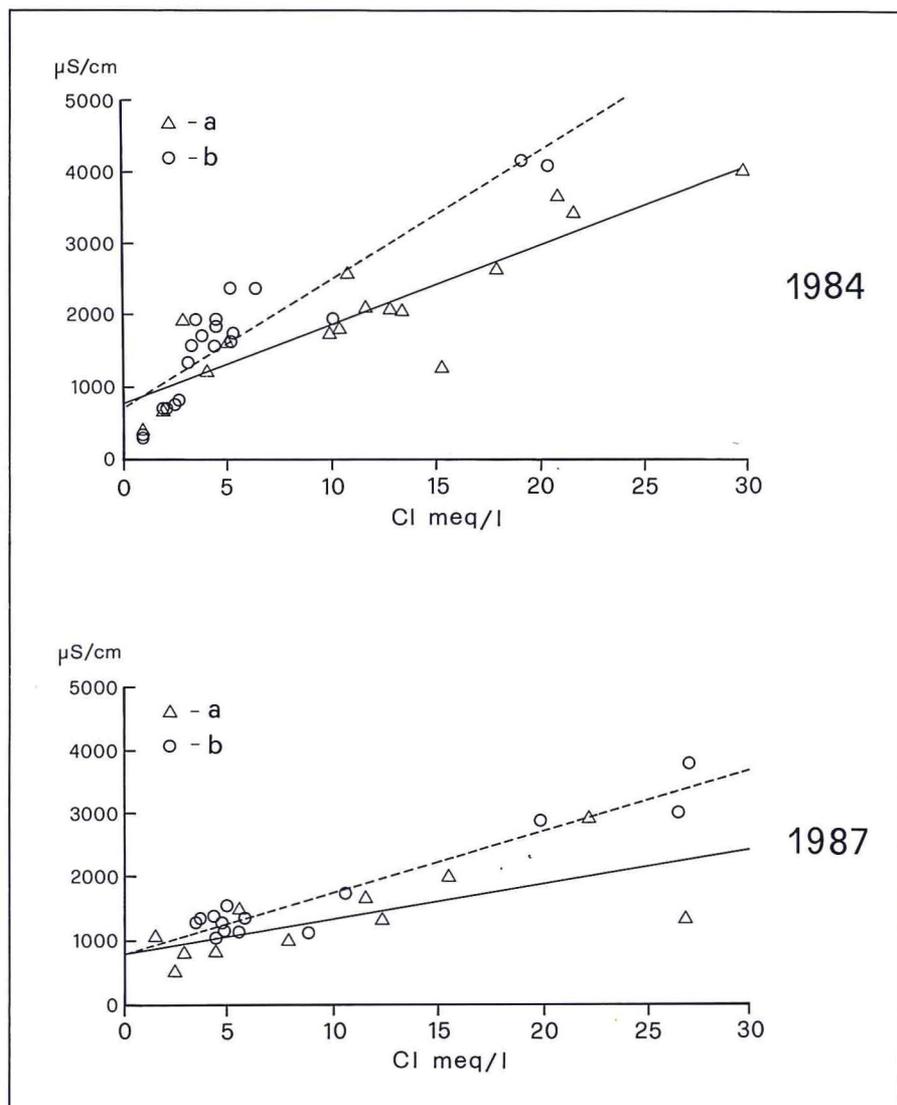


Fig. 14 - Correlazione Cloruri/Conducibilità per gli anni 1984 e 1987.
LEGENDA a - "Primo acquifero artesiano in sabbia"; b - "Primo acquifero artesiano in ghiaia" e falde profonde.

dovuto probabilmente ai maggiori prelievi su gran parte della pianura nel periodo estivo.

Ne sono derivati, come già accennato, fenomeni di intrusione marina e, probabilmente di inquinamento, questi ultimi dovuti alla drenanza di acque freatiche, nelle zone più interne della pianura.

Il quadro idrochimico che emerge da quanto sopra esposto non si discosta sostanzialmente, almeno dal punto di vista qualitativo e limitatamente alla "Prima falda artesianiana" nella zona di Pisa, da quello registrato nello studio di I. Dini (1976), in cui ne veniva accertata una alimentazione con apporti di diversa origine, sia di acque termali solfato-bicarbonato-calciche, sia di acque ad elevato contenuto in cloruri e ferro, sia di acque a bassa concentrazione di sali disciolti.

5.3. *Schemi di alimentazione dell'Amc*

Vengono ora esaminati gli schemi della circolazione sotterranea che collega i due componenti (**Complesso acquifero della Pianura di Pisa e Strutture idrogeologiche "incassanti"**) del **Sistema acquifero** precedentemente definito, tenendo conto anche delle indicazioni derivanti dalle caratteristiche piezometriche ed idrochimiche (vedi paragrafi 5.2.2. e 5.2.3.) delle falde "artesiane" dell'**Amc**; si tratta in altri termini di definire, per i diversi settori del **Sap** stesso e in base ad un'analisi dei rapporti strutturali e funzionali tra i vari elementi che lo costituiscono, le modalità di alimentazione degli acquiferi confinati della Pianura di Pisa e delle Valli di Ripafratta e Bientina.

Per meglio raggiungere tale scopo, le sezioni schematiche della Tav. 1 f.t., dove i rapporti di scala (stessa scala orizzontale e verticale) non consentono di ben delineare i vari componenti (acquiferi, acquitardi e acquicludi) dell'**Amc**, devono essere integrate con le sezioni litostratigrafiche della fig. 10 (a scala verticale esagerata), nelle quali peraltro sono indifferenziate le "rocce incassanti".

L'argomento verrà svolto distinguendo la ricarica diretta dell'**Amc** da quella indiretta, che si realizza cioè anche attraverso i collegamenti idraulici con le rocce "incassanti" e con gli apparati alluvionali intrapedemontani. Verrà inoltre seguito, come sopra accennato, un criterio di zonazione fisiografica, per meglio organizzare poi la quantificazione della ricarica, ripartita nei vari *Settori di alimentazione* individuati nel **Sap** (vedi successivo par. 6.3./ fig. 18).

5.3.1. Ricarica diretta

Gli *Apparati dunari costieri*, dove affiorano depositi sabbiosi a permeabilità primaria generalmente “Da elevata a mediocre” (PII), rappresentano aree di infiltrazione, in collegamento idraulico con vari livelli acquiferi confinati della pianura (vedi par. 5.2.1.); essi funzionano quindi come aree di ricarica diretta, con falda a pelo libero. Lo stereogramma della fig. 9, nonché le sezioni lito-stratigrafiche della fig. 10 e della Tav. 1 f.t., mostrano che i cordoni dunari recenti (d_2) alimentano gli strati acquiferi più superficiali, prevalentemente sabbiosi, mentre le dune più antiche (d_{1b}), affioranti presso Palazzetto, Castagnolo e Coltano, sono collegate anche con i sottostanti depositi ghiaiosi-ciottolosi del paleosistema idrografico Arno-Serchio.

Sulle blande ondulazioni dei *Rilievi pedecollinari di Vicarello*, affiorano depositi prevalentemente limo-sabbiosi (d_{1a} /PIII) che, come mostra lo stereogramma della fig. 16, nonché le sezioni della fig. 10, costituiscono aree di alimentazione diretta dei sottostanti depositi fluviali ghiaiosi-ciottolosi del Paleo-Arno-Serchio, analogamente a quanto si verifica per gli apparati dunari costieri.

5.3.2. Ricarica indiretta

Come già accennato, viene così definita la ricarica delle falde “artesiane” che, nei casi più complessi, coinvolge sia le strutture idrogeologiche “incassanti”, sia gli apparati alluvionali intra-pedemontani.

L'illustrazione delle varie zone fisiografiche, situate sui rilievi montuosi e collinari adiacenti alla Pianura di Pisa e alle sue propaggini nelle Valli di Ripafratta e Bientina, cui corrispondono differenti *Settori di alimentazione* delle falde “artesiane” delle pianure stesse, procederà ora in senso orario a partire dalla fascia costiera.

Monti d'Oltre Serchio

La parte dei *Monti d'Oltre Serchio* compresa nel **Sap** si articola in tre unità fisiografiche, con diverse caratteristiche idrogeologiche.

— La più meridionale è un piccolo massiccio costituito esclusivamente da rocce acquifere carbonatiche, dotate di permeabilità secondaria crescente, generalmente molto alta (Sc I-II); esso “emerge” dai

depositi alluvionali della Pianura Pisana e della Valle di Ripafratta per gran parte del suo perimetro (escluso il lato settentrionale). La rete acquifera del piccolo massiccio carbonatico viene drenata prevalentemente verso la pianura costiera (che si trova a quote inferiori a quelle della Valle di Ripafratta), come è testimoniato dalla rispettiva presenza e assenza di sorgenti (sorgenti di sbarramento sul margine occidentale del "massiccio"); queste vengono alimentate, secondo studi inediti degli Autori, oltre che dall'infiltrazione nel rilievo montuoso, anche dall'alveo del Serchio e dalla sua falda confinata di subalveo (Valle di Ripafratta).

— La parte centrale dei rilievi montuosi è costituita da un insieme di acquiferi carbonatici (Sc I-II), con giacitura subverticale; questi sono separati da due livelli relativamente impermeabili (Sd III), che funzionano quindi da "pareti", guidando la circolazione sotterranea in direzione all'incirca meridiana.

— Uno schema di circolazione sotterranea ancora diverso caratterizza la parte più settentrionale dei Monti d'Oltre Serchio, dove l'acquifero carbonatico (Sc I) viene sbarrato dal complesso, relativamente impermeabile, Scaglia-Macigno (Im-S; Sd III), senza peraltro dare origine ad importanti manifestazioni sorgentizie. Anche in questo caso, comunque, la struttura idrogeologica indirizza il deflusso sotterraneo verso la terminazione meridionale dei Monti d'Oltre Serchio.

L'insieme delle condizioni idrogeologiche sopra esposte, concorrono nel determinare la notevole portata complessiva (intorno ai 60 l/sec) della falda che alimentava le sorgenti in località "Paduletto", sul margine occidentale dei Monti d'Oltre Serchio, e che attualmente viene sfruttata mediante pozzi.

Le strutture carbonatiche dei Monti d'Oltre Serchio si scaricano, inoltre, negli acquiferi alluvionali confinati delle adiacenti pianure.

Versante sud-occidentale dei Monti Pisani

Si distinguono due zone con diverse caratteristiche idrogeologiche.

In quella nord-occidentale (dalla Valle di Ripafratta fino a San Giuliano Terme) le rocce carbonatiche affiorano diffusamente su tutto il versante e costituiscono anche, a differenza dei Monti d'Oltre

Serchio, acquiferi "pensili"⁽¹⁰⁾; questi poggiano cioè sopra un substrato impermeabile affiorante lungo tutto il loro perimetro, scaricandosi in tal modo attraverso sorgenti di trabocco e/o di "deversement"⁽¹¹⁾ (vedi sezione 2 della Tav. 1 f.t.). Il contributo di queste strutture idrogeologiche alla ricarica delle falde "artesiane" della Pianura di Pisa è quindi irrilevante, rispetto a quello dei *Monti d'Oltre Serchio*.

Situazioni di ricarica analoghe a quelle dei *Monti d'Oltre Serchio* si verificano invece per i più limitati acquiferi carbonatici (*Strutture carbonatiche pedemontane*), situati nella fascia pedemontana da S. Giuliano Terme fino alla terminazione sud-orientale del versante.

Nello stesso tratto del versante in oggetto, particolare importanza assumono gli apparati alluvionali intra-pedemontani, situati allo sbocco dei principali bacini idrografici; si tratta in genere di poco accentuati coni di deiezione, talvolta coalescenti, che tendono probabilmente a formare nel sottosuolo, unitamente alle falde detritico-colluviali, una fascia continua di depositi grossolani (permeabilità in genere P II), in collegamento idraulico con gli acquiferi confinati della Pianura Pisana (vedi sezioni della fig. 10).

In sintesi, le modalità di alimentazione dell'**Amc**, da parte del *Versante sud-occidentale dei Monti Pisani*, sono molteplici, ma consistono principalmente nelle seguenti:

a) Infiltrazione delle acque meteoriche sugli apparati alluvionali intra-pedemontani, ed in particolare sui coni di deiezione.

b) Ricarica, sugli apparati alluvionali intra-pedemontani stessi, dagli alvei fluviali e dalle loro falde di subalveo, queste ultime a loro volta alimentate anche dalle relative strutture idrogeologiche "incassanti".

⁽¹⁰⁾ Proponiamo questo termine per definire, nel tipo di struttura idrogeologica considerata, sia l'acquifero che la falda in esso contenuta, che ha un substrato impermeabile del tutto o in parte affiorante; il significato è quindi sostanzialmente diverso da quello di falda "sospesa", che viene utilizzato di solito per le falde di acquiferi alluvionali, il cui substrato impermeabile è completamente sotterraneo.

⁽¹¹⁾ Nella letteratura idrogeologica italiana, la traduzione letterale ("scaricamento") di questo termine francese non è comunemente in uso per questo tipo di sorgenti, che vengono classificate come "di contatto in senso stretto" o di "limite di permeabilità sottoposto"; riteniamo che queste definizioni non siano rigorose, in quanto non ne esprimono completamente le caratteristiche geometriche ed idrodinamiche: sorgenti alimentate da falde nelle quali tutti i filetti liquidi si muovono al di sopra del livello di sfioro. Ne consegue la possibilità di una completa discarica del serbatoio di alimentazione, in assenza di un'adeguata ricarica stagionale.

Il collegamento idraulico con gli acquiferi confinati dell'**Amc** è quindi in ogni caso costituito dagli apparati detritico-alluvionali pedemontani.

Valle di Bientina

La *Valle di Bientina* che funziona, insieme a quella di Ripafratta, da collegamento idrografico ed idrogeologico tra le pianure di Lucca (a monte) e di Pisa, presenta una marcata dissimmetria morfo-idrostrutturale.

Lo stereogramma schematico della fig. 15 mostra infatti che il suo versante destro (*Versante orientale dei Monti Pisani*), molto acclive e culminante alle quote di 917 del M. Serra e di 705 del M. Cimone, è costituito quasi esclusivamente (oltre alle diffuse coperture detritiche) da rocce filladico-quarzitiche ("verrucano" s.l./ da Im S a S Im); gli affioramenti carbonatici sono molto limitati e confinati alla parte basale meridionale del versante, non compreso nello stereogramma.

Le condizioni di alimentazione, da questo settore alla falda confinata della piana di Bientina, sono analoghe a quelle dell'adiacente versante sud-occidentale, per quanto diversa sia la sua ripartizione nelle sudette componenti "a" e "b"; la ricarica proveniente dalle rocce "incassanti" (Verrucano s.l.; Sd-si) è presumibilmente di entità limitata, e comunque nettamente subordinata rispetto a quella analoga proveniente dalle *Colline delle Cerbaie*.

La struttura idrogeologica del versante sinistro, formato dai modesti rilievi delle *Cerbaie*, differisce sostanzialmente da quella del versante destro. Vi affiorano infatti i depositi ghiaiosi-ciottolosi, a matrice e con alternanze limo-sabbiose, della formazione Qt/ PIII-II; questi poggiano sopra una formazione (Ps) prevalentemente sabbiosa, ma con disomogenee caratteristiche di permeabilità (da P III a P Im), che può funzionare, almeno localmente, da substrato relativamente impermeabile. I due orizzonti, che nell'insieme costituiscono un complesso acquifero (ad accentuata variabilità latero-verticale di permeabilità), contenente falde sia a pelo libero (talvolta sospese) che in pressione, sono limitati verso il basso da un substrato a dominante argillosa, impermeabile (Pag/Im), non affiorante nell'area dello Schema idrogeologico, ma deducibile dalle condizioni geologiche al contorno.

La struttura idrogeologica immerge nell'insieme, con debole incli-

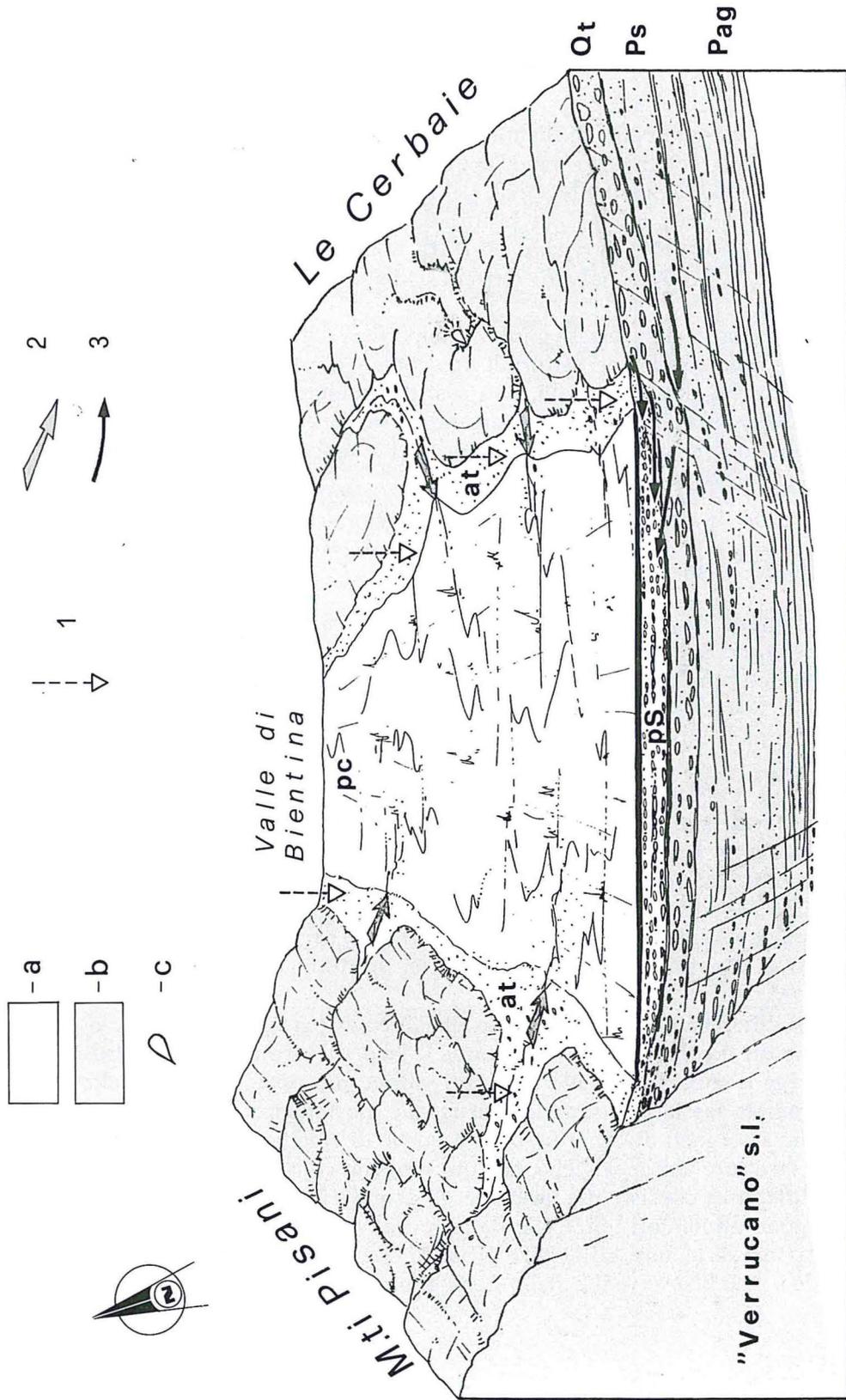


Fig. 15 - Stereogramma idrogeologico schematico attraverso la Valle di Bientina. Sono state omesse le coperture superficiali, detritico-colluviali, presenti soprattutto sui Monti Pisani.
 Per la legenda delle formazioni geologiche e delle corrispondenti caratteristiche di permeabilità, si veda la tabella 3 ed inoltre: pS - Depositi ghiatosi-ciottolosi del Paleoc-Serchio.
LEGENDA a - Complesso acquifero della Pianura pisana s.l.: b - *Strutture idrogeologiche "incassanti"*; c - Sorgenti di emergenza; **Alimentazione della falda "artesiana" della Valle di Bientina:** 1. Infiltrazione; 2. Ricarica subalveare; 3. Ricarica dagli acquiferi "incassanti".

nazione, verso la Piana di Bientina, determinando in tal modo un generale deflusso sotterraneo verso l'acquifero confinato della piana stessa, costituito dai depositi alluvionali del PaleoSerchio (pS); tale acquifero viene alimentato anche, per infiltrazione diretta, in limitate aree di depositi alluvionali terrazzati (at/P II), nonché attraverso gli alvei (e relative falde di subalveo) dei corsi d'acqua che scendono dalle Cerbaie.

La falda freatica, estesa a tutta la superficie dei suddetti rilievi collinari, è suddivisa in vari settori di tipo conico, divergente sugli interfluvii e convergente nelle valli, con assi di drenaggio che convogliano nell'insieme la circolazione sotterranea verso la Valle di Bientina; solo in parte essa si scarica attraverso sorgenti di emergenza, contribuendo così al deflusso superficiale.

"Versante" meridionale della Pianura Pisana

L'intero "versante" meridionale della Pianura Pisana è stato assimilato, come *Settore di alimentazione*, alle Colline omonime. Esso in realtà comprende, ma molto marginalmente, porzioni limitate dei Monti Livornesi e di quelli di Casciana Terme; questi ultimi, inoltre, alimentano in prevalenza anche una circolazione sotterranea extrabacino, come si è visto nel precedente paragrafo 5.1..

Sulle *Colline Pisane* lo schema generale di alimentazione è analogo a quello delle *Cerbaie*, per quanto riguarda la struttura idrogeologica "incassante" immergente con debole pendenza verso la pianura, dove si stabiliscono collegamenti idraulici con l'**Amc**, ed in particolare con il "Primo acquifero artesiano in ghiaia"; tali collegamenti possono essere diretti, o avvenire attraverso i depositi sabbiosi (d_{1a}) dei *Rilievi pedecollinari di Vicarello* (vedi Sezione n°3 della fig. 10 e stereogramma della fig. 16).

Si differenzia in parte (rispetto alle *Cerbaie*), per un maggior frazionamento degli acquiferi, in quanto il loro substrato impermeabile emerge o subaffiora nelle incisioni vallive più profonde, oltre che nell'ampia fascia adiacente lo spartiacque morfologico; ciò dà origine anche a sorgenti di contatto, oltre a quelle di emergenza, comuni alle due strutture idrogeologiche, che qui vengono confrontate. Un'ulteriore differenza consiste nel fatto che gli acquiferi confinati di subalveo vengono alimentati, oltre che dalle rocce "incassanti", dai segmenti superiori di alcune valli, dove gli alvei sono ghiaiosi-ciottolosi, con falde a pelo libero (vedi 2. dello stereogramma in fig. 16).

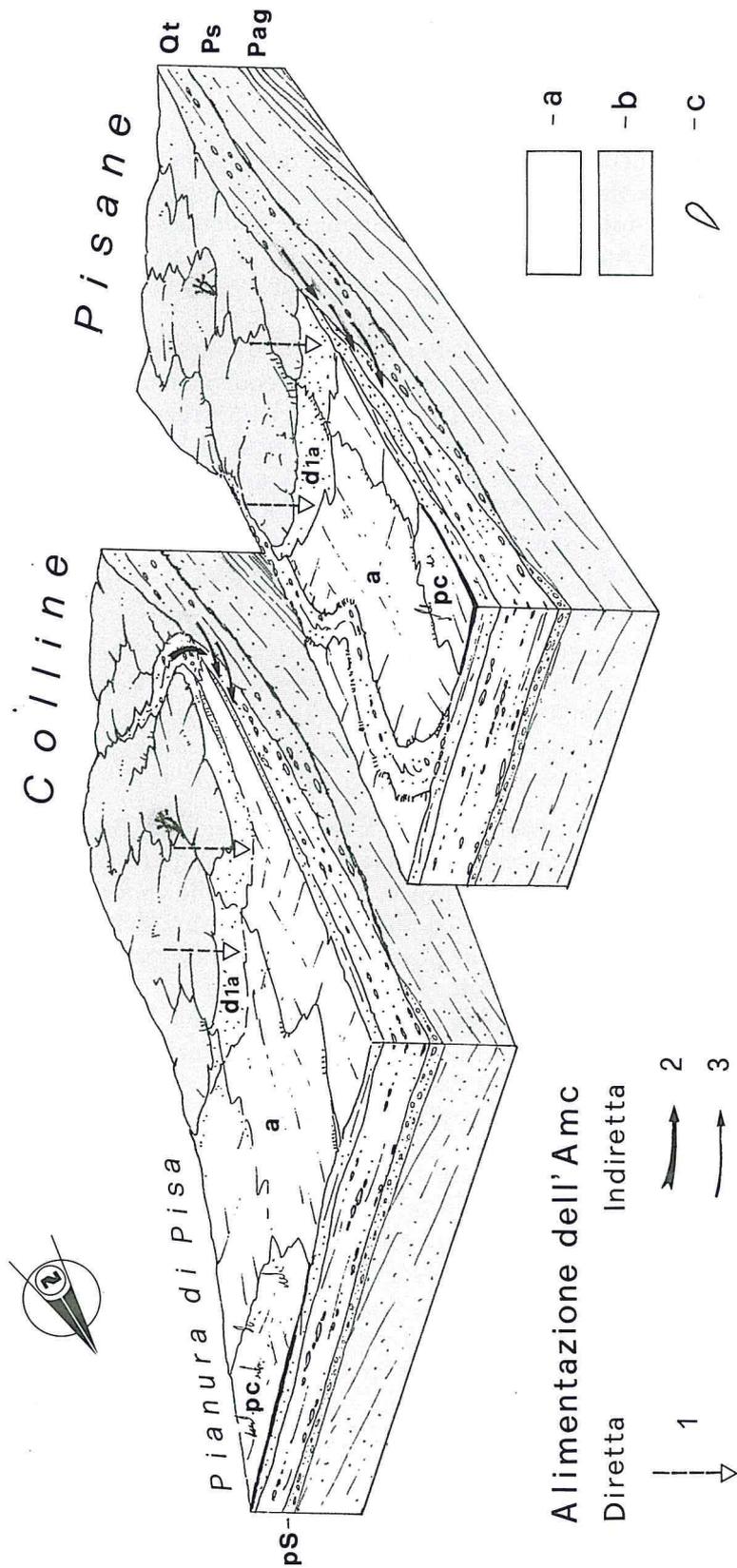


Fig. 16 - Stereogramma idrogeologico schematico, che mostra i rapporti tra le rocce "incassanti" delle *Colline Pisane* e il *Complesso acquifero* dell'adiacente *Pianura omonima*.
 Per la legenda delle formazioni geologiche e delle corrispondenti caratteristiche di permeabilità, si veda la Tabella 3 ed inoltre: pS - Depositi ghiaiosi-ciottolosi del Paleoo-Arno-Serchio.
LEGENDA a - Complesso acquifero della *Pianura pisana s.l.*; **b** - Strutture idrogeologiche "incassanti"; **c** - Sorgenti di emergenza; **Alimentazione dell'Amc**: 1. Infiltrazione; 2. Dagli acquiferi di subalveo a pelo libero a quelli confinati; 3. Dalle strutture idrogeologiche "incassanti".

Le condizioni idrostrutturali sopra descritte favoriscono, per un verso, il deflusso superficiale (alimentato da sorgenti di contatto, oltre che di emergenza), riducendo corrispondentemente il deflusso sotterraneo; d'altra parte, al maggiore sviluppo del reticolo idrografico corrispondono più numerosi assi di drenaggio sotterraneo, esercitato dalle falde di subalveo (a pelo libero o confinate).

Dal confronto tra i due suddetti *Settori di alimentazione (Le Cerbaie e Colline Pisane)*, possiamo concludere che vi sia un'equivalenza, almeno in prima approssimazione, nella ripartizione dell'infiltrazione efficace tra: a) contributo al deflusso superficiale interno ai loro bacini idrografici; b) "uscite" sotterranee dai bacini stessi, cui si deve essenzialmente la ricarica delle falde "artesiane" delle adiacenti pianure. Ciò è confermato dalla discreta corrispondenza dei rispettivi coefficienti di deflusso (0,255 e 0,301), ottenuti indirettamente con il Metodo Kennesey (vedi successivo paragrafo 6.2.4.).

6. BILANCI IDROLOGICI

6.1. Premessa

Per la stima delle risorse idriche globali di una data regione (Bacini idrografici e/o idrogeologici, sistemi o singole strutture acquifere, etc.), sia come acque superficiali che sotterranee, è indispensabile conoscerne, oltre alle condizioni fisiografiche ed idrogeologiche, i vari elementi idro-climatici, le cui mutue relazioni possono poi essere formalizzate in una delle espressioni dell'equazione generale di bilancio.

All'interno del **Sistema acquifero della Pianura Pisana**, i bilanci idrologici sono stati specificamente finalizzati alla valutazione della ricarica delle falde "artesiane" della Pianura Pisana stessa e delle Valli di Ripafratta e di Bientina, in essa confluenti; essi sono stati impostati separatamente e in diverso modo per i vari *Settori fisiografici* che appartengono, come si è visto, sia alle pianure che ai rilievi montuosi e collinari adiacenti. Tale procedimento, oltre a rispondere ad esigenze di ordine pratico (valutazione della risorsa idrica nei vari bacini di utenza), è imposto dalle diverse condizioni idrogeologiche settoriali.

Più precisamente, i bilanci sono stati applicati (vedi successivo paragrafo 6.3. e fig. 18), sia ad aree di ricarica diretta, sia a singole strutture idrogeologiche, sia ad insiemi di bacini idrografici-idrogeologici (*Unità idrografiche*), il cui spartiacque superficiale corrisponde mediamente a quello sotterraneo (vedi par. 5.1.). Le suddette unità ter-

ritoriali sono state definite *Settori di alimentazione*.

Per i bacini idrografici, date le loro caratteristiche idrogeologiche, le "Entrate" sotterranee possono essere approssimate a zero, mentre si verificano "Uscite", essenzialmente attraverso le falde di subalveo (confinato o a pelo libero), in corrispondenza delle loro sezioni di chiusura; considerando inoltre trascurabile, per lunghi periodi, la variazione delle riserve idriche, può essere utilizzata la seguente equazione di bilancio:

$$P = Er + D + Us$$

in cui:

P - Afflusso meteorico

Er - Evapotraspirazione reale

D - Deflusso superficiale

Us - Uscite sotterranee;

quest'ultimo elemento di bilancio assume pertanto il significato di ricarica degli acquiferi confinati della Pianura Pisana e delle sue appendici nelle Valli di Bientina e Ripafratta.

Per la determinazione degli elementi di bilancio "P" ed "Er" (Anno idrologico medio 1951-1980), sono stati elaborati i dati pluviometrici e termometrici degli Annali dell'Ufficio Idrografico e Mareografico dell'Arno - Sezione di Pisa, in parte già riportati nei precedenti Cenni climatici (Cap. 3.); per quanto riguarda i deflussi, non essendo disponibili dati idrometrici, è stato adottato il metodo del Kennessey (1930), che consente di pervenire ad una loro stima indiretta su basi climatico-fisiografiche, attraverso cioè la sommatoria di coefficienti di deflusso parziali (relativi ai suoi vari fattori) di derivazione empirica od analitica.

È stata così risolta l'equazione di bilancio idrologico rispetto all'unica incognita "Us", pur con i limiti e le approssimazioni insiti nella metodologia adottata.

Nel caso delle aree di alimentazione in diretta connessione idraulica con l'Amc (*Dune e lidi litoranei; Rilievi pedecollinari di Vicarello*), le "Uscite" sotterranee ("Us") sono state equiparate all'infiltrazione efficace (Ie), in quanto esse non danno origine ad un apprezzabile deflusso superficiale; la stima di Ie è stata effettuata come percentuale delle disponibilità idriche ($Di = P - Er$), sulla base dei dati di letteratura e tenendo conto delle condizioni idrogeomorfologiche locali.

Per quanto riguarda invece le *Strutture idrogeologiche carbonatiche*, situate sui Monti D'oltre Serchio e alla base dei Monti Pisani, l'infiltrazione efficace non può essere considerata equivalente alla ricarica dell'Amc; esse alimentano infatti anche un deflusso superficiale (sebbene questo possa essere limitato dalle condizioni piezometriche delle

falde "artesiane"), attraverso sorgenti di sbarramento, operato dagli adiacenti depositi alluvionali. Ci siamo pertanto limitati a valutare (come sopra) il parametro I_e , in mancanza dei dati necessari (portata delle sorgenti - deflussi) per ricavarne la percentuale di ricarica alle falde dell'**Amc** stesso.

6.2. ELEMENTI DI BILANCIO

6.2.1. *Afflussi*

Sono stati analizzati, per il periodo 1951-1980, i dati relativi alle Stazioni pluviometriche di un'ampia regione costiera (vedi fig. 5), comprendente il *Bacino idrografico della Pianura di Pisa* (inquadrate tra quelli del Serchio, Arno, Cecina, Fine e Bacini minori della costa versiliese e livornese), previa verifica dei valori mensili ed annui mediante confronti statistici. La ricostruzione delle serie di dati, per le stazioni con brevi lacune di funzionamento, è stata ottenuta comparando, con il metodo delle "doppie cumulate", i valori medi annui di stazioni poste in condizioni simili di altitudine ed esposizione; i dati mancanti sono stati poi determinati attraverso analisi di regressione.

Su questa base è stata calcolata la media annua e mensile delle precipitazioni per ogni singola stazione; nella Tabella 2 (Cap. 3.) sono riportate le altezze medie annue, unitamente alla quota delle stazioni ed agli anni complessivi di esercizio.

Per l'elaborazione della carta delle isoiete si è reso necessario un esame delle variazioni di precipitazione in rapporto all'orografia (gradienti pluviometrici zonali), attraverso la definizione di alcuni semplici modelli di correlazione; in base ai valori (funzione della quota) così ottenuti ed a quelli misurati sono stati ricostruiti alcuni profili pluviometrici, tracciati tenendo conto dell'allineamento delle stazioni disponibili e dei rapporti tra precipitazioni e orografia-circolazione atmosferica; dell'elaborato finale (carta delle isoiete medie annue, a scala 1:50.000; equidistanza di 50 mm) è stata riportata solo una rappresentazione tridimensionale a scala ridotta, nel precedente Cap. 3 (fig. 5).

Il calcolo degli afflussi medi, annui e mensili, è stato effettuato mediante l'integrazione del metodo ietografico con quello dei Topoieti di Thiessen: si è operata cioè una sovrapposizione tra la carta delle isoiete e quella dei topoieti, che rappresentano aree di uguale altezza di pioggia. Tale operazione ha permesso di calcolare il valore delle precipitazioni da attribuire ad ogni singolo topoieto (che nel metodo di

Thiessen coincide con l'afflusso della stazione baricentrica), come media pesata ottenuta dal prodotto tra l'area individuata da isoiete successive per il corrispondente valore medio di pioggia.

Ciò ha consentito di ottenere, oltre alla rappresentazione continua dell'afflusso meteorico (carta delle isoiete), un frazionamento territoriale in unità di calcolo (topoieti); attraverso questi, una volta stabilito il rapporto fra il dato pluviometrico puntuale della stazione baricentrica e quello areale del poligono, si possono ricavare automaticamente afflussi mensili e annuali al variare delle precipitazioni presso la stazione baricentrica.

6.2.2. *Temperature*

Per la stima delle temperature, tenuto conto della scarsità delle stazioni presenti nella zona in esame, sono stati utilizzati anche i dati di quelle comprese nell'ambito del più vasto bacino del Valdarno inferiore (BALDACCI *et al.*, 1988); il loro funzionamento, pressoché continuo nel trentennio considerato (1951-80), è stato verificato attraverso l'esame dell'andamento cronologico di serie di dati cumulati, che ne ha evidenziato un comportamento omogeneo.

Sulla base dei valori così ottenuti, sono stati definiti modelli di variazione della temperatura media annua in rapporto alla quota (gradienti termometrici); il gradiente annuo è risultato di tipo lineare, pari a circa 0.4°C ogni 100 metri. È da precisare che il tipo di gradiente ed il suo valore risultano condizionati dalla mancanza di stazioni poste a quote superiori ai 500 metri e pertanto il modello adottato presenta una maggiore affidabilità per la stima delle temperature a bassa quota.

La successiva ripartizione dei valori medi annui in mensili (anche in questo caso per il calcolo dell'evapotraspirazione) è stata ottenuta mediante curve $T=f(\text{quota})$, appositamente elaborate, prendendo come quota di riferimento quella media del topoieto; le elaborazioni sono state effettuate su carte topografiche dell'I.G.M a scala 1:50.000.

6.2.3. *Evapotraspirazione*

La valutazione dell'evapotraspirazione, per la quale non sono disponibili misure sperimentali, è stata ottenuta mediante le equazioni empiriche di Turc e Keller, nonché la metodologia di Thornthwaite.

La relazione del Turc, elaborata attraverso un'ampia casistica speri-

mentale, fa riferimento a correlazioni esclusivamente di tipo climatico (Temperatura e Precipitazioni medie annue), e permette una valutazione diretta della evapotraspirazione reale:

$$E_r = P / (0.9 + P^2/L^2)$$

dove:

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3.$$

T = Temperatura media annua in °C

P = Precipitazione media annua in mm

La formula di Keller, adatta per bacini di tipo montano ad elevata acclività dei versanti, esprime invece l'evapotraspirazione reale in funzione della sola precipitazione media annua in mm:

$$E_r = 0.058 P + 405.$$

Nel caso della metodologia di Thornthwaite, oltre che dei caratteri climatici, si tiene conto delle caratteristiche del manto vegetale e della tessitura del suolo, che controllano la "riserva idrica" di quest'ultimo; il processo evapotraspirativo reale viene inoltre quantificato attraverso l'"evapotraspirazione potenziale", definita come "la perdita d'acqua che si verifica in un sistema terreno-vegetazione-ambiente nell'ipotesi di una persistente umidità".

Determinata l'entità dell'evapotraspirazione potenziale mensile (etpi), questa coincide con quella reale, se le precipitazioni (pi) sono maggiori o uguali alla etpi (pi > etpi); nei mesi in cui pi < etpi il deficit idrico viene in parte reintegrato dalla "riserva idrica del suolo", secondo una relazione che tiene conto dell'accumulazione dei deficit idrici stessi. Le relative operazioni, eseguite attraverso procedure automatizzate, seguono lo schema esemplificato nella tab. 6.

Le carte tematiche (Suolo ed Uso del suolo) necessarie per la determinazione della "riserva idrica del suolo", sono state predisposte a partire da varie fonti (ROTINI *et al.*, 1966 e 1977 - Regione Toscana, 1985), integrate e verificate con controlli sul terreno e l'esame di foto aeree (scala 1:13.000).

6.2.4. Coefficienti di deflusso

Come già accennato nella parte introduttiva di questo Capitolo, per la determinazione dei Bilanci idrologici si è fatto ricorso, in mancanza

Tab. 6 - Esempio di calcolo dell'evapotraspirazione reale secondo Thornthwaite.

TOPOIETO N. 6

COLLINE PISANE
Anno idrologico 1951-80

Area: Km² 979,05

Quota media: 57 m s.l.m.

Riserva idrica media del suolo: 125 mm

Stazione pluviometrica baricentrica: Lorenzana (127 m s.l.m.)

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	A	N	N	O
T(°C)	6.3	7.5	9.9	13.2	17.2	20.7	23.6	23.2	20.0	15.5	10.7	7.4	Media Totale			

I	1.42	1.85	2.81	4.35	6.49	8.59	10.48	10.21	8.16	5.54	3.16	1.77	64.83			

unadj PE	0.5	0.7	1.0	1.6	2.3	3.1	3.8	3.7	2.9	2.0	1.2	0.7	795			

PE	12	17	31	54	88	120	148	133	90	5.7	29	16	879			

P	75.3	79.2	74.4	63.3	54.7	48.8	29.5	47.3	78.0	116.5	119	92.9	84			

P - PE	63	62	43	9	-33	-71	-118	-86	-12	60	90	77				

acc pot WL					-33	-104	-222	-308	-320							

ST	125	125	125	125	95	53	21	10	9	69	125	125				

ΔST	0	0	0	0	-30	-42	-32	-11	-1	60	56	0				

AE	12	17	31	54	85	91	62	58	79	57	29	16	591			

T(°C) = Temperature medie

I = Indice calorico

unadj PE = Evapotraspirazione potenziale non corretta

P = Precipitazioni medie

P-PE = differenza fra precipitazioni e evapotraspirazione potenziale

acc. pot. WL = Accumulazione dei deficit idrici potenziali

ST = Riserva idrica

Δ ST = Variazioni della riserva

AE = Evapotraspirazione reale

di dati sperimentali di deflusso, al metodo del Kennessey (1930). Tale metodologia, sperimentata originariamente per alcuni bacini ungheresi, è stata recentemente verificata e adattata con buoni risultati da vari Autori (TARDI e VITTORINI, 1977; BARAZZUOLI *et al.*, 1986), in alcuni bacini idrografici della Toscana Meridionale; essa permette, in base ad alcuni parametri fisiografici e climatici, la stima analitica del coefficiente di deflusso (e quindi, indirettamente, del deflusso stesso) di un bacino fluviale o porzioni di esso (Unità-strutture idrogeologiche, Unità geomorfologiche, etc.).

Le caratteristiche fisiografiche prese in considerazione sono:

- 1) Acclività della superficie topografica
- 2) Permeabilità delle rocce affioranti
- 3) Estensione e tipo di copertura vegetale

Il metodo consiste nel calcolare il coefficiente di deflusso medio annuo come sommatoria di tre componenti, funzione dei tre parametri sopracitati e delle condizioni climatiche.

A tal proposito, TARDI e VITTORINI (1977) hanno proposto di introdurre l'indice di aridità medio annuo, valutato secondo la formula di De Martonne, come parametro discriminante fra le varie classi di valori individuati dal Kennessey per ognuna delle tre componenti fisiografiche.

6.3. Risultati di bilancio

In questo paragrafo vengono sinteticamente esposti i risultati dei bilanci idrologici, necessariamente parziali e/o approssimativi, eseguiti per i vari *Settori di alimentazione* individuati all'interno del **Sistema acquifero della Pianura Pisana**, tralasciando il procedimento di quantificazione dei relativi elementi idroclimatici, che è stato ripreso da BALDACCI *et al.*, 1988.

Si ricorda che le elaborazioni cartografiche e numeriche sono state effettuate per l'anno idrologico 1951-1980 e che i limiti delle *Unità idrografiche* corrispondono a quelli idrogeologici, con le due sole eccezioni della Valle del Guappero e dei Monti di Casciana Terme (vedi par. 5.1.).

Per quanto riguarda l'evapotraspirazione reale, inoltre, la scelta tra i modelli proposti dai vari Autori (Turc, Keller e Thornthwaite) è stata fatta in funzione delle caratteristiche morfologiche dei *Settori di alimentazione* considerati.

Le metodologie più comunemente utilizzate (Turc e Thornthwaite) non tengono conto dell'acclività dei versanti, che influisce in modo considerevole sul processo; nei bacini ad alta energia del rilievo, dove le acque di precipitazione vengono maggiormente sottratte al processo evapotraspirativo dal ruscellamento superficiale, i valori risultano quindi in genere sovrastimati.

Per tale motivo, e in base ad alcune verifiche effettuate nei *Settori* situati sui Monti Pisani e su quelli d'Oltre Serchio, è stata utilizzata la relazione del Keller che, pur nella sua semplicità, è maggiormente affidabile, in quanto sperimentata su bacini con condizioni geomorfologiche analoghe. Per i restanti *Settori di alimentazione*, con caratteri morfologici sostanzialmente diversi (aree collinari e quasi-pianeggianti), è stato adottato un valore medio tra quelli ottenuti mediante le formule del Turc e del Thornthwaite.

Nella tabella 7 sono riportati i valori (espressi in mm) degli elementi di bilancio, relativamente a tutti *Settori di alimentazione*, di cui viene indicata anche la superficie.

Tab. 7 - Elementi del bilancio relativi ai vari Settori di alimentazione del sistema acquifero della Pianura Pisana.

SETTORI di ALIMENTAZIONE	SUP. kmq	P mm	Thorn.	Turc	Er (mm) Media**	Keller
A Apparati dunari costieri	64,72	928	615	638	626	
B Rilievi pedecollinari di Vicarello	44,10	924	586	632	609	
C Monti d'Oltre Serchio	5,23	1137				471
D Strutture carbonatiche pedemontane dei M. Pisani	6,57	1106				469
E Versante sud-occidentale dei M. Pisani*	22,95	1116				470
F Versante orientale dei M. Pisani	27,82	1112				469
G Colline delle Cerbaie	68,55	1057	576	670	623	
H Colline Pisane	202,30	923	563	624	593	

* Escluse le strutture carbonatiche pedemontane.

** Media tra i valori ricavati con i metodi di Turc e di Thornthwaite.

Un primo importante dato idrologico, immediatamente derivabile (vedi Tab. 8), è rappresentato dalle "Piogge efficaci" o "Disponibilità idriche" ($Di = P - Er$). Esse rappresentano, com'è noto, la quantità di acque meteoriche che sfugge ai processi di evapotraspirazione ed è appunto "efficace" o "disponibile" per il deflusso (D), cui contribuiscono sia il ruscellamento superficiale che la circolazione sotterranea, a meno che quest'ultima non si scarichi direttamente a mare.

Nella successiva tabella 9 sono riassunti i risultati di bilancio relativi ai vari *Settori di alimentazione* (vedi Schema della Fig. 18), che assu-

Tab. 8 - Disponibilità idriche nei vari Settori di alimentazione del Sistema acquifero della Pianura Pisana.

SETTORI di ALIMENTAZIONE	Disponibilità Idriche		
	mm	mc/a 10 ⁶	mc/sec
A Apparati dunari costieri	290	18,8	0,60
B Rilievi pedecollinari di Vicarello	315	13,9	0,44
C Monti d'Oltre Serchio	666	3,5	0,11
D Strutture carbonatiche pedemontane	637	4,2	0,13
E Versante sud-occidentale dei M. Pisani*	646	14,8	0,60
F Versante orientale dei M. Pisani	643	17,9	0,57
G Colline delle Cerbaie	434	29,8	0,94
H Colline Pisane	330	66,8	2,12

* Escluse le strutture carbonatiche pedemontane.

mono però un diverso significato rispetto alla ricarica delle falde "artesiane"; in particolare, il *Settore A* (Apparati dunari costieri) può "virtualmente" scaricarsi anche direttamente a mare, ma in condizioni di artificiale depressione piezometrica, come quella registrata nel periodo di studio, esso viene prevalentemente drenato verso la pianura.

La tabella si compone, in senso verticale, di due parti (Ricarica diretta e indiretta), quest'ultima a sua volta distinta rispetto alle sue differenti modalità e alle diverse aree di riferimento; in orizzontale è rispecchiato il procedimento ed il risultato finale cui siamo giunti nei tre possibili casi:

a) *Aree di ricarica diretta*: È stata effettuata una stima (% di Di) dell'infiltrazione efficace (Ie), nella ragionevole ipotesi che essa non vada ad alimentare il deflusso superficiale, ma quasi esclusivamente la ricarica delle falde "artesiane" o, nel caso A, anche la discarica direttamente a mare.

b) *Strutture idrogeologiche carbonatiche*: Ci siamo limitati, come già accennato, a valutare l'infiltrazione efficace (anche in questo caso come percentuale di Di), non essendo possibile una sua ripartizione tra la ricarica delle falde "artesiane" e l'alimentazione delle sorgenti di sbarramento originate dalle strutture stesse.

c) *Unità idrografiche*: Soluzione dell'equazione generale di bilancio ($P=Er+D+Us$; vedi par. 6.1.), dalla quale si ricava Us, attraverso la determinazione ("Metodo di Kennessey") dei coefficienti di deflusso medio annuo (Cd).

Tab. 9 - Disponibilità idriche e contributi alla ricarica delle falde "artesiane" della Pianura di Pisa e delle Valli di Ripafratta e Bientina, relativi ai vari Settori di alimentazione.

Legenda: **P** - Afflussi meteorici; **Di** - Disponibilità idriche; **I** - Infiltrazione efficace; **Cd** - Coefficiente di deflusso ♦; **Us** - Uscite sotterranee.

SETTORI DI ALIMENTAZIONE							
Ricarica diretta	Di			% Di	Ie ≅ Us		
	mm	mc/a · 10 ⁶	mc/sec		mm	mc/a · 10 ⁶	mc/sec
A - Apparatì dunari costieri	290	18,8	0,60	80	232	15,0	0,48
B - Rilievi pedecollinari di Vicarello	315	13,9	0,44	60	189	8,3	0,26
Ricarica indiretta	Di			% Di	Ie		
	mm	mc/a · 10 ⁶	mc/sec		mm	mc/a · 10 ⁶	mc/sec
Strutture idrogeologiche							
C - Monti d'Oltre Serchio	666	3,5	0,11	80	533	2,8	0,09
D - Monti Pisani	637	4,2	0,13	80	510	3,4	0,11
	Pmm	Cd♦		Us			
		mm	mc/a · 10 ⁶	mc/sec			
Unità idrografiche							
E - Versante sud-occidentale dei M. Pisani (*)	1116	0,483	107	2,5	0,08		
F - Versante orientale dei M. Pisani (*)	1112	0,486	103	2,9	0,09		
G - Le Cerbaie	1066	0,257	162	11,1	0,35		
H - Colline pisane	923	0,301	52	10,5	0,33		

(*) Escluse le strutture carbonatiche dei Monti Pisani

♦ Metodo Kennessey

È da mettere in rilievo che si tratta comunque di stime approssimative e/o di tipo empirico, in mancanza di dati idrologici fondamentali, quali l'infiltrazione, i deflussi superficiali e la portata delle sorgenti, per la chiusura di rigorosi bilanci d'acqua; esse forniscono comunque un attendibile ordine di grandezza della ricarica alle falde "artesiane" della Pianura Pisana e delle sue due appendici nelle Valli di Ripafratta e Bientina.

Lo stereogramma della fig. 17 illustra, a titolo di esempio, il bilancio idrologico del Sistema acquifero Le Cerbaie-Valle di Bientina, mediante il quale è stata quantificata ($Us = 176$ mm, pari a $14,2 \times 10^6$ mc/anno = $0,45$ mc/sec) l'alimentazione della falda "artesiane" della Valle (Paleoserchio), da parte della struttura idrogeologica dei rilievi collinari.

Lo Schema della fig. 18 mostra invece la provenienza, dai vari *Settori* del **Sap**, di tutti i contributi all'alimentazione delle falde "artesiane" dell'**Amc**, nonché delle Valli di Ripafratta e di Bientina; in particolare, lo "schema della ricarica dell'**Amc**" ne evidenzia (vedi l'inserito nel riquadro), in sezione ed in forma simbolica, le varie modalità della ricarica stessa, sia diretta che indiretta, quest'ultima proveniente dai rilievi montuosi adiacenti, oltre che dalle suddette Valli di Ripafratta e di Bientina.

Sono stati rappresentati anche i limiti idrogeologici del **Sap**, dai quali risulta che si tratta di un "sistema aperto"; valutazioni qualitative sulla entità della ricarica esterna, con le relative modalità e con i relativi bacini idrogeologici di provenienza, verranno forniti e discussi nel successivo Capitolo conclusivo, sulla base di dati di Letteratura e di studi inediti degli Scriventi.

7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

L'insieme degli studi compiuti (da quelli a carattere preliminare: idrologici, geomorfologici e geologici, a quelli più specificatamente idrogeologici: idrostrutturali, piezometrici ed idrochimici) hanno concorso alla definizione di un complesso sistema acquifero (**Sap**), che ha come terminale idrografico-idrogeologico la Pianura di Pisa.

Il recettore finale della circolazione sotterranea è un'acquifero multistrato confinato (**Amc**), che viene alimentato, sia per infiltrazione diretta delle acque meteoriche nelle aree con falda a pelo libero (ricarica superficiale nei *Settori* A e B), sia da una ricarica laterale più o meno profonda, fino ai circuiti idrotermali, proveniente dalle *Strutture idrogeologiche "incassanti"*; in questo secondo caso il collegamento con gli strati acquiferi dell'**Amc** può avvenire attraverso gli apparati alluvionali intra-pedemontani.

Gli acquiferi confinati di subalveo delle Valli di Ripafratta (Fiume Serchio) e di Bientina (Paleo-Serchio) funzionano da ricettori intermedi, con analoghe modalità di alimentazione. È da osservare che per la valle di Bientina il termine di "subalveo" è divenuto improprio, dopo che essa è stata abbandonata dal corso del Serchio.

Gli schemi della figura 18 mettono in evidenza, in planimetria e in sezione, una marcata dissimmetria morfo-idrostrutturale degli opposti "versanti" della Pianura Pisana, cui corrispondono differenti modalità di ricarica all'**Amc**; tale dissimmetria può essere sintetizzata nei seguenti punti:

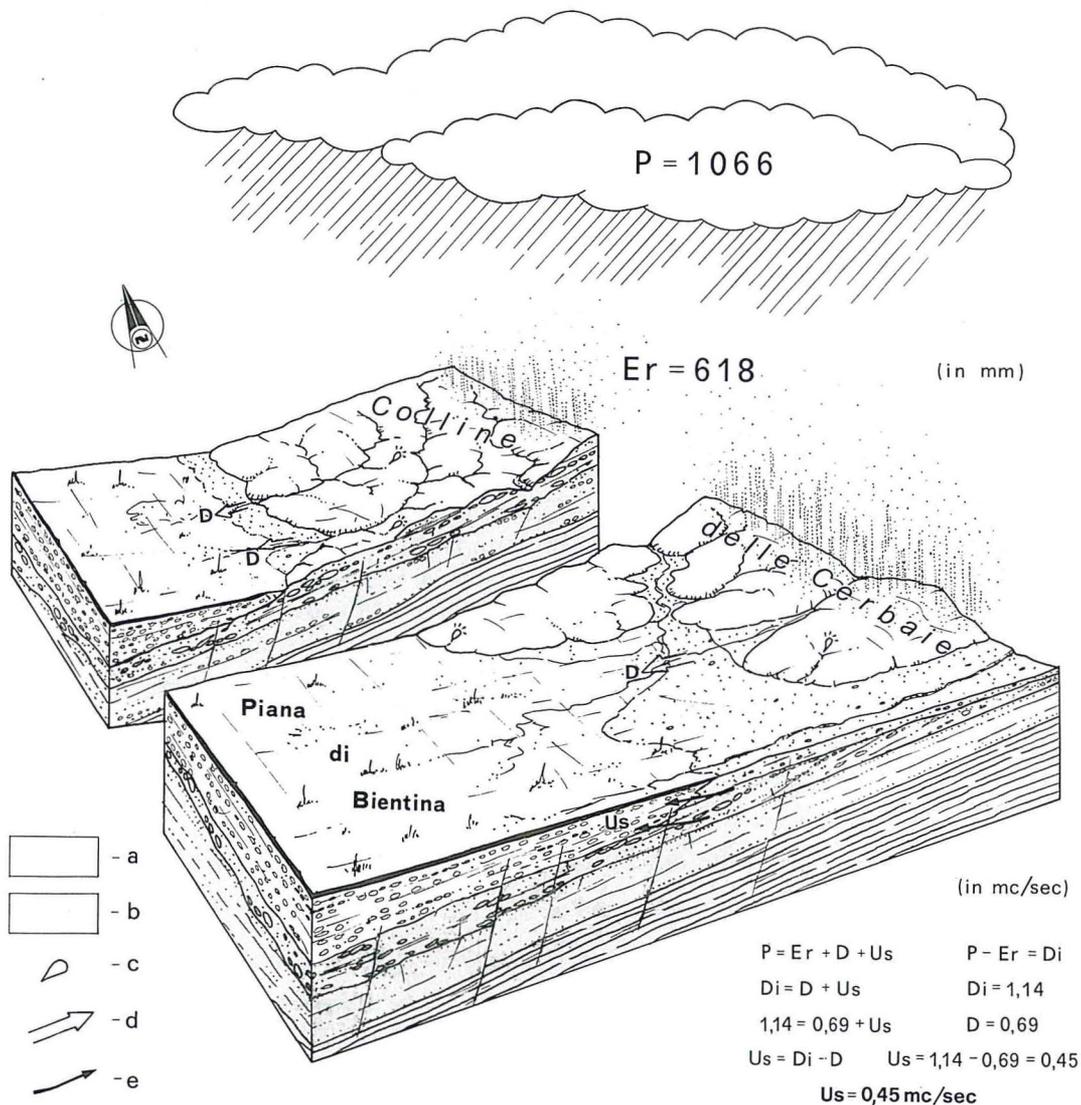


Fig. 17 - Bilancio idrologico del Sistema acquifero Le Cerbaie-Valle di Bientina.

LEGENDA a - Complesso acquifero della Pianura Pisana s.l.; b - struttura idrogeologica "incassante"; c - Sorgenti di emergenza; d - Deflusso superficiale; e - "Uscite" sotterranee (Us) dalle Colline delle Cerbaie, che contribuiscono alla ricarica dell'acquifero confinato della Valle di Bientina.

P - Afflussi meteorici; Er - Evapotraspirazione reale; D - Deflusso; Di - Disponibilità idriche; Us - "Uscite" sotterranee.

Per la legenda delle formazioni geologiche si veda la fig. 11.

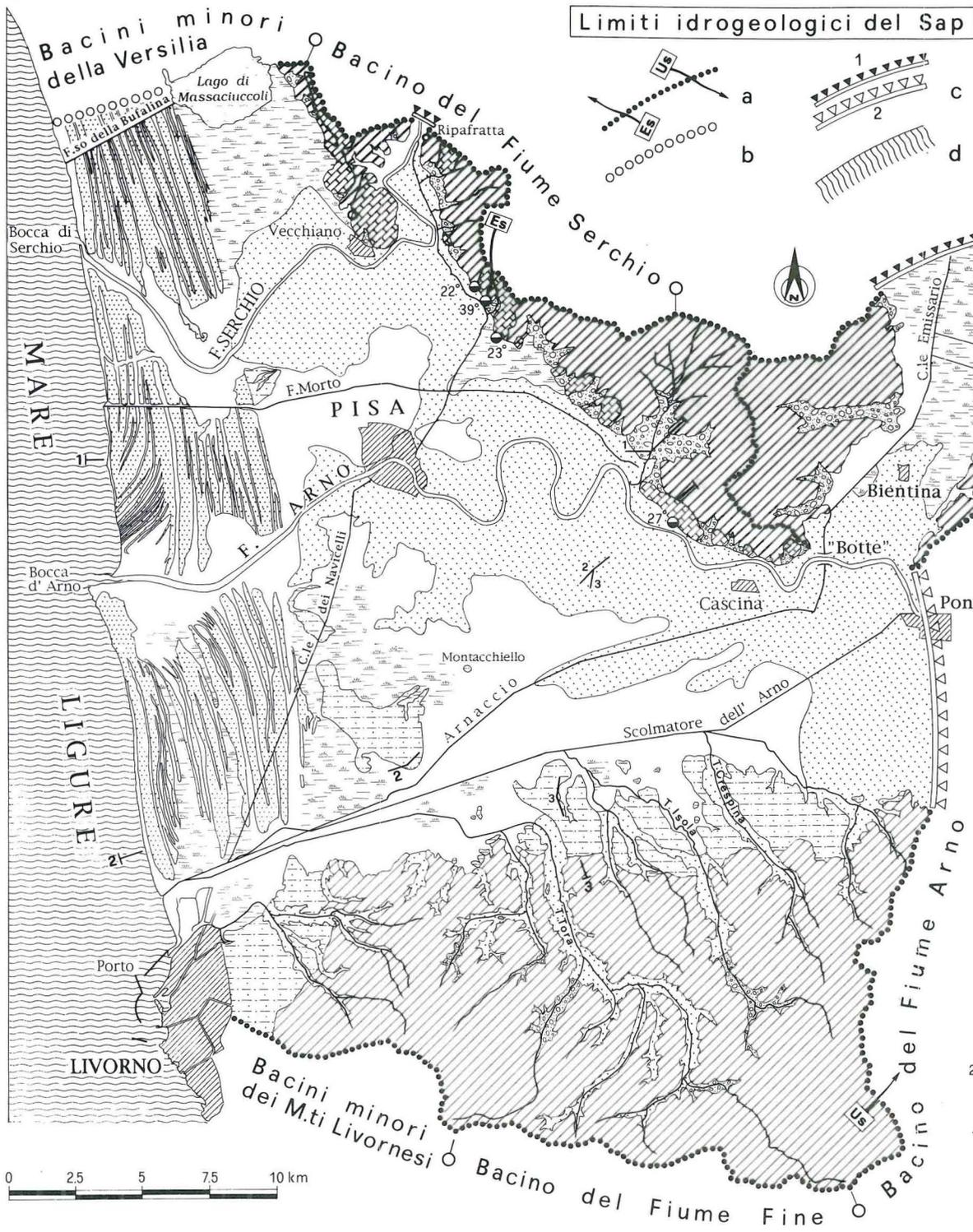
- Il passaggio dalle falde di subalveo a pelo libero a quelle confinate si trova, nei torrenti originati dal “versante” destro (Monti Pisani-Monti d’Oltre Serchio), alla base dei rispettivi coni di deiezione, o comunque al loro sbocco nella pianura, mentre in quelli provenienti dal “versante” sinistro (Colline Livornesi-Pisane) tale limite di “artesianità” è spostato nella parte superiore delle valli.
- Gli acquiferi delle **Strutture idrogeologiche “incassanti”**, sul “versante” destro della pianura, sono costituiti da mezzi fessurati, mentre quelli del “versante” sinistro sono costituiti da mezzi porosi.
- Sul “versante” destro, in particolare, la funzione di ricarica all’**Amc** è svolta anche da *Strutture idrogeologiche carbonatiche “pedemontane”*, ad esso direttamente collegate.
- La dissimmetria tra i due “versanti” riguarda probabilmente anche il livello idrostrutturale profondo; non ci sono infatti evidenze che sul margine meridionale della pianura funzionino circuiti di risalita idrotermale, analogamente a quanto si verifica su quello settentrionale (Sistema idrotermale S. Giuliano-Uliveto). Ciò fa presupporre che in corrispondenza della linea di dislocazione tettonica trasversale, che passa al margine delle Colline Pisane, eventuali processi idrotermali di “self-sealing” siano ormai compiuti e che, in altri termini, essa non sia attualmente attiva.

* * *

Come già più volte osservato, le metodologie di bilancio d’acqua

Fig. 18 - Schema di alimentazione delle falde “artesiane” della Pianura Pisana e delle Valli di Ripafratta e Bientina.

LEGENDA Limiti idrogeologici del Sap: a - Spartiacque superficiale, corrispondente mediamente a quello sotterraneo (“Limite a flusso nullo”), ad eccezione dei tratti “Es” ed “Us” (rispettivamente “Entrate” ed “Uscite” sotterranee); b - Bordo parallelo alle linee di flusso (“Limite a flusso nullo”); c - “Limiti a flusso imposto”, in entrata nel sistema: 1. Dati quantitativi; 2. Dati semi-quantitativi; d - “Limite a potenziale imposto”. **Complesso acquifero della Pianura di Pisa:** 1a. Depositi alluvionali prevalentemente limo-argillosi; localmente depositi fluvio-palustri e/o di colmata (con soprassegno); 1b. Depositi alluvionali prevalentemente sabbiosi e limosi; 2. Depositi eolici delle dune e dei lidi litoranei; 3. Depositi alluvionali di fondovalle, dei coni di deiezione e/o terrazzati, prevalentemente ghiaiosi-ciottolosi; 4. Depositi eolici e fluvio-colluviali. **Rocce incassanti:** 5. Successioni post-orogenetiche; 6. Unità strutturali pre-messiniane: a - Strutture carbonatiche pedemontane; b - Unità idrografiche; 7. Sorgenti fredde; 8. Sorgenti termominerali; 9. Traccia delle sezioni litostratigrafiche interpretative. **Schema della ricarica dell’Amc:** 1. Infiltrazione; 2. Ricarica subalveare; 3. Ricarica laterale dalle strutture idrogeologiche “incassanti”; 4. Circuiti idrotermali. **Amc** - Acquifero multistrato confinato della Pianura Pisana e sue aree di alimentazione; **Ri** - Rocce “incassanti”.



SETTORI DI ALIMENTAZIONE

Ricarica diretta

- A - Dune e lidi litoranei
- B - Rilievi pedecollinari

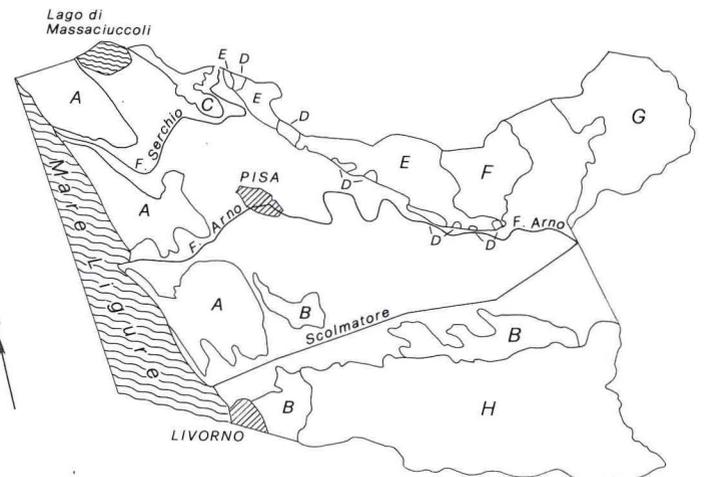
Ricarica indiretta

Strutture idrogeologiche carbonatiche

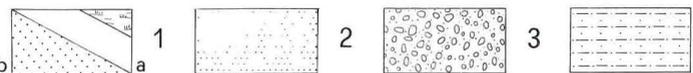
- C - Monti d'Oltre Serchio
- D - Strutture carbonatiche pedemontane

Unità idrografiche

- E - Versante sud-occidentale dei Monti Pisani
- F - versante orientale dei Monti Pisani
- G - Le Cerbaie
- H - Colline pisane



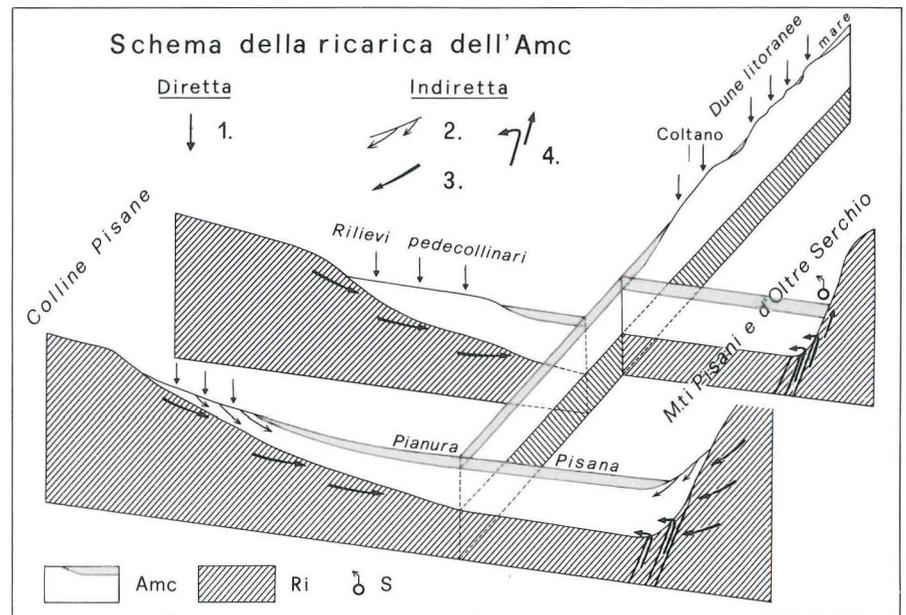
COMPLESSO ACQUIFERO DELLA PIANURA DI PISA



ROCCHE INCASSANTI



o 7
27° 8
T 9



comportano in genere errori ed approssimazioni derivanti dalle misure sperimentali e/o dalle equazioni empiriche con le quali vengono calcolati i vari elementi idroclimatici, nonché dalla identificazione delle unità territoriali di riferimento; i dati di base disponibili ed il tipo di bilancio applicabile non sono inoltre omogenei per tutti i *Settori di alimentazione* individuati.

I risultati di bilancio, riportati nella tabella 9, hanno quindi un diverso grado di approssimazione dell'entità della ricarica alle falde "artesiane", con una diversa affidabilità per i vari *Settori di alimentazione del Sap*.

Per i settori A-D è stato possibile soltanto una valutazione dell'infiltrazione efficace (Ie), che può essere equiparata alla ricarica delle falde "artesiane" nei casi A e B (*Ricarica diretta*), mentre è puramente indicativa dell'ordine di grandezza della ricarica stessa per le *Strutture idrogeologiche carbonatiche* (C e D).

Ad eccezione delle Cerbaie, dove si hanno intensi emungimenti, i bilanci sono comunque rappresentativi delle condizioni naturali dei cicli ricarica-discarda.

* * *

La ricarica interna al **Sap** ha un'evidente espressione piezometrica nella fascia pedemontana dei Monti Pisani-Monti d'Oltre Serchio, e ciò significa che, almeno su questo lato, il bilancio ricarica-discarda permane positivo, nonostante i prelievi dai pozzi; non altrettanto si verifica nella fascia adiacente le Colline Livornesi-Pisane.

Per quanto riguarda la discarda del **Sap** nel suo complesso, è presumibile che essa, stante l'attuale situazione di generalizzata e perdurante depressione piezometrica dell'**Amc**, sia prevalentemente (o quasi esclusivamente) artificiale (attraverso pozzi), almeno stagionalmente.

La naturale discarda a mare, nella misura e nei periodi in cui essa sia resa possibile dalle condizioni dei gradienti idraulici, è probabilmente canalizzata verso "selle" interposte a "rilievi" piezometrici, questi ultimi centrati sui principali gruppi di dune costiere; ciò deve verificarsi anche per i flussi inversi (dal mare verso l'interno), con i fenomeni di intrusione marina da essi indotti.

Oltre alla discarda a mare, apprezzabili "uscite" sotterranee dal **Sap**, in corrispondenza della linea spartiacque, si verificano solo nel tratto dei Monti di Casciana Terme (alimentazione delle sorgenti termo-minerali omonime); tali "perdite" sono tuttavia da considerare irrilevanti, anche rispetto ai volumi complessivamente in gioco, e rien-

trano probabilmente nei margini di errore insiti nelle metodologie di bilancio d'acqua.

* * *

Il diagramma di flusso della fig. 19 che modella, concettualmente e con i dati quantitativi attualmente disponibili, le condizioni della ricarica proveniente dall'esterno del **Sap** ("sistema aperto"), mostra che esso riceve una parte rilevante della propria alimentazione appunto dall'esterno.

Dobbiamo innanzitutto mettere in evidenza che il dato quantitativo relativo al bacino idrogeologico dell'Arno ha un diverso significato, sebbene le modalità di ricarica siano analoghe, rispetto a quelli che si riferiscono al "Bacino idrogeologico della Pianura di Lucca" (NARDI *et al.*, 1987), a sua volta alimentato dal Bacino del Serchio.

Il primo deriva infatti da un bilancio eseguito (BALDACCI *et al.*, 1988) senza tener conto degli emungimenti destinati ai vari usi e dei corrispondenti coefficienti di restituzione (come se il sistema funzionasse in condizioni naturali); possiamo quindi trarne unicamente un ordine di grandezza della massima ricarica (definita "virtuale") che il **Sap** può ricevere dal Bacino idrogeologico dell'Arno; essa è stata valutata nella misura di:

$$155 \times 10^6 \text{ mc/anno, pari a } 490 \text{ l/sec}$$

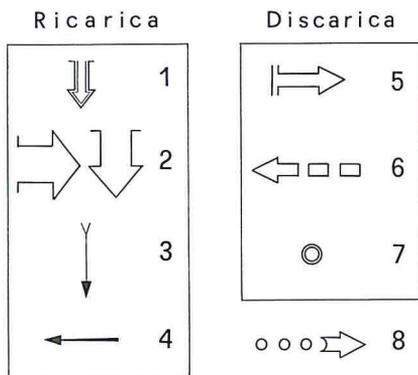
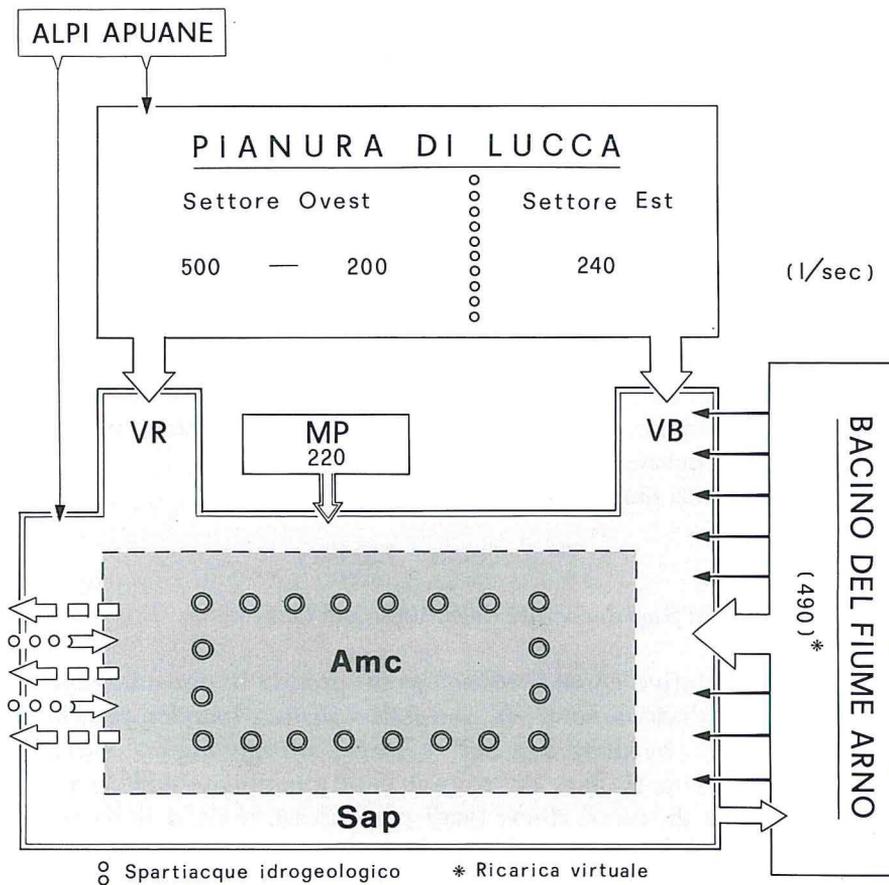
È da rilevare inoltre come tale ricarica possa interessare non soltanto l'**Amc**, ma anche acquiferi più profondi, appartenenti alle **Strutture idrogeologiche incassanti**.

La ricarica proveniente dalla parte centro-orientale del "Bacino idrogeologico della Pianura di Lucca" è stata invece quantificata dagli Autori suddetti anche in base ai prelievi dai pozzi; il deflusso sotterraneo in "uscita" (in "entrata" nel **Sap**) è risultato complessivamente di:

$$12,6 \times 10^6 \text{ mc/anno}$$

pari ad un deflusso istantaneo medio di circa:

$$400 \text{ l/sec}$$



Sap - Sistema acquifero della Pianura di Pisa
Amc - Acquifero multistrato confinato
 VR - Valle di Ripafratta (Falda di Filettole)
 VB - Valle di Bientina
 MP - Versante settentrionale dei Monti Pisani (Valle del Guappero)

Fig. 19 - Modello concettuale della ricarica proveniente dall'esterno del Sap.
 LEGENDA Ricarica: 1. Acquiferi carbonatici appartenenti a strutture idrogeologiche superficiali, in corrispondenza dello spatiacque morfologico; 2. Acquiferi confinati di subalveo; 3. Acquiferi carbonatici appartenenti a strutture idrogeologiche profonde, comprendenti anche una circolazione idrotermale; 4. Acquiferi non carbonatici appartenenti a strutture profonde. Discarica: 5. Idem, come al punto 1; 6. Discarica al mare; 7. Discarica artificiale, dai pozzi; 8. Intrusione di acqua marina.

Tale deflusso sotterraneo è stato poi ripartito, mediante una verifica delle portate di falda attraverso le due sezioni di ingresso nel **Sap** (Valli di Ripafratta e di Bientina), rispettivamente in 200 e 240 l/sec (da noi assunti nel Modello), valori compatibili con il suddetto risultato di bilancio (400 l/sec) indipendentemente ottenuto.

Ancora secondo NARDI *et al.* la "Falda di Filettole" riceve, nel settore di raccordo tra la Pianura di Lucca e la Valle di Ripafratta, un ulteriore contributo di circa 500 l/sec (valutato indirettamente per differenza tra la sua portata complessiva, pari a 700 l/sec, e l'apporto di 200 l/sec dalla Piana di Lucca), proveniente dalla ricarica subalveare del Serchio e da una circolazione profonda, originata dalla terminazione meridionale delle Alpi-Apuane.

Gli stessi Autori hanno inoltre valutato in:

$$7 \times 10^6 \text{ mc/anno} = 220 \text{ l/sec}$$

l'alimentazione al **Sap** derivante dalla Valle del Guappero.

È da notare infine come il Modello non prenda in considerazione, nemmeno qualitativamente, la possibilità di una ricarica profonda e/o idrotermale, che provenga dal "versante idrogeologico" sinistro della Pianura Pisana (Colline omonime); ciò è giustificato dalla struttura idrogeologica di questi rilievi (vedi par. 5.3.2.), nonché dalla mancanza di evidenze fisico-chimiche (vedi par. 5.2.3.), che invece si registrano nella fascia adiacente ai Monti Pisani.

Su questo lato si verificano invece "Uscite" sotterranee, che contribuiscono all'alimentazione delle Sorgenti idrotermali di Casciana Terme, ma sono da considerare irrilevanti nell'"economia" del Sistema acquifero qui considerato.

* * *

È noto che nelle suddette Valli di Ripafratta e di Bientina sono ubicati rispettivamente i Campi-pozzi degli importanti Acquedotti di Filettole, che approvvigionano le città di Livorno e Pisa, e del Consorzio delle Cerbaie, che serve un ampio e popoloso comprensorio, comprendente le città di Pontedera e Cascina.

Le accentuate, permanenti depressioni piezometriche provocate dai due impianti, registrate nel corso di ormai pluridecennali serie di osservazioni, indicano che i prelievi sono al limite delle portate delle rispettive falde, sulle quali effettivamente vengono regolati gli emungimenti.

Da quanto sopra esposto possiamo concludere che la ricarica

all'**Amc**, proveniente dalle Valli di Bientina e di Ripafratta, sia verosimilmente modesta; nel secondo caso anche a prescindere dal fatto che la portata di 700 l/sec della Falda di Filettole sia, secondo ricerche inedite degli Scriventi, sottostimata.

Ciò può sembrare in contrasto con la configurazione piezometrica registrata allo sbocco della Valle di Ripafratta nella pianura costiera, dove si nota (vedi fig. 12) un ben pronunciato settore conico divergente, che esprime quindi una zona di apprezzabile ricarica.

In realtà, nella fascia adiacente i Monti d'Oltre Serchio-Monti Pisani (che possiamo definire come "versante idrogeologico" destro del **Sap**) viene ammessa (BALDACCI e RAGGI, 1982; BALDACCI *et al.*, 1993) una importante alimentazione profonda (fino ai circuiti idrotermali), proveniente da acquiferi carbonatici situati sul prolungamento idrostrutturale sud-orientale del versante tirrenico delle Alpi Apuane.

Tale alimentazione, indicata anche nel Modello concettuale della fig. 19, non è direttamente quantificabile, e riteniamo che sarebbe comunque estremamente problematico tentarne una stima indiretta; al riguardo possiamo soltanto fornire le seguenti indicazioni:

- I circuiti profondi alimentano, oltre all'**Amc**, il sistema di sorgenti termominerali situate ai piedi dei Monti Pisani (S. Giuliano-Uliveto Terme), che hanno portate complessive dell'ordine di 200-300 l/sec.
- Nel settore nord-occidentale della Pianura Pisana, ci sono evidenze idrochimiche e termali di un apporto di acque profonde alle falde "artesiane" dell'**Amc**, apporto che modifica sensibilmente la loro composizione media.

La configurazione piezometrica generale dell'**Amc**, rappresentativa della fase di transizione dai minimi fine-estivi all'inizio della ricarica invernale, evidenzia forti depressioni in tutta la parte centrale della pianura, da mettere in relazione agli intensi e diffusi prelievi nei numerosi pozzi, che attingono all'acquifero multifalda.

In particolare il gradiente inverso (dal mare verso l'interno) registrato lungo la fascia costiera, anche se basato su un limitato numero di dati piezometrici, indica che il deflusso sotterraneo verso il mare, in questa stagione, è praticamente nullo e/o molto localizzato; ne derivano fenomeni di intrusione marina, con conseguente inquinamento salino delle falde.

Dal precedente studio di GAGLIARDI e RAGGI (1985), risulta che le

condizioni piezometriche non sono sostanzialmente dissimili nemmeno durante la stagione invernale, nonostante la fase di ricarica già in atto.

Ciò è dovuto all'uso in gran parte industriale e civile delle risorse idriche, che ne comporta uno sfruttamento pressochè costante durante tutto l'anno.

In definitiva, per quanto la mancanza di affidabili dati sui prelievi non consenta l'esecuzione di un bilancio delle falde "artesiane", le loro condizioni piezometriche mostrano che esse sono soggette ad uno sfruttamento superiore alle loro potenzialità, almeno in condizioni di ricarica naturale.

* * *

Un incremento delle risorse sotterranee, nelle falde attualmente sfruttate, potrà realisticamente essere conseguito mediante sistemi di ricarica artificiale utilizzando, in particolare, le acque superficiali dei bacini idrografici delle Colline Pisane, interni al **Sap**, e dell'adiacente bacino del Fiume Era; ciò anche con l'obbiettivo di una regimazione dei deflussi superficiali.

Riteniamo, inoltre, che un promettente tema di ricerca di fonti idriche alternative potrebbe essere indirizzato agli orizzonti acquiferi sottostanti all'**Amc**, preso in esame in questa Nota.

Ricordiamo, a questo proposito, i sondaggi profondi (oltre 200 metri) eseguiti dalla Soc. Saint Gobain nell'area del proprio stabilimento pisano (ROMAGNOLI, 1957), che hanno raggiunto (nell'intervallo 205-220 metri) livelli ghiaiosi-ciottolosi, con acque allora risalenti al di sopra del livello del suolo.

Tali strati acquiferi sono correlabili a quelli incontrati nei pozzi profondi (intorno ai 150 metri dal p.c.) trivellati sulle Colline delle Cerbaie, nel Padule di Fucecchio e nella Pianura dell'Arno tra Empoli e Castelfranco di Sotto; anch'essi sono da attribuire pertanto ai depositi marino-transizionali e continentali, prevalentemente sabbiosi, che in affioramento si trovano generalmente al passaggio tra il Pliocene marino (Ps) ed i soprastanti depositi fluvio-lacustri, sabbiosi e ghiaiosi-ciottolosi (Qt), del Pleistocene inferiore.

Le buone caratteristiche idrauliche degli acquiferi (K dell'ordine di $10^{-3} \div 10^{-4}$ m/sec), nonché quelle idrochimiche delle falde, confermano uno schema idrogeologico regionale, nel quale sono individuabili estese aree di ricarica di tali strati acquiferi, in corrispondenza dell'ampia fascia dei loro affioramenti, situata ai margini pedemontani della

depressione morfo-strutturale che si estende dal Padule di Fucecchio alla Valle dell'Arno.

BIBLIOGRAFIA

- AAVV(1984) - Atlante delle spiagge italiane. C.N.R.,SELCA-FIRENZE.
- BALDACCI F. & RAGGI G. (1982) - Lineamenti geologici ed idrogeologici della regione dell'Appennino Ligure - Toscana a Nord dell'Arno. In: "Contributo alle conoscenze delle risorse geotermiche del territorio italiano", C.N.R.,PFE - Speg, RF **13**, 67-85.
- BALDACCI F., BELLINI L., GRAZIOSI B., MANNOCCI C. & RAGGI G. (1988) - Studio idrogeologico e geomorfologico dei bacini in sinistra dell'Arno e della Pianura pisana. Amministrazione Provinciale di Pisa - Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa, inedito.
- BALDACCI F., CECCHINI S., LOPANE G. & RAGGI G. (1993) - Le risorse idriche del bacino del Fiume Serchio ed il loro contributo all'alimentazione dei bacini idrografici adiacenti. *Mem. Soc. Geol. It.*, **49**, 365-391, "Scritti in onore di L. Trevisan".
- Barazzuoli P., MICHELUCCINI M., SALLEOLINI M. & SALVADORI L. (1986) - Valutazione delle risorse idriche nella Toscana meridionale: 1) Applicazione del "Metodo Kennessey" al bacino del Torrente Farma (Province di Siena e Grosseto) e sua verifica con i calcoli di bilancio. *Boll. Soc. Geol. It.*, **105**, 333-350.
- BOCCALETTI M., CERRINA FERONI A., MARTINELLI P., PLESI G. & SANI F. (1991) - L'area Tosco-Laziale come dominio di transizione tra il bacino tirrenico e i thrusts esterni; rassegna di dati mesostrutturali e possibili relazioni con le discontinuità del "ciclo neoautoctono". IN: Workshop "Evoluzione dei bacini Neogenici e loro rapporti con il magmatismo Plio-Quaternario nell'area Tosco-Laziale, Pisa, 12-13 Giugno 1991.
- CANAVARI M. (1928) - Manuale di geologia tecnica. Pisa, Arti Grafiche Nistri.
- CECCHHELLA A. & PINNA M. (1991) - Il Valdarno Inferiore Pisano. Studio economico e territoriale. Centro Studi Economico-Finanziari, ETS Ed., Pisa.
- CHIOSTRI E., RAGGI G. & TREVISAN L. (1969) - Prime conoscenze per uno studio idrogeologico delle acque termominerali di Casciana Terme (Pisa). "L'idrogeologia nel campo termale ed idrominerali" - VII Symposium internazionale A.I.T.I.
- DALLAN L. (1988) - Ritrovamento di ALEPHIS LYRIX nelle argille della serie lacustre di Montecarlo (Lucca) e considerazioni stratigrafiche sui depositi continentali dell'area tra il Monte Albano e il Monte Pisano. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem. vol. XCV*, 1-17, Pisa.
- DAL PIAZ G., MERLA G. & TREVISAN L. (1950) - Relazione geologica sulle sorgenti termominerali di Bagni di Casciana (Pisa). Comune di Bagni di Casciana, Lischi, Pisa.
- DE GUIDI G. (1923) - Contributo allo studio geologico del sottosuolo della pianura pisana. Il pozzo trivellato della Richard Ginori in Pisa. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem. vol. XXXV*, Pisa.
- DELLA ROCCA R., MAZZANTI R. & PRANZINI E. (1987) - Studio geomorfologico della Pianura di Pisa (Toscana). *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, **10**, 56-84.
- DINI I. (1976) - La prima falda artesianiana della zona di Pisa. Provincia - Comune di Pisa.
- FANCELLI R., GRIFONI R., MAZZANTI R., MENCHELLI S., NENCINI C., PASQUINUCCI M. & TOZZI C. (1986) - Evoluzione della Pianura di Pisa. In: "Terre e paduli, reperti, documenti, immagini per la storia di Coltano", Comune di Pisa, Pacini, Pisa, 23-29.
- FEDERICI P.R. (1987) - Il territorio del Bientina: dalla Geologia alla Storia. In: "Il padule di Bientina. Aspetti naturalistici ed agronomici", Pacini, Pisa

- FEDERICI P.R. & MAZZANTI R. (1988) - L'evoluzione della paleogeografia e della rete idrografica del Valdarno inferiore. *Boll. Soc. Geogr. It. Roma*, Ser. **XI**, Vol. V, 573-615.
- FEDERICI P.R. & MAZZANTI R. (1989) - The Pisa Plain (Italy) and its hidrological hazards. *Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, **II**, 41-49.
- GABBANI G., PIERI M., PRANZINI E. & PRANZINI G. (1990) - Indagini geoelettriche per il controllo a terra di dati Landsat TM rilevati sulla Pianura di Pisa. A.I.T. - Terzo Convegno Nazionale, Atti. L'Aquila 1990.
- GAGLIARDI S. & RAGGI G. (1985) - Studio idrogeologico della Pianura Pisana. Amministrazione Comunale di Pisa. Inedito.
- GHELARDONI R., GIANNINI E. & NARDI R. (1968) - Ricostruzione paleogeografica dei bacini neogenici e quaternari della bassa valle dell'Arno sulla base dei sondaggi e rilievi sismici. *Mem. Soc. Geol. It.*, **7**, 91-106.
- GIANNINI E. & NARDI R. (1965) - Geologia della zona nord-occidentale del Monte Pisano e dei Monti d'Oltre Serchio (Prov. di Pisa e Lucca). *Boll. Soc. Geol. It.*, **84** (5), 197-270.
- GIOLI G. (1894) - Il sottosuolo della Pianura di Pisa. *Boll. Soc. Geol. It.*, **13**, 210-233.
- GRASSI S. & FANELLI G. (1990) - Le acque calde di San Giuliano Terme in AAVV, San Giuliano Terme - La Storia, il Territorio - Giardini, Pisa.
- GRASSI S., CAROSI R., MARRONI M. & ANCORA D. (1992) - Il sistema idrotermale di S. Giuliano Terme (PI): note di geologia, idrogeologia e geochimica. *Boll. Soc. Geol. It.*, **111**, 303-313.
- KENNESSEY B. (1930) - Lefolyasi téniezok és retnciok. Vizogy, Koziemények.
- LAZZAROTTO A., MAZZANTI R. & NENCINI C. (1990) - Geologia e morfologia dei Comuni di Livorno e Collesalveti. Suppl. n. 2. ai *Quad. Mus. Stor. Nat.* di Livorno, **11**, 1-85.
- MARGAT J. & RAMON S. (1975) - Essais d'une nouvelle cartographie hydrogéologique. *Bull. du B.R.G.M.*, **XII**, Sect. III, n. 2, 77-83.
- MARRONI M., MAZZANTI R. & NENCINI C. (1990) - Geologia e morfologia delle Colline Pisane. Suppl. n. 1 ai *Quad. Mus. Stor. Nat.* di Livorno, **11**, 1-40.
- MAZZANTI R. & RAU A. (1994) Capitolo I - LA GEOLOGIA, in AAVV - La Pianura di Pisa ed i rilievi contermini: la natura e la storia; Parte Prima - *L'Ambiente Naturale, Mem., Soc. Geogr. It.*, vol. **L**, Roma.
- MIN. LL.PP. - Servizio Idrografico, Annali Idrologici. parte I, 1951-1980. Poligrafico dello Stato, Roma.
- NARDI R., NOLLEDI G. & ROSSI F. (1987) - Geologia ed idrogeologia della Piana di Lucca. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, **10**, 132-160.
- RAPETTI F. & VITTORINI S. (1978) - Osservazioni sul clima del Litorale Pisano. *Riv. geogr. It.*, **85**, 1-26.
- RAPETTI F., TOMEI P.E. & VITTORINI S. (1987) - Aspetti climatici del Lago di Massaciuccoli in rapporto alla presenza di entità vegetali di rilevanza fitogeografica. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem.*, Serie A, Vol. **93**, 221-233.
- RAPETTI F. & VITTORINI S. (1988) - Differenze pluviometriche tra i versanti tirrenico e adriatico lungo l'allineamento Livorno-Monte Cimone-Modena. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, **11**, 105-115.
- RAPETTI F. & VITTORINI S. (1989) - Aspetti del clima nei versanti tirrenico ed adriatico lungo l'allineamento Livorno-Monte Cimone-Modena. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem.*, Serie A, **96**, 159-192.
- RAU A. & TONGIORGI M. (1974) - Geologia dei Monti Pisani a sud-est della Valle del Guappero. *Mem. Soc. Geol. It.*, **13** (3), 227-408.

- REGIONE TOSCANA - GIUNTA REGIONALE (1986) - Carta dell'uso del suolo. *Quadranti* 104 II, 105 III, 111 I e 112 IV. Firenze.
- ROTINI O.T., CARLONI L. & LOTTI G. (1966) - Carta agropedologica della Provincia di Livorno. Amministrazione provinciale di Livorno.
- ROTINI O.T., CARLONI L., LOTTI G., PANATTONI A. & RIFFALDI R. (1970) - Carta agropedologica della Provincia di Pisa. Amministrazione provinciale di Pisa.
- ROMAGNOLI L. (1957) - Sondaggi a 200 metri di profondità nel Quaternario recente presso Pisa. Studio delle facies attraversate e considerazioni sulla sedimentazione a carattere ciclico. *Boll. Soc. Geol. It.*, **76**, 21-35.
- SARTORI F. (1978) - Studi sedimentologici e mineralogici delle alluvioni recenti della Pianura di Pisa. I sedimenti del sondaggio della Bigattiera, presso S. Piero a Grado (Pisa). *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem.*, **85**; 61-93.
- SEGRE A. (1955) - Nota sulla Idrografia continentale e marina. In: «Note illustrative della C.G.I., scala 1:100.000, foglio 111 Livorno. *Serv. Geol. It.*, Roma».
- TARDI A. & VITTORINI S. (1977) - Il calcolo del coefficiente di deflusso su basi fisiografiche. *Boll. degli Ing.*, Firenze, **4**, 5-14.
- THORNTHWAITE C.W. & MATHER J.R. (1957) - Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publications in Climatology*, **10**, 185-311, Certerton.
- TONGIORGI M. (1978) - La subsidenza nelle basse pianure dell'Arno e del Serchio. In: Atti Conv. "I problemi della subsidenza nella politica del territorio e della difesa del suolo", Pisa, 1978, Vol. 2, Pacini, Pisa, 3-14.
- TREVISAN L. & TONGIORGI E. (1953) - Le acque del sottosuolo della Regione Pisana. La Provincia Pisana 9-10, Pisa.
- TURC L. (1955) - Le bilan d'eau des sols. *Ann. Agronom.*
- UGOLINI R. (1908) - Contribuzione allo studio geologico del sottosuolo della Pianura pisana. Il pozzo trivellato di S. Rosa. *Ann. Univ. Tosc.*, vol. XXVI, Pisa.
- UGOLINI G. (1925) - Contribuzione allo studio geologico della Pianura Pisana. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat. Mem.*, vol. XXXVI, Pisa.

(ms. pres. il 7 marzo 1995, ult. bozze il 30 agosto 1995)

Tab. A - Parametri fisico-chimici delle acque sotterranee (Gennaio-Febbraio 1984)

pozzo numero	pH	durezza °F	alcalin. met. m/l HCl N	calcio mg/l	cloruri mg/l	sodio mg/l	magnesio mg/l	ammoniac mg/l
1	7,14	28,2	4,2	97,8	35,5	20	9,2	ass
2	6,85	43,4	10,6	116,2	148,9	105	35	13
5	7,24	32,0	6,9	98,6	35,5	nr	18	tracce
8	6,96	64,0	14,0	168,3	351	250	53,5	25
16	7,40	110,0	17,4	266,1	737,4	350	106	0,5
17	7,18	90,8	16,8	221,2	765,7	400	86,6	3,75
18	6,95	14,4	3,9	35,3	49,6	nr	13,6	tracce
22	7,03	61,2	7,4	160,3	475	170	51,6	3,75
23	6,02	37,4	6,4	92,2	117	77	35	ass
24	6,32	16,6	2,3	53,7	46,1	35	7,8	ass
25	7,40	81,6	17,6	189,2	382,9	278	79,8	11
27	7,75	43,8	7,8	102,6	542,4	325	44,2	tracce
28	7,25	63,0	10,8	162,7	159,5	208	54,5	10
34	7,67	59,6	11,2	137,9	411,2	260	29,2	5
35	7,21	46,4	8,0	107,4	351	175	47,7	4
39	7,41	20,0	3,5	64,1	35,45	23	9,7	ass
41	7,08	36,6	10,2	76,2	358	280	42,8	3,5
43	7,10	52,0	11,8	129,8	390	273	47,7	2,1
46	6,98	30,0	7,9	71,3	230,4	180	29,7	1,75
48	7,50	21,6	5,7	56,1	88,6	76,1	18,5	0,5
51	6,84	78,0	7,7	228,5	124,1	120	51,1	4
57	6,45	17,2	5,0	40,1	74,4	92,2	17,5	ass
61	7,05	6,0	3,0	20	31,9	63	2,43	ass
61B	6,42	34,0	7,5	78,5	102,8	90	35	ass
63	7,35	31,6	7,4	75,3	368,7	260	31,6	2
67	6,85	47,6	8,0	133,8	109,9	110	34,5	2
68	6,90	64,0	9,0	186	117	103,4	42,8	0,75
69	7,34	58,4	9,4	104,2	1056,4	640	78,8	3,5
71	7,44	57,6	4,5	125	638,1	343	64,2	0,75
72	6,90	48,0	7,6	110,6	453,8	248,4	49,6	1
73	7,37	23,4	6,1	62,5	95,7	95	19	1,5
76	7,23	20,4	5,4	54,5	74,4	100	16,5	0,5
78	7,37	8,2	4,9	21,6	67,3	110	6,8	0,25
80	7,49	9,8	2,9	28,8	53,2	58	6,8	0,25
81	7,37	70,0	7,2	200,4	101,4	146	48,6	4
82	6,53	5,2	2,2	13,6	31,3	55	4,4	ass
85	6,55	8,8	2,5	15,2	35,45	50	12,2	ass
86	6,70	63,6	11,8	183,6	42,5	62,5	43,3	0,5
87	6,36	84,0	18,6	216,4	226,9	250	73	3,5
88	7,04	27,2	5,4	89	39	27	12,2	ass
91	7,03	21,0	8,9	56,1	141,8	190	17	0,25
92	6,98	34,0	11,8	80,2	177,2	220	34	0,25
95	7,00	55,2	12,0	128,2	184,3	150	56,4	0,75
96	6,76	59,6	13,0	129,8	187,9	170	83,7	0,75
106	6,97	65,6	9,0	200,4	159,5	150	37,9	4
113	7,19	59,2	8,6	168,3	134,7	124	41,8	1,75
121	6,90	99,6	12,8	269,3	184,3	184	78,8	4
124	7,16	42,4	7,8	114,6	124,1	125	33,6	1,5
129	7,44	108,6	25,0	250,1	723,2	430	112,4	17
131	6,55	99,6	20,0	258,1	262,3	200	85,6	2
138	6,85	52,0	12,8	133,9	120,5	105	45,2	10
140	6,86	46,4	12,2	139,5	170,2	140	28,2	3,75
143	6,86	49,0	10,4	136,2	170,2	150	36,5	2
145	7,03	36,4	8,0	104,2	102,8	90	25,3	0,5
174	6,93	92,0	22,8	160,2	680,6	525	126,5	25

% Tab. A

bicarbonati mg/l	nitriti mg/l	nitrati mg/l	solforati mg/l	ferro mg/l	manganese mg/l	potassio mg/l	conducibilità µs/cm	residuo a 180°C
256,2	ass	2,7	69,5	0,33	ass	1,4	632	380
646,6	ass	1,23	ass	11,5	0,55	4,6	1395	742
421	ass	0,92	nr	3	nr	nr	724	nr
854	tracce	2,15	ass	35	0,7	4	2204	1308
1061,4	tracce	9,12	ass	tracce	1,3	2,4	3658	1952
1025	ass	3	ass	12,5	1,4	3,1	3421	2000
237,9	tracce	ass	ass	8	0,2	ass	517	nr
451,4	ass	2,08	ass	0,55	0,45	3,2	2046	1088
390,4	ass	6,54	60,8	0,4	tracce	2,8	1059	598
140,3	ass	31,6	36,8	0,18	ass	4,6	493,5	273
1073,6	tracce	4,92	ass	7	0,3	5,9	2566	1450
476	ass	3,23	11,5	0,18	ass	1,7	2303	1263
658,8	ass	2,46	240	13	ass	12	1935	1105
397	0,2	4,08	ass	1,5	0,2	ass	2105	1210
488	ass	1,4	ass	4	0,3	3,7	1743	930
213,5	ass	5,31	25,5	0,16	ass	1,7	477	270
622,2	ass	2,1	ass	2	0,3	6	1950	1100
719,8	tracce	5,23	ass	16,5	0,5	3,3	2270	1200
481,9	ass	1,15	ass	0,65	0,2	3	1434	766
347,7	tracce	2,23	ass	6,5	0,6	1,6	763	422
369,7	ass	0,77	530	1,5	0,5	9	1941	1400
305	ass	1,08	17	0,16	ass	ass	691	410
183	ass	0,96	8	0,21	ass	0,7	411,2	225
457,5	ass	1,5	69	1,32	ass	1,7	1066	589
451,4	ass	2,23	13,5	1,32	0,15	3,2	1809	979
488	ass	0,61	142,5	nr	0,2	3,1	1349	830
549	tracce	0,61	261,7	0,49	42,8	3,1	1579	1000
573	ass	1,46	ass	16	0,3	6	4014	2120
274,5	tracce	1,85	ass	10	0,25	1,9	2632	1344
463,6	tracce	1,92	ass	1,5	0,4	2,4	2073	1100
372,1	ass	0,69	tracce	1,5	0,1	2,1	823	500
329,4	ass	0,62	ass	0,98	0,2	3	711	424
173,7	ass	2	ass	4,5	ass	ass	658	345
176,9	ass	1,58	5,7	2	tracce	ass	428	242
439,2	ass	0,88	427,1	13,2	0,6	7,2	1909	1212
134,2	ass	2,54	58	0,4	ass	1,2	322	183
152,5	ass	2,93	5,8	0,22	ass	1,4	355	198
719,8	tracce	1,77	98,7	7,5	1,4	1,8	1402	778
1134,6	ass	0,46	80	2,8	1,4	6	2369	1351
329,4	tracce	4,93	15	0,49	ass	0,7	625	390
315,5	ass	0,65	ass	0,16	ass	ass	1217	660
413	ass	0,77	ass	4,9	0,1	ass	1619	851
732	ass	0,39	26,3	4,9	0,25	4	1632	905
793	ass	0,54	47,7	4	0,4	3,4	1750	998
549	tracce	1,23	314	2	0,4	6,7	1842	1131
524,6	tracce	9,24	325	0,4	0,3	36	1710	1082
780,8	tracce	0,85	506	4	0,5	5,2	2368	1554
475,8	tracce	6,55	112	2	0,25	4	1290	770
1525	ass	3,75	ass	10	0,8	3,7	4080	2390
1220	ass	0,54	ass	0,98	1,4	10	2560	1450
780,8	ass	1,04	90	22,5	0,55	3	1467	765
744,2	ass	1,3	ass	4,5	0,3	4,3	1546	880
634,4	ass	0,5	96	1,5	1	3	1539	915
488	ass	0,4	66	4	1	1,5	1039	645
390,8	ass	1,6	142	0,65	2	16,3	4145	2290

Tab. B - Parametri fisico-chimici delle acque sotterranee (Giugno-Luglio 1987)

pozzo numero	conducib. $\mu\text{S/cm}$	T °C	pH	cloruri mg/l	alcalin.met. m/l HCl N	durezza °F	ferro mg/l
5	591	17,5	7,3	39	7,1	32,2	0,49
8	1900	18,0	7,0	355	15,0	63,2	16,50
17	3000	18,0	7,1	789	16,9	89,6	4,05
18	434	22,0	7,2	49	40,0	15,8	2,45
21	810	19,2	6,9	99	8,3	22,0	0,49
22	1430	17,0	6,8	954	9,8	80,4	0,81
27	2050	n.r.	7,9	550	8,7	40,0	0,50
28	1300	20,5	7,1	121	7,0	77,4	2,62
34	1700	22,0	7,0	408	10,7	59,6	0,81
51	1400	19,5	6,9	152	7,4	78,4	1,32
60	1060	n.r.	6,9	53	8,7	55,2	1,46
63	1020	19,2	7,4	277	5,6	21,6	0,33
72	1370	17,5	6,8	436	7,6	45,2	2,45
78	521	19,0	7,5	85	4,6	8,6	0,98
87	1150	20,0	6,7	312	13,0	70,8	1,65
88	501	19,0	6,6	39	5,1	28,6	n.r.
91	820	18,0	8,2	155	9,3	16,4	0,50
92	1500	18,5	7,4	195	11,7	30,0	0,50
95	1160	n.r.	7,6	195	12,4	47,0	2,60
106	1300	18,5	7,1	166	8,8	68,6	2,45
109	1360	19,2	6,9	128	8,1	72,8	0,65
111	1560	20,5	6,9	174	11,1	76,4	3,30
113	1180	18,0	7,7	170	8,7	53,0	2,30
117	1390	22,0	7,0	205	6,0	68,6	3,30
118	1770	20,9	7,1	375	11,1	75,0	1,46
124	1090	n.r.	7,0	159	9,0	48,0	4,90
129	1070	18,0	6,9	156	10,8	46,0	1,46
131	1820	n.r.	6,7	283	20,3	68,4	0,33
140	1070	17,1	6,8	174	11,8	45,6	4,90
143	1060	17,3	7,1	177	10,2	48,0	3,30
144	980	19,0	7,4	128	10,3	41,0	3,30
173	3110	19,5	7,2	943	11,5	87,8	0,65
174	2950	18,5	6,8	706	22,7	88,6	0,81
175	3870	21,0	8,0	961	7,7	42,6	3,30