

Progettazione di un "chiaro" perenne per la sosta dell'avifauna migratoria mediante tecniche integrate di idrochimica e modellazione idrogeologica numerica nell'alveo "bonificato" dell'ex Lago di Bientina (PI)



**AMBROSIO MICHELE
FAGIOLI MARIA-TERESA
DELLOMONACO GABRIELE
CATTANEO MARINA**

AF GEOSCIENCE AND TECHNOLOGY
CONSULTING SRL

PREMESSA

La conservazione della biodiversità di un ambiente non sempre può limitarsi alla sola prevenzione del degrado degli habitat delle specie animali e vegetali di cui si intende tutelare la sopravvivenza.

In aree interessate da attività antropica plurisecolare, invasiva ed altamente impattante è necessario talvolta ricostruire, *ex novo*, habitat in progressiva rarefazione o le cui caratteristiche stanno variando con rapidità tale da minacciare numero ed equilibrio delle specie in essi presenti.

Le aree di bonifica integrale rappresentano, emblematicamente, la "trasformazione totale". Da corpo idrico con la sua flora e fauna specifica, in genere naturali, ad area agricola, sede di attività prevalentemente antropica, con flora e fauna intenzionalmente selezionate e controllate ed apporto, negli ultimi decenni, di massicce concentrazioni di nutrienti e fitofarmaci.

E se per tali trasformazioni si è impegnata forza lavoro in grande quantità ed a vari livelli di specializzazione e si sono mosse risorse finanziarie immense, tale abbondanza di risorse ben di rado è disponibile quando si tenta di mitigare gli effetti uniformizzanti di tali "grandi opere".

Se allora, ad esempio, si vuol ricreare un area umida, durevole che consenta di non perdere, per sempre, il passaggio delle rotte migratorie dell'avifauna acquatica da un antico alveo lacustre, ormai solo sede di effimere aree umide invernali, per la ricreazione di un "chiaro" perenne sarà

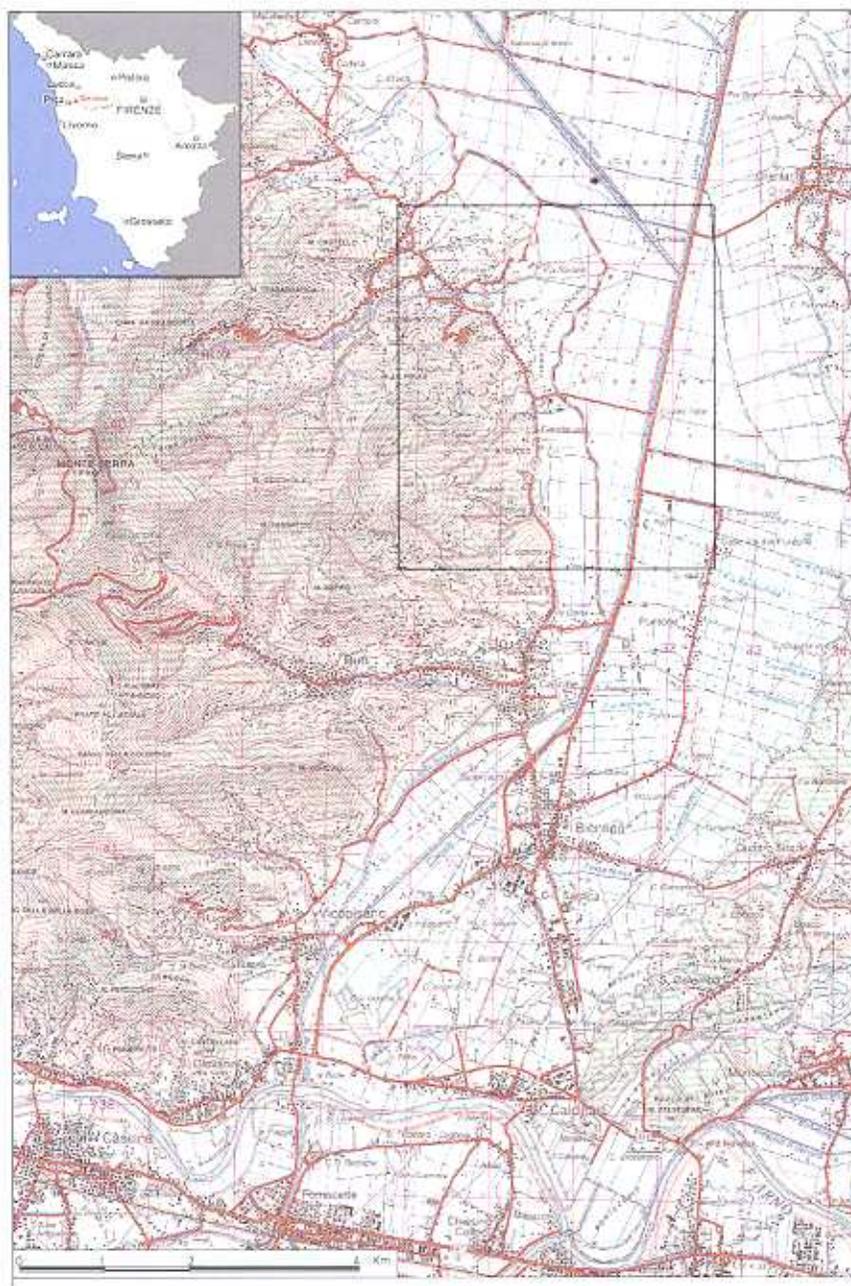


Figura 1a - Ubicazione dell'area di interesse.

Periodico
trimestrale
della
Società
Italiana di
Geologia
Ambientale
Anno XIII
n. 4/2005

Geologia
dell'Ambiente

necessario disporre di una vasta massa di informazioni e verificare preventivamente e quantitativamente l'evoluzione a breve, medio e lungo termine di quanto si va a progettare, pena, in caso contrario, la totale aleatorietà dei risultati dell'intervento.

INTRODUZIONE

La ricreazione di un chiaro perenne nell'alveo dell'ex Lago di Bientina (Prov. di Pisa Fig.1a, Fig.1b) nella porzione compresa fra le aree protette ANPIL "Bosco di Tanali" ed "Il Bottaccio", rientra nel progetto "Lungo le rotte migratorie" finanziato dalla Regione Toscana ed ha lo scopo principale di garantire un'area di sosta e nidificazione per l'avifauna migratoria acquatica messa in crisi dallo stagionale prosciugamento sia delle aree umide relitte, che di buona parte di fossi e canali.

La progettazione del chiaro, in un simile contesto, è particolarmente delicata dovendo conciliare:

- la garanzia del mantenimento della superficie di acqua libera anche in periodi di pluriennale siccità;
- l'incompatibilità di qualsiasi apporto di geomateriali non autoctoni;
- la garanzia di adeguato ricambio

delle acque che costituiranno il nuovo corpo idrico superficiale;

- la minimizzazione dell'impatto delle indagini preliminari e della realizzazione dell'opera, in considerazione delle caratteristiche di area protetta della zona di intervento;
- la limitata disponibilità finanziaria.

La complessità di tale conciliazione è stata affrontata utilizzando tecniche di modellazione idrogeologica numerica ed indagini *in situ* miniinvasive.

Il lavoro, di cui si presenta una sintesi, è stato eseguito dal marzo 2001 al giugno 2002 ed ha prodotto, oltre ai dati conoscitivi ed alle sintesi modellistiche che si esamineranno di seguito, il progetto esecutivo, immediatamente cantierabile per la realizzazione del chiaro.

METODOLOGIA DI LAVORO

La progettazione di un chiaro, ovvero di un corpo di acqua superficiale libera perenne, naturalmente e costantemente rinnovata, impone di conoscere qualità e quantità della risorsa idrica presente nell'area di interesse e nel suo intorno.

Una volta raccolta ed analizzata la tutt'altro che ricca bibliografia specifica sull'area, con apposita campagna di

terreno, si è provveduto, ad integrazione degli scarsi dati disponibili, a:

- rilevare le caratteristiche geologiche ed idrauliche dei litotipi affioranti;
- ricostruire, con carotaggi microstratigrafici continui (attrezzati per freatimetria) la stratigrafia delle aree di interesse ("carotaggio inguainante miniinvasivo", Ambrosio et al.1997);
- monitorare a cadenza mensile la freatimetria;
- rilevare le portate istantanee significative dei principali corsi d'acqua sia artificiali che naturali;
- rilevare le caratteristiche chimiche delle acque sia superficiali che sotterranee.

Con i dati di bibliografia e di nuova acquisizione si è quindi proceduto ed effettuato:

- elaborazione del bilancio idrologico dei bacini afferenti l'area di interesse.
- elaborazione del modello idrogeologico concettuale dell'area.
- implementazione del Modello numerico "area vasta": implementazione del modello "generale" a differenze finite da cui ricavare le condizioni al contorno della modellazione di dettaglio per l'area progettuale.
- identificazione dell'area ottimale di intervento: integrazione dei risultati del modello con le informazioni idrochimiche e definizione delle geometrie del nuovo corpo idrico.
- modello numerico area ristretta: implementazione del modello a differenze finite per l'area selezionata per il chiaro, simulazione del comportamento pluriennale e calcolo del bilancio idrogeologico specifico per il chiaro.
- elaborazione del Progetto esecutivo cantierabile.

AREA DI INTERVENTO

La zona indagata fa parte dell'alveo dell'ex lago di Bientina (Fig.1c). La conca lacustre occupa la fascia pianeggiante immediatamente ad est delle pendici del Monte Pisano, ad ovest del rilievo delle Cerbaie, in continuità morfologica col margine meridionale della pianura lucchese. Verso sud essa è separata dall'adiacente Pianura Pisana dal corso rettificato e sospeso del Fiume Arno.

CENNI PALEOGEOGRAFICI

La pianura Bientinese, in prima approssimazione, può considerarsi, fin da epoca Pleistocenica, come l'ultimo tratto della valle del Fiume Serchio, quando questo (fino ad epoca medievale) confluiva, almeno parzialmente ed occasionalmente, in Arno.

Come la maggior parte della pianura di Pisa, l'area è stata interessata dalle trasgressioni marine, che l'hanno a tratti trasformata in un vasto golfo di mare sottile (Sinus Pisanus) che ha occupato a più riprese, sin dal Pliocene

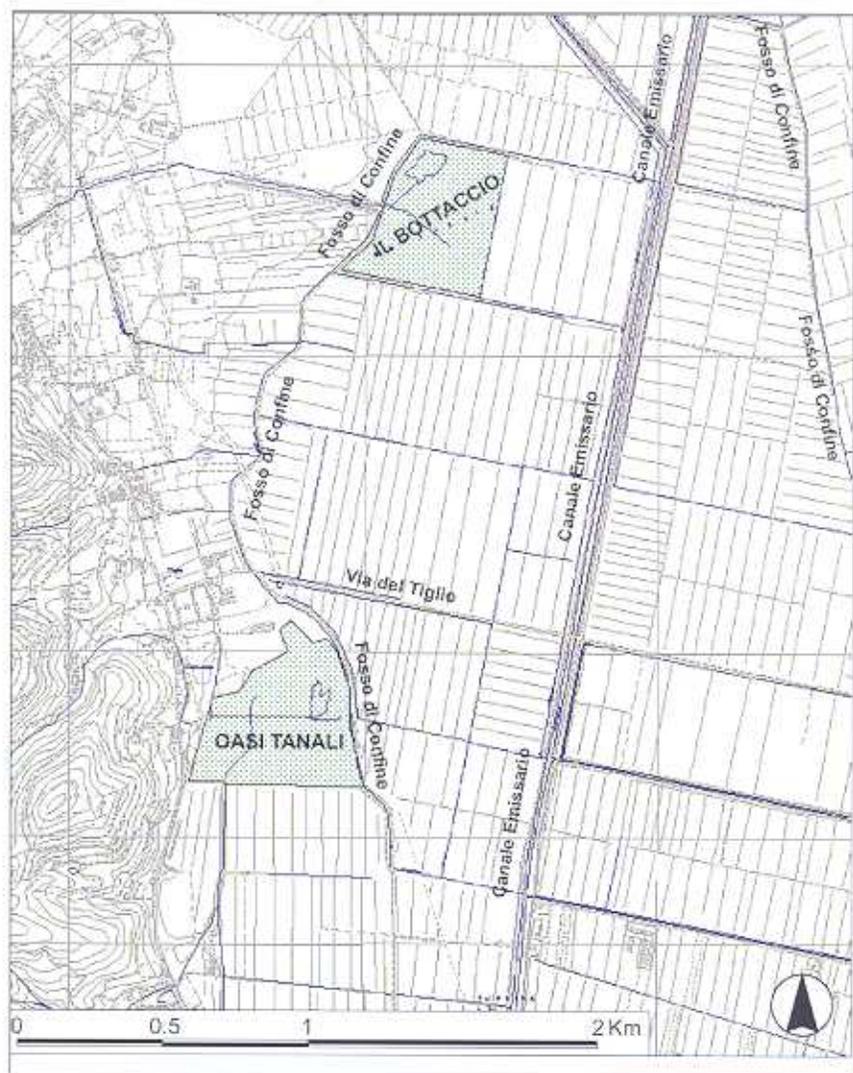


Figura 1b - Schema topografico dell'area.

Superiore, l'intera pianura Pisana fin oltre l'attuale abitato di Pontedera.

Dal termine dell'ultima Glaciazione (circa 14000 anni fa) fino all'età Etrusca, il fiume Auser (il Serchio degli Etruschi e dei Romani), che non tagliava ancora verso mare attraverso la soglia di Ripafratta, correva lungo la piana ad est del Monte Pisano, ma la sua confluenza in Arno veniva progressivamente ostacolata dal sovralluvionamento generato dall'Arno stesso. L'Arno, infatti, correva pensile, sbarrando sia il proprio affluente Auser, che tendeva quindi a tracimare da Ripafratta, sia l'ultimo tratto, pianeggiante, della sua valle, che si impaludava e rimaneva sommerso sempre più a lungo.

Il Lago di Bientina si è quindi originato come lago di sbarramento da sovralluvionamento, ad opera dell'Arno, occupando dall'epoca etrusca fino al diciassettesimo secolo l'area morfologicamente depressa tra i rilievi del Monte Pisano ad ovest e delle Cerbaie ad est.

Probabilmente sin da epoca Romana, e sicuramente da epoca tardo medievale, vari raggruppamenti di umani hanno tentato, di volta in volta, di alzare o abbassare artificialmente il livello del lago, sia per fini agronomici che di navigabilità, che politici e militari (l'area era al Punto triplo di confine tra territorio pisano, luc-

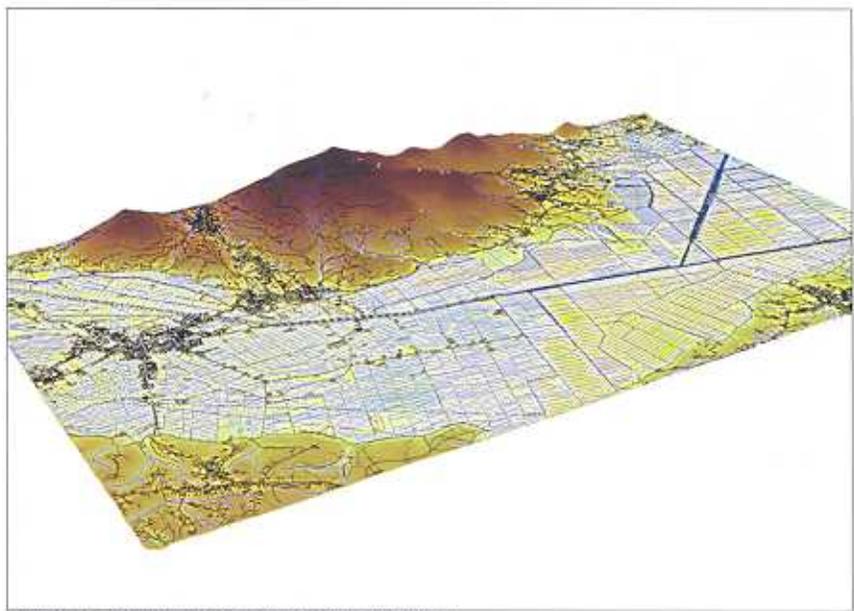


Figura 1c - Area di interesse; elaborazione 3D (Arcgis).

chese e fiorentino, e più volte lo stratega di turno ha cercato di usare il lago per affogare "il nemico" fosse esso assediato o assediante).

Alla metà del diciannovesimo secolo, immediatamente prima dell'Unità d'Italia, con un grandioso e, per l'epoca, audacissimo progetto, il Granducato di Toscana faceva aprire un sottopasso idraulico (detto "La Botte") al di sotto del letto dell'Arno per consentire lo svuotamento del lago verso le paludi ed i bassopiani di

Coltano e di Calambrone che all'epoca circondavano Livorno.

L'opera, tutt'ora efficiente ed in esercizio, non ha però mai garantito il costante mantenimento all'asciutto dell'intera area dell'ex bacino lacustre, e solo negli ultimi sessanta o settant'anni, con l'impiego di impianti idrovori, il prosciugamento è stato completato, ferma restando la frequente sommersione invernale delle parti morfologicamente più depresse del fondo dell'ex lago.

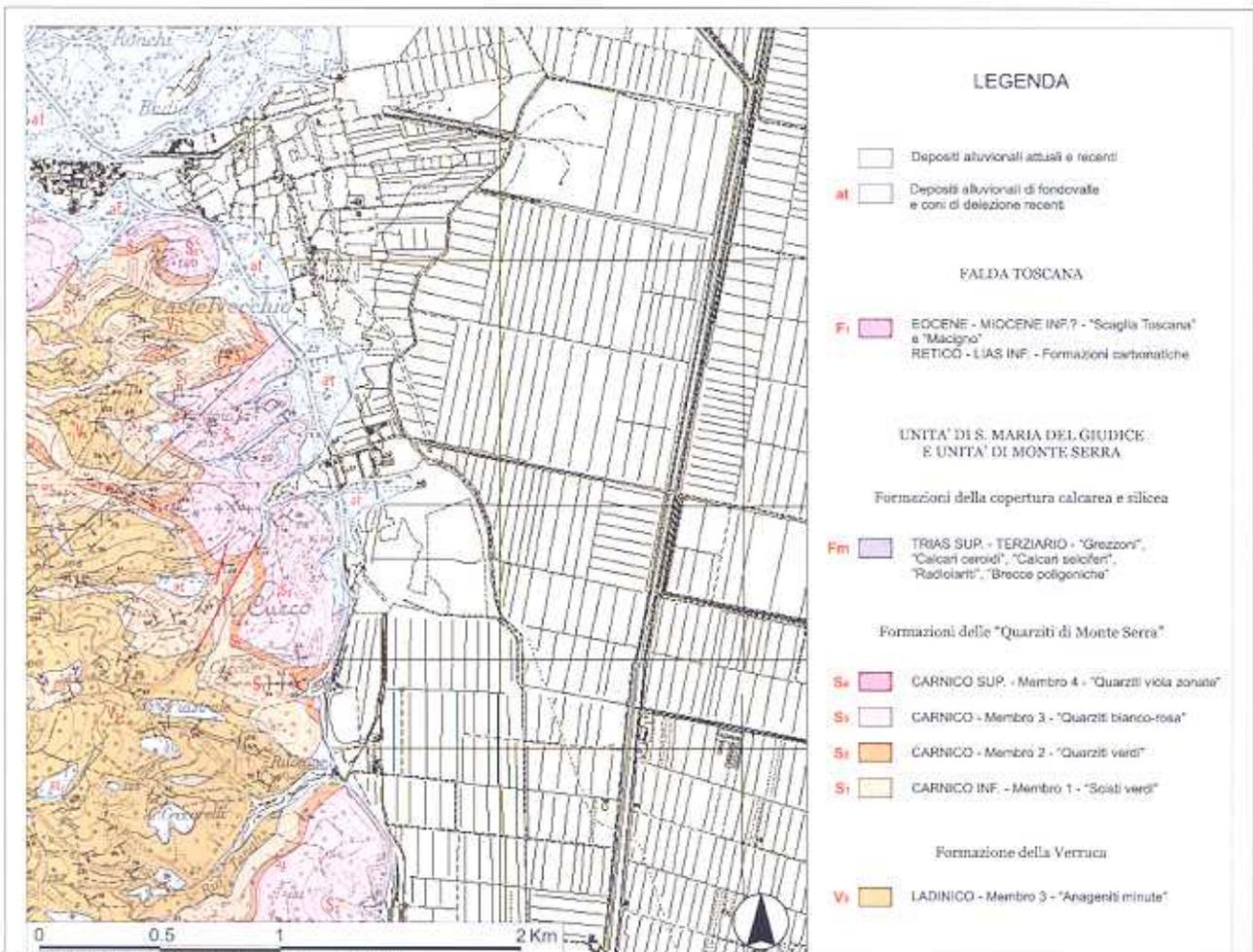


Figura 2 - Carta geologica (Rau, Tongiorgi, 1974)

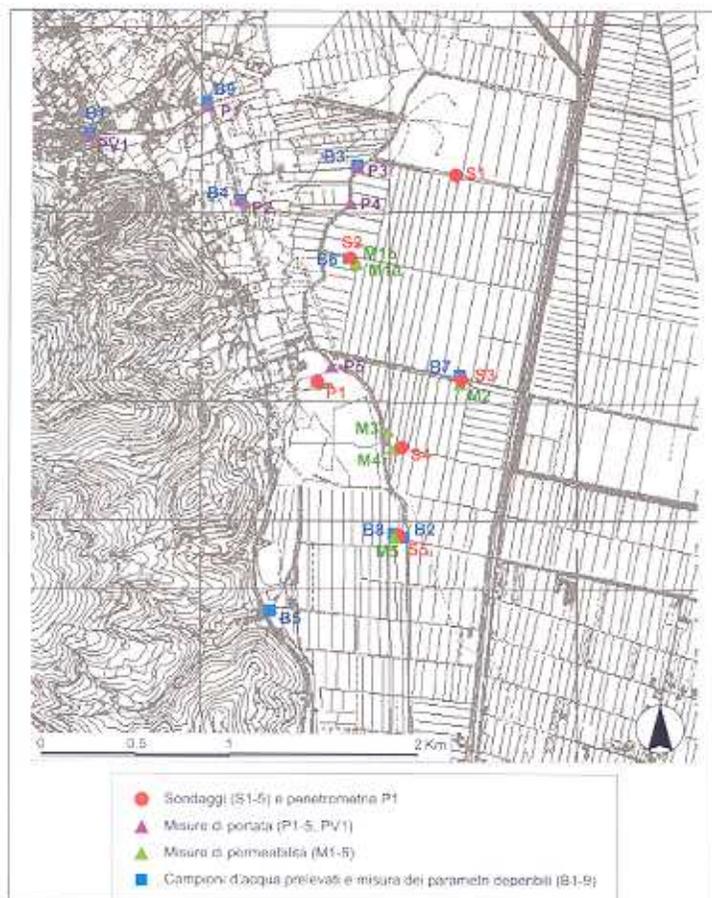


Figura 3 - Ubicazione di sondaggi, prove di infiltrazione, prove di portata e punti campionamento chimico.

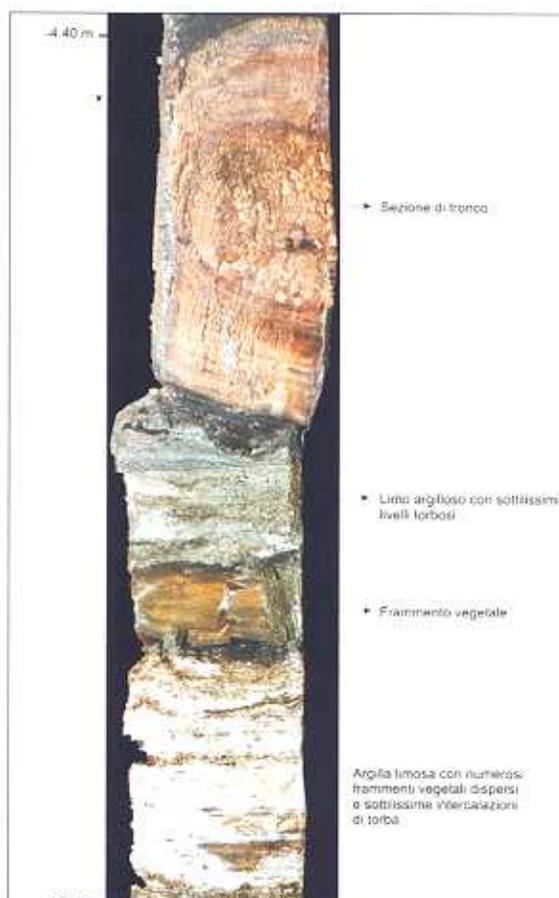


Figura 4 - Esempio di carota: sondaggio S2 da -4.40m a -4.90 m dal p.c.

GEOLOGIA E STRATIGRAFIA

L'area di interesse (Fig. 2) è costituita da depositi di origine marina, lacustre e fluviale. Ai depositi limo-argillosi di trasgressione marina si sono

sovrapposti i sedimenti fluviali e palustri legati ai periodi di emersione quando l'area era attraversata dal fiume Serchio.

Le porzioni di terreno più superficiali sono

caratterizzate da alternanze di depositi lacustri fini, e straterelli di torba, ben poco compattato, con spessore generalmente variabile attorno ai due metri; le torbe giacciono su sedimenti ripetuti passaggi da palustre a lacustre e viceversa del limo-argilloso, con componente organica concentrata in sottili livelli (paleoemersioni).

Il sondaggio 1, al di sotto delle torbe e prima di incontrare la sequenza limoso-argillosa lacustre propriamente detta, ha evidenziato la presenza di un orizzonte di sabbie, che, come verrà discusso nel paragrafo "Posizionamento ottimale del chiaro", influenza notevolmente l'idrogeologia locale.

MISURE DI CAMPAGNA

Nel corso di un anno idrogeologico sono state eseguite:

- Freatimetrie, con cadenza mensile, nei fori dei carotaggi appositamente attrezzati. La figura 6 riporta l'andamento delle piezometrie nel tempo per i 5 punti di misura. Su tali dati si è basata la calibrazione del "Modello area vasta".
- Misure dirette in pozzetto della conducibilità idraulica dei depositi affio-

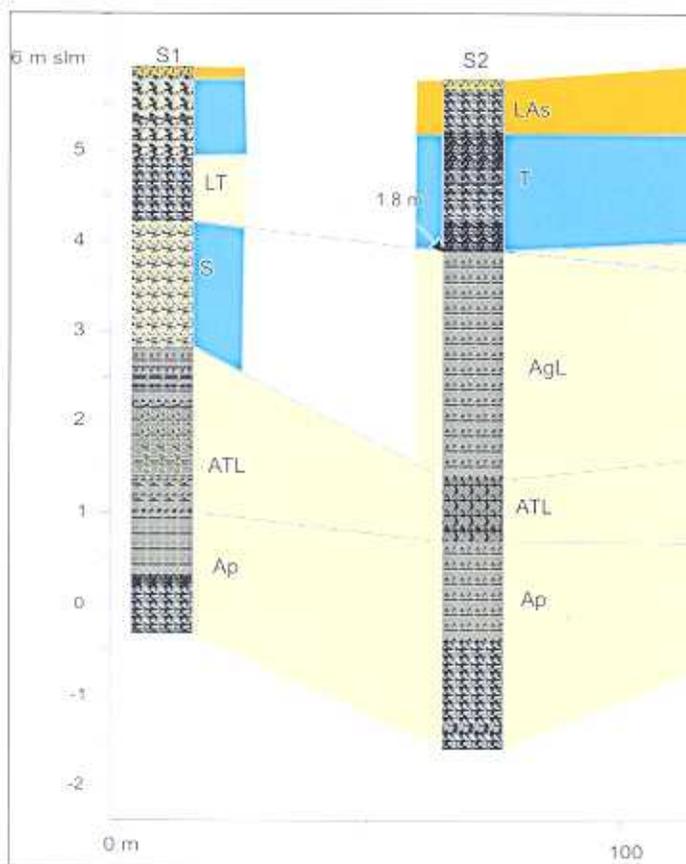


Figura 5 - Schema correlazioni stratigrafiche.

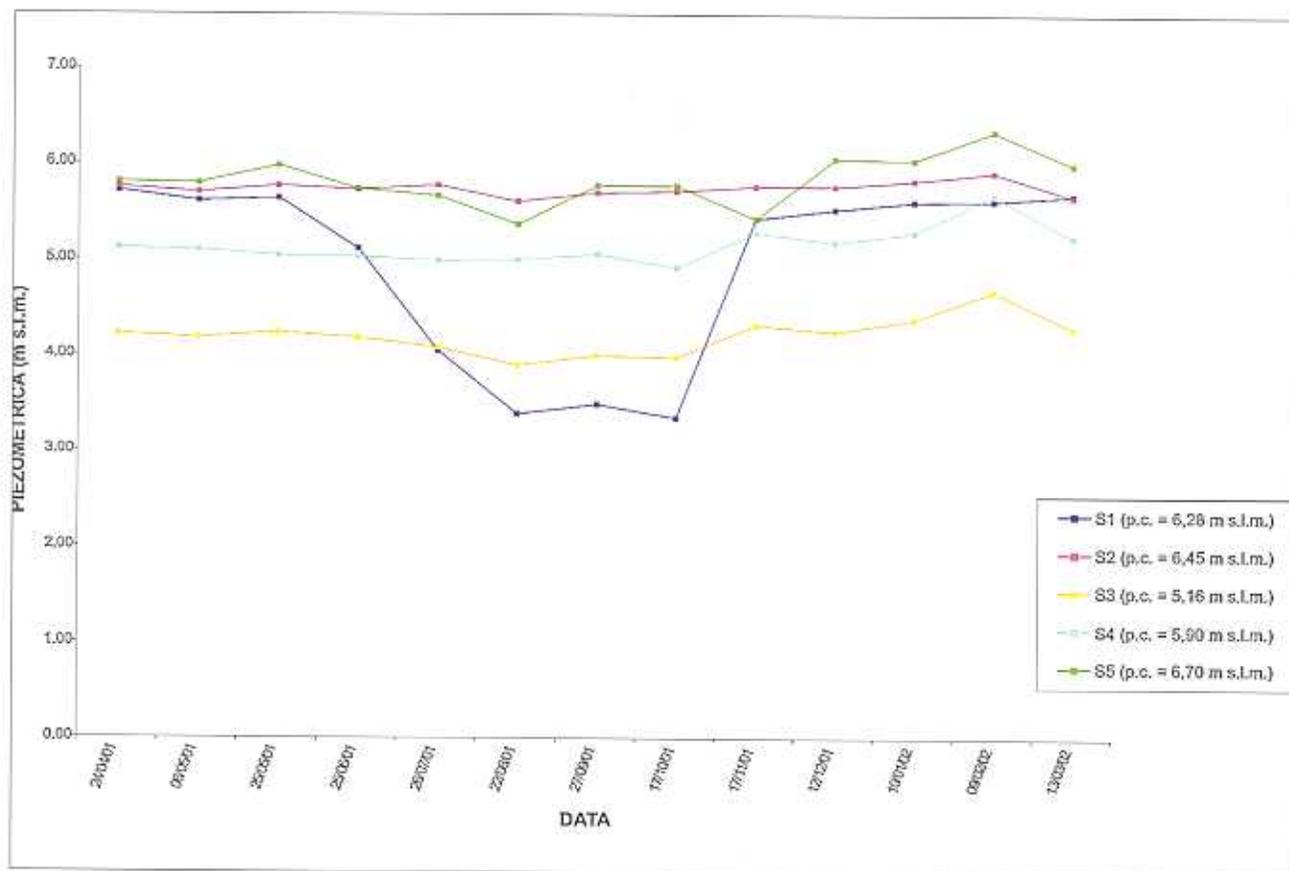


Figura 6 - Piezogrammi.

ranti (5 punti di misura, Fig.3, rappresentativi delle litologie dell'area). I risultati sono riportati in Tab.1.

- Prove di portata istantanea (misure in 6 punti chiave, Fig. 3) per la valutazione degli scambi acque superficiali-acque sotterranee al termine della stagione secca.

Era indispensabile quantificare i deflussi minimi sia per verificare l'eventuale disponibilità di acque superficiali, ossigenate, per favorire il ricambio del chiaro in periodo estivo, sia per stimare i rapporti di reciproca alimentazione tra falda superficiale e reticolo idrografico. Durante i lavori preliminari è stata inoltre notata la rilevanza idrogeologica dell'antica sede della dismessa linea ferroviaria Pontedera-Lucca via Bientina che taglia il conoide del Torrente Visona sottopassandone l'alveo.

Il sottopasso (galleria ferroviaria a botte, dell'inizio secolo), la trincea ferroviaria di avvicinamento alla galleria ed il canale in muratura che la prosegue agiscono molto efficacemente come opera di cattura non solo delle acque sotterranee del subalveo del tor-

rente, ma anche, per circa un chilometro, dei depositi grossolani di pedemonte, fino ad un gomito, oltre il quale il canale punta verso la piana. Le acque di questo canale (denominato di seguito "gorile ferroviario") rappresentano una risorsa perenne, anche se con portata fortemente variabile.

Sono state eseguite otto prove di portata istantanea (Tab.2) di cui una a diluizione di tracciante (Rio Visona allo sbocco sulla piana, al Ponte di Castelvecchio) e sette mediante misure dell'area della sezione bagnata e della velocità media del flusso.

- Raccolta campioni per analisi idrochimiche di anioni e cationi maggiori e misure *in situ* dei parametri deperibili (Fig. 3): il campionamento e la misura sul terreno dei parametri deperibili è stato eseguito sia per le acque superficiali di canali e rii, che sotterranee dei piezometri per individuare e valutare le potenziali risorse di alimentazione del chiaro. In tabella 3a sono riportati i risultati delle analisi di terreno:

Prova	Coordinate UTM (Zona 32T)	K (cm/sec)
P1	0630900 - 4846914	$3,1 \cdot 10^{-4}$
P2	0631461 - 4846259	$5,9 \cdot 10^{-4}$
P3	0631061 - 4845923	$5,4 \cdot 10^{-4}$
P4	0631044 - 4846002	$1,0 \cdot 10^{-3}$
P5	0631118 - 4845465	$4,9 \cdot 10^{-4}$

Tabella 1 - Risultati delle prove di permeabilità in pozzetto

VALUTAZIONE QUALI-QUANTITATIVA DELLA RISORSA IDRICA

BILANCIO IDROGEOLOGICO CLASSICO

Sono stati studiati i bacini del Rio Visona (superficie ca. 8 Km²) e del Rio Tanali (superficie ca. 6 Km²), essendo tali corsi d'acqua, ubicati nella parte orientale dei Monti Pisani, unici afferenti all'area di interesse (Fig. 7).

In aggiunta a questi, durante il lavoro, è stata individuata e considerata una porzione di bacino della superficie di circa 1 Km² (G1) costituita da depositi di pedemonte ad elevata permeabilità e coefficiente di infiltrazione. G1 è attraversato, ed in parte drenato, dal gorile ferroviario.

Nei calcoli del bilancio, alla relativa scarsità di stazioni pluviotermometriche ed ai pluriennali periodi di non operatività delle stesse, si è aggiunta

Sigla	Data	Portata (l/sec)
P1	13.05.2001	40.9
	26.07.2001	secco
PV1	08.09.2001	17.8
P2	13.05.2001	60.9
	26.07.2001	11.5
P3	26.07.2001	5.7
	26.06.2001	47.7
P4	26.07.2001	5.0
	26.07.2001	47.9

Tabella 2: - Risultati delle prove di portata istantanea



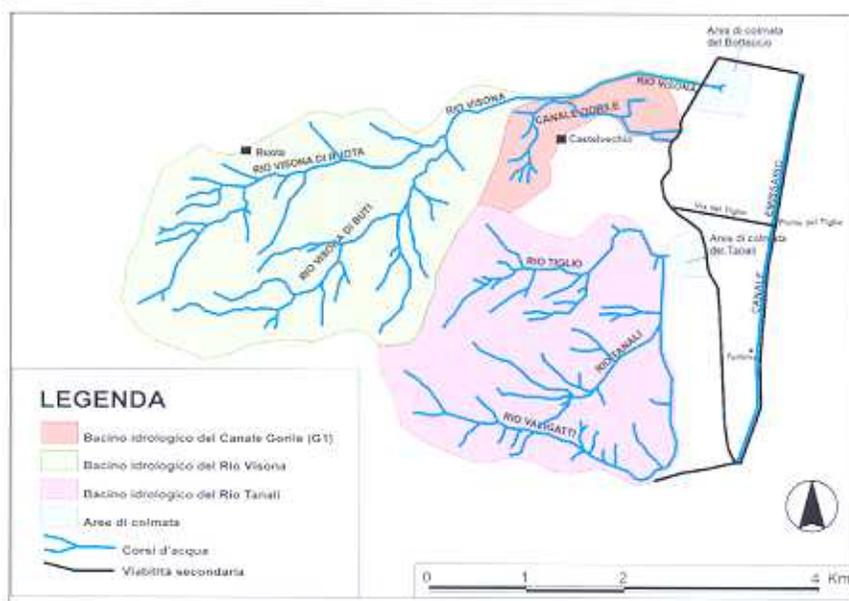


Figura 7 - Schema dei bacini idrografici afferenti.

Tab. 3a

Sigla	Data	Temperatura (°C)	pH	Conducibilità (µS) a 20°C	Alcalinità (µl di HCl 0,1N per titolare 1000µl campione)
B1	09.08.2001	19,8	8,4	165	12
B2	09.08.2001	27,9	7,6	378	1,6
B3	09.08.2001	22,7	7,5	220	14,5
B4	09.08.2001	23,9	7,9	201	13
B5	09.08.2001	25,7	8,6	205	14
B6	22.08.2001	25,3	6,9	2220	234 (filtrato)
B7	22.08.2001	19,2	6,3	1520	147 (filtrato)
B8	22.08.2001	22,1	6,37	1163	110 (filtrato)

Tab. 3b

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
Alc (meq)	1,2	1,6	1,45	1,3	1,4	23,4	14,7	11
Cl (mg/l)	18,51	29,04	21,03	24,1	26,41	170,93	61,58	55,69
NO3 (mg/l)	2,92	7,75	4,29	1,8	<0,5	0,61	<0,5	<0,5
SO4 (mg/l)	4,42	23,94	9,67	5,09	2,21	1,57	0,55	8,78
Na (mg/l)	11,68	21,86	12,51	14,33	17,43	175,2	51,39	39,44
K (mg/l)	0,846	2,406	1,848	0,791	0,406	5,946	2,623	7,083
Ca (mg/l)	15,1572	29,0598	23,0928	18,7374	17,2992	244,0554	157,4982	138,414
Mg (mg/l)	4,7073	7,04004	5,33664	4,7379	7,19202	58,75812	32,93988	28,26216
Fe (mg/l)						20,48058	52,44534	41,68332

Acque superficiali

- B1 - Rio Visona, Al ponte di Castelvecchio
- B2 - Fosso di Confine (Sud area di lavoro)
- B3 - Fosso di confine, (Nord area di lavoro vicino Area Bottaccio)
- B4 - Fosso Uscita nella piana del dreno ferroviario
- B5 - Rio Tanali, Molino di Rotone

Acque sotterranee

- B6 - Piezometro S2
- B7 - Piezometro S3
- B8 - Piezometro S5

Tabelle 3 - (a) Misure di parametri chimico-fisici deperibili; (b) Cationi ed anioni maggiori di acque superficiali e sotterranee

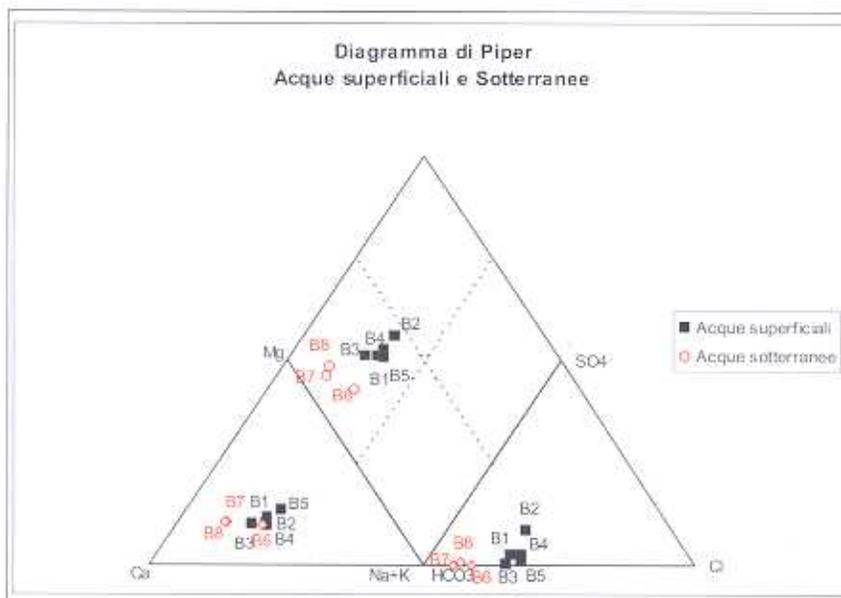


Figura 8 - Diagramma classificativo di Piper.

la difficoltà dovuta all'assenza di idrometrografi sia sul Rio Tanali, che sul Rio Visona che sul Canale Emissario. Non era quindi possibile verificare la "chiusura" dei bilanci.

Sono stati utilizzati i dati delle stazioni pluviometriche del Monte Serra (quota 918 m.s.l.m.), Chiesina di Padule (quota 13 m.s.l.m.) e Staffoli (quota 23 m.s.l.m.); i dati delle stazioni limitrofe di Lucca (quota 20 m.s.l.m.), San Giovanni alla Vena (quota 16 m.s.l.m.) e Pontedera (quota 14 m.s.l.m.) sono stati usati, previo calcolo delle curve di correlazione, per interpolare le lacune delle prime.

Per il calcolo dell'evapotraspirazione si è impiegato il metodo del Thornthwhite, assumendo una capacità di campo (cautelativa) di 100 mm.

Per gli attingimenti antropici sono stati considerati i dati delle concessioni del Genio Civile (probabile, ma non quantificabile una sottostima).

In assenza di dati di chiusura si è assunto, per l'infiltrazione profonda, non contribuente al deflusso sotterraneo in direzione dell'area di interesse, una percentuale pari al 2% della precipitazione (dati bibliografici per aree geologicamente comparabili); questo tiene conto della ridotta tettonizzazione e bassa permeabilità primaria della stragrande maggioranza dei litotipi che affiorano sul fianco occidentale del Monte Pisano.

Il valore calcolato per i deflussi del Rio Visona e del Rio Tanali sono riportati in Tab. 4a,b; questi apporti idrici superficiali arrivano in piano alle casse di colmata dell'Oasi di Bottaccio e del Rio Tanali, ma non influenzano direttamente l'area intermedia. E' inoltre opportuno notare come i deflussi estivi risultino annullarsi per oltre tre mesi, risultato che pur dovendosi obbligatoriamente considerare solo qualitativo, in ragione dell'assenza di verifica numerica, è comunque in accordo con la diretta osservazione dei periodi di secca dei torrenti, anche in estati particolarmente piovose quale quella dell'anno 2002.

I deflussi del bacino G1 sono molto limitati e vengono intercettati dal Fosso di confine.

E' peraltro ragionevole ipotizzare che i deflussi sotterranei da tale bacino siano percentualmente più rilevanti di quelli degli altri due (maggiore percentuale della superficie del bacino costituita da depositi di talus pedemontano permeabile); osservazione in buon accordo con l'incremento (si vedano le portate istantanee estive) del deflusso superficiale estivo del fosso di confine nell'attraversare la "base" (lato valle) di tale bacino.

DEFLESSI SUPERFICIALI ESTIVI

Dall'esame dei risultati delle misure di portata istantanea si è avuta la

Tab. 4a

Bacino (Superficie Km ²)	ottobre	novembre	dicembre	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno
Rio Visona (ca. 8)	534700	934100	861200	919600	687700	648000	354600	31200	-366600
Canale Gorile (ca. 1)	71600	108200	97100	85700	71000	59300	44200	-16000	-65700
Rio Tanali (ca. 6)	441900	736400	699400	633200	518400	474600	272200	-46800	-352500
TOTALE (ca. 15)	1057200	1778700	1657700	1638500	1277100	1217900	676000	-31600	-784800

Bacino (Superficie Km ²)	luglio	agosto	settembre	anno
Rio Visona (ca. 8)	-344600	0	3200	4263100
Canale Gorile (ca. 1)	-24400	0	0	431000
Rio Tanali (ca. 6)	-210700	0	112.5	3171213
TOTALE (ca. 15)	-579700	0	3312.5	7,910,513

Tab. 4b

Bacino (Superficie Km ²)	(P-Ev)/a	I (m3/a)	PA (m3/a)	Dc (m3/a)
Rio Visona (ca. 8)	4263100	-14000	-50000	4149100
Canale Gorile (ca. 1)	431000	-344800	0	36200
Rio Tanali (ca. 6)	3171213	-14000	0	3107213

I = infiltrazione profonda; PA = Prelievi antropici

conferma che durante il periodo estivo i corsi d'acqua Visona e Tanali si inallveano completamente all'ingresso in pianura, che il gorile ferroviario si riduce a circa un decimo della portata invernale ma non va mai a secco e che il fosso di confine incrementa la sua portata ben più di quanto lo giustifichi la confluenza del gorile, manifestando una chiara ricarica dalle falde.

IDROCHIMICA

I campioni d'acqua prelevati sono stati analizzati per elementi maggiori (cationi ed anioni) e i risultati sono riportati in Tabella 3b. Per la classificazione si è impiegato il diagramma di Piper di Fig. 8.

I campioni ricadono tutti nella famiglia delle acque bicarbonato calciche a segnalare una "storia" idrogeologica breve (tempo di interazione con le rocce incassanti breve).

Ovviamente la salinità dei campioni provenienti da falda risulta marcatamente superiore a quella delle acque superficiali, come pure la concentrazione di bicarbonati, ma la vicinanza dei due gruppi di campioni nel diagramma di Piper ne identifica univocamente l'origine comune: acque meteoriche di età recentissima.

E' interessante notare che, indipendentemente dalla salinità totale, per le acque sotterranee il contenuto in ferro risulta direttamente proporzionale alla distanza del punto di campionamento dal margine settentrionale pedemontano della conca lacustre: maggiore è il percorso delle acque sotterranee all'interno dei depositi torbosi più si instaurano condizioni riducenti in grado di solubilizzare il ferro.

MODELLO NUMERICO AREA VASTA

La modellazione ha avuto lo scopo di consentire il calcolo del bilancio idrogeologico della zona pedecollinare e di pianura comprendenti e circo-

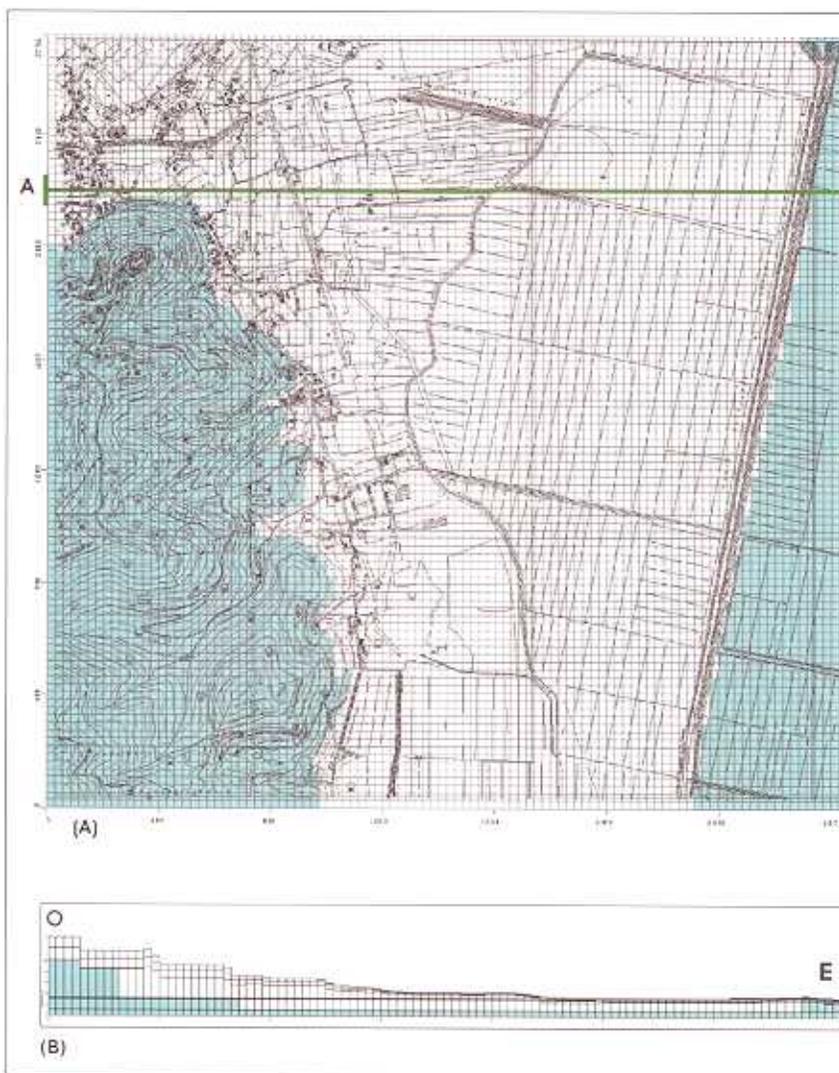


Figura 9 - Discretizzazione dello spazio in XY (A), in Z (B); in colore le celle inattive.

Proprietà N°	$K_x = K_y$ (cm/sec)	K_z (cm/sec)	S_s (1/m)	S_y (-)	Eff. Por (-)	Tot. Por (-)
2	1.0e-03	3.0e-04	1.0e-04	5.0e-02	0.10	0.10
3	6.2e-04	3.1e-04	1.0e-03	0.1	0.15	0.25
4	5.9e-04	5.9e-04	0.03	0.1	0.15	0.30
5	2.0e-03	1.0e-03	1.0e-05	1.0e-02	0.15	0.20
6	1.0e-08	1.0e-08	1.0e-01	0.1	0.20	0.25
7	1.0e-03	1.0e-03	5.0e-02	0.15	0.30	0.40
8	1.0e-04	1.0e-04	1.0e-04	0.025	0.08	0.12
9	1.0e-03	1.0e-04	1.0e-05	0.2	0.10	0.10
10	3.0e-04	3.0e-04	1.0e-04	9.0e-03	0.10	0.20

Tabella 5 - Modello area vasta; proprietà delle celle. K_x, K_y, K_z = conducibilità idraulica nelle tre direzioni spaziali. S_s = Specific Storage; S_y = Specific Yield; Eff. Por = Porosità effettiva; Tot. Por. = Porosità totale



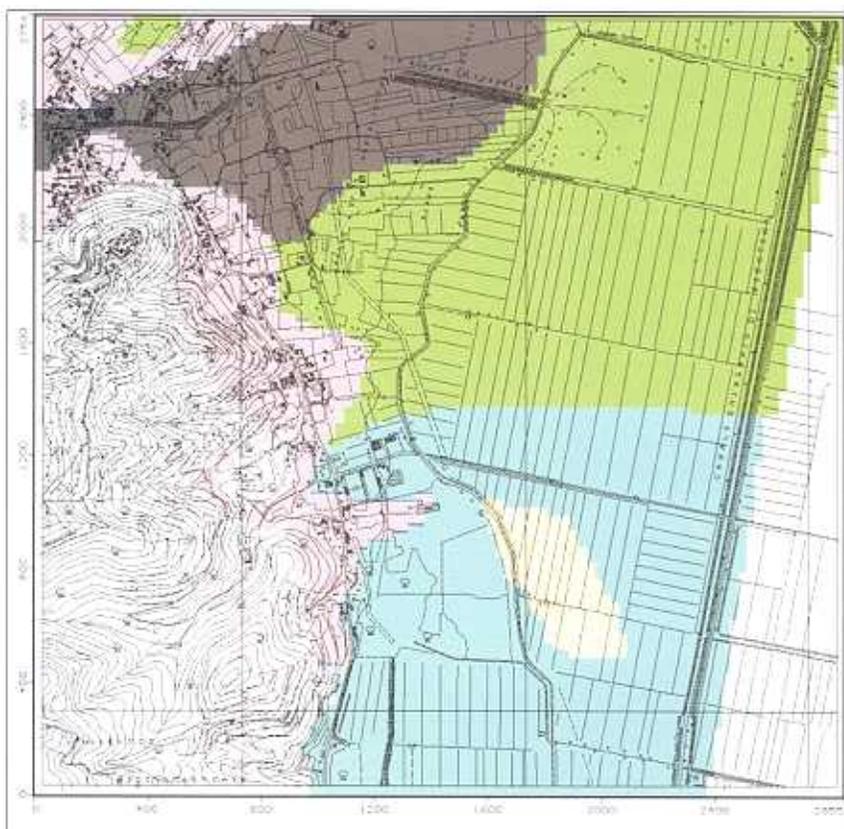


Figura 10a - Distribuzione delle proprietà idrauliche sullo strato 1 (in bianco le celle inattive).

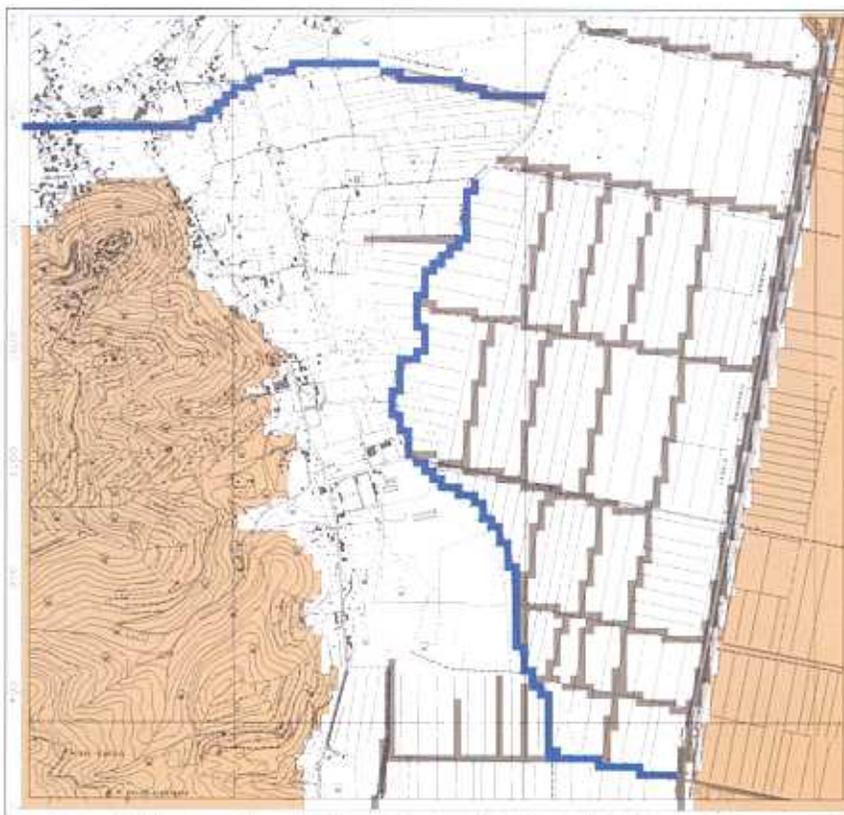


Figura 10b - Distribuzione delle celle "drain" (colore grigio) e "river" (colore blu)

Periodo	Precipitazioni (mm/anno)	Evapotraspirazione potenziale (mm/anno)
Gennaio-Maggio	999	638
Giugno- Agosto	717	1508
Settembre-Dicembre	1504	380
		H_{ex} 1 m
		H_{ex} 3 m per le aree boscate

Tabella 6 - Valori di precipitazione e di E_v calcolata in mm/a dai dati della stazione di Chiesina di Padule

stanti l'area di interesse.

In assenza di dati idrometrografici statisticamente significativi relativi al reticolo idrografico, non si è considerato accettabile il solo uso delle equazioni classiche di bilancio in quanto queste sarebbero comunque rimaste prive di verifica. La modellazione idrogeologica a differenze finite ha invece consentito (mediante la tecnica di calibrazione iterativa effettuata sui dati freaticometrici direttamente misurati) di comparare l'affidabilità delle ipotesi di lavoro relative all'interazione di acque superficiali con acque sotterranee ed al moto di queste ultime.

Una volta implementato e calibrato il modello per l'area vasta è stato eseguito un bilancio a zone con la ricostruzione di scambi idrici sia fra acque sotterranee e acque superficiali che fra differenti aree.

Per la modellazione è stato utilizzato Vmodflow 2.8.2. MODFLOW è un modello a differenze finite che simula il flusso di acque sotterranee nelle tre dimensioni spaziali (X,Y,Z); esso incorpora i modelli bi e tridimensionali descritti da Trescott (1975), Trescott e Larson (1976), Trescott, Pinder and Larson (1976) e ampiamente utilizzati dall' USGS.

Il modello offre la possibilità di simulare:

- le diverse caratteristiche del sistema idrologico interagente con l'area di studio quali ad esempio flusso da fiumi, flusso da superfici a carico costante, flusso dovuto a drenaggi, ecc.;
- flussi associati con stress esterni quali ad esempio pozzi, ricarica areale, evapotraspirazione, reiniezione o ricarica artificiale;
- differenti tipi di strati: confinati, non confinati, misti.

Modflow permette inoltre il calcolo del bilancio a zone; per l'area relativa all'alveo del Lago di Bientina il bilancio è stato affrontato solo mediante modello numerico.

IMPLEMENTAZIONE MODELLISTICA

DISCRETIZZAZIONE DELLO SPAZIO E CONFINI DEL MODELLO

- Discretizzazione orizzontale (X, Y): la griglia (celle quadrate di 100 righe e 100 colonne) è stata valutata come il miglior compromesso fra grado di approssimazione e rapidità di calcolo;
- Discretizzazione verticale (Z): lo spazio verticale, dalla massima altezza topografica alla minima quota (-8 m s.l.m.), è stato suddiviso in 6 strati di cui il più profondo (-6 - -8 m s.l.m.), costituito da celle inattive, a rappresentare la base del modello (dati topografici da CTR Toscana numerico 1:10000).

I confini del modello sono stati definiti utilizzando celle inattive che sono state distribuite in modo da com-

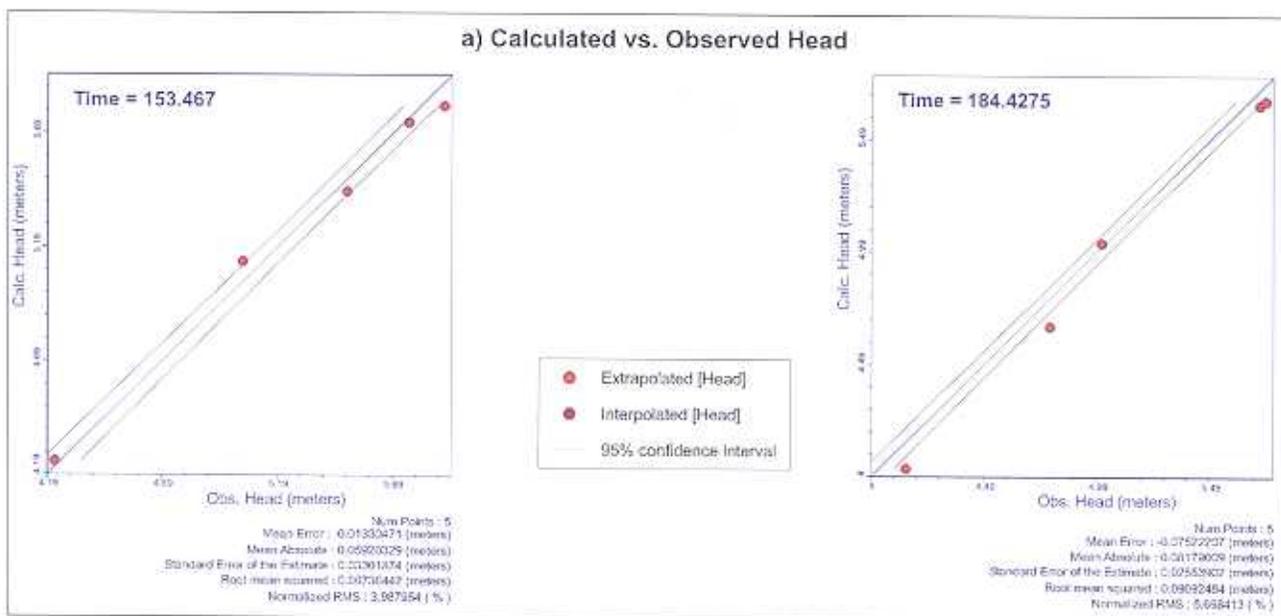


Figura 11a - Diagrammi "calcolato - osservato" a T = 153 giorni e T = 184 giorni.

prendere le colline e la zona ad ovest del canale Emissario (Fig. 9).

CONDIZIONI AL CONTERNO: FIUME

Le celle Fiume simulano gli interscambi acque superficiali - acque sotterranee. La modellazione dei fiumi, nel caso in esame Rio Visona e Fosso di Confine, è una delle parti più delicate del modello in quanto sono disponibili pochi dati sia per il calcolo della conduttanza sia per la definizione della quota (H) di pelo libero dell'acqua nei periodi estivi ed invernali.

I parametri sono stati assegnati alle celle fiume ricavando la quota assoluta della lama d'acqua dalle quote di vari punti dell'alveo e dalle evidenze di campagna di livelli medi di magra e di morbida ed i valori di conduttanza dal confronto dei valori di portata istantanea contemporanea in più punti.

I dati così ottenuti sono stati inseriti nel modello e quindi corretti con l'utilizzo della calibrazione.

PROPRIETÀ DELLE CELLE

Ogni cella attiva del modello viene caratterizzata da un set di proprietà idrauliche.

Lo studio delle carote dei sondaggi e dei dati delle prove di infiltrazione comparato con dati bibliografici del nostro "case history" hanno permesso di ricavare le proprietà per i depositi della zona. Queste proprietà sono state quindi estrapolate sull'intera area secondo l'interpretazione idrogeologica già elaborata.

La calibrazione effettuata con i valori di piezometria misurati ha permesso di verificare ed affinare l'estrapolazione areale. Nella tabella 5 sono indicati i valori delle proprietà assegnate mentre nella Fig. 10a è rappresentata la distribuzione areale finale sullo strato 1 di superficie.

Le proprietà 2, 8, 9 sono state ricavate da bibliografia e rappresenta-

no depositi di conoide; le proprietà 3, 4, 10 rappresentano livelli argilloso-limoso-sabbiosi (acquitardi); 5 - Sabbie limose; 6 - argille; 7 - Torbe.

PERTURBAZIONI ESTERNE AL SISTEMA

Nell'area in esame non esistono pozzi ma, trattandosi di un'area bonificata dotata di fitta e complessa rete di fossetti e canali artificiali, risulta

particolarmente critica la funzione drenaggio.

DRENAGGI: La funzione drenaggio simula gli effetti della rimozione di acqua da un acquifero con velocità proporzionale alla differenza di carico idraulico tra l'acquifero e la quota dei dreni. La funzione si basa sull'assunzione che il drenaggio non ha effetto quando la piezometrica scende sotto

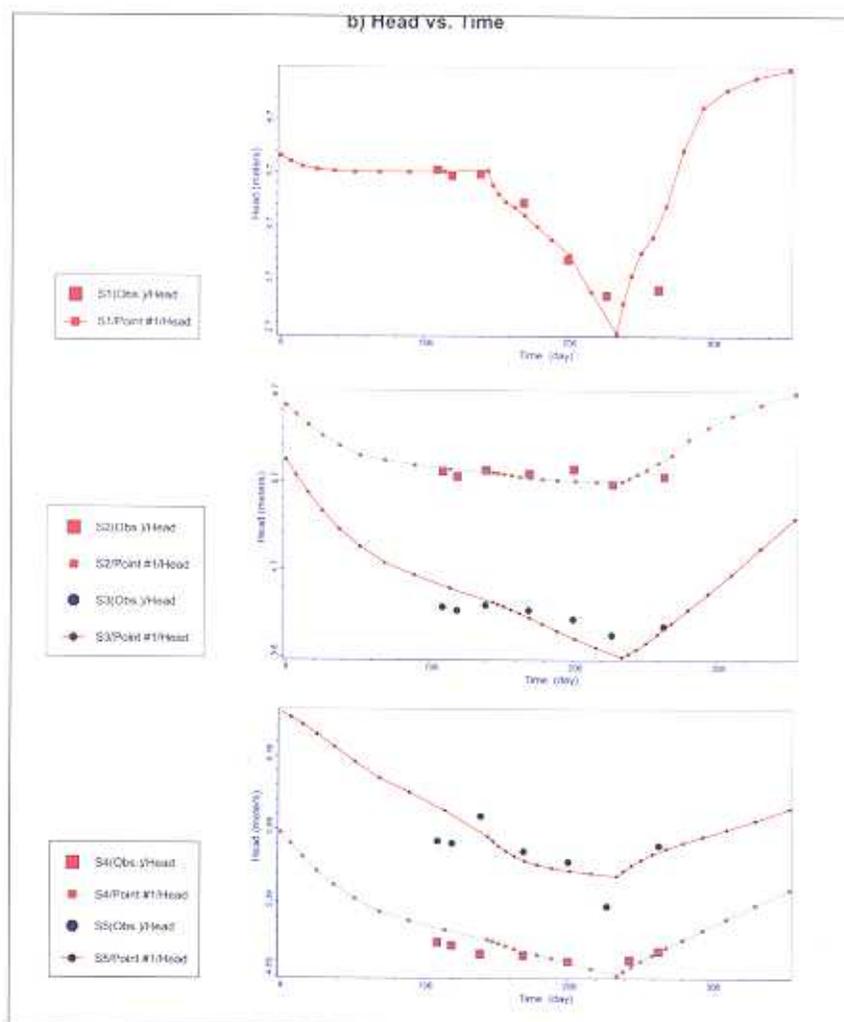


Figura 11b - Piezogrammi calcolati ed osservati. Calcolati: linea continua; Osservati: simboli isolati.

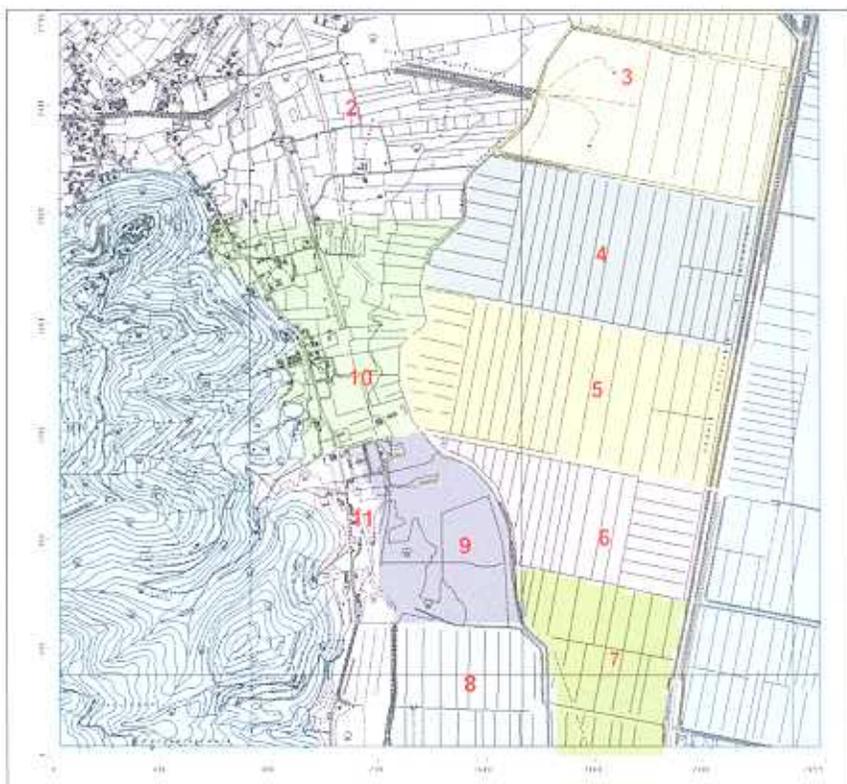


Figura 12 - Bilancio a zone: aree per il calcolo

la quota del dreno.

Sono stati considerati sia i drenaggi principali (estesi su tre strati) sia i drenaggi secondari corrispondenti alle scoline di separazione fra campi (estesi su 2 strati). Il valore di Conduttanza è stato ricavato da bibliografia ed affinato nella fase di calibrazione. In Fig. 10b è riportata la distribuzione spaziale del reticolo drenante modellato.

RICARICA ED EVAPOTRASPIRAZIONE

Ricarica meteorica

I dati necessari per la modellizzazione sono stati ricavati dai calcoli del bilancio idrogeologico classico dei bacini afferenti. In particolare per la zona fra le colline ed il fosso di confine

sono stati utilizzati i valori ricavati per la stazione pluviografica di Chiesina di Padule considerando un coefficiente di infiltrazione pari a 0.6.

Per la piana l'attribuzione della ricarica è stata diversificata per zone; i valori di ricarica efficace (Tab. 6) sono stati attribuiti tenendo conto di differenti valori di infiltrazione dedotti dalle misure di terreno di conducibilità idraulica dei depositi affioranti.

Evapotraspirazione

Come per i valori relativi alla ricarica anche quelli relativi all'evapotraspirazione sono stati ricavati dai dati del bilancio idrologico.

La profondità di estinzione dell'evaporazione (massima soggiacenza

della superficie freatica oltre la quale il fenomeno si interrompe) è stata considerata di 1m nei seminativi e negli incolti e di 3m nelle aree boscate.

DATI REALI PER LA CALIBRAZIONE

Per la calibrazione sono stati inseriti i dati delle piezometrie rilevate mensilmente per un anno dall'aprile 2001 sui sondaggi S1-S2-S3-S4-S5.

PARAMETRI PER IL CALCOLO DEL MODELLO DI FLUSSO PER LA CALIBRAZIONE

L'area di piana dell'alveo lacustre di Bientina è una zona di equilibri idrogeologici limite, data la prossimità della superficie freatica al piano di campagna, il ridotto spessore dei depositi costituenti l'acquifero freatico superficiale ed il non raro manifestarsi di estesi allagamenti, prevalentemente generati da apporti idrici da aree esterne.

Il modello per la calibrazione è stato quindi calcolato, in regime transiente, per un "anno significativo" suddiviso in "stress periods" trimestrali a loro volta suddivisi in 10 "Time steps".

Come punto di partenza è stata scelta la situazione teorica di falda a piano campagna in considerazione delle condizioni effettive di falda affiorante rilevate sistematicamente nei periodi invernali nell'area di interesse.

CALIBRAZIONE

La simulazione del modello di flusso è stata verificata mediante calibrazione sul periodo temporale per il quale si disponeva di dati piezometrici adeguatamente distribuiti. La calibrazione ha quindi mirato a verificare ed affinare la rispondenza del comportamento idraulico del "modello virtuale" con la realtà fisica. L'operazione, di per se piuttosto delicata, è stata ulteriormente complicata dall'assenza di dati certi idrometrografici continui relativi al reticolo idrografico superficiale.

Per quanto riguarda l'azione dei dreni, particolarmente critica nel determinare la morfologia e le quote della superficie piezometrica nel periodo secco, i pochi dati rilevati sono stati integrati da ipotesi di lavoro, successivamente affinate per tentativo ed errore sino a minimizzare la differenza tra dati calcolati ed osservati.

L'affinamento della distribuzione dei parametri idraulici è stato effettuato comparando il valore di parametri statistici significativi per ogni calibrazione fino ad ottenere valori di RMS normalizzato sull'intero periodo modellato non superiori al 10% e inferiori al 5% per il periodo più critico della stagione secca.

La Fig. 11a mostra, ai tempi rispettivamente di T=153 giorni e a T=184 giorni, i diagrammi di featime-

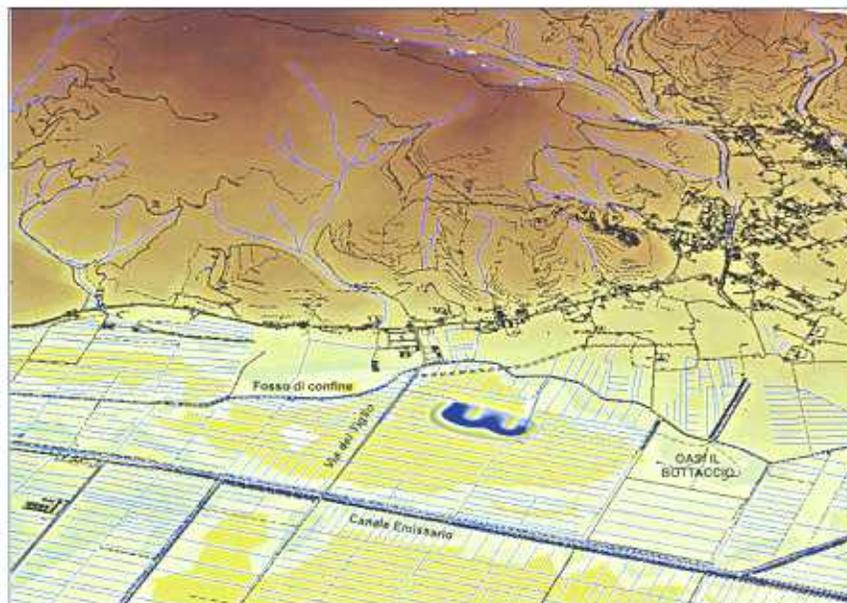


Figura 13 - Ubicazione del chiaro (Elaborazione Arcgis)

tria "osservato-calcolato" con riportati i relativi indici statistici.

I diagrammi di Fig.11b riportano, invece, per ciascun sondaggio, la quota piezometrica in funzione del tempo come calcolata dal modello calibrato (linea continua) ed i valori veri misurati (punti isolati).

BILANCIO

L'area in oggetto è stata suddivisa in 10 zone (Fig. 12). Per ognuna di queste zone e per ciascun periodo di simulazione sono stati calcolati: variazione dell'immagazzinamento, immagazzinamento, scambi con i dreni, ricarica meteorica, evapotraspirazione, scambi con i corsi d'acqua, ottenendo fra l'altro anche l'entità degli scambi sotterranei di ciascuna zona con le limitrofe.

Dall'esame dei risultati si è potuto osservare che per la realizzazione del chiaro le aree più favorevoli sono le 4 e 5.

Tali zone sono comparabili fra loro con l'unica differenza che la zona 4 riceve, per l'inallveamento della Visona, un po' più acqua sotterranea rispetto alla 5 e la restituisce all'ambiente subaereo con l'evapotraspirazione delle sue più estese porzioni boscate.

E' opportuno notare che la zona 5 è quella da cui si ha la massima tendenza dell'acqua sotterranea ad uscire verso altre aree.

Se da un punto di vista del mantenimento del chiaro nei mesi estivi questo è sicuramente uno svantaggio, d'altra parte è importante considerare che la realizzazione di un chiaro artificialmente alimentato con apposita diversione di acque superficiali disponibili, se realizzato nella zona 5, non altera i naturali equilibri e le naturali direzioni di deflusso delle acque sotterranee.

Altra conseguenza di estrema rilevanza dei bilanci modellati è che un chiaro realizzato nella zona 5 avrà la probabilità minima, rispetto ad uno realizzato nelle altre aree, di subire apporti di acque anossiche circolanti nelle torbe.

POSIZIONAMENTO OTTIMALE DEL CHIARO

La selezione dell'area per la realizzazione del chiaro perenne ha dovuto conciliare le realtà fisiche con esigenze ed infrastrutture antropiche al contorno; tra i fattori antropici, la presenza di due aree protette già ben stabilite e l'attraversamento dell'area topograficamente più depressa (quindi morfologicamente più propizia) da parte di un metanodotto nazionale.

L'elevato grado di naturalizzazione delle due aree protette, nate come cassa di colmata ma da oltre un cinquantennio completamente rinaturalizzate,

Proprietà N°	$K_x = K_y$ (cm/sec)	K_z (cm/sec)	S_s (1/m)	S_y (-)	Eff. Por (-)	Tot. Por (-)
11	1.0	1.0	1.0	0.9e-10	0.99	0.99
12	1.0	1.0	0.9e-10	0.9e-10	0.99	0.99

Tabella 7. Modello ristretto: proprietà "sintetiche" delle colte area lacustre.
 K_x, K_y, K_z = conducibilità idraulica nelle tre direzioni spaziali.
 S_s = Specific Storage; S_y = Specific Yield; Eff. Por = Porosità effettiva;
 Tot. Por. = Porosità totale.

sconsigliava d'intervenire, nella loro immediata prossimità, con il necessario movimento terra da effettuarsi peraltro obbligatoriamente proprio nel periodo di nidificazione dell'avifauna. Comunque, la loro natura di casse di colmata alimentate da torrenti con elevato gradiente topografico, comportando la presenza nel sottosuolo di depositi a granulometria prevalentemente grossolana con elevata permeabilità, suggeriva ingenti variazioni di livello di falda (confermate dalla piezometria del sondaggio S1) incompatibili con la creazione di un chiaro perenne.

Le condizioni al contorno di natura antropica insieme ai dati di distribuzione di qualità e quantità delle risorse idriche superficiali e sotterranee precedentemente analizzate, definiscono l'area di posizionamento ottimale del chiaro (porzione centrale della zona modellistica 5) compatibile con il minimo impatto con infrastrutture, rinaturalizzazioni ed equilibrio idrogeologico dell'area di bonifica (Fig. 13).

MODELLO NUMERICO AREA RISTRETTA

L'area compresa fra l'argine meri-

dionale dell'antica cassa di colmata del Bottaccio a Nord, la Via del Tiglio a Sud, il fosso di Confine ad ovest ed il Canale Emissario ad est (area di seguito denominata Area ristretta) è diventata lo scenario per la modellazione del laghetto e della sua interazione con l'ambiente circostante.

Nell'area ristretta sono state implementate le modifiche morfologiche da eseguirsi per la creazione del chiaro e sono inoltre state previste le modifiche alla rete di drenaggi esistenti.

Mentre il modello generale ha portato alla selezione dell'area ottimale per la formazione del chiaro ed ha fornito uno scenario di condizioni al contorno, il modello ristretto è invece a tutti gli effetti uno specifico strumento progettuale per la verifica sia dei rapporti idrogeologici fra il nuovo lago e l'ambiente circostante che degli effetti sugli stessi di differenti soluzioni di progetto.

Si illustra di seguito la soluzione progettuale che ha fornito i migliori risultati simulati:

- Arginatura, sui lati nord-sud-est dell'area lacustre, a basso profilo ottenuta con i materiali di risulta dello scavo impiegati differenziatamente in funzione delle loro caratteristiche

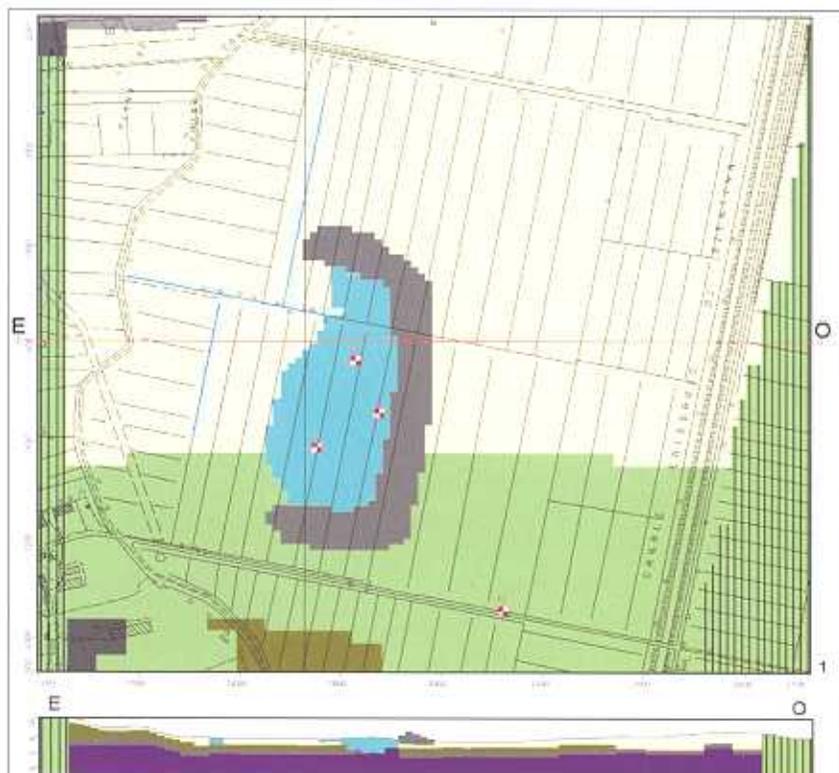


Figura 14a - Distribuzione delle proprietà, strato 1 del modello ristretto. (1) in pianta, (2) in sezione. L1, L2, L3: linnigrati virtuali.





Figura 14b - Distribuzione drenaggi, strato 1. Modello ristretto.

idrauliche. Limi argillosi a costituire l'argine, argille a formare un diaframma idraulico impermeabile poste lungo l'affioramento dello strato naturale di torba sui fianchi nord-sud ed est dello scavo. Le torbe risultanti dallo scavo e che saranno poste a copertura del corpo dell'argine non sono state modellate in quanto pressoché ininfluenti, in tale posizione, ai fini idrogeologici.

- Area lacustre (circa 8ha) con profondità decrescente dal piede dell'argine (-3 m dal pdc) fino a raccordarsi con l'attuale superficie topografica verso ovest.

- Eliminazione dei drenaggi nell'area lacustre.

- Utilizzo di alcuni "drenaggi" ad ovest dell'area lacustre a convogliare il ruscellamento superficiale dell'area

compresa fra il fosso di Confine e l'argine del chiaro.

IMPLEMENTAZIONE

Il modello ristretto utilizza il background di dati di input del modello generale; di seguito si riportano solo i dati che sono stati variati.

DOMINIO DEL MODELLO

Il modello ristretto rappresenta un ingrandimento di un'area particolare del modello generale; restano invariati numero e profondità degli strati, variano invece i limiti XY di modellazione. Nella finestra ristretta la griglia di discretizzazione orizzontale è stata impostata a 98 righe e 106 colonne, ottenendo una dimensione in pianta delle singole celle (circa 13m x 13m) sufficientemente piccola per simulare

gli effetti delle modifiche morfologiche di progetto.

Sono mantenute costanti le profondità degli strati da 2 a 6. Variano invece le quote della superficie essendo stata implementata la variazione di morfologia relativa ai movimenti terra previsti.

PROPRIETÀ DELLE CELLE

Alle proprietà del modello generale ne sono state aggiunte altre due distribuite come da Fig. 14a.

Tali proprietà (Tab. 7) non corrispondono, nella realtà, ad alcun litotipo e sono soltanto un espediente numerico per simulare un corpo idrico a superficie libera in costante e diretto equilibrio con la falda che lo circonda (proprietà 11) e un drenaggio che, a differenza di quelli previsti da Modflow, i quali si limitano ad ablare l'acqua che drenano senza possibilità di considerarne la reimmissione in altre zone, sia invece in grado di restituire quanto drenato in altra area (proprietà 12).

PERTURBAZIONI ESTERNE: DRENAGGI, RICARICA ED EVAPOTRASPIRAZIONE

Drenaggi (Fig. 14b): La rete di drenaggi preesistente è stata modificata con l'eliminazione di quella parte ricadente nell'area di chiaro ed arginatura e la trasformazione di alcuni dreni in "canali" (celle con proprietà 12).

Ricarica ed evapotraspirazione: I valori della ricarica non variano da quelli inseriti nel modello generale. Viene aggiunta una ulteriore zona corrispondente al chiaro che come valori di ricarica assume, in via conservativa, quelli della zona cui appartiene.

L'evaporazione dalla superficie libera è stata simulata inserendo il valore ricavato dai dati meteorologici disponibili mediante l'impiego del nomogramma per il calcolo dell'evaporazione giornaliera da laghetti a bassa profondità adottato dall'USGS (US Weather Bureau Research Paper n. 38, 1955) per simili condizioni climatiche.

PARAMETRI PER IL CALCOLO

Il modello è stato calcolato con le stesse assunzioni descritte per il modello generale e come per quest'ultimo è stato eseguito un bilancio a zone.

La simulazione è stata eseguita per 5 anni partendo per il primo da una piezometrica iniziale corrispondente alla superficie topografica (e massimo invaso del lago) e per ciascuno dei successivi dalle condizioni finali della precedente simulazione. I risultati dell'ultima simulazione sono stati utilizzati per la discussione finale.

Per un agevole controllo delle variazioni del livello del lago sono stati inseriti 3 punti di osservazioni (Fig. 14a), uno per ciascun layer interessa-

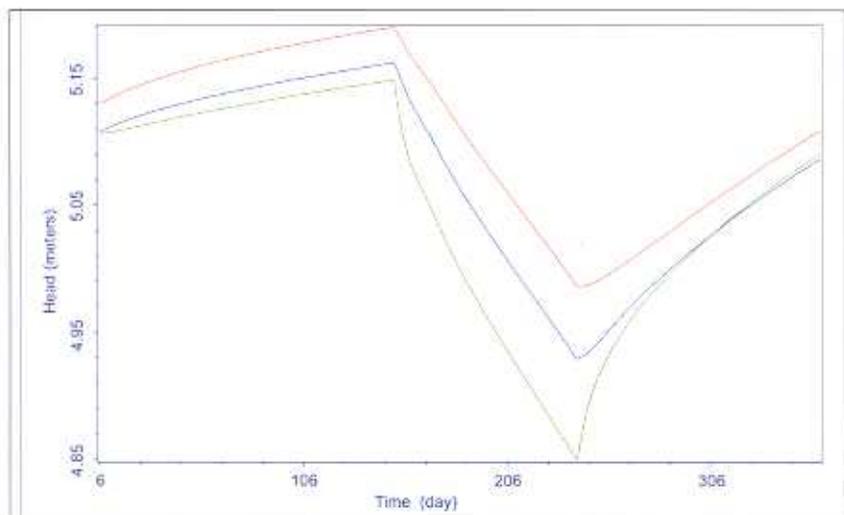


Figura 15 - Limnigrammi virtuali



Figura 16a - Bilancio a zone: aree di calcolo per il modello ristretto.

to dall'area del chiaro (L1,L2,L3).

SIMULAZIONI E BILANCI

La simulazione dello stato modificato ha permesso di prevedere sia le oscillazioni del livello del lago che gli scambi idrici sotterranei fra lago ed aree circostanti. La Fig. 15 mostra l'andamento della variazione del livello del lago: la presenza di tre linee invece di una sola è la conseguenza dell'espedito modellistico relativo alla proprietà 11. La prossimità delle tre linee (massima discrepanza 12 cm) testimonia l'accettabilità dell'espedito adottato.

Le oscillazioni annuali del livello del lago risultano inferiori al mezzo metro.

La Fig. 16a mostra la suddivisione

delle zone per il bilancio.

Dalle simulazioni per il bilancio a zone si è potuto osservare (Fig.16b), come peraltro prevedibile, che la principale voce di uscita estiva è legata all'evaporazione; il lago nel periodo estivo si alimenta con le acque sotterranee della zona 4 ed in minor misura della zona 5, mentre in autunno la situazione si inverte e la ricarica autunnale del lago privilegia la zona 5.

I risultati delle simulazioni si possono così sintetizzare:

1. L'alimentazione del chiaro in periodo estivo avverrà prevalentemente per richiamo di acque sotterranee della falda superficiale provenienti in prevalenza dal sottosuolo dell'area compresa fra il chiaro stesso ed il piede del

monte ad ovest e dalla propaggine meridionale del conoide di deiezione del rio Visona.

2. L'effetto della presenza del lago sul livello della falda superficiale risulterà appena percettibile localmente (alcuni centimetri) ed assente a larga scala.

3. L'alimentazione del chiaro mediante acque superficiali non risulta, a rigore, indispensabile; nelle simulazioni modellistiche non si è previsto ulteriore apporto al chiaro di acqua superficiale al fine di verificarne il comportamento in condizioni di stress limite.

CENNI DEL PROGETTO ESECUTIVO DEL CHIARO

La progettazione esecutiva dell'area umida perenne, ottenuta per locale affioramento della superficie freatica, ha previsto necessariamente l'esecuzione di un'escavazione.

Il reimpiego locale dei materiali di risulta è stato ottimizzato per:

- ricarica geotecnica dei materiali in situ altamente compressibili ai bordi del chiaro con riduzione della permeabilità degli stessi ed ottenimento di un argine "sotterraneo" aperto verso l'area di provenienza delle acque di migliore qualità;

- eliminazione della necessità del loro allontanamento (comportante costi sia finanziari che ambientali rilevanti);

- creazione di un rilevato stratificato con porzione inferiore a composizione prevalentemente limo argillosa e copertura di materiali torbosi che, una volta portati al di sopra del livello di falda ed ossigenati per rimaneggiamento durante lo scavo, andranno a costituire un suolo vegetale naturalmente ricco in nutrienti già pronto per la piantumazione di specie vegetali ar-

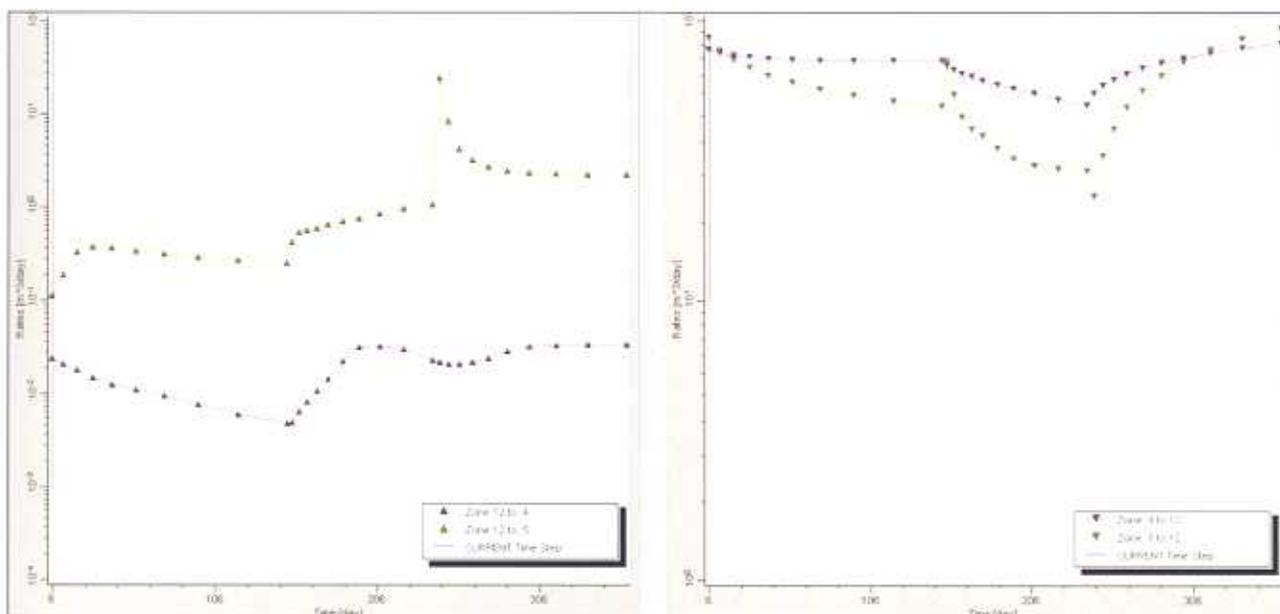


Figura 16b - Diagrammi scambi idrici dell'area lacustre con la falda.





Figura 17 - Progetto del chiaro (Elaborazione Surfer)

boree.

Sia il colmo del rilievo, che circonda su tre lati il chiaro, che le sue sponde verranno piantumate con specie arboree autoctone al fine di circondare l'area umida con una fascia boschiva con funzione multipla: facilitazione della rinaturalizzazione faunistica dell'area di intervento, minimizzazione degli effetti negativi del vento (erosione sponde per moto ondoso, accelerazione dell'evaporazione) sull'area umida, accelerazione della stabilizzazione geotecnica del rilievo stesso.

L'area umida permanente (5 ha, Fig. 17) avrà un massimo di profondità di 3 m dall'attuale pdc con uno spessore minimo della lama d'acqua in periodo di secca non inferiore a 2.3 m

Il rilievo si eleverà al di sopra dell'attuale pdc di circa 1.5-2.0 m ed avrà una larghezza di 20-25 m. Sia il materiale del rilievo che quello su cui lo stesso andrà a poggiare si compatteranno naturalmente in situ nel tempo e l'altezza finale prevista sarà fra 1.5 ed 1 metro al di sopra dell'attuale pdc garantendo il mantenimento in emersione del colmo del rilievo anche nei periodi di sommersione delle aree circostanti.

La forma progettata per il laghetto integra le esigenze sia della particolare tecnologia realizzativa selezionata (impiego di benne a lancio che minimizza l'invasività del cantiere), che dell'opportunità di ottenere morfologie e gradienti topografici di sponda abbastanza vari per favorire l'insediamento del maggior numero di specie sia floristiche che faunistiche.

CONCLUSIONI E RINGRAZIAMENTI

La simulazione numerica preventiva mostra come la creazione per escavazione di un chiaro perenne in un'ex area lacustre con falda freatica prossima alla superficie altera solo localmente ed in maniera molto modesta gli equilibri idrogeologici dell'area. L'effetto maggiore è un incremento dell'ablazione dell'acqua per evaporazione diretta dalla superficie libera.

La realizzazione del chiaro perenne, nei tempi e con le modalità previste dal progetto esecutivo, restituirà una piccola porzione di territorio alla sua naturale vocazione di area umida senza peraltro entrare in conflitto con l'attività di bonifica circostante.

L'applicazione della metodologia sopra descritta come supporto alla progettazione del chiaro ha permesso non solo di ottimizzare al meglio il progetto stesso, ma ha altresì contribuito a migliorare il quadro conoscitivo geologico ed idrogeologico della porzione di interesse dell'ex lago di Bientina; ha inoltre fornito per l'area vasta un modello numerico implementato e calibrato utilizzabile, attraverso minimi ulteriori affinamenti ed aggiornamenti da effettuarsi nel tempo, sia per prevedere le variazioni del chiaro in risposta agli stress esterni, siano essi meteorologici, idrologici, antropici, sia per prevedere l'impatto di nuove eventuali modifiche geomorfologiche.

Nel concludere si ringrazia la Dott. Geol. Brunella Raco per la sua consulenza in idrochimica ambientale, il Dott. Andrea Corti ed il Dott. Raffaello Corsi per la loro consulenza sull'assetto vegetazionale e faunistico dell'area, l'Amministrazione del Comune di Capannori che ha messo a disposizione sia la cartografia geologica (realizzata a supporto dello Strumento Urbanistico comunale) che il relativo dato base del suo territorio, il Consorzio di Bonifica del Bientina che ha collaborato sia fornendo i propri dati bibliografici, storici e tecnici che mettendo a disposizione l'esperienza dei propri tecnici nella ricerca e nella messa a punto di soluzioni progettuali compatibili con la delicata gestione della Bonifica.

Si ringraziano inoltre la Lega Ambiente Valdera per il supporto fornito con l'opera dei volontari che hanno eseguito una non marginale parte dei rilievi idrometrici e l'Amministrazione del Comune di Bientina che, quale committente del progetto, ha approvato e supportato l'impostazione innovativa delle modalità di progettazione di un'area umida ed ha accon-

sentito alla divulgazione dei risultati.

BIBLIOGRAFIA

AMBROSI, M., FAGGIOLI M.T., Malfatti A., Principe C., Rosi M., (1997). METODOLOGIA INNOVATIVA DI CAROTAGGIO MICROSTRATIGRAFICO: ESEMPLO DI APPLICAZIONE ALLA TEFROSTRATIGRAFIA DI PRODOTTI VULCANICI DISTALI. *Geologia Tecnica & Ambientale*, vol. 4/97, 39-50.

CACIAGLI G., 1984. "ILLAGO DI BIENTINA: VICENDE STORICHE ED IDROGEOLOGICHE" ISTITUTO STORICO DELLE PROVINCE D'ITALIA, SEZIONE TOSCANA.

DELLA ROCCA B., MAZZANTI R., PRANZI E., 1987. "STUDIO GEOMORFOLOGICO DELLA PIANURA DI PISA." *Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 10 (1987), 56-84

FEDERICI P. R., MAZZANTI R., 1988. "L'EVOLUZIONE DELLA PALEOGEOGRAFIA E DELLA RETE IDROGRAFICA DEL VALDARNO INFERIORE" *BOLL. SOC. GEOL. IT.* Vol. V (1988), 573-616

HARBAUGH A., 1990. "A COMPUTER PROGRAM FOR CALCULATING SUBREGIONAL WATER BUDGETS USING RESULTS FROM THE U.S. GEOLOGICAL SURVEY MODULAR THREE DIMENSIONAL FINITE-DIFFERENCE GROUND-WATER FLOW MODEL" U.S. GEOLOGICAL SURVEY REPORT

HILL M. C., "PRECONDITIONED CONJUGATE GRADIENT 2 (PCG)", A COMPUTER PROGRAM FOR SOLVING GROUND-WATER FLOW EQUATIONS" U.S. GEOLOGICAL SURVEY WATER-RESOURCES INVESTIGATIONS REPORT 90-4048

HSEH P.A., FRECKLETON J.R., 1993. "DOCUMENTATION OF A COMPUTER PROGRAM TO SIMULATE HORIZONTAL-FLOW BARRIERS USING THE U.S. GEOLOGICAL SURVEY'S MODULAR THREE DIMENSIONAL FINITE-DIFFERENCE GROUND-WATER FLOW MODEL" U.S. GEOLOGICAL SURVEY OPEN-FILE REPORT 92-477

KOHLER, M. A., T.J. NORDENSON, W.E. FOX, 1955. "EVAPORATION FROM PONDS AND LAKES" US WEATHER BUREAU RESEARCH, PAPER 38.

LEAKE S.A., PRUDIC D.E., 1988. "DOCUMENTATION OF A COMPUTER PROGRAM TO SIMULATE AQUIFER-SYSTEM COMPACTION USING THE MODULAR THREE DIMENSIONAL FINITE-DIFFERENCE GROUND-WATER FLOW MODEL" U.S. GEOLOGICAL SURVEY OPEN-FILE REPORT 92-477

MCDONALD M.G., HARBAUGH A.W., ORR B.R., ACKERMAN D.J., "A METHOD OF CONVERTING NO-FLOW CELLS TO VARIABLE-HEAD CELLS FOR THE U.S. GEOLOGICAL SURVEY'S MODULAR FINITE-DIFFERENCE GROUND-WATER FLOW MODEL" U.S. GEOLOGICAL SURVEY OPEN-FILE REPORT 91-536

POLLOCK D.W., 1989. "DOCUMENTATION OF COMPUTER PROGRAMS TO COMPUTE AND DISPLAY PATHLINES USING RESULTS FROM U.S. GEOLOGICAL SURVEY'S MODULAR THREE DIMENSIONAL FINITE-DIFFERENCE GROUND-WATER FLOW MODEL" U.S. GEOLOGICAL SURVEY OPEN-FILE REPORT 89-381

PROVINCIA DI PISA, 1994. "LA PIANURA DI PISA E I RILIEVI CONTERMINI. LA NATURA E LA STORIA" A CURA DI RENZO MOZZANTI, MEM. SOC. GEOL. ITAL., Vol. 50

RAU A., TONGIORGI M., 1974. "GEOLOGIA DEI MONTI PISANI A SUD-EST DELLA VALLE DEL GUAPPERO" MEM. SOC. GEOL. ITAL. Vol. 13, pp. 227-408

TRESCOTT P.C., PETER C., 1975. "DOCUMENTATION OF FINITE-DIFFERENCE MODEL OF THREE DIMENSIONAL GROUND-WATER FLOW" U.S. GEOLOGICAL SURVEY OPEN-FILE REPORT 75-438

TRESCOTT P.C., PETER C.F. E LARSON S.P., 1976. "SUPPLEMENT TO OPEN-FILE REPORT 75-438; DOCUMENTATION OF FINITE-DIFFERENCE MODEL OF THREE DIMENSIONAL GROUND-WATER FLOW" U.S. GEOLOGICAL SURVEY OPEN-FILE REPORT 76-591

TRESCOTT P.C., PETER C.F. E LARSON S.P., 1976. "FINITE-DIFFERENCE MODEL FOR AQUIFER SIMULATION IN TWO DIMENSIONS WITH RESULTS OF NUMERICAL EXPERIMENTS" U.S. GEOLOGICAL SURVEY TECHNIQUES OF WATER-RESOURCES INVESTIGATIONS, BOOK 7, CHAPTER C1

USGS BOOK 6 - MODELLING TECHNIQUES.