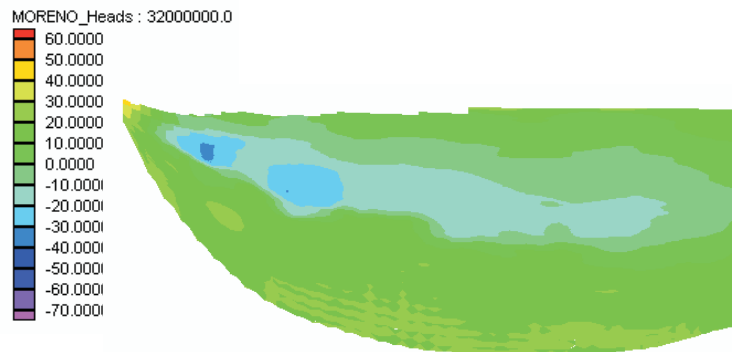
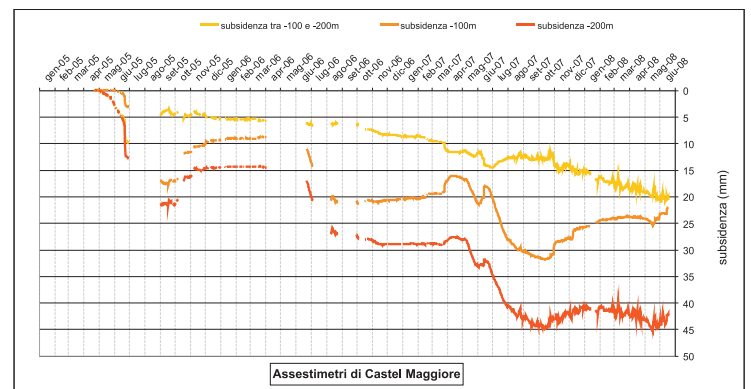


APPROFONDIMENTI SULLA CONOIDE ALLUVIONALE DEL FIUME RENO, AGGIORNAMENTO DELLA MODELLISTICA E VALUTAZIONE DELLE NECESSITA' DI ADEGUAMENTO DELLA STESSA IN BASE A SPECIFICHE ESIGENZE



RELAZIONE



Regione Emilia-Romagna
Assessorato Ambiente e Sviluppo Sostenibile

Servizio Tutela e Risanamento Risorsa Acqua

Dott.ssa Rosanna Bissoli - Responsabile del Servizio Tutela e Risanamento Risorsa Acqua

ARPA

Agenzia Regionale per la Prevenzione e l'Ambiente

Gruppo di Lavoro ARPA Ingegneria Ambientale:

Ing. Andrea Chahoud – Responsabile di progetto

Dott. Flavio Bonsignore

Ing. Daniele Cristofori

Dott. Pierre Clement Damy

Dott.ssa Gisella Ferroni

Dott. Luca Gelati

Ing. Paolo Spezzani

Dott.ssa Barbara Villani

Dott. Giacomo Zaccanti

Collaborazioni:

Servin – Servizi Integrati Gestionali Ambientali

Dott.ssa Elisa Banzola

Dott. Fabrizio Morandi

Dott. Giuseppe Patrizi

Università degli Studi di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali (DICMA)

Prof. Ing. Paolo Macini

Prof. Ing. Ezio Mesini

Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna

Dott.ssa Luciana Bonzi

Dott.ssa Marina Guermandi

Dott. Paolo Severi

Autorità di Bacino del Reno

Dott. Domenico Preti

Si ringraziano per i dati forniti:

Dott. Lucio Botarelli - ARPA Servizio Idrometeorologico

Ing. Paola Cavazzi - Provincia di Bologna

Dott. Adriano Fava - ARPA Sezione Provinciale di Reggio Emilia

Dott. Marco Marcaccio - ARPA Direzione Tecnica

Ing. Mirko Pancaldi - Hera Bologna

Dott. William Praticcioli - ARPA Servizio Idrometeorologico

Dott. Luigi Vicari - ATO 5 Bologna

La grafica di copertina è stata curata da:

Sig.ra Leda Ferrari ARPA Ingegneria Ambientale

SOMMARIO

1. PREMESSA.....	1
2. APPROFONDIMENTI PER UNA MIGLIORE DEFINIZIONE DEI RAPPORTI FALDA FIUME.....	1
2.1 Analisi delle dispersioni nel tratto a valle della Chiusa di Casalecchio.....	2
2.2 Analisi del tratto a monte della Chiusa di Casalecchio.....	7
2.2.1 La derivazione del Canale di Pontecchio	9
2.3 Analisi dei dati dei piezometri in continuo.....	11
2.3.1 Premessa.....	11
2.3.2 La relazione fiume-falda in via Chiarini	12
2.3.3 La relazione fiume-falda nell'area del Tiro a Segno	16
2.3.4 Conclusioni e possibile prosieguo dei lavori.....	21
3. AGGIORNAMENTO DELLA MODELLISTICA	22
3.1 Aggiornamento del modello di flusso delle acque sotterranee	22
3.1.1 Scelta dei passi temporali del modello.....	22
3.1.2 Dati piezometrici.....	23
3.1.3 Prelievi	24
3.1.4 Ricarica zenitale	27
3.1.5 Verifica e validazione del modello di flusso.....	34
3.2 sviluppo ed Aggiornamento del modello di subsidenza	35
3.2.1 Upgrade del modello numerico di subsidenza (flowkonsol).....	35
3.2.2 Aggiornamento del modello di subsidenza	36
4. SIMULAZIONI DI SCENARIO.....	39
5. APPROFONDIMENTI DI CARATTERE GEOTECNICO PER LA COMPrensIONE DELLE DINAMICHE DI SUBSIDENZA.....	45
5.1 Elementi e dati di base a supporto dell'analisi	45
5.1.1 Il contesto geologico ed idrogeologico	45
5.1.2 I Prelievi di acque sotterranee	49
5.1.2.1 Prelievi acquedottistici	49
5.1.2.2 Prelievi industriali ed irrigui	49
5.1.3 La Rete Regionale di Monitoraggio della Subsidenza	52
5.2 Analisi di dettaglio dei dati assestometrici di Castel Maggiore	55
5.2.1 Evoluzione della subsidenza a Castel Maggiore	55
5.2.2 Confronto tra subsidenza e prelievi nel breve periodo.....	58
5.2.3 Confronto tra subsidenza e pluviometria	60
5.2.4 Confronto con i dati satellitari.....	63
5.2.5 Nuovi dati piezometrici e pedologici a supporto dello studio.....	68
5.2.5.1 Installazione di tre piezometri e analisi dei primi dati disponibili.	68
5.2.5.2 Incidenza delle variazioni del contenuto idrico nel suolo sull'andamento della subsidenza rilevata dagli assestimetri	72
5.3 Considerazioni conclusive	74
BIBLIOGRAFIA.....	77

1. PREMESSA

La conoide alluvionale del Fiume Reno è stata negli ultimi anni oggetto di particolare attenzione da parte dei diversi Enti e soggetti interessati alla pianificazione dell'uso della risorsa idrica in una zona strategicamente importante per il territorio bolognese ma con evidenti segnali di squilibrio. Ciò ha portato alla firma di un Protocollo di Intesa tra gli Enti (dicembre 2002) per la realizzazione del progetto denominato "Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la realizzazione di un modello idrogeologico per la gestione sostenibile delle risorse idriche". Le attività del progetto, concluse nel mese di dicembre 2005, hanno portato ad un consistente sviluppo delle conoscenze del sistema idrogeologico oggetto di studio ed ora risultano disponibili i seguenti strumenti:

- 1) modello matematico per la simulazione del flusso delle acque sotterranee della conoide;
- 2) modello matematico per la simulazione della subsidenza della conoide;
- 3) due assestimetri profondi (100 m e 200m) per la misura degli abbassamenti del suolo.

È proprio in rapporto alle possibilità di utilizzo di tali strumenti modellistici ed alle loro specifiche necessità di adeguamento ed aggiornamento, nonché per una maggiore comprensione dei rapporti falda fiume e per la valutazione dei nuovi dati disponibili sugli abbassamenti del suolo, che si inseriscono le attività del presente progetto la cui articolazione è diretta conseguenza dell'esperienza maturata nell'ambito dello studio precedentemente concluso.

L'organizzazione delle attività all'interno del presente progetto è così articolata:

- 1) approfondimenti per una migliore definizione dei rapporti falda fiume;
- 2) aggiornamento della modellistica;
- 3) simulazioni di scenario;
- 4) approfondimenti di carattere geotecnico per la comprensione delle dinamiche di subsidenza,

ed i contenuti della presente relazione ne rappresentano la sintesi finale delle attività svolte.

2. APPROFONDIMENTI PER UNA MIGLIORE DEFINIZIONE DEI RAPPORTI FALDA FIUME

La presente attività è dedicata ad alcuni sintetici approfondimenti opportuni al fine di una migliore comprensione dei meccanismi di ricarica fluviale all'interno della conoide alluvionale del Fiume Reno.

Le prove di portata effettuate all'interno Progetto citato in premessa ([1], Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna, Autorità di Bacino del Reno (2005). *Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la realizzazione di un modello idrogeologico per la gestione sostenibile delle risorse idriche*. Rapporto tecnico) hanno evidenziato, per un regime di portate del fiume inferiori ai 2 m³/s, come trascurabile il contributo della ricarica fluviale nei confronti della conoide del Fiume Reno. Per verificare ed approfondire tale circostanza è stato effettuato un sopralluogo da Casalecchio verso valle, nel periodo tardo-primaverile estivo, in un particolare momento scelto in rapporto agli andamenti pluviometrici e comunque in regime di spiccata magra del fiume (paragrafo 2.1).

Inoltre al fine di valutare un eventuale contributo alla alimentazione da parte della porzione più apicale della conoide, a monte della Chiusa di Casalecchio, diretta verso le alluvioni laterali (con spessori dell'ordine della decina di metri) è stato anche in questo caso effettuato un sopralluogo e le relative attività svolte sono descritte nel paragrafo 2.2.

Infine viene riportata una sintesi delle analisi condotte dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna a supporto del presente studio e riguardanti le possibili

interazioni falda/fiume deducibili dai dati piezometrici rilevati in continuo in piezometri vicino all'alveo (paragrafo 2.3).

2.1 ANALISI DELLE DISPERSIONI NEL TRATTO A VALLE DELLA CHIUSA DI CASALECCHIO

Per valutare lo stato del fiume dal punto di vista delle infiltrazioni idriche dall'alveo verso le falde sottostanti, si è condotto un sopralluogo dalla Chiusa di Casalecchio, dove è posta la derivazione del Canale di Reno, fino all'attraversamento della linea ferroviaria Bologna-Milano. L'indagine è stata condotta il 5/7/07, percorrendo a piedi i circa 5.5 km del tratto, in parte rimanendo in alveo, dove lenti di ghiaia laterali non fittamente vegetate o la presenza di acqua corrente e quindi molto bassa lo consentivano, in parte muovendosi all'esterno, sulle sponde, dove la fitta vegetazione circostante e l'acqua "stagnante" non consentivano il passaggio entro il letto fluviale.

Alla Chiusa di Casalecchio, sulla base di informazioni fornite da un tecnico del *Consorzio della Chiusa di Casalecchio e del Canale di Reno*, la portata addotta dal Canale risultava di circa 1.4 m³/s, quella sfiorante sulla traversa era nulla, il rilascio al primo scarico del Canale, appena sotto la traversa, connesso al DMV era indicato in circa 0.4 m³/s. Un secondo scarico poco a valle determinava un esiguo rilascio, dell'ordine di 15-30 l/s. Sull'intero percorso non si sono rilevati altri apporti attivi (sono infatti presenti un ulteriore scaricatore del Canale, in destra, nonché alcune fosse e parecchi scaricatori, tutti con apporti legati essenzialmente ad eventi pluviometrici).

Il tratto indagato presenta una serie di briglie, in particolare nella parte di monte, dove da valle della Chiusa alla Croce di Casalecchio ve ne sono ben 4. Ve ne è quindi una immediatamente a valle dei 3 ponti della linea ferroviaria (quello storico centrale più i 2 recenti laterali); vi è inoltre una soglia sotto il ponte della Via Emilia. Tali manufatti contribuiscono a ridurre le già contenute pendenze del tratto, originando una situazione con lunghi "segmenti" di acqua stagnante, caratterizzati dall'intera sezione non vegetata del letto coperta di acqua (per 30-40 m di ampiezza), con spessori della stessa da poche decine di cm a tiranti dell'ordine del metro e quindi con velocità di flusso irrisorie.





Gli unici tratti nei quali vi sono dei raschi, cioè dove l'acqua è bassa e scorre velocemente in quanto le pendenze longitudinali sono più rilevanti e quindi risultano caratterizzati da acqua "corrente", si individuano appena a valle del ponte sulla Porrettana, dalla tangenziale verso valle, per circa 800 m e per un tratto di circa 500 m a monte e a valle del ponte su via Togliatti.

La prima porzione percorsa, fino all'altezza dello stadio Nobile, presenta diffusi affioramenti rocciosi e quindi il fondo risulta sicuramente impermeabile. Da qui in poi, considerando le planimetrie e le sezioni elaborate dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione, dovrebbe aprirsi l'ampia conoide del Fiume Reno e quindi si dovrebbero evidenziare cospicue infiltrazioni verso le falde, dell'ordine almeno della intera portata fluente (0.4 m³/s) e forse anche parecchio di più.

La Figura 2.1 e la successiva Figura 2.2 propongono alcune delle situazioni riscontrate nel tratto d'alveo.

Analizzando visivamente i ridotti deflussi presenti in alveo nei diversi tratti, dove sono presenti i raschi o in corrispondenza delle briglie, si può affermare che per tutto il percorso indagato la portata si mantiene pressoché costante, con una possibile riduzione massima non superiore ad 1/4 del quantitativo rilasciato alla Chiusa, quindi pressoché trascurabile rispetto a quanto si dovrebbe teoricamente infiltrare. Già la serie di misure dirette su alcune sezioni successive, condotte nel 2005 nell'ambito del progetto richiamato precedentemente in premessa, in condizioni di esigui deflussi, avevano indicato portate superficiali pressoché costanti e quindi l'apparente mancanza di infiltrazioni.

Figura 2.1: foto relative alle condizioni dell'alveo nel tratto del F. Reno dalla Chiusa di Casalecchio ai 3 ponti FS

	
<p>1) Chiusa di Casalecchio e rilascio del DMV</p>	<p>2) Affioramenti rocciosi presso ponte pedonale all'altezza dello stadio Nobile</p>
	
<p>3) Alveo in vista a valle del ponte sull'asse attrezzato</p>	<p>4) Tratto fluviale "stagnante" a monte dell'impianto di baseball</p>

A valle dello stadio Nobile, nei tratti con raschi e quindi di acqua corrente, il substrato è essenzialmente ghiaioso, con presenza di ciottoli di dimensioni entro la decina di cm e tale appare anche il fondo delle lunghe "pozze" presenti, nelle zone dove lo spessore dell'acqua è ridotto e quindi il materiale d'alveo risulta visibile. Si evidenzia che, in relazione alla forte presenza di solidi sospesi connessi in parte a fenomeni di inquinamento, la visibilità entro l'acqua è non superiore ai 20-30 cm e il fondo delle lunghe pozze è coperto da uno spessore variabile da alcuni mm ad 1-2 cm di depositi fangosi.

Ci si è quindi chiesto per quale motivo non vi è infiltrazione, almeno nelle condizioni di deflusso caratterizzate da portate ridotte. L'unica risposta che si è trovata è la seguente:

- i manufatti trasversali esistenti, le basse pendenze e la non rilevante ampiezza laterale dell'alveo non producono, anche in presenza di elevate portate/piene, rilevanti sommovimenti (erosioni e depositi) del fondo ghiaioso dell'alveo;
- tale mancata movimentazione, che invece è ricorrente nei tratti apicali di conoide della maggior parte dei corsi d'acqua regionali, non permette il "lavaggio" delle ghiaie e la venuta a giorno di strati permeabili;

- l'impermeabilità delle ghiaie superficiali è attribuibile alle particelle fini del suolo (limi e argille), a quelle da apporti inquinanti e ai fenomeni colloidali (assorbimento e adsorbimento) presenti nelle acque, che hanno prodotto, con il tempo, un "intasamento" degli strati più superficiali.

Una verifica di tale valutazione potrebbe essere condotta prelevando alcune carote superficiali (di 1-2 m di profondità) entro l'alveo bagnato e misurando il grado di permeabilità dei diversi spessori verticali.

Figura 2.2: foto relative alle condizioni dell'alveo nel tratto del F. Reno dalla Chiusa di Casalecchio ai 3 ponti FS, segue

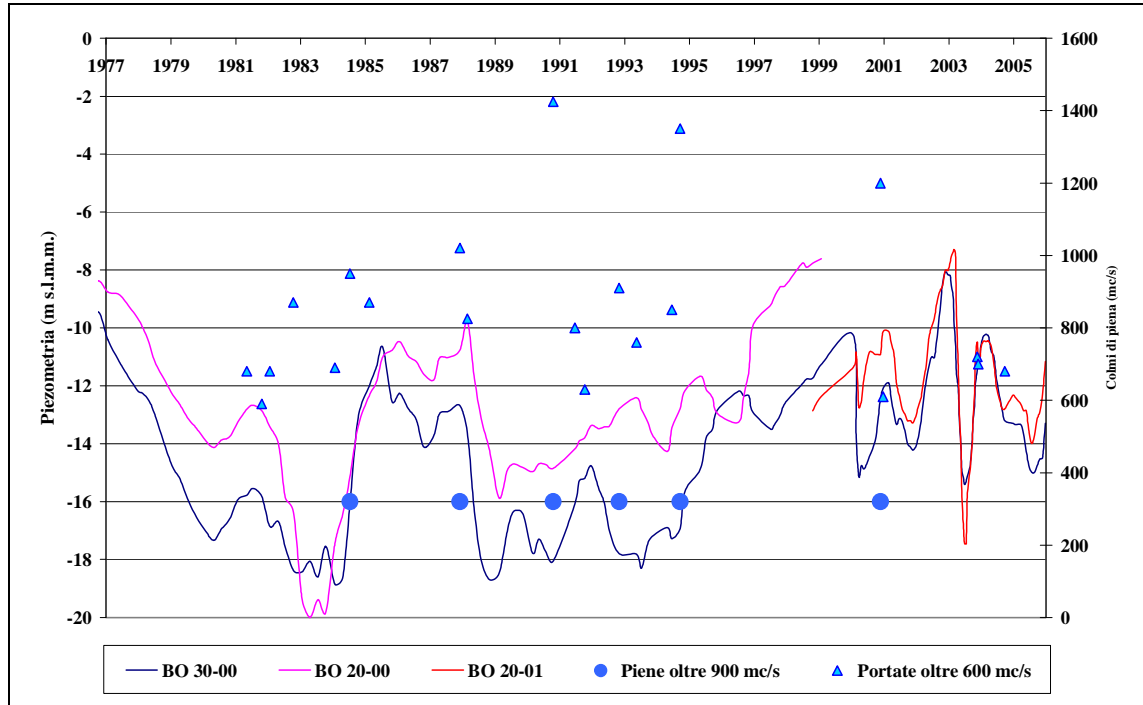
	
<p>5) Tratto fluviale "stagnante" a valle dell'impianto di baseball</p>	<p>6) Alveo con acqua corrente a monte del ponte su via Togliatti</p>
	
<p>7) Tratto fluviale "stagnante" a valle del ponte su via Togliatti</p>	<p>8) Flusso idrico sopra la briglia a valle dei 3 ponti della linea FS</p>

In relazione alla attuale conformazione dell'alveo, sul quale per buona parte del tratto (almeno il 70%) l'intera sezione incisa si presenta già bagnata per ridotti deflussi, in presenza di portate di media-morbida, l'area interessata dall'acqua si valuta superiore ma non di molto. Si ritiene quindi che anche in tale condizione le infiltrazioni si mantengano limitate.

Diversa potrebbe essere la situazione di infiltrazione in corrispondenza di episodi di piena o comunque di elevato deflusso, nel corso dei quali l'acqua va ad interessare zone vegetate circostanti dell'alveo e strati ghiaiosi visibili sulle sponde erose. Tali circostanze si verificano

però un numero limitato di giorni nel corso dell'anno medio (non più di 10-12) e quindi possono avere contenuti effetti.

Figura 2.3: relazione tra andamento della piezometrica (media mobile) ed eventi gravosi di piena sul Reno relativamente a pozzi profondi



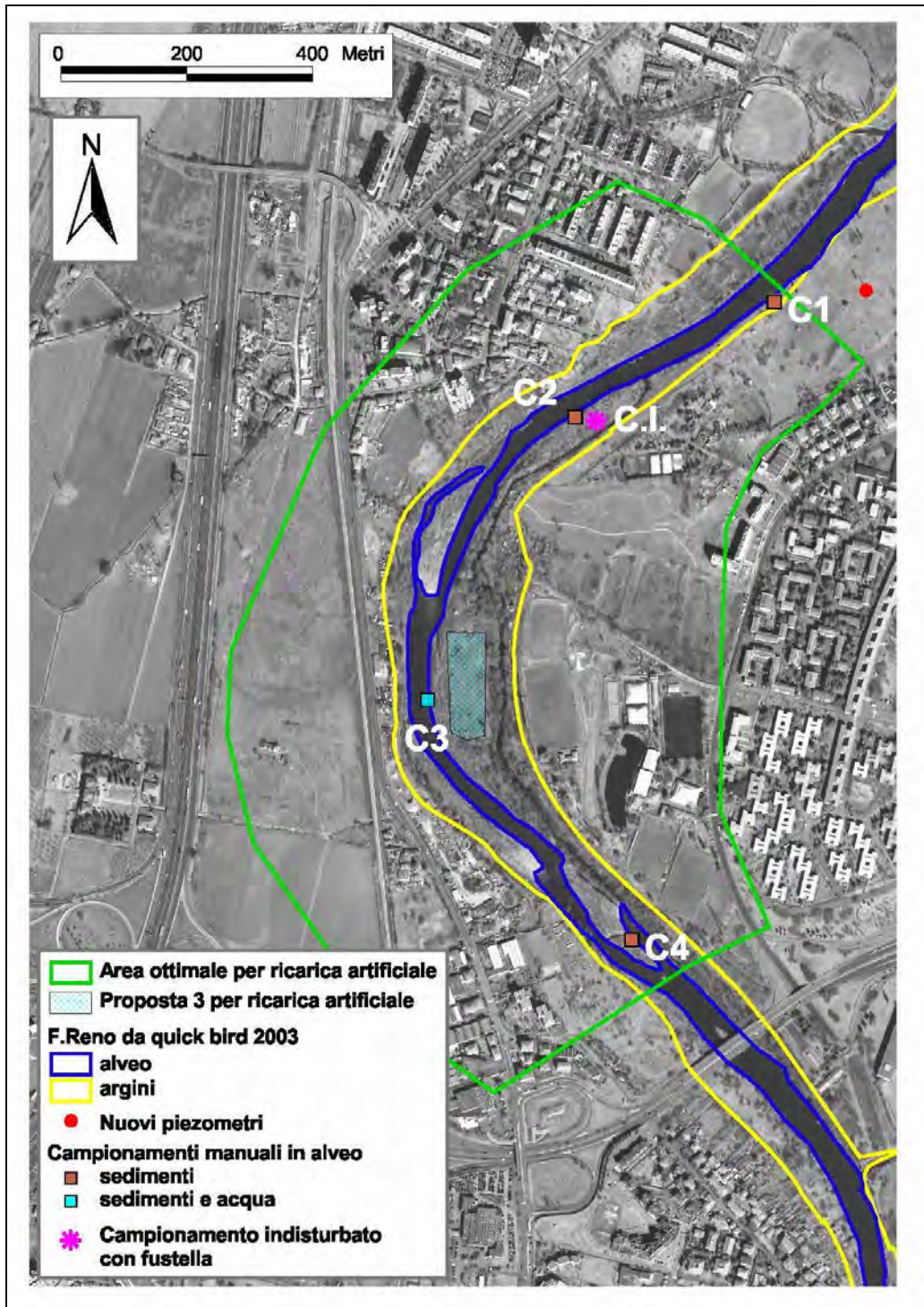
In presenza di piene rilevanti si potrebbe pensare che l'alveo subisca comunque dei sommovimenti ("lavaggi"), tali da accrescere temporaneamente la permeabilità per mesi o anche anni. Per valutare tale possibilità si sono confrontati:

- gli andamenti a media mobile delle piezometrie 1976-2006 per due pozzi della Rete Regionale di Monitoraggio, il BO 20-00 (e per gli ultimi anni il BO 20-01) e il BO 30-00, ricordando però che si tratta di pozzi profondi rispettivamente 130 e 330 m, posizionati grosso modo all'altezza della linea FS;
- gli eventi di piena sul Reno a Casalecchio del periodo 1980-2005, tratti da documentazione disponibile sul sito dell'Autorità di Bacino del Reno, in particolare quelli con portata superiore ai 600 m³/s e fra di essi separando i 6 oltre i 900 m³/s (3 vanno anche oltre i 1200 m³/s).

Si perviene a quanto evidenziato in Figura 2.3. Da essa non si ritiene di poterne desumere andamenti quali quelli ipotizzati, cioè tendenze ricorrenti all'aumento dell'infiltrazione e quindi alla risalita piezometrica per esempio nell'anno o nei due anni successivi agli eventi di piena eccezionali. Sarebbe quindi opportuno analizzare tale circostanza su pozzi più superficiali e se possibile anche posti più a monte (si veda in tal proposito il successivo paragrafo 2.3).

In relazione al possibile intasamento, operato da sedimenti più fini, delle ghiaie superficiali del letto del fiume risulta utile richiamare in questa sede l'attività di campionamento ed analisi condotta in [4] (Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2008). *Studio sulla ricarica artificiale delle falde in Emilia-Romagna*. Rapporto tecnico.) nell'ambito di un recente studio sulle possibilità di realizzazione di interventi di ricarica artificiale delle falde nel contesto del territorio emiliano-romagnolo.

Figura 2.4: ubicazione dei campionamenti dei sedimenti in alveo e del sondaggio geognostico da ([4], Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2008). *Studio sulla ricarica artificiale delle falde in Emilia-Romagna. Rapporto tecnico.*).



Prendendo in esame il tratto del fiume in posizione ottimale per la ricarica della falda sono stati prelevati n.4 campioni di terreno rimaneggiato superficiale e n.1 campione indisturbato tra 0.00 e 0.60 metri di profondità. (Figura 2.4). I primi 4 campioni rimaneggiati sono stati sottoposti ad analisi granulometrica completa, mediante setacciatura e sedimentazione (norma CNR-UNI 23

– ASTM D422). Sul campione indisturbato è stata eseguita, oltre all'analisi granulometrica completa, anche una prova di permeabilità a carico variabile (norma ASTM D2434-68). I risultati ottenuti dalle prove di laboratorio condotte sui campioni prelevati per la composizione granulometrica sono riportati in maniera sintetica nella tabella di seguito riportata (Tabella 2.1).

Tabella 2.1: risultati delle analisi granulometriche

Campione	Denominazione - A.G.I. ¹	Composizione granulometrica in % (A.G.I.)				Coefficiente di permeabilità k (cm/sec)
		G	S	L	A	
C1	sabbia con limo	2.03	50.98	44.02	2.98	n.d.
C2	sabbia deb. limosa	1.99	82.55	14.44	1.01	n.d.
C3	sabbia ghiaiosa limosa	16.83	66.59	15.48	1.10	n.d.
C4	limo e sabbia ghiaiosa	22.92	37.62	37.95	1.51	n.d.
CI-1	sabbia limosa	0.96	66.59	29.25	3.20	1.413E-03

G=ghiaia; S=sabbia; L=limo; A=argilla

L'analisi di Tabella 2.1 evidenzia che i sedimenti campionati risultano essere costituiti da una miscela di prevalenti sabbie e limi con subordinate ghiaie e argille; quest'ultima frazione granulometrica, in particolare, si presenta sempre con percentuali molto basse, comprese tra il 3.2% e l'1.0%. Anche la frazione ghiaiosa è generalmente bassa se si considera che nei campioni C3 e C4 i valori percentuali più alti, rispettivamente 16.8% e 22.9%, sono imputabili, per lo più, alla presenza di pochi ciottoli ma relativamente pesanti. Tra le due frazioni più rappresentate si rileva una certa predominanza della componente sabbiosa che, ad esclusione del campione C4, presenta percentuali sempre superiori al 50%.

La caratterizzazione granulometrica prevalente condiziona il grado di permeabilità dei sedimenti. In tal senso, nell'unico campione testato (CI-1) il valore del coefficiente di permeabilità (k) è risultato pari a $1.413 \cdot 10^{-3}$ cm/sec; tale valore si accorda pienamente con quelli medi indicati in letteratura, che per le sabbie da fini a molto fini e per i limi risultano mediamente compresi tra 10^{-2} e 10^{-4} cm/sec.

Tenendo conto solamente delle risultanze emerse dalle analisi granulometriche condotte, il valore ottenuto, indicante un grado di permeabilità da medio-basso a basso (terreno semi-permeabile), potrebbe essere considerato abbastanza rappresentativo dei sedimenti fini e medio-fini presenti superficialmente. In realtà, l'effettiva rappresentatività del dato acquisito rispetto al reale assetto litologico-tessiturale e, conseguentemente al grado di permeabilità, presente lungo il tratto di alveo oggetto di studio, è da considerare molto più bassa; ciò in relazione al carattere puntuale dei campionamenti ed alla modalità "selettiva" adottata per il prelievo dei terreni.





2.2 ANALISI DEL TRATTO A MONTE DELLA CHIUSA DI CASALECCHIO

Relativamente al sopralluogo condotto sul tratto di monte, da Pontecchio Marconi alla Chiusa, di circa 7 km, per effetto dei manufatti trasversali esistenti a Palazzo dei Rossi, di fronte alle ex-cave/ laghi del Maglio e alla Chiusa, le pendenze dell'alveo sono anche qui contenute. Tale elemento, accompagnato da un trasporto solido di fondo molto limitato in corrispondenza delle

¹ La convenzione proposta dall'A.G.I. (Associazione Geotecnica Italiana) consiglia di far precedere dalla preposizione *con*, la denominazione della frazione secondaria se compresa tra il 50% e il 25%, di farla seguire dal prefisso *oso*, se fra il 25% e il 15%, e designare *debolmente oso*, se fra il 15% e il 5%.

piene determina, come a valle, una situazione nella quale l'acqua occupa solitamente un'ampia sezione, con "pozze" anche longitudinalmente molto estese, separate da contenuti raschi (zone con maggiore pendenza e quindi maggiore velocità della corrente, pertanto con tiranti e sezione bagnata ridotti).

Figura 2.5: foto relative alle condizioni dell'alveo nel tratto del F. Reno da Pontecchio Marconi alla Chiusa di Casalecchio

	
<p>1) Affioramenti rocciosi in alveo a valle della Traversa di Palazzo dei Rossi</p>	<p>2) Presa del Canale di Pontecchio a Palazzo dei Rossi</p>
	
<p>3) Alveo del Reno a monte della briglia prospiciente le ex-cave/laghi del Maglio</p>	<p>4) Briglia prospiciente le ex-cave/laghi del Maglio</p>

Nelle pozze la profondità media si valuta solitamente un po' più contenuta che a valle, con valori dell'ordine dei 30-50 cm (in condizioni di forte magra del fiume) e con una velocità esigua della corrente. Soltanto il tratto di circa 1 km a valle della traversa di Palazzo dei Rossi evidenzia pendenze maggiori entro l'alveo, con acqua corrente.





Con deflussi bassi a Palazzo dei Rossi la portata viene totalmente derivata dal Canale di Pontecchio, scaricando in alveo approssimativamente 1/3 del DMV a valle della traversa di presa. La restituzione del Canale avviene a monte dell'area di servizio autostradale Cantagallo. La Figura 2.5 e la successiva Figura 2.6 propongono alcune immagini della presenza idrica sul tratto.

Sono note con buona approssimazione le portate in transito alla Chiusa di Casalecchio in caso di deflussi ridotti, attraverso le misure del quantitativo derivato e del DMV scaricato, grazie a

recenti tarature delle scale di deflusso sui relativi manufatti, condotte dall’Autorità di Bacino del Reno.

L’effettuazione di qualche misura diretta alla presa del Canale di Pontecchio o anche in alveo a monte dello stesso potrebbero consentire di valutare l’eventuale presenza di significativi dreni sul tratto verso falde superficiali laterali, essendo ritenuto non presente un dreno verticale diretto, per effetto del substrato compatto esistente, visibile in più punti.

Figura 2.6: foto relative alle condizioni dell’alveo nel tratto del F. Reno da Pontecchio Marconi alla Chiusa di Casalecchio, segue

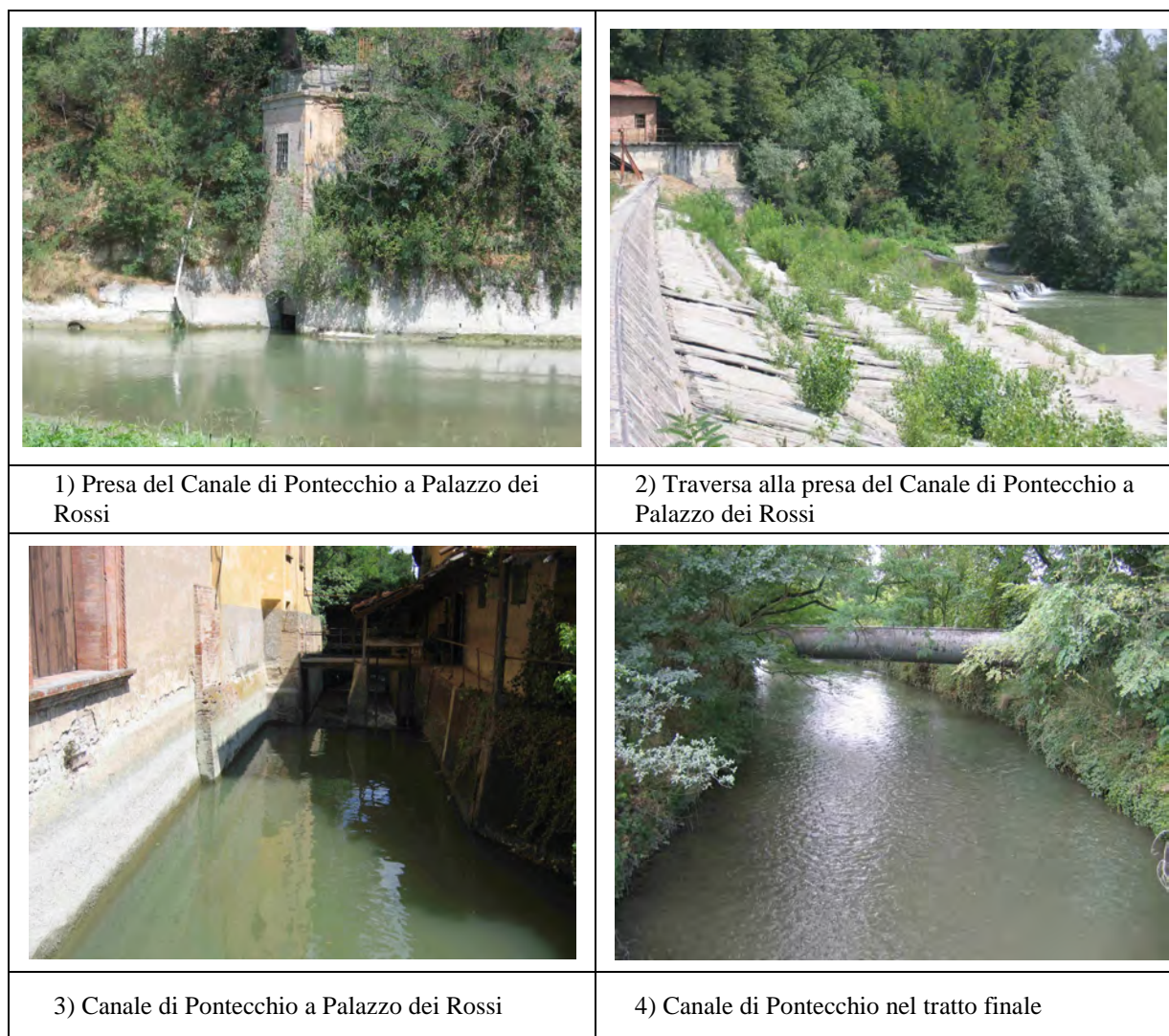
	
<p>5) Alveo del Reno nel tratto prospiciente le excavelaghi del Maglio - raschio</p>	<p>6) Alveo del Reno a valle della restituzione del Canale di Pontecchio</p>
	
<p>7) Alveo del Reno tra la Chiusa di Casalecchio e l’area di servizio autostradale Cantagallo</p>	<p>8) Alveo del Reno a monte della Chiusa di Casalecchio</p>

2.2.1 La derivazione del Canale di Pontecchio

Sul Fiume Reno in comune di Sasso Marconi, appena a monte di Palazzo dei Rossi, è presente una grossa derivazione ad uso idroelettrico e industriale assentita alla Cartiera del Maglio con sede a Borgonovo di Pontecchio Marconi (BO) – Via Cartiera, 64. Il prelievo concesso è di 12.66 m³/s come valore massimo e di 8.56 m³/s come portata media e si avvale di una grossa traversa entro l’alveo del Fiume Reno (Figura 2.7). Il Canale adduttore denominato di “Pontecchio” ha complessivamente una lunghezza di circa 4.4 km, una larghezza attorno agli 8-9 m, sottopassa l’area della Cartiera e si reimmette in Reno circa 600 m a monte dell’area di

servizio autostradale (sulla A1) di Cantagallo. L'immissione in Reno avviene circa 2.5 km a monte della traversa di Casalecchio, sulla quale è posta la derivazione del Canale di Reno. Il prelievo dal Reno del Canale di Pontecchio è posizionato ad una quota tale per cui, in presenza di deflussi contenuti, gli stessi sono interamente derivati. Una parte dell'acqua viene attualmente, solitamente, restituita per esigenze ambientali (DMV). A Palazzo dei Rossi una piccola parte del flusso è deviata su una condotta laterale, interagendo con la fognatura del Borgo, quindi la stessa viene restituita al canale principale.

Figura 2.7: foto relative alla derivazione del Canale di Pontecchio



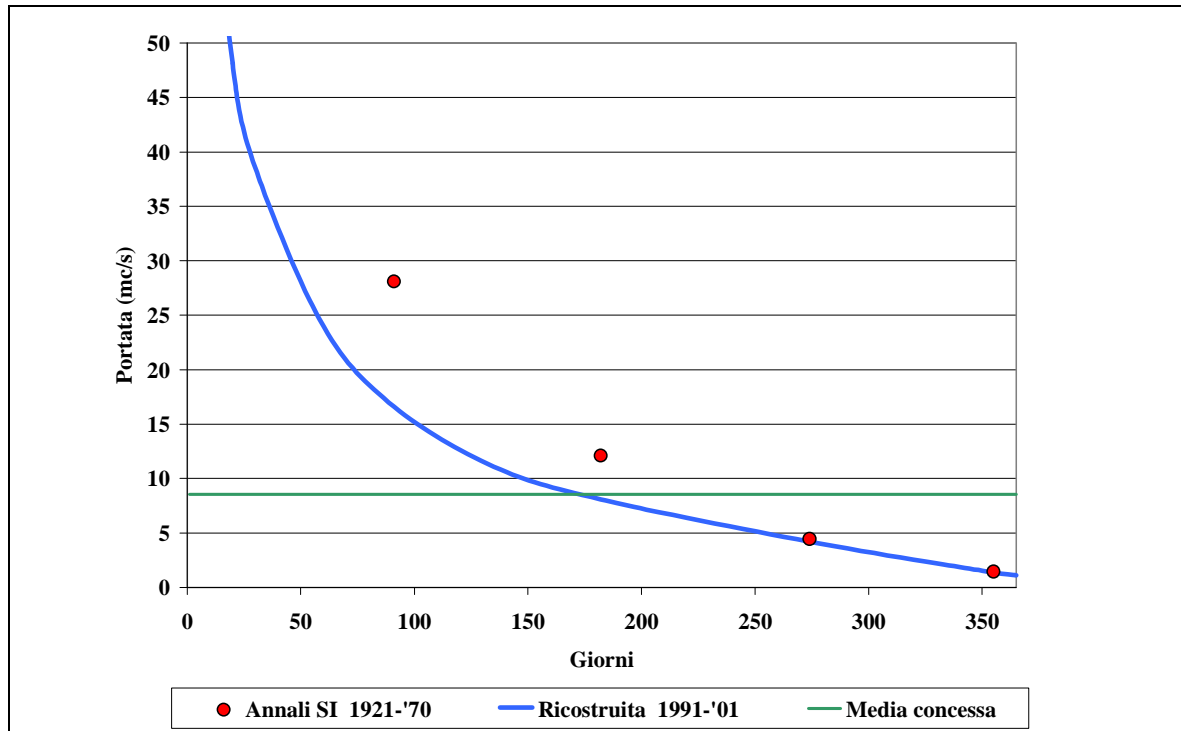
Considerando la curva di durata delle portate del Reno a Casalecchio e facendo riferimento a quella storica tratta dagli Annali del Servizio Idrografico per il periodo 1921-'70 ma soprattutto a quella del periodo più recente 1991-'01, ricostruita nell'ambito delle Attività Conoscitive relative al Piano di Tutela delle Acque regionale, si osserva che la portata media concessa alla Cartiera è superiore ai deflussi in alveo per almeno la metà dell'anno, cioè quasi sempre nel periodo estivo; si veda a tale proposito la Figura 2.8. Al riguardo, considerando le portate misurate giugno-settembre del periodo 2003-2006 a Casalecchio da ARPA SIM, si evidenzia che non più del 3.5% dei valori giornalieri eccedono il valore medio di concessione.

Si può quindi affermare che la quasi totalità delle portate estive (salvo attualmente 1/3 del DMV) transitano per il Canale di Pontecchio.

Da un colloquio telefonico con un tecnico della Cartiera del Maglio è emerso che non è presente alcun tipo di misurazione della portata prelevata.

La traversa nella sezione di prelievo è impostata su fondo roccioso compatto, che l'erosione sul tratto di valle ha portato a vista. I flussi di trafileamento osservati a valle della traversa risultano esigui.

Figura 2.8: curve di durata del Reno a Casalecchio e confronto con la portata media concessa alla Cartiera del Maglio



2.3 ANALISI DEI DATI DEI PIEZOMETRI IN CONTINUO

2.3.1 Premessa

Uno degli aspetti più importanti e ancor oggi meno chiari emersi nell'ambito dello studio recentemente realizzato sulla conoide del Fiume Reno ([2], "Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la realizzazione di un modello idrogeologico per la gestione sostenibile delle risorse idriche", Regione Emilia Romagna, la Provincia di Bologna, il Comune di Bologna, l'Autorità di Bacino del Reno ed HERA s.p.a., 2007), è la relazione che intercorre tra le acque del fiume e le acque sotterranee presenti negli acquiferi ad esso collegati. Per approfondire questa tematica il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli ha coordinato, in accordo con l'Autorità di Bacino del Reno ed Arpa IA, una attività di monitoraggio dell'andamento delle oscillazioni piezometriche in alcuni punti collocati lungo l'asta del Reno a breve distanza dall'alveo e di confrontarlo, ove possibile, con il livello idrometrico del fiume. Avendo a disposizione per il Reno il livello idrometrico rilevato nella stazione del "Tiro a Volo" con cadenza oraria, si è deciso di procedere anche per gli acquiferi in esame con un monitoraggio in

continuo. Questo sistema di misura consente di acquisire dati e memorizzarli per periodi di tempo anche molto lunghi e ad intervalli programmati, così da ottenere una sorta di monitoraggio in tempo reale che permette valutazioni molto dettagliate dell'andamento di un certo parametro (il livello piezometrico, in questo caso) e di porlo efficacemente a confronto con altri parametri misurati con la medesima cadenza (ad esempio il livello idrometrico). Nella Figura 2.9 sono rappresentate le due aree scelte per approfondire lo studio sulle relazioni fiume-falda, entrambe ubicate in Comune di Bologna.

Figura 2.9: ubicazione delle zone di approfondimento



L'area più a Sud si colloca nella zona demaniale a cui si accede dalla via Chiarini, quella più a Nord si trova invece in corrispondenza del campo pozzi HERA del "Tiro a Segno", nelle immediate vicinanze della ferrovia, subito a valle della briglia sul Reno.

2.3.2 La relazione fiume-falda in via Chiarini

Nell'area di studio posta in via Chiarini, sono presenti due piezometri nei quali, per il monitoraggio in questione, sono state installate, a carico del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli (d'ora in avanti SGSS), delle centraline che misurano il livello dell'acqua con cadenza oraria. Nella Figura 2.10 è riportata con maggiore dettaglio l'ubicazione dei due punti di misura: il primo piezometro, indicato con un punto rosso, è stato messo a disposizione dal Comune di Bologna, è profondo circa 70 m e si trova a circa 200 m dalla sponda destra del fiume (di qui in

avanti chiamato “Comune BO”); il secondo, indicato con un punto verde, profondo 66 m e distante circa 115 m dal fiume, è stato invece perforato appositamente (a carico del SGSS). In data 14 giugno 2008, è stato inoltre installato, sempre a carico del SGSS, un ulteriore piezometro profondo 65 metri, distante solo cinque metri dal fiume (punto giallo, SGSS2). Al momento per questo punto non disponibili misure, ma a breve sarà anch’esso dotato di una sonda per la misura oraria del livello.

Figura 2.10 Ubicazione dei piezometri di via Chiarini



Proiettando i primi due piezometri realizzati su una sezione geologica longitudinale passante per l’area di studio (Figura 2.11), è possibile vedere che i punti di misura sono ubicati nella zona di amalgamazione pressoché totale della conoide del fiume Reno, in cui le ghiaie dei diversi gruppi acquiferi costituiscono praticamente un acquifero monostrato molto spesso e sostanzialmente freatico. Questa è la zona di massima ricarica dell’intera conoide del Reno, dove si infiltrano le acque meteoriche e dove dovrebbero avvenire i maggiori scambi idrici tra fiume e falda.

I due punti azzurri sulla sezione, rappresentano la soggiacenza mediamente rilevata nel periodo del monitoraggio: circa 59 m nel piezometro “Comune BO” e circa 57 m nel “SGSS”. Lo spessore del terreno insaturo è quindi molto rilevante ed è maggiore rispetto alle aspettative precedenti questo lavoro, soprattutto per quel che concerne il piezometro più vicino al Reno. La sezione geologica mostra inoltre che sia l’acquifero A1 che e l’acquifero A2 (che in questo settore della conoide, come detto sono amalgamati), sono totalmente asciutti. Evidenze di prosciugamento dell’acquifero A1 in questa zona erano già state ben evidenziate dal Comune di Bologna nel 2001 (Figura 2.12).

Figura 2.11: Particolare della sezione longitudinale passante per via Chiarini

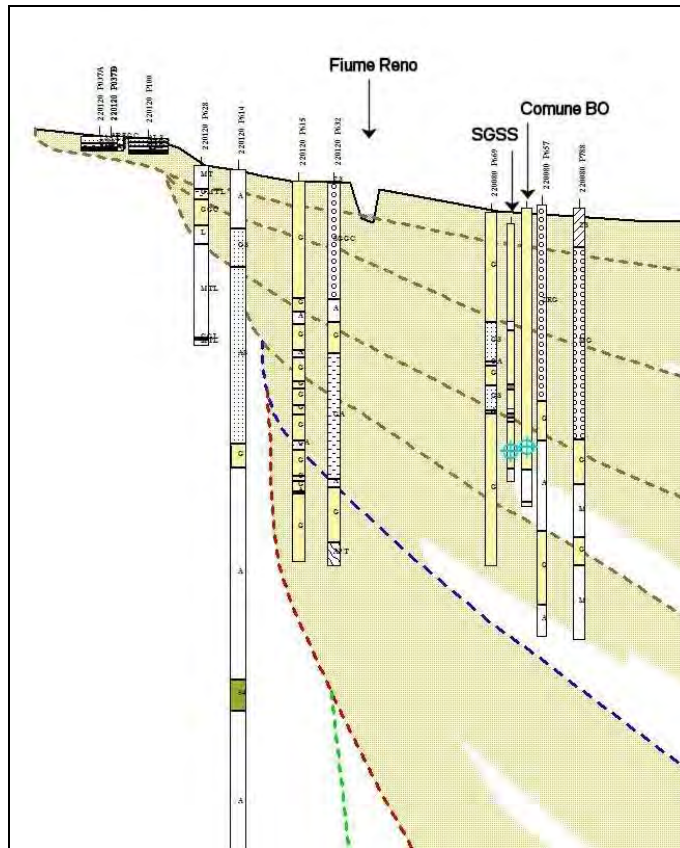
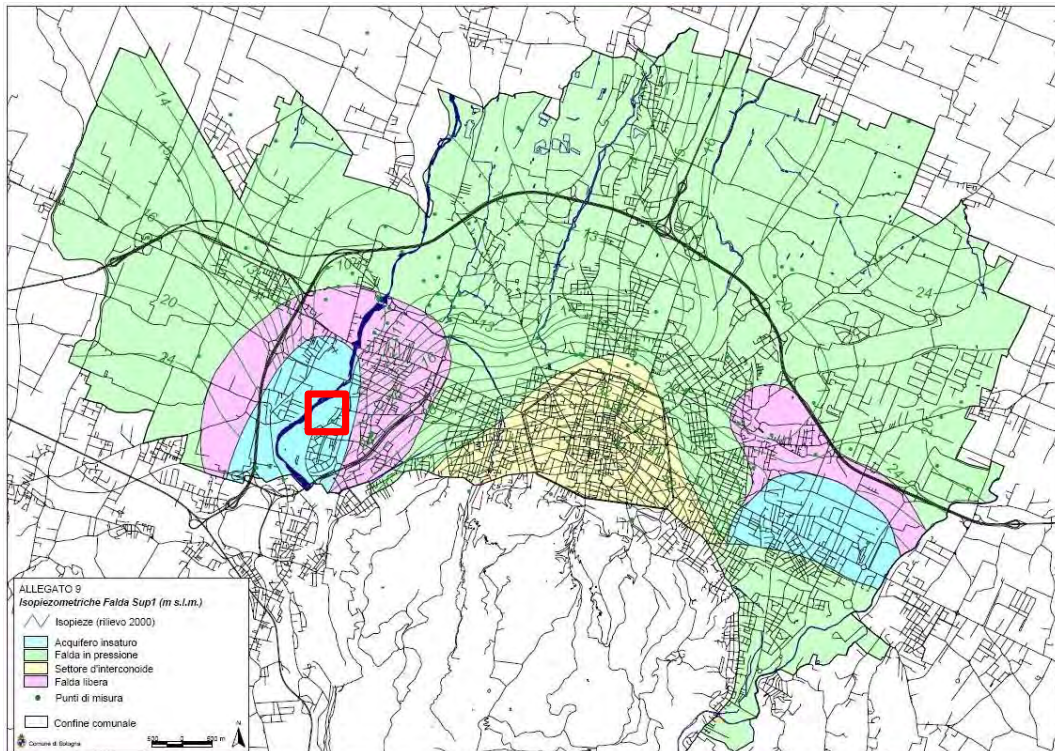


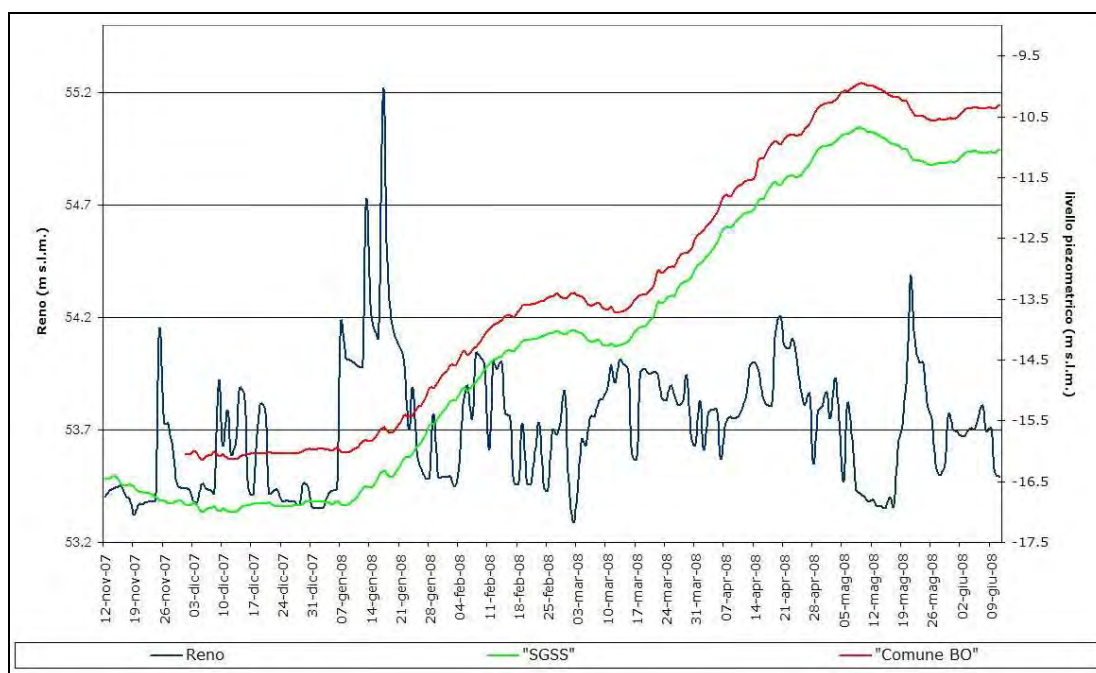
Figura 2.12 Piezometria della Falda Sup1 (corrispondente all'acquifero A1) rilevata dal Comune di Bologna (2001). Il riquadro rosso evidenzia l'area in esame



In pianta, come visto, i due punti sono stati disposti in modo da creare un transetto con il fiume, così da verificare la direzione di flusso della falda e le eventuali relazioni di scambio idrico tra il Reno ed il suo acquifero. Per fare questo confronto nel modo più preciso possibile, si è provveduto ad una quotatura di precisione del piano campagna in corrispondenza dei due piezometri. Il rilievo è stato effettuato direttamente dai tecnici del SGSS con un ricevitore GPS Trimble R6 doppia frequenza e tecnica NRTK (VRS). Le coordinate planimetriche UTM-ED50 e le quote assolute in metri s.l.m. (altezze ortometriche geoidiche) sono state calcolate con l'applicazione "ConvER3", prodotta dalla RER, che per la parte altimetrica utilizza il modello di geoida nazionale ITALGEO pubblicato dall'IGM (grigliati gr1). La quotatura si è rivelata di cruciale importanza per riportare i valori di soggiacenza in quote assolute e ricavare, dal confronto delle oscillazioni piezometriche, la corretta direzione delle linee di flusso.

Il grafico di Figura 2.13 mostra il confronto tra i livelli piezometrici rilevati nei due piezometri di via Chiarini ed il livello idrometrico del Reno nella stazione del Tiro a Volo, nel periodo compreso tra il 12 Novembre 2007 e l'11 Giugno 2008.

Figura 2.13 Confronto tra i livelli piezometrici nei piezometri di via Chiarini ed il livello idrometrico del Reno



Sull'asse delle ordinate di sinistra è riportato il livello idrometrico, mentre su quello di destra il livello piezometrico in m s.l.m. . Dall'osservazione di questo grafico è possibile trarre alcune considerazioni in merito all'andamento della falda ed alla sua relazione col fiume.

Per quanto riguarda l'andamento dei livelli piezometrici appare evidente che non si assiste ad una stretta relazione con gli andamenti del Reno. I piezometri rilevano infatti un aumento del livello graduale e non correlabile con i picchi di livello del Reno che sono molto più frequenti ed articolati.

Va poi sottolineata la direzione di deflusso della falda: come si vede dallo stesso grafico, infatti, il piezometro "Comune BO" ha sempre un livello superiore a quello del SGSS. Questo fa sì che l'acqua si muova, necessariamente, dal primo verso il secondo e dunque, richiamando le rispettive ubicazioni in pianta di Figura 2.10, verso l'asta fluviale. Questo avviene sempre,

anche nel momento del massimo relativo misurato a metà Maggio e, alla luce di questi dati, sembrerebbe che la ricarica operata dal Reno in quest'area sia inconsistente.

L'assenza di una correlazione evidente con gli andamenti del Reno, e la direzione del movimento della falda, fa quindi pensare che l'andamento del livello piezometrico non risenta tanto ed in maniera diretta della ricarica del fiume, ma possa corrispondere alle variazioni di carico della conoide su ampia scala, verosimilmente dovute alle precipitazioni ed ai prelievi.

La Figura 5 mostra inoltre che dal 7 Gennaio alla fine della serie di misure il livello della falda si è alzato complessivamente di circa 6 metri.

Tra fiume e falda freatica vi è poi una enorme differenza di quota: il livello del Reno nella zona in cui sono ubicati i piezometri è stata quotata a 39 metri s.l.m. , mentre i livelli della falda sono sempre al di sotto del livello del mare dai -17 ai -10 (si noti che in Figura 5 sono riportate le quote del Reno misurate nella stazione del Tiro a Volo che è più a monte dei punti di misura della falda). Alla luce di queste misure è facile dedurre che la profondità della tavola d'acqua misurata nei due piezometri è circa 50 metri al di sotto dell'acqua nel Reno.

Quindi dall'interpretazione dei dati di sette mesi di monitoraggio in continuo, emerge che:

- lo spessore di insaturo è stato mediamente di 58 – 60 m;
- l'oscillazione della tavola d'acqua è governata dal comportamento stagionale del sistema ad ampia scala, connesso agli eventi meteorologici e, molto probabilmente, al regime dei prelievi;
- meno o per nulla influente pare invece l'effetto della ricarica del Reno. Si ricorda ancora la grandissima differenza di carico idraulico tra fiume e falda (circa 50 metri) e la presenza quasi esclusiva di ghiaie dalla superficie alla profondità interessata dai piezometri. E' bene tuttavia ricordare che in questa zona l'alveo del Reno è interessato da una sedimentazione prevalentemente fine, che potrebbe inibire il passaggio idrico verso le falde.

2.3.3 La relazione fiume-falda nell'area del Tiro a Segno

Spostandosi più a Nord, nella seconda delle zone investigate, le ghiaie della conoide del Reno si separano e gli acquiferi diventano compartimentati (Figura 2.14). In questo caso, per valutare le relazioni fiume-falda, è stato monitorato l'acquifero più superficiale (A0 + A1) che in quanto freatico, dovrebbe ricevere i contributi di infiltrazione di acqua dalle piogge e dal fiume. In questo caso la soggiacenza, indicata ancora con un punto azzurro sulla sezione, è mediamente di 26 m.

Nella Figura 2.15 è riportata in dettaglio l'ubicazione di alcuni dei piezometri per i quali si hanno dei dati disponibili in quest'area e grazie a quali è stato possibile realizzare un monitoraggio più articolato.

I due piezometri indicati come C1bis e C3bis, si trovano all'interno del campo pozzi di HERA del Tiro a Segno ed in entrambi sono state installate le sonde (dal SGSS nel C1bis e dal Comune di Bologna nel C3bis) per la misura oraria del livello piezometrico. I due punti indicati come C1 e C5, fanno invece parte di una serie di piezometri perforati e monitorati tra il 2000 ed il 2002 durante i lavori per la realizzazione della TAV ma mentre per il C1 è stato possibile proseguire la misura anche tra il 2006 ed il 2008, il C5 è andato distrutto e non è stato quindi più possibile rilevarne la quota d'acqua. Anche in questo caso è stata realizzata una quotatura di precisione del piano campagna per tutti i piezometri, che ha permesso di giungere alle considerazioni di seguito riportate.

Nella Figura 2.16 sono messi a confronto il livello rilevato nel piezometro C1bis ed il livello idrometrico del Reno nella stazione del Tiro a Volo. Come prima, sull'asse delle ordinate di sinistra è riportato il livello idrometrico, mentre su quello di destra il livello piezometrico entrambi in m s.l.m. . In questo caso il monitoraggio copre un periodo molto più lungo che va dal 7 Novembre 2006 all'11 Giugno 2008 e consente quindi di valutare l'andamento dei livelli piezometrici nelle varie condizioni stagionali.

Figura 2.14: Particolare della sezione longitudinale passante per via Chiarini e per il campo pozzi del Tiro a Segno.

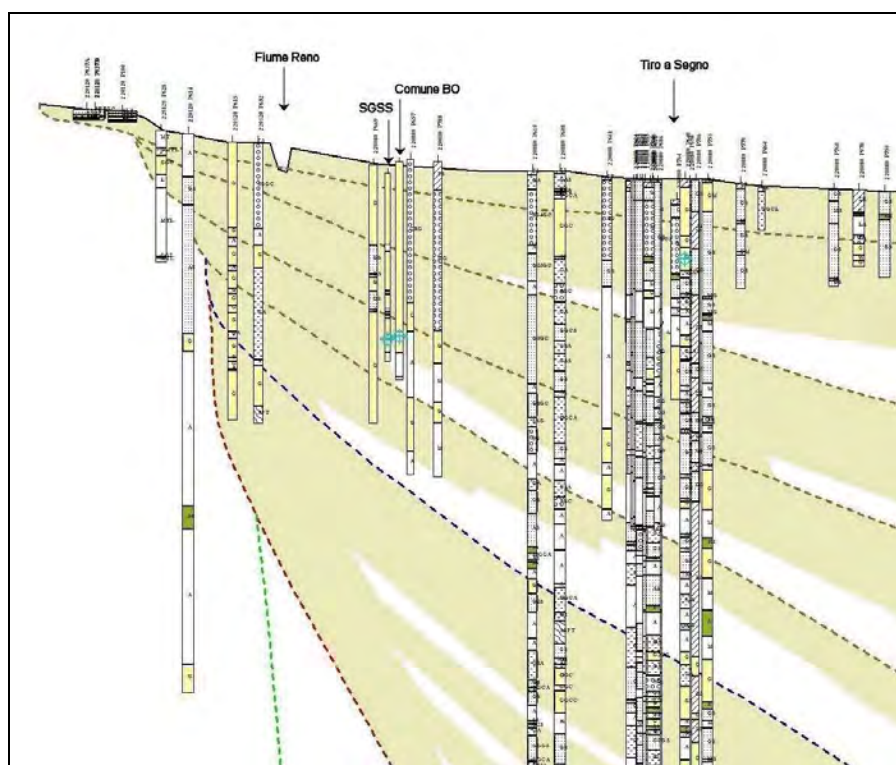


Figura 2.15: Ubicazione dei piezometri nei pressi del Tiro a Segno



A differenza di quanto illustrato nel grafico di Figura 2.13, in questo caso si evidenzia una buona relazione tra gli andamenti del Reno e quelli della falda. Il livello piezometrico sale, se pur con un certo ritardo e con variazioni di pochi decimetri, in corrispondenza dei vari picchi di piena e scende nel lungo periodo siccitoso tra il Giugno e Ottobre del 2007, con una perdita

complessiva di poco più di 1 m. Questo andamento evidenzia la probabile connessione tra il fiume e l'acquifero freatico.

Va notato che trovandosi il piezometro all'interno del campo pozzi, è verosimile che il calo di livello possa anche coincidere col periodo di massimo prelievo.

E' inoltre significativo sottolineare che in oltre un anno e mezzo di monitoraggio il livello piezometrico è variato di solamente un metro e mezzo.

Figura 2.16 Confronto tra il livello piezometrico nel piezometro C1bis ed il livello idrometrico del Reno

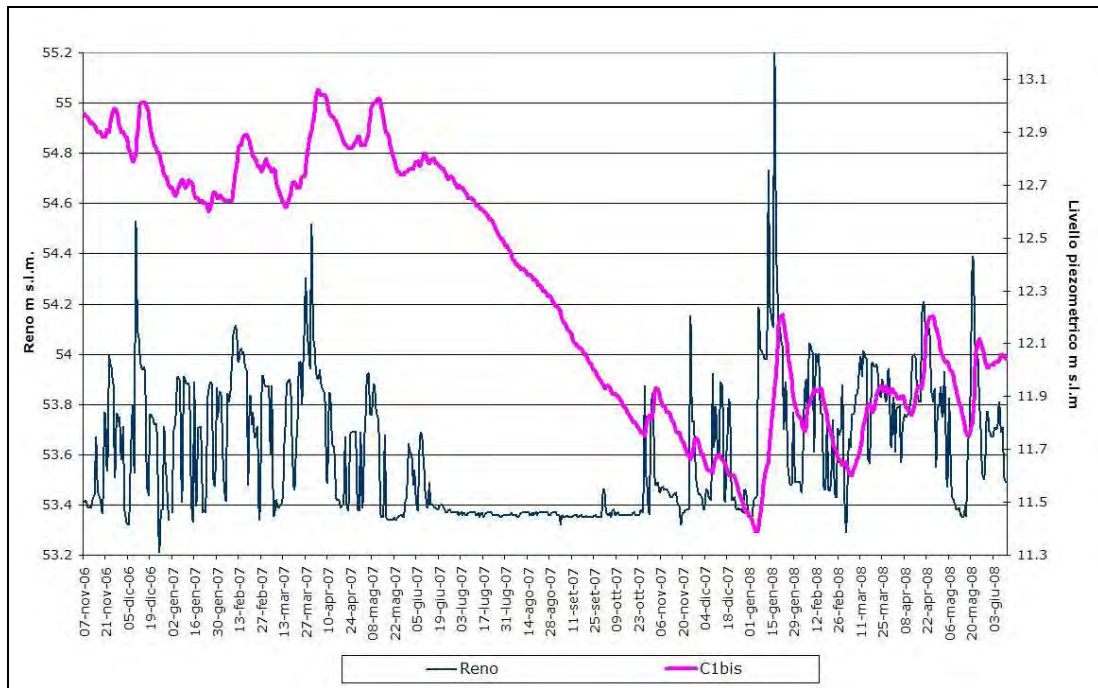
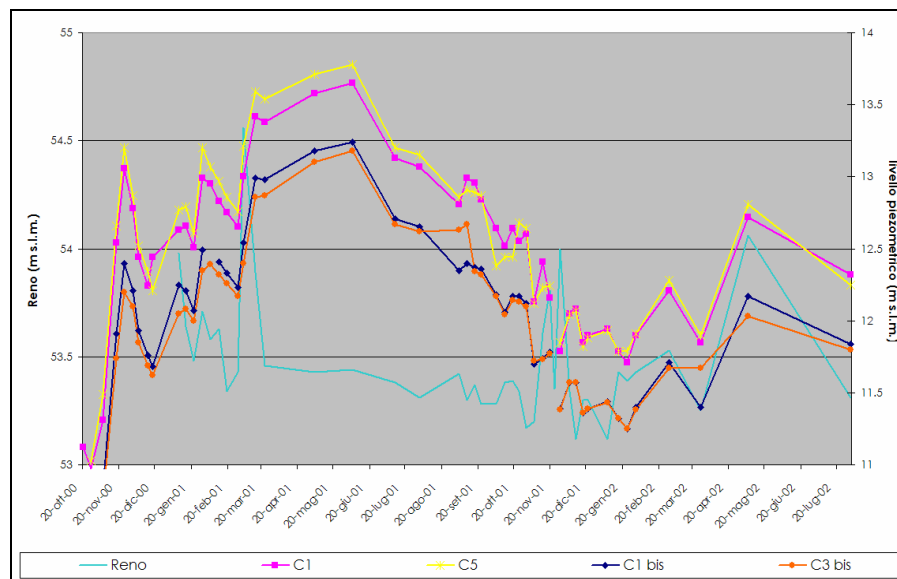


Figura 2.17: confronto tra i livelli piezometrici nei piezometri della TAV ed il livello idrometrico del Reno tra il 2000 ed il 2002



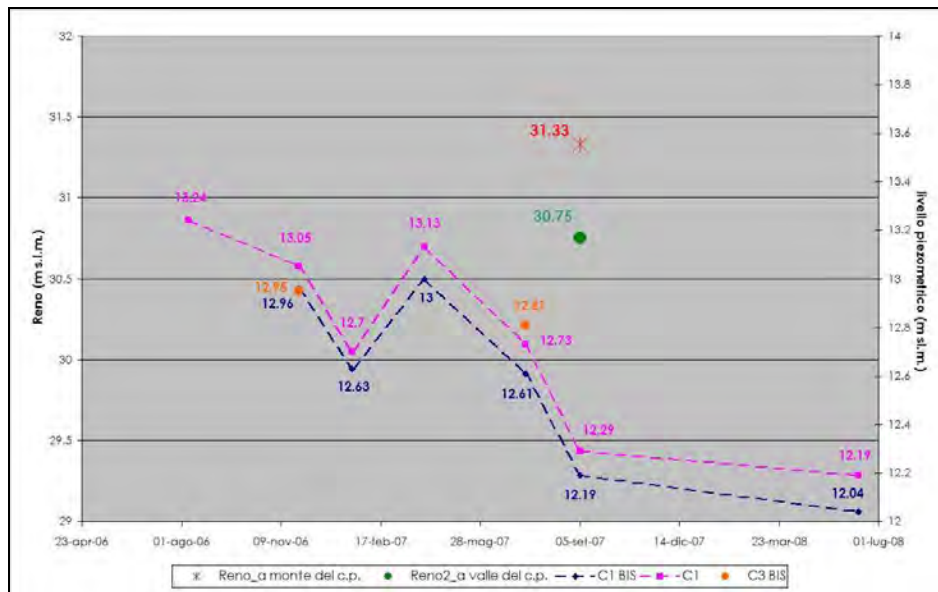
In sintesi, l'analisi delle due situazioni precedentemente descritte (via Chiarini e zona Tiro a Segno, rispettivamente Figura 2.13 Figura 2.16), evidenzia la forte differenza dell'andamento

della falda rispetto al livello del Reno nei due casi: nel primo la falda non segue l'evoluzione del livello del Reno, nel secondo caso invece ciò accade ed in modo chiaro.

Si sono poi messi in relazione anche gli andamenti dei piezometri della TAV tra il 2000 ed il 2002 (Figura 2.17) con l'andamento del fiume. Anche in questo caso si nota una buona relazione tra le quote della falda e il livello fluviale.

Nel dettaglio la Figura 2.17 mostra che i piezometri C1 e C5, più vicini al fiume, hanno sempre un livello piezometrico superiore a quello dei piezometri C1bis e C3bis, situati all'interno del campo pozzi HERA. La direzione di flusso della falda procede, pur con un gradiente molto basso, dai primi verso i secondi. Anche questo andamento evidenzia quindi un effettivo transito idrico, o quantomeno un contributo di pressione dal fiume alla falda, contrariamente da quanto si è rilevato nella zona di Via Chiarini precedentemente illustrata.

Figura 2.18: Confronto tra i livelli piezometrici nei piezometri della TAV ed il livello idrometrico del Reno misurato a valle della briglia



Il grafico di Figura 2.18 è invece riferito alle misure effettuate negli stessi punti (fatto salvo il C5) tra il 2006 e il 2008. Anche in questo caso è stato misurato il pelo libero dell'acqua del fiume utilizzando la strumentazione per la quotatura di precisione citata in precedenza, in due punti posti uno a monte e l'altro a valle del campo pozzi. L'andamento delle diverse curve e la posizione dei punti, conferma la direzione di flusso dal fiume verso i piezometri (il C1 mostra sempre un livello più alto del C1bis). Anche questi dati mostrano quindi l'esistenza di una possibile connessione tra il fiume e l'acquifero.

Si noti che in quest'area, quindi, lo spessore dell'insaturo è di circa 17 – 20 m.

Occorre poi considerare che i piezometri si trovano immediatamente a valle della briglia sul Reno posizionata immediatamente a valle del ponte della Ferrovia Bologna Milano. Tale briglia provoca una vera e propria cascata (Figura 2.19) che, verosimilmente, potrebbe avere una funzione di pulizia del fondo dell'alveo, favorendo quindi l'infiltrazione verso le falde. Non è escluso, inoltre, che sia anche il regime dei prelievi del campo pozzi ad incrementare il richiamo di acqua dal fiume, generando una sorta di ricarica indotta dal fiume verso l'acquifero freatico (se pur esso non sia direttamente oggetto dei prelievi dei pozzi HERA, che sono filtrati nella falde sottostanti).

Figura 2.19: Vista della briglia sul Reno dal campo pozzi del Tiro a Segno



Nel campo pozzi del Tiro a Segno è presente anche un piezometro più profondo, che intercetta l'acquifero A2 (C2bis in Figura 2.20). Questo piezometro rappresenta uno dei 40 punti di monitoraggio in continuo delle falde che la Regione Emilia-Romagna ha recentemente messo in funzione, tramite ARPA, nella pianura.

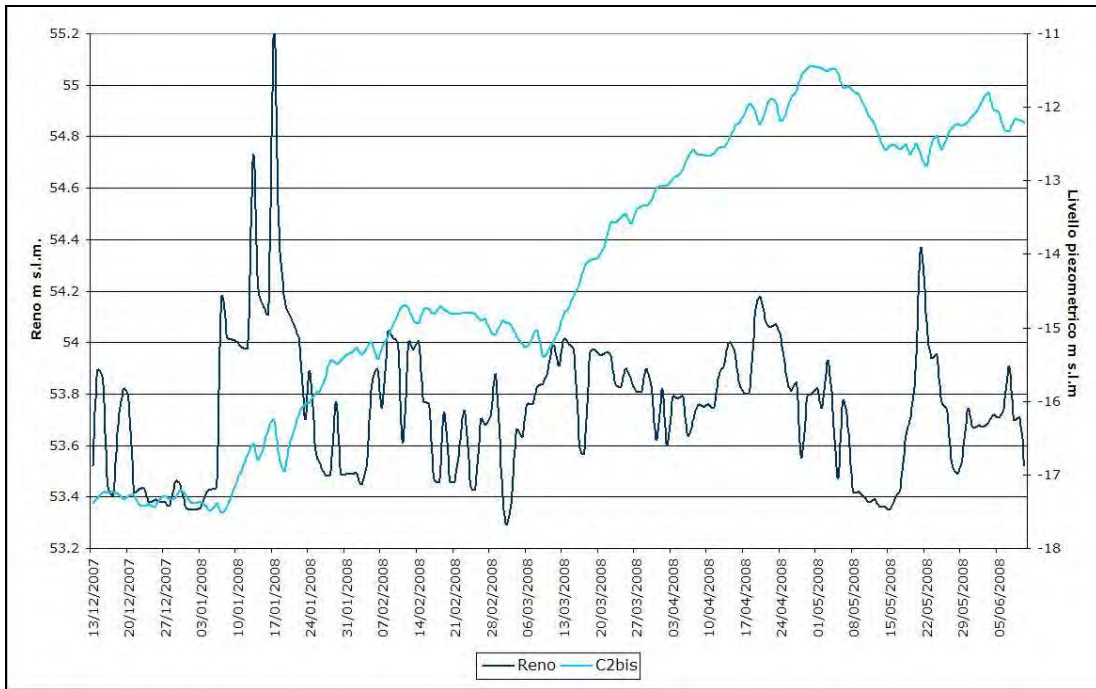
Dal 13 Dicembre 2007 è disponibile anche per questo, la misura oraria del livello.

Figura 2.20: Ubicazione del piezometro C2bis



La piezometria in questo punto (Figura 2.21) è del tutto paragonabile a quella rilevata in via Chiarini (Figura 2.13), non solo come andamento, ma anche come quote assolute. L'analogia tra gli andamenti di questo piezometro, che si trova all'interno del campo pozzi, con quelli posti nella zona di Via Chiarini, lascia pensare che anche gli andamenti letti in Via Chiarini, possano essere prevalentemente legati al regime dei prelievi idropotabili.

Figura 2.21: confronto tra il livello piezometrico nel piezometro C2bis ed il livello idrometrico del Reno



2.3.4 Conclusioni e possibile prosieguo dei lavori

I dati raccolti permettono di evidenziare che le due zone oggetto di monitoraggio sono caratterizzate da forti differenze.

Le differenze più evidenti risiedono:

- *nello spessore della parte insatura*: oltre 50 metri nella zona di via Chiarini, dove l'acquifero è quasi completamente indifferenziato (Figura 2.11); circa 20 metri presso il Tiro a Segno, dove l'acquifero è invece ben differenziato in un sistema multifalde (Figura 2.14);
- *nell'ampiezza dell'escursione misurata*: oltre 6 metri in pochi mesi in via Chiarini (Figura 2.13); circa un metro e mezzo nella zona del Tiro a Segno (per l'acquifero più superficiale, Figura 2.16), in 19 mesi di monitoraggio. L'analogia tra l'andamento del piezometro profondo monitorato da ARPA nel campo pozzi del Tiro a Segno (Figura 2.21) con quelli di via Chiarini (vedi Figura 2.13), lascia pensare che entrambi questi andamenti, con forti ampiezze rilevate, possano essere prevalentemente dovuti alle variazioni nel regime dei prelievi idropotabili. In quest'ottica sono già stati presi accordi per avere dal gestore i valori dei prelievi acquedottistici in questa zona, in modo tale da poterli paragonare alle oscillazioni delle piezometrie rilevate.
- *negli andamenti della falda rispetto a quelli del fiume*: vi è una buona somiglianza nella zona del Tiro a Segno a evidenza di una possibile ricarica del fiume a favore della falda freatica, mentre in via Chiarini i due andamenti non sono correlabili;
- *nelle direzioni di falda individuate*: dal fiume verso l'esterno nella zona del Tiro a Segno, e quindi evidenza di una ricarica del fiume alle falde; dai bordi verso il fiume nella zona di via Chiarini.

Gli ultimi due punti citati, come più volte detto, lasciano pensare che mentre nella zona del Tiro a Segno l'acquifero più superficiale (A1) sia in contatto idraulico con il Reno, nella zona di Via Chiarini, l'acquifero indifferenziato non lo sia, o lo sia molto meno.

Queste differenze di comportamento potrebbero essere dovute al diverso spessore dell'insaturo nelle due zone. Uno spessore molto più alto (via Chiarini), potrebbe in qualche modo mascherare e smorzare gli effetti della possibile ricarica fluviale.

Tuttavia, il mancato passaggio dal fiume alla falda nella zona di via Chiarini potrebbe, come già accennato, essere dovuto anche alla presenza di materiali fini nell'alveo del Reno. Tali sedimenti fini potrebbero di fatto ostruire le ghiaie precludendo il passaggio dell'acqua e di conseguenza la ricarica dell'acquifero (si veda in tal proposito il paragrafo 2.1).

Nella zona del Tiro a Segno, la presenza della grande briglia del ponte della ferrovia, causa una cascata e un conseguente aumento della velocità del flusso del Reno che non consente la permanenza di sedimenti fini. In questa zona infatti il letto del fiume è caratterizzato da sedimenti più grossolani, che favoriscono il passaggio dal fiume alle falde. La stessa briglia causa a monte una diminuzione di pendenza del fiume, favorendo il ristagno idrico e la sedimentazione di depositi fini.

Al fine di verificare questa ipotesi potrebbe essere efficace effettuare una ripulitura del letto del Reno nella zona di via Chiarini, che è, come detto, la zona di massima ricarica della conoide.

Tale ripulitura potrebbe essere realizzata con una "aratura" del letto del fiume in un periodo di morbida che consenta quindi ai sedimenti sollevati dal fondo di essere portati velocemente a valle. La presenza del nuovo piezometro perforato dal SGSS a soli 5 metri dal Reno permetterebbe di verificare in modo univoco l'efficacia di questo intervento. Infatti qualora la rimozione del sedimento fine procurasse un effettivo aumento dell'infiltrazione dal Reno alle falde, il piezometro permetterebbe di apprezzare in tempo reale un aumento del livello idrico nella zone immediatamente sotto al fiume.

3. AGGIORNAMENTO DELLA MODELLISTICA

3.1 AGGIORNAMENTO DEL MODELLO DI FLUSSO DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Il modello matematico di simulazione del flusso delle acque sotterranee della conoide del Fiume Reno, implementato all'interno del progetto "Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la realizzazione di un modello idrogeologico per la gestione sostenibile delle risorse idriche" ([1]) è stato calibrato nell'orizzonte temporale 1983-1998. Risulta ad oggi opportuno effettuare un aggiornamento del modello sulla base dei nuovi dati disponibili relativamente a:

1. dati piezometrici;
2. prelievi;
3. ricarica zenitale.

3.1.1 Scelta dei passi temporali del modello

Sono state effettuate preliminarmente una serie di scelte relative alle modalità di aggiornamento del modello numerico, cioè al fine di rendere disponibile il modello stesso sia per esecuzione delle simulazioni di scenario previste all'interno del presente progetto sia per la successiva lettura dei dati con la necessaria definizione temporale. Le scelte sono state effettuate in base a:

1. disponibilità e scansione temporale dei dati piezometrici di controllo;
2. disponibilità e scansione temporale dei dati di ricarica zenitale;
3. disponibilità e scansione temporale dei dati di prelievo di acque sotterranee;
4. necessità di valutazioni delle dinamiche stagionali nelle simulazioni di scenario;
5. necessità di valutazioni delle dinamiche di breve periodo in relazione ai dati di abbassamento del suolo rilevati dagli assestimetri di Castel Maggiore;

6. capacità degli strumenti Hardware e Software disponibili.

La Tabella 3.1 riporta il dettaglio della scelta finale riguardante la scala dei tempi relativi all'aggiornamento del modello numerico della conoide del Reno per il quale si è valutato di mantenere il passo annuale della fase precedente di calibrazione (Fase 1) nei sei anni successivi di aggiornamento (Fase 2) per poi passare ad un passo mensile negli ultimi due anni, il 2005 ed il 2006 (Fase 3a) così da ottenere come risultato del modello di flusso delle serie temporali di carichi idraulici utilizzabili per la successiva modellazione della subsidenza. Si è anche scelto di mantenere gli ultimi due anni di aggiornamento numerico del modello come semplici Stress Period annuali in modo da avere una versione del modello maggiormente adatta a simulazioni di lungo periodo (Fase 3b).

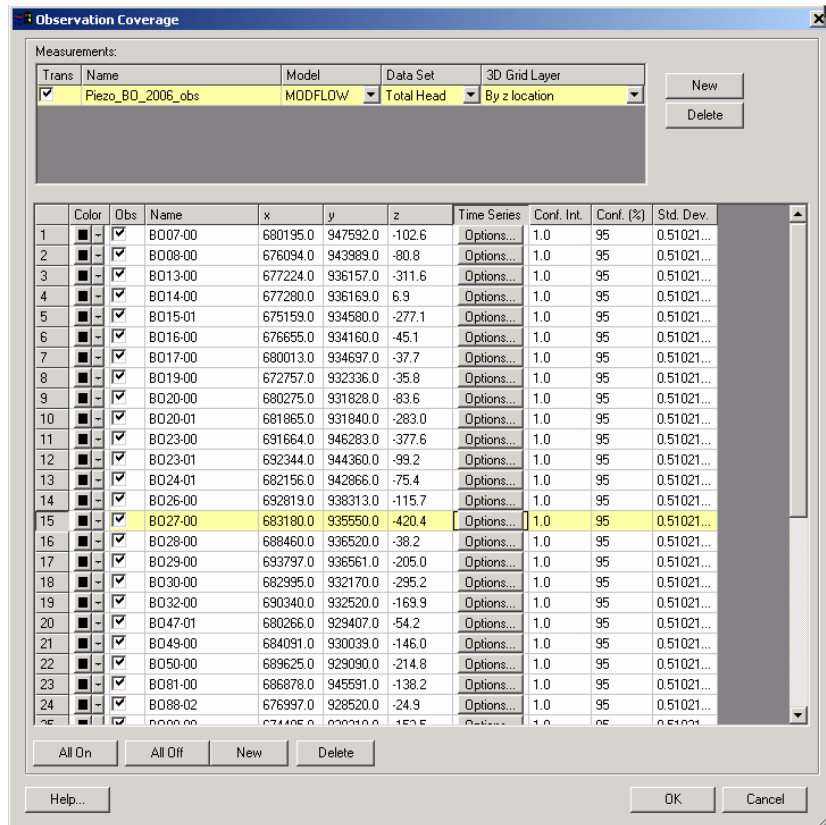
Tabella 3.1: schema dei tempi per l'aggiornamento del modello numerico

Fase modellistica	Arco temporale	Lunghezza Stress Period	Numero Stress Period
Fase 1: Calibrazione	dal 1983 al 1998	con passi annuali	16
Fase 2: Aggiornamento	dal 1999 al 2004	con passi annuali	6
Fase 3a: Aggiornamento	Anni 2005 e 2006	con passo mensile	24
Fase 3b: Aggiornamento	Anni 2005 e 2006	con passo annuale	2

3.1.2 Dati piezometrici

I dati piezometrici della Rete Regionale di Monitoraggio delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna, disponibili fino all'anno 2006 per l'areale di interesse, sono stati inseriti all'interno del modello matematico. I pozzi utilizzabili risultano in tutto 39.

Figura 3.1: inserimento dei pozzi di controllo all'interno del modello numerico



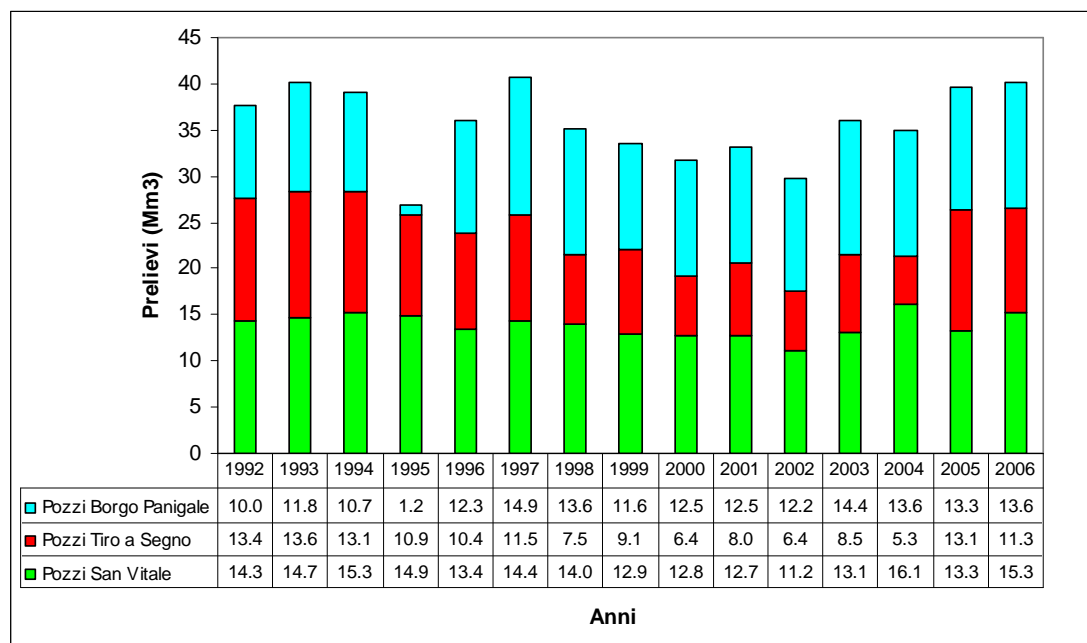
Di questi 11 garantiscono la continuità temporale delle serie storiche già utilizzate per la calibrazione del periodo antecedente 1983-1998, 14 sono pozzi di nuovo inserimento, avvenuto con l'aggiornamento della rete di monitoraggio avvenuta negli anni 2001-2002 e quindi con dati disponibili a partire da questi anni, in sostituzione di altri 14 pozzi presenti nella vecchia rete e non confermati nella nuova e con disponibilità di dati fino al 2001 (Figura 3.1).

L'aggiornamento ha riguardato sia l'impostazione delle condizioni al contorno negli anni successivi al periodo 1999-2000 sia le condizioni di carico idraulico per la verifica della calibrazione del modello.

3.1.3 Prelievi

Relativamente ai prelievi di acque sotterranee a scopo acquedottistico sono stati reperiti i dati dall'Ente gestore relativamente agli ultimi anni per i diversi campi pozzi in loro gestione. Nella Figura 3.2 sono riportati i prelievi annui per i tre campi pozzi appartenenti alla conoide del Reno mentre nelle tabelle successive (Tabella 3.2, Tabella 3.3 e Tabella 3.4) è riportato il dettaglio su base mensile per gli ultimi cinque anni disponibili. Per i prelievi relativi agli altri usi sono stati utilizzati i dati del Piano di Tutela delle Acque.

Figura 3.2: Prelievi annuali dai campi pozzi Hera (conoide Reno)



La Figura 3.3 riporta i prelievi complessivi riferiti ai diversi usi, suddivisi nei periodi coi quali è stata realizzata la discretizzazione temporale nella fase di aggiornamento del modello di flusso.

Tabella 3.2: Prelievi mensili del campo Pozzi Borgo Panigale dal 2002 al 2006 (Mm³)

MESE\ANNO	2002	2003	2004	2005	2006
1	1.19	0.97	0.45	0.51	0.36
2	0.60	0.23	0.32	0.49	0.55
3	1.26	0.20	0.88	0.70	0.68
4	0.86	0.41	0.67	0.66	0.36
5	0.70	1.06	0.55	1.10	0.93
6	1.33	1.95	1.83	2.21	1.65
7	1.55	1.97	1.66	1.58	1.96
8	1.84	2.13	2.06	1.49	1.54
9	1.18	2.00	1.82	1.53	1.71
10	0.81	2.07	1.78	1.06	2.20
11	0.41	1.03	0.97	1.24	1.49
12	0.46	0.43	0.63	0.82	0.21
Totale complessivo	12.19	14.44	13.61	13.38	13.64

Tabella 3.3: Prelievi mensili del campo Pozzi Tiro a Segno dal 2002 al 2006 (Mm³)

MESE\ANNO	2002	2003	2004	2005	2006
1	0.61	0.59	0.00	1.14	0.69
2	0.27	0.13	0.00	1.07	0.64
3	0.56	0.04	0.07	1.11	0.49
4	0.41	0.13	0.77	0.86	0.58
5	0.25	0.66	0.20	0.85	0.63
6	0.79	1.14	0.69	1.33	1.07
7	0.95	1.27	0.74	1.28	1.19
8	1.05	1.52	0.67	1.04	0.89
9	0.64	1.34	0.76	1.19	0.89
10	0.52	1.29	0.38	1.12	1.25
11	0.14	0.35	0.16	1.27	1.68
12	0.24	0.00	1.07	0.84	1.30
Totale complessivo	6.44	8.46	5.53	13.09	11.30

Tabella 3.4: Prelievi mensili del campo Pozzi San Vitale dal 2002 al 2006 (Mm³)

MESE\ANNO	2002	2003	2004	2005	2006
1	1.01	0.71	0.66	0.30	0.49
2	0.47	0.53	0.73	0.20	0.51
3	0.69	0.65	1.16	0.76	0.65
4	0.72	0.58	0.69	0.93	0.48
5	0.72	0.87	0.64	1.06	0.78
6	1.31	1.41	1.47	1.85	1.41
7	1.28	1.24	2.21	1.75	1.88
8	1.42	1.87	1.86	1.52	1.32
9	0.98	1.53	2.14	1.39	1.56
10	1.05	1.95	2.10	1.21	2.18
11	0.86	0.94	1.49	1.51	2.08
12	0.67	0.79	0.97	0.78	1.94
Totale complessivo	11.18	13.08	16.12	13.26	15.29

Figura 3.3: Aggiornamento dei dati di prelievo acque sotterranee nel modello Conoide Reno (dal 1999 al 2006)

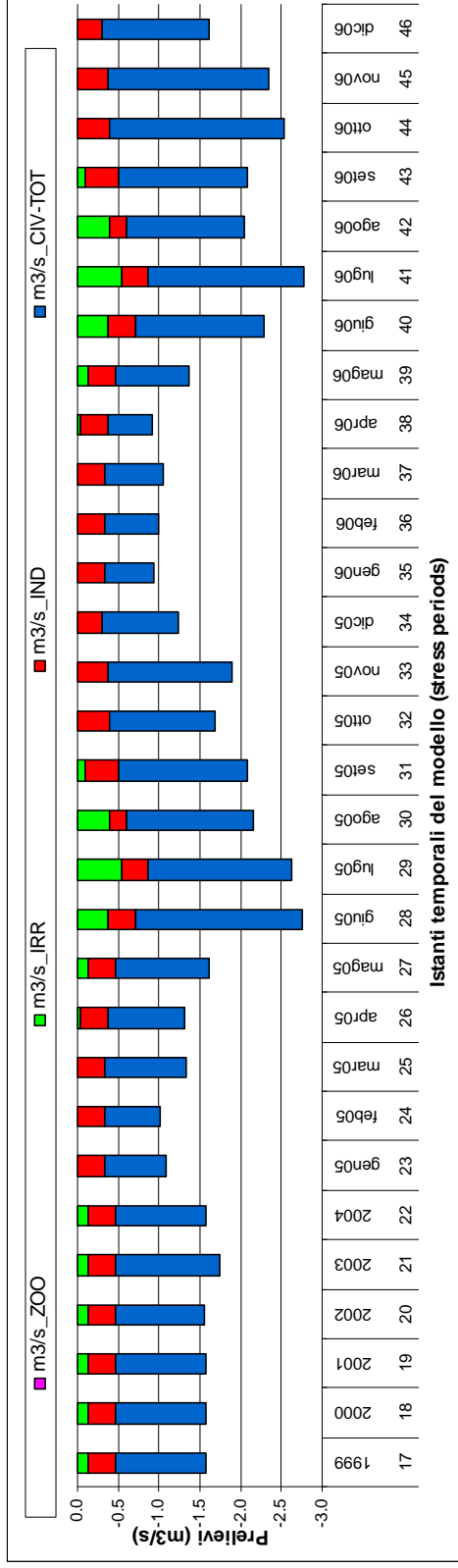
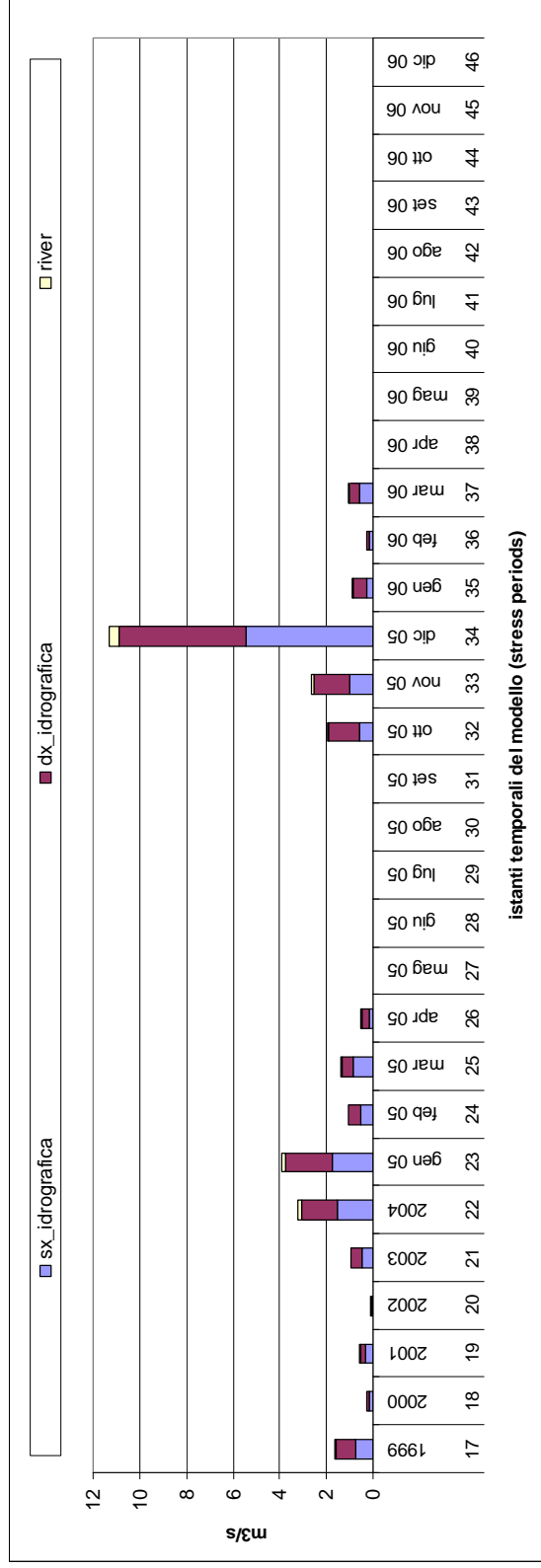


Figura 3.4: Aggiornamento dei dati di ricarica zenitale nel modello Conoide Reno (dal 1999 al 2006)



3.1.4 Ricarica zenitale

Relativamente al periodo 1999-2006 di aggiornamento del modello numerico sono state fatte delle valutazioni circa i possibili contributi alla ricarica della conoide. Per la parte meteorica si è fatto riferimento ai dati pluviometrici e di drenaggio verso la falda stimati da ARPA-SIM con il codice di calcolo CRITERIA che effettua il bilancio idrico del suolo. Al fine di un migliore affinamento del termine di ricarica da pioggia sono state condotte ulteriori valutazioni in funzione della diverse tipologie di suolo presenti nel territorio di conoide la cui distribuzione è rappresentata in Figura 3.5.

I dati meteorologici fanno riferimento alle celle riportate sempre nella Figura 3.5 i cui dati di precipitazione e drenaggio su base annuale dal 1999 al 2006 e su base mensile per gli ultimi due anni (2005 e 2006) sono riportati nelle figure successive.

Figura 3.5: ubicazione delle celle meteo per il calcolo di CRITERIA

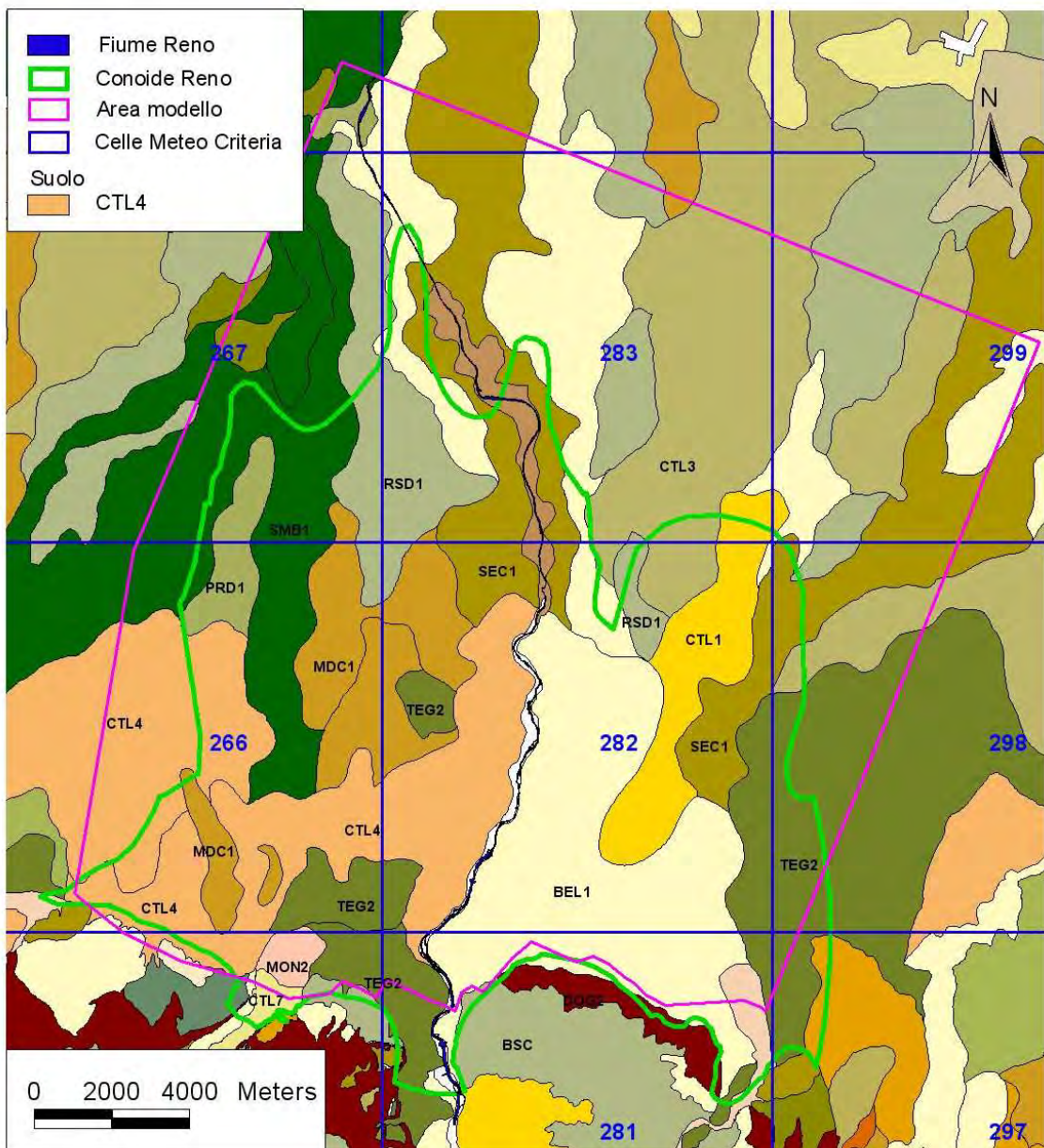


Figura 3.6: bilancio idrico Criteria, cella Meteo 265: a) dati annuali dal 1999 al 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m/s); b) dati annuali dal 1999 al 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m³/s); c) dati mensili 2005 e 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m³/s)

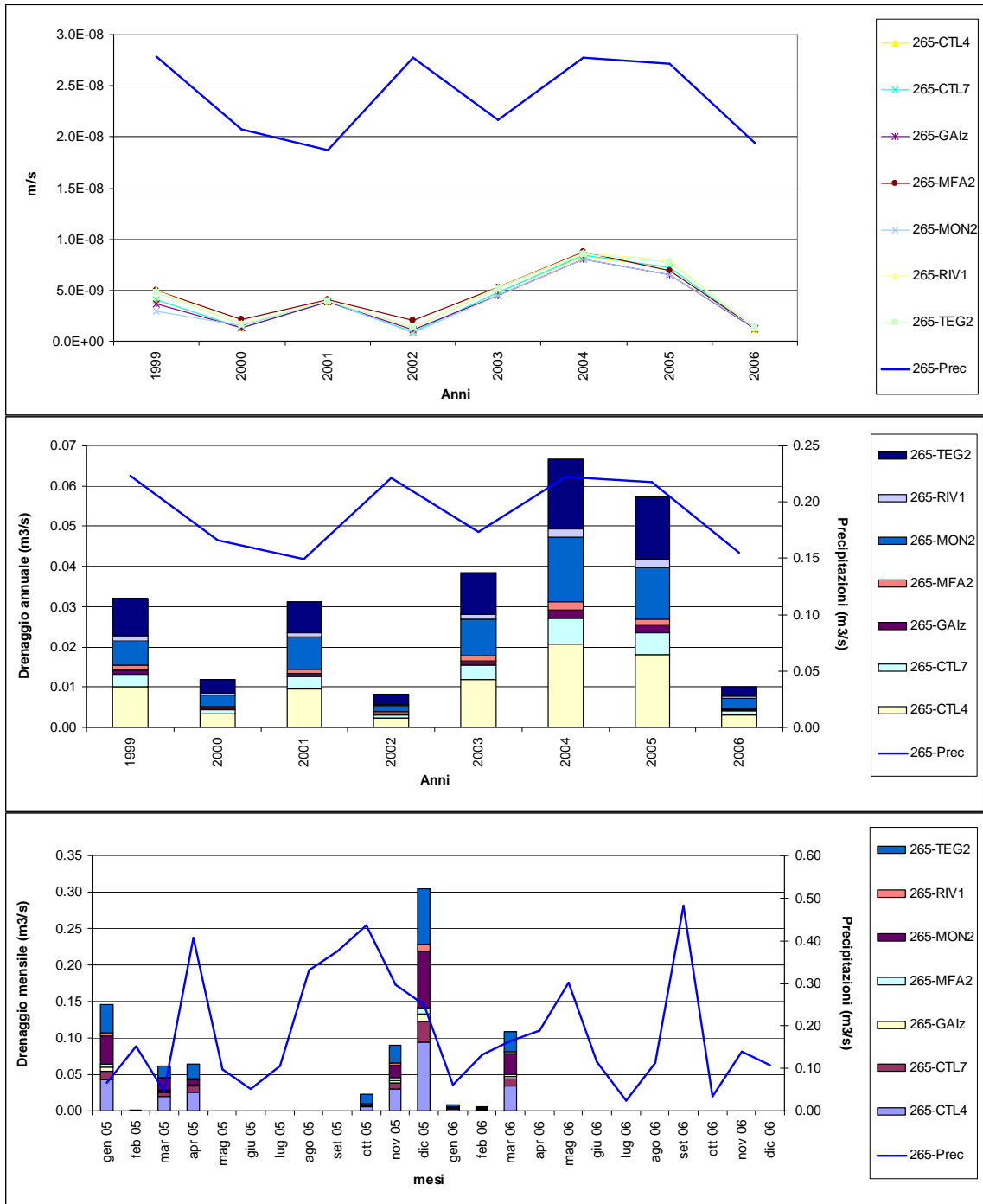


Figura 3.7: bilancio idrico Criteria, cella Meteo 266: a) dati annuali dal 1999 al 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m/s); b) dati annuali dal 1999 al 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m³/s); c) dati mensili 2005 e 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m³/s)

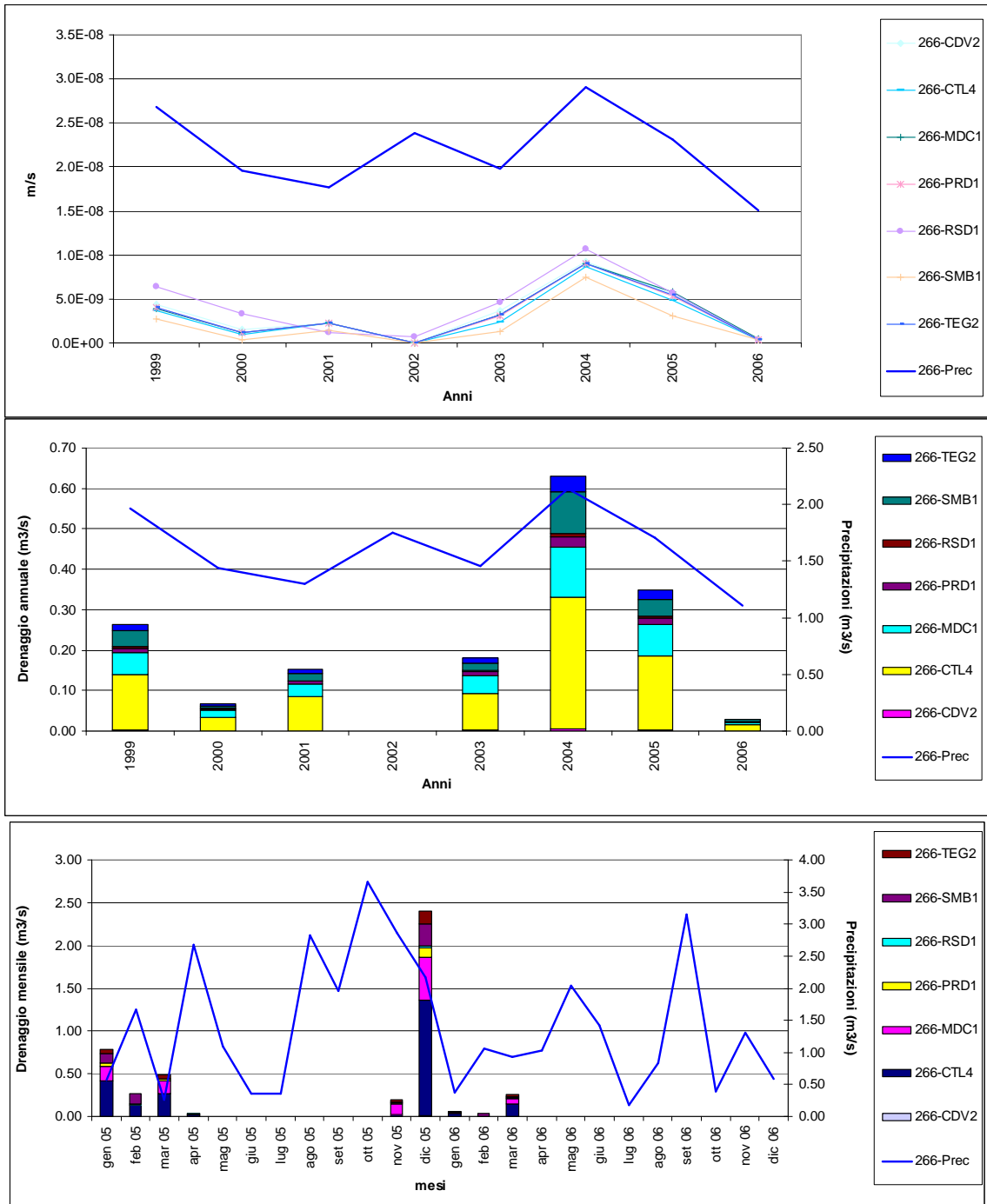


Figura 3.8: bilancio idrico Criteria, cella Meteo 267: a) dati annuali dal 1999 al 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m/s); b) dati annuali dal 1999 al 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m³/s); c) dati mensili 2005 e 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m³/s)

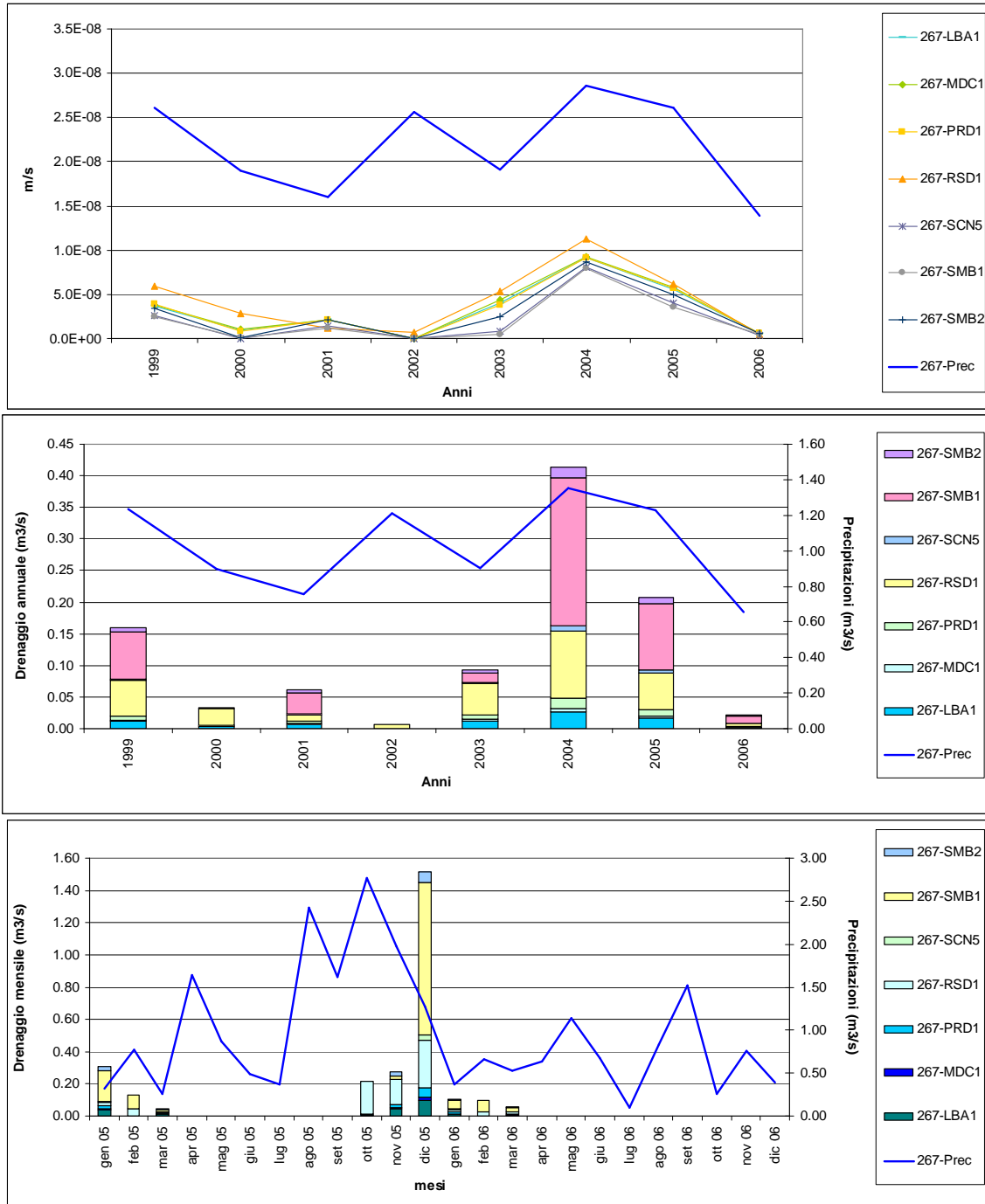


Figura 3.9: bilancio idrico Criteria, cella Meteo 281: a) dati annuali dal 1999 al 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m/s); b) dati annuali dal 1999 al 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m³/s); c) dati mensili 2005 e 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m³/s)

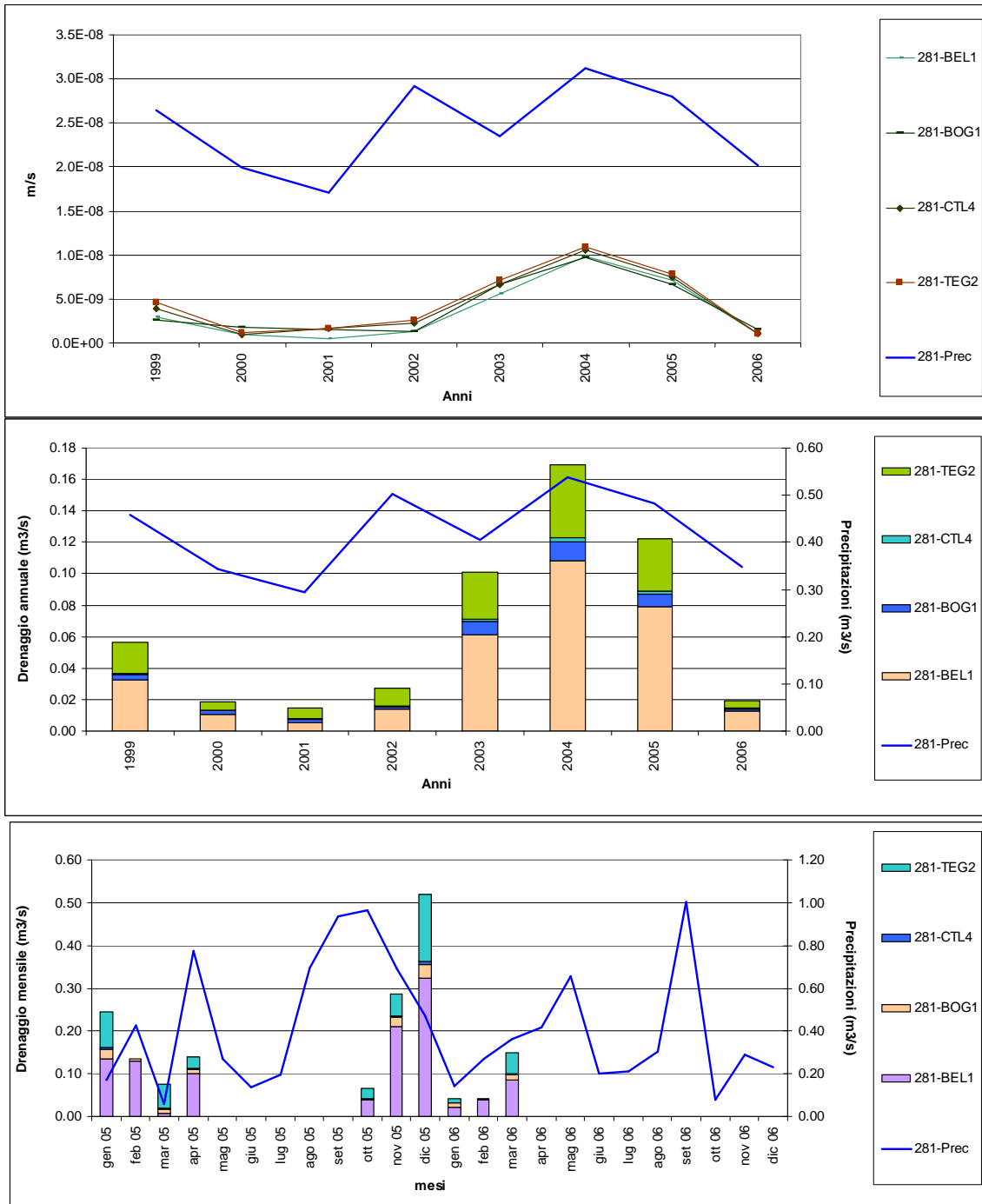


Figura 3.10: bilancio idrico Criteria, cella Meteo 282: a) dati annuali dal 1999 al 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m/s); b) dati annuali dal 1999 al 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m³/s); c) dati mensili 2005 e 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m³/s)

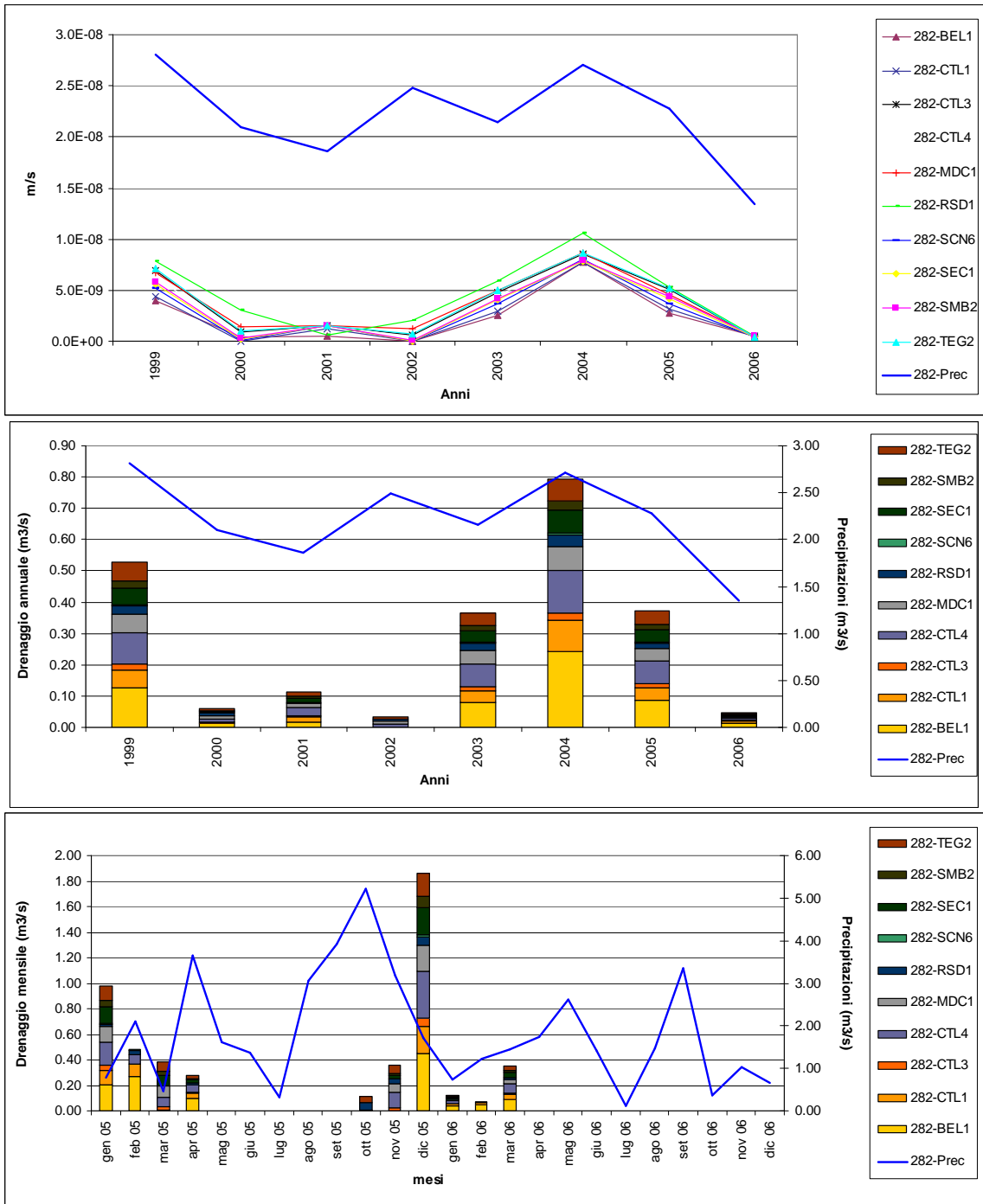
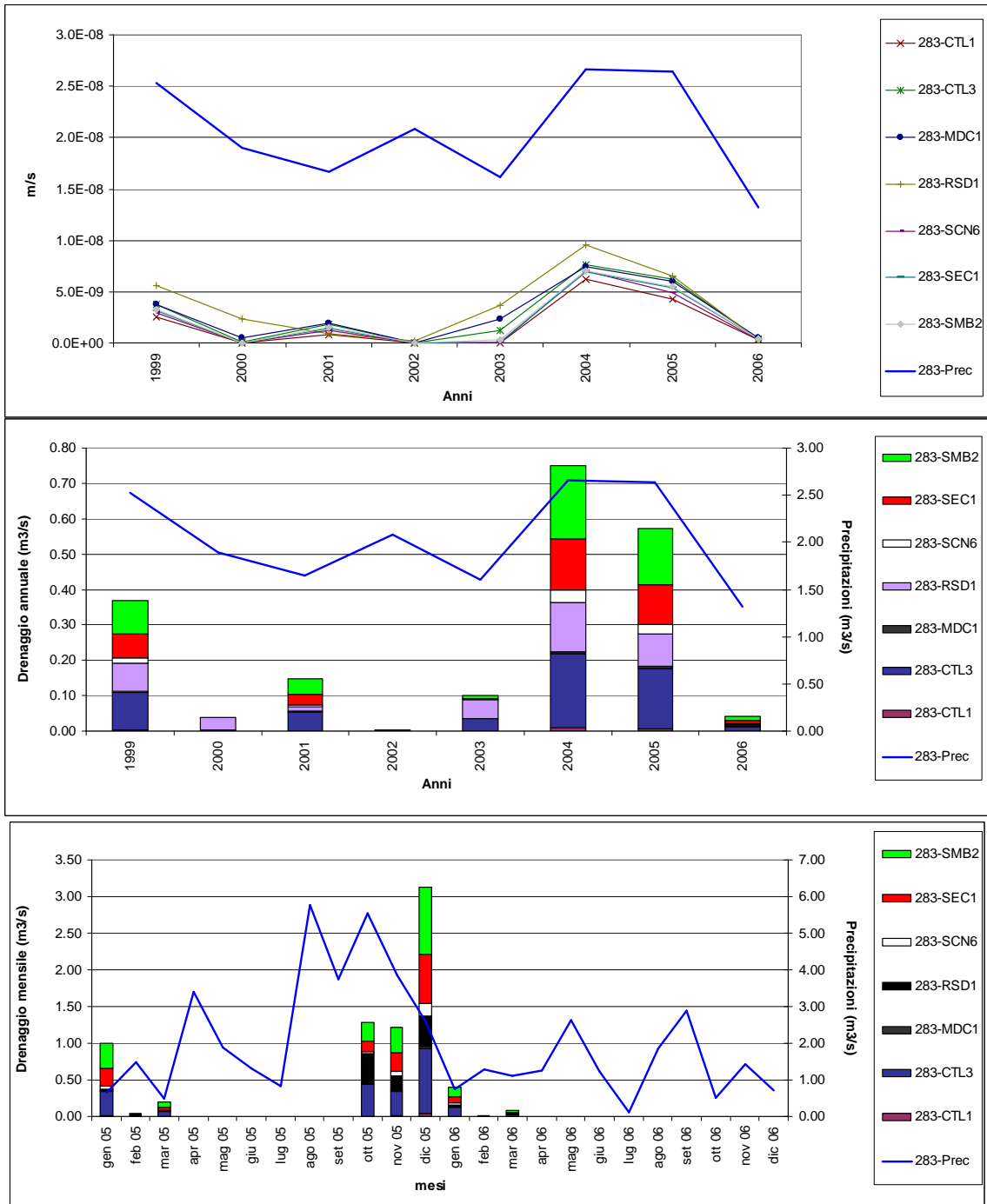


Figura 3.11: bilancio idrico Criteria, cella Meteo 283: a) dati annuali dal 1999 al 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m/s); b) dati annuali dal 1999 al 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m³/s); c) dati mensili 2005 e 2006: precipitazioni e drenaggio per i diversi suoli presenti (m³/s)



L'analisi dei grafici precedenti permette quindi di:

1. valutare l'incidenza delle diverse caratteristiche pedologiche dei suoli sulle possibilità di ricarica della falda da parte della pioggia (grafico in alto, i dati in m/s esprimono una portata di acqua in ingresso per unità di superficie di infiltrazione e quindi misurano la capacità di drenaggio dei diversi suoli presenti)

2. valutare il rapporto complessivo su base annuale tra gli apporti meteorici e la possibile ricarica delle acque sotterranee (grafico centrale, i dati in m^3/s rispetto al grafico precedente tengono conto della maggiore o minore presenza dei diversi suoli dei quali ne valutano l'effettivo contributo alla ricarica complessiva);
3. valutare il rapporto complessivo su base stagionale o mensile tra gli apporti meteorici e la possibile ricarica delle acque sotterranee (grafico in basso, dati in m^3/s). L'elaborazione rappresenta il dettaglio su base mensile del grafico di cui al punto precedente.

In particolare i dati in m^3/s esprimono direttamente le portate di ricarica imposte al modello di flusso in funzione del tipo di suolo presente e che la Figura 3.4 riporta sommate per intero areale di conoide, suddivisi questa volta nei periodi coi quali è stata realizzata la discretizzazione temporale nella fase di aggiornamento del modello di flusso.

3.1.5 Verifica e validazione del modello di flusso

Tutti i dati precedentemente descritti (prelievi, ricariche zenitali, carichi idraulici) sono stati inseriti all'interno del modello di flusso delle acque sotterranee opportunamente modificato al fine di poter accogliere i nuovi dati con le aggregazioni temporali prestabilite secondo quanto descritto al precedente paragrafo 3.1.1.

La validazione consiste nel verificare gli andamenti dei carichi idraulici ottenuti dal modello (tarato nel periodo 1983-1998 della Fase 1 di calibrazione di Tabella 3.1) in funzione dei nuovi dati di prelievo e ricarica nel periodo di aggiornamento del modello stesso (fase 2 e fase 3 di Tabella 3.1, periodo 1999-2006), in rapporto alle nuove osservazioni disponibili.

In ragione del fatto che:

- la distribuzione spaziale delle osservazioni disponibili nelle due fasi di calibrazione e validazione non è la medesima e quindi nuovi dati/osservazioni si sono resi disponibili per la validazione in zone del sistema non soggette a controllo diretto nella fase precedente di calibrazione;
- la fase di calibrazione 1983-1998 è stata condotta con passi temporali annuali mentre la validazione è stata spinta su un transitorio con passo mensile (Fase 3b di Tabella 3.1),

si è resa necessaria una fase di verifica dell'intero modello che sinteticamente ha riguardato i seguenti aspetti:

- verifica della parte strutturale del sistema attraverso il controllo di dettaglio delle caratteristiche litologiche associate alle maglie del modello a partire dalla descrizione litostratigrafica della conoide;
- controllo e verifica della parametrizzazione idrogeologica (permeabilità e coefficienti di immagazzinamento) associata alle caratteristiche litologiche presenti;
- verifica della parte numerica del sistema con particolare riferimento ai parametri utili alla convergenza del modello;
- assetto dei prelievi nello schema tridimensionale della conoide.

Le figure che seguono mostrano i risultati del modello in alcuni punti di controllo.

Figura 3.12: confronto dati osservati e dati calcolati negli anni 2005-2006 su base mensile per il pozzo BO20-01

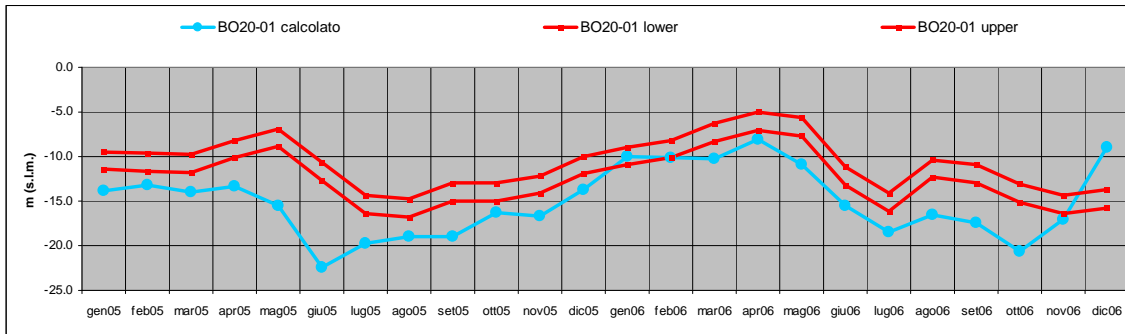


Figura 3.13: confronto dati osservati e dati calcolati negli anni 2005-2006 su base mensile per il pozzo BO27-00

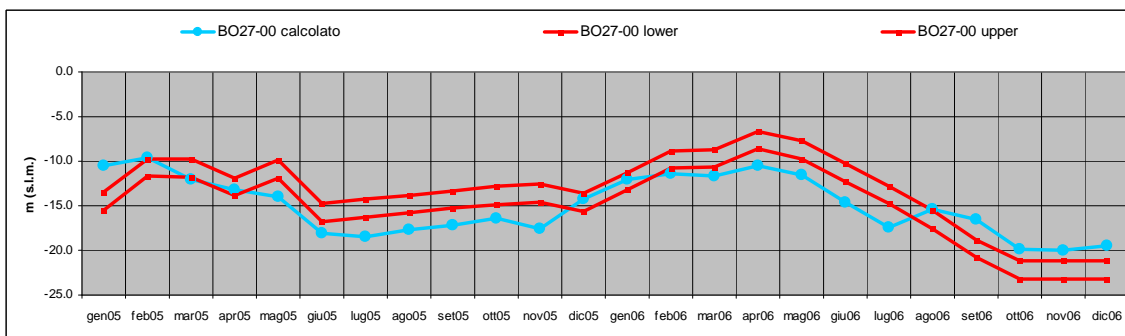
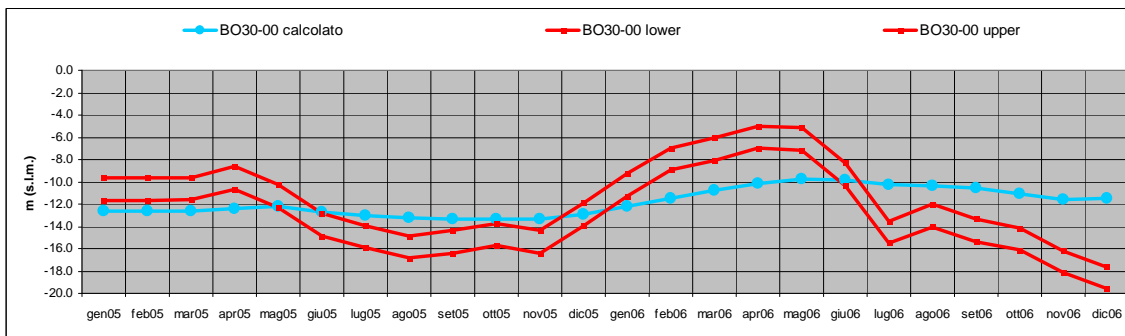


Figura 3.14: confronto dati osservati e dati calcolati negli anni 2005-2006 su base mensile per il pozzo BO30-01



3.2 SVILUPPO ED AGGIORNAMENTO DEL MODELLO DI SUBSIDENZA

3.2.1 Upgrade del modello numerico di subsidenza (flowkonsol)

L'attività di ulteriore sviluppo del modello di subsidenza, rispetto a quanto riportato in [1] (Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna, Autorità di Bacino del Reno (2005). *Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la realizzazione di un modello idrogeologico per la gestione sostenibile delle risorse idriche*. Rapporto tecnico) ha riguardato sia il software, sia le modalità applicative. Per quello che riguarda il software è stata migliorata la fase di calibrazione ottenendo:

- tempi molti più veloci di calcolo con una diversa strutturazione del problema;

- possibilità, avendo maggiore efficienza, di condizionare meglio il problema e verificare uno spettro più ampio di coefficienti.

Avendo migliorato la fase di calibrazione, i risultati ottenuti sono più stabili di quelli derivati nel corso della prima esperienza condotta in [1]; brevemente, si ricorda che si tratta di un modello monodimensionale che viene applicato su ciascuna delle colonne (costituite a loro volta da 70 maglie secondo la discretizzazione verticale del sistema) del reticolo del modello di flusso, per cui l'applicazione vera e propria consiste in un insieme di circa 1700 modelli diversi e separati (uno per ciascuna colonna del modello di flusso). Ciascuno di questi modelli è soggetto sia alla fase di calibrazione, sia alla fase di assestamento numerico, come qualsiasi applicazione del genere.

Dovendo necessariamente configurare tutte le maglie allo stesso modo, dato che il numero elevato di maglie rende di fatto impossibile il controllo diretto su ciascuna, si ottiene che un certo numero di queste tende a soluzioni non stabili o comunque non coerenti fisicamente. I miglioramenti apportati hanno consentito di ridurre questo genere di problemi e di stabilizzare meglio la soluzione.

In particolare, questo assestamento è stato utile nel corso delle simulazioni di scenario: infatti, nel corso dell'esperienza precedente (condotta in [1]) si era avuto modo di notare un discreto grado di difficoltà a far girare il modello in un contesto ipotetico, cioè in condizioni idrauliche diverse da quelle utilizzate nella taratura. I risultati presentati in questa sede derivano quindi da:

- a) un grado migliore di affidabilità che è stato ottenuto con la revisione del modello di flusso, nell'ambito del quale sono stati decisamente migliorati diversi aspetti legati alla taratura (geometria dei sedimenti, stabilità numerica ecc.);
- b) una migliore risposta del modello di subsidenza, che si avvale sia di una migliore configurazione idraulica di partenza, sia dei vantaggi dei suoi propri miglioramenti, come detto sopra.

Questi risultati si sono tradotti anche in una distribuzione del modulo di deformazione (che è la principale variabile di controllo del modello di subsidenza) molto più accettabile di quella della prima versione, tale da suggerire un'aderenza alla fisica del sistema sotterraneo abbastanza ragionevole.

Restano comunque aperti molti problemi, che possono essere portati all'attenzione per altre successive fasi di sviluppo:

- a) l'approccio metodologico generale, che, per evidenti ragioni di economia, è stato orientato ad una applicazione monodimensionale verticale;
- b) la presenza di molte situazioni in cui il modello non risponde bene o non risponde affatto: si tratta di una quantità di maglie pari orientativamente al 5-10 % del totale, per le quali sarebbe necessaria un'attenzione specifica per verificare le ragioni di tale comportamento (che possono dipendere dal modello di subsidenza in senso stretto, ma anche di limiti ancora presenti nella taratura del modello di flusso)
- c) la verifica della taratura con i dati dell'assestometro: è possibile condizionare l'applicazione a simulare il periodo per il quale sono oggi disponibili le osservazioni dello strumento. In questo caso è necessario realizzare una simulazione a passo molto più corto (nel tempo) del modello di flusso e con questo far girare il modello di subsidenza con una scansione paragonabile alla serie dei dati assestometrici. In questo modo si possono fare notevoli passi avanti sia nella calibrazione dei modelli, sia nell'interpretazione delle osservazioni.

3.2.2 Aggiornamento del modello di subsidenza

Rispetto a quanto riportato in [1] (Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna, Autorità di Bacino del Reno (2005). *Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la realizzazione di un modello idrogeologico per la gestione sostenibile delle risorse idriche*. Rapporto tecnico) risultano ad oggi disponibili i nuovi dati di rilievo della subsidenza nella pianura emiliano

romagnola eseguiti con analisi interferometrica ([5], Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2007). *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Analisi interferometrica*. Rapporto tecnico.). La successiva Figura 5.9 riportata a pagina 54 mostra il dettaglio dell'elaborazione relativamente all'areale corrispondente alla conoide del Fiume Reno. Al fine di fornire una valutazione dell'evoluzione del fenomeno della subsidenza nel tempo nelle successive figure (Figura 3.15 e Figura 3.16) vengono riportate le velocità medie annue di abbassamento del suolo disponibili nei diversi periodi di riferimento.

Figura 3.15: velocità di subsidenza media annua (cm/anno) osservata nel periodo 1983-87 (a sinistra) ed 1987-92 (a destra)

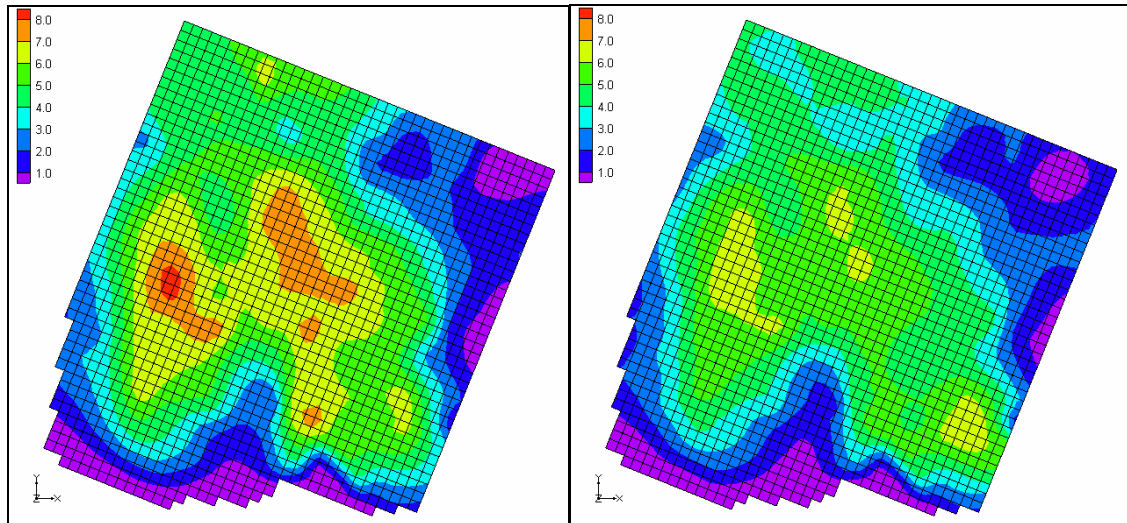
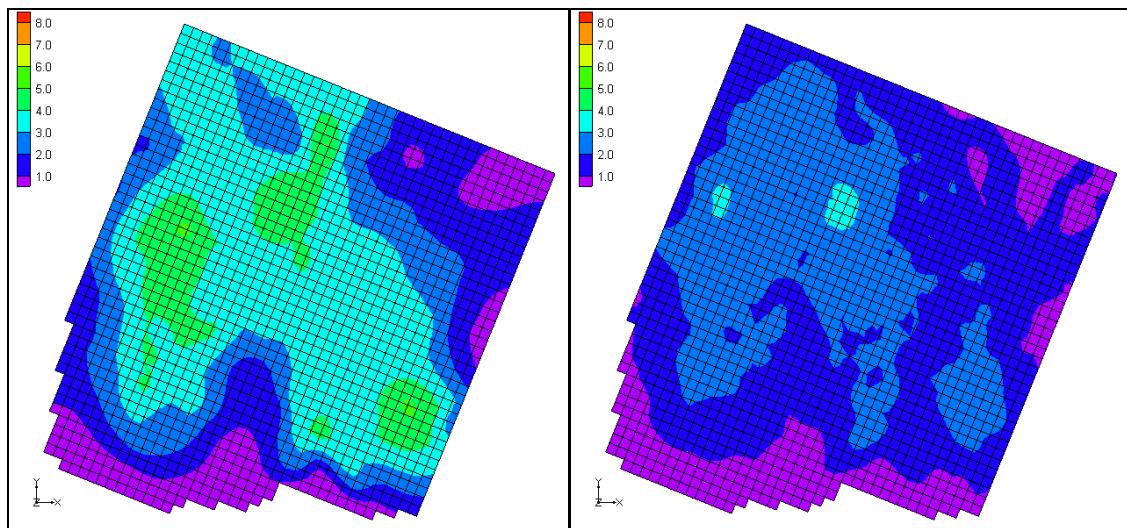


Figura 3.16: velocità di subsidenza media annua (cm/anno) osservata nel periodo 1992-99 (a sinistra) e 2002-2006 (a destra)



Nelle successive figure (Figura 3.17 e Figura 3.18) vengono invece riportati gli abbassamenti cumulati a partire dall'anno di inizializzazione del modello (1983) fino al termine di ciascuno dei quattro periodi precedentemente considerati (1987, 1992, 1999 e 2006). In particolare l'ultima immagine, riferita all'intero periodo 1983-2006, rappresenta il valore di abbassamento del terreno posto come obiettivo dell'aggiornamento della calibrazione del modello di subsidenza condotta con il software flowkonsol opportunamente modificato secondo quanto descritto nel precedente paragrafo 3.2.1.

Figura 3.17: subsidenza osservata (cm) nel periodo 1983-87 (a sinistra) e 1983-92 (a destra)

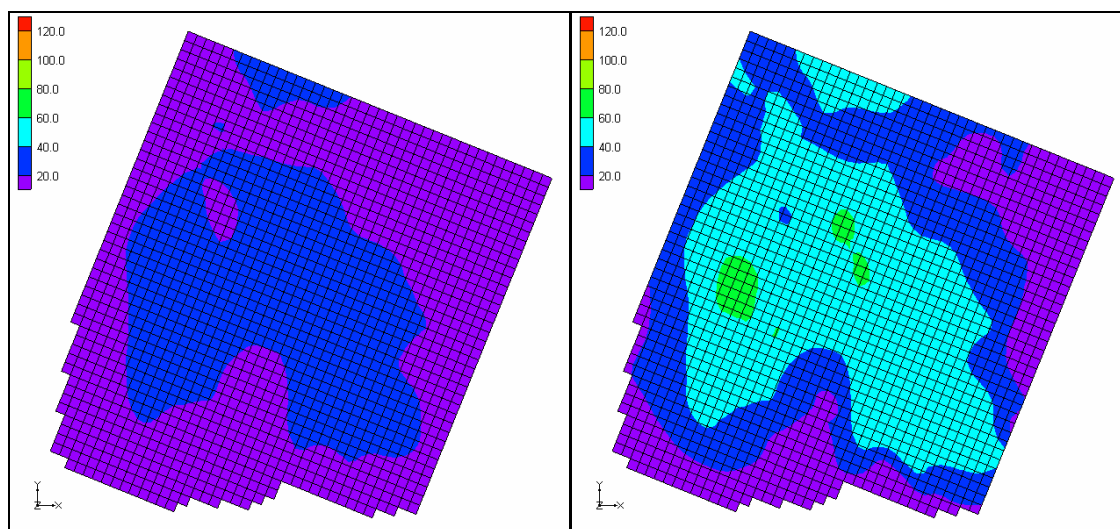
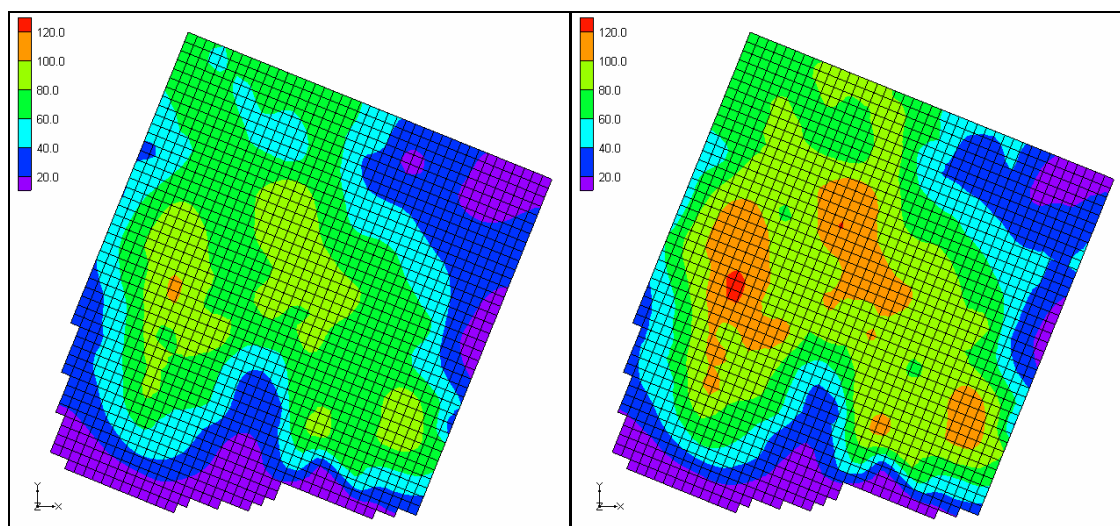
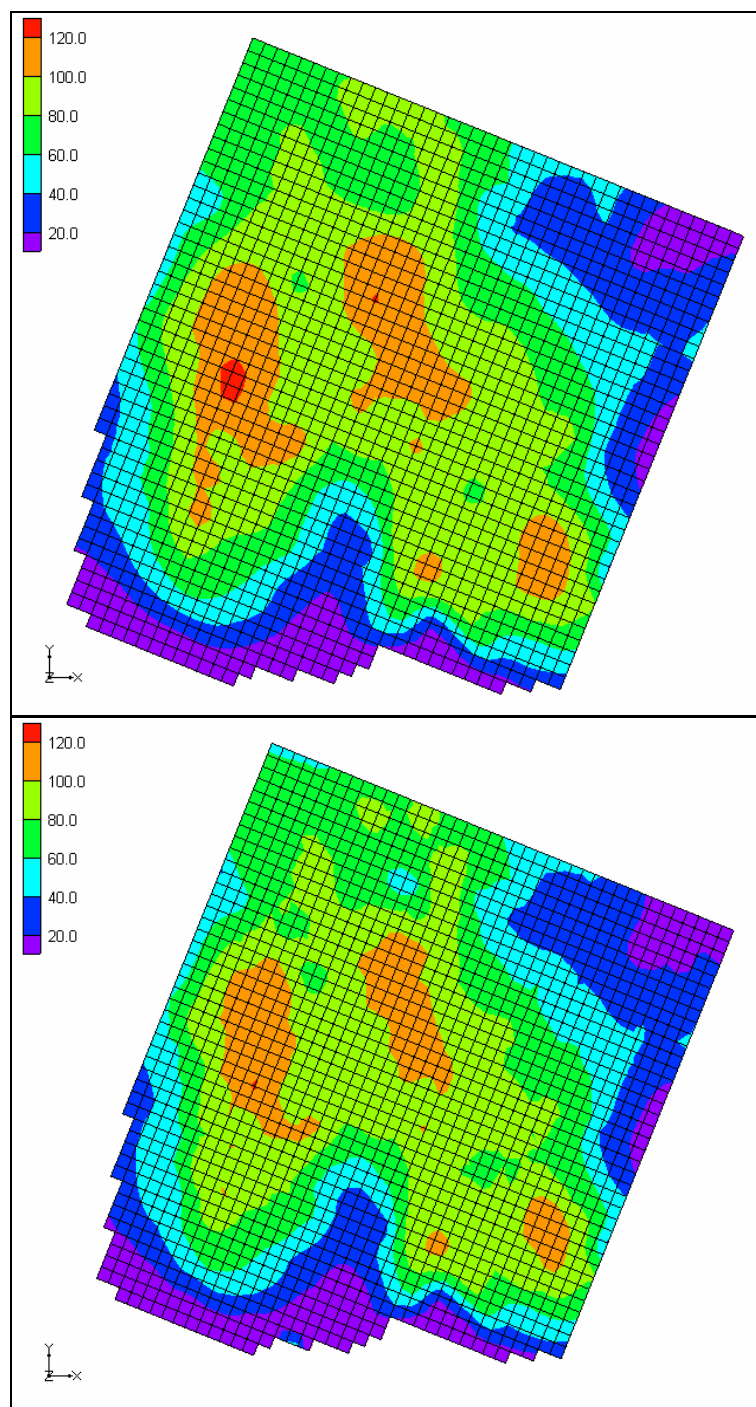


Figura 3.18: subsidenza osservata (cm) nel periodo 1983-99 (a sinistra) e 1983-2006 (a destra)



Nella successiva Figura 3.19 viene proposto il confronto tra i risultati di abbassamento del terreno ottenuti al termine dei 24 anni di simulazione del modello di subsidenza, e le osservazioni disponibili per lo stesso periodo di riferimento. La figura evidenzia una più che buona rispondenza tra dati calcolati e dati osservati.

Figura 3.19: subsidenza osservata (in alto) e calcolata dal modello (in basso) nel periodo 1983-2006 (cm)



4. SIMULAZIONI DI SCENARIO

All'interno di [4] (Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2008). *Studio sulla ricarica artificiale delle falde in Emilia-Romagna*. Rapporto tecnico.) sono state riportate alcune valutazioni riguardanti il possibile utilizzo della modellistica matematica delle acque sotterranee in diverse situazioni applicative e con una particolare attenzione alla valutazione degli effetti di

un possibile intervento di ricarica artificiale delle falde. Nel citato lavoro è stata fatta una analisi sia del bilancio idrogeologico (stagionale) sia dei recuperi piezometrici al fine di valutare nell'immediato i benefici attesi dall'intervento proposto.

Allo scopo di estendere la valutazione anche in termini di subsidenza è stata impostata una simulazione di lungo periodo del modello di flusso (24 anni complessivi) con 20 anni di ricarica artificiale ipotizzata nella parte apicale della conoide (proposta 3, Croce di Casalecchio) con portata pari a $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$.

Relativamente alla valutazione dei possibili diversi effetti indotti sulla subsidenza da tale intervento (scenario del tipo "Cosa sarebbe successo se.....?") è stata condotta la seguente analisi:

Simulazione di riferimento:

- a) valutazione degli andamenti dei carichi idraulici attraverso il modello di flusso delle acque sotterranee della conoide del Fiume Reno relativamente al periodo 1983-2006 (Modflow)
- b) valutazione dell'abbassamento della superficie topografica attraverso il codice di calcolo dedicato alla simulazione della subsidenza per il periodo 1983-2006 (FlowKonsol)

Simulazione di scenario:

- a) valutazione degli andamenti dei carichi idraulici attraverso il modello di flusso delle acque sotterranee della conoide del Fiume Reno relativamente al periodo 1983-2006 nella simulazione di scenario che prevede un intervento di possibile ricarica della falda in apice di conoide corrispondente ad un maggiore ingresso di acqua pari a $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ per i 20 anni compresi tra il 1987 ed il 2006;
- b) valutazione dell'abbassamento della superficie topografica attraverso il codice di calcolo dedicato alla simulazione della subsidenza per il medesimo periodo e sulla base della distribuzione del carico idraulico e della sua variazione nel tempo nelle ipotesi di cui al punto precedente;

Comparazione delle due simulazioni:

- a) nelle seguenti figure viene mostrata la variazione del carico idraulico dovuta ai maggiori ingressi di acqua forniti dall'intervento di ricarica artificiale:
 - dalla Figura 4.1 alla Figura 4.6 sulla sezione del modello in asse con la nuova immissione di acqua dal 1987 al 2006 con un passo temporale di circa 4 anni;
 - dalla Figura 4.7 alla Figura 4.9 su alcuni punti di controllo del modello a diverse distanze dall'immissione di acqua.
- b) nella Figura 4.10 viene riportata invece la differenza di subsidenza nelle due ipotesi. La figura evidenzia che nel lungo periodo si assiste ad un effetto positivo (corrispondente ad un minor schiacciamento del terreno dovuto alle modifiche del campo di moto dell'acqua sotterranea legate alla maggiore disponibilità di risorsa). Tale effetto è localizzato principalmente nelle zone maggiormente subsidenti dove, restringendo l'analisi alle colonne con valori superiori ai 5 cm, il recupero medio stimato è di circa 23 cm in 20 anni (Figura 4.11).

Figura 4.1: recupero piezometrico (m) visto sulla sezione j 31 a fine 1987 dovuto a ricarica artificiale in zona apicale di conoide

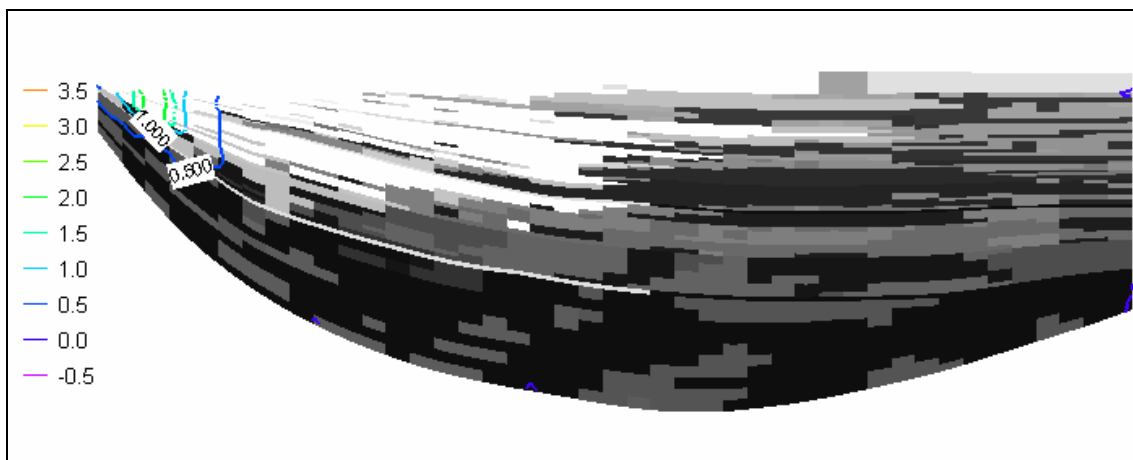


Figura 4.2 recupero piezometrico (m) visto sulla sezione j 31 a fine 1991 dovuto a ricarica artificiale in zona apicale di conoide

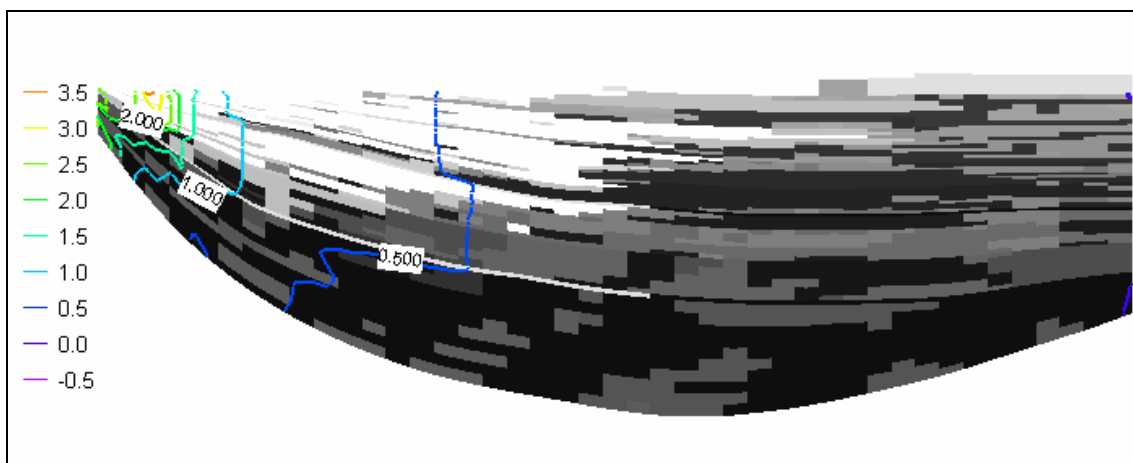


Figura 4.3: recupero piezometrico (m) visto sulla sezione j 31 a fine 1995 dovuto a ricarica artificiale in zona apicale di conoide

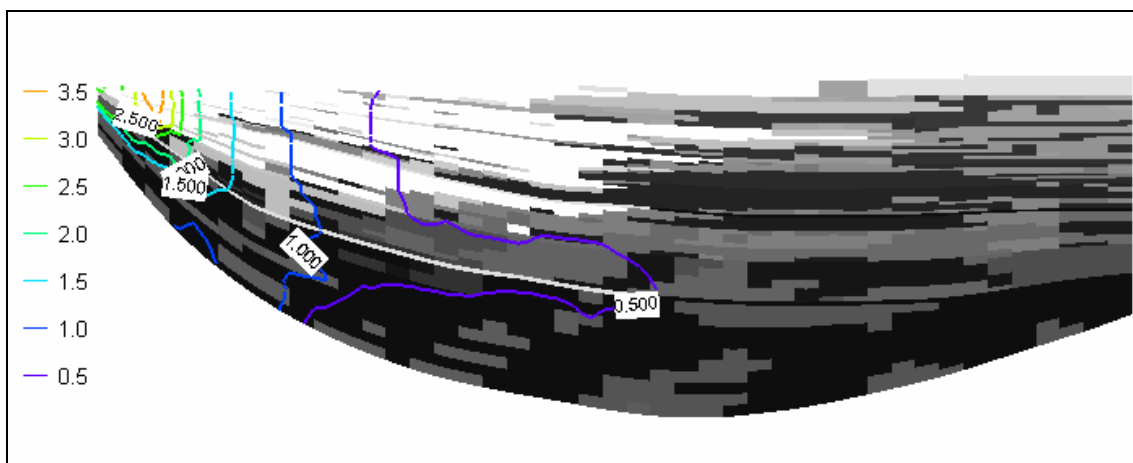


Figura 4.4: recupero piezometrico (m) visto sulla sezione j 31 a fine 1999 dovuto a ricarica artificiale in zona apicale di conoide

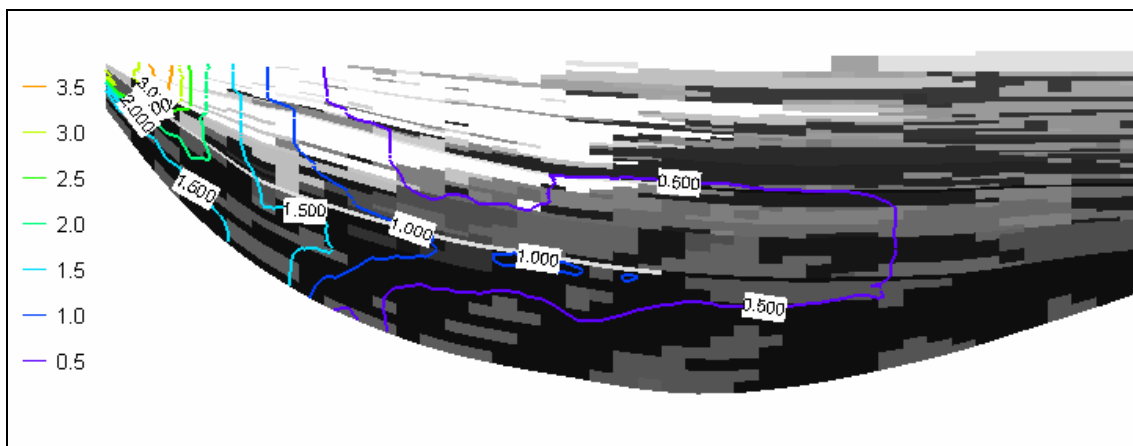


Figura 4.5: recupero piezometrico (m) visto sulla sezione j 31 a fine 2003 dovuto a ricarica artificiale in zona apicale di conoide

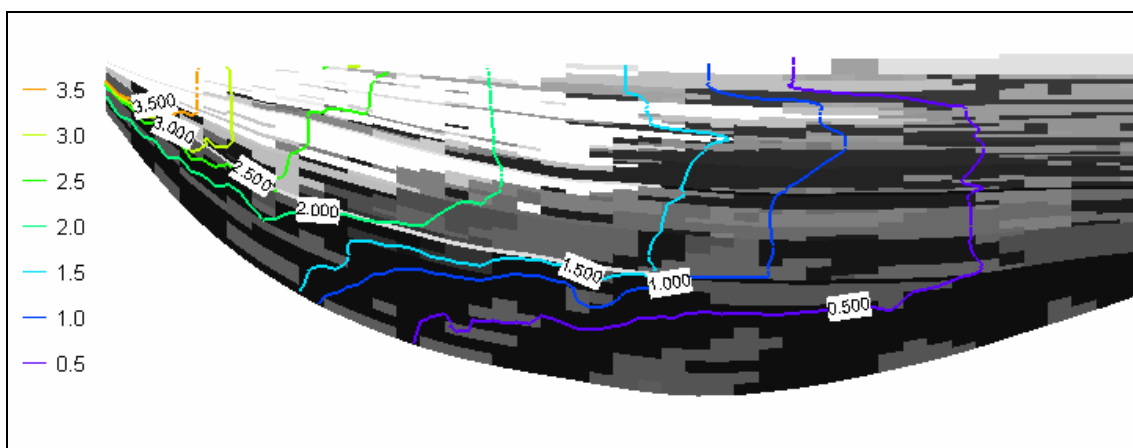


Figura 4.6: recupero piezometrico (m) visto sulla sezione j 31 a fine 2006 dovuto a ricarica artificiale in zona apicale di conoide

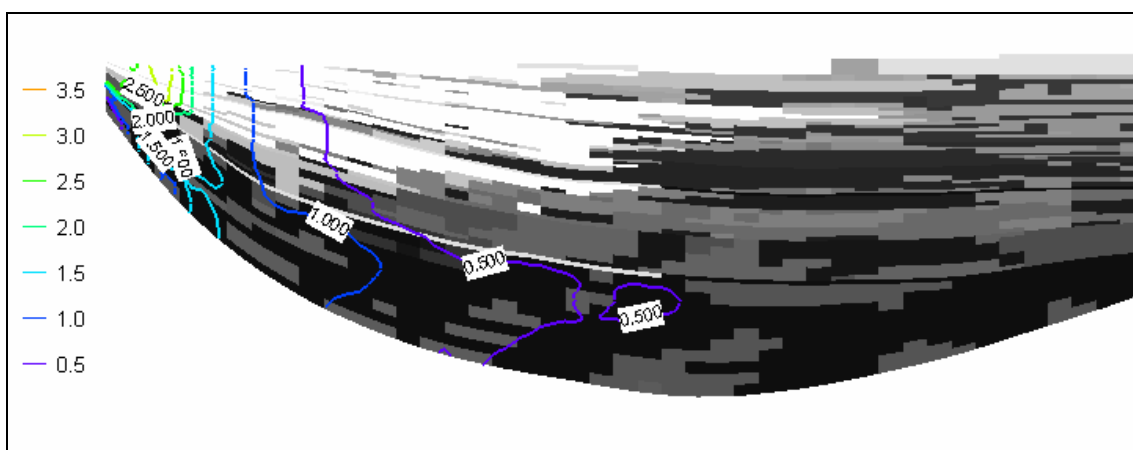


Figura 4.7: grafico del recupero piezometrico dovuto alla ricarica artificiale in zona apicale di conoide riscontrabile in corrispondenza del pozzo BO20-01 dal 1987 al 2006.

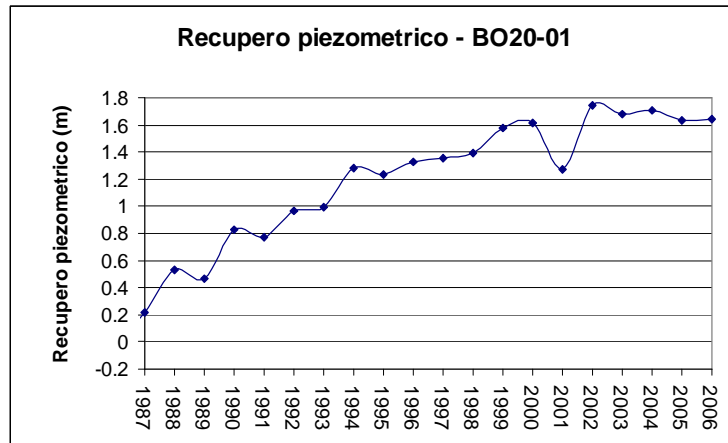


Figura 4.8: grafico del recupero piezometrico dovuto alla ricarica artificiale in zona apicale di conoide riscontrabile in corrispondenza del pozzo BO27-00 dal 1987 al 2006.

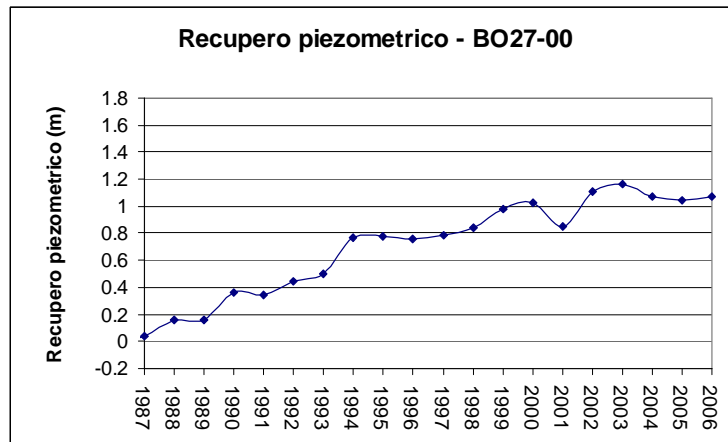


Figura 4.9: grafico del recupero piezometrico dovuto alla ricarica artificiale in zona apicale di conoide riscontrabile in corrispondenza del pozzo BO81-00 dal 1987 al 2006.

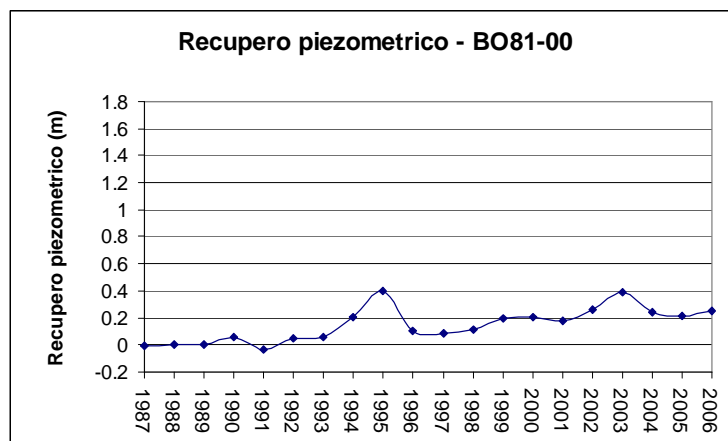


Figura 4.10: recupero in termini di abbassamento del suolo calcolato dal modello numerico (cm)

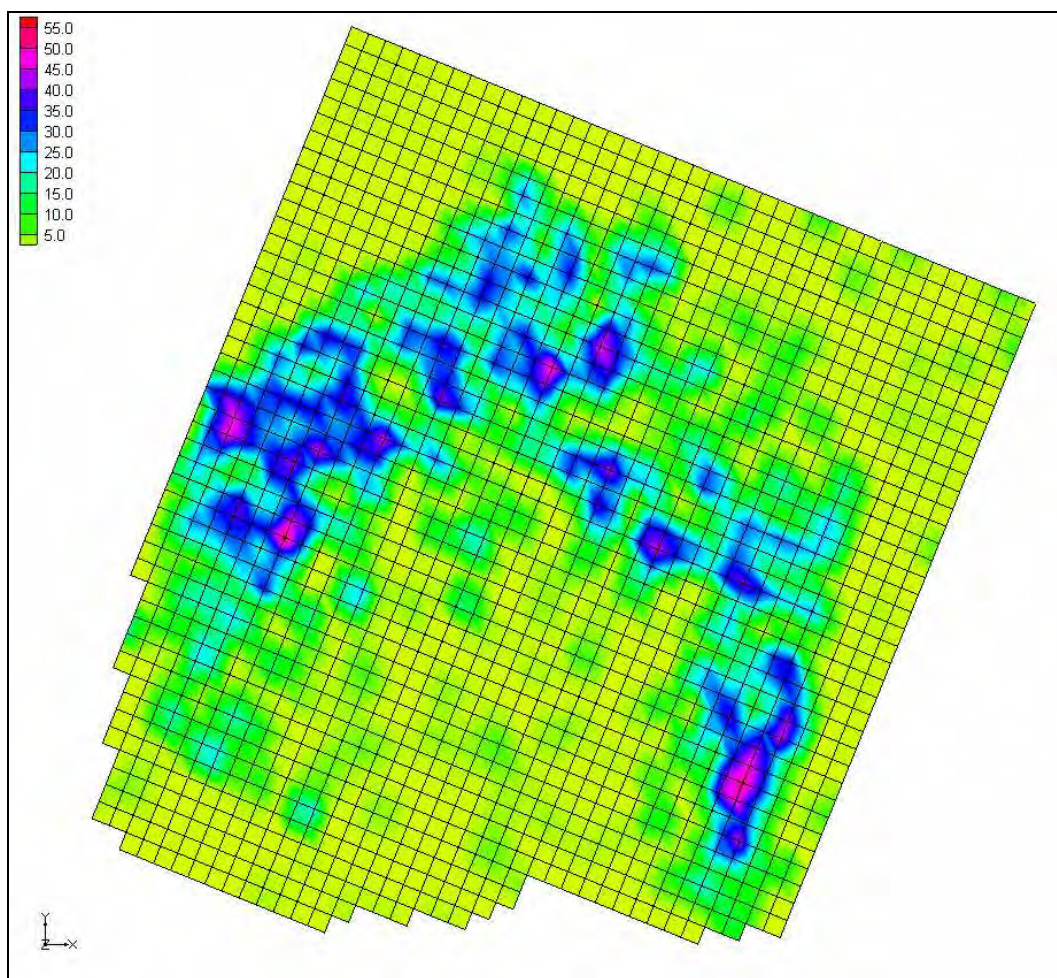
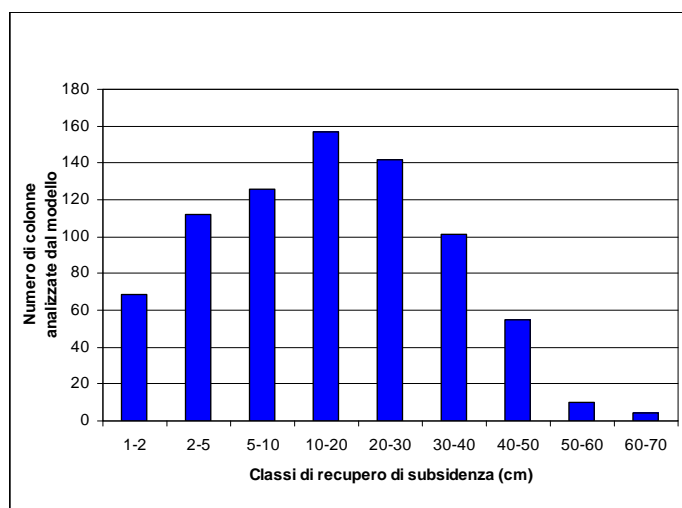


Figura 4.11: distribuzione dei recuperi di subsidenza calcolata dal modello numerico (cm)



5. APPROFONDIMENTI DI CARATTERE GEOTECNICO PER LA COMPRESIONE DELLE DINAMICHE DI SUBSIDENZA

Come richiamato in premessa lo studio sulla conoide alluvionale del Fiume Reno ha realizzato l'installazione di due assestimetri profondi ubicati a poca distanza l'uno dall'altro a Castel Maggiore, zona caratterizzata dai maggiori problemi di abbassamento del suolo. Le diverse profondità di ancoraggio permettono la valutazione differenziale degli abbassamenti riferiti alle diverse profondità ed in rapporto alla rete di livellazione topografica. Fattore di rilievo è la scansione in continuo dei dati di abbassamento che permette di cogliere una dinamica del fenomeno non altrimenti evidenziabile dalle misure della rete di livellazione. I dati rilevati dai due assestimetri sono disponibili a partire dal mese di aprile 2005 (con misure ogni due ore) e sono ad oggi in fase di registrazione (gli ultimi dati disponibili sono riferiti al mese di giugno 2008). Obiettivo della presente attività è quello di effettuare una analisi di dettaglio dei dati rilevati e quindi valutare le possibili motivazioni di carattere geotecnico che determinano le particolari dinamiche rilevate. Ciò anche analizzando le dinamiche della compattazione del suolo misurata dagli assestimetri di Castel Maggiore in relazione ai diversi possibili fattori ad essa più probabilmente legati.

Nei prossimi paragrafi l'analisi verrà condotta riferendosi spesso e richiamando a volte dove necessario i contenuti della relazione finale [1] Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna, Autorità di Bacino del Reno (2005). *Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la realizzazione di un modello idrogeologico per la gestione sostenibile delle risorse idriche*. Rapporto tecnico.

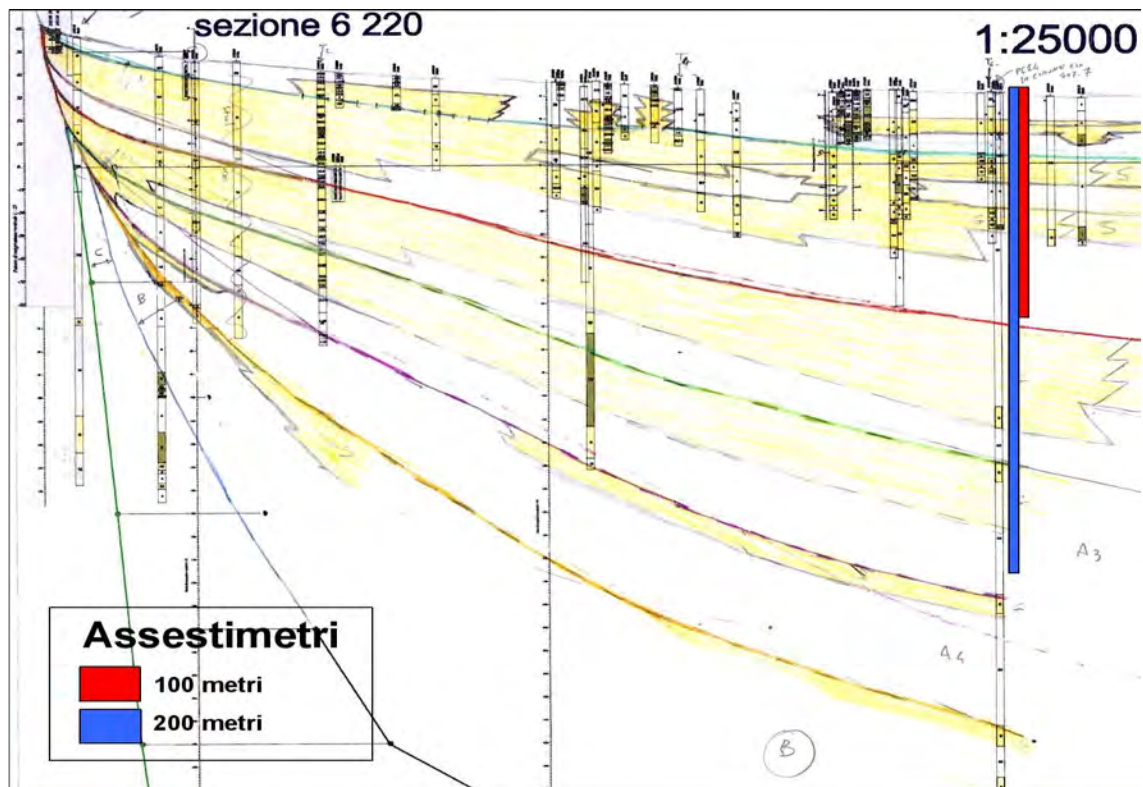
5.1 ELEMENTI E DATI DI BASE A SUPPORTO DELL'ANALISI

5.1.1 Il contesto geologico ed idrogeologico

Nello *Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la realizzazione di un modello idrogeologico per la gestione sostenibile delle risorse idriche* ([1]), il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna, ha realizzato la ricostruzione del sottosuolo della conoide del fiume Reno individuando i tre Gruppi Acquiferi principali A, B e C, ed all'interno del Gruppo Acquifero A i complessi acquiferi denominati rispettivamente, dal più superficiale al più profondo, A0, A1, A2, A3 ed A4 (Figura 5.1).

I gruppi acquiferi A e B sono costituiti da depositi alluvionali, in cui vi sono sedimenti grossolani e fini disposti in modo alterno. Ogni coppia grossolano-fine costituisce un complesso acquifero. Per ogni complesso acquifero, i depositi più fini si concentrano nella parte inferiore, mentre nella parte superiore sono prevalenti i depositi grossolani che corrispondono a grandi spessori di ghiaie che risultano amalgamate nella parte più a sud della conoide verso il margine appenninico. Nel Gruppo Acquifero C troviamo invece dei depositi marino costieri costituiti soprattutto da sabbie.

Figura 5.1: Sezione 6 ed ubicazione degli assestimetri



Secondo il medesimo studio, nella parte meridionale della conoide troviamo un'area con litologie costituite da ghiaie a partire dal piano campagna per decine di metri di profondità. In questa zona, la conoide è fatta di un unico acquifero freatico. Questa è la zona di ricarica massima di tutto l'acquifero ed è qui che le acque superficiali, (fiumi, torrenti e acque di pioggia,) infiltrandosi nel sottosuolo, alimentano gli acquiferi della conoide. Più a nord, queste ghiaie si alternano con depositi fini sempre più frequenti che ricoprono la funzione di acquitardi e dividono tra loro i diversi complessi acquiferi. Quindi, nella zona più a nord è presente un acquifero multistrato, che presenta falde profonde, confinate o semiconfinate.

In questi settori l'acquifero freatico (che è a contatto con le acque di superficie) si trova solamente nelle porzioni superficiali (complessi acquiferi A0 ed A1). La Figura 5.2 riporta la carta freatimetrica della conoide del Reno caratterizzata dall'evidente ampia zona non satura presente nella parte centrale della conoide. La successiva Figura 5.3 evidenzia invece il cono di depressione piezometrica rilevato dai pozzi della rete regionale di monitoraggio delle acque sotterranee. La figura si riferisce agli anni 2005 e 2006 ma tale depressione fu rilevata già dall'anno di istituzione della Rete Regionale di Monitoraggio (1976) a significare che i prelievi sotterranei sono stati per molti anni superiori alla capacità naturale della falda freatica della conoide di ricaricarsi. Tale depressione persiste tutt'oggi anche se con segnali di recupero dei livelli piezometrici a partire della metà degli ottanta.

Figura 5.2: Carta della falda freatica bolognese 1996 nella conoide del Reno ([8], Viel G., (1998). *Acque sotterranee.....terra, e.....quant'altro*. In: Ricerche e studi sul sistema urbano bolognese, *Metronomie* n°12.)

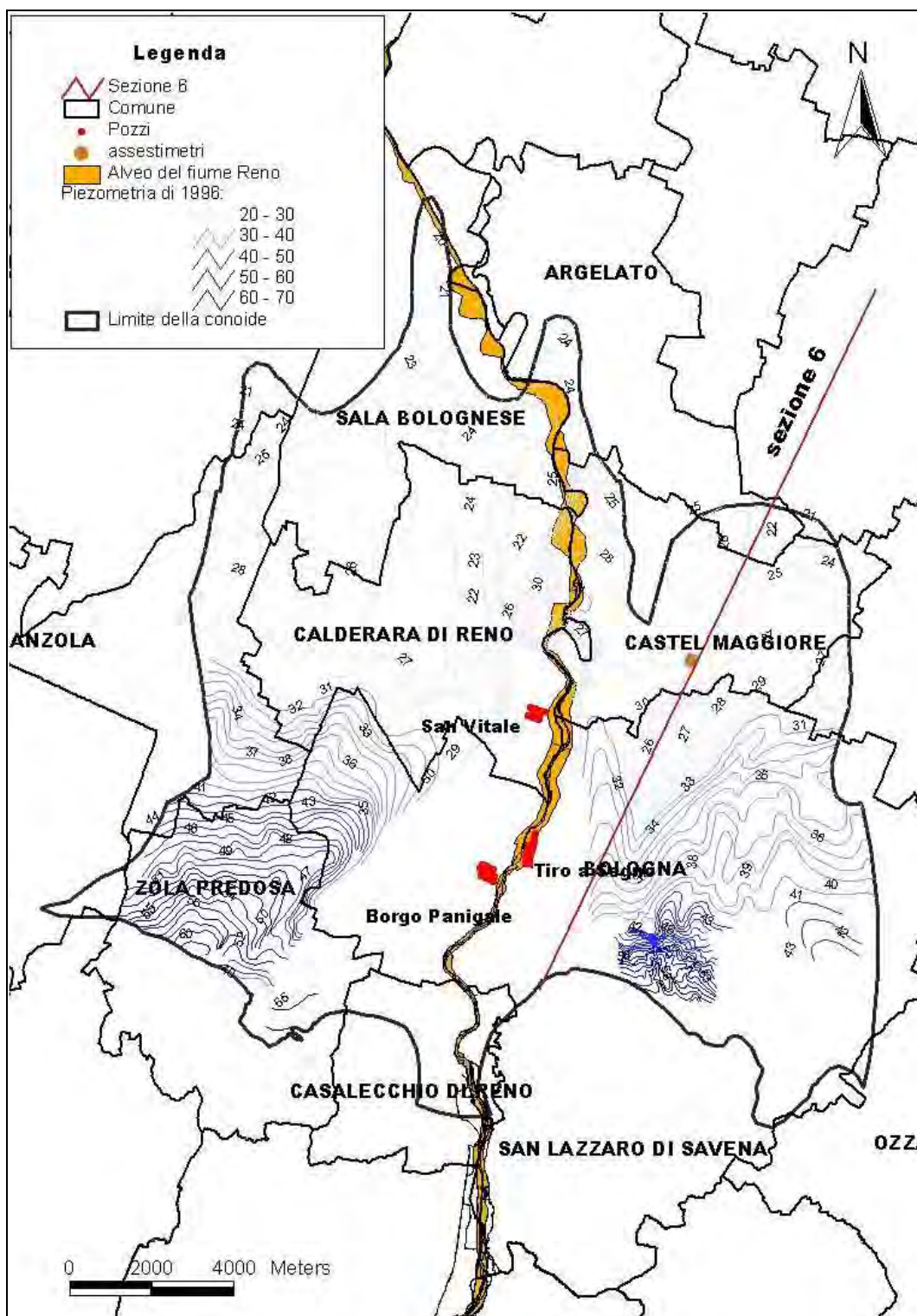
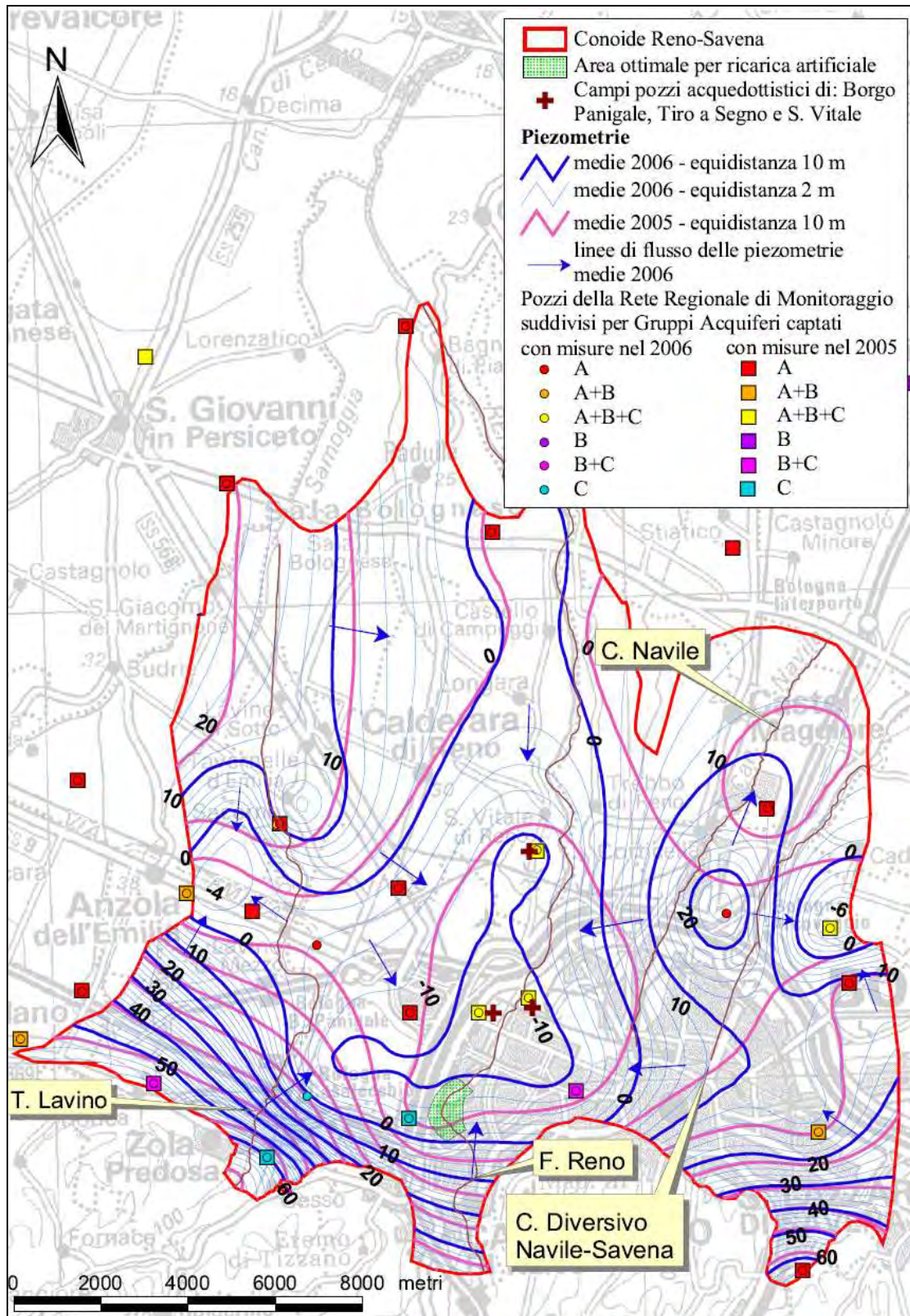


Figura 5.3: Piezometria media anni 2005 e 2006 nella conoide del Fiume Reno (da [4], Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2008). *Studio sulla ricarica artificiale delle falde in Emilia-Romagna. Rapporto tecnico.*)



5.1.2 I Prelievi di acque sotterranee

5.1.2.1 *Prelievi acquedottistici*

I dati sui prelievi civili sono stati forniti da Hera su base giornaliera nel periodo gennaio 2005-marzo 2007 relativamente ai campi pozzi da loro gestiti. In particolare si è fatto ricorso ai dettagli dei prelievi civili giornalieri effettuati da Hera presso i campi pozzi di Borgo Panigale, Tiro a Segno e San Vitale (Figura 5.4) le cui caratteristiche costruttive complessive medie sono riportate in Tabella 5.1. Come si può vedere dalla tabella, la profondità dei filtri dei pozzi è compresa tra circa -100 metri e -400 metri, e corrisponde alla profondità dei prelievi di falda effettuati sugli acquiferi A2, A3, A4, B e C.

Nell'analisi successiva non verranno considerati i prelievi effettuati nel campo pozzi di Fossolo in quanto rappresentano solo il 6% dei prelievi totali, sono lontani dalla collocazione dei due assestimetri ed in posizione marginale rispetto alla intera conoide (nell'estremo sud-orientale del modello matematico e perciò non considerati, Figura 5.5).

Tabella 5.1: dettagli dei prelievi di Borgo Panigale, Tiro a Segno e San Vitale

COMUNE	CAMPO POZZI	Numero pozzi	Dati HERA 2006: Volumi di acqua prelevati (Mm ³ /y)	Piano campagna	Profondità media dei pozzi	Filtri (m)	
						da	a
Bologna	Borgo Panigale	13	13.6	43,5	345,1	93	346
Bologna	Tiro a Segno	13	11.3	40,8	347,5	92	334
Calderara di Reno	San Vitale	10	15.3	33,0	397,6	95	430

5.1.2.2 *Prelievi industriali ed irrigui*

Nella Figura 5.5 sono riportate le ubicazioni planimetriche dei prelievi industriali ed irrigui che sono stati quantificati in base alle stime del Piano di Tutela delle Acque. Tali stime, effettuate su base annua e disaggregate nello spazio su base comunale, sono state successivamente calendarizzate su base mensile. Nel presente lavoro, al fine di rappresentare al meglio il totale dei prelievi effettuati sulla conoide del Fiume Reno, sono stati considerati i prelievi relativi ai seguenti comuni: Bologna, Caldera di Reno, Castel Maggiore, Argelato e Sala Bolognese che complessivamente ricoprono il territorio corrispondente a gran parte della conoide del Fiume Reno.

Prendendo a riferimento l'areale più ristretto così costituito (cinque comuni) la Figura 5.6 riporta la ripartizione, relativamente al periodo compreso tra gennaio 2005 e marzo 2007, dei prelievi di acque sotterranee per i diversi usi associabili alla conoide del Fiume Reno. I prelievi civili presso i tre campi pozzi Hera rappresentano mediamente circa l'80% dei prelievi da falda totali mentre i prelievi industriali ed irrigui ne rappresentano circa il 20 %.

Figura 5.4: Carta della conoide del Reno con i punti dei prelievi da falda e da fonte superficiale

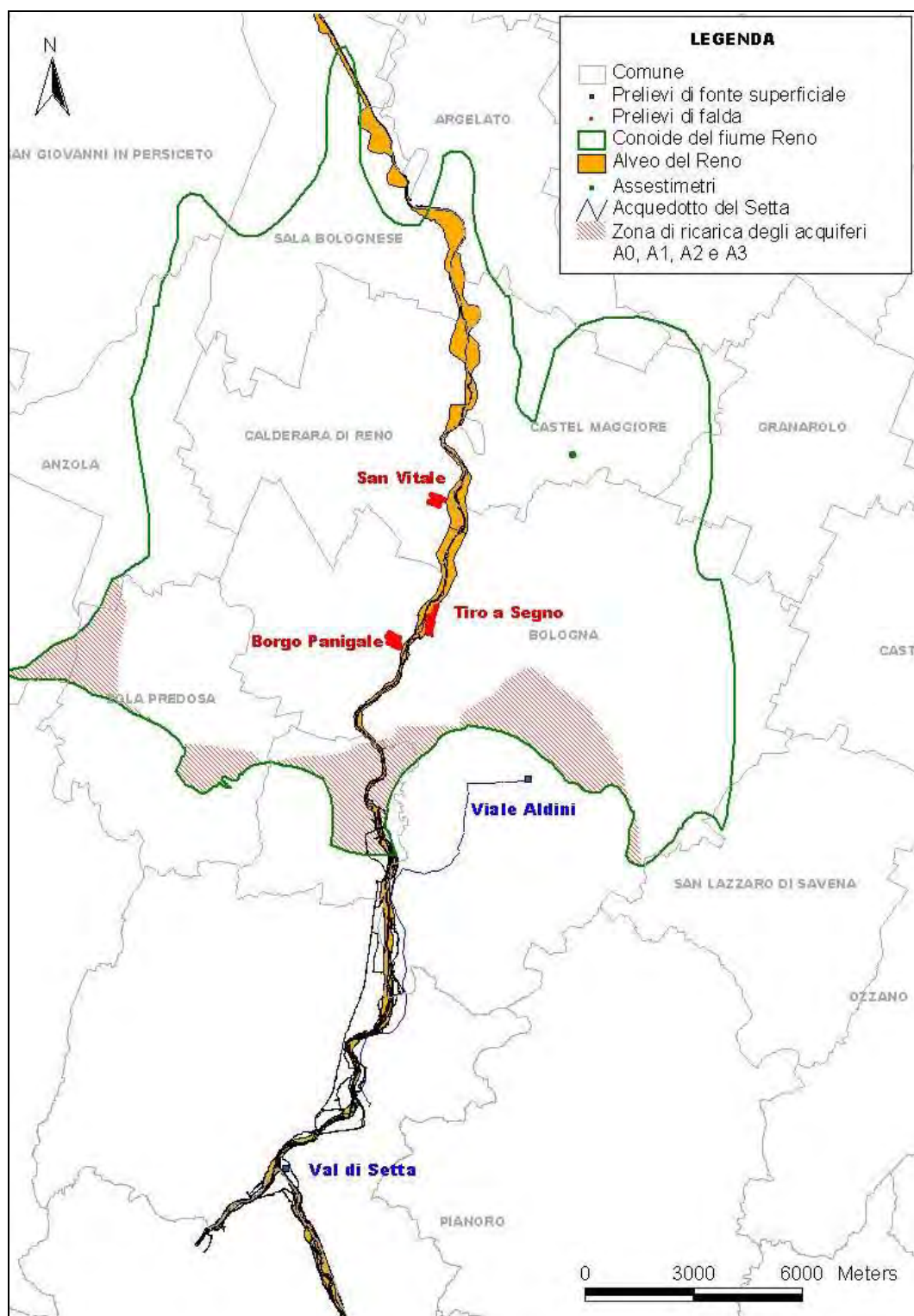


Figura 5.5: Carta delle ubicazioni dei prelievi civili, industriali ed irrigui.

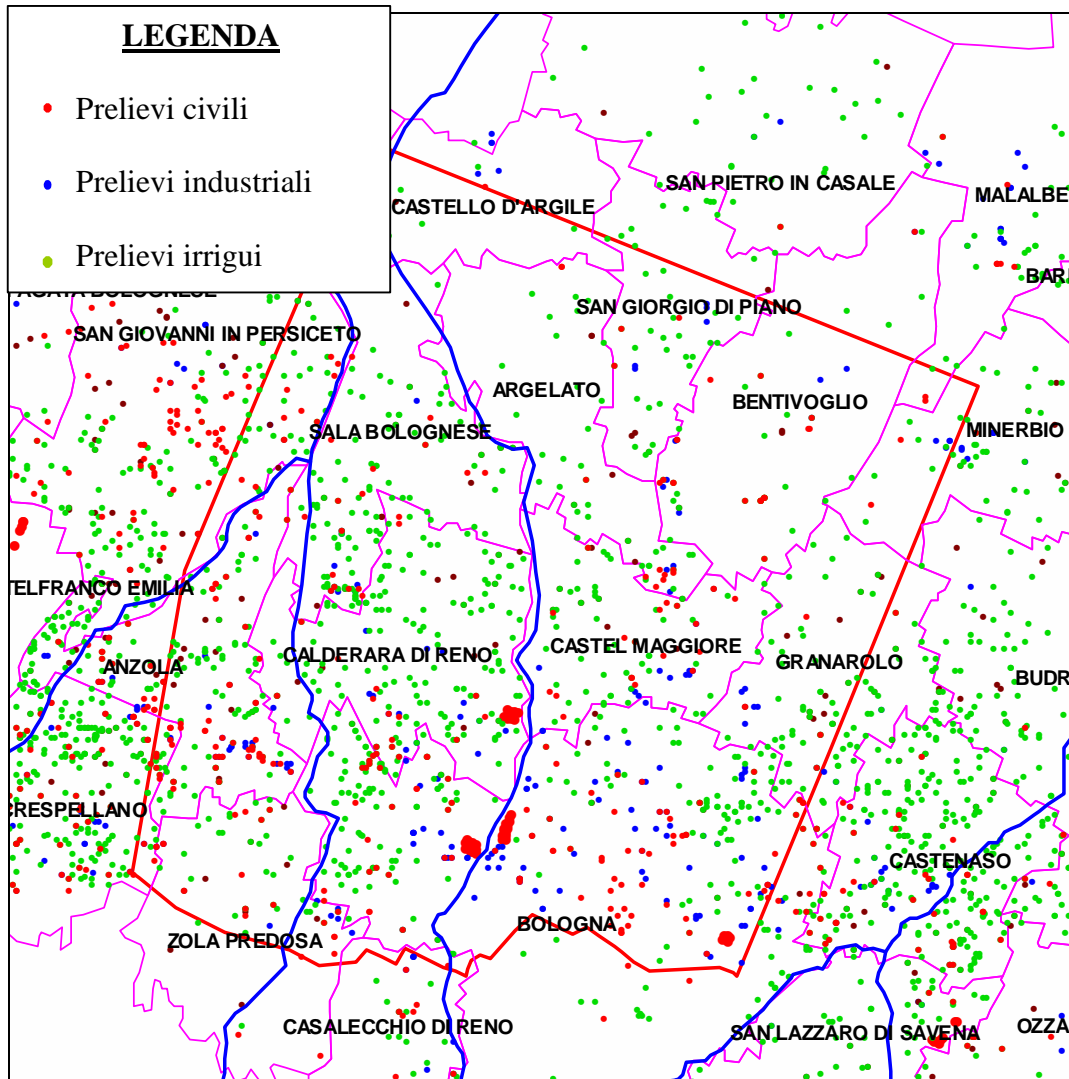
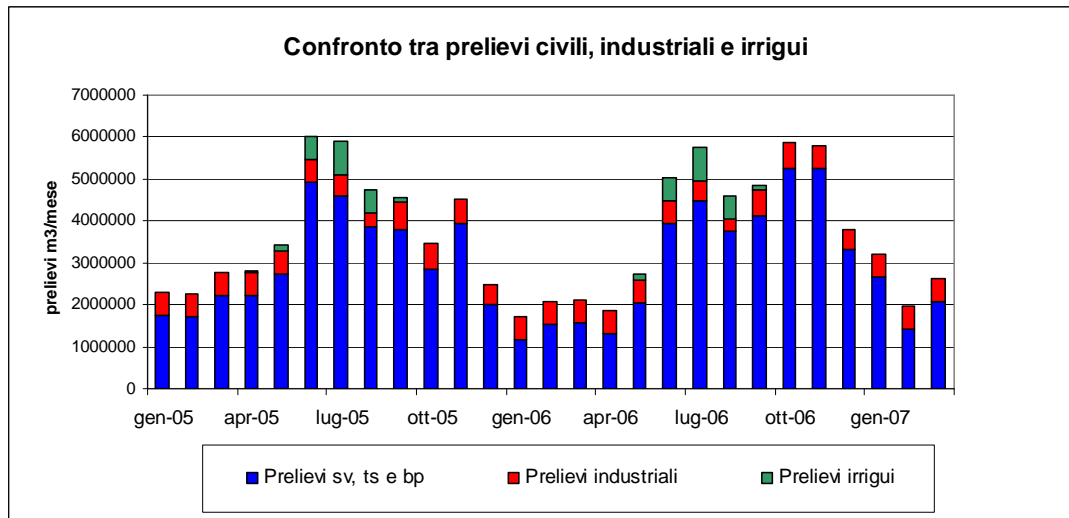
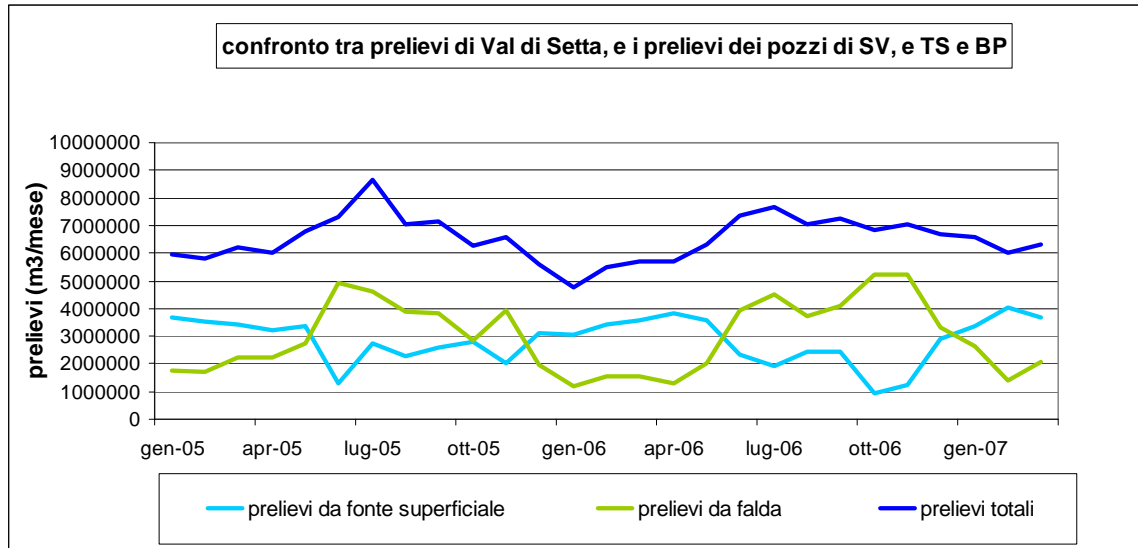


Figura 5.6: ripartizione dei prelievi civili, industriali e irrigui per ogni mese



A completamento dell'analisi e per la migliore comprensione della dinamica stagionale dei prelievi da falda la Figura 5.7 riporta, come ulteriore confronto, le voci presenti nei "Rapporti di esercizio dell'acquedotto" forniti da Hera, che nel loro complesso rappresentano i volumi di acque derivanti da fonte superficiale immessi in acquedotto dall'impianto di potabilizzazione della Val di Setta (Val di Setta e Viale Aldini).

Figura 5.7: confronto tra le somme, per ogni mese, dei prelievi di falda e da fonte superficiale

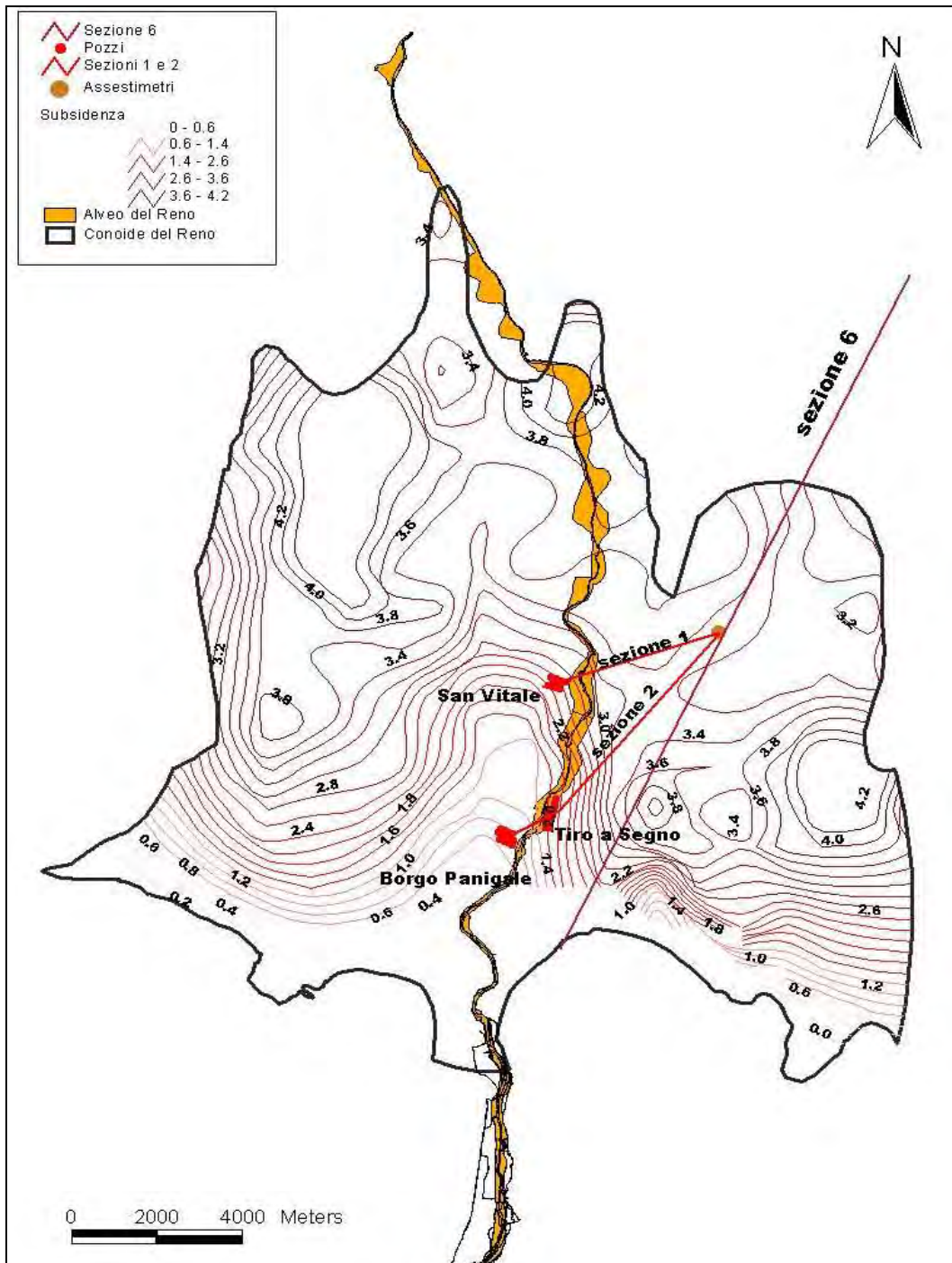


La figura conferma il fatto che i prelievi da falda e di acqua superficiale hanno andamenti complementari: a fronte di una maggiore disponibilità da fonte superficiale (in inverno ed inizio primavera) si assiste ai minimi prelievi di acque sotterranee mentre al contrario i prelievi da falda sono maggiori durante l'estate e l'autunno per compensare la minor disponibilità da fonte superficiale. La somma delle due tipologie di prelievo mostra anche un'evoluzione sinusoidale con un valore massimo durante il periodo estivo e un valore minimo durante il periodo invernale.

5.1.3 La Rete Regionale di Monitoraggio della Subsidenza

La Figura 5.8 riporta le velocità di abbassamento del suolo medie nel periodo 1992-1999 rilevate dalla Rete Regionale di Monitoraggio della Subsidenza. Tale elaborato rappresenta una analisi di dettaglio rispetto a quanto riportato in [7] (Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2003). *Rete regionale di controllo della subsidenza: misura della rete GPS*. Relazione finale.) ed eseguita nell'ambito del già citato Studio sulla Conoide del Reno ([1], Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna, Autorità di Bacino del Reno (2005). *Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la realizzazione di un modello idrogeologico per la gestione sostenibile delle risorse idriche*. Rapporto tecnico). La figura evidenzia in corrispondenza degli assestimetri di Castel Maggiore una velocità di abbassamento compresa nell'intervallo 3.2-3.4 cm/anno.

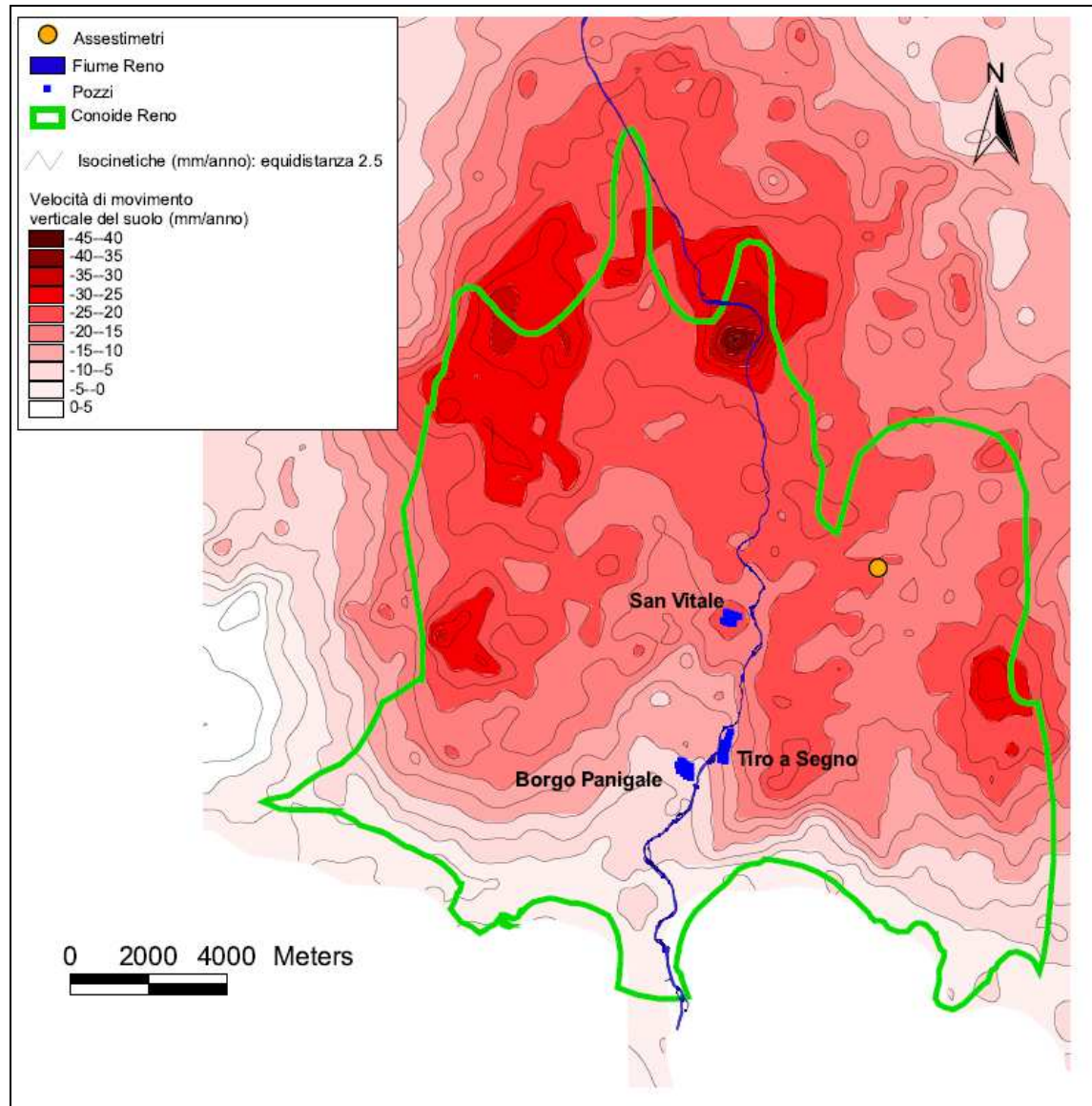
Figura 5.8: subsidenza nel periodo 1992-1999 (cm/anno) (da [1], Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna, Autorità di Bacino del Reno (2005). *Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la realizzazione di un modello idrogeologico per la gestione sostenibile delle risorse idriche. Rapporto tecnico*)



Gli ultimi dati disponibili fanno invece riferimento al successivo rilievo della subsidenza condotto con analisi interferometrica ([5], Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2007). *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Analisi interferometrica. Rapporto tecnico.*) e della cui elaborazione per la provincia di Bologna è riportato un dettaglio

nella successiva Figura 5.9. La figura evidenzia in corrispondenza degli assestimetri di Castel Maggiore una velocità di abbassamento di circa 2 cm/anno.

Figura 5.9: subsidenza nel periodo 2002-2006 (mm/anno), (da [5], Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2007). *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Analisi interferometrica. Rapporto tecnico.*)



La diminuzione delle velocità medie di abbassamento del suolo nel periodo 2002-2006 rispetto al periodo precedente 1992-1999 rappresenta una evidenza chiara di attenuazione del fenomeno per tutto l'areale bolognese dove comunque permangono le maggiori velocità medie di abbassamento del suolo nel contesto regionale, pari a 20 mm/anno. ([5] Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2007). *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Analisi interferometrica. Rapporto tecnico.*)

5.2 ANALISI DI DETTAGLIO DEI DATI ASSESTIMETRICI DI CASTEL MAGGIORE

5.2.1 Evoluzione della subsidenza a Castel Maggiore

La Figura 5.10 mostra gli andamenti rilevati dai due assestimetri di Castel Maggiore, uno a 100 metri di profondità (complessi acquiferi A0 e A1), l'altro a 200 metri di profondità (complessi acquiferi A0, A1, A2 e A3). Il primo misura la compattazione dell'intervallo tra 0 e 100 metri, il secondo quella complessiva tra 0 e 200 metri dal piano campagna, e quindi per differenza tra i due si ottiene la compattazione dello strato compreso tra i 100 ed i 200 metri di profondità.

La successiva Figura 5.11 riporta gli stessi dati rispetto alla una quota fissa posta a - 200 m dal piano campagna. La figura evidenzia che la curva dell'assestometro dei 200 metri rappresenta il profilo di abbassamento del piano campagna stesso mentre la curva differenza dei due assestimetri rappresenta il movimento della quota dei -100 m dal piano campagna. In figura, nell'asse delle ordinate (quota in m rispetto al piano campagna) viene riportato l'abbassamento rilevato dagli assestimetri (in mm*1000) con una opportuna esagerazione della scala in modo da renderlo visibile sull'asse del grafico.

L'analisi della Figura 5.10, dove lo zero delle ordinate rappresenta la situazione iniziale ed i valori sul medesimo asse i mm di abbassamento del suolo rispetto a tale riferimento temporale, permette di rilevare quanto segue:

- i due assestimetri (0/-100m e 0/-200m) mostrano andamenti simili tra loro con un andamento ciclico/stagionale per entrambi gli intervalli. L'abbassamento del suolo avviene durante i periodi estivi mentre si assiste ad una stabilizzazione durante i periodi invernali. La primavera e l'estate 2005 sono caratterizzate da una fase di abbassamento del suolo, poi, c'è stato un innalzamento durante l'autunno e una stabilizzazione fino all'estate 2006. In seguito, si osserva un nuovo abbassamento all'inizio dell'estate 2006, che si stabilizza successivamente fino alla primavera 2007. Seguono poi le due rapide variazioni tra aprile e luglio: due innalzamenti del suolo in aprile e in giugno (più importante per l'intervallo 0/-100m), seguiti rispettivamente da due abbassamenti del suolo in maggio e luglio. Da luglio 2007 si registra il ripetersi della fase estiva di abbassamento del suolo prima repentina e poi in rallentamento nei mesi di settembre ed ottobre al termine dei quali si ripresenta la fase ciclica di innalzamento del suolo;
- lo schiacciamento dello strato compreso tra i 100 e 200 metri di profondità viene calcolato per differenza tra gli abbassamenti dei due assestimetri e mostra una evoluzione abbastanza lineare, eccetto durante l'estate 2005, quando la subsidenza ha subito una crescita e un abbassamento repentino (questa evoluzione potrebbe essere legata ad una fase iniziale di assestamento degli assestimetri). Tra l'autunno 2005 e la primavera 2007 si assiste ad un abbassamento complessivo di 5 millimetri con una dinamica alquanto regolare. Invece, tra aprile 2007 e settembre 2007, si possono constatare delle piccole variazioni che sembrano in contrasto con quelle osservate per gli intervalli 0/-100m e 0/-200m, con un valore complessivo della subsidenza registrata sia di circa 3 millimetri. La fase successiva compresa tra ottobre 2007 e giugno 2008 si presenta abbastanza regolare con un abbassamento complessivo di 7 mm.

Figura 5.10: Evoluzione della subsidenza a Castel Maggiore (maggio 2005-giugno 2008)

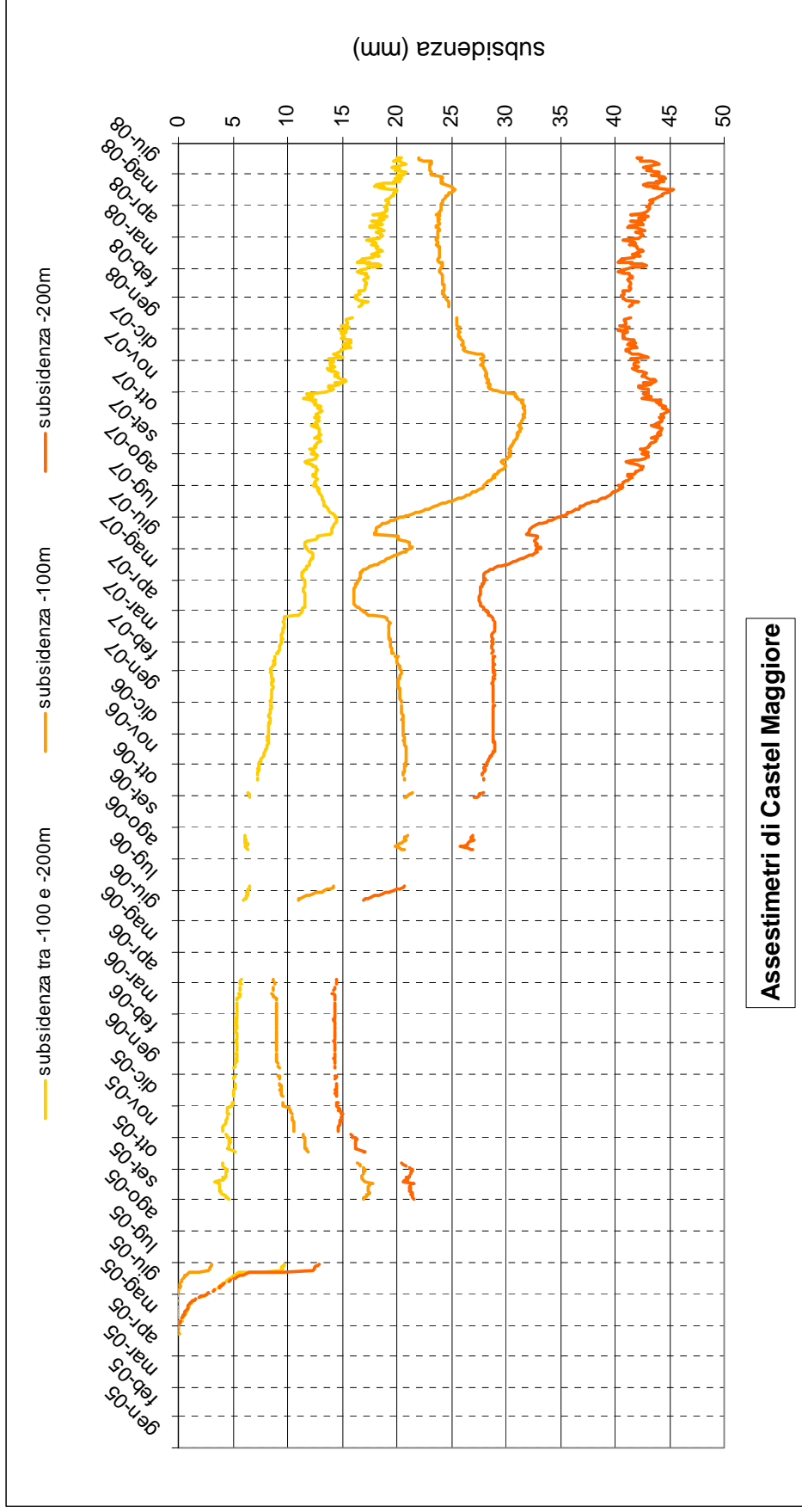
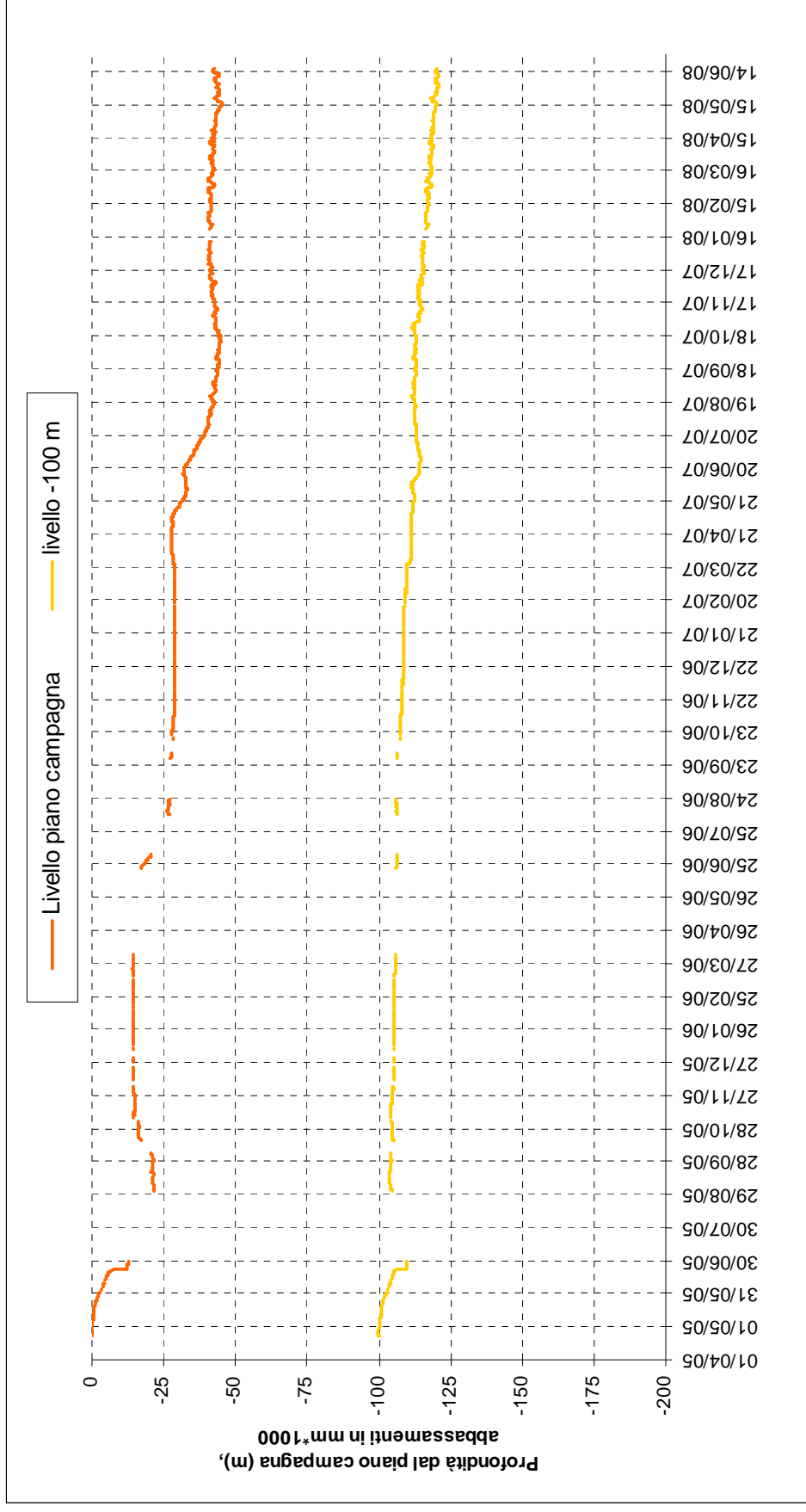


Figura 5.11: Evoluzione della subsidenza a Castel Maggiore (maggio 2005-giugno 2008)



5.2.2 Confronto tra subsidenza e prelievi nel breve periodo

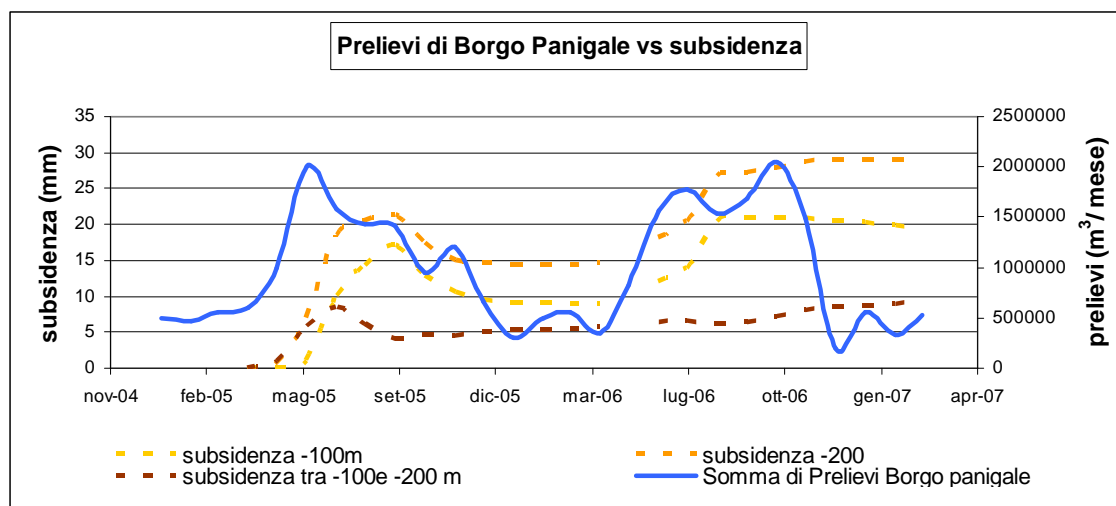
Allo scopo di valutare i possibili rapporti tra la ciclicità stagionale rilevata dai dati assestimetrici e la ciclicità stagionale del sistema dei prelievi di acque sotterranee della conoide vengono ora riportate alcune valutazioni². Nei grafici seguenti vengono confrontati la subsidenza misurata dagli assestimetri di Castel Maggiore ed i prelievi effettuati nei tre campi pozzi Hera presenti sulla conoide del Fiume Reno. I dati disponibili permettono l'analisi nel biennio compreso tra aprile 2005 e aprile 2007. L'analisi della Figura 5.12, della Figura 5.13 e della Figura 5.14 evidenzia come l'evoluzione dei prelievi effettuati sui tre siti (Borgo Panigale, Tiro a Segno e San Vitale) rispecchi la stessa dinamica stagionale rilevata dai due assestimetri per quel che riguarda la fase di abbassamento del suolo (maggio-giugno 2005 e 2006), con il picco dei prelievi che risulta sfasato ed in anticipo rispetto al picco di subsidenza. La Figura 5.15 riporta la somma dei prelievi dei tre campi pozzi e totale comprensiva degli altri usi ed anche in questo il collegamento con la subsidenza risulta evidente (nelle fasi subsidenti).

Lo stessa valutazione non può però essere fatta per l'intervallo -100 m e -200 m, dove invece lo schiacciamento avviene in modo abbastanza regolare, senza evidenti ciclicità stagionali e dove non appare alcun segnale del forte aumento dei prelievi durante i periodi estivi (nel 2006 e nel 2007).

Inoltre nell'anno 2006 a fronte della forte riduzione dei prelievi (ottobre) non si assiste, come per l'anno precedente, ad un recupero della quota del terreno.

Tutto ciò induce a ritenere che la correlazione diretta tra le variazioni cicliche stagionali delle due grandezze in esame (subsidenza e prelievi) non siano bene correlabili e quindi il loro rapporto non sia sufficiente per l'interpretazione dei dati assestimetrici. Occorrerà quindi estendere l'analisi anche ad altri fattori come verrà descritto in seguito.

Figura 5.12: Confronto tra i prelievi di Borgo Panigale e la subsidenza



² la correlazione ricercata riguarda l'eventuale incidenza dei forti aumenti dei prelievi nel periodo estivo sull'abbassamento registrato dagli assestimetri nel medesimo periodo. Si sottolinea che la correlazione ricercata non riguarda i rapporti di causa-effetto tra prelievi e subsidenza in termini generali.

Figura 5.13: Confronto tra prelievi di Tiro a Segno e la subsidenza

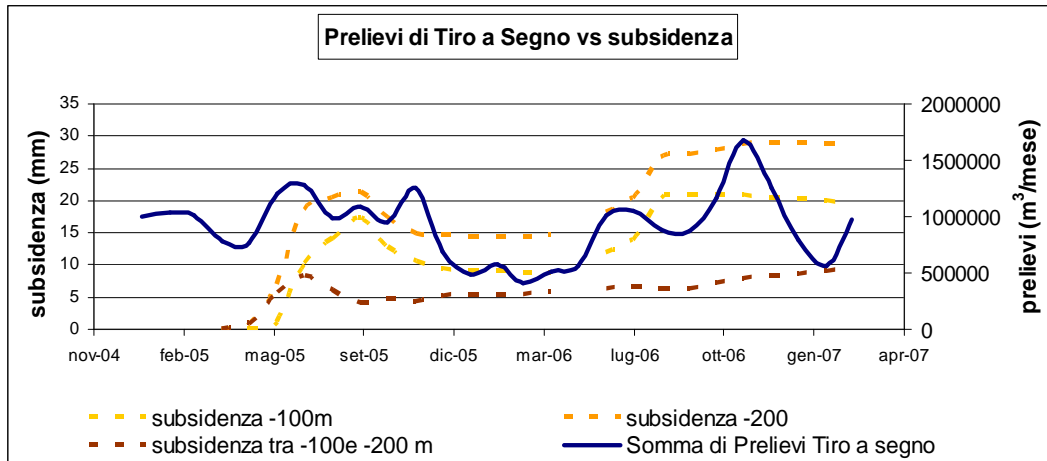


Figura 5.14: Confronto tra prelievi di San Vitale e subsidenza

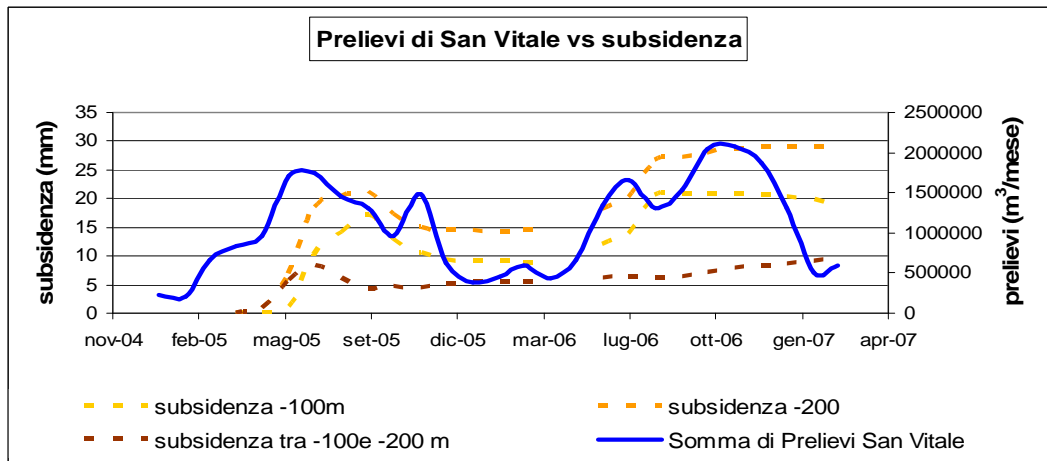
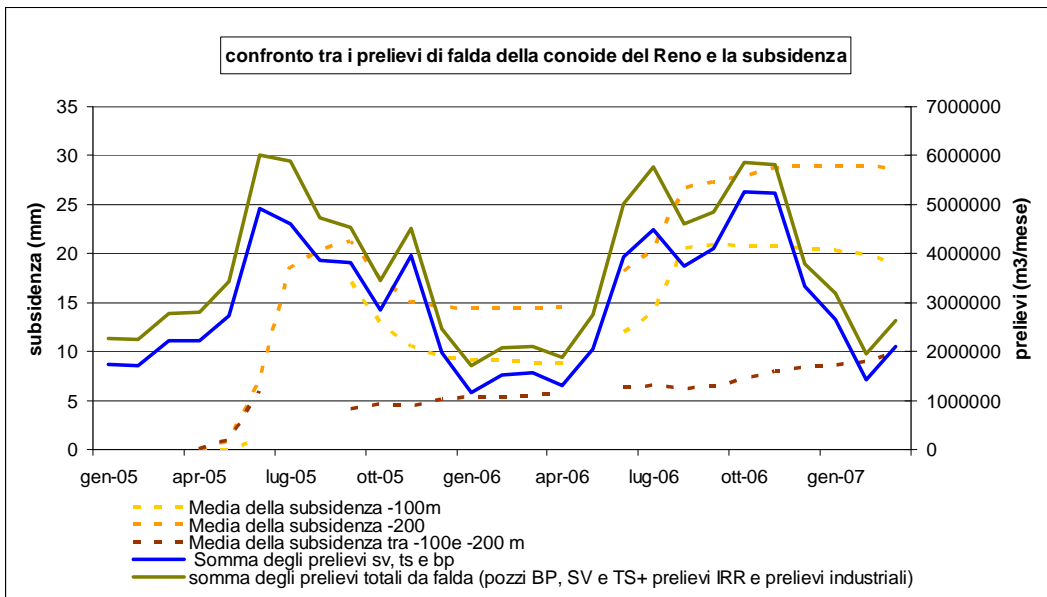


Figura 5.15: Confronto tra prelievi totali e subsidenza per ogni mese



5.2.3 Confronto tra subsidenza e pluviometria

Al fine di confrontare i dati pluviometrici con la subsidenza misurata a Castel Maggiore, si è fatto riferimento alla stazione pluviometrica di Calderara di Reno (inizialmente, poi sostituita dalla stazione di Bologna), che è la più vicina al luogo di misurazione degli assestimetri. La Figura 5.16 e la Figura 5.17 riportano i dati rilevati dagli assestimetri dall'inizio delle rilevazioni fino al mese di giugno 2008 in sovrapposizione alla pioggia giornaliera e cumulata nel medesimo periodo. L'analisi delle figure permette di rilevare quanto segue:

- durante l'estate 2005 l'abbassamento del suolo è cresciuto fortemente. Poi in autunno, ci sono state forti precipitazioni (circa 400 mm) accompagnate da un segnale di innalzamento del suolo rilevato da entrambi gli assestimetri di 6-7 mm (ottobre 2005, caso (a)). Durante l'estate 2006, la subsidenza cresce di nuovo, e rimane abbastanza stabile durante l'autunno e l'inverno, periodo durante il quale le precipitazioni sono state relativamente scarse (meno di 100 mm). Si possono poi notare da aprile a giugno 2007, due eventi successivi (caso (b), marzo-aprile 2007 e caso (c), giugno 2007) caratterizzati entrambi da precipitazioni superiori ai 100 mm in un intervallo di tempo molto breve accompagnati da segnali di innalzamento del suolo di circa 1 mm per l'assestimetro più profondo e di circa 3 mm per quello più superficiale. I due eventi sono intervallati da un abbassamento del suolo di circa 4 mm registrato da entrambi gli assestimetri. Situazione analoga si presenta ancora nel mese di ottobre 2007 (caso (d)) e nel mese di giugno 2008 (caso (e)). Nella Figura 5.17 sono evidenziati i cinque periodi appena descritti.
- l'evoluzione dello strato compreso tra i 100 m e 200 m di profondità in rapporto alle precipitazioni permette un diverso raffronto: la prima situazione (caso (a)) fornendo effetti di innalzamento del suolo di uguale consistenza per i due assestimetri non permette di attribuire tale effetto in misura maggiore o minore ad uno dei suoi intervalli (0-100 m e 100-200 m). Nella lettura della seconda sequenza (casi (b) e (c)), la diversa entità dell'innalzamento del suolo rilevata dai due assestimetri porta ad una indicazione di schiacciamento dello strato sottostante pari proprio a tale differenza.

Si potrebbe quindi supporre che questo fenomeno d'innalzamento e di abbassamento del suolo durante le forti piogge sia dovuto, almeno in parte, alle caratteristiche litologiche delle zone di evapotraspirazione e di ritenzione e dunque ai primi dieci metri del sotto-suolo. Al fine di verificare e quantificare la reale possibilità di questo meccanismo sono state effettuate (a cura del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli) alcune indagini mirate come verrà meglio descritto nel successivo paragrafo 5.2.5.2.

Figura 5.16: confronto tra subsidenza e pioggia giornaliera

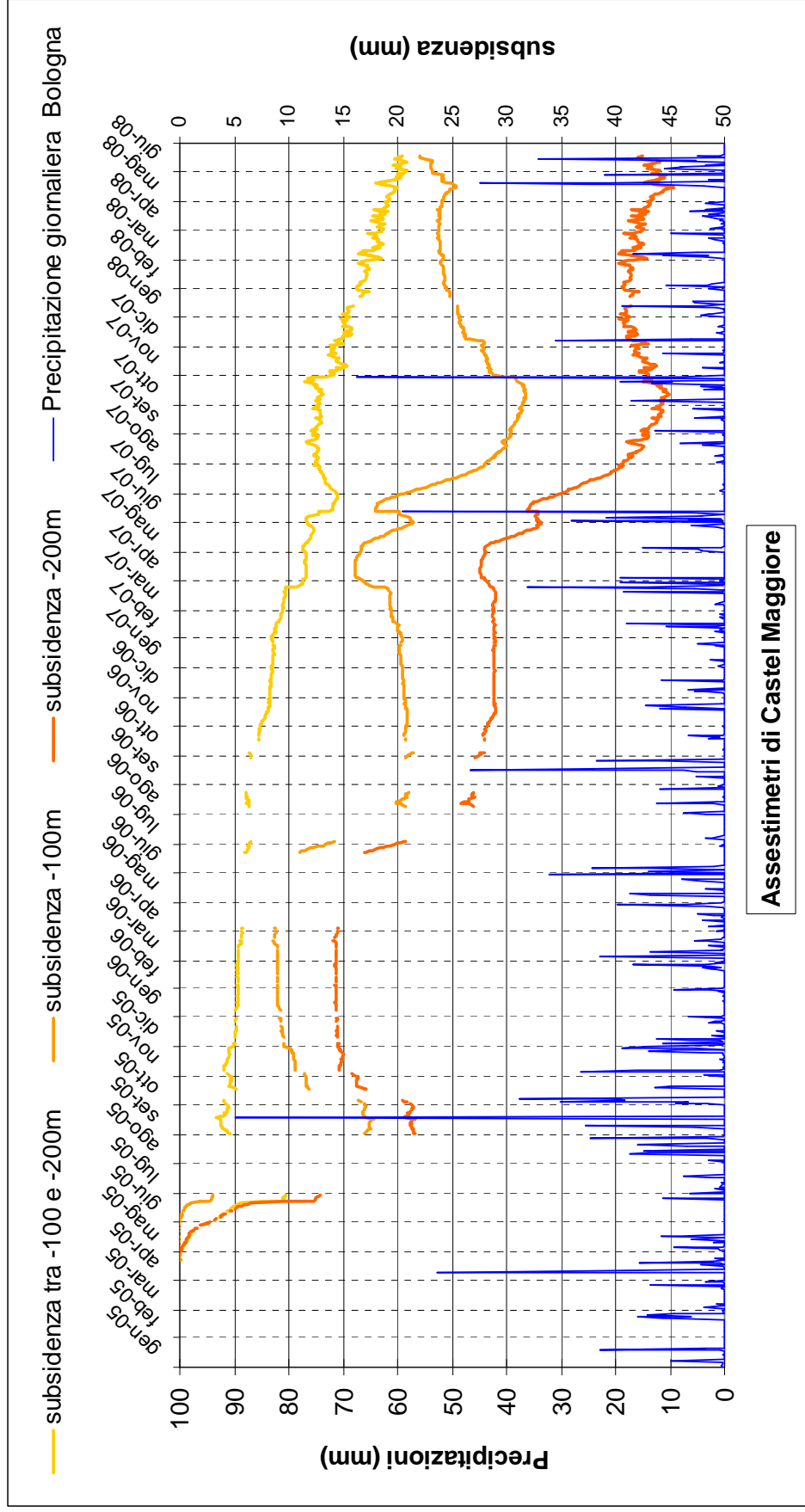
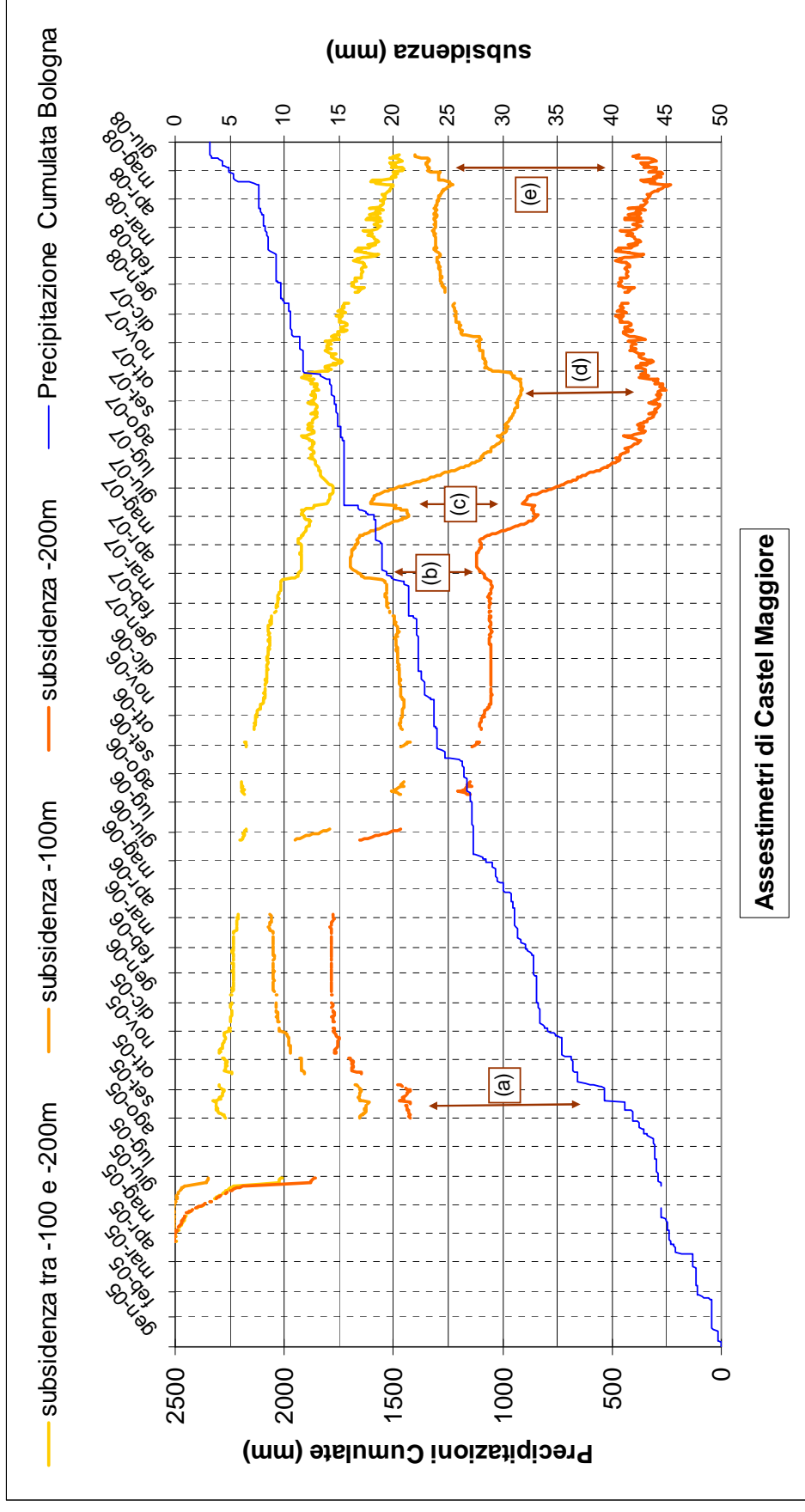


Figura 5.17: confronto tra subsidenza e pioggia cumulata



5.2.4 Confronto con i dati satellitari

Al fine di trovare conferma della validità delle misure assestometriche, con particolare riferimento al verificarsi dei frequenti innalzamenti della quota del terreno, per confronto è stata effettuata un'analisi dei dati altimetrici satellitari disponibili nei dintorni degli assestimetri per individuare le analogie degli andamenti della subsidenza registrata con i due metodi.

Sono state quindi scelte le misure altimetriche relative a 113 *Permanent Scatters* ubicati entro il raggio di 1.500 m dagli assestimetri di Castel Maggiore. Tali misure sono state fornite dai satelliti ERS1 e ERS2 nell'ambito della *track* 165 discendente nel periodo compreso fra il 1992 e il 2000 e sono restituite rispetto a un punto di riferimento.

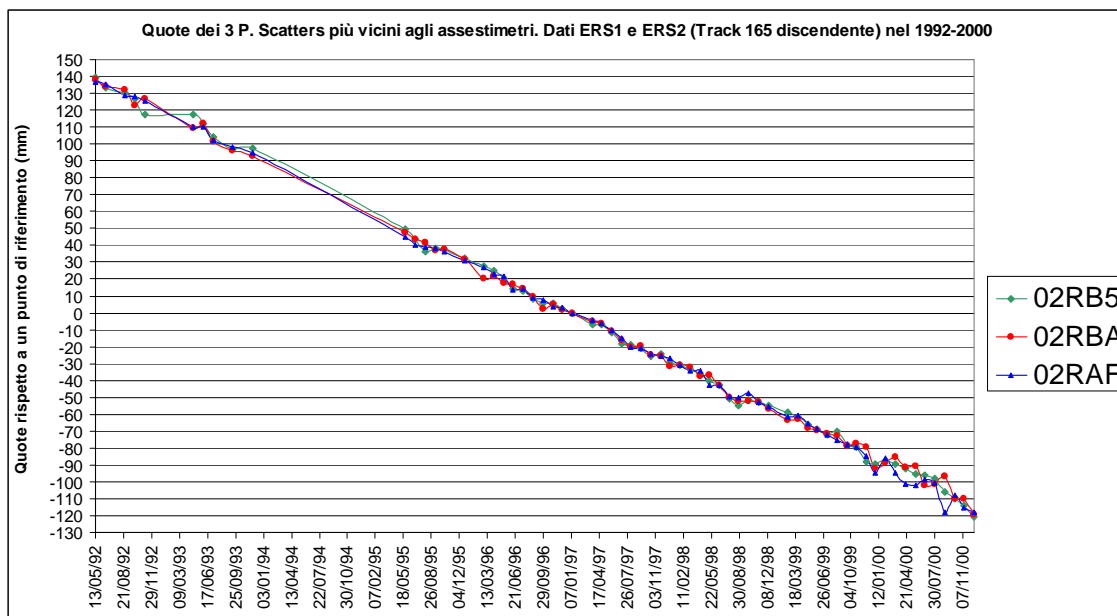
Il numero dei *Permanent Scatters* presenta la seguente distribuzione spaziale rispetto agli assestimetri: 10 entro il raggio di 500 m, 54 compresi fra 500 e 1.000 m e 49 fra 1.000 e 1.500 m.

Il confronto degli andamenti nel tempo delle quote altimetriche del terreno registrate dagli assestimetri fra aprile 2005 e dicembre 2007 e dai satelliti ERS1 e ERS2 fra maggio 1992 e dicembre 2000 fa emergere elementi comuni alle due tipologie di analisi. Infatti, sebbene si tratti di misure effettuate con metodi concettualmente molto diversi, il comportamento del terreno nel tempo mostra una evidente tendenza alla subsidenza nel medio e lungo periodo interrotta da intervalli ciclici caratterizzati da rialzamenti del terreno.

Di seguito viene riportato come esempio il grafico degli andamenti delle quote altimetriche registrate dai satelliti negli anni 1992-2000 e relative ai tre *Permanent Scatters* con ubicazione più prossima agli assestimetri di Castel Maggiore.

Le distanze dei tre *Permanent Scatters* denominati "02RBA", "02RB5" e "02RAF" sono rispettivamente pari a circa: 85, 155 e 165 m.

Figura 5.18: quote dei 3 PS più vicini agli assestimetri



Il grafico di Figura 5.17 riporta gli andamenti della subsidenza registrati dagli assestimetri di Castel Maggiore fra aprile 2005 e giugno 2007 e le precipitazioni cumulate misurate a Bologna nello stesso periodo. Da tale grafico si riscontra che il periodo dell'anno in cui si verifica la maggiore subsidenza è quello estivo compreso fra maggio e agosto, mentre quello più stabile, ovvero con variazioni altimetriche del terreno all'incirca nulle, è quello autunnale e invernale

compreso fra novembre e marzo. Si notano inoltre alcuni rialzamenti del terreno distribuiti fra i mesi di agosto e ottobre, oltre a quelli registrati nel 2007 in aprile, giugno e dicembre. Tali rialzamenti riguardano principalmente i sedimenti compresi entro i primi 100 m di profondità rispetto al piano campagna e sono quasi sempre collegati a eventi significativi di precipitazioni. Qui di seguito vengono riportate due tabelle riassuntive al fine di confrontare le differenze di subsidenza registrate fra i dati degli assestimetri nel 2005-2007 (Tabella 5.2) e quelli forniti dai satelliti ERS1 e ERS2 (Tabella 5.3) fra il 1992 e il 2000.

Si può quindi vedere dalla Tabella 5.3 che le velocità medie di subsidenza del terreno misurate dai satelliti sui *Permanent Scatters* ubicati nel raggio di 500 m dagli assestimetri risultano comprese fra 27.6 e 30.2 mm/anno con valore medio pari a 29.12 mm/anno. Tali valori sono confrontabili con le velocità medie di abbassamento del suolo relative al periodo 1992-1999 (Figura 5.8) rilevate dalla rete regionale di monitoraggio della subsidenza ([7], Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2003). *Rete regionale di controllo della subsidenza: misura della rete GPS* . Relazione finale.) che riportano un valore di 33 mm/anno in corrispondenza dell'ubicazione degli assestimetri. Tali valori confrontati con quelli misurati dall'assestimetro più profondo (Tabella 5.2) risultano essere all'incirca doppi rispetto a questi ultimi. In merito a tale risultato, però è opportuno sottolineare che il paragone fra i due gruppi di dati non è molto significativo visto che si tratta di archi temporali diversi. I dati assestimetrici sono infatti in linea con le più recenti misure della rete della subsidenza con analisi interferometrica ([5], Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2007). *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Analisi interferometrica*. Rapporto tecnico.) che riportano abbassamenti di circa 20 mm/anno.

Tabella 5.2: Velocità di subsidenza medie annue calcolate dagli assestimetri di Castel Maggiore

Periodo estivo	Subsidenza assestimetri (mm/4 mesi)	Subsidenza assestimetri (mm/giorno)	Periodo annuale	Subsidenza assestimetri (mm/anno)
Mag-Ago 2005	21.6	0.176	Mag 2005-Apr 2006	14.5
Mag-Ago 2006	12.5	0.102	Mag 2006-Apr 2007	13.6
Mag-Ago 2007	14.3	0.116		

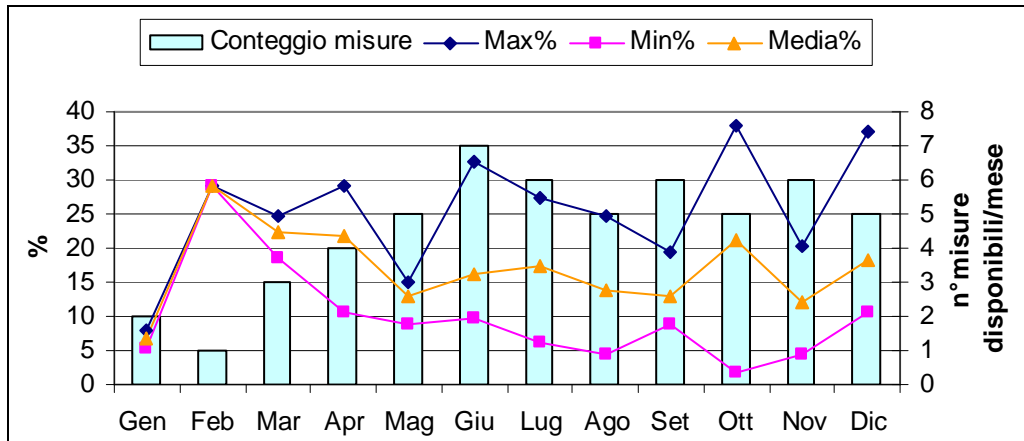
Tabella 5.3: Velocità di subsidenza medie annue calcolate nel periodo 1992-2000 (dati ERS1 e ERS2)

	Subsidenza <u>minima</u> ERS1 ERS2 (mm/anno)	Subsidenza <u>massima</u> ERS1 ERS2 (mm/anno)	Subsidenza <u>media</u> ERS1 ERS2 (mm/anno)
<i>Permanent Scatters</i> nel raggio di 500 dagli assestimetri	27.60	30.20	29.12
<i>Permanent Scatters</i> ubicati fra 500 e 1000 m dagli assestimetri	23.30	30.70	27.28
<i>Permanent Scatters</i> ubicati fra 1000 e 1500 m dagli assestimetri	23.90	33.30	26.35

Nel grafico di Figura 5.19 sono riportate per ciascun mese le percentuali massime, minime e medie del numero di PS con rialzamenti del terreno registrati da ERS1 ed ERS2 nei vari passaggi effettuati negli anni dal 1992 al 2000.

Nell'elaborazione di tale grafico, fra tutte le misure disponibili, sono state scelte quelle rilevate fra un passaggio e l'altro dei satelliti compreso in un periodo temporale variabile fra 34 e 36 giorni, mentre sono state scartate le altre misure maggiormente distanziate nel tempo (da 70 fino a 548 giorni). Sono inoltre state escluse nell'analisi le misure effettuate da ERS2 successive di un solo giorno rispetto a quelle di ERS1. Tali misure sono infatti troppo ravvicinate nel tempo e non si dimostrano attendibili in quanto anche più del 50 % delle misure stesse registrano rialzamenti del terreno dell'ordine anche di diversi mm, che quindi non possono essere reali, ma sembrano dovuti ad un probabile rumore di fondo.

Figura 5.19: analisi del numero di PS con rialzamenti del terreno registrati nei diversi mesi all'interno del periodo 1992-2000



Dal grafico si riscontra che le percentuali di rialzamenti del terreno diminuiscono da febbraio a maggio, passando da valori medi di quasi il 30 %, a circa il 22 % di marzo-aprile, fino a scendere al 13 % in maggio. Nel periodo estivo compreso fra maggio e settembre le percentuali medie dei rialzamenti del terreno rimangono nel complesso abbastanza stabili con valori mensili fra i più contenuti dell'anno e compresi circa fra il 13 % e il 17 %. Il trimestre compreso fra ottobre e dicembre, mostra ad eccezione di novembre, percentuali medie dei rialzamenti del terreno superiori a quelle registrate nel periodo estivo con valori compresi fra il 21 % e il 18 % per i mesi di ottobre e dicembre, mentre in novembre è minore e arriva solo al 12 %. Per il mese di gennaio si riscontrano le percentuali di rialzamenti del terreno più contenute dell'anno con valore medio del 6.5 %.

Nel grafico è stato inoltre inserito un istogramma con il numero delle misure disponibili per ciascun mese per il periodo compreso fra il 1992 e il 2000, in modo da consentire di dare più o meno peso alle medie mensili riferite all'intero periodo, in rapporto al numero delle misure disponibili. Secondo quest'ultima valutazione i mesi con le percentuali di rialzamenti del terreno meno rappresentative dell'intero periodo sono gennaio e febbraio.

Nel complesso si può notare che il comportamento del movimento verticale del terreno ubicato in corrispondenza degli assestimetri di Castel Maggiore mostra un certo andamento stagionale, quindi in relazione con condizioni meteo-climatiche (temperature e precipitazioni). Infatti in corrispondenza del periodo estivo si registrano il minor numero di rialzamenti del terreno, ovvero in tale periodo si assiste alla maggiore subsidenza, mentre durante la restante parte dell'anno la subsidenza è complessivamente più contenuta.

Confrontando la distribuzione mensile nel periodo 1992-2000 dei rialzamenti del terreno registrati dai satelliti ERS sui *Permanent Scatters* con l'andamento della subsidenza misurato dall'assestmetro più profondo nel periodo 2005-2007, si può notare che esiste abbastanza corrispondenza fra le due analisi, le quali indicano come mesi caratterizzati da una maggiore subsidenza, accompagnata da una minore frequenza di rialzamenti del terreno, quelli del periodo estivo compresi fra maggio e agosto.

Per questo motivo si è ritenuto utile effettuare un confronto su tali mesi estivi fra i dati satellitari e quelli dell'assestometro al fine di ricavare l'ordine di grandezza della subsidenza estiva media sul lungo periodo 1992-2000 e quella recente per il 2005-2007.

L'elaborazione dei dati satellitari riferiti ai mesi estivi compresi fra maggio e agosto-metà settembre viene riportata Tabella 5.4. con i valori minimi, massimi e medi di subsidenza del terreno ottenuti dalle preventive medie di tutti i *Permanent Scatter* calcolati su ciascuno dei tre gruppi di punti ubicati rispetto all'assestometro: entro un raggio di 500 m, fra 500 e 1000 m e fra 1000 e 1500 m. Dalla tabella si può vedere che i valori medi di subsidenza riferiti ai satelliti per il gruppo dei *Permanent Scatter* più vicini all'assestometro (entro il raggio di 500 m) vanno da un minimo di circa 0.08 mm/giorno a un massimo di circa 0.12 mm/giorno, con una media pari a 0.096 mm/giorno.

Tali valori sono confrontabili con quelli misurati dall'assestometro (vedi la precedente Tabella 5.2) nei periodi estivi del 2006 e del 2007, i cui valori sono pari a circa 0.10-0.12 mm/giorno, mentre nello stesso periodo del 2005 i 0.176 mm/giorno di subsidenza misurati dall'assestometro sono superiori di circa l'80 % rispetto ai dati satellitari. In merito a tale risultato occorre però considerare che i dati degli assestimetri dei primi mesi in cui hanno avuto inizio le misurazioni (da aprile 2005) possono non essere del tutto attendibili a causa di una possibile fase di assestamento iniziale delle misure successiva alla messa in opera degli assestimetri.

Tabella 5.4: Velocità di subsidenza medie per i periodi estivi fra **maggio e agosto-metà settembre** negli anni **1992-2000** (dati ERS1 e ERS2)

	Minimo dei valori medi di subsidenza (mm/giorno)	Massimo dei valori medi di subsidenza (mm/giorno)	Media dei valori medi di subsidenza (mm/giorno)
<i>Permanent Scatters</i> nel raggio di 500 dagli assestimetri	0.081	0.117	0.096
<i>Permanent Scatters</i> ubicati fra 500 e 1000 m dagli assestimetri	0.068	0.101	0.086
<i>Permanent Scatters</i> ubicati fra 1000 e 1500 m dagli assestimetri	0.066	0.088	0.077

Dati per un confronto diretto tra misure assestimetriche e dati satellitari su uno stesso periodo temporale sono disponibili solamente fra aprile 2005 e febbraio 2006. Infatti, grazie al satellite ENVISAT, sono state acquisite fra ottobre 2002 e febbraio 2006 le misure delle quote altimetriche del terreno su 112 *Permanent Scatters* così ubicati rispetto agli assestimetri: 17 entro un raggio di 500 m, 43 fra 500 e 1000 m e 52 fra 1000 e 1500 m.

Di seguito sono stati riportati nello stesso grafico gli andamenti della subsidenza relativi al periodo aprile 2005 e febbraio 2006, forniti sia dagli assestimetri, sia dal satellite ENVISAT (*track* 172 ascendente). I dati satellitari sono stati graficati come valori medi della subsidenza del gruppo dei *Permanent Scatters* più vicini agli assestimetri, ovvero quelli ubicati entro il raggio di 500 m da questi.

Il confronto dei due gruppi di dati mette in luce diversi aspetti che possono essere così riassunti:

- la subsidenza sull'intero periodo in esame (vedi Tabella 5.5) risulta minore per i dati degli assestimetri (14.5 mm), essendo pari a circa il 57 % di quella registrata da ENVISAT (25.3 mm)
- premesso che il passo delle misure ENVISAT è poco più che mensile, mentre per gli assestimetri, sono disponibili misure medie giornaliere, i dati satellitari mostrano

velocità di subsidenza all'incirca costanti nel tempo e senza rialzamenti del terreno. Al contrario questi ultimi sono ben visibili dalle misure fornite dagli assestimetri in autunno e sono quasi sempre in relazione a eventi significativi di precipitazioni

- la subsidenza registrata da ENVISAT è maggiore rispetto ai dati degli assestimetri in primavera e a partire da novembre, mentre nell'estate avviene il contrario
- come già detto in precedenza i dati degli assestimetri dei primi mesi in cui hanno avuto inizio le misurazioni (da aprile 2005) possono non essere del tutto attendibili a causa di una possibile fase di assestamento iniziale delle misure successiva alla messa in opera degli assestimetri. In particolare in questo periodo la subsidenza relativa ai sedimenti compresi fra 100 e 200 m di profondità rispetto al piano campagna risulta superiore mediamente di circa tre volte rispetto a quella relativa ai sedimenti entro i primi 100 m, mentre gli stessi assestimetri misurano un comportamento opposto da settembre, dove i valori di subsidenza relativi ai sedimenti compresi fra 100 e 200 m risultano essere da dalla quarta parte alla metà di quelli relativi ai sedimenti entro i primi 100 m.
- la subsidenza registrata dai dati satellitari nel periodo estivo fra aprile-maggio e agosto è pari a 0.08 mm/giorno, ovvero è circa la metà dei 0.15 mm/giorno misurati dall'assestometro più profondo (vedi Tabella 5.5)

Figura 5.20: confronto tra subsidenza assestimetri ed ENVISAT nel periodo aprile 2005-febbraio 2006

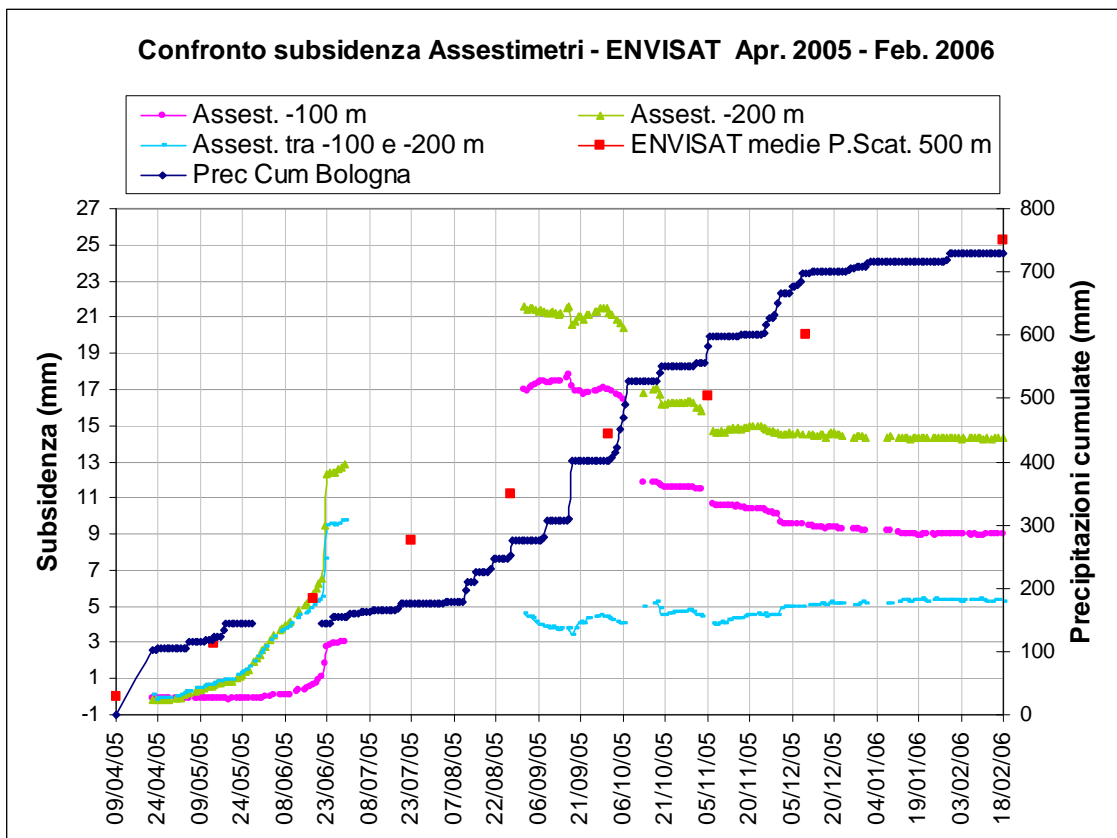


Tabella 5.5: abbassamenti e velocità di subsidenza medie rilevate dagli assestimetri e da ENVISAT

Periodo	Subsidenza Assestmetro a -200 m (mm)	Subsidenza (mm/giorno) Assestmetro a -200 m	Subsidenza (mm) ENVISAT P. Scatters entro 500 m	Subsidenza (mm/giorno) ENVISAT P. Scatters entro 500 m
Apr.2005-Feb.2006	14.52	0.048	25.26	0.080
Apr-Mag.2005-Ago.2006	21.78	0.150	11.23	0.080

5.2.5 Nuovi dati piezometrici e pedologici a supporto dello studio

Al fine di migliorare la comprensione dei fenomeni che regolano l'andamento della subsidenza misurata nei due assestimetri e chiarire in particolare gli andamenti ciclico-stagionali, la loro relazione con il regime dei prelievi e/o il comportamento dei suoli, il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli, in accordo con l'Autorità di Bacino del Reno ed ARPA Ingegneria Ambientale, ha ritenuto opportuno provvedere all'acquisizione dei dati mancanti, tenendo conto anche dell'assenza di dati nelle immediate vicinanze degli assestimetri, sia sull'andamento della piezometria, sia sugli effetti indotti sui terreni di fondazione dei manufatti di alloggiamento degli assestimetri al variare del contenuto idrico dei suoli.

Si è provveduto quindi ad integrare il sistema di monitoraggio della subsidenza con una serie di piezometri attrezzati per il monitoraggio in continuo delle piezometrie relative alle principali falde presenti nei primi 100 metri localizzati nelle immediate vicinanze degli assestimetri (paragrafo 5.2.5.1).

Per quanto attiene la possibilità che la ciclicità stagionale possa essere determinata dagli effetti delle variazioni del regime idrologico dei terreni di fondazione del manufatto di alloggiamento degli assestimetri, si è proceduto alla determinazione delle variazioni dimensionali di alcuni campioni di suolo e di sedimento al passare dallo stato umido allo stato secco (paragrafo 5.2.5.2). A tale scopo, durante l'esecuzione dei sondaggi realizzati per l'installazione dei tubi piezometrici sono stati prelevati, fino alla profondità di circa 4 metri, 8 campioni di suolo e di sedimento e su tali campioni è stata determinata la granulometria. Su alcuni di essi, in base al contenuto in sabbia, si è determinato il coefficiente di estensibilità lineare (COLE).

5.2.5.1 *Istallazione di tre piezometri e analisi dei primi dati disponibili.*

Al fine di acquisire il maggior numero di dati utili per interpretare al meglio i risultati ottenuti dagli assestimetri installati nel maggio 2005 in località Castelmaggiore, il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, in accordo con l'Autorità di Bacino del fiume Reno, ed Arpa Emilia-Romagna - Ingegneria Ambientale, ha progettato e perforato a proprio carico nell'ottobre 2007 tre sondaggi, con successiva istallazione di altrettanti piezometri per il monitoraggio delle falde. I 3 sondaggi sono stati perforati a pochi metri dagli assestimetri.

Uno (il più vicino agli assestimetri), profondo 60 metri è stato eseguito a carotaggio continuo fino a 29 metri di profondità e poi, fino a 60 metri, a distruzione di nucleo. La stratigrafia di questo sondaggio è riportata nella Tabella 5.6. Questo sondaggio ha consentito il campionamento dei terreni al fine della determinazione del COLE (successivo paragrafo 5.2.5.2).

Nel foro di sondaggio è stato messo in opera un piezometro per il monitoraggio del primo acquifero confinato qui presente (A1). Questo piezometro, in relazione alla stratigrafia rilevata, è stato realizzato nel modo seguente:

- da 0 a 32 metri cieco;
- da 32 a 35 fessurato con apertura da 0.3 mm;
- da 35 a 42 cieco;

- da 42 a 60 fessurato con apertura da 0.3 mm.

E' importante notare che l'intervallo tra 32 e 60 metri di profondità è quello in cui sono presenti gli acquiferi più rilevanti in tutto lo spessore dei primi 100 metri di sottosuolo. Quindi questi acquiferi sono significativi per valutare l'eventuale relazione tra la pressione idrica al loro interno (ovvero il loro livello piezometrico), e gli abbassamenti misurati nell'assestometro ancorato a 100 metri di profondità.

Il secondo sondaggio (il più lontano dagli assestimetri), è profondo 20 metri ed è stato perforato a distruzione di nucleo. In questo sondaggio è stato messo in opera un piezometro per il monitoraggio dell'acquifero freatico (A0). Esso, in relazione alla stratigrafia rilevata, è stato realizzato nel modo seguente:

- da 0 a 3 metri cieco;
- da 3 a 20 fessurato con apertura da 0.3 mm.

Il terzo sondaggio (intermedio si due), è profondo 3 metri ed è stato perforato a distruzione di nucleo. In questo sondaggio è stato messo in opera un piezometro per il monitoraggio della falda ipodermica, realizzato nel modo seguente:

- da 0 a 3 fessurato con apertura da 0.3 mm.

Successivamente alla messa in opera dei 3 piezometri, nel novembre 2007 sono state installate due sonde per il monitoraggio in continuo del livello idrico delle falde. Le sonde sono state posizionate solamente nei due piezometri più profondi, dato che il piezometro profondo 3 metri è sempre stato rinvenuto senza acqua.

La Figura 5.21 mostra l'andamento del livello piezometrico riferito al livello del mare dell'acquifero freatico nel periodo dal novembre 2007 al giugno 2008. Come si vede il livello è calato lentamente sino a metà maggio, se pur con una leggerissima (appena un paio di centimetri), stasi / risalita dal gennaio all'aprile 2008, per poi risalire abbastanza bruscamente nell'ultimo periodo di monitoraggio. E' importante notare che l'entità complessiva dell'oscillazione del livello nell'intero periodo di monitoraggio è stata modesta: appena 10 centimetri. A seguito di questa osservazione nel giugno 2008 è stato effettuato uno spurgo del piezometro in questione, tuttavia dopo lo spurgo il livello nel piezometro non ha mostrato modifiche. Le letture sembrerebbero quindi essere corrette; d'altro canto era anche stata effettuata una lettura in un pozzo freatico nei pressi del piezometro in questione che aveva indicato un livello idrico uguale a quello del piezometro.

In considerazione del fatto che il piano campagna è a circa 31 metri s.l.m., la soggiacenza di questo acquifero si è più o meno mantenuta a 4,8 metri. E' interessante notare che con questa soggiacenza la tavola d'acqua dell'acquifero freatico è più alta rispetto al Navile, che scorre poche centinaia di metri a Est e che quindi verosimilmente drena questo acquifero.

Osservando il modo comparato la Figura 5.21 con la Figura 5.22 (che riporta la pluviometria), si nota una buona corrispondenza tra la risalita piezometrica della fine maggio 2008 e le concomitanti piogge, durate parecchi giorni e con i valori massimi (sino a 45 millimetri al giorno), nel periodo in questione. Quindi l'acquifero freatico risente della ricarica delle piogge, specialmente quando queste sono prolungate e riescono così ad attraversare lo spessore di terreno insaturo (4,8 metri).

Figura 5.21: andamento riferito al livello del mare del livello piezometrico nell'acquifero freatico (periodo dal 9/11/2007 al 11/06/2008). La quota del piano campagna è 31 metri s.l.m.

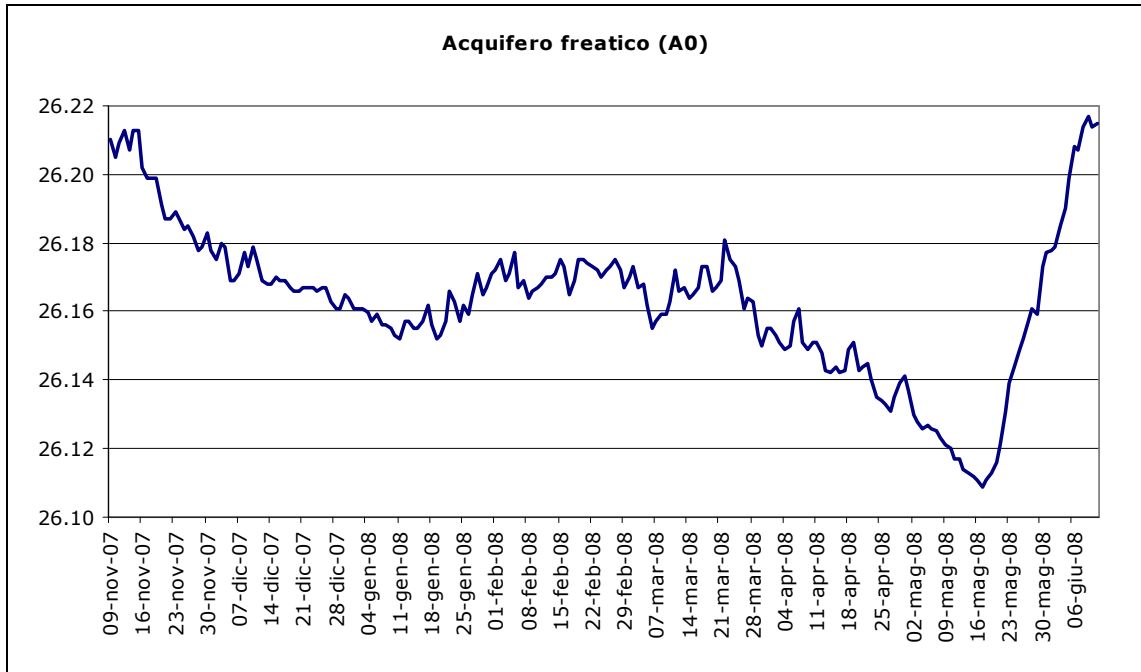
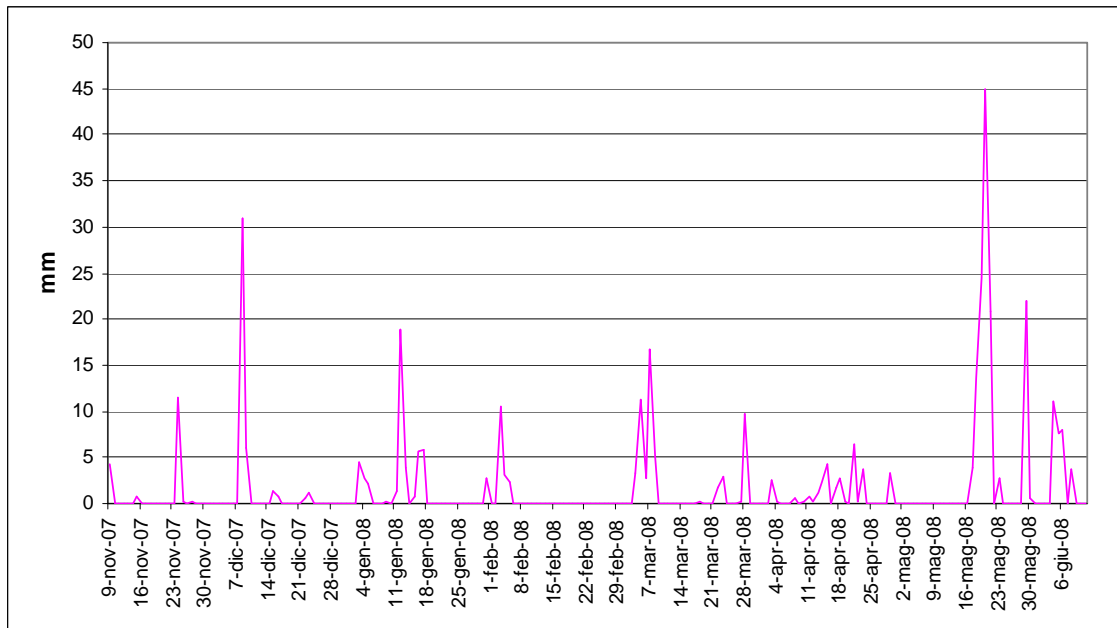


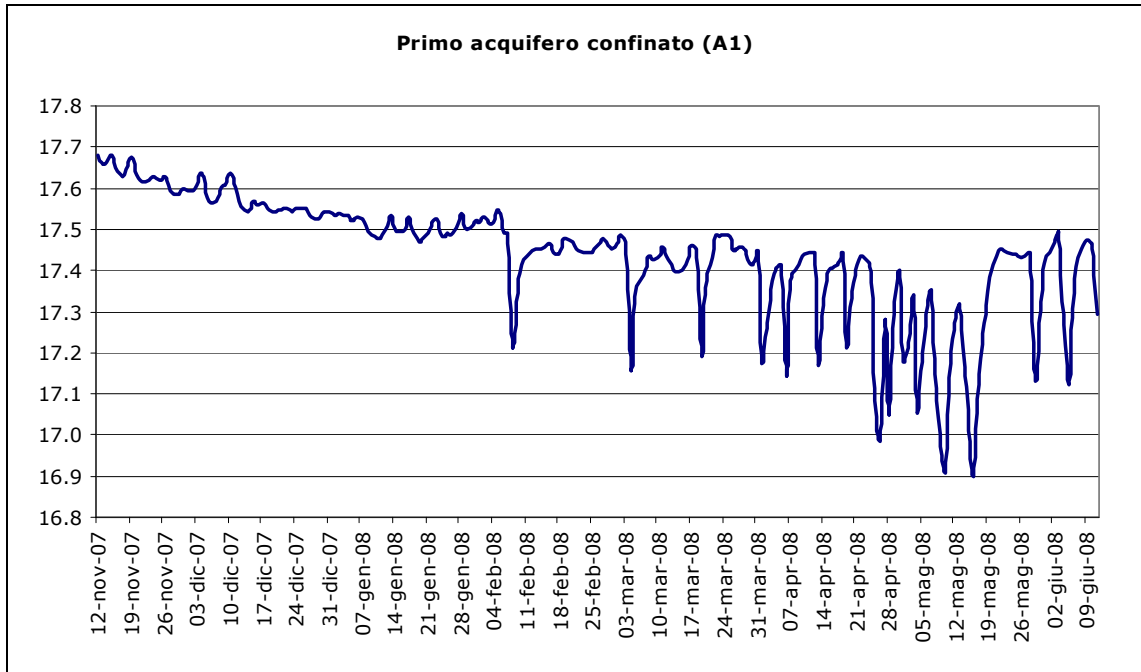
Figura 5.22: pluviometria in millimetri nel Pluviometro "Bologna" nel periodo dal 9/11/2007 al 11/06/2008



Passando invece all'osservazione della Figura 5.23 che è relativa al primo acquifero confinato, si nota un generale calo del livello piezometrico nel periodo di monitoraggio, che sino al febbraio 2008 avviene in modo graduale, per poi essere caratterizzato da evidenti picchi di abbassamento di 30 – 40 centimetri. La cosa più probabile è che questi abbassamenti repentini siano dovuti al funzionamento di un pozzo ubicato in prossimità del piezometro. Osservando la

concomitanza dei picchi negativi più intensi e frequenti (da fine aprile a metà maggio) con il periodo meno piovoso, si è propensi a pensare che il pozzo in questione serva per irrigazione. Se si escludono questi picchi di abbassamento, si nota che dal novembre 2007 al giugno 2008 c'è stato un abbassamento complessivo di 20 – 25 centimetri.

Figura 5.23: andamento riferito al livello del mare del livello piezometrico nell'acquifero confinato A1 (periodo dal 9/11/2007 al 11/06/2008).



Dal confronto degli andamenti rilevati nei due piezometri (Figura 5.21 e Figura 5.23) e considerando quanto sopra detto, si possono quindi trarre le seguenti conclusioni:

- l'acquifero freatico ha un livello decisamente più alto del primo acquifero confinato (circa 8.5 metri in più). Ciò indica una netta separazione idraulica tra i due acquiferi, operata dai sedimenti fini ricchi in sostanza organica presenti da 20,4 a 27,4 metri di profondità (si veda la stratigrafia di Tabella 5.6).
- questa separazione fa sì che i due acquiferi abbiano degli andamenti diversi: l'acquifero freatico ha avuto una variazione di circa 10 centimetri, contro i circa 25 (escludendo i picchi dovuti verosimilmente a prelievi nelle vicinanze) dell'acquifero confinato.
- l'acquifero freatico risente della ricarica delle piogge e non ha evidenza di prelievi, al contrario l'acquifero confinato mostra di essere scollegato dalla ricarica dalla superficie, mentre è interessato da emungimenti effettuati, molto probabilmente, nelle immediate vicinanze del piezometro in monitoraggio.

Tabella 5.6: Sondaggio effettuato nell'ottobre 2007 a Castel Maggiore (Bo) a fianco degli assestimetri.
Ditta esecutrice: SPG di Adria (Rovigo). Stratigrafia del carotaggio descritta dal Dott.
Geol. Domenico Preti (Autorità di Bacino del fiume Reno).

<i>Da 0 a 29 carotaggio continuo</i>		
0 – 1,20 limi	(l d'ora in poi) e sabbie (s d'ora in poi) finissime (ff d'ora in poi)	secchi
	colore beige	
1,20 – 1,40	l e s ff con concrezioni di CaCO ₃	colore beige
1,40 – 2,40	l e sff a -1,90 frammento di laterizio	colore beige
2,40 – 6,00	sff limose	colore beige
6 – 6,60	sf	colore beige
6,60 – 8;	sf limose, colore beige fino a 7 metri, da 7 a 8 grigio con screziat. rosse, da 8 in poi grigio	
8 – 11,60	alternanza di s medie e fini da 9,30 a 10 sm e ciottoli, a 10,50 laterizio	
11,60 – 14	sl alternate a sf e m	
14 – 19	ghiaie (gh d'ora in poi) max 5 cm, sm da 15 a 15,5 e da 16 a 16,8	
19 – 19,7	ls	
19,7 – 20,4	sff con materiale organico	
20,4 – 20,5	argilla limosa (al d'ora in poi)	
20,5 – 21,2	al grigio scure concrezioni di CaCO ₃ da falda e materiale organico	
21,2 – 21,5	ls	
21,5 – 22,4	al scure facce di pressione, struttura prismatica dim.cm	
22,4 – 22,8	l e al scuri con sostanza organica e concrezioni	
22,8 – 23,6	al scura con sostanza organica	
23,6 – 24,2	sf e sff	
24,2 – 25,2	alternanza ls e sff	
25,2 – 25,8	sf e sm con sostanza organica	
25,8 – 26,2	alternanza ls e sff	
26,2 – 27,4	al con sostanza organica e torba	
27,4 – 28,2	alternanza l e sf	
28,2 - 29	gh max 5 cm	
<i>da 29 a 60 distruzione di nucleo</i>		
29 – 30	gh	
30 – 30,5	sedimenti fini	
30,5 – 32	l e s	
32 - 34	s e g	
34 – 43	sedimenti fini	
43 – 44,5	s	
44,5 – 46,5	l e s	
46,5 – 53	s e g	
53 – 55	sedimenti fini	
55 – 60	s e g	

5.2.5.2 *Incidenza delle variazioni del contenuto idrico nel suolo sull'andamento della subsidenza rilevata dagli assestimetri*

Da una prima valutazione dei dati rilevati dagli assestimetri, in relazione anche all'andamento delle piogge, è emersa l'ipotesi che vi fosse una stretta relazione tra dati misurati e contenuto idrico nel suolo.

D'altra parte i suoli della pianura emiliano-romagnola sono caratterizzati da tipi e contenuti in argille che presentano in maniera diffusa un moderato o alto o molto alto potenziale di espansione-contrazione al variare delle condizioni di umidità. Ne sono una prova

immediatamente visibile le crepe presenti sulla superficie del suolo durante la stagione secca e la loro progressiva scomparsa nel corso della stagione umida.

5.2.5.2.1 Materiali e metodi

Sono stati effettuati 3 sondaggi in località Castel Maggiore (BO) a fianco degli assestimetri, per la posa di 3 piezometri. In uno di questi è stata effettuata la descrizione dei principali caratteri litologici (tessitura, colore,...) sino alla profondità raggiunta dal sondaggio (60 m) e sono stati prelevati 8 campioni di suolo/sedimento nella parte superiore del sondaggio, in relazione alle variazioni granulometriche stimate in campagna, per l'effettuazione di analisi fisiche utili a valutarne il comportamento.

Più precisamente sono state richieste ed eseguite dal laboratorio LARIAN srl (Pomezia-RM) le seguenti determinazioni:

- granulometria (5 classi di sabbia: 2000-1000 μ , 1000-500 μ , 500-250 μ , 250-100 μ , 100-50 μ ; 2 classi di limo: 50-20 μ , 20-2 μ ; 1 classe di argilla. <2 μ);
- Coefficiente di estensibilità lineare (COLE).

L'analisi granulometrica è stata richiesta per affiancare alla stima della classe litologica di campo anche i valori granulometrici.

Il COLE è una misura del potenziale di espansione-contrazione del suolo. Potenziale in quanto si effettua su un campione non confinato. Si calcola misurando i cambiamenti della lunghezza di una zolletta nel passaggio dallo stato umido (33 kP) allo stato secco ed è espresso come percentuale del cambiamento in volume rispetto allo stato secco: $(L_m - L_d) / L_d$.

A sua volta l'estensibilità lineare (LE) di un orizzonte o strato è il prodotto del suo spessore, in centimetri, per il rispettivo valore di COLE. L'estensibilità lineare di un suolo è la somma di questi prodotti per tutto il suolo.

Il COLE moltiplicato per 100 è chiamato LEP (linear extensibility percent).

Il COLE dei campioni in analisi è stato effettuato su campione disturbato (Schafer, W.M. and Singer, M.J. 1976³).

5.2.5.2.2 Risultati e interpretazione

Tabella 5.7: risultati delle analisi granulometriche e del COLE

Prof. sup. (m)	Prof. Inf. (m)	Sabbia 2000-1000 μ	Sabbia 1000-500 μ	Sabbia 500-250 μ	Sabbia 250-100 μ	Sabbia 100-50 μ	Sabbia Tot. 2000-50 μ	Limo 50-20 μ	Limo 20-2 μ	Argilla <2 μ	COLE
0,20	0,30	0,3	0,6	1,4	10,9	12,9	26,1	22,1	26,0	25,8	0,03
0,80	0,90	0,0	0,4	7,2	40,0	12,7	60,3	11,7	13,5	14,5	0,01
1,20	1,30	0,0	0,3	1,1	4,7	2,5	8,6	8,4	48,2	34,8	0,03
1,90	2,00	0,3	0,4	0,5	2,9	6,3	10,4	18,2	45,4	26,0	0,03
2,20	2,30	0,0	0,3	0,4	7,0	17,8	25,5	25,6	27,8	21,1	0,02
2,70	2,80	0,0	0,4	6,9	40,6	15,1	63,0	11,4	12,5	13,1	n.d.
3,20	3,30	0,0	0,4	3,6	29,9	20,5	54,4	17,1	16,5	12,0	n.d.
3,80	3,90	0,1	0,3	34,3	31,2	8,8	74,7	7,9	7,8	9,6	n.d.

In base ai dati granulometrici i campioni si collocano, dall'alto al basso, nelle classi tessiturali F, FS, FAL, FL, FL, FS, FS, FS del triangolo USDA. Gli alti contenuti di sabbia, già stimati in campagna, hanno suggerito la richiesta di determinazione del COLE solo sui primi 5 campioni e la validità della scelta è stata confermata dal valore del campione 0,80-0,90, analizzato

³ COLE Rod method: determinazione su pasta satura ed estrusione mediante siringa secondo M.Schafer e M.J.Singer.

nonostante l'elevato contenuto di sabbia perché non individuato nella descrizione del sondaggio, anche se campionato.

Secondo gli schemi di valutazione del National Soil Survey Handbook (NSSH, 2005) riportati in Tabella 5.8 possiamo rilevare che, tranne il campione 0,80-0,90, gli altri valori rientrano nella classe di estensibilità lineare potenziale MODERATA.

Tabella 5.8: schemi di valutazione COLE secondo il National Soil Survey Handbook (NSSH, 2005)

CLASSE	COLE	LEP = COLEx100
Bassa	<0.03	3
Moderata	0.03 - 0.06	3-6
Alta	0.06 - 0.09	6-9
Molto alta	≥0.09	≥9

L'entità della rigonfiamento, seppure potenziale è quantificabile in 3 cm su una sezione di controllo o spessore di suolo di 100 cm.

Pur considerando che i valori determinati sono riferibili a campioni disturbati e non confinati (non soggetti a carico gravitazionale) si ritiene che orientino nettamente l'interpretazione dei dati rilevati dagli assestimetri come diretta dipendenza dalla proprietà del suolo di contrarsi e rigonfiarsi al variare delle condizioni stagionali di umidità del suolo.

5.3 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nel presente lavoro, a fronte delle ipotesi formulate sui differenti fattori che possono influenzare la subsidenza rilevata dagli assestimetri di Castel Maggiore, vengono ora proposte alcune considerazioni finali che rappresentano la sintesi delle analisi complessivamente condotte che possono nello stesso tempo costituire elemento di discussione all'interno del Gruppo di Lavoro- Le prime considerazioni, di carattere generale, possono essere ricondotte ai seguenti aspetti:

1. nella conoide del Reno viene confermata la relazione diretta tra la quantità di litologie fini ed il livello di subsidenza e quindi viene confermato che la distribuzione quantitativa dei materiali fini e grossolani influenza il grado di compattazione degli acquiferi;
2. è altrettanto confermato che i prelievi (causa) e la subsidenza (effetto) non debbano essere necessariamente collocati sul medesimo asse verticale. Infatti, le variazioni di pressione negli acquitardi (costituiti da materiali prevalentemente fini) possono essere provocate da prelievi distanti nello spazio (e quindi ritardati nel tempo);
3. viene rilevato che nei mesi compresi tra maggio e settembre i prelievi di acque sotterranee subiscono un consistente incremento dovuto:
 - alla concentrazione dei prelievi agricoli che prelevano l'acqua nei complessi acquiferi A0 e A1 per circa 2-3 Mm³/anno;
 - ai prelievi acquedottistici che hanno un incremento molto elevato, con prelievi su base mensile mediamente doppi rispetto a quelli invernali;

Entrando invece nello specifico, relativamente all'analisi di dettaglio condotta sui dati assestimetrici, possono essere effettuate le seguenti valutazioni:

4. sulla base dell'insieme delle valutazioni effettuate sui tre anni di funzionamento degli assestimetri di Castel Maggiore, anche in rapporto ad altre installazioni analoghe presenti in Regione, viene complessivamente valutato ad oggi corretto il funzionamento degli stessi (a meno del periodo di assestamento iniziale di cui al punto successivo);
5. sia l'analisi delle velocità di abbassamento registrate dagli assestimetri nei tre anni di misurazioni (anno 2005 in confronto ai successivi 2 anni) sia il confronto con i dati satellitari relativamente ai PS vicini agli assestimetri confermano l'anomalia nelle

misurazioni dei primi mesi, causata da una possibile fase di assestamento iniziale successiva alla posa in opera degli assestimetri;

6. considerando l'intera serie storica dei dati disponibili (da aprile 2005 a giugno 2008) le velocità medie di abbassamento del suolo rilevate sono le seguenti:
 - assestimetro 0-100 m : 7.6 mm/anno
 - assestimetro 0-200 m : 13.0 mm/anno
 - strato 100-200 m : 5.4 mm/anno,

valori compatibili con le velocità rilevate dalla rete regionale di monitoraggio della subsidenza nell'ultima campagna di misura (con analisi interferometrica) che riporta in corrispondenza degli assestimetri 15-20 mm/anno per il periodo 2002-2006. A giustificazione dei 2-7 mm/anno di differenza si tenga presente che il dato della rete regionale è da riferirsi all'intero ammasso sedimentario, mentre il dato dell'assestimetro ai soli primi 200 m di profondità. Inoltre il dato relativo al periodo più recente rilevato dagli assestimetri (2005-2008) rispetto al periodo 2002-2006, potrebbe ulteriormente rendere conto dell'attuale fase di attenuazione del fenomeno confermata dal confronto con la livellazione topografica precedente riferita al periodo 1992-1999 (30-35 mm/anno);

7. la scansione temporale dei dati rilevati da entrambi gli assestimetri permette di evidenziare un comportamento ciclico-stagionale all'interno del quale i principali abbassamenti del suolo avvengono nei periodi estivi (da maggio ad ottobre). Tale comportamento non è però riferibile allo strato 100-200 m dal piano campagna che mostra una dinamica di schiacciamento abbastanza regolare;
8. l'analisi di dettaglio condotta per comprendere i possibili rapporti tra il comportamento ciclico stagionale degli assestimetri e gli andamenti stagionali dei prelievi non permette di evidenziare eventuali correlazioni⁴; la dinamica ciclico-stagionale degli assestimetri è da riferirsi ai primi 100 m di profondità del terreno mentre i prelievi interessano principalmente profondità maggiori; i forti aumenti di prelievi nel periodo estivo non sono direttamente correlabili al forte abbassamento del suolo rilevato nel medesimo periodo;
9. i dati rilevati dagli assestimetri evidenziano diversi periodi nei quali si assiste ad una inversione di tendenza e ad un innalzamento del suolo; tale fenomeno trova riscontro nell'analisi puntuale dei dati satellitari che per i PS in prossimità dell'assestimetro rivela un comportamento analogo;
10. i momenti nei quali si verificano gli innalzamenti del suolo sembrano essere correlati alla pluviometria ed in particolare al presentarsi di periodi di pioggia intensa. I primi metri del sottosuolo costituiti in parte da argilla sembrerebbero essere oggetto del fenomeno di ritrazione-gonfiatura e dunque essere, almeno in parte, la causa degli innalzamenti del suolo tra 0 e -100 metri;
11. le analisi condotte dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli sui campioni di terreno appositamente prelevati in prossimità degli assestimetri orientano nettamente l'interpretazione della dinamica ciclico-stagionale dei dati rilevati dagli assestimetri come diretta dipendenza dalla proprietà del suolo di contrarsi e rigonfiarsi al variare delle condizioni stagionali di umidità del suolo;
12. il comportamento ciclico stagionale rilevato dagli assestimetri può essere quindi interpretato come una alternanza di periodi:
 - stagione calda/secca (schematicamente da aprile a settembre): la velocità di abbassamento del suolo (32 mm/y come media dei valori dei tre anni di misure disponibili, dal 2005 al 2008) è più elevata in quanto oltre al dato di

⁴ la correlazione ricercata riguarda l'eventuale incidenza dei forti aumenti dei prelievi nel periodo estivo sull'abbassamento registrato dagli assestimetri nel medesimo periodo. Si sottolinea che la correlazione ricercata non riguarda i rapporti di causa-effetto tra prelievi e subsidenza in termini generali.

- effettivo abbassamento del suolo (13 mm/anno) viene rilevata anche la contrazione del terreno dovuta al suo essiccamento;
- stagione umida (schematicamente da ottobre a marzo): la velocità di abbassamento del suolo è nulla o negativa. In questo caso il rigonfiamento delle argille dovuto al contenuto di umidità dei suoli compensa o supera la velocità effettiva di abbassamento del suolo.
13. a livello metodologico, per convalidare ulteriormente le misure degli assestimetri, occorrerebbe verificare l'adeguatezza della piastra di fondazione, che deve ripartire i carichi applicati (cioè il peso di tutta l'attrezzatura assestimetrica) in modo da non causare cedimenti. Come già anticipato il forte e repentino abbassamento della superficie topografica apparentemente verificatasi subito dopo l'installazione degli assestimetri (nel periodo maggio – giugno 2005) potrebbe essere spiegato, in assenza di altre evidenze progettuali che giustifichino il contrario, con l'assestamento del terreno superficiale in seguito alla costruzione della piastra di fondazione e il suo caricamento con l'intera struttura assestimetrica;
14. infine, occorrerebbe verificare il corretto funzionamento degli assestimetri di Castel Maggiore, valutando la differenza tra deformazioni teoriche e misurate, l'influenza dell'attrito di primo distacco della colonna di aste di misura, e soprattutto della coppia di pulegge per l'applicazione del tiro alle medesime. In questa sede, si potrebbe anche indagare se l'assenza di giunti di scorrimento nella tubazione di rivestimento in PVC possa causare alterazioni della misura di deformazione (effetto palo, ovalizzazione del tubo di rivestimento, che potrebbe indurre maggior attrito sull'asta di misura, etc.). In sostanza, anche per gli assestimetri in esame andrebbe effettuata la verifica e il collaudo del sistema.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna, Autorità di Bacino del Reno (2005). *Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la realizzazione di un modello idrogeologico per la gestione sostenibile delle risorse idriche*. Rapporto tecnico
- [2] *Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la realizzazione di un modello idrogeologico per la gestione sostenibile delle risorse idriche*. Rapporto finale sui risultati ottenuti, l'analisi delle criticità evidenziate e le valutazioni conclusive. Elaborazione a cura della Direzione di Progetto, marzo 2007
- [3] Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2005). *Le caratteristiche degli acquiferi della regione Emilia-Romagna. Report 2003*.
- [4] Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2008). *Studio sulla ricarica artificiale delle falde in Emilia-Romagna*. Rapporto tecnico.
- [5] Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2007). *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Analisi interferometrica*. Rapporto tecnico.
- [6] Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2001). *Misura della rete regionale di controllo della subsidenza, misura di linee della rete costiera non comprese nella rete regionale, rilievi batimetrici*. Relazione finale.
- [7] Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2003). *Rete regionale di controllo della subsidenza: misura della rete GPS*. Relazione finale.
- [8] Viel G., (1998). *Acque sotterranee....terra, e,.....quant'altro*. In: Ricerche e studi sul sistema urbano bolognese, *Metronomie* n°12.
- [9] Comune di Bologna, Regione Emilia-Romagna, Idroser S.p.A., (1989). *Studio sul fenomeno della subsidenza nel territorio bolognese*.
- [10] Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C. & McDonald M.G., (2000). *MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-water model – User Guide to Modularization concepts and the Ground-water Flow Process*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 00-92.
- [11] Mc Donald M.G. & Harbaugh A.W., (1988). *A modular three-dimensional finite difference ground water flow model*. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, chapter A1.
- [12] Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP, (1998). *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. A cura di G. Di Dio, Selca Firenze.
- [13] Regione Emilia-Romagna, Arpa-IA (2003), *Bilanci idrici: aggiornamento dello stato attuale, scenari evolutivi e di azioni e misure di razionalizzazione, risparmio e riutilizzo*, Elaborato di supporto alla Relazione Generale del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia Romagna.
- [14] Regione Emilia-Romagna, Arpa-IA, (2003). *Creazione di una banca dati informatizzata per la parametrizzazione idrodinamica degli acquiferi*, Completamento del Quadro Conoscitivo del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna - Attività C.
- [15] Regione Emilia-Romagna, Arpa-IA, (2003). *Le acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna: modello concettuale*, Completamento del Quadro Conoscitivo del Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna - Attività B.