

Valutazione degli effetti della variazione delle riserve idriche sotterranee sulle velocità di subsidenza nella pianura di Prato (PO) durante il periodo 1992-2010.

Evaluation of groundwater excursion effects on subsidence rate in Prato plain (Tuscany) during 1992-2010 period

GIOVANNI MONTINI¹, MARCELLO BRUGIONI², FRANCESCO CONSUMI³

Riassunto

Lo scopo del lavoro è quello di verificare la correlazione tra le velocità di subsidenza registrate nella pianura di Prato (PO) e le variazioni del livello piezometrico della falda libera più superficiale del sistema acquifero della conoide del Bisenzio.

Sono state analizzate le velocità di deformazione media annua rilevate lungo la LOS discendente dai satelliti ERS (periodo 1992-2000) ed ENVISAT (periodo 2003-2010); tali velocità sono state confrontate con l'andamento temporale dei livelli piezometrici nell'area di studio. I risultati ottenuti hanno evidenziato una buona correlazione tra i due fenomeni. I risultati sono compatibili con la presenza di una importante componente limoso-argillosa nei litotipi acquiferi.

In particolare, l'innalzamento della falda registrato a partire dai primi anni 2000 è caratterizzato da un arresto generalizzato dei fenomeni di subsidenza, salvo alcune situazioni locali correlate ad un incremento dei prelievi. L'analisi spaziale della variazione dei prelievi di acque sotterranee nel periodo 2005-2011 ha infine confermato l'ipotesi che la risalita della falda è strettamente correlata alla forte

riduzione del fabbisogno per uso industriale registrato negli ultimi anni.

Abstract

The analysed area is part of the fluvial-lacustrine basin of Florence-Prato-Pistoia and is located at the alluvial fan of the river Bisenzio in the Province of Prato (PO). This area is characterized by the presence of an important aquifer system historically affected by consistent withdrawals for drinking and industrial use.

The gravels and pebbles of the Bisenzio fan reach a maximum thickness of 50 meters. There are levels of gravels with water under pressure even below the main body, to a depth of over 300 meters.

The exploitation of underground water caused in the past a considerable reduction of the permanent reserves, with formation of an extended cone of depression and development of phenomena of deformation due to the slow ground subsidence.

The recent dissuasion policies of the use of groundwater, together with the textile industry crisis, has determined, in the last decade, a trend reversal in the pattern of piezometric levels, which has led to a general rise of the groundwater with strong reduction of the cone of depression.

The aim of the study is to verify the correlation be-

1 Giovanni Montini: Autorità di Bacino del fiume Arno, via dei Servi, 15 – 50122 Firenze; g.montini@adbarno.it

2 Marcello Brugioni: Autorità di Bacino del fiume Arno, via dei Servi, 15 – 50122 Firenze; m.brugioni@adbarno.it

3 Francesco Consumi: Autorità di Bacino del fiume Arno, via dei Servi, 15 – 50122 Firenze; f.consumi@adbarno.it

tween the rate of subsidence recorded in the plain of Prato (PO) and the variations of the piezometric level of the shallow aquifer of the Bisenzio fan.

We analysed the average annual rate of deformation measured along the descending LOS from the ERS (period 1992-2000) and ENVISAT (period 2003-2010) satellites; these speeds were compared with the time course of the piezometric levels in the studied area. The results obtained showed a good correlation between the two phenomena. The results are consistent with the presence of an important silty-argillaceous component in aquifers. In particular, the rise of the water recorded since the early 2000s is characterized by a generalized stop of subsidence phenomena, except for some local conditions related to an increase in withdrawals.

The analysis of the spatial variation of groundwater withdrawals in the period 2005-2011 has finally confirmed the hypothesis that the rise of the water table is closely related to the sharp decrease in the demand for industrial use in recent years.

Termini chiave/Keywords:

Idrogeologia, interferometria SAR, subsidenza
Hydrogeology, SAR Interferometry, subsidence

Introduzione

L'avvento delle tecniche interferometriche avanzate, sviluppate a partire dagli anni '90, ha determinato una forte evoluzione delle potenzialità offerte dall'analisi multitemporale delle immagini radar acquisite da piattaforma satellitare per l'esame dei fenomeni di deformazione del terreno (COLESANTI et alii, 2002; COLOMBO et alii, 2003; COSTANTINI et alii, 2008, 2009; FERRETTI & HANSEN, 2002). Queste tecniche infatti permettono di contenere fortemente gli effetti di decorrelazione propri dell'interferometria radar tradizionale in modo da raggiungere precisioni dell'ordine del mm nella stima delle deformazioni (FERRETTI et alii, 2001, 2007).

Le caratteristiche del sistema di acquisizione e la natura dei bersagli radar al suolo (Persistent Scatterers, PS) fanno sì che queste tecniche risultino particolarmente valide per

l'analisi di movimenti lenti, con eventuale componente orizzontale che non si discosta troppo dalla direttrice EO e che risultano collocati in aree relativamente antropizzate (COLESANTI & WASOWSKI, 2006; HILLEY et alii, 2004; MEISINA et alii, 2007; MINAMB, 2009; STROZZI et alii, 2005). Queste caratteristiche li rendono particolarmente adatti per l'analisi di fenomeni di subsidenza del terreno, dissesti gravitativi di versante relativamente lenti e problemi strutturali rilevabili alla scala del singolo edificio.

Proprio in virtù delle forti potenzialità offerte da queste tecnologie, il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) ha inserito nel Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PSTA) l'elaborazione interferometrica delle immagini radar acquisite dai satelliti ERS ed ENVISAT nel periodo 1992-2010.

Nell'ambito dell'attività di aggiornamento del quadro conoscitivo di riferimento per il Piano Stralcio Bilancio Idrico, l'Autorità di Bacino del fiume Arno ha utilizzato i dati interferometrici del PSTA per effettuare, tra le altre cose, un'analisi dei fenomeni di subsidenza del terreno nelle aree di pianura alluvionale maggiormente interessate da prelievi di acque sotterranee, in modo da individuare le zone a maggiore stress idrico e pianificare i conseguenti approfondimenti d'indagine.

In questo lavoro, in particolare, vengono presentati i risultati ottenuti nell'area della pianura di Prato (PO), storicamente interessata da forti prelievi idrici di acque sotterranee destinati sia all'attività industriale che al consumo idropotabile.

L'area di studio (Fig. 1) corrisponde alla proiezione in superficie del corpo idrico significativo individuato nel Piano di Gestione delle Acque del Distretto Appennino Settentrionale (Direttiva 2000/60 CE), corrispondente all'aquifero alluvionale della pianura di Prato. Tale superficie ha un'estensione di circa 73 km².

La falda pratese è la più importante ed uti-

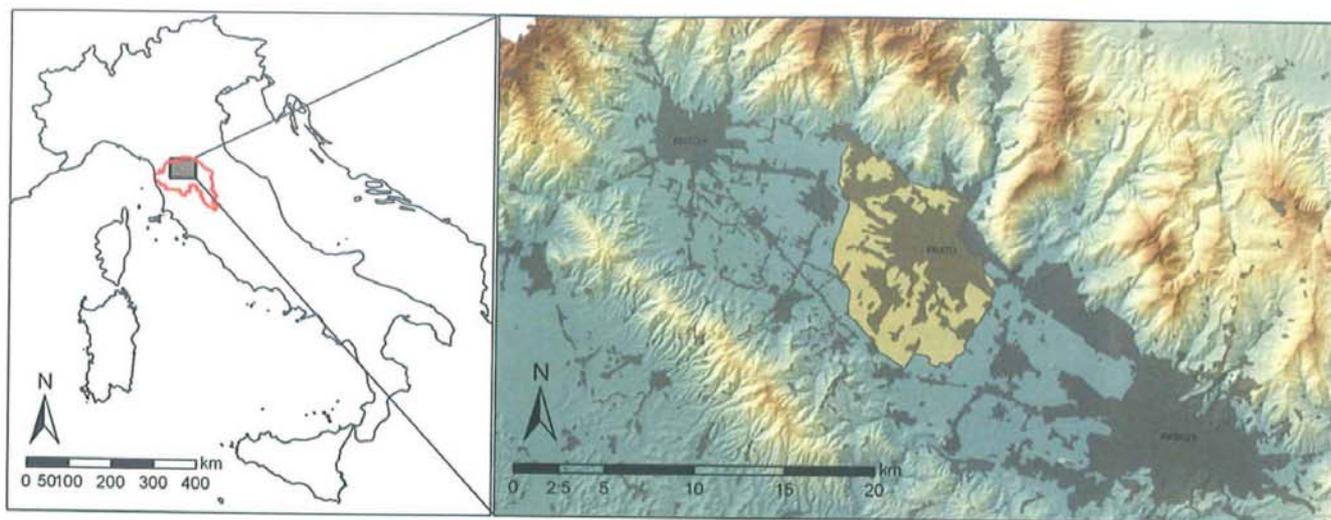


Fig. 1 – Ubicazione dell'area di studio

Fig. 1 – Location of the analysed area

lizzata fra quelle del Medio Valdarno e più in generale del bacino dell'Arno, con consistenti prelievi sia ad uso potabile che industriale. L'area di Prato, proprio per la sua ricchezza di riserve idriche sotterranee, è stata oggetto, nel corso degli anni, di un eccessivo sfruttamento che ha determinato la formazione di un esteso cono di depressione della superficie piezometrica che ha raggiunto la sua massima estensione alla fine degli anni '80. Questa situazione di deperimento della falda, peraltro monitorata già da fine anni cinquanta, ha necessariamente indirizzato verso la ricerca di soluzioni atte a migliorare il suo utilizzo ed evitare di portare la riserva all'esaurimento.

Il bilancio idrico effettuato per il periodo 1993 – 2006 (ADB ARNO, 2008) ha evidenziato un miglioramento rispetto al periodo di massimo sfruttamento, con ancora alcune situazioni di criticità. Il cono di depressione si è gradualmente ridotto sia per effetto delle misure messe in atto che, soprattutto, in seguito alla crisi dell'industria tessile pratese che ha determinato una marcata riduzione dei prelievi di acque sotterranee.

Lo sfruttamento dei decenni scorsi, unito alle peculiarità del sottosuolo pratese, ha portato anche allo svilupparsi di fenomeni di deformazione del terreno, che, seppure di magnitudo meno rilevante che in altri contesti, risultano pur sempre significativi. La pianu-

ra pratese risulta pertanto particolarmente adatta per l'analisi dell'evoluzione dei fenomeni di subsidenza nel tempo ed inoltre, vista l'importanza e la qualità della riserva idrica, è stata da sempre oggetto di monitoraggio della superficie piezometrica nel tempo, rendendo possibile un confronto diretto tra le velocità di subsidenza e le condizioni di saturazione dell'acquifero.

Inquadramento idrogeologico

L'area in oggetto è collocata nella parte centrale del bacino sedimentario di Firenze-Prato-Pistoia (Fig. 1) instauratosi a partire dal pliocene superiore in seguito alla tettonica distensiva post-orogena. I depositi fluviolacustri di riempimento del bacino che si trovano nel sottosuolo della pianura pratese possono essere divisi in tre unità principali, ovvero i depositi lacustri, i depositi di delta conoide del Bisenzio e i depositi recenti di esondazione.

I depositi lacustri sono costituiti da argille limose, talvolta leggermente sabbiose, con livelli di lignite e torba; strati di ghiaie, generalmente in matrice limosa, si intercalano alle argille con spessore decrescente procedendo verso il centro della pianura. Questi ultimi rappresentano i depositi sedimentari rilasciati dal Bisenzio allo sbocco nella pianura ed evidenziano il passaggio da un ambiente di sedimentazione di conoide fluviale

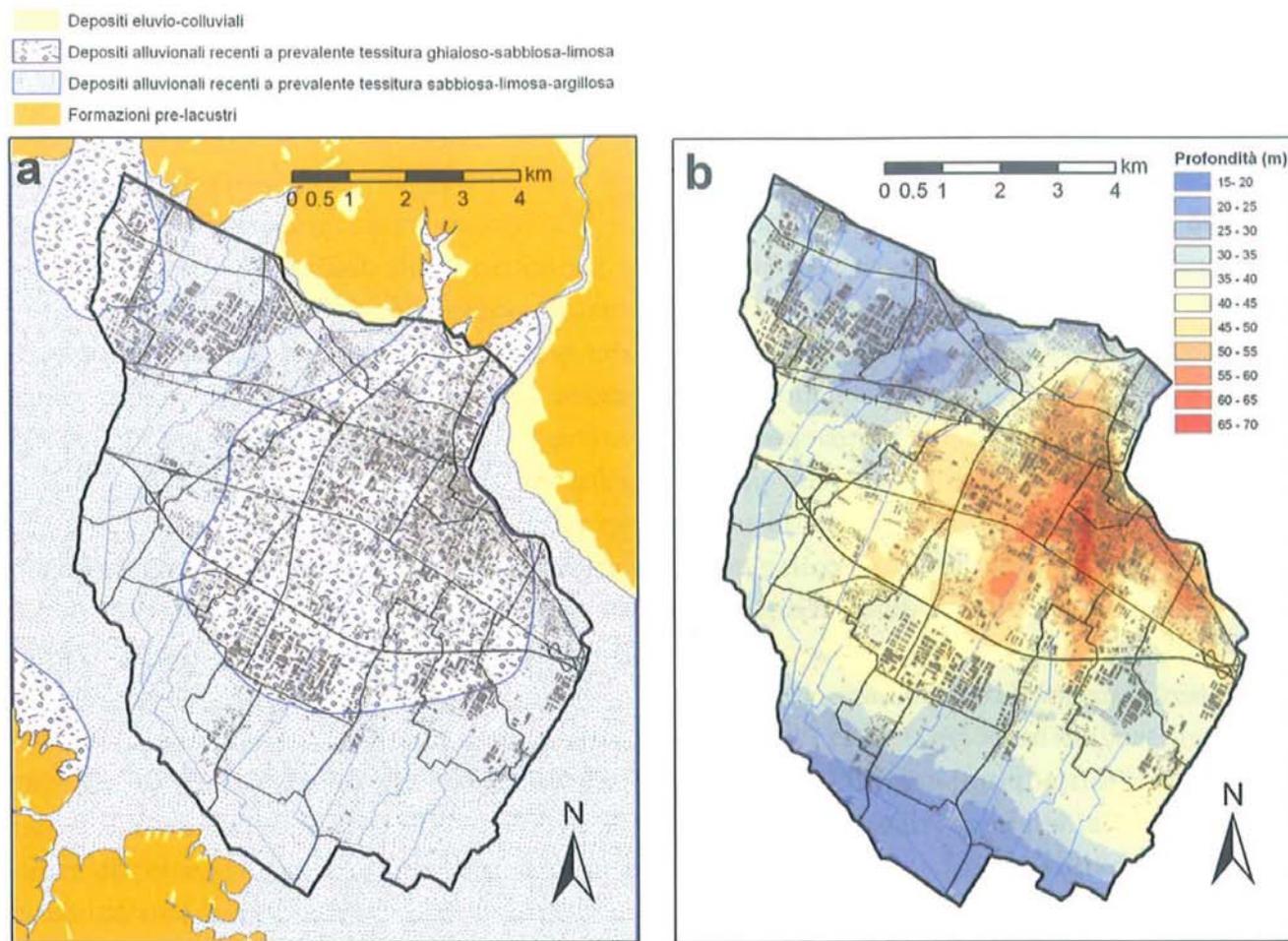


Fig. 2 – Carta geologica semplificata dell'area di studio (a) e distribuzione della profondità delle ghiaie acquifere (b)

Fig. 2 – Simplified geological map of the analysed area (a) and depth distribution of the aquifers gravel (b)

a uno di delta lacustre (LANDINI et alii, 1990). Il progressivo abbassamento del bacino veniva compensato dal notevole trasporto solido dei corsi d'acqua, tra cui il Bisenzio rivestiva un ruolo preminente a causa del forte sollevamento dell'area appenninica di provenienza, determinando un'evoluzione sedimentaria tendente ad un aumento dell'apporto macroclastico. Nell'area di Prato le ghiaie diventavano prevalenti via via che la conoide avanzava nella pianura, fin quasi al margine opposto.

Terminata nell'Olocene questa fase sedimentaria, il Bisenzio ha cominciato a incidere la sua conoide. La successione sedimentaria termina con la deposizione di materiali limoso-argillosi più o meno sabbiosi corrispondenti agli episodi alluvionali recenti.

La geometria tridimensionale dell'acquifero è stata ricostruita con un buon dettaglio, visti

i numerosi dati a disposizione, in occasione della redazione del Piano di Bacino del fiume Arno - Stralcio Bilancio Idrico e dei suoi aggiornamenti (ADB ARNO 2001, 2008). Tale analisi ha portato ad individuare due corpi idrici principali, facenti parte della conoide del fiume Bisenzio (Fig. 2a), tra loro sovrapposti e sormontati da 1-2 m di depositi di esondazione recenti a carattere prevalentemente limoso (LANDINI & PRANZINI, 1991; LANDINI et alii, 1990, 2004).

L'acquifero più superficiale è caratterizzato da una prevalenza di ghiaie grossolane in matrice limoso-sabbiosa, con subordinate intercalazioni di lenti argilloso-limose che diventano più frequenti verso i margini della conoide. Lo spessore varia da 10 m a 50-60 m e la falda può considerarsi libera, vista l'assenza di litotipi impermeabili sufficientemente continui da isolare i livelli di ghiaie; in fi-

gura 2b viene mostrata la ricostruzione della profondità delle ghiaie acquifere.

L'acquifero sottostante è invece caratterizzato da una prevalenza di sedimenti limoso-argillosi con intercalazioni, localmente anche abbondanti, di ghiaie grossolane in matrice limoso-sabbiosa. I livelli permeabili sono in contatto tra loro solo in corrispondenza di alcuni contatti geologici, concentrati in particolare nella parte apicale della conoide. In questo secondo sistema acquifero possono essere distinte più falde confinate con possibilità di scambi, sia tra loro che con la falda libera sovrastante, nella zona apicale e centrale della conoide (LANDINI et alii, 1990).

Per entrambi i corpi idrici e comunque sempre presente un'importante componente limoso-argillosa, sia in forma di lenti che come matrice dei litotipi più permeabili, su cui possono attivarsi fenomeni di compattazione o rigonfiamento dovuti dalla variazione del li-

vello piezometrico nel tempo.

Materiale utilizzato

La ricostruzione delle superficie piezometrica riguardante l'acquifero libero più superficiale è stata effettuata utilizzando i dati di soggiacenza della falda registrati dall'Amministrazione provinciale di Prato e dal gestore del servizio idrico. Tali dati risultano peraltro molto disomogenei, sia per la cadenza delle misure che per il periodo temporale a cui si riferiscono.

In particolare, i dati registrati dalla Provincia coprono l'intervallo 2006-2011 e riportano mediamente 4-5 misure l'anno relative ai mesi di marzo, giugno, luglio, agosto e dicembre; tali dati presentano una buona distribuzione sull'area in studio e risultano molto utili per esaminare l'andamento spaziale dei livelli di morbida e di piena della falda nel tempo.

I dati forniti dal gestore del servizio idrico presentano invece una serie storica molto più estesa, in alcuni casi a partire dagli anni '60, che permette di esaminare interamente il periodo 1992-2010 di riferimento per i dati satellitari, ma con una copertura spaziale più limitata e comunque insufficiente per la ricostruzione delle piezometrie su tutta l'area di studio. La distribuzione dei punti di misura, suddivisi in base alla serie storica acquisita, è riportata in figura 3.

L'analisi del tasso di subsidenza è stata invece effettuata utilizzando i dati puntuali di deformazione, denominati Persistent Scatterers (PS), ottenuti dall'analisi interferometrica differenziale delle immagini radar acquisite dai satelliti dell'Agenzia Spaziale Europea ERS 1/2, per il periodo 1992-2000, ed ENVISAT per il periodo 2003-2010. Questi dati sono stati elaborati nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale realizzato dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, applicando le tecniche interferometriche avanzate PSInSAR (FERRETTI et alii, 1999, 2001; COLESANTI et alii, 2003) e PSP-DIFSAR (COSTANTINI et alii, 2008,

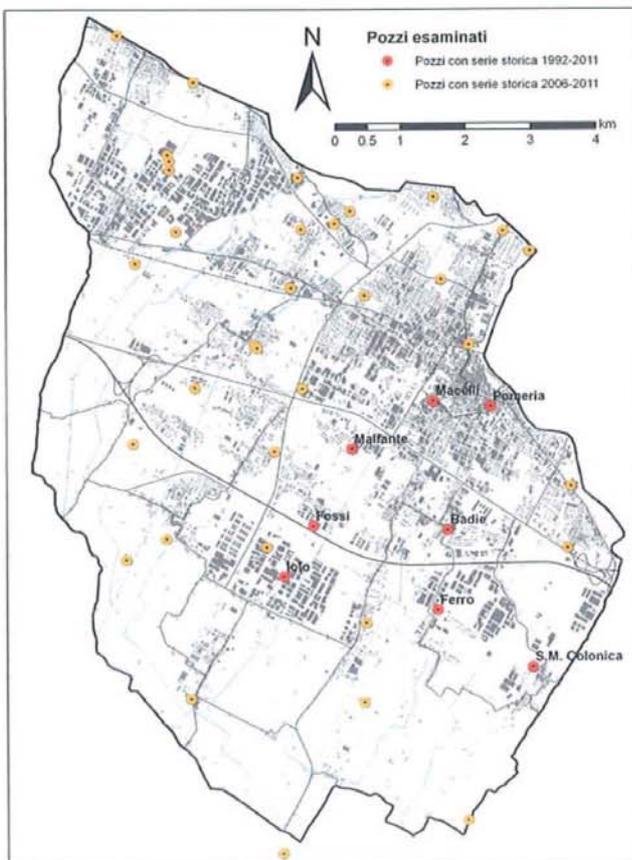


Fig. 3 – Distribuzione dei punti di misura del livello piezometrico

Fig. 3 – Distribution of reference point for the measurements of groundwater level

2009). Tali dati riportano, per ogni elemento puntuale (PS), sia le velocità media di deformazione, espressa in mm/anno relativamente a tutto l'intervallo di tempo esaminato, sia l'intera serie storica degli spostamenti espressi in mm. Il periodo di rivisitazione risulta essere di 35 giorni per entrambi i satelliti.

L'area in studio risulta coperta completamente, sia in geometria ascendente che discendente, dalle immagini acquisite dal satellite ENVISAT, mentre per il satellite ERS è disponibile solamente la copertura discendente. Per tale motivo le successive elaborazioni e i confronti di velocità tra i due periodi di osservazione, sono state svolte unicamente sul dataset discendente per entrambi i satelliti. Peraltro, l'analisi congiunta delle due geometrie effettuata preliminarmente sui dati ENVISAT, ha evidenziato che l'area è interessata da movimenti prevalentemente verticali, con valori di velocità molto simili nelle due geometrie. La densità media dei PS nell'area di

studio è risultata pari a circa 700 PS/km² per il satellite ENVISAT e circa 180 PS/km² per il satellite ERS.

Metodologia di analisi

Per evidenziare gli eventuali effetti di risalita della falda, registrati a partire dai primi anni 2000, sulle velocità di subsidenza nella pianura pratese, sono state effettuate due tipologie di analisi.

La prima, a carattere più generale, è mirata a valutare e quantificare la distribuzione spaziale e l'eventuale correlazione dei fenomeni studiati, ed è consistita nella ricostruzione, su tutta l'area di studio, delle mappe di deformazione media annua (dataset discendente) per i due sottoperiodi 1992-2000 (ERS, Fig. 4a) e 2003-2010 (ENVISAT, Fig. 4b) e dei modelli digitali della superficie piezometrica nel periodo 2006-2010 relativi ai mesi di marzo, giugno, luglio, agosto e dicembre di ogni anno considerato.

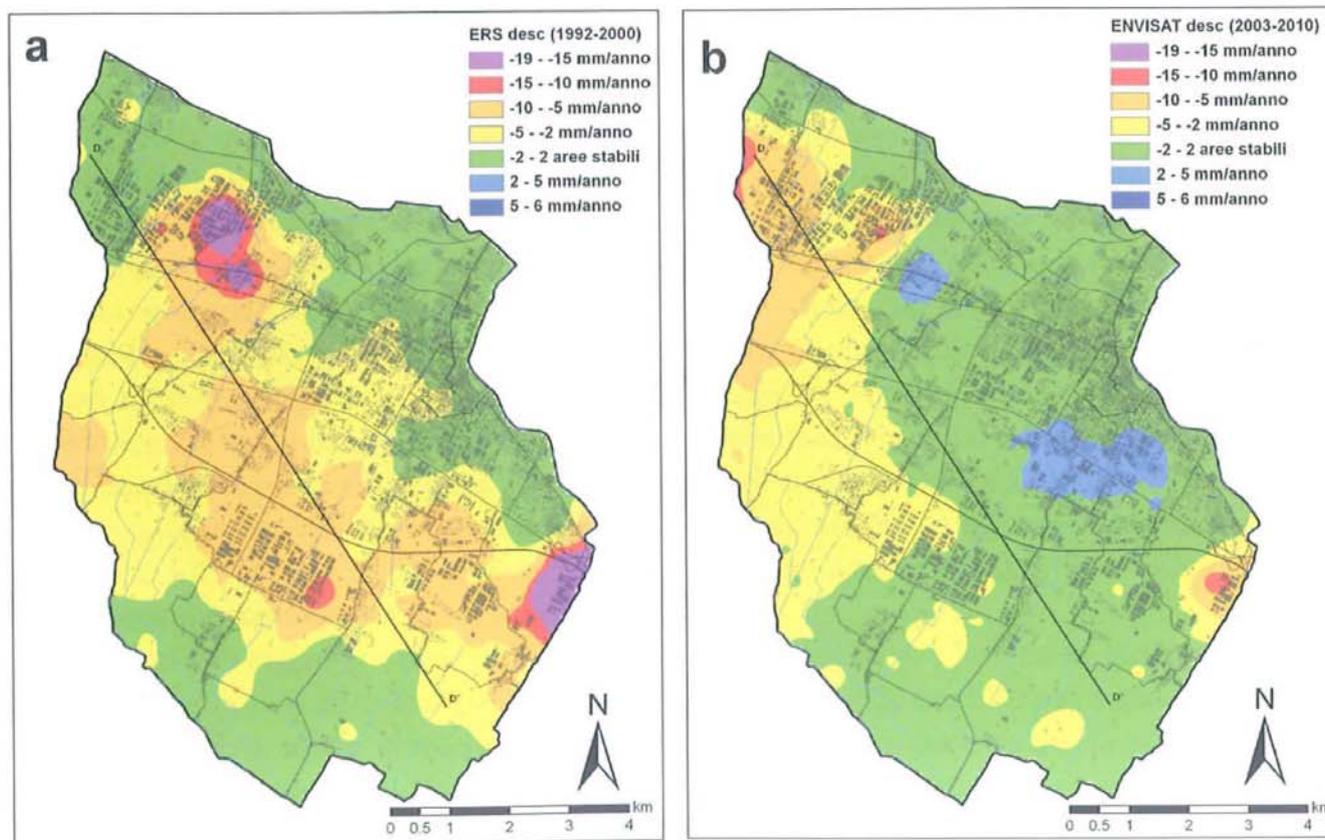


Fig. 4 – Distribuzione spaziale delle velocità di deformazione registrate lungo la LOS discendente dei satelliti ERS (a) ed ENVISAT (b)

Fig. 4 – Spatial distribution of the strain rate measured along the descending LOS for ERS satellite (a) and ENVISAT satellite (b)

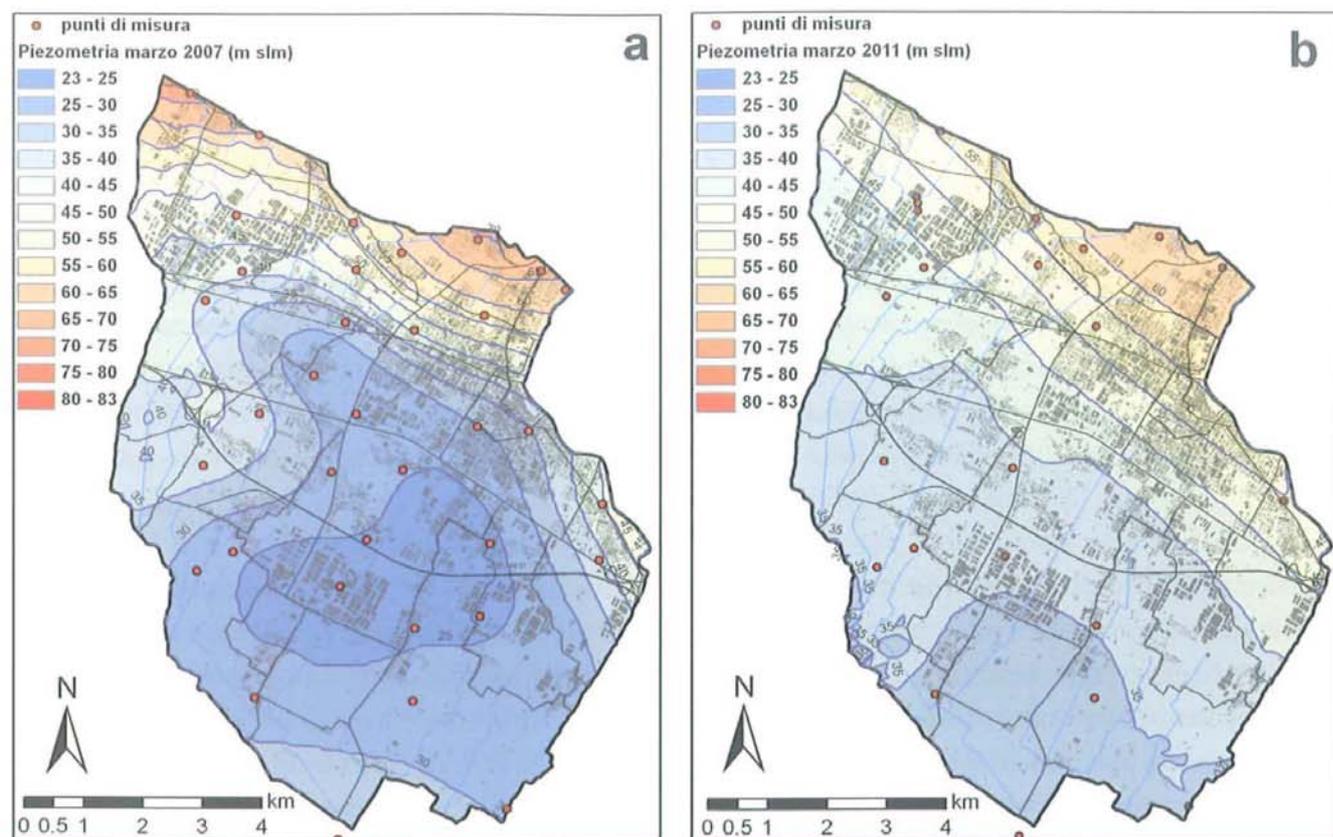


Fig. 5 – Andamento del livello piezometrico nell'area di studio relativamente al marzo 2007 (a) e al marzo 2011(b)

Fig. 5 – Trend of groundwater level in the analysed area for the months of March 2007 (a) and March 2011 (b)

Questi ultimi sono stati ottenuti dalla spazializzazione dei valori di soggiacenza registrati dalla Provincia di Prato che, come abbiamo visto, sebbene con serie storica più limitata, presentano una distribuzione spaziale abbastanza omogenea su tutta l'area di studio. Purtroppo, come accennato precedentemente, questi dati non coprono tutto l'intervallo di osservazione satellitare 1992-2010, ma ci forniscono comunque una buona descrizione del trend di risalita della falda registrato negli ultimi anni e dei suoi possibili effetti sulle velocità di deformazione registrate dal satellite ENVISAT.

I modelli digitali delle velocità di subsidenza nei due sottoperiodi 1992-2000 (Fig. 4a) e 2003-2010 (Fig. 4b) sono stati infine tra loro sottratti in modo da delimitare spazialmente le aree che hanno subito variazioni di velocità da quelle dove invece il tasso di deformazione è rimasto invariato. Il risultato ottenuto (Fig. 6a) è stato quindi confrontato con la distribuzione spaziale delle variazioni di livello pie-

zometrico registrate nel periodo 2006-2010 (Fig. 6b), ottenuta dalla differenza delle piezometrie relative al dicembre 2006 (Fig. 5a) e dicembre 2010 (Fig. 5b), in modo da evidenziare meglio le eventuali correlazioni spaziali tra variazioni di velocità di subsidenza e andamento della falda nel tempo. Il mese di dicembre è stato scelto come riferimento per i successivi confronti in quanto rappresenta una situazione di piena della falda, ma i risultati ottenuti risultano confermati anche per i restanti periodi dell'anno.

La seconda elaborazione effettuata nell'ambito di questo studio presenta invece un carattere di dettaglio, a livello di singolo pozzo, e consiste nel confronto puntuale tra l'andamento dei livelli piezometrici nel tempo e la serie storica degli spostamenti registrati circa mensilmente dai satelliti in un intorno significativo di ogni pozzo considerato. Per effettuare questa tipologia di analisi sono stati esaminati solamente i pozzi che presentano una serie storica estesa a tutto il periodo

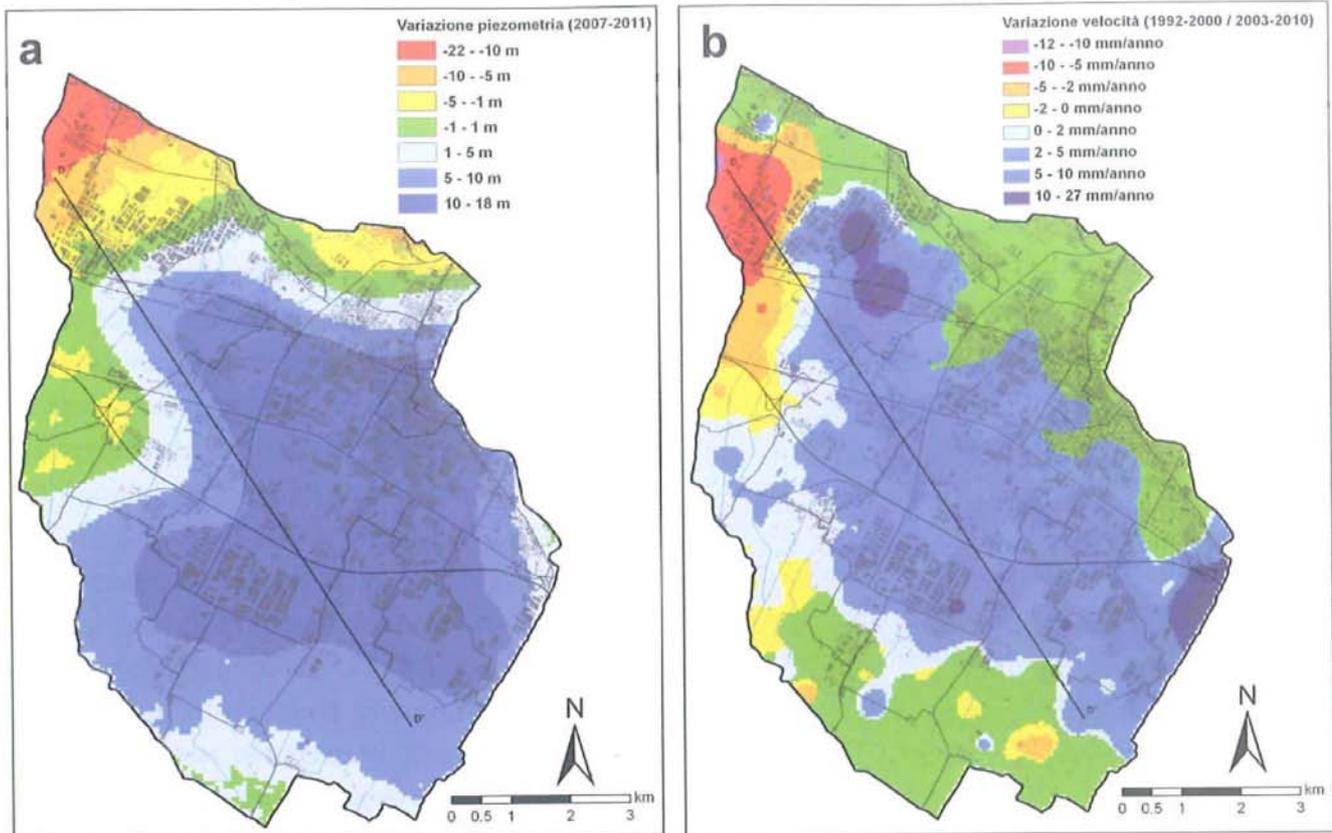


Fig. 6 – Confronto tra la variazione del livello piezometrico registrate nel periodo 2007-2001 (a) e la differenza tra le velocità di deformazione registrate dai satelliti ERS (1992-2000) ed ENVISAT (2003-2010) (b)
 Fig. 6 – Comparison between the variation of groundwater level recorded in the period 2007-2001 (a) and the difference between the deformation speeds measured by ERS satellite (1992-2000) and ENVISAT satellite (2003-2010)

1992-2010, in modo da confrontare graficamente le variazioni di livello piezometrico con le serie storiche degli spostamenti del terreno registrati prima dal satellite ERS (1992-2000) e poi dal satellite ENVISAT (2003-2010) con cadenza circa mensile (Fig. 8).

In particolare, i dati PS sono stati selezionati sia in funzione della distanza dai pozzi esaminati (raggio 100 m) sia in base alla coerenza tra andamento degli spostamenti nelle corrispondenti serie di deformazione. Questa seconda tipologia di analisi, sebbene non permetta di effettuare valutazioni generali su tutta l'area di studio, consente tuttavia analisi puntuali su tutto l'intervallo di tempo coperto dal rilievo satellitare, a supporto e integrazione di quanto evidenziato dall'analisi spaziale vista precedentemente.

Risultati ottenuti

In figura 6b sono riportati i risultati del con-

fronto tra velocità di deformazione registrate lungo la linea di vista dei satelliti ERS, per il periodo 1992-2000, ed ENVISAT, per il periodo 2003-2010, entrambi in geometria di acquisizione discendente.

Come accennato precedentemente, dall'analisi congiunta dei vettori di velocità registrati nelle due geometrie di acquisizione per il satellite ENVISAT, si è potuto verificare che si tratta di moti a carattere prevalentemente verticale, riconducibili a fenomeni di subsidenza del terreno probabilmente innescati dall'eccessivo prelievo idrico.

Dal confronto tra le mappe di distribuzione delle velocità nei due sottoperiodi di riferimento (Figure 4a e 4b), emerge un generale rallentamento della subsidenza passando dal periodo 1992-2000 al periodo 2003-2010, dove, addirittura, è rilevabile la presenza di alcune aree che, sebbene con velocità molto modeste, risultano interessate da fenomeni

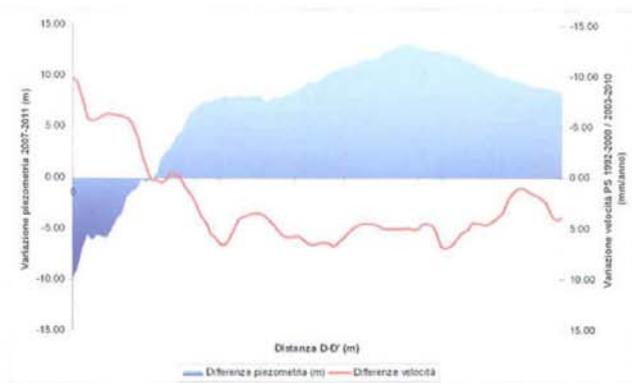


Fig. 7 – Confronto tra variazione di velocità registrata dai satelliti ERS (1992-2000) ed ENVISAT (2003-2010) e variazione del livello piezometrico nel periodo 2003-2007 lungo la sezione D-D' di figura 6

Fig. 7 – Comparison, along the section line D-D' in figure 6, between the difference of deformation speed measured by ERS satellite (1992-2000) and ENVISAT satellite (2003-2010) and the variation of groundwater level in the period 2003-2007

di sollevamento. La distribuzione delle differenze di velocità registrate dai due satelliti

(Fig. 6b) evidenzia peraltro anche la presenza di una vasta zona ubicata ai margini NW dell'area di studio, oltre ad alcune situazioni locali, dove, al contrario, è possibile osservare un aumento della velocità di subsidenza nel tempo.

In figura 6a sono invece riportati i risultati del confronto tra l'andamento della superficie piezometrica registrato a dicembre 2006 e a dicembre 2010, dove è possibile osservare il generale innalzamento della falda libera più superficiale nel tempo. Anche in questo caso la mappa è stata ottenuta effettuando le differenze di livello piezometrico tra i due periodi estremi in modo da discriminare le aree soggette a risalita del livello piezometrico da quelle dove invece si è verificato un ulteriore abbassamento della falda nel tempo.

Il confronto tra le mappe di figura 6a e 6b evidenzia che esiste una forte correlazione spaziale tra variazioni del livello piezometrico nel tempo ed evoluzione delle velocità di

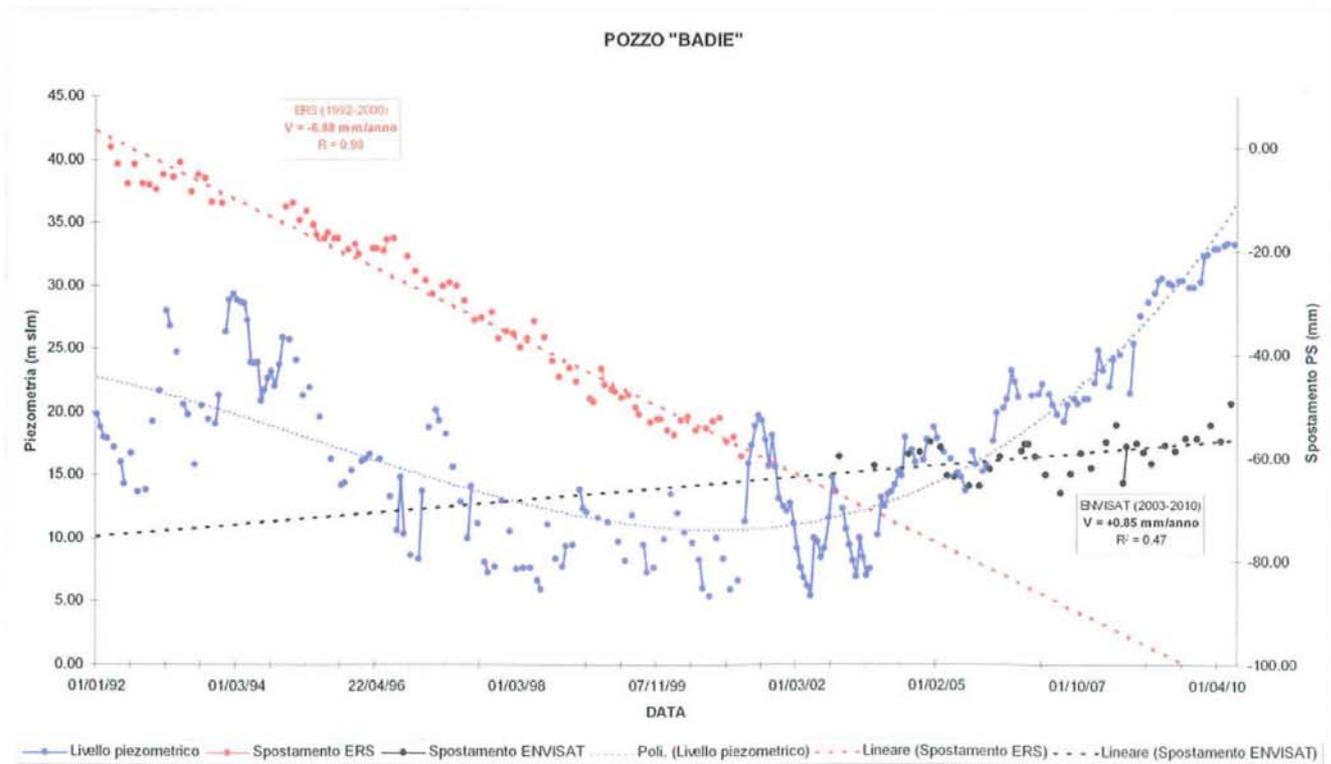


Fig. 8 – Confronto tra andamento del livello piezometrico (in blu), velocità di deformazione registrata dal satellite ERS (in rosso) e velocità di deformazione registrata dal satellite ENVISAT (in nero) per il pozzo "BADIE" nel periodo 1992-2010

Fig. 8 – Comparison among the trend of groundwater level (blue), the deformation rate recorded by ERS satellite (red) and the deformation rate recorded by ENVISAT satellite (black) for the well "BADIE" in the period 1992-2010

subsidenza nell'area in esame, che permette di ipotizzare una dipendenza diretta tra i due fenomeni analizzati anche alla luce delle caratteristiche litologiche degli acquiferi considerati, compatibili con fenomeni di compattezza e rigonfiamento.

Questa correlazione appare particolarmente evidente nel grafico di figura 7, dove viene effettuato un confronto, lungo la sezione DD' di figura 6, tra le differenze di velocità media annua registrate nei periodi 2003-2010 e 1992-2000 e le differenze piezometriche tra dicembre 2010 e dicembre 2006. Come possiamo osservare, infatti, dove si sono verificati innalzamenti più o meno consistenti del livello piezometrico, le velocità di subsidenza presentano un trend positivo, mentre dove si è registrato un ulteriore abbassamento della falda nel tempo, le differenze di velocità presentano valori negativi a sottolineare l'accelerazione del movimento.

L'analisi puntuale effettuata in corrispondenza dei singoli pozzi con serie storica 1992-2010 ha fornito risultati coerenti con quanto evidenziato dall'analisi spaziale estesa a tutta l'area di studio appena vista.

Nel grafico di figura 8, riferito in particolare al pozzo denominato "Badie", è riportato il confronto tra l'andamento della superficie piezometrica nel periodo 1992-2010 e le serie storiche di deformazione media dei PS ERS

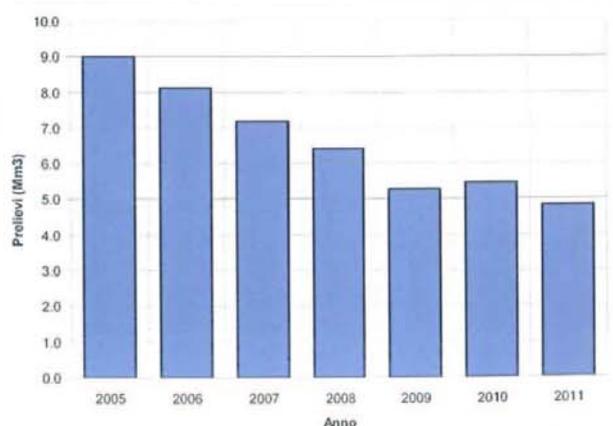


Fig. 9 – Andamento dei prelievi di acque sotterranee ad uso industriale nel periodo 2005-2011

Fig. 9 – Trend of groundwater withdrawals for industrial use in the period 2005-2011

ed ENVISAT ricadenti in un intorno circolare con raggio di 100 m dai pozzi considerati.

Come possiamo osservare l'andamento della superficie piezometrica mostra una evidente inversione di tendenza a partire dai primi anni 2000, passando da una situazione di graduale e continuo abbassamento ad una situazione di risalita o stabilizzazione.

Tale inversione di tendenza ha determinato un forte rallentamento delle velocità di subsidenza del terreno registrate dai satelliti nei pressi dei pozzi esaminati, portandosi da valori di circa -5/-10 mm/anno (LOS discendente) per il periodo 1992-2000 a valori rientranti nell'ambito dell'errore sperimentale (+/- 2 mm/anno) per il periodo 2003-2010.

Il trend di risalita della falda è probabilmente da imputare alla forte diminuzione dei prelievi di acque sotterranee a scopo industriale dovuta essenzialmente alla crisi dell'industria pratese verificatasi a partire dagli anni 2000, ma anche alle azioni di governance

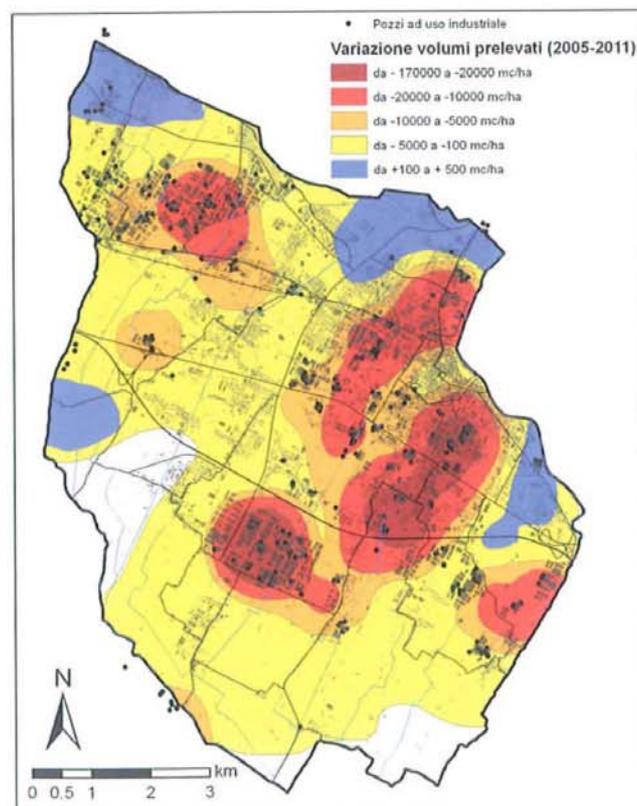


Fig. 10 - Distribuzione di densità delle variazioni di prelievo industriale nel periodo 2005-2011

Fig. 10 – Density distribution of changes in groundwater withdrawals for industrial use in the period 2005-2011

delle risorse idriche messe in atto (miglioramento dei processi industriali, politiche di disincentivazione all'utilizzo delle acque di falda ed incentivazione all'utilizzo delle acque di recupero per uso industriale, ecc). Dall'analisi dei dati forniti dalla Provincia di Prato è stato possibile stimare che i prelievi di acque sotterranee ad uso industriale nell'area in esame sono diminuiti di circa il 46% nel periodo 2005-2011, passando da circa 9 Mm³ del 2005 a circa 4,8 Mm³ del 2011 (fig. 9).

In figura 10 è riportata una mappa della distribuzione di densità delle variazioni di prelievo industriale nel periodo 2005-2011. In particolare, ad ogni punto è assegnato il valore, espresso in variazione di volume per unità di area, riguardante la variazione di prelievi di acque sotterranee a scopo industriale nel periodo 2005-2011 verificatasi nel raggio di 500 m dal punto stesso.

Come possiamo osservare è rilevabile una buona correlazione spaziale tra aree interessate da risalita della falda (Fig. 6a) e zone a maggiore riduzione di prelievi industriali,

così come appare evidente un aumento dei prelievi nelle zone dove invece si è registrato un ulteriore abbassamento dei livelli piezometrici. Ovviamente, dobbiamo tenere presente che l'attività industriale non è l'unica fonte di prelievo nell'area ma, insieme al prelievo per uso potabile, determina comunque un impatto molto importante sulle variazioni delle riserve idriche dell'acquifero esaminato; il prelievo ad uso idropotabile è altrettanto rilevante e si è mantenuto pressoché costante nell'arco degli anni considerati.

Le condizioni piezometriche, e quindi la variazione delle riserve idriche, sono ovviamente, correlate, oltre che alla variazione dei prelievi, anche alla variazione della ricarica. Senza entrare nei dettagli dei termini di bilancio idrico, cosa che esula dagli scopi del presente lavoro, è possibile effettuare una valutazione dell'andamento della ricarica dell'acquifero pratese semplicemente analizzando l'andamento delle precipitazioni.

In figura 11 viene mostrato l'andamento delle precipitazioni cumulate mensili e annue

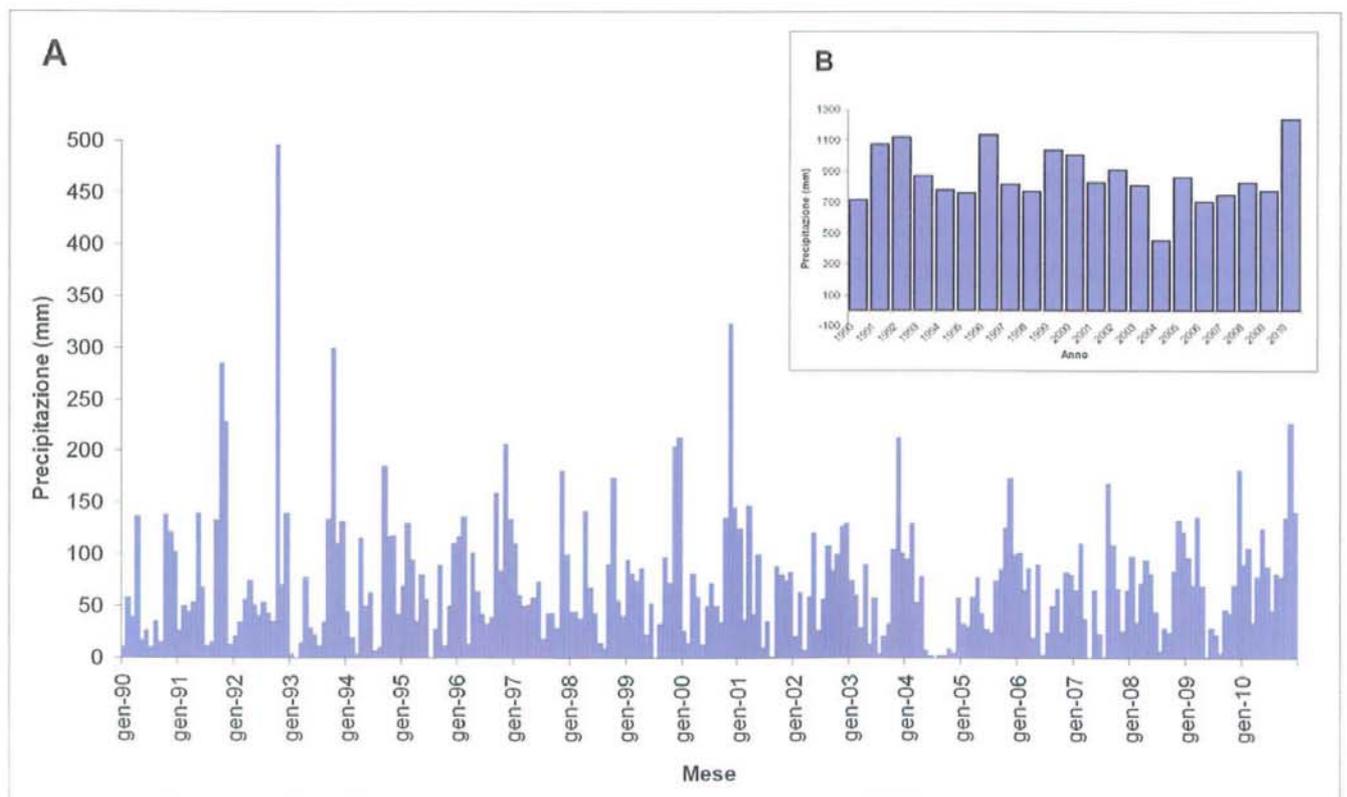


Fig. 11 – Andamento delle precipitazioni meteoriche nel periodo 1990-2010 (a – precipitazioni mensili; b – precipitazioni annue)

Fig. 11 – Trend of rain water in the period 1990-2010 (a – monthly rainfall; b – annual rainfall)

registrate nell'area in oggetto nel periodo 1990-2010. Le precipitazioni in questo periodo evidenziano una sostanziale stabilità degli apporti meteorici, pur con le naturali oscillazioni stagionali, con i valori massimi nei mesi invernali, dove si ha la quasi totalità di ricarica alle falde acquifere. Anche alla scala annuale sono rilevabili alcune importanti oscillazioni nel periodo considerato, come il picco di oltre 1200 mm registrato nel 2010. Tali oscillazioni risultano peraltro ininfluenti ai fini dell'analisi svolta, evidenziando un apporto meteorico sostanzialmente stabile per i due sottoperiodi di analisi dei dati satellitari considerati in questo lavoro. Ovviamente per la comprensione dettagliata dei meccanismi di ricarica dell'acquifero sono necessari ulteriori approfondimenti, che esulano dagli obiettivi del presente lavoro; peraltro proprio a tale scopo, l'Autorità di Bacino del fiume Arno, in collaborazione con la Provincia di Prato, ha in corso di elaborazione un modello numerico di flusso della falda. In ogni caso, si può affermare che la variazione positiva dell'andamento della superficie piezometrica sia da mettere in relazione soprattutto con la diminuzione delle quantità di acque prelevate dall'acquifero pratese, restando invece sostanzialmente invariato l'apporto meteorico nei periodi di maggior ricarica.

Conclusioni

Il confronto tra velocità di subsidenza nel periodo 1992-2010 e l'andamento temporale della superficie piezometrica, ha permesso di verificare un controllo diretto dei fenomeni di deformazione del terreno dai fenomeni di ricarica della falda, compatibilmente con le caratteristiche litologiche dell'acquifero esaminato.

I dati di deformazione utilizzati, ottenuti tramite interferometria radar differenziale da piattaforma satellitare, hanno mostrato una buona copertura per l'area in esame permettendo un'accurata analisi della distribuzione spaziale delle deformazioni nel tempo. Anche

le misure del livello piezometrico, sebbene temporalmente discontinue, hanno permesso di ricostruire con adeguata precisione l'evoluzione della falda nel periodo esaminato. L'analisi svolta ha evidenziato che l'importante riduzione dei prelievi di acque sotterranee nell'area di studio, determinata dalla crisi dell'industria pratese a partire dai primi anni 2000, ha innescato un fenomeno di risalita generalizzata del livello piezometrico. Questa situazione ha portato ad un arresto delle velocità di subsidenza del terreno che, da valori di qualche centimetro l'anno, sono rientrate nell'ordine dell'errore sperimentale. Sono comunque rilevabili anche alcune situazioni locali, più o meno estese, dove nel periodo considerato si è verificato un aumento dei prelievi che ha determinato un aumento delle velocità medie di deformazione registrate dai satelliti.

Il fatto che vi sia questa buona correlazione fra la velocità di subsidenza e l'andamento temporale della superficie piezometrica testimonia che è possibile utilizzare questa metodologia, anche come indicatore dello stato quantitativo delle risorse idriche, laddove questa correlazione sia comprovata dall'esame di dati misurati, come nel caso in oggetto. L'utilizzo della interferometria radar differenziale da piattaforma satellitare si conferma quindi anche un'utile strumento per programmare le attività di pianificazione dell'uso delle risorse idriche, alla scala di bacino.

Riferimenti bibliografici

- ADB ARNO (2001) - Quaderno n. 10: Bilancio idrogeologico nel Bacino dell'Arno. Felici ed., Pisa. <http://www.adbarno.it/cont/testo.php?id=37&biblio=2>
- ADB ARNO, 2008 - Progetto di Piano di bacino Stralcio "Bilancio idrico". Delibera di Comitato Istituzionale n. 204 del 28/2/2008.
- COLESANTI C., LOCATELLI R. & NOVALI F. (2002) - Ground deformation monitoring exploiting SAR Permanent Scatterers. Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing

- Symposium, 24-28 June 2002. Toronto, Canada. 2: 1219-1221.
- COLESANTI C., FERRETTI A., NOVALI F., PRATI C. & ROCCA F. (2003) - SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 41: 1685-1700.
- COLESANTI C. & WASOWSKI J. (2006) - Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*. 88: 173-199.
- COLOMBO D., FARINA P., MORETTI S., NICO G. & PRATI C. (2003) Land subsidence in the Firenze-Prato-Pistoia basin measured by means of spaceborne SAR interferometry. *Proceedings of IGARSS 2003*, 21-25 July 2003. Toulouse, France, 1-3.
- COSTANTINI M., FALCO S., MALVAROSA F. & MINATI F. (2008) - A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 7-11 July 2008. Boston MA. pp. 449-452.
- COSTANTINI M., FALCO S., MALVAROSA F., MINATI F. & TRILL F. (2009)- Method of Persistent Scatterers Pairs (PSP) and High Resolution SAR Interferometry. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium* 12-17 July 2009. Cape Town, South Africa.
- FERRETTI A., PRATI C. & ROCCA F. (1999) - Multibase-line InSAR DEM reconstruction: the wavelet approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 37 (2): 705-715.
- FERRETTI A., PRATI C. & ROCCA F. (2001) - Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 39 (1).
- FERRETTI A. & HANSEN R. (2002) - Deformation monitoring by satellite radar interferometry. *GIM International, The Worldwide Magazine for Geomatics*. 16 (9): 52-57.
- FERRETTI A., SAVIO G., BARZAGHI R., BORGHI A., MUSAZZI S., NOVALI F., PRATI C. & ROCCA F. (2007) - Sub-millimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 45 (5): 1142-1153.
- HILLEY G., BÜRGMANN R., FERRETTI A., NOVALI F. & ROCCA F. (2004) - Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis. *Science*, 304 (5679): 1952-1955.
- LANDINI F., PRANZINI G. & VENTURUCCI E. (1990) - La falda idrica della conoide di Prato (Firenze). *Acque Sotterranee*, Giugno 1990, 48-70.
- LANDINI F. & PRANZINI G. (1991) - Hydrogeologic balance of an over exploited aquifer (Prato Fan, Italy) and corrective measures for the water resources management. *Atti del XXII Congr. A.I.H. "Aquifer overexploitation"*, Canary Island, Spain, April 1991, 227-230.
- LANDINI F., PRANZINI G., PUPPINI U., SCARDAZZI M. E., STREETLY M. J., VALLEY S. (2004) - An overexploited aquifer (Prato, Italy): a physical model for groundwater resources evaluation. *32nd Int. Geological Congress*, 20-28 Agosto 2004, Florence (Italy), 97-5, 456.
- MEISINA C., ZUCCA F., CONCONI F., VERRI F., FOSSATI D., CERIANI M. & ALLIEVI J. (2007) - Use of Permanent Scatterers technique for large-scale mass movement investigation. *Quaternary International*. 171-172: 90-107.
- MINAMB (2009) - Linee guida per l'analisi di dati interferometrici satellitari in aree soggette a dissesti idrogeologici. Progetto Persistent Scatterers Interferometry. http://www.pcn.minambiente.it/GN/progetto_psi.php?lan=it#.
- STROZZI T., FARINA P., CORSINI A., AMBROSI C., THÜRING M., ZILGER J., WIESMANN A., WEGMÜLLER U. & WERNER C. (2005) - Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry. *Landslides*. 2 (3): 193-201.