

MONITORAGGIO SUBSIDENZA IN EMILIA-ROMAGNA

LA VALUTAZIONE DELLA VELOCITÀ CON CUI IL SUOLO SI ABBASSA IN REGIONE È UN ASPETTO MOLTO IMPORTANTE PER LA GESTIONE E IL CONTROLLO DEL TERRITORIO. L'EVOLUZIONE NEL TEMPO DEL MONITORAGGIO DEI MOVIMENTI VERTICALI DEL SUOLO STA RESTITUENDO UN QUADRO DELLA SITUAZIONE SEMPRE PIÙ AFFIDABILE E COMPLETO.

Il monitoraggio dei movimenti verticali del suolo nella pianura dell'Emilia-Romagna viene svolto da oltre 20 anni con frequenza quinquennale e il recente aggiornamento della cartografia regionale di subsidenza ha riguardato il periodo 2016-2021. Principale obiettivo del monitoraggio è valutare l'evoluzione del fenomeno della subsidenza, ovvero delle velocità di abbassamento del suolo, per confronto con i risultati dei precedenti periodi di monitoraggio effettuati con la stessa tecnica a partire dal 2006, al fine di valutare le tendenze temporali degli ultimi 15 anni circa.

Le modalità di monitoraggio si sono infatti evolute nel tempo e in Emilia-Romagna si è passati da rilievi topografici effettuati fino all'anno 2005 tramite livellazione geometrica di alta e altissima precisione, utilizzando una rete di capisaldi nella zona di pianura del territorio regionale, all'elaborazione di dati interferometrici satellitari, a partire dall'anno 2005, che restituiscono, con opportune tecniche di elaborazione e calibrazione dei dati, una velocità media di movimento verticale del suolo con un dettaglio temporale e spaziale molto maggiore rispetto le tecniche tradizionali di monitoraggio.

Il monitoraggio dei movimenti verticali del suolo viene inoltre svolto anche in automatico, ad alta frequenza, in alcuni punti rappresentativi del territorio regionale, attraverso assestimetri che restituiscono 2 misure al giorno di spostamento del suolo riferite alle profondità a cui l'assestmetro è ancorato nel sottosuolo. Nel 2005 sono stati infatti posizionati a Castel Maggiore (BO) due assestimetri alle profondità rispettivamente di 100 m e 200 m per studiare come varia il fenomeno della subsidenza alle diverse profondità e nel tempo (Arpa Emilia-Romagna et al., 2005) e confrontare il risultato rispetto alla subsidenza totale misurata a scala regionale.

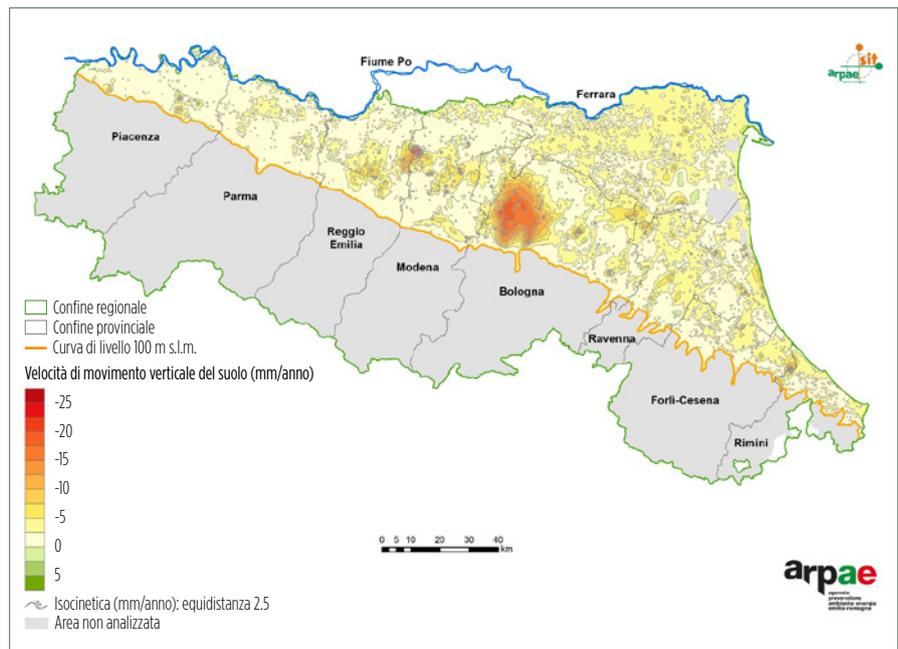


FIG. 1 CARTA DELLE VELOCITÀ
Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2016-2021.

Novità del monitoraggio della subsidenza 2016-2021

Il monitoraggio dei movimenti verticali del suolo nel periodo 2016-2021 è stato effettuato attraverso l'elaborazione interferometrica dei dati satellitari Sar (*Synthetic aperture radar*), messi a disposizione dalla costellazione dei satelliti Sentinel-1 del programma europeo Copernicus (www.copernicus.eu), utilizzando la tecnica SqueeSAR™ e successiva calibrazione dei risultati tramite i dati di movimento verticale di stazioni permanenti Gns (*Global navigation satellite system*), ottenendo le velocità medie di spostamento annuo del suolo nel quinquennio. Le elaborazioni sono state effettuate da Tre Altamira - Telerilevamento Europa srl, con la collaborazione scientifica del Dipartimento di Ingegneria civile, chimica, ambientale e dei materiali dell'Università di Bologna.

Le attività sono state precedute da una verifica delle evoluzioni tecnologiche intervenute negli ultimi anni nell'ambito del rilievo satellitare e della tipologia di dati radar satellitari disponibili, al fine di disporre di una copertura omogenea dell'intero territorio regionale per il periodo 2016-2021, comprendendo, oltre la porzione di pianura storicamente studiata, anche l'elaborazione per la prima volta dei dati interferometrici nella porzione di territorio collinare-montano dell'Emilia-Romagna. Ulteriore novità metodologica rispetto al monitoraggio progressivo è quella di disporre di acquisizioni satellitari in doppia geometria (movimento dei satelliti nelle orbite ascendente e discendente rispetto all'equatore e polo nord), la cui combinazione permette di valutare oltre gli spostamenti verticali del suolo, come fatto nei rilievi precedenti, di calcolare per la prima volta anche gli spostamenti orizzontali del suolo nella direzione est-ovest.

Elaborazioni svolte per la nuova cartografia di subsidenza 2016-2021

L'analisi interferometrica dei dati Sentinel-1 per il periodo 2016-2021 dell'intero territorio regionale di oltre 22.000 km², ha restituito un dataset contenente i singoli spostamenti e la velocità media di spostamento lungo la linea di osservazione del satellite di 13.555.277 punti di misura a terra, tenendo conto delle zone di sovrapposizione delle 4 track di acquisizione del satellite che comprendono le geometrie ascendenti e discendenti. La combinazione dei dati ascendenti e discendenti ha consentito di ottenere la scomposizione del moto nella componente verticale e orizzontale (est-ovest), attraverso il ri-campionamento su una griglia regolare con maglia 50x50 metri, e restituendo queste informazioni per un totale di 704.444 punti di misura a scala regionale. Il dataset così ottenuto è stato poi calibrato utilizzando 21 stazioni permanenti Gnss e utilizzando ulteriori 7 stazioni Gnss per effettuare la validazione post-elaborazione della calibrazione stessa. I risultati ottenuti dalla validazione della calibrazione si possono considerare del tutto soddisfacenti, con una soglia di incertezza complessiva dell'intera analisi di velocità di spostamento effettuata di circa ±2 mm/anno, valore confrontabile con i precedenti periodi di monitoraggio (Arpae Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna, 2023).

Il dataset così ottenuto è stato sottoposto a verifiche e validazione dei singoli punti di misura al fine di eliminare i dati ritenuti anomali (*outliers*) e non rappresentativi del fenomeno a scala regionale ma generalmente riconducibili

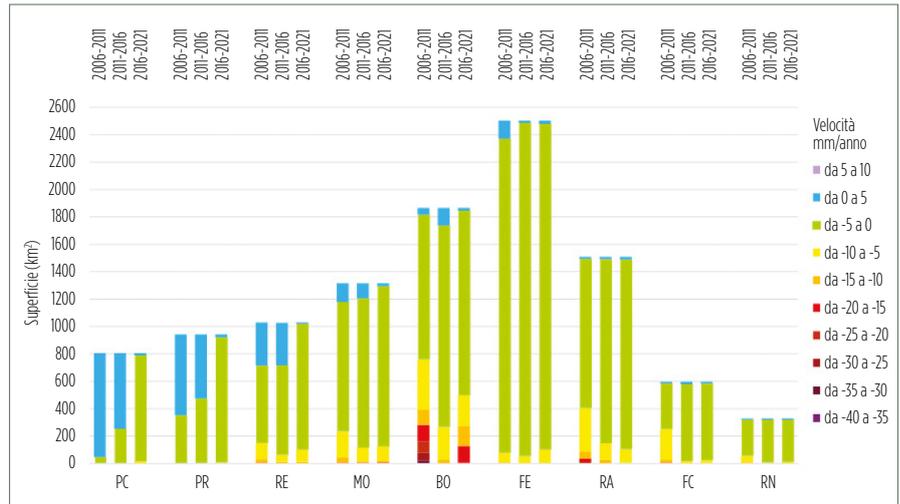


FIG. 2 CLASSI DI MOVIMENTO
Superfici provinciali suddivise per classi di movimento (mm/anno) relative ai periodi 2006-2011, 2011-2016 e 2016-2021.

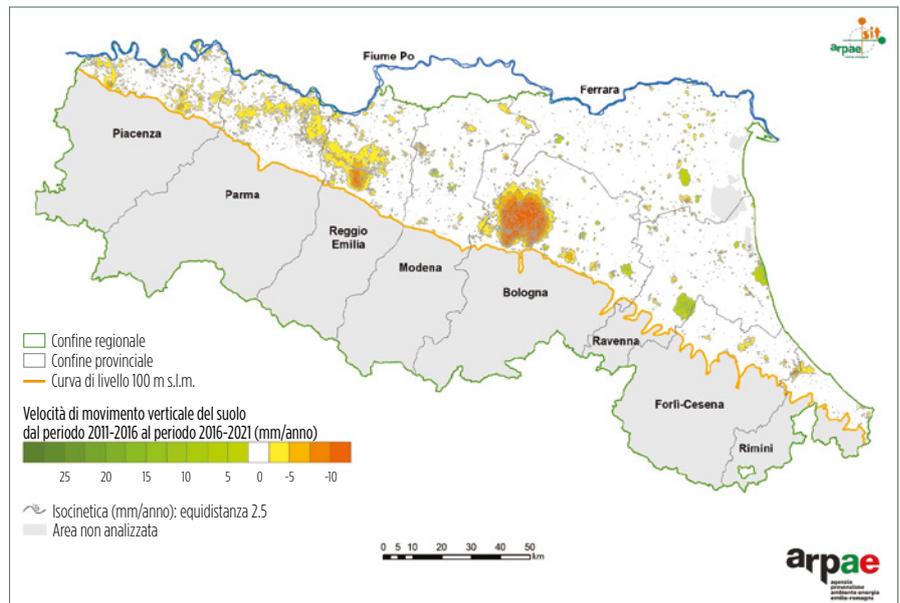


FIG. 3 VARIAZIONI VELOCITÀ
Carta delle variazioni delle velocità di movimento verticale del suolo dal periodo 2011-2016 al periodo 2016-2021.

TAB. 1
CLASSI DI VELOCITÀ DI MOVIMENTO

Superficie di pianura dell'Emilia-Romagna per classe di velocità di movimento verticale e relativa percentuale sul totale nei 3 periodi di monitoraggio dal 2006 al 2021.

Velocità di movimento verticale (mm/anno)	2006-2011		2011-2016		2016-2021	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
da 10 a 5	0,00	0,00%	2,470	0,02%	0,010	0,00%
da 5 a 0	2.014,34	18,49%	1.630,520	14,96%	155,320	1,43%
da 0 a -5	6.964,07	63,91%	8.605,210	78,97%	9.763,990	89,61%
da -5 a -10	1.324,76	12,16%	573,440	5,26%	660,700	6,06%
da -10 a -15	261,05	2,40%	76,710	0,70%	178,650	1,64%
da -15 a -20	159,65	1,47%	7,390	0,07%	131,180	1,20%
da -20 a -25	95,62	0,88%	0,540	0,00%	6,310	0,06%
da -25 a -30	54,92	0,50%	0,030	0,00%	0,170	0,00%
da -30 a -35	21,88	0,20%	0,000	0,00%	0,000	0,00%
da -35 a -40	0,02	0,00%	0,000	0,00%	0,000	0,00%
TOTALE	10.896,31	100%	10.896,31	100%	10.896,31	100%

ad attività antropiche di gestione del territorio e urbanizzazione. Questa attività ha consentito di ottenere il dataset finale che per la zona di pianura ha permesso di elaborare la cartografia dei movimenti verticali del suolo nel periodo 2016-2021 utilizzando un totale di 552.581 punti di misura. La cartografia finale di subsidenza (figura 1) è stata ottenuta attraverso la spazializzazione delle velocità medie annue di spostamento verticale nel quinquennio 2016-2021 del dataset calibrato e validato, utilizzando un grigliato, con maglia di dimensioni pari a 100x100 metri, co-registrato con i grigliati calcolati nei precedenti periodi di monitoraggio, al fine di supportare le comparazioni dei risultati in ambiente Gis (www.arpae.it/it/dati-e-report/dati-ambientali/il-portale-cartografico-di-arpae). Sono state eliminate dalla cartografia finale le aree occupate dalle acque superficiali di transizione, come ad esempio le Valli di Comacchio, e sono state restituite le curve isocinetiche con passo di 2,5 mm/anno.

Evoluzione del fenomeno della subsidenza a scala regionale

Nell'ultimo rapporto regionale sulla subsidenza [3] sono presentati i risultati degli ultimi 15 anni a scala regionale, per ambito provinciale e per la prima volta anche per ambito comunale. Nel periodo 2016-2021 risulta che la velocità media verticale del suolo nella porzione di pianura è compresa tra 0 e -5 mm/anno nell'89,6% del territorio, il 6,1% nella classe da -5 a -10 mm/anno e il 2,9% nelle classi con velocità inferiore a -10 mm/anno (tabella 1). A scala regionale, dal 2006 al 2021, è progressivamente diminuita la classe di velocità da 5 a 0 mm/anno (in sollevamento) aumentando contestualmente la classe di velocità da 0 a -5 mm/anno, e si sono ridotte progressivamente le classi con velocità di subsidenza più elevate, fino a dimezzare nell'ultimo periodo quella da -5 a -10 mm/anno rispetto al periodo 2006-2011.

Dal confronto delle velocità di movimento dell'ultimo periodo 2016-2021 con il precedente (2011-2016) emerge che l'85,47% del territorio di pianura non presenta variazioni di tendenza significative, l'11,17% è interessato da un incremento dell'abbassamento, mentre una tendenza alla riduzione degli abbassamenti si evidenzia per il 3,36% della superficie. Questi risultati a scala provinciale (figure 2 e 3) evidenziano che le province di Piacenza, Parma e Reggio Emilia presentano una diffusa variazione negativa, mentre in passato avevano sempre evidenziato tendenze medie alla risalita della superficie topografica. Bologna presenta l'ampio areale a nord della città con variazione negativa mentre a est di Bologna si evidenziano alcuni limitati areali in miglioramento e altri in peggioramento. Modena, Ravenna e Ferrara presentano anch'esse alcuni areali in miglioramento, come anche Ravenna che presenta le zone più estese in miglioramento, anche lungo la costa, e zone arealmente

Località	Velocità di abbassamento (mm/anno)				Abbassamento totale 1999-2021 (cm)
	1999-2005	2006-2011	2011-2016	2016-2021	
Foce del Po di Goro (FE)	9	9	4	6	-15
Goro (FE)	10	8	3	5	-14
Boscone della Mesola (FE)	7	5	3	6	-11
Lido delle Nazioni (FE)	10	2	3	5	-11
Porto Garibaldi (FE)	8	3	2	4	-9
Dosso degli Angeli (FE)	13	2	3	4	-12
Casalborsetti (RA)	10	3	2	4	-11
Porto Corsini (RA)	13	7	8	6	-18
Marina di Ravenna (RA)	8	5	4	4	-11
Punta Marina (RA)	10	5	4	4	-12
Lido Adriano (RA)	15	14	11	8	-25
Lido di Dante (RA)	19	21	17	9	-35
Foce Bevano (RA)	11	11	11	7	-22
Lido di Savio (RA)	10	6	5	5	-14
Milano Marittima (RA)	10	7	5	6	-15
Pinarella di Cervia (RA)	8	5	3	3	-10
Cesenatico (FC)	9	5	3	3	-11
Gatteo a Mare (FC)	10	6	3	3	-12
Bellaria (RN)	8	5	2	2	-10
Torre Pedrera (RN)	6	3	3	3	-8
Rimini	9	6	4	3	-12
Cattolica (RN)	4	4	3	3	-7

TAB. 2
VELOCITÀ

Andamento della velocità di movimento verticale del suolo dal 1999 al 2021 lungo il litorale dell'Emilia-Romagna.

molto limitate e frammentate in peggioramento. Infine al confine tra Cesena e Rimini si evidenzia una zona in peggioramento.

Nella provincia di Bologna, in particolare la zona di pianura a nord del capoluogo, ha registrato storicamente valori elevati di subsidenza che nel tempo sono sempre risultati in progressiva diminuzione, e nel precedente rilievo 2011-2016 sono risultati in forte diminuzione e in alcuni areali si sono registrate anche velocità positive (in sollevamento), le cui ragioni erano legate principalmente alla riduzione degli emungimenti di acque sotterranee e al favorevole regime climatico del periodo. La situazione attuale 2016-2021 fa registrare invece un incremento degli abbassamenti in tutto l'areale storicamente critico, ma con tassi meno elevati rispetto il passato.

Sul litorale continua la tendenza, già manifestatasi con il precedente rilievo, a una diminuzione della subsidenza, dove le velocità verticali non superano i 10 mm/anno che si raggiungono nella zona della foce dei Fiumi Uniti tra Lido Adriano e Lido di Dante (vedi *figura 1*). Le velocità riscontrate nell'ultimo periodo risultano in attenuazione rispetto a quelle del periodo 2011-2016, soprattutto da Ravenna a Rimini, dove le velocità di Lido di Dante si sono circa dimezzate (*tabella 2*). Le velocità verticali e orizzontali calcolate per la prima volta nel territorio collinare e montano hanno permesso di fare solo alcune valutazioni molto preliminari in relazione all'inventario dei fenomeni franosi disponibile per l'Emilia-Romagna.

L'analisi infine dei prelievi da acque sotterranee ha evidenziato che dal 2010 al 2018 si è avuta una riduzione media del

6% dei prelievi che ha riguardato tutte le province, a parte un leggero incremento a Bologna per il settore industriale e acquedottistico.

Contestualmente però i livelli medi di falda nel periodo 2016-2021, coincidente con le elaborazioni interferometriche, sono in diminuzione in modo generalizzato in tutte le tipologie di corpi idrici sotterranei di pianura dell'Emilia-Romagna, al contrario di quanto era avvenuto nel periodo precedente 2010-2011 e 2014-2016, quando i livelli di falda avevano subito un significativo incremento prevalentemente per effetto della consistente ricarica meteorica (Arpae Emilia Romagna, 2021). Questo effetto è stato molto evidente nella conoide del Reno-Lavino a nord della città di Bologna, dove la falda era risalita in alcune zone di circa 15 metri, comportando una attenuazione significativa della subsidenza.

Una valutazione delle precipitazioni dal 2006 al 2021 evidenzia come siano diminuite in particolare nella zona ovest del territorio regionale, da Reggio Emilia a Piacenza, e abbia piovuto meno in generale in tutta la fascia della isolina dei 100 m slm, che rappresenta la zona delle conoidi alluvionali appenniniche in cui avviene la ricarica degli acquiferi profondi di pianura. Le condizioni climatiche e in particolare l'entità e il regime delle precipitazioni, a parità di prelievi idrici da acque sotterranee, possono influire sul regime di ricarica naturale degli acquiferi e avere effetti sulle variazioni verticali del suolo, come evidenziato per l'area di conoide Reno-Lavino anche attraverso le valutazioni dei dati automatici ad alta frequenza degli assestimetri congiuntamente ai livelli di falda.

Marco Marcaccio, Marianna Mazzei

Arpae Emilia-Romagna

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[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 a cura di Marco Marcaccio e Andrea Chahoud, Arpa Emilia-Romagna, Bologna, 126 pp., www.arpae.it/it/temi-ambientali/suolo/rapporti/rapporti-subsidenza/conoide-alluvionale-fiume-reno-modello-idrogeologico/view

[2] Arpae Emilia-Romagna, 2021, *Valutazione dello stato delle acque sotterranee 2014-2019*, Rapporto tecnico a cura di Marco Marcaccio e Daniela Lucchini, Bologna, 114 pp., www.arpae.it/it/temi-ambientali/acqua/report-bollettini/acque-sotterranee/report_acque_sotterranee_er_2014-2019/view

Arpae Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna, 2023, *Monitoraggio dei movimenti verticali del suolo e aggiornamento della cartografia di subsidenza nella pianura dell'Emilia-Romagna. Periodo 2016-2021*, Rapporto tecnico a cura di Marco Marcaccio e Marianna Mazzei, Arpae Emilia-Romagna, Bologna, 97 pp., www.arpae.it/it/temi-ambientali/suolo/rapporti/rapporti-subsidenza/monitoraggio-movimenti-verticali-suolo-e-cartografia-subsidenza-emilia-romagna-2016-2021.zip



FOTO: REGIONE EMILIA-ROMAGNA