

## CAPITOLO 4

# QUALITÀ DELLE ACQUE INTERNE

### Introduzione

La Direttiva europea 2000/60 (*Water Framework Directive*, WFD), recepita in ambito nazionale dal D.Lgs. 152/06 e dalle norme tecniche derivate, definisce, per le acque superficiali, lo stato di qualità dei corpi idrici attraverso lo studio degli elementi biologici supportati dai dati idromorfologici, chimici e chimico-fisici.

Per le acque sotterranee, la Direttiva 2006/118/CE (*Groundwater Directive*), recepita con il D.Lgs. 30/2009, ha fissato i criteri per l'identificazione e la caratterizzazione dei corpi idrici sotterranei, stabilito gli *standard* e i criteri per valutare il buono stato chimico delle acque sotterranee, per individuare e invertire le tendenze significative e durature all'aumento dell'inquinamento.

Di riferimento per la valutazione delle risorse idriche è la Direttiva Alluvioni 2007/60/CE (*Floods Directive*), recepita con il D.Lgs. 49/2010, che ha come obiettivo la riduzione degli effetti distruttivi delle inondazioni attraverso la valutazione e la gestione dei rischi associati a tali eventi.

Nell'ambito delle azioni comunitarie sulla tutela qualitativa delle acque, la Direttiva 91/676/CEE (Direttiva Nitrati) si pone l'obiettivo di proteggere le acque dall'inquinamento prodotto dai nitrati di origine agricola.

I dati di monitoraggio sulla qualità delle acque superficiali interne sono ancora esigui, poiché la classificazione sarà effettuata alla fine del primo ciclo sessennale di gestione dei **distretti idrografici**, momento in cui gli stessi dati saranno valutati e incrociati al fine della classificazione dello stato chimico e dello stato ecologico. Pertanto, in questa edizione, si tratterà prevalentemente lo stato chimico delle acque sotterranee.

### Lo stato della qualità delle acque interne

La qualità delle acque sotterranee viene rappresentata dall'indice SCAS (Stato Chimico delle Acque Sotterranee) che evidenzia le zone sulle quali insistono criticità ambientali rappresentate dagli impatti di tipo chimico delle attività antropiche sui corpi idrici sotterranei.

Lo stato chimico di ciascun corpo idrico sotterraneo, insieme allo stato quantitativo, determinato dal regime dei prelievi di acque sotterranee e dal ravvenamento naturale di queste ultime, permette la definizione dello stato complessivo del corpo idrico.

L'indice SCAS viene rappresentato, per ciascuna stazione di monitoraggio dei corpi idrici sotterranei, in due classi "buono" e "scarso", come definite nel D.Lgs 30/09.

Nella classe "buono" rientrano tutte le acque sotterranee che non presentano evidenze di impatto antropico, e anche quelle in cui sono presenti sostanze indesiderate o contaminanti, ma riconducibili a

*Lo Stato di qualità del corpo idrico sotterraneo è dato dallo stato chimico e dallo stato quantitativo.*

*La classificazione dello stato chimico delle acque sotterranee prevede due classi, ovvero stato "buono" e stato*

un'origine naturale. Nella classe "scarso", invece, rientrano tutte le acque sotterranee che non possono essere classificate nello stato "buono" e nelle quali risulta evidente un impatto antropico, sia per livelli di concentrazione dei contaminanti, sia per le tendenze significative e durature all'aumento nel tempo. "scarso.

La rappresentazione provvisoria dell'indicatore SCAS nel triennio 2010-2012, è stata elaborata per stazioni di monitoraggio distinte per ambito territoriale regionale o provinciale e per complesso idrogeologico, a livello nazionale, su 4.416 stazioni di monitoraggio il 71% ricade in classe "buono", mentre il restante 29% in classe "scarso". *Nel 2010-2012, su 4.416 stazioni, il 71% presenta uno SCAS ricadente nella classe "buono".*

Dall'esame delle percentuali delle classi di SCAS delle singole regioni e province autonome (Figura 4.1), tenendo conto del numero totale di punti di prelievo per ciascun ambito territoriale, emerge che la Provincia Autonoma di Bolzano ha tutte le stazioni di monitoraggio in classe "buono", seguita dal Molise con il 96,5%. Al contrario, la maggiore incidenza dello stato "scarso" si riscontra in Sardegna (45%), seguita da Sicilia e Lombardia (39,5%).

Analizzando lo SCAS in relazione ai **complessi idrogeologici** presenti nelle diverse regioni (Toscana e Friuli-Venezia Giulia descrivono 6 complessi idrogeologici, mentre Valle d'Aosta, Liguria, Lombardia e Provincia di Trento solo uno - Figura 4.2), le alluvioni delle depressioni quaternarie (DQ) rappresentano il complesso con il maggior numero di stazioni di monitoraggio, pari a 2.490, seguito dalle alluvioni vallive (AV) e da calcari (CA); mentre vulcaniti (VU), formazioni detritiche (DET) e acquiferi locali (LOC) sono descritti da un minore numero di stazioni. La classe "buono" nelle DQ e nelle AV mostra percentuali confrontabili, rispettivamente pari al 68,9% e 67,1%, leggermente più basse di quella nazionale (71%); mentre CA e LOC sono di qualità più elevata raggiungendo rispettivamente il 90,3% e 81,6%. Solo i DET e le VU presentano una qualità più scadente (62,4% e 56,1%).

I parametri critici che determinano la classe "scarso" per ciascun ambito territoriale o per complesso idrogeologico sono spesso le sostanze inorganiche quali nitrati, solfati, fluoruri, cloruri, boro, insieme a metalli, sostanze clorurate, aromatiche e pesticidi.

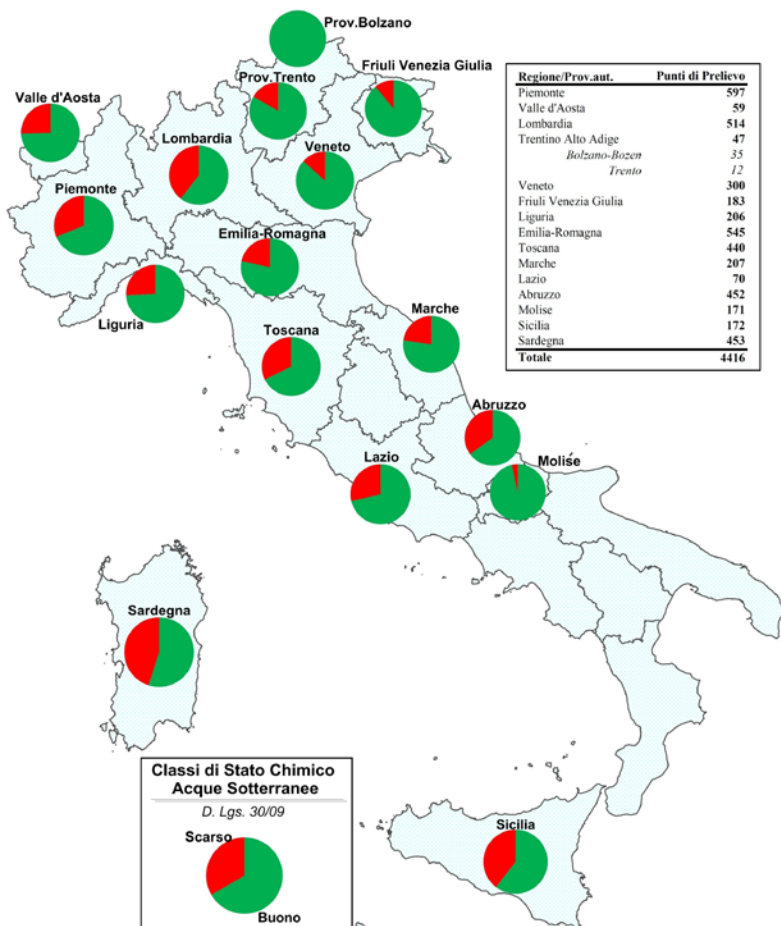
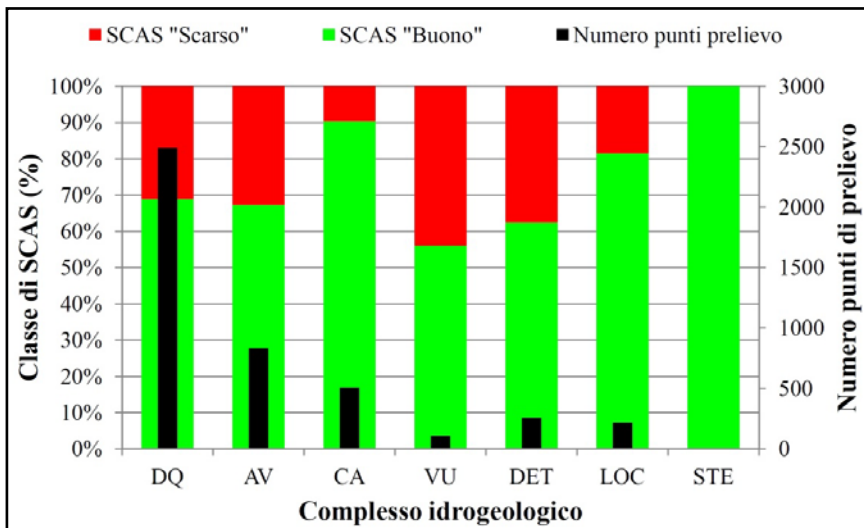


Figura 4.1: Percentuale delle classi di SCAS sul totale dei punti di prelievo per ambito territoriale (2010-2012)<sup>1</sup>



Legenda:

DQ - Alluvioni delle depressioni quaternarie; AV - Alluvioni vallive; CA - Calcari; VU - Vulcaniti; DET - Formazioni detritiche degli altipiani plio-quaternari; LOC - Acquiferi locali; STE - Formazioni sterili

Figura 4.2: Percentuale delle classi di SCAS sul totale dei punti di prelievo per complesso idrogeologico (2010-2012)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fonte: Elaborazione ISPRA/ARPA Emilia-Romagna su dati forniti da regioni, province autonome e ARPA/APPA

<sup>2</sup> Fonte: Elaborazione ISPRA/ARPA Emilia-Romagna su dati forniti da regioni, province autonome e ARPA/APPA

La misura sistematica e l'analisi delle variabili idro-meteorologiche quali temperatura, precipitazione e portata, ricoprono un ruolo fondamentale per l'azione conoscitiva del territorio, per l'elaborazione del bilancio idrologico, per lo studio e la prevenzione di eventi estremi e di fenomeni indotti (inondazioni, siccità, frane, ecc.) e, più in generale, per valutare l'andamento della situazione climatica.

La siccità, a differenza dell'aridità che indica una condizione di permanente carenza di risorse idriche, è una condizione temporanea e relativa di scarsità idrica definita come uno scostamento rispetto a condizioni climatiche medie di un determinato luogo di interesse. L'impatto sull'ambiente è poi legato al perdurare delle condizioni siccitose.

Una carenza di piogge prolungata per molti mesi (6-12 mesi) avrà effetti sulla portata dei fiumi; mentre per un periodo maggiore (uno o due anni) graverà sulla disponibilità di acqua nelle falde.

La Commissione Europea in collaborazione con gli Stati membri ha sviluppato un osservatorio europeo della siccità (EDO – *European Drought Observatory*<sup>3</sup>) e definito una serie di indici e strumenti per la valutazione, il monitoraggio e la previsione della siccità a scala europea.

*Siccità idrologica*

L'indice *Standardized Precipitation Index* (SPI), comunemente usato sia a livello internazionale sia nazionale, quantifica statisticamente, su una data scala temporale e spaziale, il deficit o il surplus di precipitazioni rispetto alla corrispondente media climatologica.

L'ISPRA fornisce un monitoraggio mensile della siccità sul territorio nazionale (e anche su alcune particolari aree del continente e del bacino del Mediterraneo) attraverso il calcolo di mappe di SPI a 3, 6, 12 e 24 mesi, utilizzando come dati di precipitazione le rianalisi su grigliati a 2.5° del *National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy* (NCEP/DOE reanalysis).

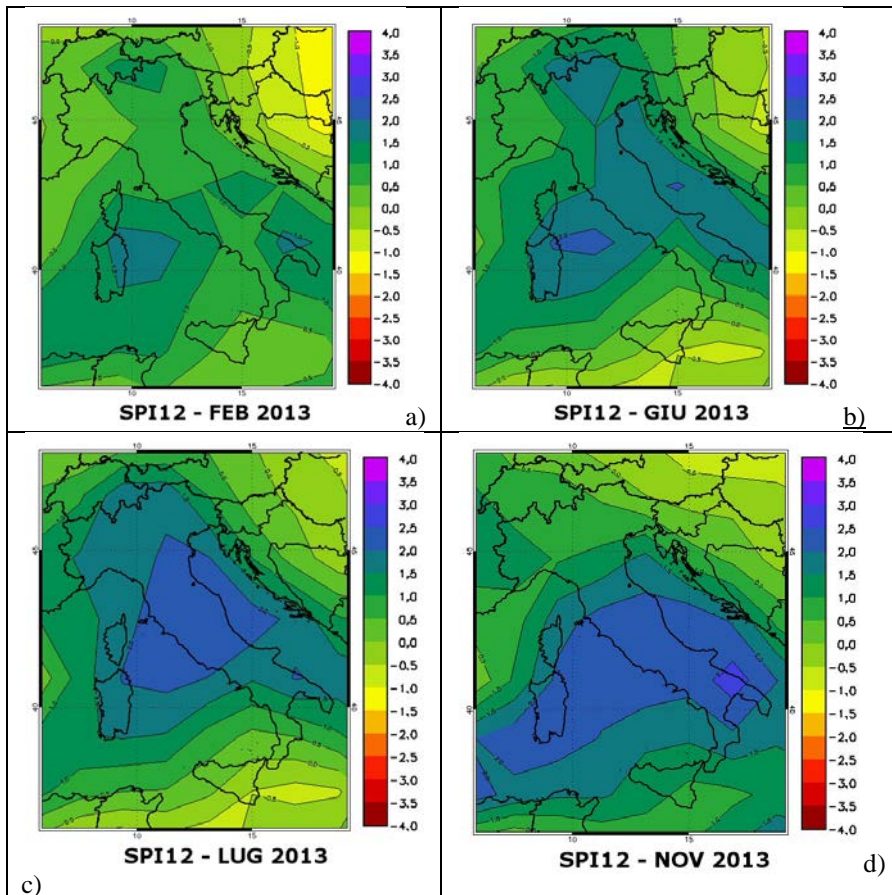
Le mappe di SPI a 12 mesi non evidenziano fenomeni di siccità per il 2013. Tuttavia, in corrispondenza dell'Italia centrale, in particolare da luglio (Figura 4.3c) a novembre (Figura 4.3d), e della Sardegna, tra febbraio (Figura 4.3a) e giugno (Figura 4.3b), si evidenzia un surplus di precipitazione rispetto alla media climatologica per il periodo 1948–2012, calcolata sulle serie di pioggia cumulata su 12 mesi ottenute dai dati giornalieri di rianalisi NCEP. Situazioni di piovosità estrema/severa nel corso del 2013 sono state evidenziate anche in Piemonte.

*Per il monitoraggio della siccità si utilizza lo Standardized Precipitation Index (SPI), che quantifica il deficit o surplus di precipitazioni rispetto alla corrispondente media climatologica.*

*Nel 2013 non sono stati evidenziati fenomeni di siccità.*

---

<sup>3</sup> <http://edo.jrc.ec.europa.eu/>



*A luglio e novembre 2013 si rileva, sull'Italia centrale e Sardegna, un surplus di precipitazioni.*

*Fenomeni di siccità sono stati registrati in Sicilia e nell'Italia nord-est, in particolare durante l'estate.*

Legenda:

> 2.0 Estremamente umido; da 1.5 a 1.99 Molto umido; da 1.0 a 1.49 Moderatamente umido; da -0.99 a 0.99 Vicino alla norma; da -1.49 a -1 Siccità moderata; da -1.99 a -1.5 Siccità severa; < -2.0 Siccità estrema

**Figura 4.3: SPI a 12 mesi**<sup>4</sup>

### Le principali cause di alterazione

Le aree fortemente antropizzate costituiscono un nodo critico per l'elevata domanda di acqua per usi civili, industriali, agricoli, ricreativi e per la produzione di altrettanti volumi di reflui da sottoporre a trattamenti depurativi. Gli agenti inquinanti delle acque più comuni sono gli inquinanti fecali, le sostanze inorganiche tossiche e nocive, le sostanze organiche non naturali, oli ed emulsionanti, solidi sospesi, calore, ecc.

La massiccia antropizzazione e industrializzazione delle aree urbane determina spesso scarichi di fognature civili non depurati, scarichi dei residui di materie prime e dei prodotti intermedi e finali dell'industria, il dilavamento di rifiuti e inquinanti delle aree cementificate adibite ad attività di servizi. I sistemi di collettamento e di depurazione, in alcuni casi, risultano inadeguati e non idonei ad abbattere il carico inquinante dei volumi di acque reflue e industriali prodotti da vasti agglomerati.

La grande industria specificatamente determina oltre che l'inquinamento da sostanze inorganiche tossiche e nocive (ioni di metalli pesanti quali Cr<sup>6+</sup>, Hg<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, CN<sup>-</sup>, fosfati e polifosfati) e da sostanze organiche non naturali (acetone, trielina,

*L'inquinamento delle acque deriva principalmente dall'attività dell'uomo.*

*Dall'industria deriva l'inquinamento chimico e termico.*

<sup>4</sup> Fonte: Elaborazione ISPRA su NCEP Reanalysis II data



benzene, toluene, ecc.), anche l'inquinamento termico che, con la modifica della temperatura dell'acqua, va ad alterare gli equilibri chimici e biochimici dei corpi idrici diminuendo la solubilità dell'ossigeno disciolto, provocando così alterazioni patologiche e/o la scomparsa di alcune specie viventi e/o lo sviluppo di altre normalmente assenti.

La presenza di allevamenti zootecnici intensivi genera forti pressioni dovute ai liquami prodotti e al dilavamento delle deiezioni, e l'uso massiccio in agricoltura di fertilizzanti e di prodotti fitosanitari, può causare impatti sulla vita acquatica e modificazioni delle acque per uso potabile sia superficiali sia sotterranee.

L'acquisizione di informazioni riguardanti le fonti di inquinamento, il tipo e l'entità dei pericoli e dei danni in atto, costituisce il presupposto per la definizione di misure e programmi per la gestione di un determinato ambiente.

*I residui della zootecnia e l'uso massiccio di fitosanitari e fertilizzanti in agricoltura possono causare impatti sulla vita acquatica.*

### **Le azioni volte alla tutela della qualità delle acque**

A livello nazionale, il quadro normativo è in evoluzione e progressiva attuazione. Il D.Lgs. 152/06, che nella sua Parte Terza rappresenta il recepimento della Direttiva quadro in materia di Acque (2000/60/CE), con l'emanazione delle norme tecniche che in questi anni si sono susseguite sta portando a completamento il processo attuativo degli obiettivi di prevenzione e riduzione dell'inquinamento, della promozione di un utilizzo sostenibile dell'acqua, della protezione dell'ambiente, del miglioramento delle condizioni degli ecosistemi acquatici e della mitigazione degli effetti delle inondazioni e della siccità.

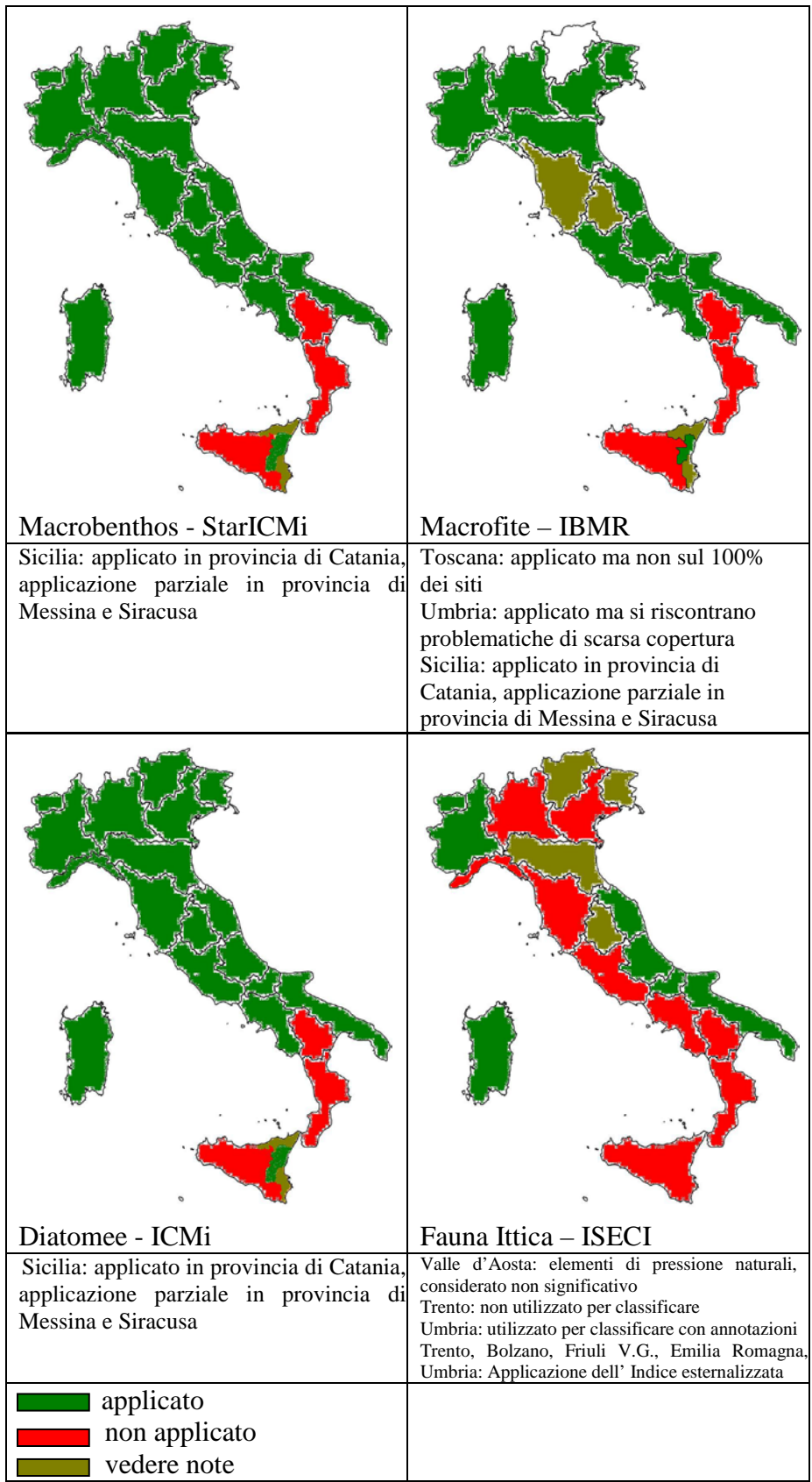
Lo strumento previsto dalla normativa per attuare questi obiettivi è il Piano di Bacino Distrettuale.

Ad oggi tutti i **Distretti Idrografici** sono dotati di un **Piano di Gestione Distrettuale**. Tali piani saranno rivisti nel 2015 e successivamente ogni sei anni.

Per dare un quadro, sicuramente non esaustivo, sulla progressiva attuazione dei monitoraggi previsti nelle normative vigenti, si riporta schematicamente la situazione dell'applicazione dei monitoraggi biologici sui corpi idrici fluviali nelle diverse regioni, prioritari per l'espressione del giudizio di qualità (Figura 4.4).

Dei quattro indicatori previsti, i più applicati risultano Macrobenthos e Diatomee. Le Macrofite sono applicate da meno regioni, sia per la non obbligatorietà in area alpina, sia per la minore presenza di personale formato. Le maggiori difficoltà di applicazione si presentano per l'Indice dello Stato Ecologico delle Comunità Ittiche (ISECI).

Alcune regioni, infatti, eseguono questo monitoraggio senza però utilizzarlo per classificare (Valle d'Aosta e provincia di Trento), oppure viene usato ma con aggiunta di annotazioni (Umbria). Nel Sud Italia, precisamente in Basilicata, Calabria e Sicilia (con l'eccezione della provincia di Catania che supporta non su tutti i siti le province di Messina e Siracusa) si riscontra la situazione peggiore per l'applicazione dei quattro gli indicatori.



**Figura 4.4: Applicazione dei monitoraggi biologici sui corpi idrici fluviali<sup>5</sup>**

<sup>5</sup> Fonte: Elaborazione ISPRA da questionari ARPA/APPA

## FOCUS

### Monitoraggio quantitativo delle acque sotterranee dell'Emilia-Romagna e variazioni dei livelli di falda indotte dagli eventi sismici del 2012

Il monitoraggio delle acque sotterranee è necessario per definire lo stato ambientale dei corpi idrici sotterranei, che deriva dall'osservazione congiunta dello stato quantitativo e dello stato chimico, con l'obiettivo di verificare il mantenimento o il raggiungimento dello stato di "buono" definito ai sensi della Direttiva 2000/60/CE. Sono pertanto necessarie due diverse tipologie di reti di monitoraggio, funzionali a ricostruire rispettivamente:

- lo stato chimico, attraverso campionamenti periodici di acque e successive determinazioni chimiche di laboratorio, al fine di definire la concentrazione delle sostanze chimiche sia di origine naturale, sia di origine antropica, e individuare le eventuali tendenze delle concentrazioni (Direttiva 2006/118/CE);
- lo stato quantitativo, attraverso la misura dei livelli delle acque nei pozzi o delle portate nelle sorgenti, al fine di verificare che la media annua dei prelievi a lungo termine non esaurisca le risorse idriche sotterranee disponibili.

Le due reti di monitoraggio vengono progettate e gestite per ciascun corpo idrico sotterraneo o per raggruppamento degli stessi, definendo la densità spaziale delle stazioni di monitoraggio, la profondità, la frequenza di monitoraggio e la complessità dello *screening* analitico, tenendo conto in generale dei seguenti principali elementi (*European Commission*, 2009; D.Lgs. 30/2009):

- distribuzione dei corpi idrici sotterranei individuati sia in planimetria, sia in profondità;
- tipologia dei **complessi idrogeologici** cui appartengono i diversi corpi idrici;
- vulnerabilità intrinseca dei corpi idrici, zone di ricarica e tempi di rinnovamento delle acque;
- presenza di pressioni antropiche significative di tipo sia chimico, sia quantitativo, che possono condizionare, direttamente o indirettamente, lo stato ambientale dei corpi idrici;
- impatti di tipo chimico o quantitativo derivanti dalle pressioni antropiche.

Nella porzione territoriale di pianura dell'Emilia-Romagna sono state distinte, procedendo dalla superficie in profondità, 3 diverse tipologie di corpi idrici: freatici, confinati superiori e confinati inferiori (Figura 4.5).

La rete di monitoraggio quantitativa della porzione di pianura è stata istituita nel 1976, mentre quella per il monitoraggio chimico è stata avviata nel 1987. Nel 2010 entrambe le reti sono state revisionate e ampliate territorialmente alla porzione montana e freatica di pianura (Regione Emilia-Romagna, 2010).

Il monitoraggio quantitativo viene attualmente effettuato in modo manuale, con frequenza semestrale (primavera e autunno), su 626 stazioni, delle quali 74 sono sorgenti e le restanti 552 sono pozzi. Tra queste ultime, vi sono 40 stazioni in cui il monitoraggio avviene in automatico, tramite centraline automatiche di acquisizione del livello di falda (Figura 4.6), temperatura e in alcuni casi della conducibilità elettrica, con frequenza oraria.



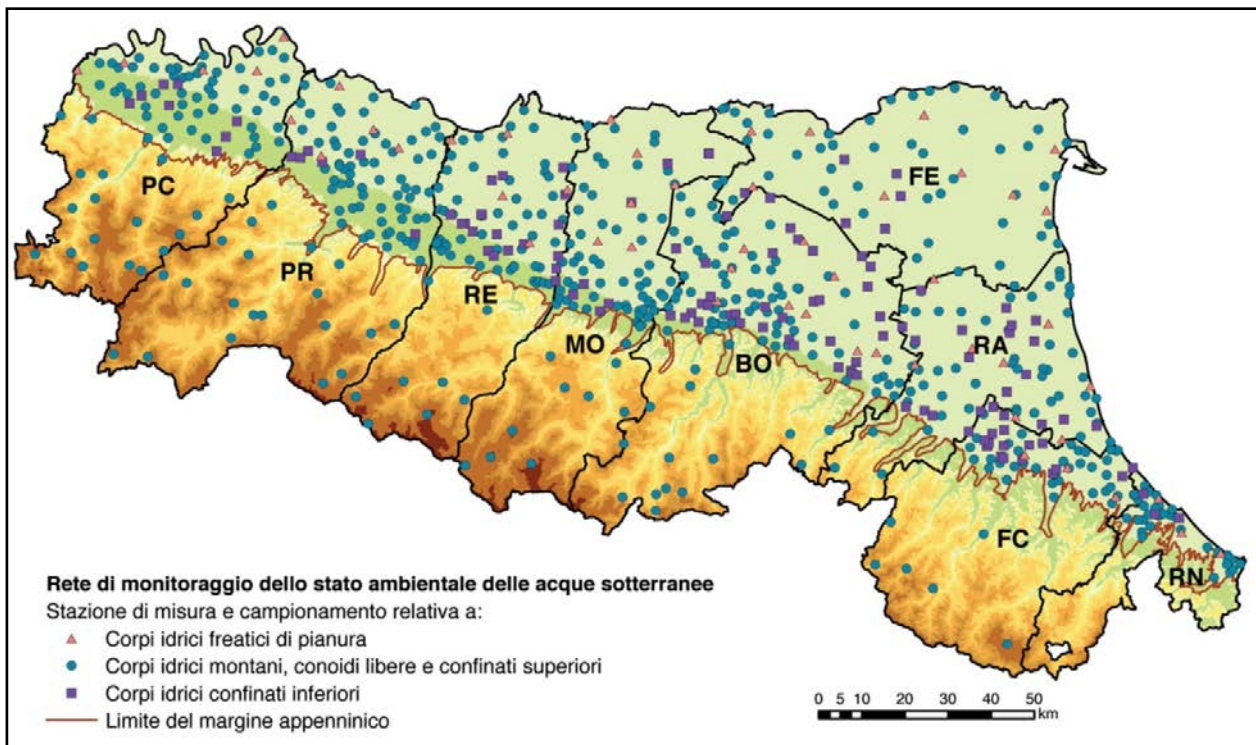


Figura 4.5: Distribuzione delle stazioni di monitoraggio delle acque sotterranee dell'Emilia-Romagna, distinte per tipologia di corpi idrici sotterranei<sup>6</sup>

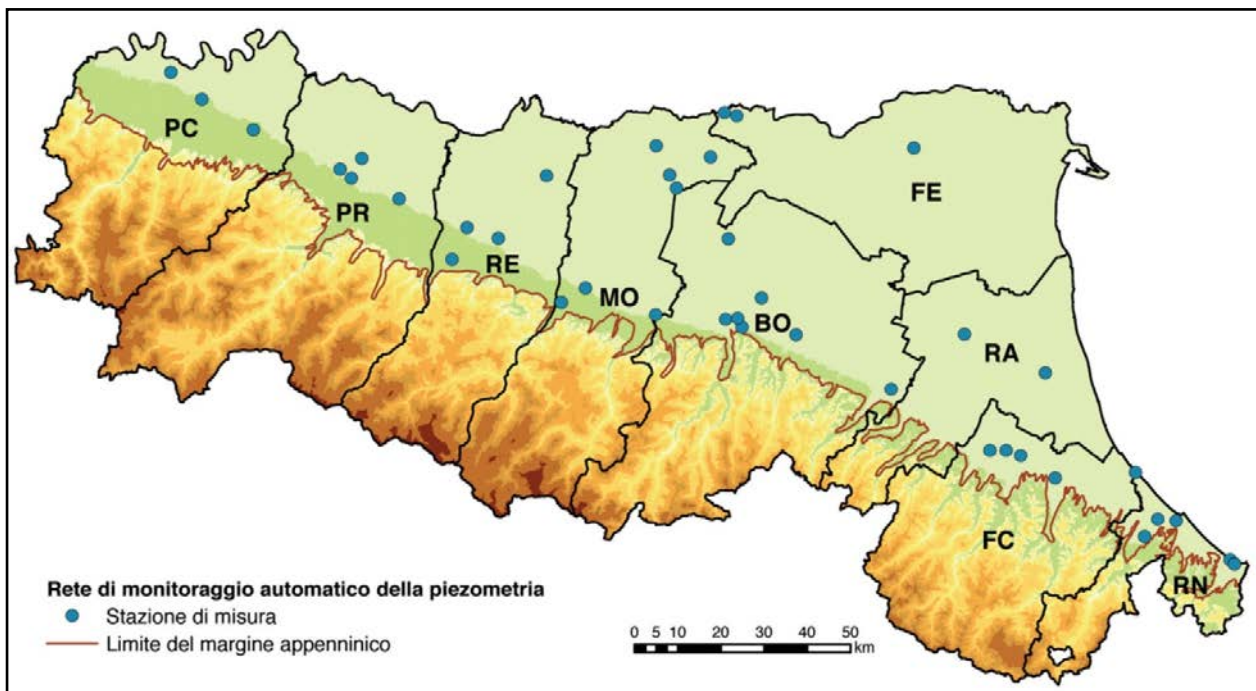


Figura 4.6: Distribuzione delle stazioni di monitoraggio automatico delle acque sotterranee di pianura dell'Emilia-Romagna<sup>7</sup>

<sup>6</sup> Fonte: ARPA Emilia-Romagna

<sup>7</sup> Fonte: ARPA Emilia-Romagna

### Alcuni risultati del monitoraggio quantitativo delle acque sotterranee in Emilia-Romagna

I dati di monitoraggio quantitativo delle acque sotterranee sono indispensabili per caratterizzare il deflusso delle acque all'interno dei corpi idrici sotterranei, definire i rapporti tra le acque sotterranee e quelle superficiali, siano esse fluviali, di transizione o marine, verificare la sostenibilità dei prelievi idrici, ecc. Una delle principali elaborazioni di questi dati è la ricostruzione della superficie piezometrica (livello delle falde rispetto al livello medio del mare), che permette di individuare le direzioni di deflusso delle acque sotterranee e calcolare i gradienti idraulici.

Le nuove carte della **piezometria** dei corpi idrici di pianura dell'Emilia-Romagna sono state elaborate spazializzando i dati medi del triennio 2010-2012 di ciascuna stazione di monitoraggio, distinguendole, a differenza del passato, sulla base della loro appartenenza ai corpi idrici di pianura alluvionale, distinti in base alla profondità: liberi e confinati superiori (Figura 4.7) e liberi e confinati inferiori (Figura 4.8).

La distribuzione della piezometria presenta il caratteristico andamento del livello delle acque sotterranee, con valori elevati nelle zone di margine appenninico che si attenuano passando dalle zone di ricarica diretta delle acque sotterranee (conoidi alluvionali appenniniche) alle zone di pianura alluvionale, con valori anche negativi nella zona costiera. Questo andamento, riscontrabile alle due diverse profondità, evidenzia un flusso idrico sotterraneo dal margine appenninico verso il Po e la costa, caratterizzato da gradienti idraulici differenti: più elevati nelle zone delle conoidi emiliane rispetto a quelle romagnole. Detto andamento, però, è interrotto nella zona della conoide Reno-Lavino (Bologna), che presenta, in prossimità del margine appenninico, valori di piezometria negativi anche nella porzione libera di conoide, raggiungendo valori fino a -10 m, che corrispondono alla presenza di un acquifero insaturo dello spessore di circa 60 m al di sotto dell'alveo del fiume Reno. Questa depressione piezometrica si amplia arealmente con la profondità, ovvero negli acquiferi liberi e confinati inferiori (Figura 4.8). Ciò costituisce l'impatto, ancora oggi evidente, prodotto dai consistenti prelievi effettuati negli anni '50 - '60 del secolo scorso nella conoide medesima. La distribuzione della **soggiacenza** (profondità della falda rispetto al piano campagna) evidenzia situazioni, seppure molto meno accentuate rispetto a quella del Reno, anche in altre conoidi, come ad esempio nel Trebbia, Taro, Secchia, Panaro e in alcune conoidi romagnole (ARPA Emilia-Romagna, 2013).

L'analisi delle variazioni nel tempo della piezometria fornisce indicazioni utili per definire lo stato quantitativo dei corpi idrici, in grado di evidenziare le situazioni in disequilibrio sul lungo periodo (*trend* negativi di piezometria), dovute cioè al prevalere dello sfruttamento della risorsa idrica sotterranea rispetto la capacità di ricarica naturale degli acquiferi.

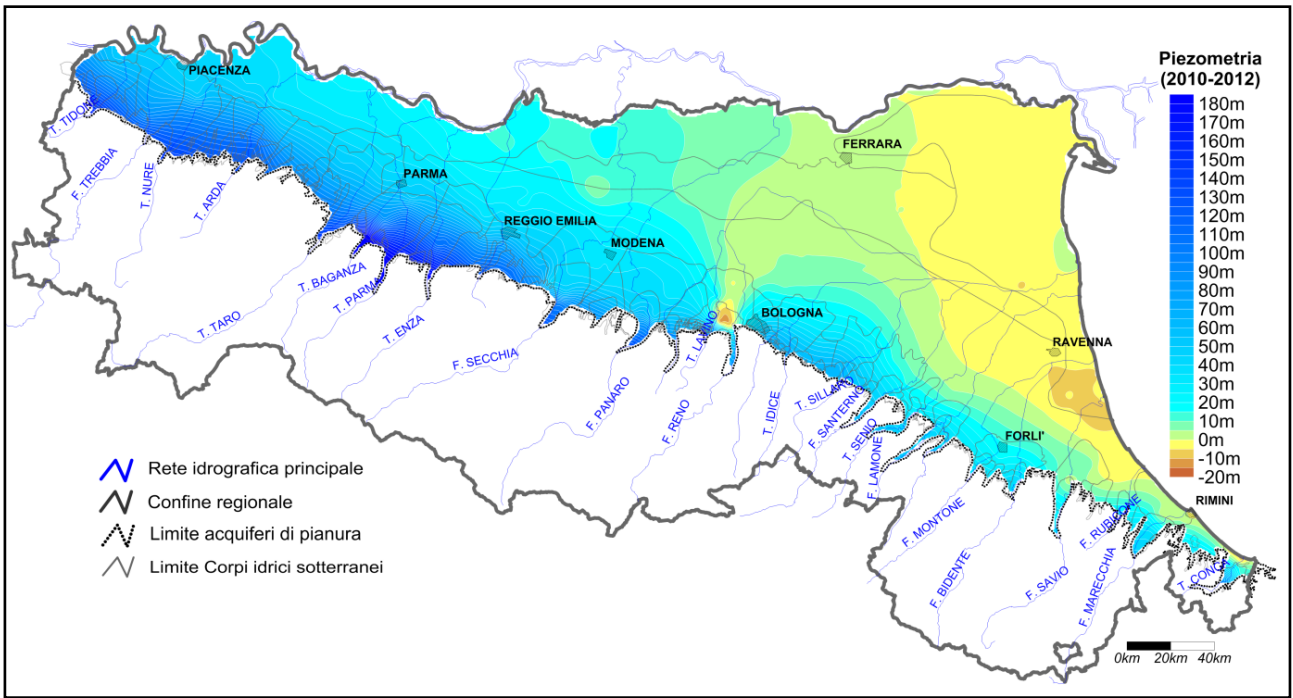


Figura 4.7: Piezometria media nei corpi idrici liberi e confinati superiori (2010-2012)<sup>8</sup>

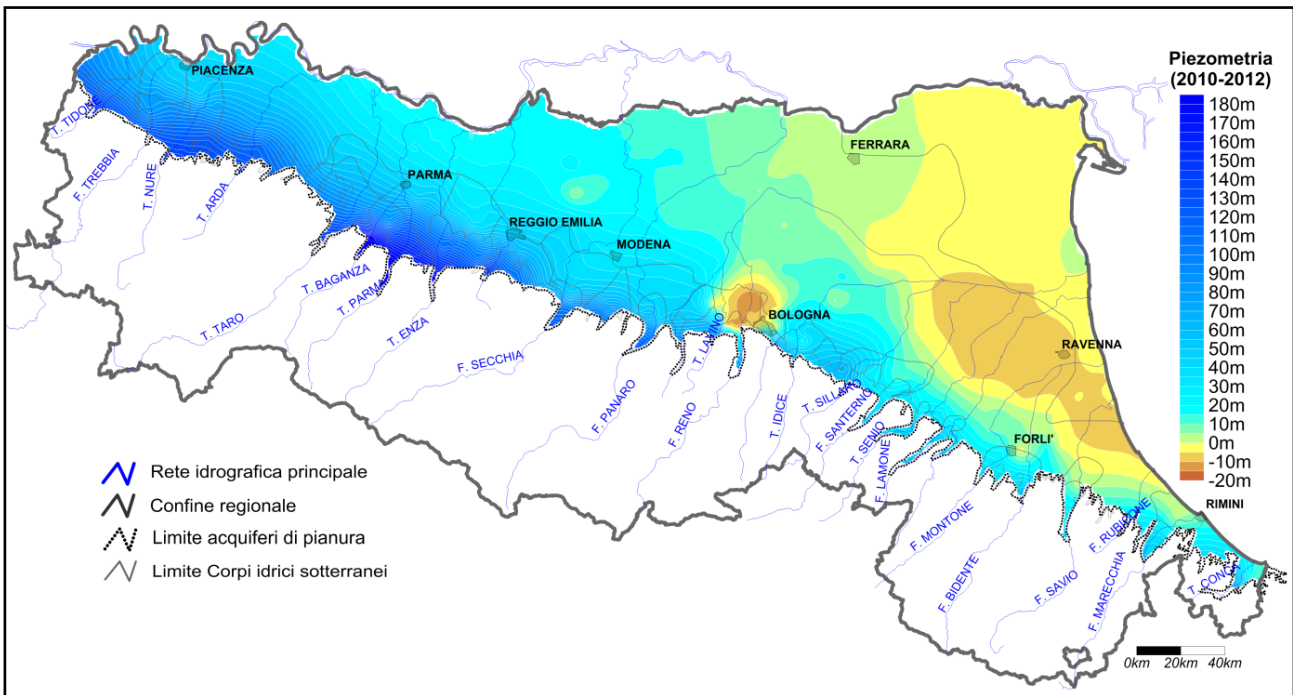


Figura 4.8: Piezometria media nei corpi idrici liberi e confinati inferiori (2010-2012)<sup>9</sup>

<sup>8</sup> Fonte: ARPA Emilia-Romagna

<sup>9</sup> Fonte: ARPA Emilia-Romagna

### Monitoraggio quantitativo automatico delle acque sotterranee

Il monitoraggio quantitativo automatico delle acque sotterranee in Emilia-Romagna è stato avviato nel 2007-2008 con l'installazione di una rete di monitoraggio regionale costituita da 40 stazioni in grado di acquisire automaticamente i dati con frequenza oraria e trasmetterli a un centro di gestione. Nonostante il numero delle stazioni si possa considerare esiguo rispetto l'estensione territoriale regionale, rappresenta per le acque sotterranee dell'Emilia-Romagna il primo approccio strutturato di monitoraggio automatico.

Il monitoraggio automatico permette di ottenere una migliore descrizione dei fenomeni di carattere naturale o artificiale, caratterizzati da tempi relativamente rapidi di evoluzione e quindi non osservabili con le classiche misurazioni manuali. Inoltre, la rete permette di fornire risposte in tempo reale nei periodi dell'anno più critici per quanto riguarda l'insorgere di potenziali "crisi idriche" determinate, ad esempio, dalla maggiore richiesta della risorsa idrica nel periodo estivo - autunnale, contestuale a una ridotta capacità di ricarica naturale degli acquiferi.

Le stazioni automatiche (Figura 4.6) sono state installate in punti significativi a caratterizzare zone con acque sotterranee soggette a dinamiche evolutive di particolare interesse:

- zone di ricarica delle acque sotterranee, ovvero in acquiferi di conoide alluvionale in prossimità a corsi di acqua superficiale;
- zone caratterizzate da prelievi acquedottistici significativi;
- zone caratterizzate da subsidenza elevata;
- in acquiferi caratterizzati da fenomeni di intrusione salina nelle aree costiere;
- in acquiferi caratterizzati da incremento di cloruri in aree di pianura.

Inoltre, la rete automatica può essere utile a misurare il grado di confinamento degli acquiferi, attraverso l'osservazione e l'analisi delle fluttuazioni di livello (qualora presenti) determinate dalle maree terrestri, e l'effetto dei terremoti in particolari contesti geodinamici compressivi o distensivi. Di seguito si descrivono alcune variazioni dei livelli di falda registrate durante gli eventi sismici in Emilia-Romagna del 2012.

### Variazione dei livelli delle acque sotterranee durante il sisma del 2012

La sequenza sismica che ha interessato l'Emilia-Romagna a partire da maggio 2012 ha indotto numerose variazioni dei livelli delle acque sotterranee, oltre a molteplici fenomeni di liquefazione e di fessurazione del suolo. In Figura 4.9 sono riportati gli epicentri degli eventi sismici con magnitudo  $>5$ , le strutture tettoniche presenti nella zona, i pozzi nei quali sono state osservate variazioni di livello e le zone dove sono avvenuti fenomeni di liquefazione determinati dagli eventi sismici principali del 20 e 29 maggio 2012 (Di Manna et al., 2012).



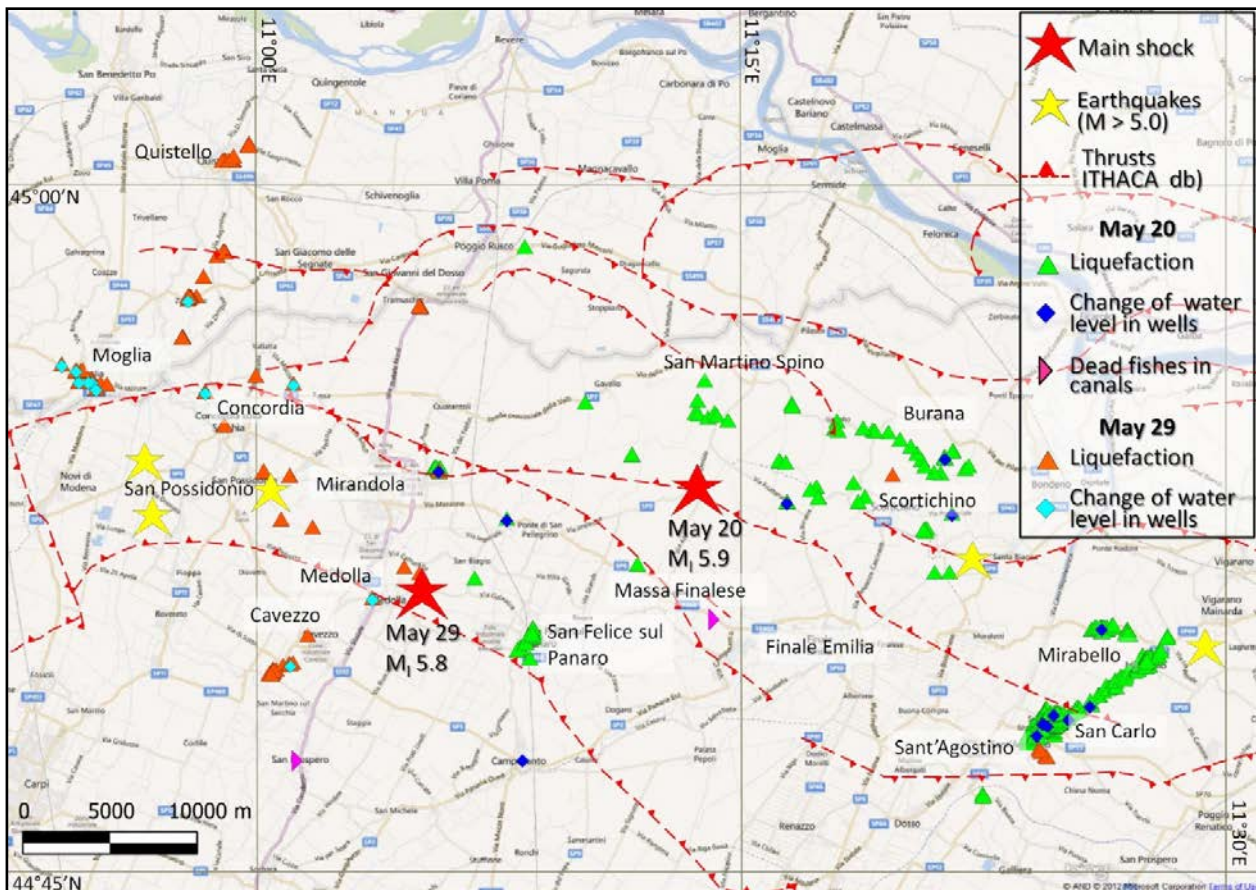


Figura 4.9: Ubicazione degli epicentri dei principali eventi sismici di maggio-giugno 2012 in Emilia-Romagna, strutture tettoniche presenti ed effetti cosismici in pozzi (variazione di livello dell'acqua) e nei terreni (liquefazione)<sup>10</sup>

Le variazioni di livello, oltre a essere state segnalate da diversi proprietari di pozzi, sono state misurate dopo gli eventi sismici principali. Poche sono le stazioni che presentano osservazioni scientificamente attendibili prima, durante e dopo gli eventi sismici. Alcune di esse sono stazioni automatiche della rete regionale di monitoraggio delle acque sotterranee, scelte per documentare nel dettaglio gli effetti delle sequenze sismiche avvenute a maggio 2012 in Emilia-Romagna, in alcuni acquiferi confinati di pianura alluvionale (Marcaccio e Martinelli, 2012).

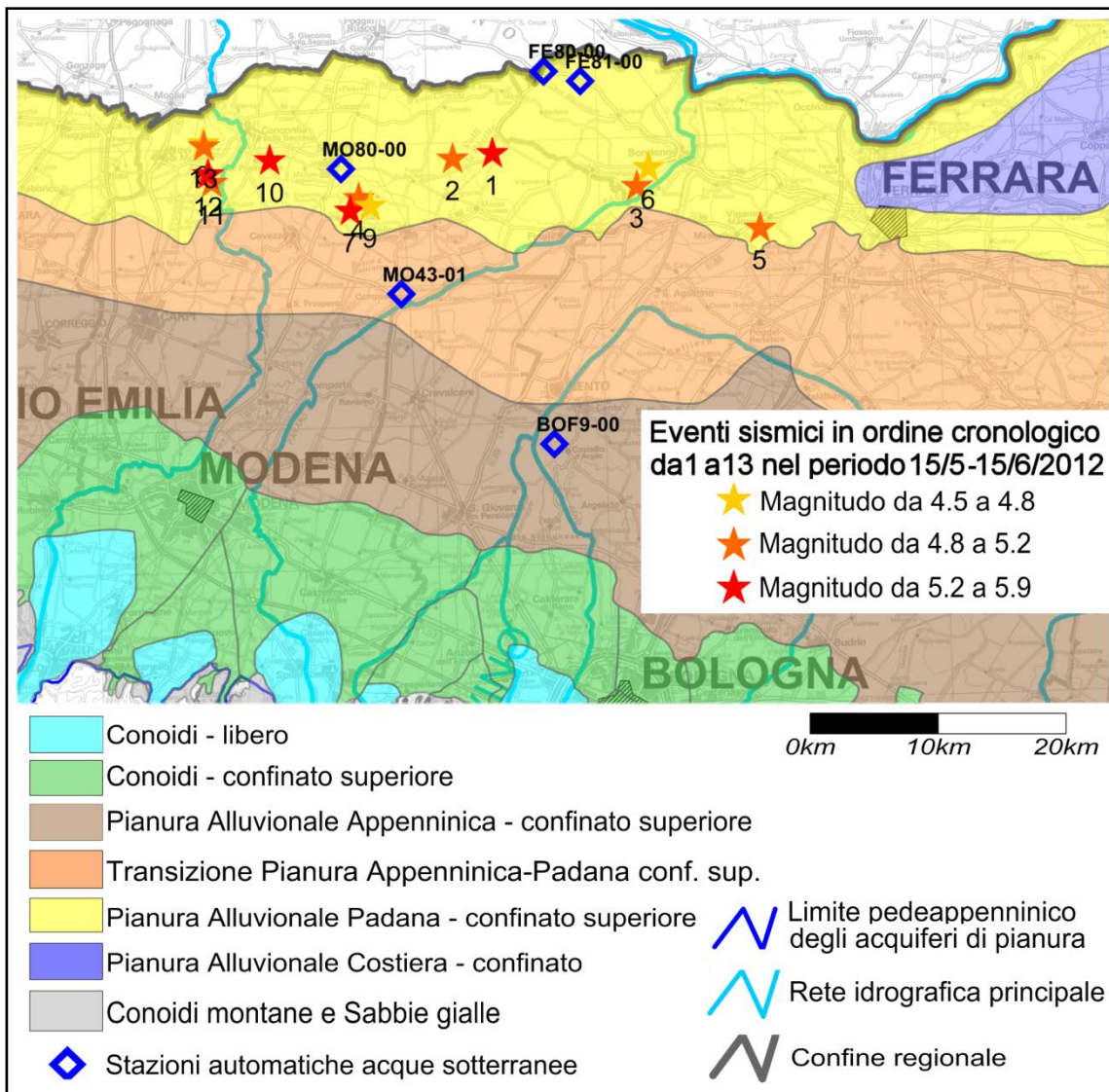
Le stazioni selezionate sono sia quelle prossime all'area epicentrale (ubicate a Bondeno (FE) (stazioni FE80-00 e FE81-00) e Mirandola (MO) (stazione MO80-00)), sia quelle relativamente più lontane (Camposanto sul Panaro (MO) (stazione MO43-01) e Castello D'Argile (BO) (stazione BOF9-00)). Tutte le stazioni sono comunque rappresentative di acquiferi confinati, caratterizzate da profondità variabili, comprese tra 40 m (stazioni di Ferrara) e 300 m (stazioni di Modena e Bologna).

In Figura 4.10 sono riportate le 5 stazioni automatiche di monitoraggio considerate, i corpi idrici sotterranei (Regione Emilia-Romagna, 2010) e gli epicentri degli eventi sismici aventi magnitudo maggiore di 4,5. Questi ultimi sono in totale 13, nel periodo che va dal 15 maggio al 15 giugno 2012, numerati in ordine cronologico a partire dal primo evento di magnitudo 5,9 avvenuto il 20 maggio.

L'epicentro dei due eventi sismici principali per magnitudo si trova, nel primo caso (evento 1 con magnitudo 5,9) quasi equidistante dalle stazioni di monitoraggio di Bondeno e dalla stazione di Mirandola, mentre nel secondo caso (evento 7 con magnitudo 5,8) è molto vicino alla stazione di Mirandola.

<sup>10</sup> Fonte: Di Manna et al., 2012





**Figura 4.10: Ubicazione delle stazioni automatiche di monitoraggio, cartografia dei corpi idrici sotterranei ed epicentri degli eventi sismici avvenuti nel periodo dal 15 maggio al 15 giugno 2012<sup>11</sup>**

Dall'analisi dei dati (Figura 4.11, 4.12, 4.13) risulta evidente l'innalzamento dei livelli delle falde (diminuzione della soggiacenza) subito dopo gli eventi sismici principali del 20 e del 29 maggio. Gli innalzamenti massimi del livello si sono verificati con il primo evento sismico del 20 maggio, dove sono stati registrati aumenti di circa 160 cm a Mirandola, 60 cm a Terzana di Bondeno e 20 cm a Pilastrini di Bondeno.

L'entità dell'innalzamento del livello delle falde è correlabile alle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero (confinamento), alla magnitudo del sisma e alla distanza dagli ipocentri dei due sismi principali (Wang e Manga, 2010; Marcaccio e Martinelli, 2012), che sono avvenuti a profondità molto diverse: il primo (20 maggio) a 6,3 km e il secondo (29 maggio) a 10,2 km. Solo gli eventi sismici principali (20 e 29 maggio) hanno comportato un innalzamento delle falde significativo, mentre il fenomeno sismico del 3 giugno 2012 (magnitudo 5,1) ha determinato una perturbazione molto minore, registrata in modo appena apprezzabile solo nella stazione di Mirandola (MO80-00).

I livelli di falda sono tornati ai valori pre-sisma nel corso del mese di giugno 2012 per le due stazioni di Bondeno (FE) e nel mese di agosto 2012 per la stazione di Mirandola (MO). Per

<sup>11</sup> Fonte: Regione Emilia-Romagna

quest'ultima si osserva una diminuzione del livello in funzione del tempo, a seguito degli eventi sismici, molto meno disturbata rispetto le altre due stazioni. Tutto ciò è coerente con il maggior grado di confinamento idrogeologico e di profondità dell'acquifero monitorato dalla stazione di Mirandola rispetto all'acquifero monitorato dalle stazioni di Bondeno.

Le stazioni di monitoraggio collocate in posizione più lontana (MO43-01 e BOF9-00) e tutte le altre stazioni disponibili, ma collocate in zona di conoide alluvionale (margine appenninico), non hanno invece evidenziato variazioni significative o aumenti immediati del livello delle falde della stessa entità e tipologia osservate nelle stazioni delle zone epicentrali.

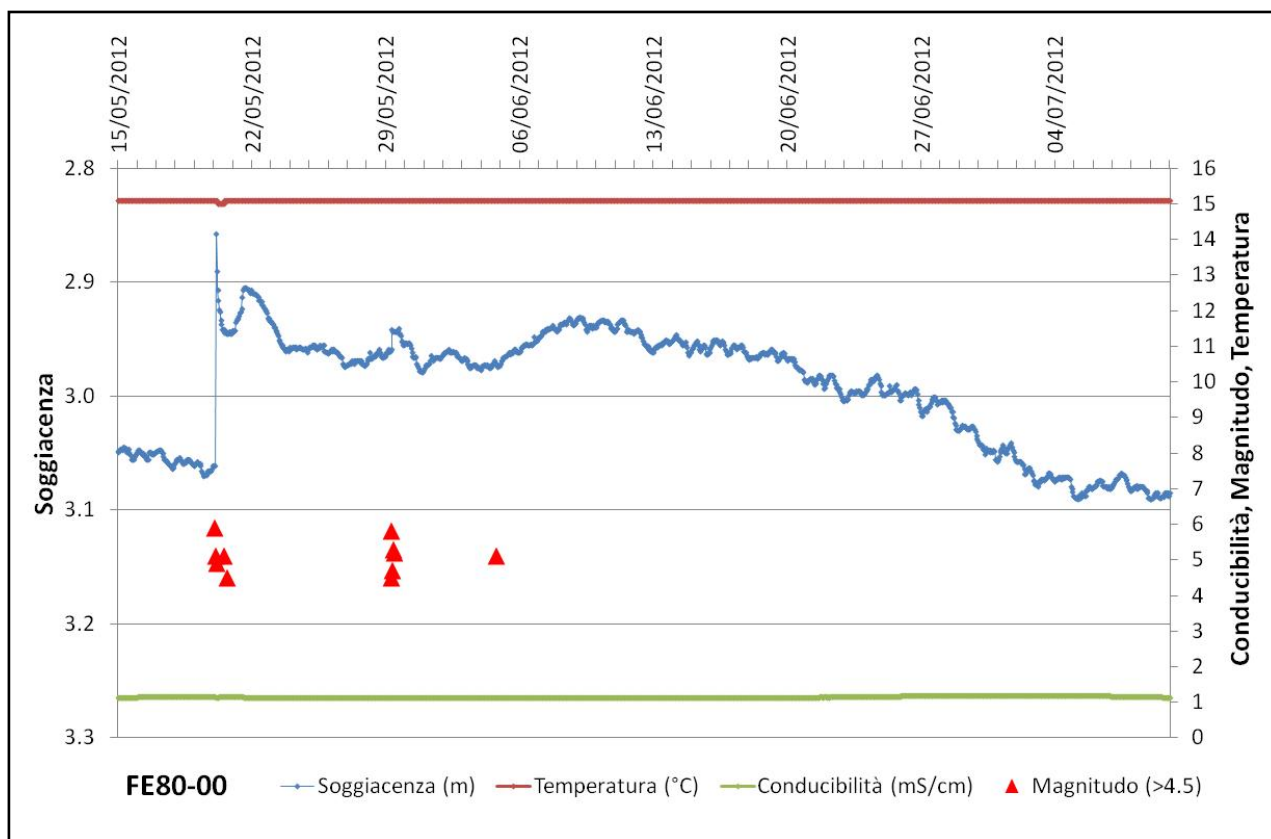


Figura 4.11: Misure automatiche di livello (soggiacenza), conducibilità elettrica e temperatura nel periodo maggio-luglio 2012 nella stazione di monitoraggio delle acque sotterranee FE80-00 (Pilastrini di Bondeno) in concomitanza agli eventi sismici di magnitudo maggiore di 4,5<sup>12</sup>

<sup>12</sup> Fonte: ARPA Emilia-Romagna

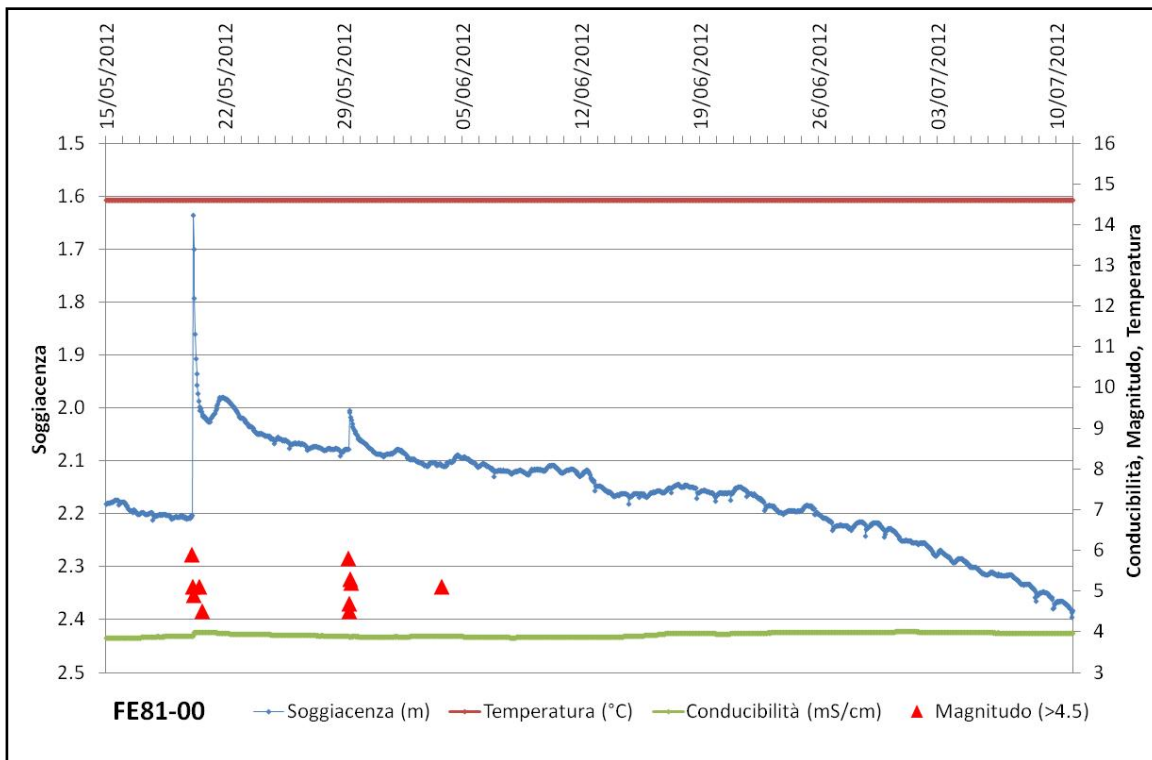
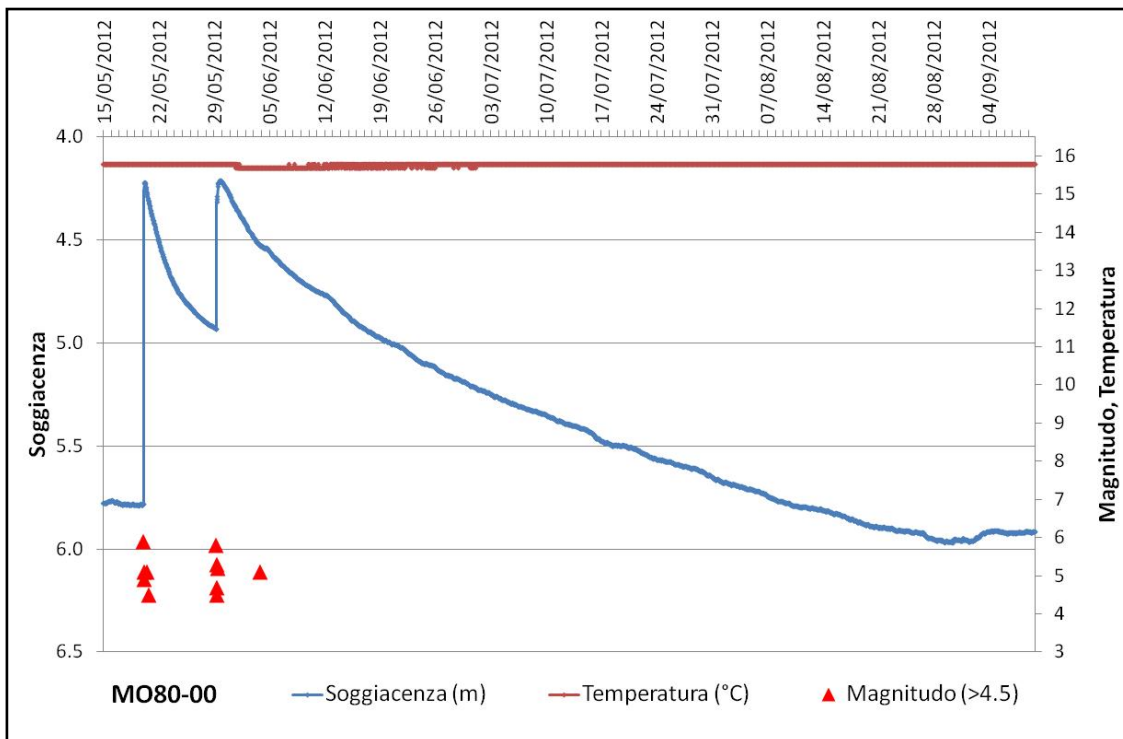


Figura 4.12: Misure automatiche di livello (soggiacenza), conducibilità elettrica e temperatura nel periodo maggio-luglio 2012 nella stazione di monitoraggio delle acque sotterranee FE81-00 (Terzana di Bondeno) in concomitanza agli eventi sismici di magnitudo maggiore di 4,5<sup>13</sup>



<sup>13</sup> Fonte: ARPA Emilia-Romagna

**Figura 4.13: Misure automatiche di livello (soggiacenza) e temperatura nel periodo maggio-settembre 2012 nella stazione di monitoraggio delle acque sotterranee MO80-00 (Mirandola) in concomitanza agli eventi sismici di magnitudo maggiore di 4,5<sup>14</sup>**

In generale le anomalie di livello osservate in occasione dei terremoti possono essere di tipo positivo (innalzamento del livello dell'acqua come nel caso osservato in Emilia-Romagna) o negativo (abbassamento del livello dell'acqua) (Okada, 1992), ciò dipende, rispettivamente, dalla presenza di acquiferi in aree soggette a compressione o a dilatazione.

Gli effetti osservati sui livelli di falda delle 3 stazioni di monitoraggio indicano che gli acquiferi sono stati soggetti a compressione.

Ciò è confermato osservando la ricostruzione degli spostamenti co-sismici del suolo nelle zone epicentrali nel periodo dal 29 maggio al 4 giugno (Figura 4.14), dove risulta evidente che la zona tra Medolla, Mirandola e San Felice sul Panaro ha subito un innalzamento massimo del suolo pari a 10-11 cm per effetto delle deformazioni avvenute in profondità a seguito del regime compressivo, coerente sia con le variazioni repentine dei livelli di falda nel pozzo di Mirandola (MO80-00), sia con la diminuzione del suolo, in zone adiacenti, in particolare nella zona a sud tra Medolla e Bomporto, pari a 2 cm.

Le osservazioni e i dati resi disponibili dal monitoraggio automatico assumono particolare importanza anche nella calibrazione dei modelli idrogeologici di flusso, in relazione alla deformazione subita dagli acquiferi e conseguente variazione dei parametri idrologici degli stessi durante e successivamente gli eventi sismici.

Con il monitoraggio automatico delle acque sotterranee sono state acquisite, inoltre, temperatura e conducibilità elettrica. Va precisato che questi parametri fisico-chimici, a differenza del dato di livello, sono significativi e attribuibili all'acquifero solo in determinate condizioni. Pertanto le variazioni dei dati fisico-chimici rilevate sono significative per le sole stazioni più superficiali, quelle ubicate a Bondeno (Figure 4.11 e 4.12), non lo sono per la stazione più profonda, ubicata a Mirandola (Figura 4.13). Fatta questa necessaria premessa, il rilievo in continuo della conducibilità e della temperatura non ha mostrato variazioni significative in relazione agli eventi sismici e alle variazioni di livello di falda osservate. In particolare, le variazioni di temperatura sono risultate contenute a due decimi di grado (poco maggiore della risoluzione strumentale), sia prima sia dopo gli eventi sismici, tanto da ritenere il dato nel normale range di variabilità.

Nei primi giorni dopo il terremoto sono stati segnalati dalla popolazione svariati pozzi freatici con acque divenute improvvisamente calde, oltre i 30 °C, inducendo a ritenere che questo fenomeno fosse connesso alla risalita di acque calde dalle profondità per effetto del terremoto. I numerosi interventi di verifica, effettuati dall'ARPA Emilia-Romagna, hanno permesso di appurare che il fenomeno è stato indotto da malfunzionamenti delle pompe provocati dalla presenza di sabbia nel pozzo, risospesa a seguito degli eventi sismici. Fenomeni di questo tipo accadono spesso nella gestione dei pozzi, ad esempio nell'ambito del monitoraggio regionale delle acque sotterranee, indipendentemente dai fenomeni sismici.

---

<sup>14</sup> Fonte; ARPA Emilia-Romagna



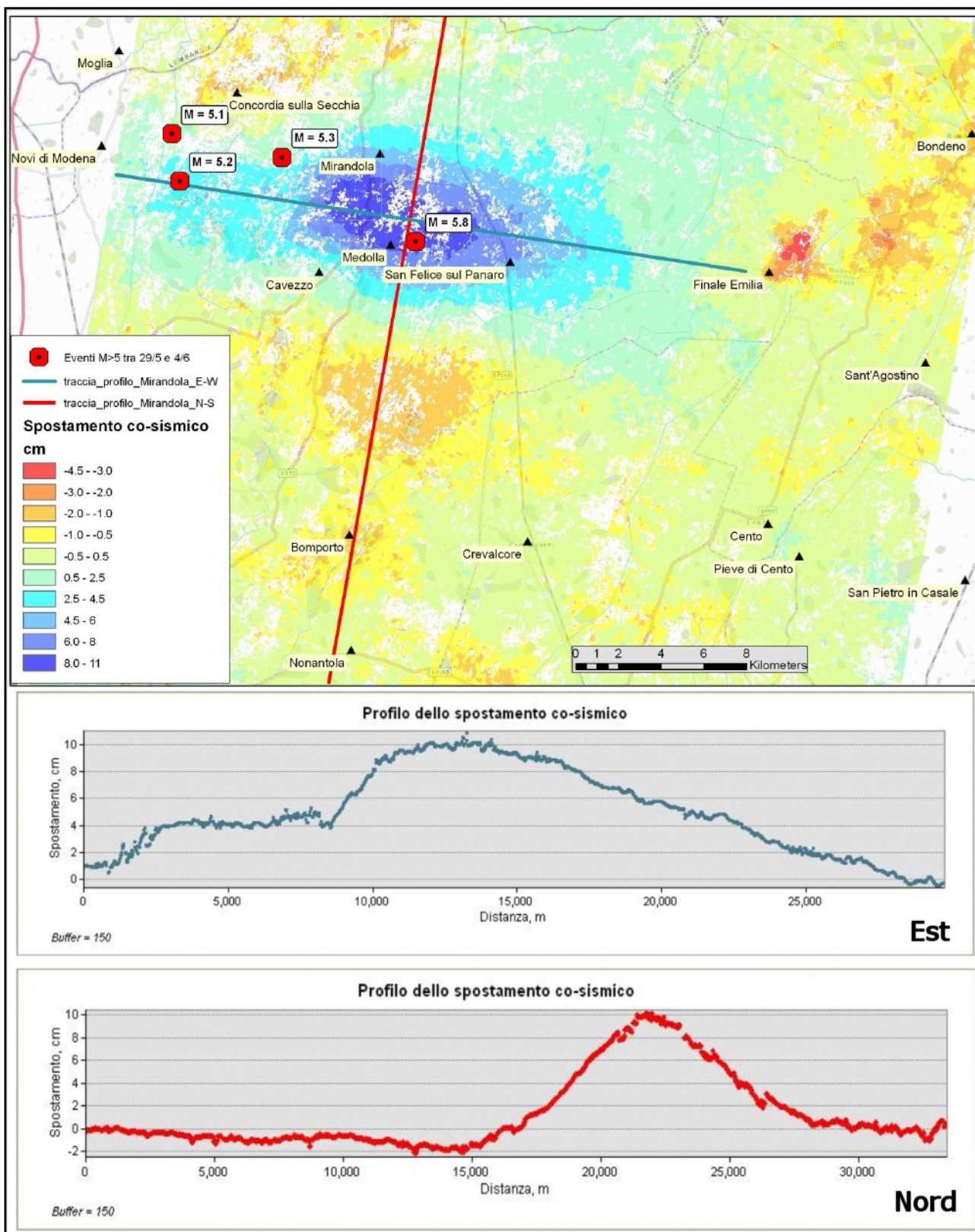


Figura 4.14: Spostamento co-sismico del suolo avvenuto nel periodo dal 29 maggio al 4 giugno 2012 nell'area epicentrale di Mirandola, con le tracce e relativi profili di spostamento co-sismico<sup>15</sup>

<sup>15</sup> Fonte: Atzori et al., 2012



## Fenomeni di liquefazione dei terreni durante il sisma del 2012

In concomitanza con le principali scosse sismiche del 20 e 29 maggio 2012 sono stati osservati numerosi fenomeni che hanno interessato, oltre le già illustrate variazioni di livello delle acque sotterranee profonde, anche le falde freatiche superficiali e i terreni nei quali si è, in diversi casi, innescato il fenomeno della liquefazione delle sabbie. Sono stati censiti almeno 700 casi di liquefazione dei terreni in un'area di circa 500 km<sup>2</sup> (Bertolini e Fioroni, 2012; Di Manna et al., 2012; Figura 4.9) che hanno interessato prevalentemente le seguenti località: Mirabello, San Carlo e Sant'Agostino nel Ferrarese; San Felice, Cavezzo e Concordia sulla Secchia nel Modenese.

La liquefazione delle sabbie contenute nel terreno si è manifestata in superficie con la comparsa di vulcanetti di sabbia mista a fango, fuoruscita di acqua e sabbia dai pozzi domestici superficiali, fratturazioni e dislocazioni superficiali, oltre a locali depressioni del suolo (inghiottitoi poco profondi).

Il fenomeno della liquefazione è noto da tempo nella letteratura scientifica e tecnica, le condizioni predisponenti sono la presenza di sedimenti, generalmente sabbie fini e finissime, in acquiferi di bassa profondità, saturi in acqua e localmente confinati in superficie da lenti argillose. Queste geometrie deposizionali sono tipiche e diffuse in tutte le pianure alluvionali: rappresentano il risultato della divagazione in pianura, avvenuta nel passato geologico, degli alvei dei corsi d'acqua. La sollecitazione dell'onda sismica oltre una certa potenza e persistente per un determinato periodo di tempo può innescare il fenomeno della liquefazione in queste particolari strutture geologiche.

A pochi giorni dalla prima scossa sismica sono stati misurati manualmente i livelli delle falde in alcuni pozzi della rete di monitoraggio, e valori di livelli di falda più alti della serie storica di misure sono stati riscontrati nella zona di San Carlo (Comune di S. Agostino - FE), dove il fenomeno della liquefazione è stato particolarmente accentuato. Le variazioni di livello osservate nei pozzi freatici sono tornate ai livelli pre-sisma dopo pochi giorni dagli eventi principali, a differenza di quanto è stato osservato negli acquiferi più profondi (Figura 4.15).

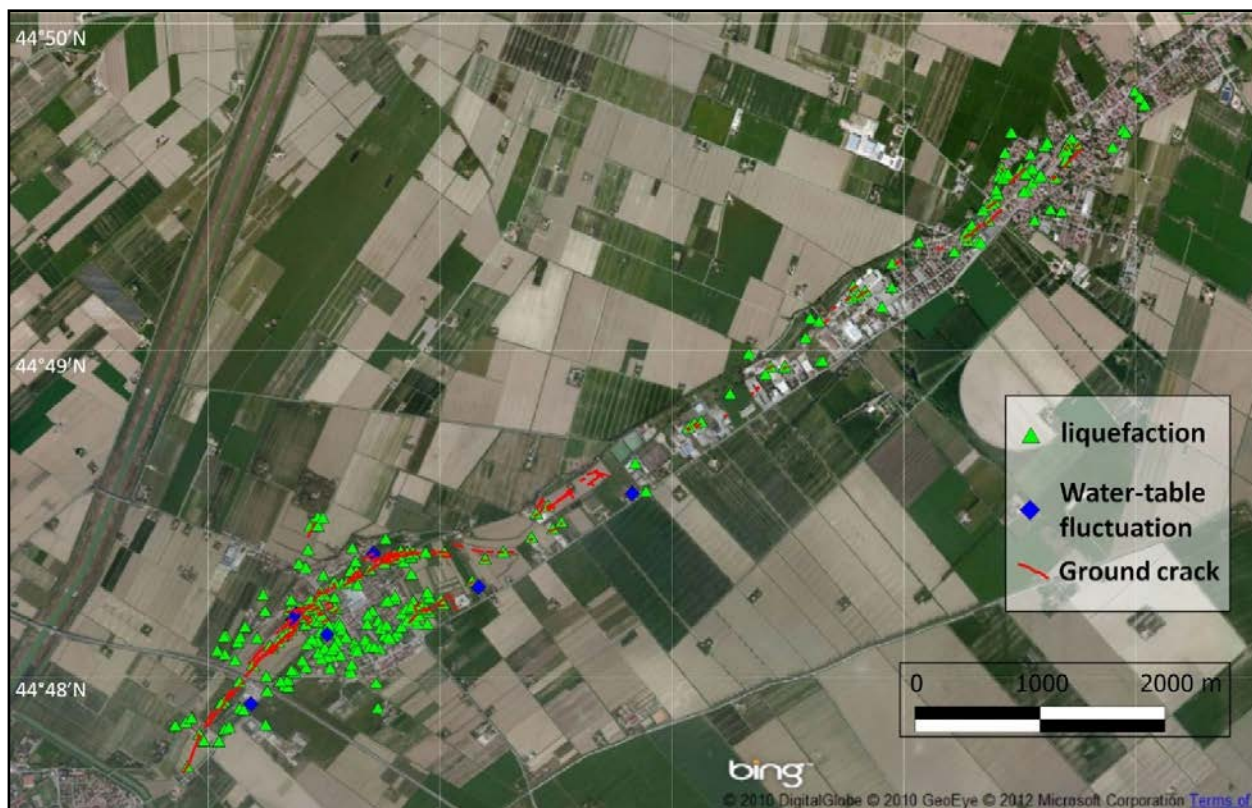
Inoltre, sono stati effettuati ulteriori approfondimenti per analizzare le strutture sedimentologiche del primo sottosuolo in prossimità delle zone dove sono avvenuti i fenomeni di liquefazione. È stata scavata una trincea in prossimità del paleo alveo del Reno (zona tra San Carlo e Mirabello) che ha permesso di evidenziare la migrazione di sabbie verso la superficie dove si trovano materiali relativamente più fini e meno permeabili (Papathanassiou et al., 2012). In particolare, è stato possibile rilevare dalle testimonianze sedimentologiche, registrate nei primi metri di sedimento, che il fenomeno della liquefazione delle sabbie era già avvenuto in passato nelle medesime zone dove si è manifestato con il sisma del 2012 (Caputo et al., 2012).

La Regione Emilia-Romagna ha delimitato le aree nelle quali si sono presentati gravi effetti di liquefazione a seguito del sisma e ha fornito indirizzi per interventi di consolidamento dei terreni (Regione Emilia-Romagna, 2012b).

A questo proposito il Gruppo di Lavoro Liquefazione, appositamente istituito dalla Regione Emilia-Romagna (2012a), tra le altre cose ha descritto in modo approfondito il fenomeno della "liquefazione" e dove potenzialmente si può innescare. La liquefazione comprende varie tipologie di fenomeni fisici (mobilità ciclica, liquefazione ciclica, fluidificazione), osservati nei depositi e nei pendii sabbiosi saturi durante terremoti significativi, che hanno come elemento comune il fatto che, per effetto dell'instaurarsi di condizioni non drenate, si verifica un incremento e un accumulo delle pressioni interstiziali che possono provocare una drastica caduta della resistenza al taglio e quindi una perdita di capacità portante del terreno. La differenza fra i diversi fenomeni dipende dalle tensioni di taglio mobilitate per l'equilibrio in condizioni statiche e dalla resistenza al taglio residua dopo il terremoto.

Pertanto, in un terreno pianeggiante, omogeneo o con stratificazioni orizzontali, in assenza di carichi esterni (ad esempio trasmessi da fondazioni di strutture o di rilevati), le tensioni di taglio mobilitate per l'equilibrio in condizioni statiche sono assenti. Se, invece, nel sottosuolo, a

profondità inferiori a 15-20 m, vi sono strati di terreno liquefacibile (sabbie sciolte sotto falda), durante un evento sismico significativo può verificarsi il fenomeno della liquefazione ciclica, con deformazioni volumetriche di contrazione e quindi con cedimenti del terreno pressoché uniformi.



**Figura 4.15: Fenomeni di liquefazione, fratture nel terreno e variazioni dei livelli nelle acque sotterranee freatiche tra Sant'Agostino e Mirabello, sede di un paleo alveo del fiume Reno<sup>16</sup>**

### Bibliografia

ARPA Emilia-Romagna, 2013. *Monitoraggio dei corpi idrici sotterranei dell'Emilia-Romagna ai sensi delle Direttive 2000/60/CE e 2006/118/CE. Triennio 2010-2012.* (A cura di Donatella Ferri e Marco Marcaccio). Bologna.

[http://www.arpa.emr.it/dettaglio\\_documento.asp?id=5055&idlivello=112](http://www.arpa.emr.it/dettaglio_documento.asp?id=5055&idlivello=112)

Atzori S., Merryman Boncori J., Pezzo G., Tolomei C., Salvi S., 2012. *Secondo report analisi dati SAR e modellazione della sorgente del terremoto dell'Emilia, SIGRIS system product, www.sigris.it.* [http://terremoti.ingv.it/images/ultimi-eventi/2012/report\\_sar\\_ingv\\_emilia\\_2.pdf](http://terremoti.ingv.it/images/ultimi-eventi/2012/report_sar_ingv_emilia_2.pdf)

Bertolini G., Fioroni C., 2012. *Aerial inventory of surficial geological effects induced by the recent Emilia earthquake: preliminary report.* Annals of Geophysics, 55, 4, DOI:10.4401/ag-6113.

Caputo, R., Iordanidou, K., Minarelli, L., Papathanassiou, G., Poli, M.E., Rapti-Caputo, D., Sboras, S., Stefani, M., Zanferrari, A., 2012. *Geological evidence of pre-2012 seismic events, Emilia-Romagna, Italy.* Annals of Geophysics, 55, 4, DOI: 10.4401/ag-6148.

Decreto Legislativo n. 30 del 16 marzo 2009. "Attuazione della direttiva 2006/118/CE, relativa alla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento". Gazzetta Ufficiale n. 79 del 4 aprile 2009.

<sup>16</sup> Fonte: Di Manna et al. 2012

Di Manna P., Guerrieri L., Piccardi L., Vittori E., Castaldini D., Berlusconi A., Bonadeo L., Comerci V., Ferrario F., Gambillara R., Livio F., Lucarini M., Michetti A., 2012. *Ground effects induced by the 2012 seismic sequence in Emilia: implications for seismic hazard assessment in the Po Plain*. *Annals of Geophysics*, 55, 4, DOI: 10.4401/ag-6143.

Direttiva 2000/60/CE - *Water Framework Directive (WFD)*. *Directive of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*, OJ L327, 22 Dec 2000, pp 1-73.

Direttiva 2006/118/CE, *GroundWater Daughter Directive (GWDD)*. *Directive of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 on the protection of groundwater against pollution and deterioration*, OJ L372, 27 Dec 2006, pp 19-31.

European Commission, 2009. *Guidance on groundwater status and trend assessment*, guidance document no 18. Technical Report 2009, ISBN 978-92-79-11374-1 European Communities, Luxembourg, 2009.

Marcaccio M., Martinelli G., 2012. *Effects on the groundwater levels of the May-June 2012 Emilia seismic sequence*. *Annals of Geophysics*, 55, 4, DOI: 10.4401/ag-6139

Okada Y., 1992. *Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space*. *Bull. Seismol.Soc.Am.*, 52, 81-86.

Papathanassiou, G., Caputo, R., Rapti-Caputo, D., 2012. *Liquefaction phenomena along the paleo-Reno River caused by the May 20, 2012, Emilia (northern Italy) earthquake*. *Annals of Geophysics*, 55, 4, DOI: 10.4401/ag-6147.

Regione Emilia-Romagna, 2010. Delibera di Giunta n. 350, “Approvazione delle attività della Regione Emilia-Romagna riguardanti l’implementazione della Direttiva 2000/60/CE ai fini della redazione e adozione dei Piani di Gestione dei Distretti idrografici Padano, Appennino settentrionale e Appennino centrale”.

<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/acque/temi/piani%20di%20gestione>

Regione Emilia-Romagna, 2012a. *Primo rapporto sugli effetti della liquefazione osservati a S. Carlo, frazione di S. Agostino (Provincia di Ferrara)*. Gruppo di Lavoro liquefazione. [http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro/rapporto\\_sancarolo.pdf](http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro/rapporto_sancarolo.pdf)

Regione Emilia-Romagna, 2012b. Determinazione n. 12418 del 02/10/2012 del Responsabile del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli avente ad oggetto “Approvazione degli elaborati cartografici concernenti la delimitazione delle aree nelle quali si sono manifestati gravi effetti di liquefazione a seguito degli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012 e degli indirizzi per interventi di consolidamento dei terreni”.

Wang C-y., Manga M., 2010. *Earthquakes and Water*. Springer, Heidelberg, 225 pp.

## GLOSSARIO

### **Bilancio idrologico**

Comparazione, nel periodo di tempo considerato e con riferimento a un determinato bacino o sottobacino, superficiale o sotterraneo, tra afflussi e deflussi naturali, ovvero deflussi che si avrebbero in assenza di pressione antropica (DM 28 luglio 2004).

### **Complessi idrogeologici**

Insieme di termini litologici simili aventi una comprovata unità spaziale e giaciturale, un tipo di permeabilità prevalente in comune e un grado di permeabilità relativa che si mantiene in un campo di variazione piuttosto ristretto (Civita M., 1973).

### **Distretto idrografico**

Area di terra e di mare, costituita da uno o più bacini idrografici limitrofi e dalle rispettive acque sotterranee e costiere che costituisce la principale unità per la gestione dei bacini idrografici (D.Lgs. 152/2006, art 53, comma 1, lett t).

Il D.Lgs. 152/06 ha istituito 8 distretti idrografici: Alpi orientali, Padano, Appennino settentrionale, Serchio, Appennino centrale, Appennino meridionale, Sardegna, Sicilia.

### **Epicentro**

Punto della superficie terrestre situato sulla verticale dell'ipocentro di un terremoto.

### **EQB – Elementi di Qualità Biologica**

Gli elementi di qualità biologica (fitoplancton, macroinvertebrati bentonici, macroalghe, angiosperme) giocano un ruolo chiave nella valutazione dello stato ecologico.

### **Ipocentro**

Punto all'interno della crosta terrestre in cui ha origine un terremoto e dal quale le onde sismiche si propagano in tutte le direzioni. Si trova lungo la verticale al di sotto dell'epicentro.

### **Piano di gestione distrettuale**

Strumento tecnico di governo dei distretti idrografici introdotto dalla Direttiva quadro sulle acque.

### **Piezometria**

In idrogeologia è la quota, riferita al livello medio del mare, che raggiunge l'acqua sotterranea all'interno di pozzi e/o piezometri, in condizioni di equilibrio con la pressione atmosferica. Per falde freatiche la piezometria coincide pertanto con la quota del pelo libero dell'acqua di falda.

### **Portata**

Volume d'acqua (metri cubi) che attraversa una data sezione, trasversale al flusso idrico, nell'unità di tempo (secondo). Può essere riferita a corsi d'acqua e a sorgenti.

### **Soggiacenza**

È la profondità, riferita al piano campagna, alla quale l'acqua sotterranea, all'interno di pozzi e/o piezometri, è in condizioni di equilibrio con la pressione atmosferica. Per falde freatiche la soggiacenza coincide pertanto con la profondità del pelo libero dell'acqua di falda. Può essere calcolata dalla piezometria essendo nota la quota del piano campagna.