

# MONITORAGGIO DELL'ACQUIFERO COSTIERO SUPERFICIALE

L'ACQUIFERO COSTIERO DELL'EMILIA-ROMAGNA È NATURALMENTE SOGGETTO A UNA CONTAMINAZIONE DI ACQUE SALATE MARINE CHE RISCHIA DI COMPROMETTERE LA RISORSA IDRICA E DI METTERE A RISCHIO I DELICATI ECOSISTEMI PRESENTI LUNGO LA COSTA. DAL 2009 È ATTIVA UNA RETE PER IL MONITORAGGIO DELLO STATO DELLE ACQUE DI FALDA.

L'acquifero costiero superficiale (Acs) si sviluppa per 120 km da Goro (FE) sino a Cattolica (RN) e si estende nell'entroterra per una decina di chilometri nel ferrarese e ravennate, dove lo spessore è intorno ai 30 m, e per circa 1 km da Cesenatico al confine con le Marche, dove si assottiglia fino a 5-6 m (Bonzi et al., 2010). È costituito da depositi sabbiosi di ambiente marino, costiero e deltizio sedimentati durante il ciclo trasgressivo-regressivo olocenico. I depositi di piana alluvionale sottostanti ne costituiscono l'acquitarso basale, mentre verso l'entroterra i depositi fini alluvionali e deltizi recenti sigillano lateralmente e superiormente l'acquifero (figura 1). Stante questa successione stratigrafica l'acquifero è freatico dove le sabbie sono affioranti e confinato o semi-confinato



FOTO: PARCO DEL DELTA DEL PO

CUNEO SALINO

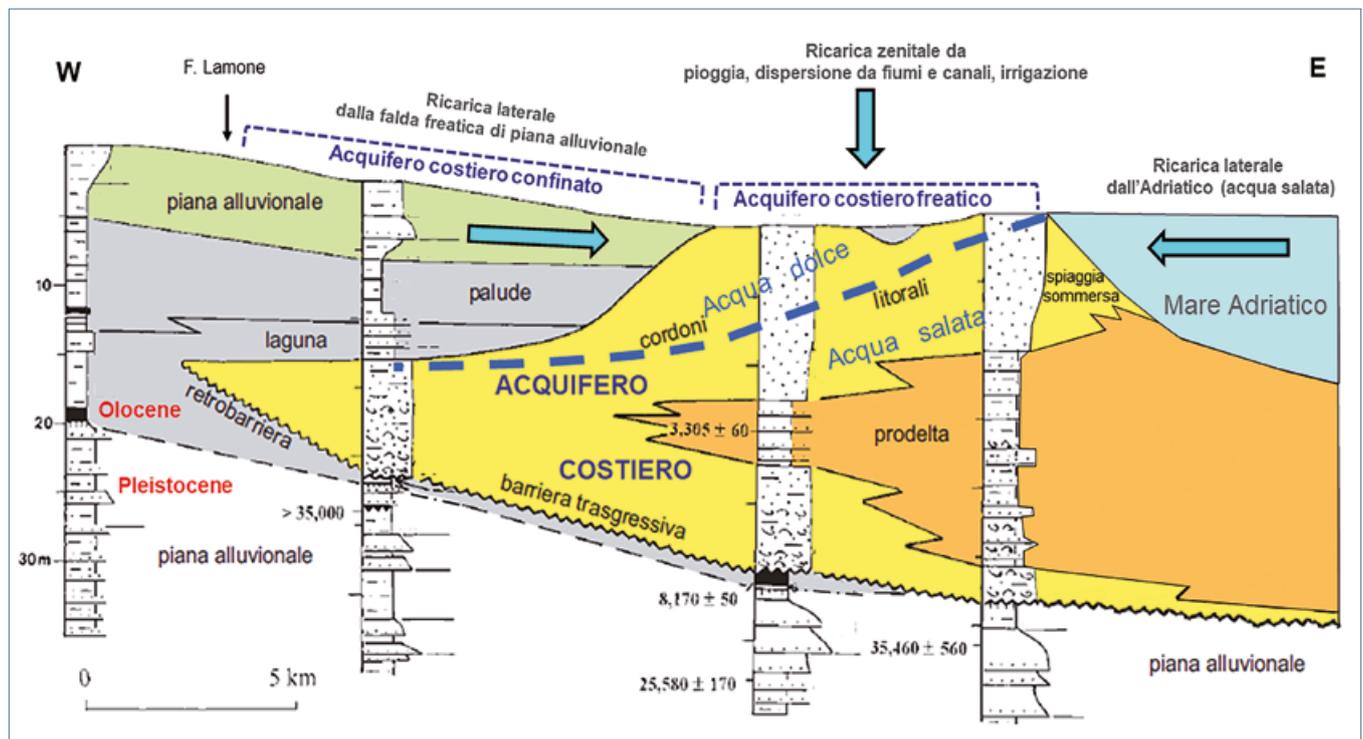


FIG. 1 ACQUIFERO  
Sezione geologica schematica nella costa ravennate; l'acquifero costiero è in giallo, le frecce indicano i principali termini della ricarica.  
Fonte: modificato da Ispra, 2002.

dove le sabbie sono sepolte sotto i sedimenti fini. La ricarica avviene attraverso le precipitazioni, la dispersione da corpi idrici superficiali (fiumi e canali) e dalle falde della pianura alluvionale e deltizia. Verso mare, l'acquifero è direttamente a contatto con le acque dell'Adriatico, che filtrano naturalmente verso terra dove, essendo più pesanti delle acque dolci, si insinuano alla base dell'acquifero.

Dal 2009 la Regione Emilia-Romagna si è dotata di una rete di monitoraggio dedicata a questo acquifero, che attualmente consta di 24 piezometri (figura 2).

In ciascun piezometro sono rilevati il livello della falda e, per ogni metro di profondità, la conducibilità elettrica specifica (Ce in mS/cm) e la temperatura (T in °C).

I rilievi avvengono due volte all'anno, generalmente in primavera quando il livello di falda è massimo e in estate o autunno e quando il livello è minimo. Le misurazioni evidenziano le seguenti casistiche:

- acqua di falda dolce lungo tutto il piezometro
- nella parte superiore acqua di falda dolce e nella parte inferiore salata e salmastra
- acqua di falda prevalentemente salata e salmastra con esiguo, o assente, "cappello" di acqua dolce.

Il limite tra le acque dolci e salate-salmaestre avviene in un intervallo di 1-3 m in cui la conducibilità varia bruscamente (figura 1).

I dati acquisiti dal 2009 al 2021 sono stati oggetto di un'analisi statistica con lo scopo di determinare lo stato e l'evoluzione delle acque di falda nel tempo, evidenziando l'eventuale presenza di tendenze dei valori misurati.

Il dataset disponibile, costituito da 17.362 misure, è stato analizzato suddividendo i dati in ogni punto di campionamento (Pc), ovvero per ogni metro di profondità a partire dalla quota della falda. Ogni Pc è stato descritto dal punto di vista statistico attraverso gli indicatori principali (valore minimo, massimo, media, mediana, deviazione standard). È stato ricostruito l'andamento della Ce e della T in profondità e nel tempo, sia per individuare eventuali variazioni stagionali sia per identificare trend annuali. Il test *Shapiro* ha permesso di verificare la "non normalità" dei dati, e di utilizzare test non parametrici per le elaborazioni successive, ovvero:

- *Kruskall Wallis e Wilcox test*, per confrontare e determinare la

FIG. 2  
RETE DI  
MONITORAGGIO

Punti della rete di monitoraggio dell'acquifero costiero. In blu il limite nell'entroterra dell'acquifero costiero, in giallo le aree dove l'acquifero è freatico (sabbie costiere affioranti).

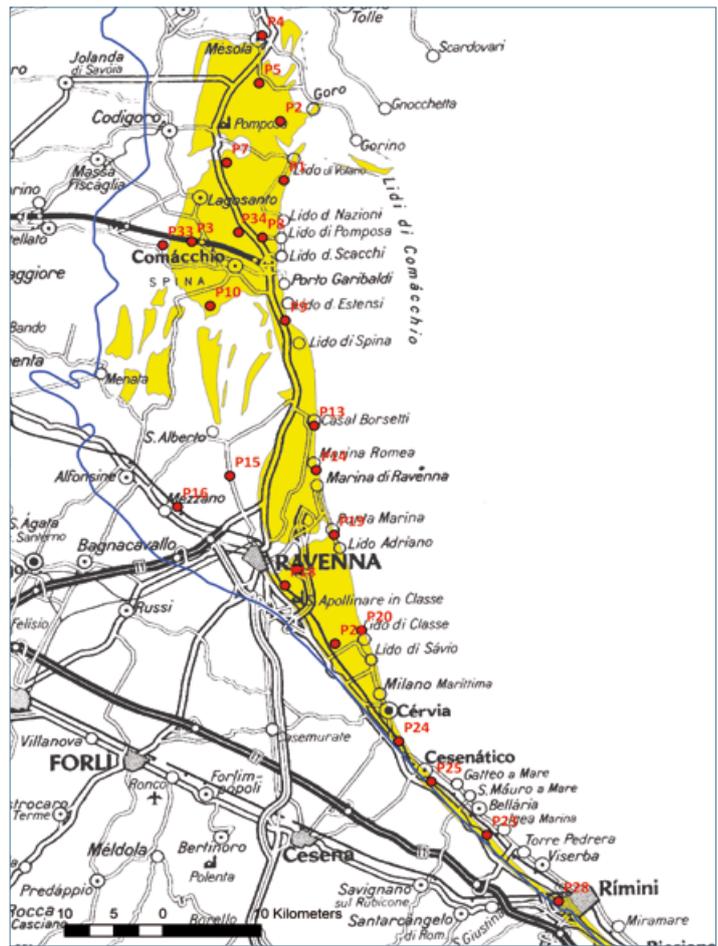
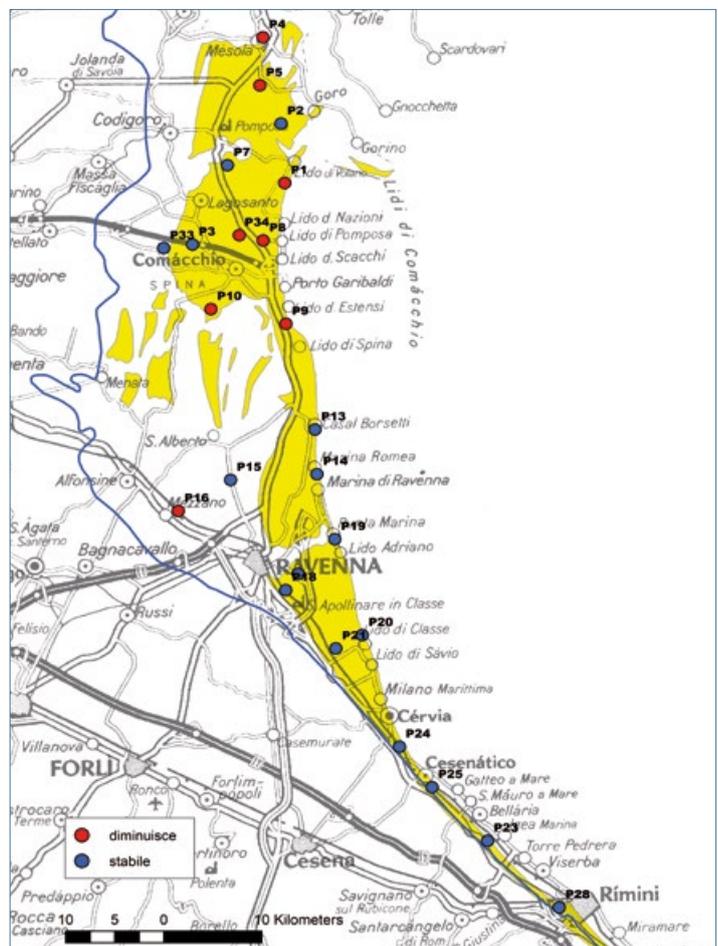


FIG. 3  
VARIAZIONE  
DEL LIVELLO

Variazione nel tempo del livello di falda.



significatività di eventuali scostamenti nelle distribuzioni dei dati, individuare la presenza di misure anomale, identificare il momento dal quale i dati si discostano in maniera significativa dai precedenti - *Mann-Kendall trend test* e il test della pendenza *Sen test*, per determinare se la Ce e la T su ogni piezometro e su ogni Pc sono cambiate nel tempo e in che modo - *Change point test* di Pettitt per ricercare il punto di flesso, corrispondente al momento in cui è avvenuto il cambio del valore medio per una data serie temporale.

Infine, la *cluster analysis* ha permesso di individuare raggruppamenti omogenei di piezometri, aventi valori di Ce simili nel tempo.

L'applicazione delle analisi sopra elencate ha restituito i seguenti risultati, sintetizzati anche in *tabella 1*.

**Livello di falda (figura 3)**

Nel periodo 2009-2021 il livello di falda è rimasto invariato in tutti i piezometri, tranne in sette, posizionati nella parte nord della costa e nell'interno del ravennate, dove il livello di falda è diminuito. Il maggiore abbassamento è avvenuto in P4 e P34 (rispettivamente del 68 e 61%).

**Spessore dell'acqua dolce (figura 4)**

Lo spessore dell'acqua dolce in ogni piezometro individua la profondità al di sopra della quale la Ce dell'acqua di falda è sempre uguale o minore di 2,5 mS/cm (corrispondente al valore limite delle acque utilizzabili per il consumo umano). Nel periodo 2009-2021 questo valore è pressoché costante in quasi tutti i piezometri, ed è massimo da Cervia verso Rimini, nell'entroterra ravennate e nella parte nord ovest del ferrarese. È minimo nei piezometri della costa sud del ravennate.

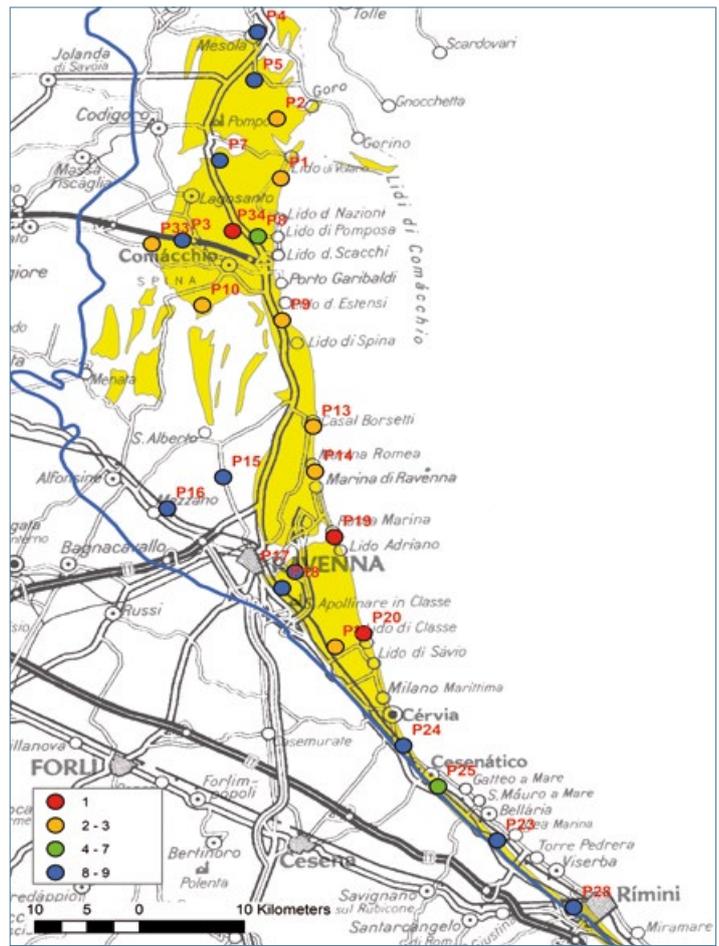
Variazione si osservano in: P9, da circa a 6 m di profondità a circa 2 m; P15, da circa a 2 m di profondità a circa 8 m; P18, da circa a 7 m di profondità a circa 8 m.

**Variazione della Ce nel periodo 2009-2021 (figura 5)**

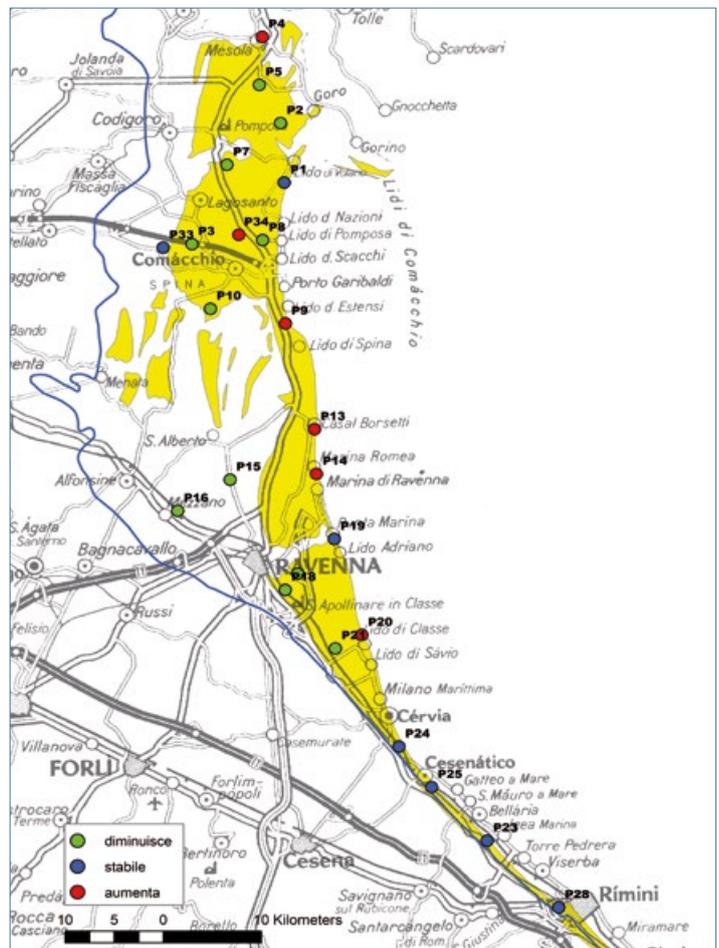
In 7 punti la Ce è aumentata (maggiormente in P9 e P14, rispettivamente del 93 e 46%), in 11 punti la Ce è diminuita (maggiormente in P16 e P8, rispettivamente del 120 e 101%), in 6 la Ce non ha subito variazioni.

**Variazione della T nel periodo 2009-2021**

La temperatura delle acque di falda risente, fino a 5-6 metri nel sottosuolo, delle variazioni stagionali; al di sotto



Spessore dell'acqua dolce (m da piano campagna).



Variazione della conducibilità elettrica (Ce).

rimane costante e vicina alla media della temperatura annua del luogo. In 8 punti, localizzati nella parte sud del ravennate sino al confine con le Marche, la T non ha mostrato variazioni di rilievo. In 16 punti nel ferrarese e nella parte nord del ravennate la T è sempre aumentata nei primi 5-6 metri di sottosuolo, il P8, P10, P33 e P34 hanno registrato un aumento in tutto lo spessore dell'acquifero. La T non è diminuita in nessun piezometro nel 2009 - 2021.

**Correlazioni tra variazioni di livello di falda, Ce e T**

Le variazioni nel periodo 2009-2021 delle 3 variabili analizzate non sono in genere correlate tra loro. Solamente in P4, P9 e P34 l'aumento della Ce si accompagna a una diminuzione del livello, e solo nel P34 ciò è anche accompagnato da un aumento della T. Nei piezometri vicini alla costa della zona centrale e settentrionale, l'aumento della Ce potrebbe indicare una maggiore ingressione di acqua marina, per riduzione della "ricarica dolce". La diminuzione della Ce in aree agricole potrebbe essere dovuta all'intensificazione dell'irrigazione, necessaria per far fronte all'aumento delle temperature e alla riduzione delle piogge degli ultimi anni. L'abbassamento del livello di falda è collegabile a una riduzione degli apporti meteorici utili alla ricarica e al generale riscaldamento, dovuti al cambiamento climatico in atto, così come l'aumento della T. È inoltre probabile che le variazioni osservate dipendano anche da condizioni di sito, legate al diverso uso del suolo e della gestione delle acque superficiali. La *tabella 1* sintetizza l'analisi statistica effettuata.

**Alessandra Aprea, Luciana Bonzi, Lorenzo Calabrese, Maria Carla Centineo, Jessica Lelli, Marcello Nolé, Pier Francesco Sciuto, Paolo Severi**

Regione Emilia-Romagna

	sigla	P1	P2	P3	P4	P5	P7	P8	P9	P10	P13	P14	P15
	<b>prof</b>	<b>12</b>	<b>17</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>9</b>	<b>15</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>14</b>
<b>Conducibilità</b>	gruppi	1	2	2	3	3	3	4	3	5	5	2	6
	☀	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
	M	✗	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↑	↑	↓
	📄	✗	'11	'11	'10	'11	'11	'13	'15	'11	'10	'13	'12
	%	0	31,6	25,2	8,7	28,3	32,7	101	93,6	21,8	5,3	45,8	3,3
	▼	≈2	≈2	≈8	≈9	≈8	≈9	2→6	8→2	≈3	≈2	≈2	2→8
	%	17	12	80	60	57	75	38	22	20	22	20	57
<b>Temp</b>	☀	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓*	✓	✓*	✓	✓	✓
	M	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	✗
	📄	'15	'14	'15	'12	'12	'14	'15	'15	'11	'13	'13	✗
<b>Livello</b>	M	↓	✗	✗	↓	↓	✗	↓	↓	↓	✗	✗	✗
	📄	'13	✗	✗	'13	'13	✗	'13	'12	'13	✗	✗	✗
	%	29	✗	✗	68	27	✗	50	23	23	✗	✗	✗

	sigla	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P23	P24	P25	P28	P33	P34
	<b>prof</b>	<b>18</b>	<b>15</b>	<b>18</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>21</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>22</b>	<b>14</b>
<b>Conducibilità</b>	gruppi	6	6	3	1	1	6	3	3	3	3	1	4
	☀	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	M	↓	↓	↓	✗	↑	↓	✗	✗	✗	✗	✗	↑
	📄	'14	'12	'11	✗	'13	'11	✗	✗	✗	✗	✗	'13
	%	120	31,5	18,4	0	16,6	29,6	✗	✗	✗	✗	✗	15
	▼	7→8	7→8	7→8	≈1	≈1	≈2	≈9	≈8	≈7	≈9	≈2	≈1
	%	44	53	44	13	10	10	90	73	78	90	9	7
<b>Temp</b>	☀	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓*	✓*
	M	↑	↑	↑	✗	✗	✗	↑	✗	✗	✗	↑	↑
	📄	'13	'13	'14	✗	✗	✗	'13	✗	✗	✗	'19	'14
<b>Livello</b>	M	↓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	↓
	📄	'12	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	'14
	%	14	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	61

**TAB. 1 ANALISI STATISTICA**  
Sintesi dell'analisi statistica effettuata

**LEGENDA**

- prof = profondità del piezometro in metri
- gruppi = numeri da 1 a 6, raggruppamenti di punti con valori omogenei di Ce, individuati con la cluster analysis (1 indica valori di Ce più bassi, 6 valori di Ce più alti)
- ☀ = stagionalità (eventuale differenza tra letture periodo secco e piovoso)
- ✓ = presenza di stagionalità; ✗ = assenza di stagionalità
- M = variazione nel tempo di Ce, T e livello
- ↓ = diminuzione nel tempo; ↑ = aumento nel tempo; ✗ = assenza di variazione
- 📄 = data in cui è avvenuta la variazione di Ce, T e livello; ✗ = assenza di variazione
- % = differenza in percentuale tra i valori medi di Ce e il livello prima e dopo la variazione; ✗ = assenza di variazione
- ▼ = spessore in m di acqua dolce (Ce≤2,5)
- ≈2 = circa 2 metri; 2→6 = lo spessore di acqua dolce passa mediamente da 2 a 6 m dopo la data della variazione
- % = percentuale dello spessore di acquifero saturo in acqua dolce
- ✓\* = variazioni stagionali della T anche a profondità maggiori di 5-6 m (in tutti gli altri casi la variazione avviene sempre, ma solo fino a 5-6 m)

**RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

Bonzi L., Calabrese L., Severi P., Vincenzi V., 2010, "L'acquifero freatico costiero della regione Emilia-Romagna: modello geologico e stato di salinizzazione", *Il Geologo dell'Emilia-Romagna*, 39, 21-34.

Ispra, 2002, *Carta geologica d'Italia in scala 1:50.000, Foglio 223 - Ravenna - Servizio geologico d'Italia - Regione Emilia-Romagna.*