

M. AMADORI (\*)

## ALCUNE OSSERVAZIONI SULLA RELAZIONE TRA INQUINAMENTO DA NITRATI E VULNERABILITÀ DELLA RISORSA IDRICA NEL COMUNE DI CECINA (LIVORNO)

**Riassunto** - Le carte di vulnerabilità sono un potente strumento per la gestione del territorio, poiché grazie a queste è possibile capire quali sono le variabili che controllano maggiormente la vulnerabilità della risorsa idrica divenendo così un ottimo strumento per la pianificazione del territorio e quindi per la prevenzione dall'inquinamento. L'area in studio, il comune di Cecina (LI), situato nella Toscana centro-meridionale, presenta, come dimostrato da studi precedentemente svolti dal Gestore Idrico, dalla Provincia di Livorno e dal CNR - Istituto di Geoscienze e Georisorse (IGG) di Pisa, una relazione tra alterazione della qualità della risorsa idrica dovuta alla presenza di nitrati di origine antropica ed agricola e vulnerabilità del territorio. Su queste basi si è ritenuto interessante provare ad elaborare una carta di vulnerabilità della risorsa idrica in funzione delle caratteristiche idrauliche del territorio, utilizzando la metodologia messa a punto dal CNR - Gruppo Nazionale Difesa Catastrofi Idrogeologiche (CNR-GNDCI) e descritta dal manuale della Agenzia Nazionale Protezione Ambiente (ANPA) 2001.

**Parole chiave** - Nitrati, contaminazione agricola, Cecina, idrologia, acque di falda, acquifero, vulnerabilità.

**Abstract** - *Some observations on the relationship between the nitrate pollution and the groundwater vulnerability in the Cecina District.* The groundwater of the Cecina river alluvial aquifer (centre Tuscany) was studied to determine the relationship between aquifer vulnerability and nitrate pollution. The vulnerability data, here presented as GIS-based maps, provide a baseline which can be used as a useful diagnostic tool in the monitoring of the Cecina groundwater and of the possible future degradation of its quality, due to nitrate pollution deriving from human activities. On the basis of the available data, maps of aquifers vulnerability to nitrate pollution were drawn, to be used in the Structural Plans aimed to guarantee an adequate standard of groundwater bodies protection. The methodology used (S.I.N.T.A.C.S. base method C.N.R. - G.N.D.C.I.) is based on groundwater pollution risk assessment, as a consequence of the interaction among different components as: intrinsic vulnerability, connected with the hydrogeological land characteristics - hazard, connected with anthropic activities - importance of the aquifer, i.e. its importance for human beings. The S.I.N.T.A.C.S. parametric method applies to the land as an example to point out the aquifer nitrate pollution risk.

**Key words** - Aquifer, vulnerability, planning, land, nitrate pollution, hydrogeology.

CARATTERISTICHE IDRAULICHE, GEOLOGICHE E GEOMORFOLOGICHE DELL'AREA IN STUDIO

Il territorio in studio, il comune di Cecina (Fig. 1), sito in provincia di Livorno nella Toscana centro-meridionale è circondato ad est da colline di altezza variabile tra i 220 ed i 280 m s.l.m. e sedi dei comuni di Casale Marittimo, Guardistallo e Montescudaio (rispettivamente da sud verso nord); a nord confina con la pianura del Comune di Rosignano Marittimo e a sud con la pianura del comune di Bibbona, mentre ad ovest con il Mar Ligure. Le caratteristiche geologiche e morfologiche del territorio in studio concordano con la distribuzione degli inquinanti nell'acquifero. I nitrati si trovano prevalentemente nelle falde che raccolgono l'acqua da terreni pianeggianti o basso collinari dove l'attività antropica e la ricarica prevalentemente verticale della falda idrica dovuta all'assenza di gradienti morfologici concorrono all'accumulo di sostanze azotate. Le principali attività economiche sono il turismo, l'agricoltura e l'allevamento. Durante il periodo estivo la crescita della popolazione unita all'aumento dei prelievi idrici, tendono a far diminuire la quantità di acqua in falda e ad aumentare i carichi di azoto.

D'Ambrosio & Fagioli (1997) riconoscono per la Pianura Costiera a nord e sud del Fiume Cecina una situazione stratigrafica che vede la presenza di almeno tre orizzonti permeabili costituiti da conglomerati e ghiaie con intercalazioni di arenarie, separate da strati d'argilla e/o arenaria compatta. Lo spessore di tali orizzonti permeabili è estremamente variabile così come il grado d'interconnessione idraulica che può dipendere anche dal grado di fratturazione delle arenarie. Gli orizzonti permeabili possono essere separati, sia da strati d'argilla sia da arenaria compatta.

Lo studio effettuato da Grassi & Squarci (2000) è stato utilizzato come modello per la descrizione della ricarica dell'acquifero della pianura costiera. Gli autori distinguono i seguenti meccanismi di ricarica:

- infiltrazione d'acque piovane;
- infiltrazione d'acque provenienti da piccoli corsi d'acqua;
- apporto d'acque dal Fiume Cecina;
- apporto d'acque dalle zone pedecollinari e montane in orizzonti permeabili connessi con quelli più profondi della piana costiera;
- penetrazioni d'acqua salmastra.

(\*) Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, via Moruzzi 1, 56126 Pisa. E-mail: amadori@igg.cnr.it

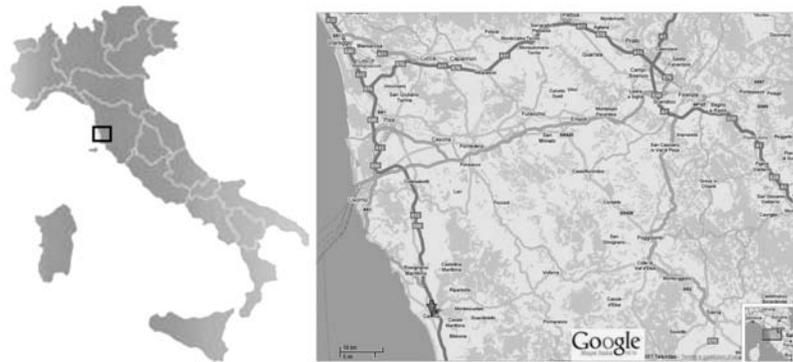


Fig. 1 - Localizzazione dell'area in studio.

Lo schema idrogeologico di riferimento assume di ritenere in buona approssimazione che le numerose falde presenti nel sottosuolo siano interconnesse in un unico sistema acquifero, detto «sistema multifalda». Le interconnessioni tra le falde possono essere dovute sia alla presenza di livelli permeabili, sia alle perforazioni dei livelli impermeabili effettuate per la ricerca delle acque, che hanno interconnesso tra di loro gli acquiferi.

Date le caratteristiche dell'area appare evidente che nelle aree verso mare, essendo più ridotto il flusso di falda a causa dell'assenza di gradienti morfologici, il contributo della ricarica verticale locale diventa una componente prevalente, che rende queste aree più sensibili ad un arricchimento in nitrati dovuto ad apporti locali, a causa della mancata diluizione e/o dispersione.

#### ORIGINE E TOSSICITÀ DEI NITRATI

I nitrati rappresentano la forma solubile più ossidata dell'azoto e determinano date le loro caratteristiche chimiche un doppio meccanismo di tossicità sia nell'uomo sia negli organismi superiori:

- il primo effetto si manifesta con la formazione della metaemoglobinemia, alterazione dei globuli rossi, che provoca la perdita della capacità di trasportare l'ossigeno ai tessuti con conseguenze gravissime, anche a carico del sistema nervoso;
- il secondo è la formazione di nitrosammine che causano danni epatici e costituiscono una delle classi più pericolose di cancerogeni.

La capacità degli organismi adulti di risentire di questa tossicità è abbastanza limitata: il maggior pericolo sussiste per quegli individui il cui patrimonio enzimatico a causa della giovane età (neonati, bambini sotto i tre anni) o di malattie debilitanti risulta immaturo o compromesso ([www.usepa.gov](http://www.usepa.gov))

Dai dati di letteratura ([www.usepa.gov](http://www.usepa.gov)) sugli studi di tossicità ambientale risulta che l'assunzione media giornaliera di nitrati per persona è 75 mg. In aree con acque ad alto contenuto di nitrati tale valore arriva fino a 160 mg/giorno. Nel 1977 la USEPA (United States Environ-

mental Protection Agency, [www.usepa.gov](http://www.usepa.gov)) ha stabilito un livello massimo di contaminazione da nitrati nell'acqua potabile pari a 10,2 mg/l sotto forma di  $\text{NO}_3^-$ .

In Italia la normativa (d.P.R. 236/88 e d.lgs. 31/2001) prevede un valore limite di 50 mg/l (mg/l) nell'acqua distribuita a scopo idropotabile, valore non derogabile. L'apporto di nitrati a livelli superiori al fondo naturale sono imputati all'attività antropica e le attività che determinano l'apporto di azoto all'ambiente sono:

- la produzione agricola intensiva, in special modo colture tipo granturco, colture a filari ed ortaggi;
- la produzione dei rifiuti azotati derivanti dagli allevamenti. Uno stoccaggio non conforme di liquami può creare impatti ambientali su di un acquifero facilmente vulnerabile;
- il trattamento e la produzione di liquami urbani nelle zone rurali dove generalmente non esiste sistema fognario ed il liquame civile prodotto segue il destino della subirrigazione;
- l'industria: in generale la produzione di insaccati è una delle attività più pericolose in quanto l'azoto è uno degli elementi più presenti nelle linee di produzione; tutte le attività produttive che determinano uno scarico di azoto possono concorrere al fenomeno.

Per poter quantificare i carichi di azoto che vengono rilasciati al terreno nell'area in studio vengono effettuate delle stime di «inquinamento presunto». Con questo termine, generalmente, si indica quale è il valore teorico di carico inquinante che viene prodotto da ogni abitante, industria e da ogni ettaro di terreno coltivato o destinato ad uso boschivo. Per il calcolo sono state create (Amadori, 2004; Meringolo, 2004) delle tabelle di conversione, che permettono di calcolare il totale degli abitanti equivalenti ed il totale dei carichi liberati sul territorio in kg di azoto (N) e di fosforo (P) per giorno. Nel caso del comune di Cecina, per il calcolo sono stati utilizzati i dati presentati dall'ISTAT ([www.istat.it](http://www.istat.it), 2001) ed una serie di coefficienti di conversione del CNR - Istituto Ricerca Sulle Acque (IRSA) (Quaderno 90, 1991).

Nella Tabella 1 vengono presentati i kg di azoto e di fosforo rilasciati giorno per giorno dalle principali atti-

Tab. 1 - Azoto, fosforo e abitanti equivalenti rilasciati dalle principali attività produttive.

Attività produttive comune di Cecina	Tot. Ab Eq	Tot. kg azoto per giorno	Tot kg fosforo per giorno
Allevamento	1264	8026	1249
Attività economiche	15.573	9280	1773
Popolazione	26.464	119.088	17.731
Turismo	1595	7178	1069
<b>Totale</b>	<b>44.896</b>	<b>143.572</b>	<b>21.821</b>

vità produttive ed il totale degli abitanti equivalenti, a cui corrispondono.

Nella Tabella 2 vengono invece presentati i kg di azoto e di fosforo rilasciati sia dalla superficie agraria utilizzata (SAU) sia da quella non utilizzata (non SAU). La Tabella 3, è la somma dei valori delle Tabelle 1 e 2, e presenta il totale degli abitanti equivalenti ed il totale dei kg di azoto e fosforo rilasciati al territorio.

LA VULNERABILITÀ DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Si è ritenuto interessante, vista la notevole quantità di dati a disposizione, costruire ad elaborare una carta di vulnerabilità della risorsa idrica rappresentativa dello stato dell'arte del 2005, per le campagne di morbida (maggio-giugno) e magra (agosto-settembre), da confrontare con la concentrazione dei nitrati nelle acque sotterranee. Sulla base di quanto indicato dal d.lgs. 152/99, per la realizzazione della carta della vulnerabilità si sono considerati i seguenti fattori: caratteristiche geologiche, capacità di attenuazione del suolo, condizioni climatiche e tipo di ordinamento colturale, come verrà descritto successivamente. A differenza di quanto indicato dal d.lgs. 152/99, non si è considerata la distribuzione dei carichi di azoto rilasciati sotto forma di fertilizzante al terreno, visto che lo studio si prefigge di confrontare la concentrazione di NO<sub>3</sub> con la vulnerabilità del territorio espressa dal modello SINTACS.

Le carte di vulnerabilità sono uno strumento, elaborato secondo metodi numerici, che permette di stabilire la sensibilità di un acquifero all'inquinamento. I dati e le metodiche utilizzate per il calcolo della vulnerabilità dell'area in studio sono:

- stratigrafie dei pozzi e loro caratteristiche litostratigrafiche, disponibili presso il portale del SIRA: ([http://sira.arp.at.toscana.it/sira/presentazione\\_portale.html](http://sira.arp.at.toscana.it/sira/presentazione_portale.html));
- il modello SINTACS (Civita & De Maio, 2000), il cui acronimo deriva dalle denominazioni dei para-

metri che vengono presi in considerazione per la sua determinazione (ANPA, 2001);

- dati analitici della concentrazione di azoto nitrico nei pozzi dell'area in studio. I dati misurati in campagna, provenienti da attività di monitoraggio consentono una caratterizzazione e una delimitazione più precisa delle aree vulnerabili.

Soggiacenza (S)

Come è noto, si definisce soggiacenza la profondità della superficie piezometrica misurata rispetto al piano di campagna. Questo parametro ha una notevole influenza sulla vulnerabilità degli acquiferi: dal suo valore assoluto e dalle caratteristiche idrogeologiche dell'insaturo dipende, in buona misura, il tempo di transito di un qualsiasi inquinante idroportato e la durata delle azioni autodepurative dell'insaturo, in particolare dell'azione ossidante dell'ossigeno atmosferico (ANPA, 2001). Per la descrizione di questo parametro sono stati utilizzati i dati piezometrici forniti dalla Azienda Servizi Ambientali (ASA, s.p.a. di Livorno) rispettivamente per le campagne di giugno 2005 e di settembre 2005. Le carte di Figura 2 e di Figura 3 esprimono le variazioni della quota piezometrica nelle due campagne di misura, mentre le Figure 2a e 3a rappresentano la dispersione dei punteggi applicata al territorio in funzione del metodo SINTACS, rispettivamente per le campagne di morbida (maggio-giugno 2005) e di magra (agosto-settembre 2005). I livelli piezometrici variano tra un minimo di -3 m s.l.m. ad un massimo di -29 m s.l.m. per entrambe le campagne, ne risultano quindi dei punteggi variabili tra il minimo di 2,5 m (valore associato a -29 m s.l.m.) ad un massimo di 9,8 (valore associato a -3 m s.l.m.).

Come si evince dalle Figure 2a e 3a, il punteggio SINTACS relativo al parametro in discussione (S), diminuisce con l'aumentare della profondità, cioè con l'aumentare dello spessore dell'insaturo, con valori compresi tra 10 e 1.

Tab. 2 - Azoto e fosforo rilasciato dalla superficie utilizzata e non utilizzata.

	Kg N/gg. SAU	Kg P/gg. SAU	Kg N/gg. non SAU	Kg P/gg. non SAU
Agricoltura	206.476,57	86.284,11	594,54	23,41

Tab. 3 - Somma delle Tabelle 1 e 2.

Totale AB EQ	Totale N kg/gg.	Totale P kg/gg.
44.896	350.643	108.129

### Infiltrazione (I)

Per il calcolo dei punteggi dei parametri I, N, T, A e C sono stati utilizzati i dati provenienti dalla banca dati stratigrafica digitale della Regione Toscana, disponibile su [http://sira.arpat.toscana.it/sira/presentazione\\_portale.html](http://sira.arpat.toscana.it/sira/presentazione_portale.html), utilizzando dati provenienti da 112 pozzi.

L'infiltrazione efficace assume notevole importanza nella valutazione della vulnerabilità poiché essa effettua sia il trascinarsi in profondità degli inquinanti, sia la loro diluizione, dapprima nell'insaturo e successivamente nella zona di saturazione. Essa è la componente unica o largamente preponderante per tutte le aree ove non sussistono interscambi tra acquiferi e corpi idrici superficiali e dove non sono esercitate pratiche irrigue che utilizzano grandi volumi d'acqua (ANPA, 2001).

Nel caso in studio l'infiltrazione (Fig. 4) è stata calcolata utilizzando il valore medio di precipitazione P, moltiplicato per l'indice  $\chi$ , funzione del tipo di tessitura (England, 1973).

Per la piovosità è stato utilizzato un valore di 750 mm come media annua (Tessitore, 2002).

I punteggi del parametro infiltrazione variano da un minimo di 2 fino ad un massimo di 10.

### Effetto del non-saturo (N)

La zona insatura è la parte di sottosuolo compresa tra la base del suolo ed il tetto della zona satura. Tale zona, ove avvengono spostamenti prevalentemente verticali dell'acqua sotterranea, è dunque limitata verso il bas-

so dalla superficie piezometrica di un acquifero libero. L'effetto di autodepurazione del non-saturo si valuta, dunque, a partire dalle condizioni litologiche dello spessore insaturo (litologia, stato di fratturazione, grado di carsismo ecc.). Si attribuisce un punteggio alla litologia del parallelepipedo insaturo avente per base la singola maglia (ANPA, 2001).

Nel caso in studio dato che lo spessore insaturo (Fig. 5) è costituito da diversi tipi litologici, si è reso necessario calcolare la media ponderata riferita allo spessore, che è data dal rapporto tra la sommatoria del prodotto del punteggio (R) di ogni singolo litotipo per il suo spessore (h) fratto lo spessore totale del non-saturo, secondo la seguente formula (ANPA, 2001):

$$N = \frac{\sum_{j=1}^n h_j R_j}{\sum_{j=1}^n h_j}$$

Il punteggio del non saturo oscilla tra valori 1 (per insaturi composti da parallelepipedo aventi una bassa permeabilità, es. argille o argillosi sabbiosi) e 10 (per insaturi ad elevata permeabilità, costituiti da ghiaie o ciottoli).

### Tipologia della copertura (T)

La tipologia dei terreni di copertura in genere e dei suoli, in particolare, riveste un ruolo della massima importanza nella mitigazione dell'impatto degli inquinanti e nella valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi.

È al suo interno, infatti, che si esplicano importanti processi che collettivamente costituiscono il potenziale di attenuazione del suolo (ANPA, 2001).

Per la descrizione della composizione dei terreni e la stima dei punteggi (Fig. 6) sono stati utilizzati i dati forniti dall'ARPAT e pubblicati da Menichetti (2003).

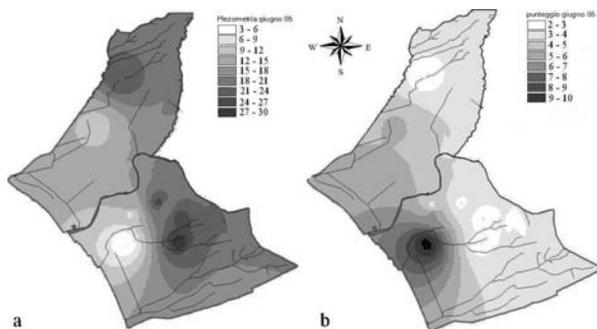


Fig. 2 - Descrizione dei valori piezometrici per la campagna di giugno (a) e descrizione della griglia dei punteggi applicata in funzione della soggiacenza (b).

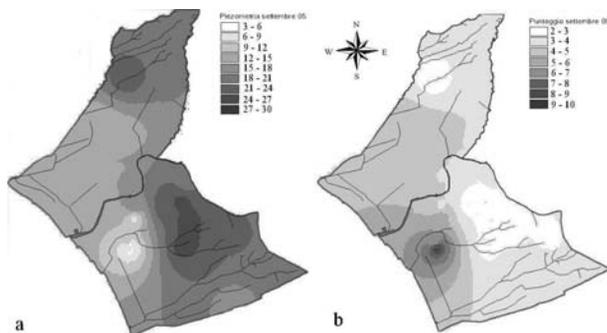


Fig. 3 - Descrizione dei valori piezometrici per la campagna di settembre (a) e descrizione della griglia dei punteggi applicata in funzione della soggiacenza (b).

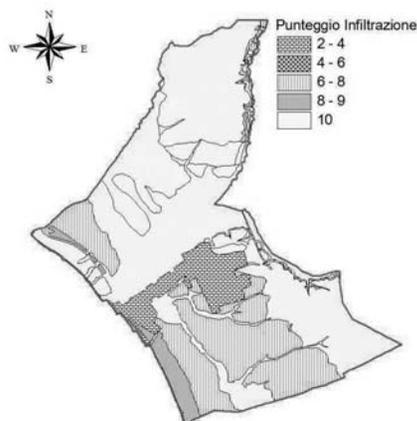


Fig. 4 - Punteggi parametro infiltrazione.

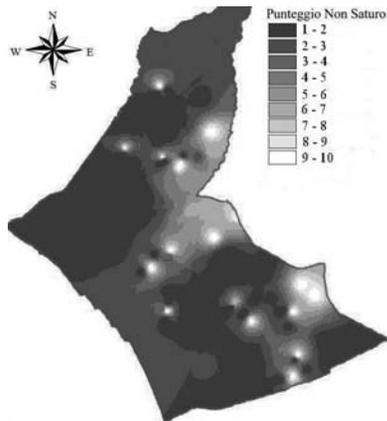


Fig. 5 - Punteggio parametro non saturo.

Dal punto di vista granulometrico i terreni della copertura risultano in prevalenza sabbiosi (> 50%), con una percentuale di sabbia che tende ad aumentare con la profondità.

I valori assegnati per il tipo di copertura variano tra 2 (per coperture costituite principalmente da suolo umifero o argilloso-limoso) e 10 (per coperture costituite da sabbie o ghiaie).

**Caratteristiche idrogeologiche dell’acquifero (A)**

La tipologia dell’acquifero (A) è il parametro di SINTACS che descrive i processi che avvengono al di sotto della superficie piezometrica, quando un inquinante idro-veicolato giunge a mescolarsi con l’acqua sotterranea. Nel caso in studio i punteggi sono stati assegnati in funzione della litologia dell’acquifero ed in funzione della variazioni della superficie piezometrica, misurata dalla azienda ASA s.p.a. nelle campagne di maggio e settembre. Per la definizione delle direzioni del flus-

so, della posizione degli spartiacque sotterranei fissi e mobili, della possibile interconnessione tra acquiferi diversi dello stesso sistema e della permeabilità, sono stati utilizzati i dati da Grassi *et al.* (2000), Fiaschi *et al.* (2001) e studio idrogeologico condotto dall’ARPAT nel 2002 (Menichetti, 2003).

La Figura 7 rappresenta la distribuzione dei punteggi per il parametro A, indicante la tipologia dell’acquifero.

Le caratteristiche idrogeologiche dell’acquifero variano in funzione dei complessi rocciosi contenenti la zona satura del sistema acquifero da valori 1 (per argille, limi e torbe) a valori di 8 (per alluvioni grossolane, complessi sabbiosi, arenarie e conglomerati).

**Conducibilità idraulica dell’acquifero (C)**

La conducibilità idraulica è la capacità di spostamento dell’acqua sotterranea nel mezzo saturo, dunque, di un inquinante idroportato o con le stesse caratteristiche di densità dell’acqua sotterranea. La valutazione dei pun-

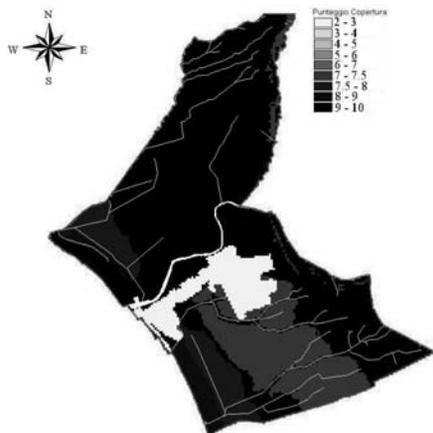


Fig. 6 - Distribuzione punteggi parametro copertura.

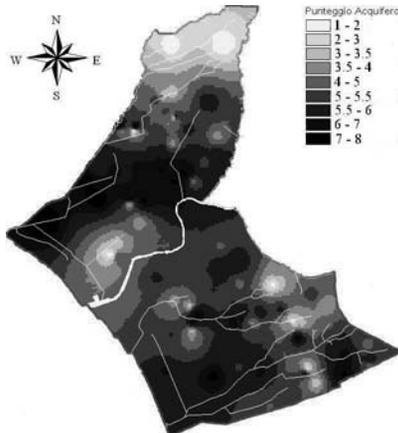


Fig. 7 - Punteggio parametro acquifero.

teggi nello studio presente è stata fatta utilizzando i valori di conducibilità riportati nello studio idrogeologico condotto dall'ARPAT nel 2002 (Menichetti, 2003) e/o utilizzando i valori di letteratura indicati nel manuale ARPAT (ANPA, 2001) in funzione dei diversi spessori litologici.

La Figura 8 mostra la distribuzione dei punteggi ottenuti per il parametro in esame.

La conducibilità idraulica dell'acquifero varia in funzione della composizione dei complessi costituenti gli acquiferi tra valori di 1 (argille, argille con intercalazioni sabbiose) a valori di 10 (ghiaie e sabbie).

### Acclività della superficie topografica (S)

L'acclività della superficie topografica influisce sulla valutazione della vulnerabilità soprattutto perché da essa dipende sia la quantità di ruscellamento che si produce a parità di precipitazione, sia la velocità di spostamento dell'acqua o di un inquinante fluido idro-veicolato in superficie. In pratica, si attribuisce un punteggio elevato alle pendenze molto blande corrispondenti a parti del territorio dove un inquinante può spostarsi poco sotto l'azione della gravità o addirittura ristagnare favorendo l'infiltrazione. L'acclività influenza, inoltre, in misura più o meno grande la tipologia e lo spessore del suolo e della copertura; parametri importanti del potenziale d'attenuazione.

Per la costruzione della carta di acclività è stato costruito un modello digitale del terreno, utilizzando le quote dal piano di campagna dei pozzi disponibili dal database digitale del Sira, ed altri forniti dall'Azienda Servizi Ambientali ASA s.p.a. di Livorno. In Figura 9 è riportata la carta della distribuzione dei punteggi in funzione della acclività dell'area in studio. Si sottolinea che il punteggio maggiore è dato alle aree con una pendenza minore, per le quali, la componente verticale della ricarica diventa la componente prevalente, rendendo queste aree più sensibili ad arricchirsi in nitrati, dovuti ad apporti locali (ANPA, 2001).

In questo caso i punteggi della pendenza assumono valori compresi tra 8 (5-6% di acclività) e 10 (per acclività comprese tra 0 e 2%).

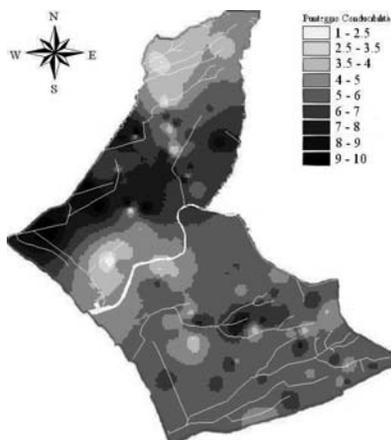


Fig. 8 - Punteggio parametro conducibilità idraulica acquifero.

### Somma dei punteggi e scelta dei pesi ottimali

Data la struttura modulare per maglie del modello risulta necessario applicare dei pesi, ad ognuna delle 7 componenti del SINTACS, scelti in base alle caratteristiche dell'area in studio ed in base all'impatto delle attività economiche che la caratterizzano, secondo la seguente formula:

$$I_{\text{SINTACS}} = \sum_{(i=1)}^7 P_i W_i$$

Dove P corrisponde al peso e W al punteggio della maglia. Per la scelta della stringa dei pesi si è considerata l'area come «area ad impatto rilevante», dove per impatto rilevante si intende: «aree a scarso gradiente topografico (pianura, pedemonte...) con insaturo composto prevalentemente da rocce permeabili, morfologicamente adatti ad antropizzazione estensiva, con colture che prevedono abbondanti trattamenti con concimi chimici o fertilizzanti naturali. Si tratta di aree con vasche di dispersione, aree industriali attive e dismesse, aree urbanizzate e assimilabili» (ANPA, 2001).

La stringa scelta (Tab. 4), è strutturata in modo da esaltare notevolmente la funzione della soggiacenza e dell'insaturo combinati, ma anche quella fondamentale del suolo come baluardo contro l'inquinamento chimico idro-veicolato da fonti sia diffuse che puntuali. Notevole enfasi viene tributata anche al parametro infiltrazione per tenere conto delle pratiche irrigue che forniscono un potente vettore agli inquinanti sparsi o/e applicati sulla superficie del suolo e alle perdite da strutture di accumulo o di trasporto di inquinanti come sistemi fognari e fosse biologiche.

L'integrazione dei valori così ottenuti fornisce, un valore numerico rappresentate la vulnerabilità intrinseca dell'acquifero di riferimento. Tali valori possono variare da un minimo di 26 ad un massimo di 260 punti. In Figura 10 è mostrato l'intervallo per gradi di vulnerabilità associato ad ogni fascia di valori.

Come si evince dalla Figura 10, avremo 6 fasce di vulnerabilità, secondo le seguenti abbreviazioni:

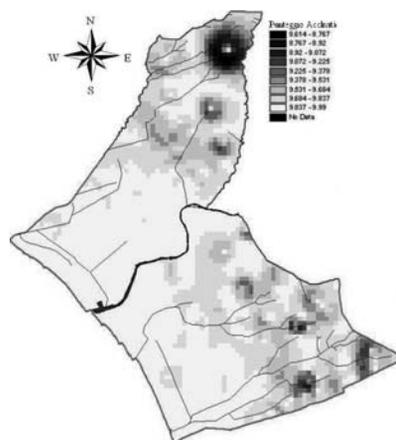


Fig. 9 - Punteggio parametro acclività superficie.

Tab. 4 - Stringa dei pesi moltiplicatori per SINTACS.

Parametro	Impatto normale
S	5
I	5
N	4
T	5
A	3
C	2
S	2

- EE = Estremamente elevata (210-260);
- E = Elevata (186-210);
- A = Alta (140-186);
- M = Media (105-140);
- B = Bassa (80-105);
- BB = Bassissima (0-80);

I risultati del modello di vulnerabilità per l'acquifero del comune di Cecina sviluppato utilizzando il metodo SINTACS sono riportati nella Figura 11a e b. Appare evidente che tutto il territorio è affetto da vulnerabilità alta, con alcune aree soggette a vulnerabilità media, ed altre soggette a vulnerabilità elevata o estremamente elevata con punteggi compresi tra 140 e 160. La Figura 11a e b evidenzia come la vulnerabilità maggiore si ha nella campagna di morbida, maggio-giugno, quando il livello della falda idrica è elevato ed i composti inquinanti sono più facilmente trasportati in falda.

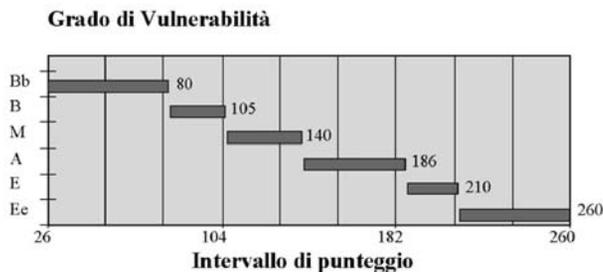


Fig. 10 - Intervallo di valori per grado di vulnerabilità

DISTRIBUZIONE DELLA CONCENTRAZIONE DEI NITRATI IN FALDA

La distribuzione della concentrazione dei nitrati presenti nella falda a giugno e settembre 2005, è riportata per classi, seguendo la classificazione espressa dal d.lgs. 152/99 (Fig. 12a e b):

- Classe 1  $\text{NO}_3^- \leq 5$  mg/l;
- Classe 2  $\text{NO}_3^- \leq 25$  mg/l;
- Classe 3  $\text{NO}_3^- \leq 50$  mg/l;
- Classe 4  $\text{NO}_3^- > 50$  mg/l;

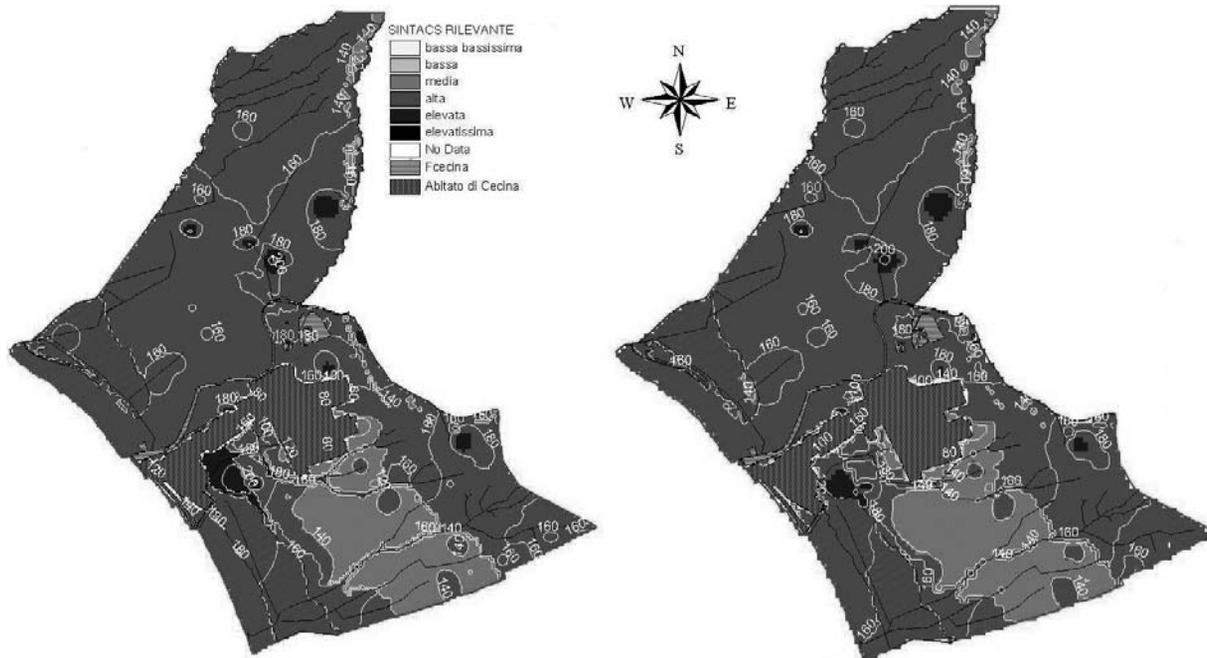


Fig. 11 - Vulnerabilità idraulica nelle campagne: di magra (a) e di morbida (b).

Tab. 5a - Statistica descrittiva della concentrazione del nitrato all'interno della falda.

Variabile	Media	N. validi	Mediana	Moda	Frequenza della moda	Minimo	Massimo	25.000mo percentile	75.000mo percentile	Media geometrica	Media armonica	DS	Varianza
Nitrati	29,23936	48	28,30000	55,40000	3	1,000000	64,20000	17,15000	35,35000	22,00135	11,98161	17,63188	310,8832

Tab. 5b - Distribuzione delle concentrazioni di nitrati all'interno della falda.

Soglia superiore	Osservati frequenza	Cumulati osservati	% osservati	% cumul. osservati	Attesi frequenza	Cumulati attesi	% attesi	% cumul. attesi	Osservati-attesi
≤ 7,50000	8	8	16,66667	16,6667	5,222197	5,22220	10,87958	10,8796	2,77780
15,00000	2	10	4,16667	20,8333	4,841617	10,06381	10,08670	20,9663	-2,84162
22,50000	7	17	14,58333	35,4167	6,791236	16,85505	14,14841	35,1147	0,20876
30,00000	10	27	20,83333	56,2500	7,970790	24,82584	16,60581	51,7205	2,02921
37,50000	10	37	20,83333	77,0833	7,828010	32,65385	16,30835	68,0289	2,17199
45,00000	2	39	4,16667	81,2500	6,432777	39,08663	13,40162	81,4305	-4,43278
52,50000	1	40	2,08333	83,3333	4,423220	43,50985	9,21504	90,6455	-3,42322
60,00000	5	45	10,41667	93,7500	2,544859	46,05471	5,30179	95,9473	2,45514
67,50000	3	48	6,25000	100,0000	1,225074	47,27978	2,52224	98,4995	1,77493
< Infinito	0	48	0,00000	100,0000	0,720220	48,00000	1,50046	100,0000	-0,72022

Variabile: nitrati; Distribuzione: normale

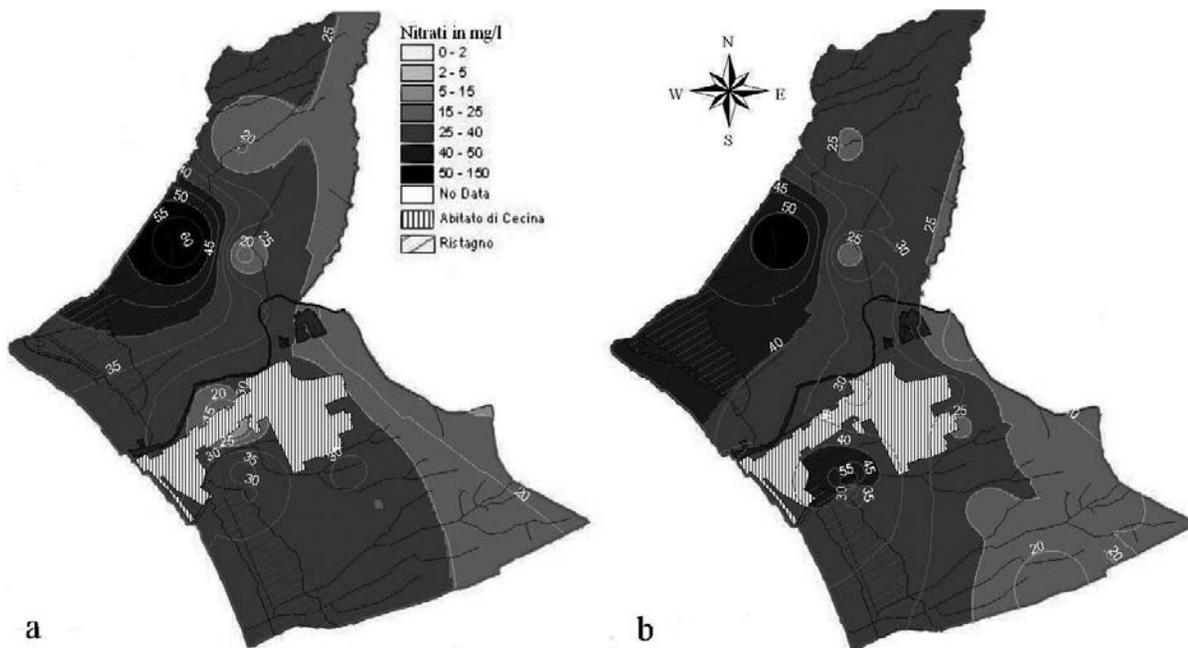


Fig. 12 - Distribuzione dei nitrati nelle campagne: di magra (a) e di morbida (b).

La Tabella 5a e b mostra la distribuzione della concentrazione dei nitrati nella falda idrica dell'area in esame. Per questa classificazione sono stati utilizzati 48 dei 55 pozzi monitorati dal gestore idrico durante la campagna di morbida e di magra. Circa il 42% dei dati analizzati (20 pozzi) varia tra 30 e 38 mg/l. La Tabella 5a, riporta la statistica descrittiva dei dati, sottolineando che la media è di circa 29 mg/l, ma evidenziando una moda di circa 55 mg/l.

La Tabella 5b evidenzia la distribuzione delle frequenze della variabile nitrito.

La Figura 13a descrive la curva di probabilità empirica della famiglia di dati in analisi. Come si evince dal grafico la probabilità è distribuita secondo due rette con pendenza distinta. Questo indica che l'insieme dei dati è distribuito secondo due famiglie, corrispondenti ai diversi periodi di campionamento. La Figura 13b e c, indicante rispettivamente le distribuzioni normal-logaritmiche dei campioni di magra (agosto-settembre 2005) e di morbida (maggio-giugno 2005) evidenzia un'anomalia positiva, imputabile probabilmente all'evapotraspirazione del periodo estivo (Fig. 13b), e ad un effetto di lisciviazione e trasporto dei nitrati in falda nelle aree più vulnerabili durante il periodo di morbida (Fig. 13c).

Come si evince dalla Figura 12a e b le aree che risentono di elevate concentrazioni di azoto nitrico in falda sono due: la prima è in località San Pietro in Palazzi, mentre la seconda è a Cecina in località il Paduletto. Nella zona di S.P. in Palazzi le concentrazioni sono tali da raggiungere una concentrazione superiore a 50 mg/l, ponendosi così in classe 4 secondo la classificazione

del d.lgs. 152/99. Considerando che lo stato quantitativo di questa area, sempre secondo d.lgs. 152/99, è definito come Classe C (impatto antropico significativo con notevole incidenza sull'uso della risorsa idrica), sommando l'indice della Classificazione Chimica (Classe 4) con l'indice Quantitativo (Classe C), si ottiene che lo stato del corpo idrico sotterraneo in questa area assume la caratteristica di Stato Scadente, per le campagne di morbida (maggio-giugno 2005) e di magra (agosto-settembre 2005). Lo stesso effetto si ha anche in località il Paduletto, con l'eccezione di avere nella campagna di morbida (maggio 2005) classifica-

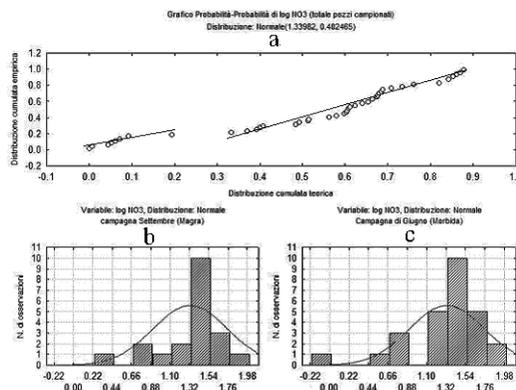


Fig. 13 - Grafico probabilità vs. probabilità (a); distribuzione normale delle concentrazioni dei nitrati per le campagne in studio (b e c).

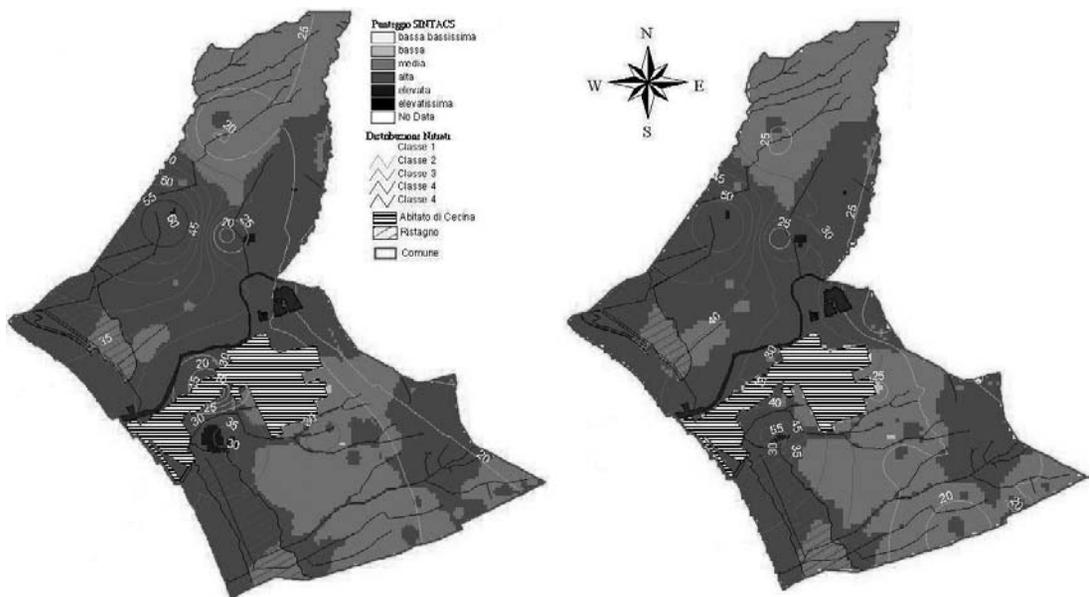


Fig. 14 - Relazione tra vulnerabilità idraulica e distribuzione dei nitrati nelle campagne: di magra (a) e di morbida (b).

zione chimica di classe 3, che non cambia, comunque, lo stato ambientale del corpo idrico sotterraneo che rimane classificato come scadente. Per entrambe le zone è possibile evidenziare che in settembre la concentrazione di  $\text{NO}_3$  ricopre una superficie maggiore.

## CONCLUSIONI

Il presente studio delle caratteristiche geologiche e morfologiche del territorio tende a sottolineare la correlazione fra il fenomeno di inquinamento da nitrati dell'acquifero e la vulnerabilità del territorio. In Figura 14a e b sono confrontate le classificazioni della vulnerabilità del territorio secondo il metodo SINTACS e la distribuzione dei nitrati per le campagne di maggio 2005 (Fig. 14a) e settembre 2005 (Fig. 14b).

Confrontando i dati chimici con i risultati del modello si conclude che la falda idrica del territorio comunale di Cecina è altamente vulnerabile. La presenza di nitrati è connessa ad attività antropiche (l'agricoltura, l'allevamento e lo smaltimento dei reflui civili) con un carico quantificabile in 44896 abitanti equivalenti, tali da produrre un rilascio di 35 tonnellate di azoto (N) su tutto il territorio in studio. Ne risulta così una concentrazione media in nitrati nelle acque della falda comunale quantificabile in 29,4 mg/l, con concentrazioni estreme maggiori di 60 mg/l in prossimità delle aree estremamente vulnerabili specie nel periodo estivo. Le possibili fonti di inquinamento possono essere imputate:

- all'irrigazione dei campi durante il periodo primaverile-estivo, che tende a trasportare in falda i composti azotati lisciviati dai terreni;

- all'aumento della popolazione dovuto all'arrivo dei turisti in campeggi o agriturismo, che spesso in questa zona sono provvisti soltanto di fosse biologiche;
- all'aumento dei prelievi in falda come conseguenza dell'aumento dei consumi idrici e diminuzione del volume idrico della falda a causa della diminuzione delle piogge;
- alle prime piogge autunnali, brevi ed intense, che in alcuni anni in fine settembre possono lisciviare e trasportare in falda i composti azotati rilasciati sul terreno per la semina autunnale di mais e grano.

## RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare l'Azienda Servizi Ambientali (ASA) s.p.a., per i dati chimici e piezometrici, in particolare la dott.ssa Barbara LaComba, dott.ssa Roberta Maggiorelli e il tec. ind. Riccardo Mori e l'assessore Ambiente e Territorio del Comune di Cecina tec. ind. Alberto Mazzoncini per le informazioni sull'utilizzo del territorio. Desidero ringraziare inoltre il revisore, in forma anonima, per l'aiuto ed i consigli necessari alla realizzazione di questo articolo.

## BIBLIOGRAFIA

- ASA s.p.a. Azienda Servizi Ambientali, 2005, Dati piezometrici e dati analitici. Livorno.
- Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (ANPA), 2001. Linee guida per la redazione e l'uso delle carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. [www.anpa.it](http://www.anpa.it)
- Amadori M., 2004. La qualità delle acque del Fiume Cecina nel tratto tra Radicanoli e Ponteginori. Tesi di Laurea, Università di Pisa, Interfacoltà di Scienze Ambientali, [www.etd.adm.unipi.it/etd-db/etd-search/search](http://www.etd.adm.unipi.it/etd-db/etd-search/search)

- Ambrosio M., Fagioli M.T., 1997. Bilancio Idrologico del Fiume Cecina. Province di Pisa e Livorno. Provincia di Livorno.
- Ambrosio M., Fagioli M.T., 2001. Modellazione e simulazione numerica in idrogeologia: esempio di applicazione alla pianura costiera di Cecina. *Acque Sotterranee* 70.
- ARPAT, ANPA, Centro Tematico Nazionale Acque Interne e Marino Costiere CTN AIM, 2001. Gli indicatori per il primo rapporto SINAnet sulle acque. E-mail: ctnaim@arpato.toscana.it
- Bartoletti E., Bossio A., Esteban M., Mazzanti R., Mazzei R., Salvadorini G., Sanesi G., Squarci P., 1985a. Studio geologico del territorio comunale di Rosignano Marittimo in relazione alla carta geologica alla scala 1:25.000. *Quad. Mus. Stor. Nat. Livorno* (Suppl. n. 1) 6: 33-127.
- Bartoletti E., Mazzanti R., Squarci P., 1985b. Idrogeologia del territorio del Comune di Rosignano M.mo. *Quad. Mus. Stor. Nat. Livorno* (Suppl. n. 1) 6: 247-283.
- Beccari M., Di Pinto A.C., Marini D., Santori M., Tiravanti G., 1986. I metalli nelle acque: origine, distribuzione, metodi di rimozione. I.R.S.A. Quaderni 71, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma.
- Civita M., De Maio M., 1997. Assessing groundwater contamination risk using ARC/INFO via grid function. Proc. ESRI User Conference, S. Diego (California), July 8-11 1997, paper 591.
- Civita M., De Maio M., 2000. Valutazione Cartografica automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5. Quaderni e Tecniche di Protezione Ambientale 72, Pitagora, Bologna, 226 pp. 1 CD-ROM.
- England C.B., 1973. Relative leaching potentials estimated from hydrologic soil groups. *Wat. Res. Bull. Am. Wat. Res. Ass.* 9 (3): 590-597
- ESRI, 1994. Understanding GIS. The ARC/INFO Method. Environment Systems Research Institute, Inc. Redlands (California)
- Fiaschi S., Murratzu A., 2001. Prove di portata di lunga durata presso la centrale di Santo Pietro in Palazzi. Azienda Servizi Ambientali, Livorno.
- Grassi S., Rossi S., Squarci P., 2000. Studio Idrogeologico finanziato dal Gestore delle risorse idriche, Azienda Servizi Ambientali Livorno, finalizzato alla descrizione dell'inquinamento da nitrati. ASA, Azienda Servizi Ambientali, Livorno.
- Istituto Nazionale di Statistica, www.istat.it, 14 Censimento Generale della Popolazione e delle Abitazioni, anno 2001, www.istat.it/Censimenti, 5 Censimento Generale dell'Agricoltura, anno 2001, www.istat.it/Censimenti, 8 Censimento dell'industria e dei servizi, anno 2001, www.istat.it/Censimenti.
- Menichetti S., 2003. Studio idrogeologico con utilizzo di modelli numerici di simulazione per la definizione dei meccanismi d'arricchimento in nitrati delle acque sotterranee nell'area compresa tra gli stradoni del Lupo, del Tripesce, la SS. n. 206, Vada e S. Pietro in Palazzi. ARPAT Relazione Finale, gennaio 2003.
- Meringolo F., 2004. Relazioni idrochimiche tra acque di scorrimento superficiale e acque sotterranee nella valle del Fiume Cecina nel tratto tra Radicondoli e Ponteginori. Tesi di Laurea, Università di Pisa, Interfacoltà di Scienze Ambientali, www.etd.adm.uni-pi.it/etd-db/etd-search/search
- Meucci O., 2001. Caratterizzazione delle sorgenti di contaminazione in ione nitrico delle acque sotterranee del territorio compreso tra Vada e S. Pietro in Palazzi. Azienda Servizi Ambientali, Livorno.
- Patruno A., Cavazza L., Pesci C., 1989. Variazione del contenuto di azoto nitrico nel Terreno. Influenza della concimazione azotata e della sua interazione con la lavorazione, su colture in annate diverse. *Riv. Agron.* 1: 99-115.
- Patruno A., Cavazza L., Pisteli E., 1986. Variazione del contenuto di azoto nitrico del terreno. Influenza della lavorazione, della coltura e del decorso meteorico. *Riv. Agron.* 2-3: 204-217.
- Provincia di Livorno, Settore Difesa del Suolo, 2003. La vulnerabilità da nitrati della pianura costiera: risultanze dello studio nei comuni di Rosignano Marittimo, Cecina e Castagneto Carducci. Livorno.
- Raggi G., Bicchi A.R., 1985. Studio Idrogeologico e Geomorfologico del Bacini dei Fiumi Cecina e Fine. Edizioni Bastogi, Livorno.
- Regione Toscana. Segnali ambientali in Toscana 2002, pp. 13-56. www.rete.toscana.it/sett/ambiente
- Tessitore S., 2002. Indagini di campagna e di laboratorio a supporto dello studio idrogeologico previsto nella convenzione, stipulata dall'ARPAT con l'ASA di Livorno, finalizzata alla definizione dei meccanismi d'arricchimento in nitrati delle acque sotterranee nell'area compresa tra gli stradoni del Lupo, Tripesce, la SS. n. 206, Vada e San Pietro in Palazzi. ASA - Azienda Servizi Ambientali Livorno.

(ms. pres. il 15 luglio 2006; ult. bozze il 7 febbraio 2007)

