

## Origine e distribuzione dei nitrati in falda nella Pianura Padana occidentale (Province di Novara, Alessandria e Pavia)

Giorgio Pilla<sup>1</sup>, Elisa Sacchi<sup>1</sup>, Laure Gerbert-Gaillard<sup>2</sup>, Gian Maria Zuppi<sup>3</sup>, Gian  
Francesco Peloso<sup>1</sup>, Gianfranco Ciancetti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pavia, gpilla@manhattan.unipv.it, elisa.sacchi@manhattan.unipv.it, gpeloso@unipv.it, cttgf@unipv.it

<sup>2</sup>ISO4 - Analisi, studi, ricerche, s.s., Torino, iso4.dst@unito.it

<sup>3</sup>Dipartimento di Scienze Ambientali, Università Cà Foscari di Venezia, zuppi@tin.it.

*Origin and distribution of nitrates in groundwater from western Po Plain (Novara, Alessandria and Pavia Provinces)*

**ABSTRACT:** The origin, distribution and abatement of nitrate contamination in surface and groundwater are traced by hydrochemical and stable isotope analyses. The studied area, of approximately 3,600 km<sup>2</sup>, includes the Novara, Alessandria and Pavia provinces (Northern Italy), along a N-S cross section of the Po plain. The main nitrate source is from synthetic fertilisers, exceedingly used for crop raising. The distribution of groundwater contamination is closely related to land use (corn and wheat cultivation) and aquifer characteristics. Denitrification is observed where superficial clay layers are present, along major draining rivers and underneath rice fields. Results are interpreted in terms of aquifer vulnerability, groundwater circulation and land use.

*Key terms:* alluvial plain, nitrates,  $\delta^{15}\text{N}$  -  $\delta^{18}\text{O}$ , groundwater quality

*Termini chiave:* pianura alluvionale, nitrati,  $\delta^{15}\text{N}$  -  $\delta^{18}\text{O}$ , qualità delle acque.

### Riassunto

Le analisi idrochimiche ed isotopiche permettono di individuare l'origine, la distribuzione ed i processi di rimozione dei nitrati nelle acque superficiali e sotterranee. L'area di studio di circa 3600 km<sup>2</sup> comprende le province di Novara, Alessandria e Pavia lungo un transetto N-S attraverso la Pianura Padana. L'origine prevalente dei nitrati disciolti è da imputare ai fertilizzanti sintetici usati in eccesso in agricoltura. La distribuzione della contaminazione è strettamente legata all'uso del suolo ed alle caratteristiche dell'acquifero. La denitrificazione si osserva in presenza di estese coperture argillose superficiali, lungo i corsi d'acqua drenanti e, stagionalmente, nelle risaie. I risultati sono interpretati in termini di vulnerabilità e circolazione negli acquiferi, ed uso del suolo.

### Introduzione

Il continuo aumento della concentrazione dei nitrati nelle acque superficiali ed in quelle sotterranee desta, in Pianura Padana, sempre maggiore preoccupazione.

Le zone a maggior vocazione agricola soffrono generalmente dell'inquinamento delle acque sotterranee da parte di fonti diffuse legate all'utilizzo congiunto di notevoli quantità di fertilizzanti sintetici azotati e/o dello spargimento al suolo di liquami di origine zootecnica.

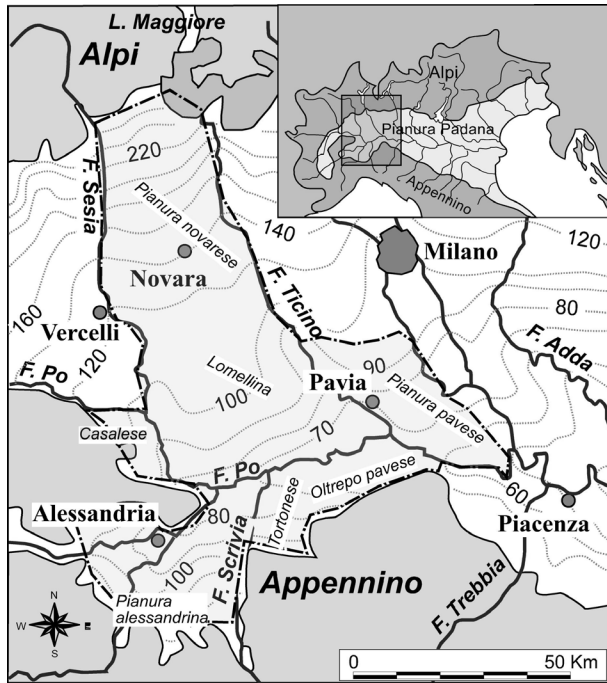
La migrazione in profondità del carico di azoto

superficiale viene facilitata anche dalle pratiche irrigue.

L'origine delle varie fonti dei nitrati nelle acque sotterranee può essere individuata utilizzando sia le tecniche proprie dell'idrochimica (Griffioen, 2001; Spruill et al., 2002) sia il segnale isotopico di ossigeno e di azoto della molecola del nitrato (Clark & Fritz, 1997). Mentre il primo metodo può essere utile in semplici casi di contaminazione puntuale, lo studio isotopico permette la netta distinzione fra le varie origini dei nitrati nelle acque sotterranee. L'utilizzo congiunto dei relativi rapporti isotopici ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^{15}\text{N}$ ) permette, inoltre, di individuare gli effetti legati ai problemi di contaminazione regionale e, in più, di riconoscere i processi di nitrificazione della materia organica e dei fertilizzanti sintetici, nonché la presenza o meno di fenomeni di denitrificazione. Pertanto, il segnale isotopico dei nitrati permette di verificare se l'attenuazione del carico d'azoto nelle acque sotterranee sia da imputare a semplice diluizione, o ai più auspicabili processi di denitrificazione (Aravena & Robertson, 1998; Panno et al., 2001).

### Inquadramento Idrogeologico

Il settore di Pianura Padana interessato da questo studio presenta un'estensione di circa 3.600 km<sup>2</sup>. Esso si sviluppa lungo una fascia ad orientazione nord-sud in corrispondenza del limite amministrativo tra Piemonte e Lombardia (Fig.1).



**Legenda**

- Depositi Pre-Quaternari
- Depositi Glaciali
- Depositi Alluvionali
- Principali fiumi
- Isopiezometrica (m s.l.m.)
- Principali città
- Area investigata

Figura 1 – Carta delle isopieze della falda acquifera principale con ubicazione dell’area investigata (da Braga & Cerro, 1988, modificato).

*Water-table contour map of the phreatic aquifer in the investigated area (modified after Braga & Cerro, 1988).*

Il sottosuolo dell’area investigata risulta costituito da depositi continentali di età plio-pleistocenica (I.R.S.A. - C.N.R., 1981, REGIONE LOMBARDIA & ENI DIVISIONE AGIP, 2002). Questi poggiano su sedimenti di origine marina, prevalentemente costituiti da marne argillose siltose e da argille siltose.

Il sistema deposizionale continentale padano risulta articolato in due fondamentali sequenze litostratigrafiche sovrapposte: la sequenza inferiore del "Villafranchiano" *Autoctorum* e la sequenza superiore alluvionale pleistocenica medio-superiore.

La prima, depositata in ambiente palustre-lacustre, risulta costituita da un complesso litologico limoso-argilloso con ricorrenti livelli ed orizzonti sabbiosi.

La seconda sequenza è costituita, per la maggior parte, da ghiaie e sabbie, con intercalazioni di orizzonti e lenti di natura limosa ed argillosa. Su quest’ultimi depositi è impostato il piano generale della pianura.

Lungo il fondo delle locali incisioni fluviali (F. Po, F. Sesia, F. Ticino, ecc.) si rinvencono, infine, depositi

alluvionali olocenici di modesto spessore, costituiti prevalentemente da ghiaie e sabbie

I depositi di natura alluvionale costituiscono l’acquifero di maggior interesse in quanto accoglie al suo interno vari corpi idrici di notevole importanza. Esso è strutturato in modo differente nelle varie zone investigate. Nel settore settentrionale (alta pianura novarese) l’acquifero si presenta come acquifero monostrato con un’elevata potenza e permeabilità dei depositi.

Procedendo verso sud (bassa pianura novarese, pianura pavese e Lomellina) l’acquifero alluvionale diviene tipicamente compartimentato multifalda, a falda superiore libera.

La superficie piezometrica si colloca ad alcune decine di metri sotto il piano di campagna in prossimità della fascia pedemontana alpina, ma, procedendo verso sud, si approssima alla superficie topografica, talvolta generando emergenze naturali (fontanili). Il senso di flusso delle acque della falda freatica è rivolto essenzialmente verso S-SE, ad eccezione dei settori prossimi ai principali corsi d’acqua della zona (F. Sesia e F. Ticino) che costituiscono dei veri e propri assi drenanti (Fig. 1). Il serbatoio freatico, in assenza di livelli argillosi in prossimità della superficie topografica, risulta particolarmente vulnerabile agli inquinamenti antropici

L’assetto idrogeologico del sottosuolo cambia radicalmente spostandosi a sud del F. Po, in Oltrepo Pavese e nella pianura Alessandrina.

In Oltrepo Pavese, l’assetto idrogeologico del sottosuolo risulta fortemente condizionato dall’innalzamento, ai margini appenninici, del substrato di origine marina a bassa permeabilità, che limita fortemente, specialmente nei settori più meridionali, lo spessore dell’acquifero (localmente non si superano i dieci metri di potenza). Il senso di flusso della falda idrica dell’Oltrepo Pavese è rivolto complessivamente verso N-NE. Questo settore è inoltre caratterizzato dalla presenza di un orizzonte superficiale, pressoché continuo, di depositi a bassa permeabilità (argille limose) che limitano fortemente la ricarica locale proteggendo le acque sotterranee da eventuali inquinamenti superficiali.

Situazione ben differente si riscontra invece nella pianura alessandrina, dove l’acquifero, di natura prevalentemente ghiaiosa e ghiaioso-sabbiosa non risulta protetto da orizzonti superficiali a bassa permeabilità, ad eccezione delle zone prossime al margine appenninico. Di conseguenza gli acquiferi della pianura alessandrina possiedono un alto grado di vulnerabilità.

**Gli isotopi stabili dei nitrati disciolti nelle acque**

Lo studio isotopico dei nitrati in soluzione, basato sull’abbondanza degli isotopi stabili di azoto ed ossigeno nella molecola di nitrato, rende possibile l’individuazione della loro origine nelle acque superficiali e sotterranee.

I fertilizzanti sintetici sono prodotti per sintesi industriale a partire dall’azoto e dall’ossigeno atmosferico.

Pertanto la loro composizione isotopica rimane simile a quella atmosferica; per l'azoto  $\delta^{15}\text{N} = 0 \text{ ‰}$ , con valori generalmente compresi tra  $-4 \text{ ‰}$  e  $+4 \text{ ‰}$ , per l'ossigeno,  $\delta^{18}\text{O} = +20 \pm 2 \text{ ‰}$  (valore medio dell'ossigeno atmosferico  $\delta^{18}\text{O} = 23 \text{ ‰}$ ).

Col processo di nitrificazione, ed al perdurare della permanenza del nitrato in contatto con l'acqua sotterranea, si assiste ad una progressiva equilibratura con la composizione isotopica dell'ossigeno dell'acqua, sensibilmente più impoverita.

La metabolizzazione dell'azoto lungo la catena alimentare comporta un frazionamento sempre maggiore in proporzione al livello trofico dell'organismo. Dunque, i nitrati provenienti dall'ossidazione di materia organica prodotta da organismi superiori (concimi organici, perdite da fosse settiche) presentano valori di  $\delta^{15}\text{N}$  maggiormente arricchiti fino a valori prossimi a 20‰.

La diminuzione della concentrazione in nitrato nelle acque sotterranee può avvenire attraverso la diluizione o attraverso la denitrificazione. La prima dovuta esclusivamente a fenomeni fisici, non determina un reale abbattimento della contaminazione nell'acquifero; la seconda, invece, rappresenta una vera e propria decontaminazione. Essa avviene grazie a una reazione biologica che richiede condizioni anossiche ed un substrato solitamente costituito da carbonio organico sciolto.

La denitrificazione provoca una variazione del tenore isotopico sia dell'azoto che dell'ossigeno, comportandone un arricchimento. Tale processo può essere descritto tramite l'equazione di Rayleigh.

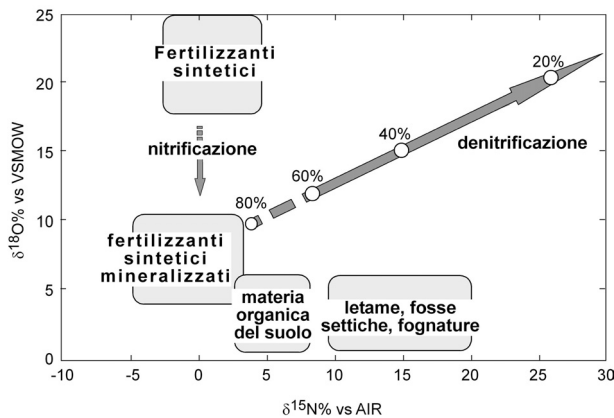


Figura 2 - La composizione isotopica ( $\delta^{15}\text{N}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ ) delle diverse fonti dei nitrati in soluzione (da Clark & Fritz, 1997). *The isotopic composition ( $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ) of various nitrate sources (modified after Clark & Fritz, 1997).*

In virtù di quanto brevemente esposto, è possibile elaborare un diagramma che evidenzia la variabilità naturale delle composizioni isotopiche dei nitrati derivati da differenti fonti (Fig. 2). Questo diagramma interpretativo generale (Clark & Fritz, 1997) è stato modificato nel nostro studio, poiché sono stati analizzati campioni con tenori in

nitrato sempre superiori a 10 mg/l, che registrano quindi oltre al segnale naturale della materia organica del suolo anche un segnale tipicamente antropico. È stata dunque eliminata la composizione isotopica della materia organica come origine dei nitrati, ed i punti che cadono in quel campo sono interpretati come contaminazione a duplice origine.

### Concentrazione, distribuzione ed origine dei nitrati nelle acque sotterranee

Lo studio si è articolato in diverse fasi comprendenti inizialmente una raccolta dettagliata di dati presso Enti territoriali, quali le Province, le Regioni, ed i Dipartimenti delle sezioni provinciali dell'ARPA, nonché informazioni acquisite nel corso di precedenti lavori dell'Università di Pavia condotti sull'area.

In seguito si è passati al campionamento delle acque sotterranee con particolare riguardo alle falde idriche più superficiali. Questo è stato condotto in stretta collaborazione con le Sezioni provinciali dell'ARPA, che hanno provveduto ad effettuare parte delle analisi chimiche nell'ambito dei loro progetti istituzionali di monitoraggio. Altri campioni di acque sotterranee a completamento dello studio sono stati analizzati presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pavia.

I campioni a concentrazione di nitrati superiore a 10 mg/l sono stati sottoposti ad analisi isotopiche della molecola del nitrato, per un totale di circa 180 analisi, di cui 35 nella provincia di Novara, 50 nella provincia di Pavia e oltre 90 nella Provincia di Alessandria.

Dai risultati ottenuti si evince che la contaminazione da nitrati in falda risulta nella maggior parte dell'area investigata abbastanza contenuta. La concentrazione dei nitrati, ad eccezione della provincia di Alessandria raramente eccede, infatti, il limite di potabilità (Fig. 3), fissato dal D. Lgs. n. 152 del 11/05/99 a 50 mg/l.

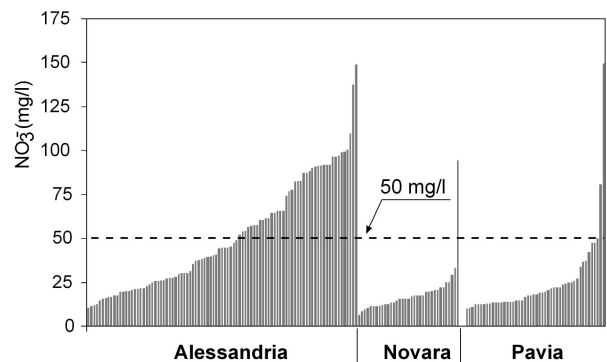


Figura 3 - Concentrazione dei nitrati rilevate nelle acque sotterranee nelle tre province investigate. *Nitrate concentration in groundwater from the three investigated regions.*

#### La Provincia di Novara

La provincia di Novara è caratterizzata dalla presenza di un

acquifero freatico di elevata permeabilità e potenza.

Come già anticipato, mentre nel settore prossimo alla fascia pedemontana alpina la soggiacenza della falda è di alcune decine di metri, verso sud la superficie piezometrica si localizza in prossimità della superficie topografica. Questa differenza si riflette anche sull'uso del suolo: la porzione settentrionale della provincia è intensamente coltivata a seminativo, mentre quella meridionale mostra una netta predominanza della coltura risicola.

La concentrazione dei nitrati raramente supera il limite di potabilità (Fig. 3), e la qualità della risorsa idrica è generalmente buona. Occasionali episodi di contaminazione da nitrato si osservano stagionalmente, con la lisciviazione di concimi, nelle porzioni di territorio a maggior permeabilità superficiale, corrispondenti con le zone settentrionali o con le fasce dei terrazzi fluviali (Fig. 4).

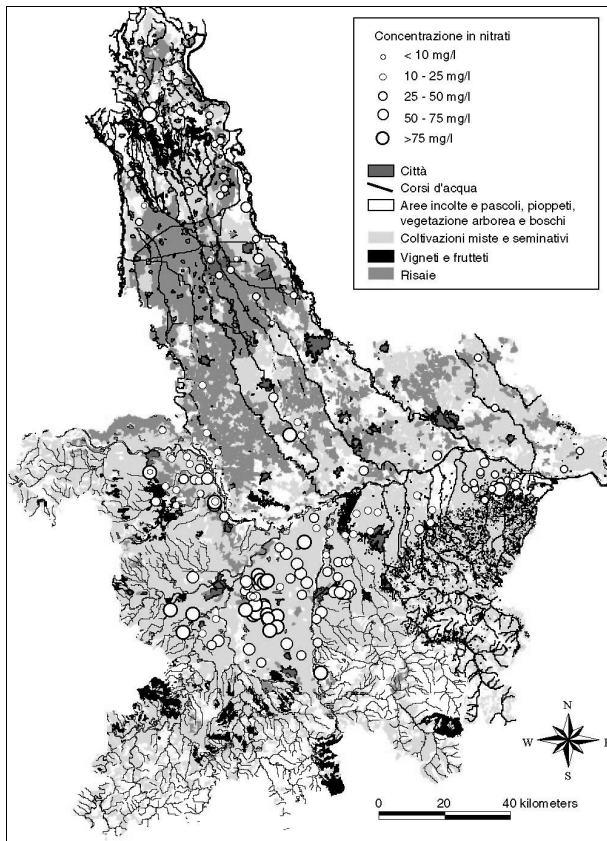


Figura 4 – Carta dell'uso del suolo con la localizzazione dei punti d'acqua campionati e con indicazione della concentrazione in nitrati in falda rilevata.

*Land use map of the investigated region with the location and nitrate concentration of sampled groundwater.*

La composizione isotopica dei nitrati conferma la dominanza del segnale dei fertilizzanti sintetici mineralizzati (Figg. 5-6).

Per un campione si osserva la presenza, nelle acque di un pozzo, di un segnale da fertilizzante sintetico non nitrificato, analogamente a quello del campione di un canale

irriguo limitrofo, mettendo in luce lo scarso isolamento del pozzo, oggetto di periodici superamenti del limite di potabilità.

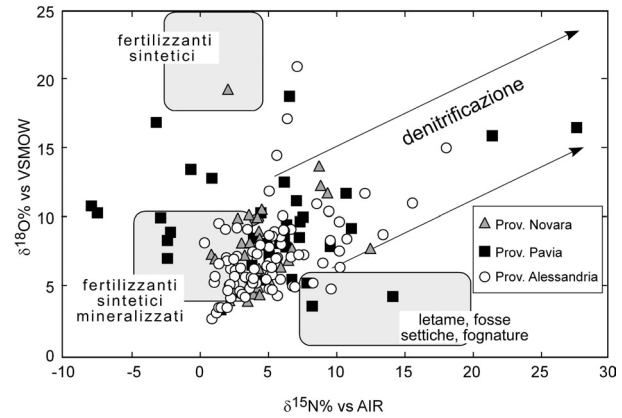


Figura 5 – La composizione isotopica dei nitrati disciolti nelle acque sotterranee nelle diverse provincie.

*The isotopic composition of groundwater dissolved nitrates from the investigated provinces.*

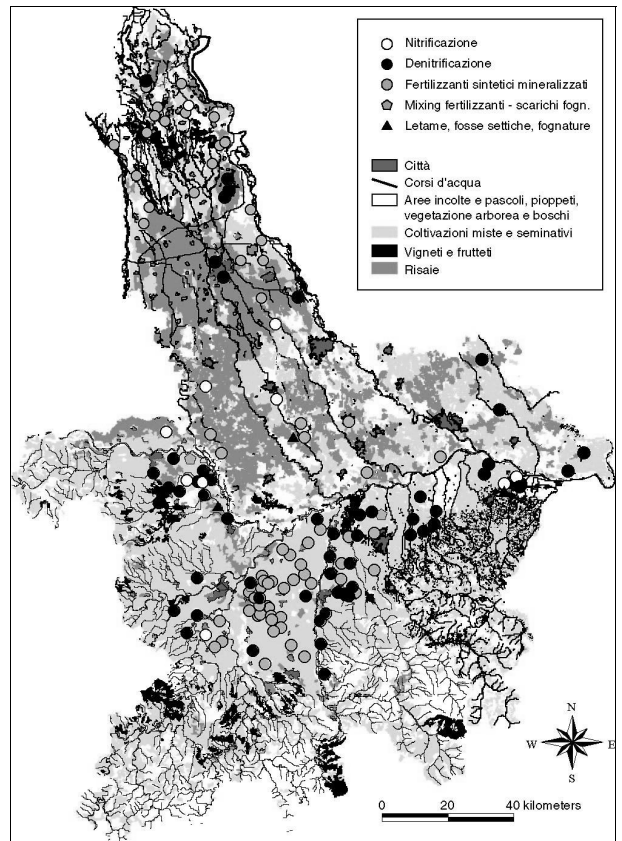


Figura 6 – Carta dell'uso del suolo con indicazione dell'origine dei nitrati e dei fenomeni ai quali sono sottoposti.

*Land use map of the investigated region with the indication of sources and processes affecting dissolved nitrates.*

La denitrificazione, evidenziata anche dai rapporti

NO<sub>3</sub>/SO<sub>4</sub> e NO<sub>3</sub>/Cl, si osserva nei pozzi che attingono all'acquifero profondo o soggetti ad elevati tassi di emungimento (ad esempio i pozzi municipali della città di Novara).

### **La Provincia di Pavia**

La provincia di Pavia in relazione alle sue connotazioni idrogeologiche può essere suddivisa in due settori contraddistinti anche da un utilizzo del suolo differente: la Lomellina-Pianura Pavese e l'Oltrepo Pavese.

#### *Lomellina – Pianura Pavese*

Caratteristica idrogeologica principale della Lomellina e della Pianura Pavese è la presenza di acquifero prevalentemente sabbioso che ospita una falda freatica localizzata a pochi metri dal piano di campagna (ASSOCIAZIONE IRRIGAZIONE EST-SESIA, 1984; Pilla, 1988; Pilla et al., 2002; Pilla et al., 2005).

Per quanto riguarda l'utilizzo del suolo, il territorio risulta contraddistinto in prevalenza da risaie. Sia la Pianura Pavese e, ancor di più, la Lomellina sono solcate, anche, da una fitta rete di canali artificiali e naturali alimentati dai corsi d'acqua principali o da manifestazioni sorgentizie (fontanili).

Pertanto, in alcuni periodi dell'anno (primavera e estate) la ricarica della falda freatica è garantita sia da infiltrazioni dalle risaie che dalla perdita dei canali irrigui.

Le acque sotterranee mostrano una qualità chimica modesta a causa della presenza oltre che di nitrati anche di solfati e di cloruri; localmente si rilevano anche tracce di antiparassitari (Pilla et al., 2002), attribuibili alle pratiche agricole in uso per la coltivazione del riso.

Lo studio isotopico dei nitrati disciolti conferma, per la maggior parte dei campioni d'acqua analizzati, un'origine dell'azoto da pratiche agricole, cioè proveniente dalla nitrificazione di fertilizzanti sintetici (Fig. 6).

Pur mostrando una medesima origine dei nitrati, le acque sotterranee della vicina Pianura Pavese evidenziano attenuazioni del carico di azoto da parte di fenomeni di denitrificazione. Questa particolarità potrebbe essere in parte favorita dalla presenza nelle porzioni prossime alla superficie di orizzonti argilloso-limosi (Pilla, 1988), che proteggono naturalmente le acque sotterranee da contaminazioni superficiali e facilitano l'istaurarsi nel sottostante acquifero di condizioni anossiche.

#### *Oltrepo Pavese*

Come precedentemente descritto l'Oltrepo Pavese è contraddistinto da un acquifero monostrato, comunemente di spessore ridotto, a causa dell'approssimarsi verso la superficie dei depositi marnoso-argillosi, siltosi e argilloso-siltosi di origine marina (Baroni et al., 1988; Peloso & Cotta, 1989; Cavanna et al., 1998). Nel suo settore orientale l'acquifero presenta spessori non superiori ad una decina di metri, mentre verso il F. Po e verso occidentale (conoide del T. Staffora), esso presenta spessori maggiori, dell'ordine di un centinaio di metri.

Le acque sotterranee dell'Oltrepo Pavese sono di tipo bicarbonato-calcico, ad eccezione di una fascia allungata circa SE-NO (tra la località Casteggio e la confluenza del F. Ticino nel F. Po) dove si assiste alla risalita verso la falda acquifera di acque clorurato-sodiche provenienti dal sottostante substrato di origine marina (Pilla et al., 2005). Il mescolamento tra queste acque e quelle della falda freatica determina, spesso, un forte decadimento qualitativo di quest'ultime fino a pregiudicarne completamente la potabilità.

I nitrati nelle acque sotterranee si mantengono generalmente entro concentrazioni modeste. Queste risultano più elevate, ma sempre inferiori a 35-40 mg/l, in corrispondenza allo sbocco in pianura dei conoidi dei principali corsi d'acqua, rappresentanti le principali aree di ricarica della falda.

Anche in Oltrepo Pavese, l'origine prevalente dei nitrati in falda è da attribuirsi all'utilizzo di fertilizzanti azotati in agricoltura. Solamente un campione di acque, ad elevata concentrazione in nitrati (circa 150 mg/l), prelevato nell'abitato di Stradella mostra un segnale isotopico tipico di reflui da fognature o da fosse perdenti (Figg. 5-6).

Questo settore è inoltre caratterizzato da intensi fenomeni di denitrificazione, pressoché ubiquitari, in grado localmente, di determinare un'abbattimento naturale delle concentrazioni in nitrati anche dell'ordine del 60%-80% (Fig. 5). Questi fenomeni, che si creano nell'acquifero anche a deboli profondità, sono favoriti dalla presenza dell'orizzonte superficiale impermeabile di natura argilloso-limoso. Tale orizzonte, infatti, oltre a limitare l'infiltrazione verticale delle acque di ricarica, impone la chiusura del sistema idrico sotterraneo all'ossigeno atmosferico. Non è possibile escludere comunque che anche la risalita delle acque profonde di tipo clorurato-sodico all'interno dell'acquifero freatico dell'Oltrepo Pavese contribuisca ad incentivare la denitrificazione.

### **La Provincia di Alessandria**

Accanto alla Pianura Alessandrina s.s. che occupa la maggior parte del settore di pianura della Provincia di Alessandria, nel territorio provinciale si possono individuare altri due settori, a minor sviuppo areale, che si differenziano sia per le connotazioni idrogeologiche del sottosuolo che, in parte, per l'uso del suolo: il Casalese, posto al margine settentrionale delle colline del Basso Monferrato, e la Pianura Tortonese, localizzata al confine orientale con l'Oltrepo Pavese (Fig. 1).

La pianura alessandrina s.s., presenta un potente acquifero ghiaioso e ghiaioso-sabbioso ad elevata vulnerabilità fortemente alimentato dalle acque dei corsi d'acqua superficiali, quali quelle del T. Scrivia.

Nella pianura del Casalese si riconoscono situazioni idrogeologiche differenti a seconda che si consideri la zona a sud del F. Po o a nord del F. Po. A sud del F. Po i depositi alluvionali hanno spessori limitati tra i 25-30 m, e ospitano una sola falda acquifera che defluisce circa verso nord-est. Il settore a nord del Po assume invece le caratteristiche degli

acquiferi della Lomellina (acquifero compartimentato multifalda, a falda superiore libera).

Per quanto riguarda, infine, il Tortonese, esso assume caratteristiche idrogeologiche simili a quelle riscontrabili nell'Oltrepò Pavese occidentale (presenza di un'estesa copertura superficiale di natura argilloso-limosa che protegge le acque sotterranee da inquinamenti di origine antropica superficiale).

Per quanto riguarda l'uso del suolo si osserva che la maggior parte del territorio di pianura della Provincia di Alessandria è contraddistinta da coltivazioni rappresentate in maggioranza da mais e da grano; solamente nel territorio del Casalese si osserva che l'utilizzo del suolo, è complessivamente dedicato alla produzione di riso, come nei vicini territori della Lomellina e della Pianura di Vercelli.

Il territorio della Provincia di Alessandria rappresenta il territorio, tra quelli investigati in questo studio, che è maggiormente colpito dalla contaminazioni in nitrati in falda. Spesso si osservano tenori in nitrati ben superiori a 50 mg/l (Fig. 3), specialmente nella pianura alessandrina s.s.. La contaminazione da nitrati raggiunge profondità elevate, fino ad oltre 100 m dal piano di campagna, ed è andata crescendo negli ultimi decenni in modo evidente. I risultati delle analisi isotopiche indicano che la contaminazione da nitrati è prevalentemente dovuta all'eccessivo utilizzo di fertilizzanti sintetici in agricoltura. Solamente in alcuni settori del Casalese si osserva un segnale isotopico da ricondurre a materia organica (fosse settiche, fognature o letame).

Nel Casalese, come anche in gran parte del Tortonese, è ben evidente il fenomeno della denitrificazione (Fig.6), che qui comporta l'abbattimento parziale della concentrazione dei nitrati. In queste ultime due zone sembra apparire dallo studio isotopico che in alcune acque l'origine del nitrato sia da attribuirsi a mescolamenti tra un azoto di sintesi industriale (fertilizzanti) e da un'azoto proveniente da materia organica.

Nella pianura alessandrina s.s., ed in particolar modo lungo il conoide del F. Scrivia, l'alta permeabilità dell'acquifero e la mancanza di orizzonti a bassa permeabilità superficiali non permette, invece, di raggiungere condizioni anaerobiche, favorevoli

all'abbattimento della concentrazioni in nitrati per denitrificazione.

## Conclusioni

Questo studio evidenzia in modo drammatico l'impatto prodotte dalle attività agricole sulla risorse idriche sotterranee. La contaminazione da fertilizzanti sintetici è molto diffusa ed il fenomeno di accumulo dei nitrati in falda rappresenta una minaccia per ingenti volumi di acqua sotterranea.

Le coltivazioni a seminativi (mais e grano) sembrano contribuire maggiormente a questo fenomeno. Tuttavia, la ricarica artificiale associata alla coltivazione del riso sembrerebbe rappresentare anch'essa una via preferenziale per gli apporti di azoto alla falda. In questi casi però l'apporto può essere parzialmente attenuato dai fenomeni di denitrificazione che si instaurano durante il lungo periodo di allagamento delle risaie, come osservato nel Casalese. Mentre l'origine prevalente della contaminazione nell'area studiata è di tipo areale legata all'uso del suolo, le forti contaminazioni sono legate a sversamenti puntuali di materia organica, presumibilmente dovute a fognature e/o a pozzi perdenti. Grazie all'uso degli isotopi, la tipologia della contaminazione è stata individuata indipendentemente dalle concentrazioni dei nitrati, permettendo anche di distinguere l'attenuazione del carico di azoto per denitrificazione da quello per diluizione.

L'interdisciplinarietà dello studio dimostra inoltre che eventuali interventi di mitigazione dell'impatto devono risultare da un valutazione congiunta di esperti in diverse discipline (idrogeologi, geochimici, chimici, agronomi e amministrazioni pubbliche).

## Ringraziamenti

Lo studio è stato finanziato dalla Fondazione CRT e dai settori di tutela delle risorse idriche sotterranee delle province interessate (Provincia di Pavia, Provincia di Alessandria e Provincia di Novara). Il lavoro è stato svolto in collaborazione con i Dipartimenti di Alessandria e Novara dell'ARPA Piemonte. Si ringrazia il dott. E. Allais (ISO4 s.s.) per il supporto analitico.

## Bibliografia

Aravena R. & Robertson W.D. (1998) - Use of multiple isotope tracers to evaluate denitrification in ground water: study of nitrate from a large-flux septic tank plume. *Ground Water*, 36, 975-982.

Associazione Irrigazione Est-Sesia (1984) - Le acque sotterranee della pianura irrigua novarese-lomellina (Comprensorio dell'Est-Sesia). Studi e ricerche per la realizzazione di un modello matematico gestionale. Litocopy, Vercelli.

Baroni D., Cotta Ramusino S. & Peloso, G.F. (1988) - La falda freatica nella pianura oltrepadana pavese e in quella alessandrina -

considerazioni sulla vulnerabilità potenziale. *Atti Tic. Sc. Terra*, 31, 351-376.

Braga G. & Cerro A. (1988) - Le strutture sepolte della pianura pavese e le relative influenze sulle risorse idriche sotterranee. *Atti Tic. Sc. Terra*, 31, 421-433.

Cavanna F., Marchetti G. & Vercesi P.L. (1998) - Idrogeomorfologia e insediamenti a rischio ambientale. Il caso della pianura dell'Oltrepò Pavese e del relativo margine collinare. F.L.A. 14-72, Isabel Litografia, Gessate (MI)

Clark I. & Fritz P. (1997) - Environmental

Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers, Boca Raton, 328 pp..

IRSA-CNR, 1981. Indagine sulle falde acquifere profonde della Pianura Padana. Quaderni IRSA 51(2):1-70

De Luca D., Masciocco L., Ricci P. & Zuppi G. M. (1987) - Studio idrogeologico della pianura alessandrina, Studi Idrogeologici sulla Pianura Padana, 3, pp. 51-57.

Griffioen J. (2001) - Potassium adsorption ratios as an indicator for the fate of agricultural potassium in groundwater. *Journal of Hydrology*

254, 244-254.

Panno, S.V., Hackley, K.C., Hwang, H.H. & Kelly, W.R. (2001) - Determination of the source of nitrate contamination in karst springs using isotopic and chemical indicators. *Chem. Geol.*, 179, 113-128.

Peloso G.F. & Cotta Ramusino S. (1989) - Idrogeologia della pianura bronese stradellina (Oltrepò Pavese) caratteristiche dei corpi idrici sotterranei e considerazioni sul loro sfruttamento. *Atti Tic. Sc. Terra*, 32, 125-162.

Pilla G. (1998) - Caratterizzazione idrochimica e geochimica isotopica delle falde idriche nel sottosuolo della città di Pavia. *Atti Tic. Sc. Terra*, 40, 180-201.

Pilla G., Sacchi E., Ciancetti G., Braga G. & Marchesi E. (2002) - Le indagini idrochimiche e geochimiche isotopiche come strumento per la gestione delle risorse idriche sotterranee: l'esempio della Lomellina (Lombardia sud-occidentale). *Atti del «1° Congresso Nazionale AIGA»*, Chieti, 19-20 febbraio 2003, 1, 589-602.

Pilla G., Sacchi E., Zuppi G.M., Braga G., Ciancetti G. (2005) - Hydrochemistry and isotope geochemistry as tools for groundwater hydrodynamic investigation in multilayer aquifers: a study case from the Po plain (Lomellina, South-Western Lombardy, Italy). *Hydrogeology Journal*, in stampa.

Pilla G., Sacchi E & Ciancetti G. (2005) -

Hydrogeologic, hydrochemical and isotopic groundwater investigation in the plain of the Oltrepò Pavese region (Southern Lombardy, Italy). *Atti del Convegno FIST "Geoitalia 2005"*, Spoleto, 21-24 settembre 2005.

Regione Lombardia & ENI Divisione AGIP (2002) - *Geologia degli acquiferi padani della Regione Lombardia*. Carcano C. and Piccin A. (Eds.), S.E.L.C.A. Firenze.

Spruill T. B., Showers W. J. and Howe S. S. (2002) - Application of classification-tree methods to identify nitrate sources in ground water. *Journal of Environmental Quality* 31, 1538-1549.