

## INQUINAMENTO DEI SUOLI E DELLE FALDE

Le alluvioni dei fondovalle dei fiumi appenninici sono sede di importanti falde di risorse idriche.

In tali aree si sono sviluppati centri urbani, zone agricole, in cui vengono intensamente impiegati concimi chimici, pesticidi, erbicidi e zone industriali per la chimica, metallurgia, agroindustria, manufatti.

La composizione delle alluvioni, talora sabbiosa e/o ghiaiosa e le caratteristiche fisiche e chimiche dei suoli consentono la percolazione dei composti inorganici ed organici nel sottosuolo. Ne consegue che nutrienti, fitofarmaci, solventi, idrocarburi, metalli di transizione penetrano nella zona non satura e satura d'acqua del terreno, da cui sono più o meno asportabili a causa dei processi che avvengono tra mezzo poroso e fluido.

Tali processi possono essere:

- reazioni di scambio;
- precipitazione, per superamento del prodotto di solubilità dei composti chimici;
- idrolisi;
- dissociazione, con aumento dell'attività ionica;
- ossidorisoluzioni, che possono influire sulla mobilità degli ioni, su precipitazioni, solubilizzazione ecc.;
- adsorbimento degli ioni sulla superficie dei minerali argillosi e delle micelle di sostanze organiche;
- chelazione;
- complessazione;
- biodegradazione di composti organici, legata alla presenza di batteri, nutrienti ed ossigeno, con variazione delle proprietà dei metaboliti rispetto al composto iniziale.

Ulteriore aggravante è rappresentata dalle frequenti interconnessioni degli acquiferi alluvionali con i fiumi, che nelle valli appenniniche costituiscono lo scolo dei reflui non trattati del bacino idrografico.

La conseguenza di tutto ciò è l'alta probabilità di vulnerabilità degli acquiferi alluvionali.

Per l'impostazione degli interventi di risanamento bisogna conoscere le caratteristiche degli inquinanti e delle sorgenti di polluzione e la distribuzione spaziale e temporale dei parametri che descrivono il sistema naturale, terreno.

Per tale motivo a scopo diagnostico si eseguono le seguenti operazioni:

- caratterizzazione del modello naturale del sito e relativo monitoraggio;
- caratterizzazione del fluido inquinante e delle sorgenti inquinanti;

- modellizzazione matematica di tipo idrodinamico, di trasporto, e di diffusione;
- prove di laboratorio (a gruppi di campioni, in colonna);
- prove su impianto pilota;
- valutazioni tecnico-economiche;
- scelta delle tecnologie di risanamento.

Il sistema va conosciuto in tutte le sue componenti: fisiche, chimiche, biologiche e socioeconomiche.

Per acquisire tale conoscenza si utilizzerà l'analisi dei sistemi, al fine di esaminare le terre, gli acquiferi e gli inquinanti in modo interdisciplinare integrato, confrontando tra loro le varie componenti. Lo strumento di base dell'analisi dei sistemi è costituito dai Sistemi Informativi Geografici (GIS, SIT), correlati con i più opportuni modelli matematici.

Un Sistema Informativo Geografico è costituito da archivi grafici connessi con archivi alfanumerici di informazioni georeferenziate. I modelli matematici, opportunamente tarati in regime permanente e transitorio, permettono di simulare scenari in funzione di particolari condizioni imposte.

Il modello matematico presuppone una buona ricostruzione del modello naturale, in modo che sia possibile distribuire le variabili del modello matematico nello spazio e nel tempo in maniera congruente con le situazioni naturali.

La caratterizzazione del modello naturale prevede la definizione dei seguenti elementi:

- la geometria del corpo inquinato;
- i parametri chimici delle terre: pH, Eh, capacità di scambio cationico, ecc.;
- le caratteristiche biologiche delle terre;
- le caratteristiche idrauliche delle terre (zona non satura e zona satura d'acqua);
- l'idrologia dell'area;
- le caratteristiche delle sorgenti inquinanti (puntuale, lineare, areale, continua, intermittente, attuale, storica, con scarico in fiume, sul terreno ecc.);
- le caratteristiche dei prelievi dai corpi idrici (distribuiti nello spazio e nel tempo);
- le caratteristiche fisiche, chimiche e biodegradative degli inquinanti;
- i trend di variazione dei processi nel tempo (monitoraggio).

Relativamente alle caratteristiche idrauliche, in zona non satura il moto convettivo è perpendicolare verso il basso, mentre è diretto verso l'alto nella frangia capillare. Ulteriori moti da considerare sono quelli di trasporto e di diffusione.

In zona satura le caratteristiche da considerare sono:

(\*) Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Camerino.

- piezometria (direzione e velocità di flusso, gradiente idraulico, portata attraverso sezioni definite);
- permeabilità e trasmissività;
- coefficiente di immagazzinamento;
- interconnessione tra acque sotterranee ed acque superficiali.

Relativamente all'idrochimica i parametri di origine naturale delle acque (geogenica) normalmente considerati sono:

Na, K, Ca, Mg,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , pH, C.E., potenziale redox,  $^{\circ}\text{C}$ , Fe, Mn, ecc.

Codesti parametri sommati ad altri di origine antropica ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ; metalli di transizione, fitofarmaci, idrocarburi; solventi;  $\text{BOD}_5$ , COD, ecc.) costituiscono l'insieme delle variabili chimiche da controllare, utilizzando reti di monitoraggio, la cui struttura si ottiene prendendo in considerazione le caratteristiche idrogeologiche dell'area e la distribuzione delle sorgenti inquinanti.

La frequenza di misura e campionamento varia in funzione dei parametri e della situazione di maggiore o minore rischio d'inquinamento. I caratteri biologici vanno esaminati caso per caso.

E' importante il concetto di indicatore ecologico, che è rappresentato da specie od associazioni vegetali ed animali, le cui caratteristiche sono in relazione con le condizioni ambientali, delle quali quindi permettono la valutazione; gli indicatori ecologici sono utili per valutare i livelli di inquinamento ambientale attuali e passati, con la relativa risposta degli ecosistemi.

Sono importanti inoltre i concetti di ciclo biogeochimico e di biodegradazione.

Bisogna altresì considerare i fenomeni di accumulo e di sinergismo delle sostanze, per cui si possono ottenere come risultanti composti tossici e/o nocivi: ad esempio i nitrati con le ammine danno le nitrosammine, che sono cancerogene.

Le sorgenti inquinanti possono essere puntuali (industriali e zootecniche) o areali (agricole), a smaltimento continuo oppure periodico.

E' necessario perciò svolgere un monitoraggio delle sorgenti inquinanti, considerando tipo, qualità e quantità d'inquinante, i prodotti derivati, e le idroesigenze, i sistemi di trattamento, smaltimento e scarico dei rifiuti.

Nei fenomeni di inquinamento è importante la distribuzione nello spazio e nel tempo dei parametri significativi. A tale esigenza rispondono i modelli matematici, i quali, tarati in un regime permanente e transitorio, consentono di simulare interventi che permettono la bonifica del sito, massimizzando i rendimenti tecnici e minimizzando l'impatto ambientale. I modelli matematici sono importanti non solo per la scelta della bonifica, ma anche per la gestione dei processi in situazioni variabili sia del sistema che delle condizioni al contorno.

Utilizzando valori di parametri monitorati in condizioni reali, i modelli di simulazione riescono a raffigurare un sistema in divenire, consentendo pertanto l'elaborazione di analisi tecniche ed economiche più precise.

Le varie simulazioni di processi di bonifica, con relative condizioni iniziali, reazioni e risultati, costituiscono una guida per lo sviluppo delle metodologie di bonifica.

Per l'esame dell'inquinamento la successione logica della tipologia dei modelli matematici è la seguente:

- modelli idrodinamici;
- modelli di trasporto;
- modelli di diffusione.

I modelli idrodinamici permettono ricostruzioni piezometriche, risultanti da simulazioni di particolari condizioni imposte: nuovi pozzi, sistemi di ricarica artificiale, mutate condizioni di esercizio degli acquiferi e delle sorgenti inquinanti.

Quando sia ben conosciuta l'idrodinamica del sistema, sarà possibile simulare spostamenti di fronti di massa nella stessa direzione dei flussi idrici.

Poiché talora gli inquinanti sono costituiti da composti fortemente dissociati, sono necessari a valle dei modelli idrodinamici e di trasporto, anche quelli di diffusione degli ioni entro il mezzo poroso.

A scopo diagnostico ambientale vengono utilizzati anche i sistemi esperti, i quali permettono di risalire da indizi, tramite sillogismi, a conclusioni logiche. Il sistema esperto è costituito da base di conoscenze, insieme di regole e da una procedura inferenziale deduttiva automatica.

Nei progetti sul territorio altro strumento utile è la cartografia tematica numerica: questa è il risultato dell'applicazione alla cartografia tradizionale di un insieme di tecniche ed algoritmi, che trasformano le rappresentazioni grafiche in archivi numerici, nei quali sono codificati le coordinate e gli elementi che caratterizzano i vari tematismi. Esistono delle carte numeriche di tipo raster e di tipo vettoriale.

E' importante poter sovrapporre carte numeriche di vari parametri, in modo da ottenere carte derivate, cioè nuove carte tematiche, ricavate dal confronto e dalla correlazione tramite criteri logico-matematici di più cartografie, d'ingresso in forme numerica. Ad esempio per la valutazione d'inquinamento potenziale delle falde è possibile comparare tra loro, in modo automatico, carte della vulnerabilità degli acquiferi.

E' opportuno definire il significato di pericolosità, vulnerabilità e rischio.

La carta della pericolosità si ottiene confrontando tra loro carte tematiche di soli parametri naturali (es. permeabilità, porosità, concentrazione); vulnerabilità è l'interconnessione della pericolosità con i manufatti; il rischio è la valutazione economica della vulnerabilità.

In base ad una buona conoscenza del modello naturale ed allo sviluppo del modello matematico sarà possibile impostare una rete di controllo razionale ed efficiente, in modo da permettere una descrizione quantitativa del sistema naturale, ben distribuita nello spazio e nel tempo. La rete di controllo e la frequenza del campionamento e delle misure possono essere modificate, migliorandole parallelamente allo sviluppo del modello matematico.

I sistemi informativi territoriali ed i modelli matematici, permettono l'omogeneizzazione, l'aggiornamento ed il confronto di dati tra parametri diversi. E' possibile con tali strumenti matematici l'*output* di carte tematiche intermedie, che possono indirizzare in maniera logica ed economica lo sviluppo delle indagini.

Gli interventi di risanamento vanno eseguiti dopo aver ben conosciuto il funzionamento del sistema tramite prove di laboratorio, impianti pilota e modelli matematici di simulazione. E' essenziale inoltre un'attenta

analisi costi-benefici delle varie alternative d'intervento. Cioè è necessario preventivamente valutare bene i costi di intervento, gestione e controllo dei processi instaurati con le modifiche al sistema. Tali costi vanno confrontati con la vocazione d'uso e quindi con il pregio delle aree e delle risorse da bonificare; i costi vanno inoltre comparati con i benefici, monetizzabili oppure no, che si possono ottenere con varie alternative d'intervento a rendimento tecnico comparabile.

Una tecnica adatta per tali confronti è rappresentata dall'MCDM (*Multi Criteria Decision Making Model*): si tratta di strumenti molto utili per scegliere le alternative d'intervento e per poter prendere decisioni razionali, impostate su dati concreti e scenari validamente simulati e valutati economicamente in modo corretto.

In caso di avvenuto inquinamento è necessario intervenire tempestivamente tramite mitigazione graduale del rischio, in funzione di una razionale analisi dei costi - benefici.

Talora, invece della realizzazione di interventi oppure assieme all'intervento è opportuno modificare le norme di gestione di sfruttamento delle risorse idriche, d'irrigazione e concimazione dei terreni, di conduzione degli impianti industriali e zootecnici e degli impianti di trattamento dei reflui. Per tale motivo è importante conoscere le condizioni socioeconomiche del territorio ed i piani di sviluppo e di settore.

Allorché il sistema sia definito dal punto di vista fisico, chimico, biologico ed economico nella sua distribuzione spaziale e temporale, di norma si interviene in prima fase per la messa in sicurezza del sito inquinato con opere di contenimento, combinate con un monitoraggio congruente con i risultati dei modelli matematici elaborati. Il contenimento può essere associato ad un contemporaneo intervento sul processo di produzione e/o trattamento dei reflui, che comporti un miglioramento della qualità degli effluenti.

Il contenimento ha lo scopo di isolare lateralmente ed inferiormente la zona inquinata, che a volte può sovrastare aree di discariche più antiche.

Al contenimento talora è necessario far seguire la bonifica in base a considerazioni di tossicità e mobilità di inquinanti ed alla vocazione d'uso del sito. La scelta tecnologica di bonifica dipende da considerazioni di carattere tecnico e socioeconomico.

Le considerazioni tecniche riguardano l'esame integrato dei risultati, delle modellizzazioni e delle prove, la valutazione del rendimento tecnico dei vari processi depurativi, la capacità di ridurre ed eliminare la tossicità, il volume, la mobilità e la persistenza degli inquinanti, lo sviluppo temporale della realizzazione dell'opera di bonifica, le tecniche ed i costi di monitoraggio, la manutenzione e gestione degli impianti di bonifica.

Le considerazioni socioeconomiche sono relative alla valutazione economica dell'intervento, alla vocazione d'uso ed al valore dell'area in risanamento, all'analisi del rischio per l'uomo o per l'ambiente, all'analisi globale dei costi benefici ecc.

Le tecnologie di risanamento, indipendentemente dal processo di bonifica utilizzato si possono suddividere in due gruppi:

- *in site*, intendendo quelle con cui si agisce direttamente nel contesto del terreno;

- *on/off site*, intendendo quelle in cui si agisce sul terreno scavato con impianto sito nel luogo oppure sul terreno scavato e trasportato ad un reattore distante dall'area di bonifica.

Per gli interventi *in site* sono necessari una buona circolazione dei fluidi nel terreno e controlli continui sulla distribuzione, la cinetica e l'efficienza delle reazioni di bonifica.

Benché gli interventi *in site* comportino un minor stravolgimento dell'area da risanare, sinora sono stati maggiormente praticati gli interventi *on/off site*, in quanto permettono una migliore gestione dei materiali (es. miscelazione), facilitando le reazioni, delle quali è più agevole il controllo delle velocità e dei rendimenti.

Se si prendono in considerazione gli idrocarburi, i principali processi applicati sia per i trattamenti *in site* che per quelli *on/off site* sono:

La scelta dei processi con relative tecniche dipende dalle caratteristiche degli inquinanti, dalla situazione dell'area inquinata e dagli obiettivi che ci si pone con la bonifica.

Ogni intervento va sviluppato nel rispetto della normativa vigente: leggi con relativi vincoli, piani di sviluppo e di settore.

#### Processo

- termico;
- estrazione;
- microbiologico.

#### Tecnica utilizzata

- strippaggio con vapore;
- lavaggio con acqua, con solventi ecc;
- biodegradazione.

Da ciò si deduce che nei progetti di disinquinamento è opportuna la collaborazione tra tecnici ed amministrazioni durante tutte le fasi delle operazioni, della definizione degli obiettivi, di conoscenza del modello naturale, alle fasi di impostazione e sviluppo dei modelli matematici di simulazione e dell'MCDM ed alle scelte delle tecnologie ottimali di risanamento.

#### BIBLIOGRAFIA

- CREMA G.C. (1996) - *Risanamento dei suoli e degli acquiferi alluvionali*. Pitagora Ed. Bologna.
- CREMA G.C. & DRAMIS F. (1993) - *Erosion, Transport and sedimentation of clays, nutrients, agrochemicals on Mio-Pliocene in Marche Region*. Conf. Int. Geomorphology, Hamilton, Canada.
- DE MARSILY G. (1986) - *Quantitative hydrogeology*. A. P. New York.
- FRICD P. (1993) - *Ground water pollution*. Elsevier Amsterdam.
- KOSTECKI P.T. et al. (1993) - *Hydrocarbon contaminated soils*. Lewis Publ. New York.
- LAURINI R. & THOMPSON D. (1992) - *Fundamental of spatial information sistem*. A.P. London.
- PEVERICRI G. (1995) - *GIS: Sistemi informativi territoriali*. Rostro Ed. Milano.
- SEQUI P. (1989) - *Chimica del Suolo*. Patron Bologna.
- STANLEY E. (1990) - *Environmental chemistry*. Lewis Publ. Boca Raton.
- ZANETTI P. (1992) - *Computer techniques in environmental studies*. IV Conf. Mech Pub. Boston.

