



SINTESI DEGLI STRUMENTI AMIIGA

WP T1, Deliverable D.T1.4.3

Delivery month
12.2018



Indice

1. SCOPO DEL DOCUMENTO.....	4
2. INTRODUZIONE	6
3. GLI STUMENTI AMIIGA PER LE ACQUE SOTTERRANEE.....	11
4. CONCLUSIONI	26



LISTA DELLE ABBREVIAZIONI

BMT:	Biological Molecular Tool, analisi biologico molecolare
BTEX:	benzene, toluene, etilbenzene e xilene
CE:	chlorinated ethene
CHC:	idrocarburi clorurati
cis-DCE:	cis-Dichloroethylene
CSIA:	Compound Specific Isotope Analysis, analisi isotopica del composto specifico
DSS:	decision support system, sistema di supporto alle decisioni
FUA:	Functional Urban Area, Area Funzionale Urbana
GIS:	Geographical Information System
GW:	groundwater, acque sotterranee
MPS:	Multiple Point Sources, Sorgenti Multiple
NGS:	next-generation sequencing
NPS:	Non-Point Sources, Sorgenti Non Puntuali
PCE:	tetracloroetilene
PCR:	polymerase chain reaction
PS:	Point Sources, Sorgenti Puntuali
qPCR:	real-time polymerase chain reaction
TCE:	tricloroetilene
VC:	cloruro di vinile

1. Scopo del documento

Il processo storico di industrializzazione e il continuo sviluppo delle aree urbane deve necessariamente confrontarsi con la presenza di ampie porzioni di territorio dove non è più possibile identificare le sorgenti di contaminazione delle acque sotterranee (principalmente solventi clorurati e idrocarburi), in quanto originatasi da molteplici fonti puntuali spesso storiche e in alcuni casi non più esistenti. Questo tipo di contaminazione, definita contaminazione diffusa, rappresenta un problema ambientale comune in molti paesi sviluppati.

Inoltre, l'inquinamento diffuso determina un impatto economico notevole sulla società, a causa dei costi necessari per la sua gestione e il suo risanamento e spesso tale inquinamento è tra gli elementi responsabili del mancato raggiungimento degli obiettivi qualitativi definiti dalla direttiva europea sulle acque sotterranee.

La contaminazione delle acque sotterranee di tipo diffuso, generata da sorgenti multiple di contaminazione (Multiple Point Sources, MPS) richiede un intervento a media scala (**Aree Funzionali Urbane - Functional Urban Areas, FUA** rif. OECD, 2012¹) ad oggi trascurata nella legislazione esistente, trovandosi a metà strada tra la normativa UE sulle fonti non puntuali e la legislazione nazionale sulle fonti puntuali.

In Italia, la gestione della contaminazione diffusa è soggetta a tre diversi livelli di legge: quello europeo, quello nazionale e quello regionale.

Da parte dell'UE, il quadro è dato dalla direttiva 2000/60/CE - Direttiva quadro sulle acque (DQA), (Agenzia europea dell'ambiente, 2013) e dalla Direttiva 2001/42/CE - Direttiva sulla valutazione ambientale strategica (VAS). Le misure di intervento per il risanamento dell'inquinamento diffuso nelle acque sotterranee contribuiscono al raggiungimento degli obiettivi di qualità per i corpi idrici sotterranei definiti dalla DQA. Inoltre, ogni piano o programma che porta a significativi effetti ambientali deve essere sottoposto alla procedura SEA.

La Direttiva è stata recepita dalla normativa nazionale e in Italia il Decreto Legislativo D.Lgs. 152/06 definisce la contaminazione diffusa antropogenica come "l'alterazione chimica, fisica e biologica delle matrici ambientali e delle contaminazioni determinate da fonti diffuse e non collegate ad una fonte puntuale". Inoltre, lo stesso Decreto Legislativo incarica le Regioni di mettere in atto le azioni necessarie per la gestione della contaminazione diffusa, definendo uno specifico valore limite di riferimento basato sui risultati di ricerche scientifiche messe a punto per gli inquinanti diffusi rilevati nelle acque sotterranee.

Altri organismi interessati e coinvolti nel processo di gestione della contaminazione diffusa delle acque sotterranee, oltre alle Regioni, sono certamente i Comuni, i gestori delle acque di approvvigionamento idrico e le autorità responsabili della protezione ambientale.

Questo documento si rivolge agli esperti dei gruppi stakeholder menzionati e fornisce gli strumenti per supportare in modo qualificato le seguenti azioni:

- valutazione dell'estensione della contaminazione diffusa nelle acque sotterranee,
- chiarimento in merito all'origine e diffusione della contaminazione,
- stima del livello di contaminazione di fondo antropogenico,

¹OECD, 2012. Redefining "Urban": A New Way to Measure Metropolitan Areas. OECD Publ., pp. 1-9
<https://doi.org/10.1787/9789264174108-en>



- quantificazione del degrado naturale o dei processi di attenuazione naturale presenti nel corpo idrico sotterraneo, che tengono conto anche di eventuali misure di risanamento aggiuntive implementate per il raggiungimento degli obiettivi di qualità delle acque sotterranee,
- condivisione di dati e informazioni a supporto del processo decisionale per l'implementazione di un piano di gestione delle acque sotterranee.

Questo documento offre agli utenti una panoramica sulle proposte tecnologiche innovative per la caratterizzazione e la gestione della contaminazione diffusa nelle acque sotterranee e consente una valutazione dei pro e dei limiti degli strumenti presentati.

La loro implementazione richiede competenze specifiche da parte degli esperti coinvolti. Il mercato dei fornitori di servizi qualificati per l'indagine e la valutazione dei risultati in questo campo è molto limitato. È quindi importante che l'utente possa specificare le azioni che intende adottare tra quelle sopra elencate così che possa poi valutare più nel dettaglio la qualità tecnica degli strumenti proposti.

2. Introduzione

Il continuo sviluppo delle aree urbane (incluse le aree edificate, le periferie e i distretti industriali) ha una relazione sempre crescente con la presenza di vaste zone le cui acque sotterranee risultano contaminate, e dove è difficile identificare le sorgenti di contaminazione.

Gli strumenti AMIIGA sono applicabili nelle **Aree Funzionali Urbane (Functional Urban Areas, FUA** rif. OECD, 2012²), tali aree comprendono il nucleo urbano e la sua zona di pendolarismo nella quale il mercato del lavoro, lo sviluppo urbano e le questioni ambientali sono altamente integrati con la città.

Prima di continuare è importante definire i diversi tipi di contaminazioni in base alla loro origine e la scala di lavoro per ciascuna di esse.

Tipi di contaminazione

In generale, la contaminazione delle acque sotterranee può avere origine da tre diversi tipi di sorgenti: a) **Sorgenti Puntuali (PS, Point Sources)**, hot spot di contaminazione che rilasciano pennacchi ad alta concentrazione; b) **Sorgenti Multiple (MPS, Multiple Point Sources)**, l'inquinamento proviene da più sorgenti puntuali che rilasciano basse concentrazioni di contaminante e di conseguenza sono difficili da identificare e sono responsabili della contaminazione diffusa delle acque sotterranee, che può essere definita anche come contaminazione antropogenica di fondo c) **Sorgenti Non Puntuali (NPS, Non-Point Sources)**, il carico di contaminanti deriva dallo sviluppo di attività antropiche su vasta area (ad esempio i pesticidi derivanti da pratiche agricole).

Scala di interesse della contaminazione

Spesso le PS si trovano all'interno di un sito contaminato che può essere un'area industriale attiva o abbandonata (vale a dire un'area dismessa). La contaminazione può riguardare solo la zona industriale o può diffondersi al di fuori dei suoi confini coinvolgendo alcuni settori della FUA (**scala locale o scala del sito contaminato**). Le MPS sono spesso raggruppate in un'area relativamente ampia (ad esempio nel distretto industriale) e la contaminazione ha un'estensione che interessa l'intera FUA (**scala media o scala FUA**). Infine, la contaminazione originata da NPS coinvolge aree molto vaste e deve essere gestita a **scala di corpo idrico**, che include la FUA ed è più grande di essa.

La rete di monitoraggio e la bonifica delle acque sotterranee devono essere pianificate per garantire gli obiettivi di qualità richiesti dalla direttiva UE 2006 sulle acque sotterranee. La mancata pianificazione delle azioni di intervento ha un forte impatto sulla società legato ai costi di gestione e bonifica ed ai conflitti legati all'uso del suolo.

Per tale ragione, il progetto AMIIGA si concentra sulle contaminazioni a scala di FUA poiché la contaminazione delle acque sotterranee generata da MPS richiede un intervento a media scala (scala FUA) trascurata nella legislazione esistente, trovandosi a metà strada tra la normativa UE sulle fonti non puntuali e la legislazione nazionale sulle fonti puntuali. Spesso il problema nelle FUA è che molte aree soggette a contaminazione diffusa non possono essere gestite con le usuali tecniche di bonifica utilizzate per i siti contaminati (PS), principalmente per due motivi: a) la difficoltà nell'identificare le sorgenti di contaminazione puntuali in ragione della bassa massa rilasciata e b) l'ampia estensione delle aree

²OECD, 2012. Redefining "Urban": A New Way to Measure Metropolitan Areas. OECD Publ., pp. 1-9
<https://doi.org/10.1787/9789264174108-en>

contaminate. Entrambi gli aspetti richiedono approcci alternativi, poiché come già detto le procedure di bonifica standard non sono efficaci ed economicamente sostenibili per la contaminazione diffusa.

Le condizioni sopra menzionate sono principalmente dovute allo sviluppo storico urbano e industriale delle aree, le fonti di contaminazione (sia PS che MPS) sono spesso molto vecchie e possono aver subito molti cambiamenti negli anni (concentrazione rilasciata, riqualificazione dell'area, parziale bonifica, eccetera).

Infine, ma non meno importante, le autorità pubbliche devono valutare il livello di contaminazione da MPS nelle FUA per introdurre limiti di soglia sostenibili per le azioni locali di bonifica delle acque sotterranee.

Il progetto AMIIGA si basa sul precedente progetto Europeo FOKS (2008-2012). L'obiettivo generale del progetto FOKS era focalizzare gli sforzi di risanamento sulle principali fonti di contaminazione nelle aree degradate.

Obiettivi specifici del progetto FOKS erano:

- l'introduzione e l'applicazione di strumenti innovativi per la gestione integrata del rischio idrico sotterraneo su aree degradate come siti contaminati e aree dismesse
- la definizione delle misure di mitigazione prioritarie sulle principali fonti di contaminazione della falda e del suolo
- l'applicazione pilota e la preparazione di studi di fattibilità per interventi di bonifica della sorgente
- il ridimensionamento dei pilastri della direttiva UE sulle acque sotterranee alla scala dei siti contaminati e delle aree dismesse.

Il progetto FOKS ha consentito di introdurre e applicare strumenti innovativi per la gestione integrale del rischio idrico sotterraneo su aree degradate, focalizzando gli interventi principalmente a scala locale. Gli strumenti introdotti, come l'approccio integrale di indagine sulle acque sotterranee, il campionamento passivo, il fingerprinting, la modellazione numerica e il backtracking, l'approccio basato sul rischio e il robusto trattamento dei dati, sono stati presentati in seminari di formazione e applicati con successo nei siti pilota FOKS.

Diversamente il progetto AMIIGA lavora ad una scala più ampia rispetto a quella del progetto FOKS, e si concentra sulle FUA, perché la contaminazione delle falde acquifere è un problema che va oltre i confini amministrativi di un'autorità pubblica locale. L'obiettivo principale di AMIIGA è rafforzare la capacità del settore pubblico nel processo di pianificazione e decisionale relativo alla gestione delle acque sotterranee nella FUA. Gli strumenti e il sistema di supporto alle decisioni (DSS) implementati nel progetto FOKS per le aree urbane dismesse sono stati ulteriormente sviluppati e potenziati in AMIIGA per adattarli alla scala delle FUA.

Pertanto, gli obiettivi specifici del progetto AMIIGA sono:

- 1) fornire alle Pubbliche Amministrazioni strumenti e procedure per la caratterizzazione della contaminazione delle acque sotterranee nelle FUA
- 2) fornire ai decisori pubblici tecnologie innovative per migliorare la qualità delle acque sotterranee nelle FUA
- 3) proporre il piano di gestione delle acque sotterranee come strumento strategico per i corpi idrici sotterranei a scala regionale.

Il presente documento vuole essere una guida pratica che in sintesi presenti gli strumenti sviluppati in AMIIGA e che, tenendo conto delle sinergie con il progetto FOKS, sia di aiuto all'utente che si trova a dover



scegliere quali tra gli strumenti proposti siano più appropriati per gestire uno specifico problema di contaminazione delle acque sotterranee. A questo scopo, l'Albero delle Decisioni (Figura 1) mostra tutti gli strumenti suddividendoli tra applicabili alla scala di FUA e alla scala del sito contaminato. Seguendo il percorso indicato e rispondendo alle domande, l'utente, sulla base delle informazioni che ha disponibili, può verificare e selezionare gli strumenti utili a migliorare, passo dopo passo, le conoscenze sullo stato di contaminazione dell'area di interesse, informazioni necessarie per predisporre un adeguato Piano di Gestione delle acque sotterranee.

Sia alla scala di FUA che alla scala di sito contaminato (rispettivamente a scala media e locale) il primo passo è la raccolta dei dati, che comprende tutte le attività necessarie per sistematizzare le informazioni disponibili utili per valutare lo stato di contaminazione (ad esempio, caratteristiche delle reti di monitoraggio, risultati delle campagne di monitoraggio, caratteristiche della falda, dati storici relativi a siti contaminati ed ex attività produttive, ecc.).

Nell'ambito del progetto FOKS, lo strumento "agnostico" matematico era indicato come un metodo efficiente per migliorare l'analisi dei dati a scala di sito contaminato. In AMIIGA, a scala FUA, i dati provengono da reti private, municipali e regionali e il **dataset** dei valori di concentrazione è molto **ampio e complesso** da analizzare. I dati raccolti in molti anni di campagne di monitoraggio hanno un ruolo chiave per lo studio dei plume e per l'identificazione della sorgente. Per questo motivo, la statistica ordinaria di analisi dei dati è stata aggiunta allo strumento proposto dal FOKS per studiare più nel dettaglio il grande set di dati disponibile per la FUA: l'**analisi esplorativa dei dati** può essere applicata per impostare la struttura del database, rilevare valori anomali, errori e valori mancanti e distinguere tra punti di monitoraggio interessati da una contaminazione di tipo puntuale (PS) o provocata da multiple sorgenti (MPS) (vedi D.T1.1.2).

A supporto dell'implementazione del modello concettuale delle acque sotterranee, AMIIGA introduce l'analisi **biologico molecolare** (*Biological Molecular Tool, BMT*) (vedi D.T1.3.4) per valutare la capacità dei gruppi microbici naturali (cioè indigeni) di degradare determinati contaminanti in situ. Inoltre, la BMT fornisce prove sull'avanzamento della degradazione biologica assistita o describe, nelle diverse fasi di bonifica di particolari tecniche, l'impatto sui microrganismi indigeni.

Inoltre, per conoscere meglio le **relazioni sorgente-plume** e per migliorare la comprensione del **modello concettuale di trasporto** degli inquinanti, AMIIGA aggiunge i seguenti strumenti:

Analisi isotopica del composto specifico (*Compound Specific Isotope Analysis, CSIA*) (vedi D.T1.2.4), per distinguere tra le diverse fonti di contaminazione, rappresenta un valido approccio per individuare il responsabile della contaminazione di origine puntuale (PS) a scala locale e media e/o per appurare la presenza di processi di degradazione, dimostrandosi di grande interesse ai fini della bonifica;

Modello di trasporto inverso (vedi D.T1.1.3), per delimitare spazialmente il confine dei plume, per separare la contaminazione delle acque sotterranee di tipo PS e MPS, per identificare l'area dalla quale con buone probabilità proviene la contaminazione di tipo diffuso (MPS), è di supporto alle decisioni nei piani di gestione delle acque sotterranee.

Ultimi ma non meno importanti, l'**analisi multivariata** e **geostatistica** e il **WebGIS** sono gli strumenti AMIIGA che nel processo di supporto alle decisioni sono utili per la selezione delle misure di intervento e la compilazione del piano di gestione delle acque sotterranee (per maggiori dettagli sul piano di gestione vedi D.T3.3.7). L'**analisi multivariata** e **geostatistica** consentono di definire le aree FUA interessate dalla contaminazione da MPS e di stimare i valori di concentrazione di fondo della contaminazione diffusa su vaste aree (vedi D.T1.1.2). Il **WebGIS** rappresenta un approccio innovativo per condividere dati e informazioni tra gli uffici istituzionali e quelli tecnici, per migliorare la comunicazione interna ed esterna, per supportare e facilitare le decisioni, per migliorare l'analisi dei dati e l'interpretazione del modello concettuale (vedi D.T1.1.1).

In questo documento, l'analisi dei punti di forza, debolezza, opportunità e minacce (analisi SWOT) degli strumenti AMIIGA consentono di capire il valore aggiunto fornito dalla possibilità di sistematizzare ed elaborare i dati, determinare l'entità della contaminazione delle acque sotterranee, chiarire l'origine della contaminazione (relazioni tra sorgente e plume), migliorare il modello concettuale, valutare il livello di contaminazione di fondo antropogenico e i processi naturali di attenuazione, pianificare e selezionare le misure e azioni di intervento.

Le domande chiave generali che guidano la selezione degli strumenti AMIIGA sono:

- ❖ È disponibile un ampio set di dati a scala di FUA? L'**analisi esplorativa dei dati** può migliorare l'analisi dei dati di contaminazione delle acque sotterranee nella FUA, ripulendo il dataset da eventuali errori e distinguendo tra punti di monitoraggio interessati da un inquinamento di tipo PS o MPS.
- ❖ Sono necessari dati aggiuntivi per la caratterizzazione delle acque sotterranee? La **BMT** può migliorare l'**implementazione del modello concettuale**, in quanto in grado di valutare la capacità dei gruppi microbici naturali di degradare determinati contaminanti in situ.
- ❖ Ci sono ancora sorgenti di contaminazione sconosciute? La **CSIA** e il **modello inverso di trasporto** possono chiarire le **relazioni tra sorgente e plume** e migliorare la comprensione del **modello concettuale di trasporto dei contaminanti**.
- ❖ È richiesto un processo di supporto alle decisioni? L'**analisi multivariata** e **geostatistica** e il **WebGIS** possono supportare il processo decisionale per la **selezione delle misure di intervento** e la **compilazione del piano di gestione delle acque sotterranee**.

ALBERO DELLE DECISIONI PER GLI STRUMENTI AMIIGA

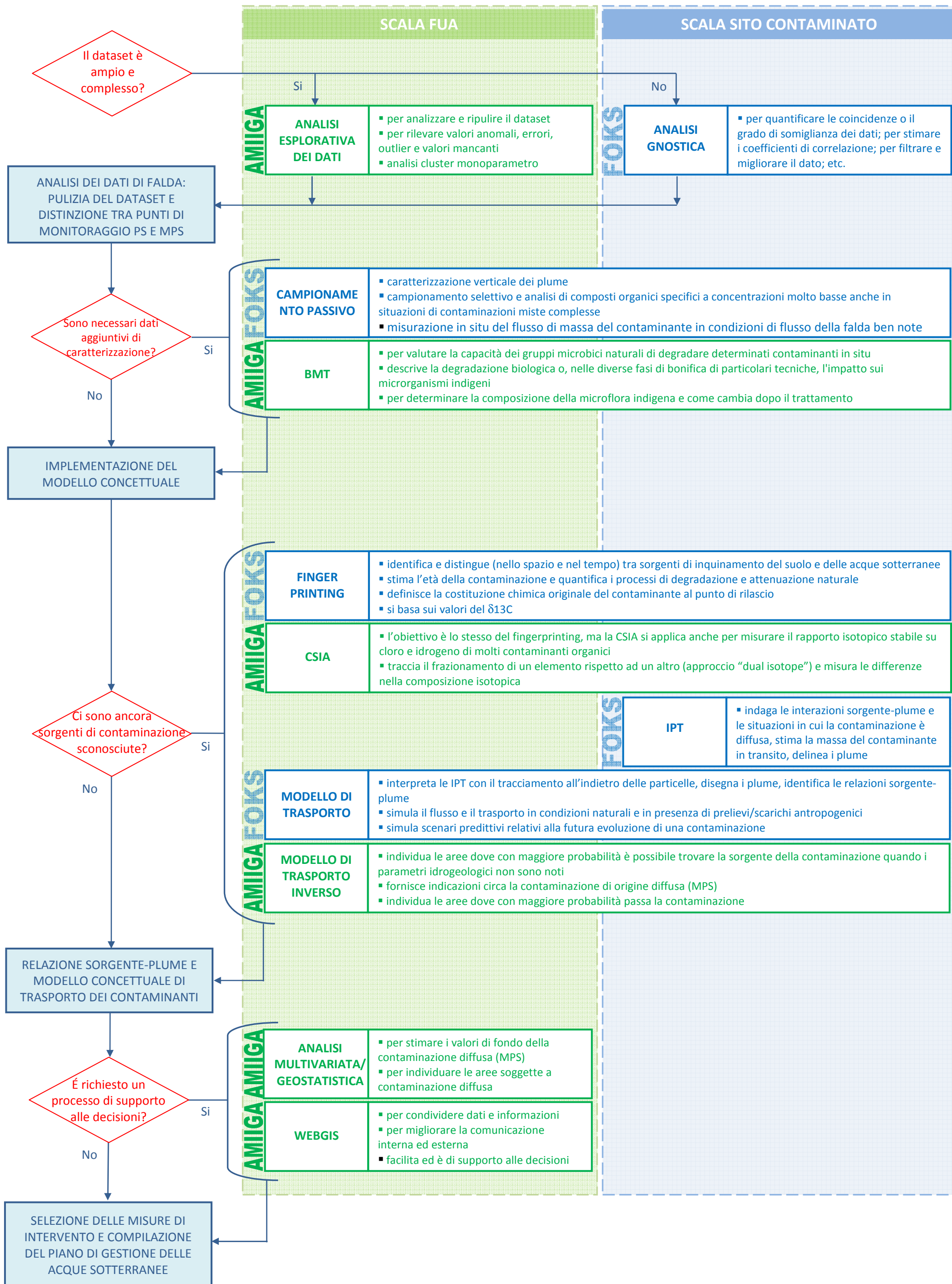


Figure 1: Albero delle decisioni per gli strumenti AMIIGA



3. Gli strumenti AMIIGA per le acque sotterranee

In questo capitolo, sono state utilizzate le domande guida riportate nella tabella qui sotto per l'analisi dei punti di forza (Strengths), debolezza (Weaknesses), opportunità (Opportunities) e minacce (Threats) (analisi SWOT) degli strumenti AMIIGA. Inoltre, per ciascuno strumento, è stata descritta a titolo di esempio l'applicazione in una delle aree pilota del progetto AMIIGA per aiutare il lettore a comprenderne l'applicabilità.

<i>PUNTI DI FORZA</i>	<p>Quali sono i punti di forza e i vantaggi di questo strumento o di questo strumento in combinazione con altri per raggiungere gli obiettivi selezionati?</p> <p>Che tipo di dati fornisce per ciascuno degli obiettivi?</p> <p>Per il raggiungimento di quale obiettivo è più efficace? Perché?</p> <p>Altri punti di forza?</p>
<i>PUNTI DI DEBOLEZZA</i>	<p>Quali sono i punti deboli e gli svantaggi dello strumento?</p> <p>Quali sono i punti deboli rispetto agli obiettivi selezionati?</p> <p>Quali aspetti non sono inclusi?</p> <p>Per quale tipo di obiettivo lo strumento è meno adatto? Perché?</p> <p>Altri punti di debolezza?</p>
<i>OPPORTUNITÀ</i>	<p>Quali altri vantaggi può avere l'utente dall'applicazione dello strumento?</p> <p>Esiste qualche possibilità di migliorare l'efficacia dello strumento?</p>
<i>MINACCE</i>	<p>Quali minacce potrebbero esserci nell'utilizzo di buona pratica di questo strumento per l'obiettivo selezionato?</p> <p>Potrebbero esserci problemi di efficacia?</p> <p>Potrebbero esserci problemi di accettazione?</p>



ANALISI ESPLORATIVA DEI DATI (D.T1.1.2)

Descrizione: L'analisi esplorativa dei dati comprende i metodi di analisi statistica (pulizia dei dati, analisi del valore mancante, analisi descrittiva, analisi cluster monoparametro) utilizzati alla scala FUA per analizzare dataset relativi alle acque sotterranee di grandi dimensioni (dal punto di vista temporale e spaziale) e multiparametrici (ad esempio dati di monitoraggio dei valori di concentrazione di diversi contaminanti). L'analisi coinvolge tutte le attività necessarie per rilevare i valori anomali, gli errori e i valori mancanti, per identificare gli hot spot di contaminazione e separare i punti di monitoraggio con una contaminazione di origine puntuale (PS) da quelli di origine diffusa (MPS).

Applicabilità: dataset di grandi dimensioni a scala FUA, relativi ad esempio ai valori di concentrazione dei contaminanti o al livello piezometrico della falda, raccolti da reti diverse (private, municipali e regionali).

Combinazione con altri strumenti: l'analisi dei cluster monoparametro è in grado di distinguere tra pozzi di monitoraggio hot spot (PS) e quelli soggetti a contaminazione diffusa (MPS); il modello di trasporto deterministico e inverso forniscono informazioni sulla distribuzione del pennacchio nell'area. Combinate insieme queste informazioni possono migliorare la comprensione del modello concettuale di trasporto dei contaminanti e della distribuzione spaziale della contaminazione diffusa, così da essere di supporto nel processo decisionale per la gestione delle acque sotterranee per quanto riguarda, ad esempio, la selezione della rete di monitoraggio.

OBIETTIVI	Analisi dei dati di falda: pulizia del dataset e distinzione tra piezometri PS/MPS	X
	Implementazione del modello concettuale	
	Relazioni sorgente/plume e modello concettuale di trasporto dei contaminanti	
	Misure di risanamento e stesura del Piano di Gestione delle acque sotterranee	X
PUNTI DI FORZA	<p>L'analisi esplorativa dei dati funziona a scala di FUA, analizza dataset ampi e complessi e contenenti dati raccolti nell'arco di molti anni.</p> <p>I metodi di esplorazione dei dati rilevano valori anomali, errori e valori mancanti contenuti in dataset di grandi dimensioni.</p> <p>L'analisi cluster monoparametro raggruppa le osservazioni in cluster e ciascun cluster è diverso dall'altro.</p> <p>Identifica gli hot spot e consente di distinguere tra punti di monitoraggio con una contaminazione di tipo puntuale (PS) da quelli interessati da una contaminazione di tipo diffuso collegata a più sorgenti puntuali (MPS).</p>	
PUNTI DI DEBOLEZZA	<p>Prima dell'applicazione dei metodi statistici di analisi, è necessaria una non sempre semplice raccolta dei dati e la preparazione del dataset. Questa fase richiede grandi sforzi sia per la mancanza di omogeneità dei dati raccolti dalle diverse istituzioni, sia per la necessità di coinvolgere le istituzioni stesse per fornire le informazioni in modo appropriato.</p> <p>Diversi metodi di pulizia del dataset (rilevamento degli errori, controlli di coerenza e trattamento dei dati mancanti) possono dare risultati diversi e pertanto è necessario prestare la massima attenzione durante questa fase di elaborazione dei dati.</p> <p>La pulizia del dataset dovrebbe essere mantenuta al minimo, se possibile.</p> <p>I valori mancanti (ad esempio quando in un pozzo non è disponibile il valore di concentrazione per uno dei parametri considerati) possono influenzare fortemente i risultati di determinate tecniche di analisi del dataset. Se i valori mancanti sono</p>	

	superiori al 30%, generalmente può rappresentare un problema e deve essere presa una decisione riguardo a come trattare i valori mancanti.
OPPORTUNITÀ	Lo strumento può mettere in evidenza le lacune della rete di monitoraggio delle acque sotterranee e può identificare nuove aree come potenziali sorgenti della contaminazione. Questo strumento può essere utilizzato dalle pubbliche amministrazioni per la selezione delle reti di monitoraggio e del set analitico, al fine di migliorare la robustezza dei risultati e ottimizzare l'efficienza e l'efficacia delle misure.
MINACCE	I risultati devono essere coerenti con il modello concettuale (struttura idrogeologica, flusso delle acque sotterranee, trasporto degli inquinanti). Il rischio è che i metodi statistici vengano applicati senza considerare le caratteristiche costruttive dei punti di monitoraggio.

ESEMPIO DI APPLICAZIONE NEL PROGETTO AMIIGA

Area pilota di Milano (IT)

L'analisi esplorativa dei dati è stata applicata nella FUA di Milano, considerando i due principali acquiferi (falda superficiale e profonda). Il dataset, contenente i valori di concentrazione degli inquinanti ricercati, era composto da una rete di monitoraggio di circa 2.000 punti.

L'analisi dei cluster, applicata a più di 45.000 valori di concentrazione di PCE registrati nelle acque sotterranee, ha evidenziato i valori anomali, ha identificato i pozzi di monitoraggio hot spot, soggetti ad una contaminazione di tipo puntuale (PS), e quelli interessati da una contaminazione di tipo diffuso (MPS). Un modello numerico di trasporto è stato implementato grazie agli hot spot identificati (PS) e tenendo conto dei punti di monitoraggio identificati come MPS.

Inoltre, i risultati hanno supportato il processo decisionale per la gestione delle acque sotterranee, in particolare per evidenziare le carenze nella rete di monitoraggio e per identificare le aree in cui sono necessari nuovi punti di monitoraggio.

BMT - *Biological Molecular Tool* - analisi biologico molecolare (D.T1.3.4)

Descrizione: BMT è un'analisi bio-molecolare utilizzata per la caratterizzazione di colonie batteriche autoctone attraverso avanzate metodologie di studio genetico (real-time PCR e sequenziamento generazionale). Specifici ceppi batterici o enzimatici possono essere analizzati attraverso PCR in tempo reale, mentre famiglie batteriche complesse possono essere descritte con NGS. Le analisi BMT si prefiggono di verificare la presenza, e di stimare la concentrazione delle specie o delle famiglie batteriche, in grado di metabolizzare particolari contaminanti presenti nell'acquifero. Inoltre, attraverso la BMT, è possibile identificare specifici processi biodegradativi e, successivamente, collegarli ai prodotti di biodegradazione. Quando la biodegradazione è scelta come metodo di bonifica in sito, l'utilizzo della metodica BMT diventa necessaria per caratterizzare sia la potenziale capacità dei batteri indigeni di metabolizzare i contaminanti presenti, sia per individuare specifici ceppi batterici o enzimi.

Applicabilità: la BMT si applica per l'analisi dei processi di biodegradazione in atto nelle falde e nei suoli contaminati. In funzione della presenza e abbondanza di definiti markers biologici, la BMT può contribuire all'individuazione degli interventi più efficaci per il trattamento del plume di contaminazione. Per esempio, se la concentrazione di specie batteriche biodegradatrici è troppo bassa, essa può essere incrementata aggiungendo un substrato adatto; ancora, gruppi definiti di microrganismi biodegradatori possono essere iniettati in ambienti con limitate capacità di attenuazione naturale (NA). Negli acquiferi contaminati, risulta inoltre fattibile l'analisi di consorzi batterici identificati quali vettori di biomassa.

Combinazione con altri strumenti: l'analisi BMT insieme alle analisi chimiche, alla CSIA, ai parametri fisici e alle informazioni geologiche è un valido strumento per la valutazione dell'attenuazione naturale e/o delle attività di biorimediazione potenziate in aree contaminate.

OBIETTIVI	Analisi dei dati di falda: pulizia del dataset e distinzione tra piezometri PS/MPS	
	Implementazione del modello concettuale	X
	Relazioni sorgente/plume e modello concettuale di trasporto dei contaminanti	
	Misure di risanamento e stesura del Piano di Gestione delle acque sotterranee	X
PUNTI DI FORZA	<p>BMT include accurate analisi di un vasto spettro di specie batteriche o enzimi in situazioni ambientali complesse. In combinazione con altri strumenti (CSIA, analisi chimiche), BMT fornisce un efficace strumento per la descrizione di siti contaminati e per la valutazione delle relative attività biologiche.</p> <p>Al fine della caratterizzazione della falda, lo strumento in oggetto fornisce i valori relative della presenza e concentrazione delle specie batteriche. Diventa, quindi, possibile definire la capacità metabolica della microflora in sito e, soprattutto, quantificare il potenziale di degradazione dei contaminanti in ambiente anaerobico/aerobico.</p> <p>Infine, ma di non minore importanza, è possibile definire se le matrici sotterranee presentano condizioni favorevoli alla biodegradazione (per esempio, presenza di batteri solfo-riduttori e denitrificanti).</p> <p>L'analisi gPCR è mirata, veloce e a costo relativamente basso, mentre lo strumento NGS offre una più complessa definizione della comunità microbiologica in sito. Pertanto, la combinazione delle due metodologie consente la miglior diagnosi dell'area di studio.</p>	
PUNTI DI	La debolezza principale dell'analisi BMT riguarda la difficoltà nell'estrazione delle	

DEBOLEZZA	<p>necessarie informazioni genetiche del DNA. Alcuni campioni possono contenere elevate concentrazioni di composti chimici interferenti con l'isolamento del DNA. Ciò può influenzare la raccolta e la qualità del DNA e, di conseguenza, dei risultati delle analisi. E' perciò possibile solamente quantificare i livelli relativi dei markers (geni specifici) nei campionamenti e valutare l'influenza degli interventi di bonifica sulla presenza di batteri autoctoni. Una conoscenza esperta delle condizioni locali (CSIA e analisi chimiche) è necessaria per l'interpretazione dei risultati.</p> <p>I markers qPCR non sono ancora stati sviluppati per la biodegradazione di tutti i possibili agenti inquinanti ambientali: esistono numerosi batteri o enzimi tuttora sconosciuti, che potrebbero essere importanti per i processi di biodegradazione.</p> <p>Un'accurata elaborazione dei dati NGS è correlata ad un attento intervento di esperti in bioinformatica: ciò potrebbe costituire un problema a causa della generale carenza di tali esperti.</p>
OPPORTUNITÀ	<p>I risultati delle analisi BMT ci forniscono una migliore conoscenza delle attività microbiche nei siti contaminati. I dati ottenuti possono sia illustrare il potenziale biodegradativo di un sito in bonifica, sia valutare l'applicabilità degli interventi individuati e della relativa quantità dei trattamenti chimici da eseguire. Inoltre, non è da escludere di poter estendere lo spettro di markers specifici grazie al rapido progresso delle conoscenze sul metabolismo batterico.</p> <p>L'efficiacia delle analisi BMT può essere potenziata grazie alla combinazione con altre metodologie di indagine (CSIA, analisi chimico-fisiche, conoscenze geologiche).</p>
MINACCE	<p>La criticità maggiore consiste nella scarsa qualità del DNA dei campioni e nel basso livello dei markers testati: entrambi influenzano significativamente i risultati BMT e, di conseguenza, devono essere interpretati con estrema attenzione.</p>

ESEMPIO DI APPLICAZIONE NEL PROGETTO AMIIGA

Area pilota di Parma (IT)

Le analisi BMT sono state utilizzate nella FUA di Parma, dove la contaminazione della falda (BTEX, CEs) fu causata da attività improprie in una stazione di rifornimento carburanti. Sono state eseguite due campagne di monitoraggio, rispettivamente a Dicembre 2017 e a Maggio 2018.

Durante le attività di monitoraggio, sono stati misurati anche i parametri fisici (per es. pH, potenziale ossido-riduttivo e condicibilità).

Le analisi BMT mostrano un trend di incremento della biomassa batterica totale nel 2° campionamento (scala di 3 ordini di grandezza), che può essere spiegato con l'aumento stagionale del livello di falda. Si è evidenziata la presenza di batteri denitrificanti (nirK gene) e solfato-riduttori (dsrA gene), che confermano la presenza di un ambiente riducente. I bassi livelli di BTEX degradatori a metabolismo anaerobico (bssA gene), associati a moderati livelli a metabolismo aerobico riscontrati in entrambe le campagne di monitoraggio, confermano la presenza di processi di degradazione di BTEX ancora attivi.

Non è stata riscontrata (sia a livello di enzimi che di batteri) la presenza di batteri che respingono l'organohalide (bvcA, vcrA genes, *Dehalococcoides* sp., *Desulfotobacterium* sp., *Dehalobacter* sp.). A causa della bassa concentrazione di CEs, si è riscontrata solo una debole attività di respirazione alogenuro-alcalica, ma non la presenza di cloruro di vinile reductasi. Non sono stati riscontrati fenomeni di dealogenazione riduttiva, quindi possiamo ipotizzare che si sia verificato attraverso percorsi aerobici e cometaboli che non possono essere rilevati usando i nostri primer.

La tabella sotto riporta i risultati ottenuti nei sei piezometri nelle due campagne di monitoraggio eseguite (Dicembre 2017 - a sinistra, Maggio 2018 - a destra) e l'individuazione degli specifici processi degradativi: la biomassa batterica totale (U16SRT), gli enzimi del cloruro di vinile (bvcA, vcrA),



Dehalococcoides sp. (DHC-RT), *Desulfitobacterium* sp. (Dsb), *Dehalobacter* sp. (Dre), i batteri solfo-riduttori (dsrA), i batteri denitrificanti (nirK), i degradatori HCH (linA) e BTEX (DEF/G, bssA).

Primer	PM3	PM5	PZ3	PZ4	PZ5	PZ8	Primer	PM3	PM5	PZ3	PZ4	PZ5	PZ8
U16SRT							U16SRT						
<u>bvcA</u>							<u>bvcA</u>						
<u>vcrA</u>							<u>vcrA</u>						
DHC-RT							DHC-RT						
<u>Dsb</u>							<u>Dsb</u>						
Dre							Dre						
dsrA2							dsrA2						
<u>nirK</u>							<u>nirK</u>						
<u>linA</u>							<u>linA</u>						
DEF/G							DEF/G						
<u>bssA</u>							<u>bssA</u>						

Il valore aggiunto delle analisi BMT nell'esempio riportato, consiste in una migliore visione d'insieme del sito. Tale metodologia è stata adottata come monitoraggio aggiuntivo ad ausilio delle usuali analisi chimiche e CSIA, al fine di giungere alla comprensione dei processi biologici del sito. Gli esiti delle analisi in oggetto hanno indicato i possibili, prossimi interventi di bonifica per il sito pilota di Parma. È stato infatti suggerita l'applicazione di un substrato per l'aumento della comunità microbica.



CSIA - Compound Specific Isotope Analysis (D.T1.2.4)

Descrizione: è possibile applicare con successo la CSIA per distinguere tra sorgenti contaminanti e migliorare la conoscenza dei rapporti tra pennacchio, plume e sorgente. Pertanto rappresenta un valido approccio nell'identificazione del sito contaminato responsabile dell'inquinamento in una determinata area target (a scala FUA o del sito contaminato). Di conseguenza, grazie ai risultati CSIA è possibile migliorare il modello concettuale del trasporto dei contaminanti e aiutare a distinguere i pennacchi di origine puntuale (PS) dalla contaminazione di tipo diffuso (MPS). Inoltre, la CSIA consente di determinare se sono attivi processi di attenuazione naturale in grado di degradare i contaminanti, il che è di grande interesse ai fini della bonifica.

Applicabilità: oggi con la CSIA è possibile misurare il rapporto isotopico stabile di carbonio, cloro e idrogeno di molti contaminanti organici. È richiesto un valore di concentrazione minimo del contaminante intorno a 5/100 µg/l in base agli strumenti di laboratorio, agli isotopi selezionati e ai composti analizzati.

Combinazione con altri strumenti: la CSIA può essere applicata in combinazione con altri strumenti quali la BMT, in particolare per il monitoraggio dei processi di attenuazione naturale (MNA) e per la progettazione e il monitoraggio di interventi di bonifica di tipo biologico potenziati. In questo modo supporta il processo decisionale per la gestione delle acque sotterranee per quanto riguarda, ad esempio, la selezione delle azioni di bonifica da adottare a livello di FUA o a scala di siti contaminati.

OBIETTIVI	Analisi dei dati di falda: pulizia del dataset e distinzione tra piezometri PS/MPS	
	Implementazione del modello concettuale	
	Relazioni sorgente/plume e modello concettuale di trasporto dei contaminanti	X
	Misure di risanamento e stesura del Piano di Gestione delle acque sotterranee	X
PUNTI DI FORZA	<p>I cambiamenti nel rapporto tra isotopi stabili (frazionamento degli isotopi) possono dimostrare in modo inequivocabile la presenza di degradazione dei contaminanti nelle acque sotterranee e possono fornire informazioni per quantificare la biodegradazione.</p> <p>L'utilizzo degli isotopi consente di comprendere meglio il comportamento dei contaminanti nelle acque sotterranee, nonché l'importanza delle trasformazioni fisiche (cioè la diluizione o il processo abiotico) e biologiche.</p> <p>La CSIA quantifica la composizione isotopica di uno specifico contaminante e quindi fornisce mezzi aggiuntivi e spesso unici per allocare e distinguere le sorgenti dei composti organici. Inoltre, la CSIA aiuta a identificare le reazioni di trasformazione e a quantificare la percentuale di massa contaminante degradata consentendo di prevedere l'evoluzione futura della contaminazione.</p>	
PUNTI DI DEBOLEZZA	<p>La procedura di campionamento e la conservazione del CSIA devono seguire le migliori pratiche al fine di prevenire la biodegradazione o la trasformazione abiotica dei contaminanti. Altrimenti, i risultati possono essere compromessi.</p> <p>In base agli strumenti di laboratorio, agli isotopi selezionati e ai composti da analizzare, è richiesto un valore di concentrazione minimo del contaminante intorno a 5/100 µg/l.</p> <p>L'incertezza analitica della CSIA può rappresentare un problema, poiché esiste una significativa variabilità a seconda dei protocolli interni e dei metodi analitici applicati nei laboratori. È responsabilità dell'utente determinare se l'incertezza sia accettabile o meno per la propria applicazione specifica. Al fine di rendere questo</p>	

	<p>strumento più efficiente e i risultati comparabili tra i diversi laboratori, dovrebbero essere sviluppati protocolli analitici europei.</p> <p>Diverse limitazioni rendono difficile la valutazione della biodegradazione tramite le analisi CSIA, come ad esempio le incertezze legate alla presenza di più sorgenti, siti contaminati complessi, ma anche effetti minori quali assorbimento / desorbimento.</p> <p>Un altro limite importante è rappresentata dalla corretta misurazione della firma isotopica della sorgente, in quanto le sorgenti di solito sono state rimosse o potrebbero non essere state ancora identificate.</p>
OPPORTUNITÀ	<p>Usando regolarmente la CSIA per i siti contaminati e la caratterizzazione delle FUA, saranno disponibili più dati che consentiranno una valutazione più attendibile dei processi di attenuazione naturale e/o dei progressi degli interventi di bonifica. Inoltre, sarebbe possibile confermare o migliorare il modello concettuale della contaminazione rafforzando le previsioni sull'evoluzione nel tempo della contaminazione.</p>
MINACCE	<p>È buona prassi spurgare il pozzo prima del campionamento. Se il pozzetto non è ben spurgato prima del campionamento, allora l'acqua di falda potrebbe non essere rappresentativa e porterebbe ad un'interpretazione errata dei risultati analitici.</p> <p>Si raccomanda di ridurre al minimo la perdita dei contaminanti volatili, limitando l'esposizione del campione all'ossigeno presente nell'atmosfera. Come noto, l'ossigeno può facilmente portare alla degradazione aerobica dei composti organici disciolti. Si consiglia inoltre di stabilizzare il campione aggiungendo un battericida per evitare qualsiasi degradazione durante la conservazione del campione.</p> <p>Nelle strategie di campionamento, è assolutamente necessario avere una completa e appropriata comprensione del modello concettuale idrogeologico e della rete di monitoraggio. Ciò è fondamentale per: scegliere correttamente i punti in cui prelevare i campioni e conoscere correttamente la profondità di prelievo del campione. Spesso l'uso di pozzi di monitoraggio aventi tratti filtrati o profondità diverse può determinare un'interpretazione errata dei risultati della CSIA, mescolando informazioni provenienti da diverse unità geologiche</p>

ESEMPIO DI APPLICAZIONE NEL PROGETTO AMIIGA

Area pilota di Milano (IT)

La CSIA è stata applicata all'area pilota di Milano (IT) con l'obiettivo di differenziare meglio i confini dei pennacchi rispetto all'inquinamento diffuso. Le diverse composizioni isotopiche stabili del PCE (sia per il carbonio [^{13}C] che per il cloro e / o [^{37}Cl]) sono state utilizzate principalmente per distinguere se una contaminazione facesse parte di uno specifico pennacchio o rappresentasse la contaminazione di fondo diffusa. I dati della CSIA sono stati usati per elaborare modelli concettuali più precisi riguardo a diverse aree all'interno dell'area pilota, aiutando a localizzare, quando possibile, le aree di origine o il potenziale responsabile delle contaminazioni.

Un obiettivo secondario era quello di valutare i processi di biodegradazione e più in generale l'attenuazione naturale dei principali contaminanti come ad esempio il PCE. La composizione isotopica di TCE e cis-DCE è stata utilizzata per ottenere informazioni sui percorsi di degradazione e sull'estensione del PCE e per capire quanto il TCE fosse un prodotto di degradazione o un contaminante primario in determinati punti.

MODELLO DI TRASPORTO INVERSO (D.T1.1.3)

Descrizione: il modello di trasporto inverso può essere applicato per valutare le incertezze legate ai parametri dell'acquifero che influenzano la simulazione del trasporto dei contaminanti in falda. Considerando una differente distribuzione di tali parametri (per esempio conducibilità idraulica, porosità, etc.), è possibile determinare i campi più probabili (scarti tra osservazioni e valori simulati accettabili) e, di conseguenza, le più probabili linee di flusso di moto dei contaminanti. La modellazione inversa può essere utilizzata: immettendo particelle di contaminante alla sorgente (se nota) e facendole fluire (a valle idrogeologico) lungo le linee di flusso più probabili (tracciamento in avanti); oppure immettendo particelle nei piezometri contaminati e facendole fluire (a monte idrogeologico) risalendo la linea di flusso della falda (tracciamento all'indietro) per individuare le aree dove è probabile sia ubicata la sorgente (se sconosciuta). La modellazione inversa consente di migliorare le conoscenze sulle relazioni tra sorgente e plume di contaminazione e di meglio valutare le criticità del modello concettuale di trasporto. Infine, rappresenta un valido strumento in grado di supportare le attività di monitoraggio, di caratterizzazione e di gestione della contaminazione in falda.

Applicabilità: la modellazione inversa sviluppata in AMIIGA dovrebbe essere applicata in area di medie dimensioni (FUA), nelle quali più sorgenti possono essere responsabili della contaminazione osservata nella falda. La tecnica della modellazione inversa può essere applicata per la localizzazione sia di piezometri responsabili di una contaminazione puntuale (hot-spot, PSt) che della contaminazione diffusa (sorgenti multiple, MPS). Nel progetto AMIIGA è applicata per l'individuazione delle più probabili aree/sorgenti di contaminazione poste a monte dei punti di monitoraggio (MPS), oppure per delimitare il percorso dei contaminanti trasportati per advezione a valle delle possibili sorgenti (hot-spot). In AMIIGA sono stati applicati i codici numerici MODFLOW per il modello di flusso, MODPATH per il tracciamento delle particelle e PEST per la generazione del campo di K per il modello inverso, MT3DMS per il modello di advezione-dispersione. Nonostante ciò, la metodologia può essere applicata con qualsiasi codice numerico per il flusso di falda e la modellazione del trasporto. Un modello di flusso calibrato (deterministico) è necessario per l'applicazione dello strumento.

Combinazione con altri strumenti: se applicato in combinazione con gli strumenti statistici, aumenta le possibilità di individuare le sorgenti di contaminazione. Inoltre, in combinazione con un modello di trasporto (advezione + dispersione), affina le capacità di valutare sia le sorgenti sospette sia l'estensione del plume in termini probabilistici, che significa valutare la probabilità che un plume abbia una determinata estensione.

OBIETTIVI	Analisi dei dati di falda: pulizia del dataset e distinzione tra piezometri PS/MPS	
	Implementazione del modello concettuale	
	Relazioni sorgente/plume e modello concettuale di trasporto dei contaminanti	X
	Misure di risanamento e stesura del Piano di Gestione delle acque sotterranee	X
PUNTI DI FORZA	<p>La presenza di sorgenti multiple (MPS), causa di contaminazione diffusa della falda nella FUA, può essere controllata attraverso una gestione e interventi di bonifica non convenzionali. Le MPS sono, per definizione, sorgenti non conosciute e i modelli classici di trasporto non sono in grado di rappresentare la contaminazione diffusa causata da tali sorgenti. Diversamente, la modellazione inversa di trasporto è in grado di simulare tale tipo di contaminazione. Per tale ragione è uno strumento essenziale per valutare e prevedere lo sviluppo della contaminazione e per pianificare una sua gestione efficace.</p> <p>La modellazione inversa di trasporto può essere applicata per l'individuazione di sorgenti puntuali (hot-spot, PS) maggiormente sospettate di essere responsabili della contaminazione e per determinare, con un tracciamento all'indietro delle particelle,</p>	

	le aree più probabili di provenienza della contaminazione. Non esistono limitazioni per le sostanze presenti nelle acque di falda.
PUNTI DI DEBOLEZZA	<p>Al fine di esplorare attentamente le incertezze correlate alle caratteristiche idrogeologiche, sarebbe opportuno considerare un più elevato numero di parametri per ogni modello inverso. Purtroppo, allo stato attuale, i parametri dovrebbero oscillare fra 1 e 4, al fine di evitare instabilità nel modello o risultati non calibrati. In futuro, ci si aspetta che le potenzialità di modellazione inversa aumentino parallelamente alla potenza dei computer.</p> <p>La mole di dati prodotti è spesso enorme (per esempio numero di particelle che scorrono attraverso una cella, in differenti starti per ogni simulazione) e richiedono un'analisi non agevole in ambiente GIS (per esempio per l'analisi della frequenza e probabilità spaziali è preferibile un software ad hoc).</p> <p>Ad oggi, solo pochi modellisti posseggono la necessaria esperienza per implementare i modelli inversi.</p>
OPPORTUNITÀ	L'analisi predittiva delle incertezze aiuterà le Autorità Pubbliche ad ottimizzare i fondi pubblici necessari per caratterizzare le probabili aree responsabili della contaminazione diffusa. Inoltre, i risultati del modello di trasporto inverso mettono in evidenza le aree delle FUA in cui è necessario integrare la rete di monitoraggio, al fine di monitorare meglio l'evoluzione della contaminazione diffusa. Infine, l'emungimento per pubblico utilizzo può essere migliorato se si tiene conto della presenza, a monte idrogeologico, di sorgenti multiple di contaminazione (MPS).
MINACCE	I risultati devono essere analizzati attentamente ed essere in accordo con il modello concettuale (caratteristiche idrogeologiche, flusso della falda, evoluzione della contaminazione e trasporto). La criticità consiste nel fatto che i risultati del modello inverso dipendono dalla calibratura numerica/deterministica del modello, che è la base per la sua applicazione (per esempio condizione iniziale per l'iterazione inversa).

ESEMPIO DI APPLICAZIONE NEL PROGETTO AMIIGA

Area pilota di Milano (IT)

Il modello di trasporto inverso è stato applicato in un settore della FUA di Milano al fine di identificare le aree con la probabilità più elevata di contenere potenziali sorgenti multiple di contaminazione. Iniziando da un modello calibrato (deterministico) è stato necessario generare 400 differenti distribuzioni dei valori di conducibilità idraulica. Fra queste distribuzioni, 11 sono state escluse in quanto non hanno soddisfatto gli obiettivi di calibrazione, poichè adottando questi k-valori il modello non era in grado di rappresentare correttamente la piezometria.

I rimanenti 389 modelli calibrati hanno presentato differenze trascurabili nei valori di K e sono stati in grado di rappresentare correttamente la piezometria: sono quindi stati considerati ugualmente probabili. Quindi, ognuno è stato utilizzato per tracciare le particelle a monte idrogeologico partendo dai piezometri di monitoraggio riconosciuti, grazie all'analisi esplorativa dei dati, come contaminati da un inquinamento diffuso.

Nel caso in oggetto, fra quei piezometri che mostravano una contaminazione diffusa, solamente i punti che presentavano una media dei valori di PCE superiore a 10 µg/l sono stati selezionati per la fase di simulazione a monte idrogeologica (per la normative italiana, il valore limite per le acque destinate al consumo umano è 10 µg/l). Poichè l'analisi delle particelle a monte idrogeologico è influenzata dalla profondità iniziale delle stesse, l'attribuzione della loro ubicazione iniziale si è basata sulla attuale posizione dei filtri. Per ogni piezometro è stata aggiunta una particella al centro del tratto terebrato per ogni strato attraversato dalla lunghezza del piezometro. Inoltre, in ogni modello, sulla base delle



piezometrie simulate, sono state tracciate le particelle a monte idrogeologico. I differenti flussi seguiti dalla medesima particella nelle 389 simulazioni sono il risultato delle differenti piezometrie e differenti valori di K generati seguendo la procedura di modellazione inversa. Contando il numero di particelle che attraversano le celle del modello in ognuna delle 389 simulazioni, è stato possibile produrre le mappe della frequenza di passaggio delle particelle che scorrono attraverso ogni strato di acquifero: nel modello, per le celle in cui il numero di passaggi di particelle era maggiore, si ha anche una probabilità maggiore rispetto alle altre celle (per esempio MPS) che le sorgenti della contaminazione diffusa siano presenti. Tale risultato viene quindi considerato come rappresentativo delle aree appartenenti alla FUA con la più elevata probabilità di avere MPS responsabili della contaminazione diffusa osservata nei piezometri.

Inoltre, il modello inverso di trasporto è stato utilizzato per identificare anche le aree con la più elevata probabilità di contenere sorgenti puntuali (PS). La procedura che genera i valori di K, è stata la medesima sopra descritta. Ma, in questo caso, le particelle sono state aggiunte solo nei piezometri con alte concentrazioni di PCE e non appartenenti ai punti coinvolti dalla contaminazione diffusa (risultanti dall'applicazione dell'analisi esplorativa dei dati), che significa considerare solo i punti sospettati di essere colpiti dal plume.

In seguito, il codice MODPATH è stato applicato per generare le direzioni di advezione a valle idrogeologico per ognuno dei modelli prodotti attraverso la realizzazione dei campi di conducibilità.

Le mappe realizzate mostrano il numero di particelle simulate a valle idrogeologico che attraversano ogni cella del modello in ciascuno dei modelli calibrati. Il risultato è rappresentativo delle aree della FUA con la più alta probabilità di presentare sorgenti responsabili della contaminazione. I risultati sono stati confrontati con il modello deterministico di trasporto (i plume simulati nella FUA) e con i risultati idrochimici delle campagne di monitoraggio AMIIGA.

ANALISI MULTIVARIATA E GEOSTATISTICA (D.T1.1.2)

Descrizione: l'analisi multivariata (analisi delle componenti principali, analisi fattoriale, analisi cluster multiparametrica, analisi di regressione) e l'analisi geostatistica sono metodi statistici, diversi da quelli utilizzati per l'analisi esplorativa dei dati, che supportano l'elaborazione dei dati e il processo decisionale per la gestione delle acque sotterranee (ad esempio la prioritizzazione e la selezione delle misure) a scala media (scala FUA) per stimare la contaminazione di fondo antropogenico (MPS) e per distinguere, nella stessa FUA, aree con diversi livelli (in termini di concentrazione di fondo) di contaminazione diffusa. In particolare:

Analisi multivariata: per valutare le componenti principali del dataset (che significa per esempio individuare i principali contaminanti) e le diverse tipologie di contaminazione diffusa che potrebbero essere presenti nella FUA.

Analisi geostatistica: per valutare la distribuzione spaziale della contaminazione diffusa.

Applicabilità: l'analisi multivariata consiste in una raccolta di metodi statistici che possono essere utilizzati quando su ciascun pozzo/piezometro di monitoraggio vengono effettuate diverse misurazioni nel tempo. L'analisi multivariata può essere applicata a diversi tipi di misure (ad esempio concentrazione di inquinanti, caratteristiche dell'acqua ecc.). prendendo in considerazione la variabile spaziale di ciascun punto di monitoraggio. Indicativamente l'analisi può essere applicata nella FUA quando sono disponibili almeno 2 punti di monitoraggio ogni 100 ettari. I metodi di analisi multivariata possono essere applicati a tutte le condizioni del sito, come il rilevamento del rilascio di agenti inquinanti, la caratterizzazione del sito, la bonifica, il monitoraggio. I metodi geostatistici possono essere utilizzati insieme ai risultati dell'analisi multivariata per meglio indirizzare i dati ambientali che sono spesso distorti, raggruppati e correlati spazialmente.

Combinazione con altri strumenti: i risultati dell'analisi multivariata e geostatistica, in combinazione con i risultati del modello numerico di trasporto deterministico e inverso, permettono di distinguere le aree interessate da una contaminazione di tipo puntuale (PS) da quelle soggette a contaminazione diffusa (MPS), fornendo informazioni sull'intensità dell'inquinamento di tipo diffuso. Queste informazioni sono di supporto nel processo decisionale per la gestione delle acque sotterranee, per stimare i valori di concentrazione di fondo della contaminazione diffusa.

OBIETTIVI	Analisi dei dati di falda: pulizia del dataset e distinzione tra piezometri PS/MPS	
	Implementazione del modello concettuale	
	Relazioni sorgente/plume e modello concettuale di trasporto dei contaminanti	
	Misure di risanamento e stesura del Piano di Gestione delle acque sotterranee	X
PUNTI DI FORZA	<p>Soprattutto nelle aree contaminate, su ciascun punto di monitoraggio vengono misurati simultaneamente più parametri che possono essere potenzialmente correlati tra loro. È necessario slegare le informazioni sovrapposte fornite dalle variabili correlate per comprendere meglio la struttura sottostante. Pertanto, il vantaggio dell'analisi multivariata è la semplificazione, allo scopo di descrivere ciò che sta accadendo utilizzando un numero ridotto di variabili (che significa ad esempio raggruppare i contaminanti che hanno lo stesso schema).</p> <p>I metodi di analisi multivariata studiano l'evoluzione temporale delle variabili e le relazioni tra i diversi parametri.</p> <p>L'analisi multivariata consente di valutare le componenti principali del dataset (che ad esempio raccolgono le concentrazioni dei principali contaminanti) e la contaminazione diffusa, che potrebbero essere presenti nella FUA, stimando i livelli della contaminazione diffusa su vaste aree.</p>	

	<p>L'interpolazione spaziale (analisi geostatistica), partendo dai valori misurati, è in grado di stimare i valori in posizioni specifiche dove la misura non è nota.</p> <p>L'analisi geostatistica fornisce una stima della distribuzione spaziale della contaminazione diffusa.</p> <p>I risultati dell'analisi multivariata e geostatistica supportano il processo decisionale per la gestione delle acque sotterranee su scala media (scala FUA).</p>
PUNTI DI DEBOLEZZA	<p>Una volta raccolti i dati, anche quando organizzati e sistematizzati correttamente, il dataset finale deve essere controllato, convalidato e preparato prima di procedere con l'analisi. Ci sono diversi passaggi necessari per la preparazione dei dati prima dell'analisi: modifica e codifica dei dati (ad esempio controllo degli errori o dei dati mancanti) e pulizia dei dati (vedere lo strumento di analisi esplorativa dei dati).</p> <p>Una distribuzione spaziale e temporale omogenea dei dati facilita l'analisi. L'aumento della densità spaziale e temporale dei dati migliora la solidità dei risultati.</p>
OPPORTUNITÀ	<p>I risultati dell'analisi multivariata e geostatistica, se la rete di monitoraggio resta invariata, possono essere utilizzati per monitorare l'evoluzione della contaminazione.</p>
MINACCE	<p>I risultati devono essere coerenti con il modello concettuale (aspetti idrogeologici, flusso delle acque sotterranee, trasporto dei contaminanti). La minaccia è che i metodi statistici vengano applicati senza considerare le caratteristiche dei punti di monitoraggio (ad esempio profondità e lunghezza del tratto filtrato).</p> <p>Ad oggi, nell'analisi geostatistica è difficile selezionare, per una vasta quantità di dati georeferenziati, il metodo migliore di interpolazione spaziale. Pertanto, in ciascuna applicazione la scelta di un metodo adeguato e la selezione degli opportuni parametri è fondamentale. Metodi diversi possono produrre rappresentazioni spaziali molto diverse e una conoscenza "approfondita" del fenomeno è necessaria per valutare quale sia il risultato più vicino alla realtà. L'uso di un metodo inadatto o di parametri inappropriati può produrre un modello distorto della distribuzione spaziale, portando a decisioni potenzialmente errate basate su informazioni spaziali fuorvianti.</p>

ESEMPIO DI APPLICAZIONE NEL PROGETTO AMIIGA

Area pilota di Milano (IT)

L'analisi multivariata e geostatistica è stata applicata alla FUA di Milano dove esistono due falde acquifere (falda superficiale e profonda). Il dataset, contenente i dati idrochimici disponibili, era composto da una rete di monitoraggio di circa 2.000 punti. L'analisi dei cluster multiparametro ha correlato i profili delle concentrazioni di diversi contaminanti. 5 cluster sono stati identificati come rappresentativi della contaminazione diffusa da PCE e rappresentano il grande gruppo delle misurazioni per la stima del valore di fondo. Le caratteristiche e i trend medi del PCE nei cinque cluster, che rappresentavano la contaminazione diffusa, sono stati studiati più in dettaglio.

Inoltre, il metodo geostatistico ha analizzato la distribuzione spaziale dei 5 cluster nell'area di studio e il cluster più rappresentativo per ciascuna zona è stato identificato dai risultati dell'analisi multivariata. Pertanto, è stato evidenziato che un valore unico di inquinamento diffuso per tutta l'area di studio non poteva essere rappresentativo della distribuzione disomogenea della contaminazione diffusa, ma nella FUA doveva essere assegnato più di un valore di concentrazione di fondo.

Analisi statistiche e geostatistiche, combinate con i risultati del modello di trasporto numerico e inverso, hanno identificato le aree PS e MPS e hanno fornito i valori di concentrazione più rappresentativi della contaminazione diffusa nella FUA di Milano. I risultati hanno supportato il processo decisionale per la gestione delle acque sotterranee, per pianificare le misure di intervento e identificare nuove potenziali sorgenti della contaminazione che è necessario monitorare.



WEBGIS (D.T1.1.1)

Descrizione: il WebGIS è uno strumento che può essere utilizzato per visualizzare ed elaborare i dati su Internet. Offre un mezzo per accedere e condividere le informazioni online. Migliora l'efficienza dell'analisi dei dati e dell'interpretazione del modello concettuale, consente la condivisione di dati e informazioni tra le istituzioni e gli uffici tecnici. L'obiettivo principale è visualizzare i dati in una mappa, agevolare la discussione sui dati/risultati del progetto e supportare e facilitare il processo decisionale per la gestione delle acque sotterranee.

Applicabilità: Scala FUA. La disponibilità e le prestazioni della banda internet devono essere efficienti.

Combinazione con altri strumenti: i risultati dell'analisi esplorativa dei dati, delle analisi chimiche, dei livelli di falda, della BMT, della CSIA, del modello di trasporto inverso e deterministico, dell'analisi multivariata e geostatistica possono essere rappresentati simultaneamente o in combinazioni diverse per migliorare la comprensione del modello concettuale dell'area di studio.

OBIETTIVI	Analisi dei dati di falda: pulizia del dataset e distinzione tra piezometri PS/MPS	
	Implementazione del modello concettuale	
	Relazioni sorgente/plume e modello concettuale di trasporto dei contaminanti	
	Misure di risanamento e stesura del Piano di Gestione delle acque sotterranee	X
PUNTI DI FORZA	<p>Il WebGIS è uno strumento a libero accesso per la consultazione dei dati. È possibile accedere al WebGIS ovunque da diverse piattaforme, impostando diversi livelli di autorizzazione per l'accesso (con nome utente e password). Ciò significa che è possibile controllare le autorizzazioni per determinati utenti o determinati gruppi, consentendo l'accesso anche solamente ad alcune specifiche informazioni sui dati o sulle mappe.</p> <p>È uno strumento per pubblicare e condividere differenti livelli di caratteristiche su una singola mappa web. Migliora l'efficienza dell'analisi dei dati e dell'interpretazione del modello concettuale.</p> <p>È un buon modo per condividere dati e informazioni tra istituzioni e uffici tecnici, per migliorare le comunicazioni interne ed esterne e la collaborazione incrociata, per supportare e facilitare le decisioni.</p> <p>Periodicamente le informazioni possono essere aggiornate, di conseguenza, tutti gli utenti di WebGIS contemporaneamente e in qualsiasi momento possono accedere alle informazioni più recenti. Consente alle organizzazioni di diventare più efficienti, produttive e reattive ai propri dati spaziali.</p> <p>Possono essere implementate molte funzionalità come la panoramica, lo zoom, la stampa, la possibilità di caricare dati e sovrapporli alle mappe esistenti, la ricerca dei dati per indirizzo, l'elaborazione dei dati. Permette a tutti, non solo agli esperti, di accedere e comprendere facilmente e con meno sforzo i dati geospaziali. Gli utenti, anche se non sono esperti in geoinformatica, possono utilizzare gli strumenti GIS concentrandosi sui dati del loro dominio specifico.</p> <p>Non c'è bisogno di PC molto performanti per gestire i dati. Non è necessario conservare i dati su un computer, poiché tutti i dati sono salvati in cloud.</p>	
PUNTI DI DEBOLEZZA	<p>La disponibilità e le prestazioni della banda internet rappresentano un problema, ma probabilmente migliorerà in futuro.</p> <p>Sono necessari professionisti specificamente dedicati allo sviluppo e alla</p>	



	manutenzione del set di dati ambientali e alla funzionalità del WebGIS per implementare lo strumento e aggiornare le informazioni.
OPPORTUNITÀ	Grazie alle potenzialità di Internet e dello strumento stesso, dovrebbe essere possibile eseguire anche complesse analisi ed elaborazione di dati vettoriali e raster sul web, collaborando con altri utenti in qualsiasi momento a distanza.
MINACCE	<p>Condividere i dati non è un processo facile.</p> <p>Gli utenti GIS tendono a sviluppare i propri set di dati. Ciò implica, ad esempio, che potrebbero non conoscere altri set di dati già esistenti e disponibili, o nella stessa banca dati, errori corretti da altri utenti. Generalmente l'accesso a set di dati completi e affidabili è difficile.</p> <p>Ogni utente GIS non è abituato a condividere set di dati con altri settori e organizzazioni. Alcune delle difficoltà legate alla condivisione dei dati sono causate da un diffuso sospetto circa la qualità dei dati di terzi, presumendo che i dati possano essere "erroneamente" utilizzati se condivisi con terzi e la loro proprietà può essere persa, o dal timore che gli altri utenti potrebbero scoprire la scarsa qualità dei propri dati condividendoli.</p> <p>Professionisti specificamente dedicati allo sviluppo e alla manutenzione di set di dati ambientali non sono sempre disponibili nella struttura del gruppo di lavoro; gli analisti ambientali spesso lavorano anche nella fase di preparazione dei set di dati per compiti specifici. Ciò può implicare che i set di dati non siano immediatamente pronti per essere condivisi per l'uso generale.</p>

ESEMPIO DI APPLICAZIONE NEL PROGETTO AMIIGA

Il WebGIS AMIIGA è disponibile al seguente link <http://131.175.56.100/lm/> . Sono stati realizzati sette progetti WebGIS, uno per ogni area pilota, e solo i partner AMIIGA possono accedere ai progetti utilizzando un login e una password personali. Il WebGIS è accessibile da un semplice browser Web su qualsiasi dispositivo.

Tutti i software sono installati su una macchina server, in esecuzione su un'installazione di Ubuntu 14.04, e tutti i componenti dell'architettura sono FOSS (Free and Open Source Software). L'architettura parte dal componente principale che è QGIS, una sorgente libera e open source Software per Geospatial (FOSS4G). QGIS consente di eseguire l'elaborazione dei dati e di archiviare tutti i livelli in un database locale. Il database scelto è PostgreSQL, con un'estensione PostGIS, specifica per la gestione dei dati geospaziali. Un altro componente dell'architettura è QGIS Server, un componente che serve i livelli in un progetto QGIS, quindi dal database, sul Web utilizzando standard OGC come un servizio Web Map (WMS). Per mostrare tutti i livelli in un browser Web, l'architettura implementa un componente dinamico chiamato Lizmap che genera un WebGIS in base alle esigenze degli utenti.

Tutti i partner sono stati coinvolti nell'attività di raccolta dati (caratteristiche della rete di monitoraggio, valori di concentrazione, caratteristiche della falda acquifera, ecc.). I dati visualizzati nel WebGIS AMIIGA sono: area pilota e estensione della FUA; caratteristiche della rete di monitoraggio; profondità delle falde acquifere; zone di significativi cambiamenti della struttura idrogeologica; risultati dei test di conducibilità idraulica; piezometrie e dati piezometrici puntuali; concentrazioni dei contaminanti; ubicazione dei siti industriali e produttivi; mappe della contaminazione diffusa.

Per ciascun partner, il WebGIS AMIIGA migliora l'efficienza dell'analisi dei dati e dell'interpretazione del modello concettuale, semplifica la condivisione dei dati e delle informazioni tra gli istituti e gli uffici tecnici con l'obiettivo principale di supportare e facilitare il processo decisionale per la gestione delle acque sotterranee.



4. Conclusioni

Gli strumenti del progetto AMIIGA possono essere suddivisi in funzione dei loro obiettivi. Le tabelle seguenti forniscono una panoramica degli strumenti descritti nel capitolo precedente.

Obiettivi degli strumenti AMIIGA

La tabella mostra gli obiettivi di ciascuno strumento, tenendo conto della descrizione riportata nel capitolo precedente.

		OBIETTIVI			
		Analisi dei dati di falda: pulizia del dataset e distinzione tra piezometri PS/MPS	Implementazione del modello concettuale	Relazioni sorgente/plume e modello concettuale di trasporto dei contaminanti	Misure di risanamento e stesura del Piano di Gestione delle acque sotterranee
STRUMENTI AMIIGA	ANALISI ESPLORATIVA DEI DATI	X			X
	BMT		X		X
	CSIA			X	X
	MODELLO DI TRASPORTO INVERSO			X	X
	ANALISI MULTIVARIATA E GEOSTATISTICA				X
	WEBGIS				X

Gli strumenti AMIGA nelle Aree Pilota

La tabella riporta gli strumenti AMIGA adottati nel progetto e gli obiettivi conseguiti nelle aree pilota.

Area Pilota (PA)		PA1 (HR)	PA2 (SL)	PA3 (IT)	PA4 (IT)	PA5 (CZ)	PA6 (PL)	PA7 (DE)
Dimensione dell'area si studio [ha]		6 500	7 000	15 740	600	3,1	2 475	530
Dimensione della FUA [ha]		26 000	25 100	52 100	58 594	3 750	20 190	4 810
Tipo di contaminanti		Batteri, nitrati	Cr VI, NO3, B, desethyl- atrazine, nuovi contamina con emergenti	PCE, TCE	PCE	CHC	Pesticidi, solventi organici	CHC
OBIETTIVI	Analisi dei dati di falda: pulizia del dataset e distinzione tra piezometri PS/MPS			X	X		X	X
	Implementazione del modello concettuale	X		X			X	X
	Relazioni sorgente/plume e modello concettuale di trasporto dei contaminanti	X	X	X	X		X	X
	Misure di risanamento e stesura del Piano di Gestione delle acque sotterranee	X	X	X	X	X	X	X
STRUMENTI AMIGA	ANALISI ESPLORATIVA DIE DATI		X	X				
	BMT		X		X	X	X	X
	CSIA		X	X	X	X	X	X
	MODELLO DI TRASPORTO INVERSO	X		X				
	ANALISI MULTIVARIATA E GEOSTATISTICA	X		X				
	WEBGIS	X	X	X	X	X	X	X



LETTERATURA

- 2011 - *FOKS Handbook for Integral Groundwater Investigation - Toolbox for the identification of key sources of groundwater contamination*
- D.T1.1.1, *WebGIS tool development for groundwater database management and open-access consultation*
- D.T1.1.2, *Guideline for statistical method and geostatistical analysis for GW quality studies at FUA*
- D.T1.1.3, *GW contamination modeling at FUA: “inverse iterative modeling” guideline for implementation and use*
- D.T1.1.4, *Technical protocol for statistical analysis coupled with transport modeling for GW pollution assessment*
- D.T1.2.4, *Final version of the CSIA technical protocol for GW pollution assessment and remedial evaluation*
- D.T1.3.4, *Final version of the BMTs technical protocol for remedial implementation and performance evaluation*
- D.T3.3.7 *Management Strategy on groundwater contamination in Functional Urban Areas of Central Europe*