

Le barriere idrauliche e idraulico-fisiche: analisi multi-criterio finalizzata alla selezione della migliore tecnologia di intervento in siti contaminati

Evaluating the feasibility of hydraulic and physical barriers at contaminated sites by means of multicriteria analysis

Andrea Gigliuto, Rudy Rossetto

Riassunto: L'utilizzo di opere di sbarramento degli acquiferi, per mezzo di sistemi idraulici e idraulico-fisici, costituisce, nell'ambito della bonifica dei siti contaminati, una pratica diffusa per il contenimento e la rimozione dei contaminanti disciolti in fase acquosa. L'evoluzione tecnica recente ha esteso le tipologie di barriera che possono essere progettate e realizzate. In tale contesto assume rilevante importanza il processo decisionale che conduce alla selezione della tecnologia di barriera maggiormente idonea al caso in studio, e deve, necessariamente, prendere in considerazione molteplici fattori, non solo tecnici, ma anche socio-economici e ambientali.

Il presente contributo espone i risultati di un progetto di ricerca che ha affrontato il suddetto tema e ha condotto alla definizione di una metodologia di analisi multi-criterio di tipo discreta finalizzata a fornire gli strumenti valutativi per decidere quale opzione di barriera degli acquiferi sia mag-

giormente idonea ad uno specifico caso in esame, tenendo in considerazione criteri tecnici, ambientali e socio-economici.

Tale metodologia è stata applicata ad un caso reale, individuato tra una serie di casi di studio analizzati, al fine di valutare l'efficacia dello strumento nella valutazione delle alternative progettuali possibili ed evidenziare le differenze tra i risultati dell'analisi multi-criterio e le scelte effettuate nella realtà dai progettisti. Un'analisi di sensitività svolta sull'effetto indotto dal peso assegnato a ciascun criterio sul risultato dell'analisi, ha permesso di trarre informazioni inerenti i singoli criteri e ha consentito di ipotizzare quali siano state le valutazioni fatte dai progettisti del caso reale.

Con questo contributo si vogliono porre le basi per approfondire tale tematica, nell'ottica di poter sviluppare metodologie che rendano maggiormente trasparenti i processi decisionali ed i vincoli e le conseguenze delle diverse alternative.

Parole chiave: barriere fisiche ed idrauliche, analisi multi-criterio, disinquinamento delle acque sotterranee.

Keywords: *hydraulic and physical barriers, multi-criteria analysis, groundwater remediation.*

Abstract: *Controlling contaminant plumes in groundwater using pump and treat or hydraulic and physical barriers is a common practice to contain and reduce solute contaminants in remediation activities. Recent evolution in engineering techniques also allowed to extend the number of solutions that can be designed and set in practice.*

As such, the decision-making process assumes great importance in leading the selection of the best suitable technology for a certain case study. This process has to take into account technical, environmental and socio-economic factors.

This paper presents the results of a research project aimed at defining a multi-criteria procedure analysis to support the decision-making process in the barrier technology selection, taking into account technical, economic, social and environmental factors.

A multi-criteria analysis methodology has been defined to provide a quantitative tool to guide the selection of the best suitable technology concerning a specific case. The methodology was applied to a real case, selected from many case studies based on data availability and quality, in order to verify the effectiveness of the procedure in evaluating the alternative selections and to highlight the differences between the results of the multi-criteria analysis and the real engineers choices. A sensitivity analysis was performed to analyze the influence of each criterion on the final result of the study.

With this paper we aim to start a discussion to deepen the decision making process, in order to develop methodologies allowing to choose the best solution without subjective evaluations

Andrea GIGLIUTO ✉
AECOM Italy S.r.l.
Via Francesco Ferrucci 17/A, Milan, Italy
andrea.gigliuto@aecom.com

Rudy ROSSETTO
Institute of Life Sciences - Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa
r.rossetto@sssup.it

Ricevuto: 10 giugno 2014 / Accettato: 30 giugno 2014
Pubblicato online: 31 luglio 2014

© Associazione Acque Sotterranee 2014

Introduzione

Nell'ambito della bonifica dei siti contaminati si è resa necessaria l'adozione di specifiche misure volte al contenimento dei contaminanti disciolti in fase acquosa e libera nelle falde acquifere. Fin dai primi passi delle procedure di bonifica dei siti contaminati, si osserva il ricorso a opere di sbarramento degli acquiferi per mezzo di sistemi idraulici coadiuvati, in un secondo momento, dall'integrazione con sbarramenti fisici. Tali metodi, in virtù spesso della loro velocità di installazione, soprattutto nel caso delle barriere idrauliche s.s., sono stati considerati i primi interventi da adottare nel caso di evidenze di contaminazione a carico delle acque sotterranee (Tosco et al., 2010).

L'evoluzione delle conoscenze tecniche, unitamente alla maturazione normativa della legislazione inerente i siti contaminati, ha permesso di estendere le tipologie di barrieramento degli acquiferi che possono essere progettate e realizzate, animando un profondo dibattito inerente la valutazione dell'efficienza dei sistemi di barrieramento disponibili (Bowen and Johnson, 1993; Bayer et al. 2004, 2006; Di Molfetta et al., 2002), ed ha portato al loro utilizzo in aree idrogeologicamente complesse in ampi contesti industriali.

La legislazione italiana ha preso in considerazione l'evoluzione degli strumenti di sbarramento degli acquiferi e, nel corso dell'aggiornamento delle norme, li ha inquadrati organicamente sia come presidi di messa in sicurezza di emergenza che come opere di messa in sicurezza operativa o di bonifica (D.Lgs. 152/06 e successivi aggiornamenti).

Proprio in virtù dell'estensione delle possibilità tecniche, il processo decisionale che conduce alla progettazione di un certo sistema di barrieramento, rispetto ad un altro, deve, necessariamente, arrivare a prendere in considerazione molteplici fattori, tecnici, ambientali e socio-economici.

Il presente studio affronta il tema delle barriere idrauliche e idraulico-fisiche, proponendo una metodologia di supporto alle decisioni, basata sull'applicazione dei principi dell'analisi multi-criterio, allo scopo di valutare quale sia, per un dato sito ed una serie di opzioni progettuali, la tipologia di barrieramento maggiormente idonea. Infatti, in fase di definizione della strategia di barrieramento, risulta importante valutare gli aspetti tecnici, legati essenzialmente all'assetto idrogeologico e alla natura ed estensione della contaminazione, ma è essenziale considerare anche i fattori socio-economici e ambientali legati al costo dell'opera, agli oneri di mantenimento e all'impatto indotto sull'ambiente e sul sistema acquifero. Prescindere dal considerare, nel modo più oggettivo possibile, tali fattori, può comportare errori di progettazione, maggiori costi o maggiori impatti sull'ambiente. L'utilizzo di una metodologia basata sull'analisi multi-criterio non conduce, comunque, all'identificazione di una soluzione che ottimizzi tutti i criteri, ma permette di selezionare una alternativa di compromesso che tenga in considerazione l'impatto legato a tutti gli ambiti di valutazione.

La metodologia proposta è stata applicata ad uno specifico caso in esame, individuato tra una serie di casi di studio analizzati dagli autori per la quantità e la qualità delle informazioni disponibili.

Materiali e Metodi

Nel presente paragrafo vengono descritti i concetti teorici su cui si fonda l'analisi multi-criterio. Come discusso in Munda (1995), un problema multi-criterio può essere descritto da un set definito di N alternative (famiglia A , scenari a_1, a_2, \dots, a_n) e da una serie M di criteri (famiglia G , criteri g_1, g_2, \dots, g_m) attraverso i quali valutare le differenti alternative. L'analisi delle alternative possibili viene affrontata valutando se un'alternativa (appartenente all'insieme A) risulta migliore di un'altra (anch'essa appartenente all'insieme A), in funzione di un certo criterio (appartenente all'insieme G). L'alternativa a_1 si può considerare migliore di a_2 , secondo il criterio g_i , se $g_i(a_1) > g_i(a_2)$. Dato un set N di alternative A e un numero M di criteri G , è possibile costruire una matrice $N \times M$, denominata matrice degli impatti (*Impact Matrix*). La matrice può includere informazioni quantitative, qualitative o entrambe le tipologie.

Al fine di ottenere una scala di preferenza (*ranking*) tra tutte le alternative possibili, i punteggi derivanti da ogni singolo criterio devono essere aggregati attraverso un algoritmo matematico (Gamboa e Munda, 2007). Molti modelli di *ranking* (si veda Arrow e Raynaud, 1986; Munda, 1995; Roy, 1996) sono stati formulati a partire dagli anni '60, ognuno con vantaggi e svantaggi (Figueira et al., 2005; Munda, 2008). In particolare, risulta fondamentale che il metodo di *ranking* sia semplice, al fine di garantire consistenza e trasparenza. Il metodo non deve prevedere la completa compensazione tra i criteri (deve essere non compensatorio), affinché non sia possibile compensare delle pessime performance ambientali o sociali con delle ottime risultanze economiche, o viceversa. Infine, l'intensità della preferenza non va tenuta in considerazione per evitare la compensabilità, mentre i pesi, seppur debbano poter riflettere l'importanza del criterio, non devono risultare *trade-off*, cioè non deve essere possibile, appunto, che una buona performance di un criterio vada a compensare quella pessima di un altro, andando quindi a ledere il principio di non compensabilità dell'analisi.

Munda (2005; 2009) propone un semplice algoritmo di *ranking*, che rispetta tutte queste caratteristiche ed è coerente con la proposta di Condorcet, descritta in Kemeny (1959) e riutilizzata da Young and Levenglick (1978). Tale approccio è denominato CKYL (Condorcet-Kemeny-Young-Levenglick; Munda, 2005).

La procedura di *ranking* utilizza un criterio di valutazione g_m di tipo ordinario, cioè basato sull'ordine di preferenza espresso per il singolo criterio. Per semplicità, si assume che il valore maggiore nella scala di preferenza del singolo criterio sia preferibile al valore minore (ma vale il contrario nei casi in cui si voglia minimizzare il valore del criterio).

$$a_j P a_k \Leftrightarrow g_m(a_j) > g_m(a_k) + q_m \quad \text{Eq. 1}$$

$$a_j I a_k \Leftrightarrow |g_m(a_j) - g_m(a_k)| \leq q_m \quad \text{Eq. 2}$$

dove P indica la relazione di preferenza e I la relazione di indifferenza mentre q è la soglia di indifferenza. La soglia q

è il valore per cui la differenza tra le alternative j e k non è abbastanza grande da differenziare le due alternative rispetto al criterio m .

Il metodo CKYL, a partire dalla matrice degli impatti descritta sopra e secondo un confronto per singole coppie di alternative, basato su tutti i criteri previsti e sui loro pesi, permette di ricavare una matrice ordinale che tenga in considerazione le soglie di indifferenza dei singoli criteri. La procedura di aggregazione proposta rispetta i seguenti assiomi (Arrow and Raynaud, 1986):

- diversità: per ogni criterio è possibile definire un ordine nelle alternative;
- simmetria: viene considerato solo l'ordine tra le coppie di alternative e non il valore di distanza che esiste tra le alternative;
- risposta positiva: il grado di preferenza tra due alternative a e b viene aumentato in funzione del numero di criteri che fanno preferire a rispetto a b e in relazione al peso dei singoli criteri.

Sulla base dei tre assiomi precedenti il metodo CKYL permette di generare una matrice $N \times N$ denominata *outranking matrix* (E ; Arrow and Raynaud, 1986), i cui elementi sono dati dall'Eq. 3

$$e_{jk} = \sum_{m=1}^M \left(W_m(P_{jk}) + \frac{1}{2} W_m(I_{jk}) \right) \quad \text{Eq. 3}$$

Dove W_m è il peso del criterio m sia per la relazione di preferenza (P_{jk} , relazione di preferenza tra le alternative j e k) che per quella di indifferenza (I_{jk} , relazione di indifferenza tra le alternative j e k).

Il massimo punteggio di *ranking* è quello supportato dal maggior numero di criteri per ogni confronto tra singole coppie di alternative, sommando tutte le possibili coppie di alternative. Chiamando R il set di tutti gli $N!$ possibili *ranking* di alternative, e considerando che $R = \{r_s\}$ ($s=1, 2, \dots, N!$) è il singolo *ranking* di R , è possibile indicare che, per ogni r_s , il punteggio ϕ_s è ottenuto dalla somma di e_{jk} su tutte le $(N/2)$ coppie j, k di alternative. L'Eq. 4 permette di calcolare il punteggio (ϕ_s) indicante il supporto dato dai criteri al singolo *ranking*.

$$\phi_s = \sum_{j \neq k} e_{jk} \quad \text{Eq. 4}$$

dove:

$$j \neq k, s = 1, 2, \dots, N!$$

$$e_{jk} \in r_s$$

Il *ranking* finale r^* è quello che massimizza l'Eq. 4, cioè:

$$r^* \Leftrightarrow \phi_{r^*} = \max \sum e_{jk} \quad \text{Eq. 5}$$

dove:

$$e_{jk} \in R$$

L'applicazione dei principi derivanti dall'analisi multi-criterio permette di ottenere una procedura standardizzabile e ripetibile includendo molte tipologie di informazioni, incluse anche quelle valutabili secondo criteri qualitativi.

L'utilizzo della procedura suddetta, nell'ambito della valutazione di problematiche ambientali, consente di effettuare

scelte strategiche e progettuali fondando le stesse su valutazioni documentabili e sulla presenza di molteplici criteri di selezione, anche appartenenti ad ambiti profondamente diversi, che vanno a concorrere sulla scelta finale (Munda, 2008). Da ultimo, l'utilizzo di una metodologia trasparente e documentabile consente anche una corretta condivisione della scelta progettuale con i vari attori presenti e con gli enti di controllo. Esempi di applicazioni della metodologia proposta sono disponibili nei lavori di Borzoni (2011), Borzoni et al. (2014), Munda e Russi (2008) e Gamboa e Munda (2007).

Descrizione del caso di studio e del sistema di barriera adottato

Il caso di studio è stato selezionato tra una serie di casi in relazione alle numerose informazioni sito-specifiche disponibili circa i costi delle opere di barriera realizzate, i costi di gestione delle stesse, una parziale stima dei costi inerenti altre opzioni progettuali e le informazioni necessarie per la valutazione degli scenari possibili, utilizzando i criteri di seguito descritti ed utilizzati nella metodologia di analisi. In relazione al grado di confidenzialità dei dati, non è stato possibile indicare l'ubicazione del sito e sono state omesse informazioni di carattere sensibile. Vengono, comunque, di seguito indicate le principali caratteristiche geologiche, idrogeologiche e inerenti lo stato di contaminazione.

Il sito in esame (Fig. 1) si trova in prossimità di un corso d'acqua che drena il sistema acquifero.

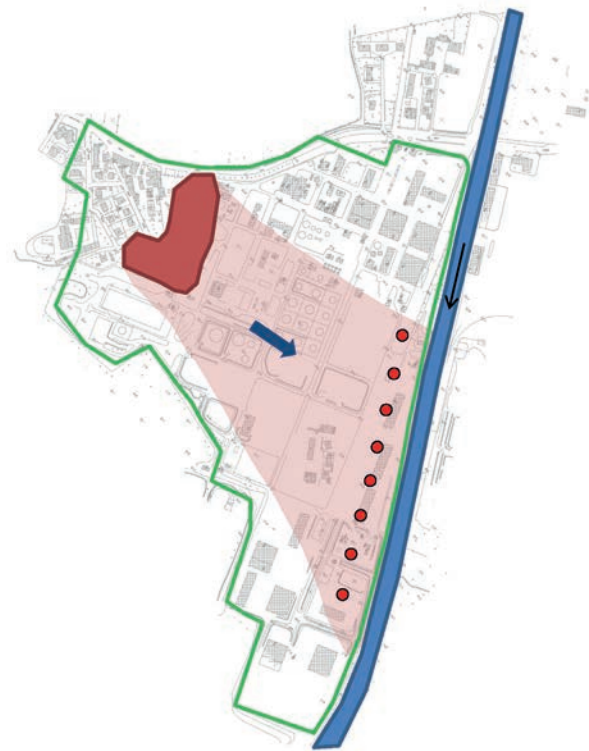


Fig. 1 - Area di studio. Poligono bordo: area di stoccaggio rifiuti; area rosa: zona di contaminazione in falda; cerchi rossi: pozzi della barriera idraulica

Fig. 1 - Study area. Bordeaux polygon: the waste disposal area; pink area: the contaminant plume; red circles: the hydraulic barrier wells

Il sottosuolo dell'area è caratterizzato da un'alternanza di orizzonti a granulometria sabbiosa (da sabbie medie a sabbie fini, a sabbie limose) ed orizzonti a granulometria predominante limosa o argillosa. In generale, predominano le sabbie limose ed i limi sabbiosi, con intercalati orizzonti limoso-argillosi, che assumono, spesso, una configurazione lenticolare racchiusa all'interno della serie sabbioso limosa (Fig. 2).

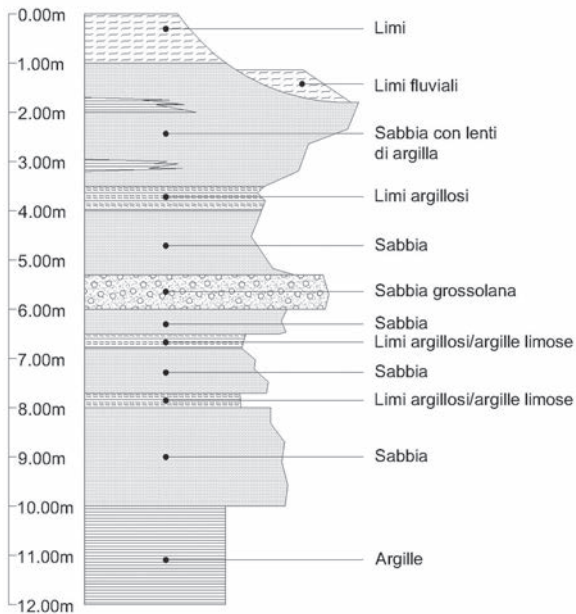


Fig. 2 - Successione stratigrafica del sottosuolo sottostante il sito.

Fig. 2 - Stratigraphic sequence below the site.

L'assetto idrogeologico dell'area è fortemente influenzato dalla successione stratigrafica descritta in precedenza, nel senso che le alternanze di orizzonti sabbiosi e orizzonti limoso-argillosi presentano alla circolazione idrica sotterranea numerosi contrasti di permeabilità. Nel sistema viene identificato un singolo acquifero superficiale, con soggiacenza a circa 3 m dal p.c. e base a circa 10 m di profondità dal p.c..

La contaminazione a carico delle acque sotterranee, dovuta alla fuoriuscita di percolato da un'area di stoccaggio rifiuti parzialmente non impermeabilizzata sul fondo, è limitata all'acquifero superficiale. Una barriera idraulica, realizzata sul sito e costituita da 8 pozzi che emungono una portata di circa 20 mc/h per un fronte di circa 600m lineari, è il sistema selezionato dai progettisti per contenere e ridurre il pennacchio di contaminazione.

Analisi dei dati

La metodologia proposta e descritta è stata applicata al caso di studio, ed il risultato confrontato con la storia progettuale del sito, con il duplice scopo di discutere criticamente la metodologia proposta e le scelte effettuate dai progettisti nella realtà.

La procedura di scelta del miglior sistema ha preso in considerazione una serie di criteri di valutazione che includono i principali fattori vincolanti la realizzazione di sistemi di barriera.

Le fasi di analisi sono di seguito elencate:

- definizione delle alternative progettuali (scenari);
- definizione dei criteri per la valutazione delle alternative progettuali;
- stima dei valori da assegnare ai criteri;
- definizione di pesi (ogni criterio può avere un peso differente dagli altri) e soglie di indifferenza (valore di tolleranza, variabile per ogni criterio, che permette di indicare quale deve essere il valore minimo idoneo a rendere differenti due scenari);
- applicazione dell'algoritmo di *ranking* CKYL che permette di ottenere l'ordine di preferenza degli scenari, in funzione dei criteri analizzati;
- analisi dei risultati e analisi di sensitività.

Di seguito viene illustrata l'applicazione al caso di studio delle fasi di lavoro principali della procedura.

Nell'analisi del caso di studio sono state definite cinque alternative progettuali (scenari) per il contenimento e/o disinquinamento della contaminazione, rappresentate in Figura 3:

- a. Barriera idraulica s.s. (BI)
- b. Barriera idraulica con barriera fisica a valle idrogeologica (BI+BF_{valle})
- c. Barriera idraulica con barriera fisica a monte idrogeologico (BI+BF_{monte})
- d. Barriera idraulica con pozzi di reimmissione a valle idrogeologica (BI+IMM_{valle})
- e. Barriera idraulica con pozzi di reimmissione a monte idrogeologico (BI+IMM_{monte})

L'analisi multi-criterio delle suddette alternative progettuali è stata effettuata considerando otto criteri. Alcuni criteri sono definiti su base numerica, altri, che non hanno una rappresentabilità diretta su base numerica, sono stati espressi attraverso un giudizio qualitativo. Il giudizio qualitativo è poi descritto attraverso una scala quantitativa, riportata in Tabella 1, seguendo l'approccio utilizzato da Roy et al. (1986).

Tab. 1 - Scala quantitativa di definizione del giudizio per i criteri qualitativi.

Tab. 1 - Quantitative scale to evaluate the qualitative criteria.

Perfect	Very good	Good	More or less good	Moderate	More or less bad	Bad	Very Bad	Extremely bad
9	8	7	6	5	4	3	2	1

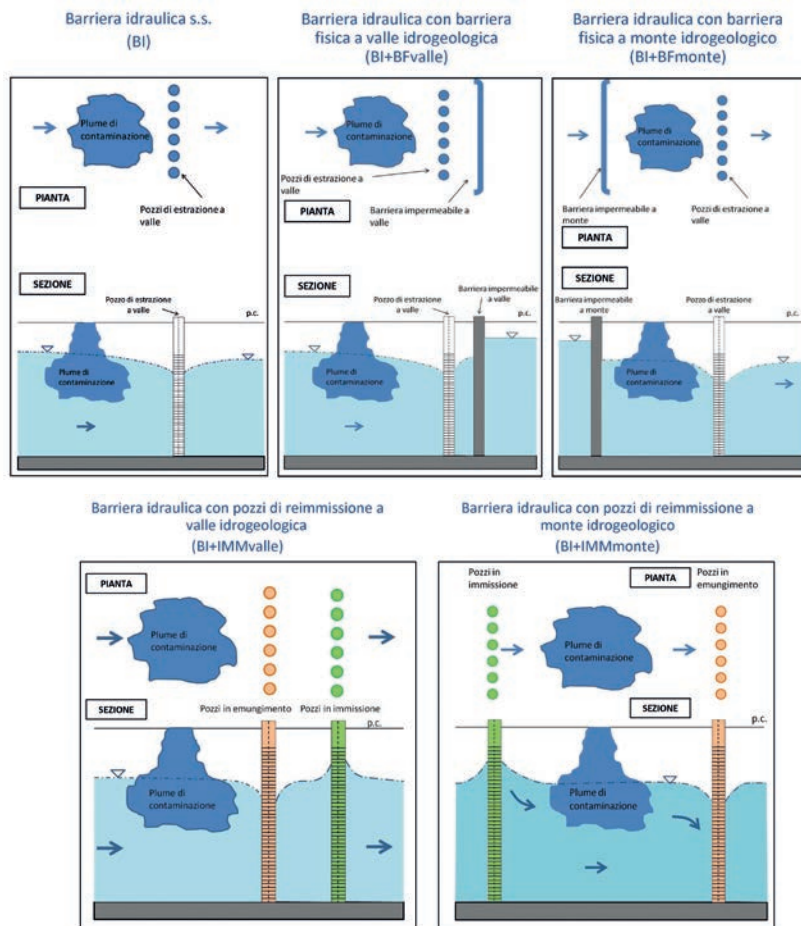


Fig. 3 - Alternative progettuali. Nell'ordine da sinistra a destra e dall'alto in basso (in alto vista in pianta e in basso in sezione):

- pozi di emungimento costituenti la barriera idraulica (modificata da Di Molfetta e Sethi, 2012);
- pozi di estrazione affiancati da una barriera impermeabile a valle (modificata da Di Molfetta e Sethi, 2012);
- pozi in estrazione affiancati da una barriera impermeabile a monte (modificata da La Grega et al., 1993);
- pozi di estrazione affiancati da un sistema di pozzi di immissione a valle dell'area contaminata;
- pozi di estrazione affiancati da un sistema di pozzi di immissione a monte dell'area contaminata.

Fig. 3 - Alternative scenarios. In order from left to right and top to bottom (plan view at the top and cross-section at bottom):

- pumping wells constituting the hydraulic barrier (modified by Di Molfetta and Sethi, 2012);
- pumping wells with downgradient impermeable barrier (modified by Di Molfetta and Sethi, 2012);
- pumping wells with upgradient impermeable barrier (modified by La Grega et al., 1993);
- pumping wells with a system of downgradient contaminated area injection wells;
- pumping wells with a system of upgradient contaminated area injection wells.

Essi sono:

- costo di realizzazione delle opere (numerico)
- costo di gestione delle opere (numerico)
- fattibilità tecnica (qualitativo)
- impatto sul bilancio idrico (numerico)
- contrasto alla salinizzazione dell'acquifero indotta dal sistema di barrieramento (qualitativo)
- contrasto alla perdita di efficienza legata alla vicinanza con limiti idrodinamici a flusso infinito (qualitativo)
- tempistiche di bonifica (numerico)
- garanzia di operatività (qualitativo)

Costo di realizzazione delle opere

Il costo di realizzazione delle opere in esame è stato calcolato, a partire dai dati sito-specifici per quanto riguarda il sistema di barriera idraulica e il relativo impianto di trattamento acque. In particolare, i dati disponibili hanno permesso di distinguere le seguenti voci:

- costi dei singoli pozzi di emungimento, inclusivi delle strumentazioni necessarie (pompe e attrezzature elettromeccaniche);
- costi relativi alla realizzazione dell'impianto di trattamento suddivisi in:
 - costi fissi realizzativi, inclusivi delle opere civili (basamenti, coperture, struttura di contenimento dell'impianto);

- costi variabili in funzione della portata di acqua da trattare, legati maggiormente alla tipologia di trattamento e alle opere che sono legate alle portate da gestire (vasche, filtri, pompe, torri, etc). Tali costi sono stati rapportati alla portata per cui è stato realizzato l'impianto (20 mc/h), permettendo di ricavare un costo per mc/h di acqua da trattare;

- costi del sistema di collettamento delle acque dai pozzi all'impianto comprensivo di opere civili.

I costi realizzativi dei pozzi di immissione sono stati calcolati a partire dal costo dei pozzi di emungimento, incrementando tale valore di 10,000.00 euro a causa del maggior diametro necessario e dei differenti allestimenti impiantistici.

Il costo delle barriere fisiche è stato calcolato in funzione dei metri quadri effettivi delle opere da realizzare. Per quanto riguarda il costo per metro quadro è stato utilizzato il dato medio disponibile dal Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR), organismo federale degli Stati Uniti d'America, che riunisce tutte le competenze in tema di bonifiche dei siti contaminati dei maggiori Enti Governativi quali EPA, USGS, US Navy, US Army, US Air Force, US Energy Dept., NASA. Dal database, elaborato nell'ambito di tale programma di cooperazione, è possibile evidenziare un costo dei sistemi di barrieramento, variabile tra 540 US\$ e 750 US\$ per metro quadro, la cui media è pari a 645 US\$, fatti corrispondere per semplicità di calcolo a 500 euro.

Le stime relative ai quantitativi di acqua da emungere o realizzare con il codice FEFLOW® (Diersch, 2005), simulando i vari scenari sono state eseguite tramite l'utilizzo di un modello numerico 3D del flusso idrico in stato transitorio, i vari scenari. In Tabella 2 sono riportati i dati utilizzati per l'analisi relativa al costo di realizzazione dell'opera.

Tab. 2 - Costi di realizzazione dell'opera.

Tab. 2 - Building costs.

Barriera idraulica s.s. (BI)				
<i>Descrizione</i>	<i>u.m.</i>	<i>Costo unitario (euro)</i>	<i>n</i>	<i>TOT</i>
Costi pozzi di emungimento inclusivi della strumentazione	cad.	30,000.00	8	240,000.00
Costi fissi impianto	corpo	1,000,000.00	1	1,000,000.00
Costi di trattamento annui in funzione della portata	mc/h	80,000.00	20	1,600,000.00
Costi delle linee di collettamento	corpo	100,000.00	1	100,000.00
TOTALE				2,940,000.00

Barriera idraulica con barriera fisica a valle idrogeologica (BI+BFvalle)				
<i>Descrizione</i>	<i>u.m.</i>	<i>Costo unitario (euro)</i>	<i>N</i>	<i>TOT</i>
Costi pozzi di emungimento inclusivi della strumentazione	cad.	30,000.00	5	150,000.00
Costi fissi impianto	corpo	1,000,000.00	1	1,000,000.00
Costi di trattamento annui in funzione della portata	mc/h	80,000.00	10	800,000.00
Costi delle linee di collettamento	corpo	100,000.00	1	100,000.00
Realizzazione barriera fisica	mq	500.00	7000	3,500,000.00
TOTALE				5,550,000.00

Barriera idraulica con barriera fisica a monte idrogeologico (BI+BFmonte)				
<i>Descrizione</i>	<i>u.m.</i>	<i>Costo unitario (euro)</i>	<i>n</i>	<i>TOT</i>
Costi pozzi di emungimento inclusivi della strumentazione	cad.	30,000.00	8	240,000.00
Costi fissi impianto	corpo	1,000,000.00	1	1,000,000.00
Costi di trattamento annui in funzione della portata	mc/h	80,000.00	15	1,200,000.00
Costi delle linee di collettamento	corpo	100,000.00	1	100,000.00
Realizzazione barriera fisica	mq	500.00	7000	3,500,000.00
TOTALE				6,040,000.00

Barriera idraulica con pozzi di reimmissione a valle idrogeologica (BI+IMMvalle)				
<i>Descrizione</i>	<i>u.m.</i>	<i>Costo unitario (euro)</i>	<i>n</i>	<i>TOT</i>
Costi pozzi di emungimento inclusivi della strumentazione	cad.	30,000.00	8	240,000.00
Costi fissi impianto	corpo	1,000,000.00	1	1,000,000.00
Costi di trattamento annui in funzione della portata	mc/h	80,000.00	20	1,600,000.00
Costi delle linee di collettamento	corpo	100,000.00	2	200,000.00
Costi pozzi di immissione inclusivi della strumentazione	cad.	40,000.00	8	320,000.00
TOTALE				3,360,000.00

Barriera idraulica con pozzi di reimmissione a monte idrogeologico (BI+IMMmonte)				
<i>Descrizione</i>	<i>u.m.</i>	<i>Costo unitario (euro)</i>	<i>n</i>	<i>TOT</i>
Costi pozzi di emungimento inclusivi della strumentazione	cad.	30,000.00	8	240,000.00
Costi fissi impianto	corpo	1,000,000.00	1	1,000,000.00
Costi di trattamento annui in funzione della portata	mc/h	80,000.00	20	1,600,000.00
Costi delle linee di collettamento	corpo	100,000.00	2	200,000.00
Costi pozzi di immissione inclusivi della strumentazione	cad.	40,000.00	8	320,000.00
TOTALE				3,360,000.00

Tab. 3 - Tabella riassuntiva dei risultati per il parametro "Costo di realizzazione.

Tab. 3 - Summary of the results for the parameter "Building costs".

CRITERIO	Dir	Soglia di indifferenza	BI	BI+BFvalle	BI+BFmonte	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte
Costo implementazione	Min	200,000	2,940,000	5,550,000	6,040,000	3,360,000	3,360,000

I valori del criterio Costo di realizzazione per ogni scenario sono riassunti in Tabella 3.

Il valore della soglia di indifferenza è stato posto pari a 200.000 euro, a significare che due scenari che presentano una differenza di costo minore di tale soglia sono considerati indifferenti. Tale differenza, comparata con il valore assoluto delle opere, non giustifica infatti una preferenza di uno scenario rispetto all'altro sulla base del solo criterio di costo.

Costo gestione delle opere

Il costo di gestione delle opere rappresenta il costo necessario per operare e mantenere il sistema barriera per un anno ed è stato calcolato, a partire dai dati sito-specifici disponibili per il sistema di barriera idraulica e il relativo impianto di trattamento acque. In particolare, i dati disponibili hanno permesso di distinguere le seguenti voci:

- costi di manutenzione annuale dei singoli pozzi;
- costi annuali di gestione dell'impianto di trattamento

suddivisi in:

- costi fissi legati alla manutenzione della struttura, delle opere civili e delle attrezzature strumentali;
- costi variabili in funzione della portata di acqua da trattare, legati principalmente agli additivi e ai componenti consumabili (carboni attivi, etc) necessari per il trattamento.

Si è assunto che la manutenzione dei pozzi di emungimento e di immissione abbia un costo equivalente e che non siano presenti costi di manutenzione annuale per le barriere fisiche. Ogni manutenzione legata a tali opere, in virtù delle loro specifiche caratteristiche costruttive e di ubicazione (sotterranea), viene considerata di tipo straordinario e di orizzonte temporale differente da quello da considerare in fase decisionale iniziale. In Tabella 4 e 5 sono riportati i dati utilizzati per l'analisi relativa al costo di gestione delle opere.

Tab. 4 - Costi di gestione. (continua a pagina seguente)

Tab. 4 - Maintenance costs. (continued on XX page)

Barriera idraulica s.s. (BI)				
Descrizione	u.m.	Costo unitario (euro)	n	TOT
Costo manutenzione annuale pozzi	cad.	10,000.00	8	80,000.00
Costi fissi annui di manutenzione impianto	corpo	100,000.00	1	100,000.00
Costi annui di gestione dell'impianto di trattamento in funzione della portata	mc/h	38,000.00	20	760,000.00
TOTALE				940,000.00

Barriera idraulica con barriera fisica a valle idrogeologica (BI+BFvalle)				
Descrizione	u.m.	Costo unitario (euro)	n	TOT
Costo manutenzione annuale pozzi	cad.	10,000.00	8	80,000.00
Costi fissi annui di manutenzione impianto	corpo	100,000.00	1	100,000.00
Costi annui di gestione dell'impianto di trattamento in funzione della portata	mc/h	38,000.00	10	380,000.00
TOTALE				560,000.00

Barriera idraulica con barriera fisica a monte idrogeologico (BI+BFmonte)				
Descrizione	u.m.	Costo unitario (euro)	n	TOT
Costo manutenzione annuale pozzi	cad.	10,000.00	8	80,000.00
Costi fissi annui di manutenzione impianto	corpo	100,000.00	1	100,000.00
Costi annui di gestione dell'impianto di trattamento in funzione della portata	mc/h	38,000.00	15	570,000.00
TOTALE				750,000.00

segue Tab. 4 - Costi di gestione.

below Tab. 4 - Maintenance costs.

Barriera idraulica con pozzi di reimmissione a valle idrogeologica (BI+IMMvalle)				
Descrizione	u.m.	Costo unitario (euro)	n	TOT
Costo manutenzione annuale pozzi	cad.	10,000.00	16	160,000.00
Costi fissi annui di manutenzione impianto	corpo	100,000.00	1	100,000.00
Costi annui di gestione dell'impianto di trattamento in funzione della portata	mc/h	38,000.00	20	760,000.00
TOTALE				1,020,000.00

Barriera idraulica con pozzi di reimmissione a monte idrogeologico (BI+IMMmonte)				
Descrizione	u.m.	Costo unitario (euro)	n	TOT
Costo manutenzione annuale pozzi	cad	10,000.00	16	160,000.00
Costi fissi annui di manutenzione impianto	corpo	100,000.00	1	100,000.00
Costi annui di gestione dell'impianto di trattamento in funzione della portata	mc/h	38,000.00	20	760,000.00
TOTALE				1,020,000.00

I valori del criterio Costo di gestione delle opere per ogni scenario sono riassunti in Tabella 5.

Tab. 5 - Tabella riassuntiva dei risultati per il parametro "Costo gestione".

Tab. 5 - Summary of the results for the parameter "Maintenance costs".

CRITERIO	Dir	Soglia di indifferenza	BI	BI+BFvalle	BI+BFmonte	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte
Costo implementazione	Min	50,000	940,000	560,000	750,000	1,020,000	1,020,000

Fattibilità tecnica

Il criterio "fattibilità tecnica" definisce la reale fattibilità dell'opera in relazione alle problematiche logistiche, morfologiche e tecniche dell'area su cui si va ad operare e agli impatti indotti dalle varie opere su eventuali cicli produttivi in essere.

La valutazione del criterio in esame è stata effettuata su base qualitativa utilizzando la scala numerica descritta in Tabella 1, assumendo che la necessità di realizzare un numero maggiore di opere vada a complicare il posizionamento delle stesse (e quindi il valore maggiore del criterio è assegnato alla sola barriera idraulica in virtù della buona adattabilità alla logistica del sito ed al minore ingombro). Il valore minore viene attribuito allo scenario di integrazione tra barriera idraulica e barriera fisica di valle, in relazione alla necessità di maggiore spazio per l'implementazione di tali opere, difficilmente compatibile con la logistica del sito, per la compresenza del confine della proprietà, il corso d'acqua e l'ubicazione dei sot-

toservizi presenti. Per quanto riguarda i rimanenti scenari si sono assegnati punteggi intermedi in quanto l'accoppiamento barriera idraulica e barriera fisica di monte, seppur più fattibile dal punto di vista degli spazi presenta problematiche legate all'attraversamento di sottoservizi da parte della barriera fisica; la barriera idraulica unita ad un sistema di reimmissione a valle, non presenta problematiche di sottoservizi, ma è limitata dai ridotti spazi a valle del confine della proprietà. Da ultimo, lo scenario di barriera idraulica con sistema di reimmissione a monte, risulta maggiormente fattibile, in quanto non ostacolato da sottoservizi o ridotti spazi, ma è sempre meno fattibile della sola barriera in relazione alla necessità di predisporre un fitto reticolo di tubazioni di collettamento delle acque immesse.

I valori del criterio utilizzati per ogni scenario sono riassunti in Tabella 6.

Tab. 6 - Tabella riassuntiva dei risultati per il parametro "Fattibilità tecnica".

Tab. 6 - Summary of the results for the parameter "Technical feasibility".

CRITERIO	Dir	Soglia di indifferenza	BI	BI+BFvalle	BI+BFmonte	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte
Fattibilità tecnica	Max	1	9	3	4	5	7

Impatto sul bilancio idrico

Il criterio è definito come la differenza tra la portata di acqua emunta dalla barriera idraulica e la portata di acqua eventualmente reimmissa nel sistema. Il criterio intende rappresentare il grado di depauperamento dell'acquifero causato dal sistema barriera.

La valutazione del criterio in esame è stata effettuata su base quantitativa stimando le portate per produrre barrieramento attraverso un modello numerico disponibile per il sito. Su tale base si osserva che per gli scenari barriera idraulica, barrie-

ra idraulica con barriera fisica a valle e barriera idraulica con barriera fisica a monte, la stima delle acque emunte è pari, rispettivamente, a 20 mc/h, 10, mc/h e 15 mc/h. Per il caso di barriera idraulica con reimmissione a valle si è stimato un emungimento di 20 mc/h e un reimmissione di 20 mc/h, per cui il valore netto di portata di acqua emunta dall'acquifero è pari a 0 mc/h. Da ultimo, per lo scenario di barriera idraulica con reimmissione a monte si è stimato un emungimento di 20 mc/h e una portata di reimmissione pari a 16 mc/h, per un valore netto di portata emunta dall'acquifero pari a 4 mc/h.

I risultati per ogni scenario sono riassunti in Tabella 7.

Tab. 7 - Tabella riassuntiva dei risultati per il parametro "Impatto sul bilancio idrico".

Tab. 7 - Summary of the results for the parameter "Impact on the Water balance".

CRITERIO	Dir	Soglia di indifferenza	BI	BI+BFvalle	BI+BFmonte	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte
Impatto sul bilancio idrico	Min	2	20	10	15	0	4

Contrasto alla salinizzazione indotta dall'opera di barrieramento

La presenza di questo criterio è finalizzata a valutare l'impatto di un sistema di barrieramento su di un limite idrodinamico ad elevata salinità. In presenza di una fonte di acqua salina in prossimità del sistema barriera si osserva, infatti, una modificazione al campo di moto naturale dell'acquifero che può creare problematiche di ingressione ed upconing dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata verso i sistemi barriera. Sistemi quali le barriere fisiche o le barriere idrauliche s.s. possono indurre tali problematiche, mentre sistemi congiunti

di pozzi di emungimento e pozzi di immissione sono idonei, normalmente, a contenere o contrastare tali fenomeni.

Per il criterio in esame risulta raccomandabile l'utilizzo di modelli numerici densità dipendenti al fine di effettuare accurate valutazioni circa l'influenza di ogni alternativa sulla salinizzazione dell'acquifero. Per il caso in esame, poiché nel sito non esistono problematiche di salinizzazione in prossimità del sistema barriera, a tutti gli scenari è stato assegnato il valore 9, volendo con questo indicare la non influenza del criterio ai fini dell'analisi.

I valori per ogni scenario sono riassunti in Tabella 8.

Tab. 8 - Tabella riassuntiva dei risultati per il parametro "Contrasto alla salinizzazione".

Tab. 8 - Summary of the results for the parameter "Contrast to salinization".

CRITERIO	Dir	Soglia di indifferenza	BI	BI+BFvalle	BI+BFmonte	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte
Contrasto alla salinizzazione	Max	1	9	9	9	9	9

Contrasto alla perdita di efficienza legata alla vicinanza con limiti idrodinamici a flusso infinito

Questo criterio è stato definito per valutare quanto il sistema di barrieramento sia soggetto alla perdita di efficienza legata alla presenza, in prossimità della barriera, di limiti idrodinamici che costituiscano una alimentazione pressoché infinita. Ciò comporta infatti la necessità di emungere un maggiore quantitativo di acqua per ottenere il medesimo effetto di abbassamento sull'acquifero e il conseguente effetto di barrieramento. In relazione alla presenza di un corso

d'acqua prossimo all'ubicazione del sistema barriera è stato dato un punteggio elevato all'unico sistema che consente di contrastare la perdita di efficienza dell'opera in presenza di un limite idrodinamico a flusso infinito. Per tutti gli altri sistemi è necessario considerare una perdita di efficienza, valutata in egual misura nel caso in esame.

La valutazione del criterio è stata effettuata su base qualitativa utilizzando la scala numerica descritta precedentemente.

I valori del criterio per ogni scenario sono riassunti in Tabella 9.

Tab. 9 - Tabella riassuntiva dei risultati per il parametro "Contrasto alla perdita di efficienza legata alla vicinanza con limiti idrodinamici a flusso infinito".

Tab. 9 - Summary of the results for the parameter "Contrast to efficiency loss related to recharging boundary".

CRITERIO	Dir	Soglia di indifferenza	BI	BI+BFvalle	BI+BFmonte	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte
Contrasto alla perdita di efficienza legata alla vicinanza con limiti idrodinamici a flusso infinito	Max	1	3	9	3	3	3

Tempistiche di bonifica

Il criterio in questione (numerico) indica la previsione temporale (in anni) di raggiungimento dei limiti di concentrazione accettabile, ad esempio nei punti di conformità (POC) previsti dal D. Lgs. 152/06.

I valori per ogni scenario sono riassunti in Tabella 10.

Il valore della soglia di indifferenza è stato posto pari a 2 anni, in relazione al fatto che al di sotto di tale valore non è considerabile preferibile uno scenario rispetto ad un altro unicamente per il criterio considerato.

Tab. 10 - Tabella riassuntiva dei risultati per il parametro "Tempistiche di bonifica".

Tab. 10 - Summary of the results for the parameter "Remediation timing".

CRITERIO	Dir	Soglia di indifferenza	BI	BI+BFvalle	BI+BFmonte	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte
Tempistiche di bonifica	Min	2	10	8	15	8	5

Garanzia di operatività

Questo criterio serve ad indicare il grado di sicurezza che un sistema di barriera possiede anche in caso di problematiche di gestione o interruzione delle attività di manutenzione evidenziando, ad esempio, la possibilità che malfunzionamenti della barriera inducano un deflusso di acque contaminate a valle del sistema. I punteggi maggiori sono stati assegnati agli scenari comprendenti le barriere fisiche; questi elementi offrono, infatti, maggiori garanzie di operatività poiché, anche in presenza di malfunzionamenti, costituiscono un presidio alla contaminazione, o direttamente per contrasto di permeabilità a valle o per rallentamento del flusso da monte. Ai sistemi misti di pozzi di emungimento e immissione sono stati, invece, assegnati i punteggi minori in relazione

alle maggiori incertezze legate alla loro corretta gestione, particolarmente soggetta ad errore umano. Uno scarso controllo nella regolazione degli emungimenti e nell'osservazione degli abbassamenti/innalzamenti indotti può comportare, di fatto, la compromissione dell'effetto barriera del sistema o, nei casi peggiori, andare anche ad incrementare problematiche ambientali connesse all'intrusione salina. Punteggio intermedio è stato assegnato al sistema di sola barriera idraulica di più semplice controllo e automatizzazione.

La valutazione del criterio in esame è stata effettuata su base qualitativa utilizzando la scala numerica descritta precedentemente.

I valori del criterio sono riassunti in Tabella 11.

Tab. 11 - Tabella riassuntiva dei risultati per il parametro "Garanzia di operatività".

Tab. 11 - Summary of the results for the parameter "Operation guarantee".

CRITERIO	Dir	Soglia di indifferenza	BI	BI+BFvalle	BI+BFmonte	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte
Garanzia di operatività	Max	1	7	9	9	5	4

I valori relativi a ciascun criterio per ogni scenario, sono sintetizzati nella matrice multi-criterio degli impatti (Tabella 12).

Tab. 12 - Matrice Multi-Criterio degli Impatti. Il campo Dir indica se il criterio indicato va massimizzato o minimizzato.

Tab. 12 - Multi-Criteria Impact Matrix. The Dir field indicates if the specified criterion needs to be maximized or minimized.

CRITERIO	Dir	Soglia di indifferenza	BI	BI+BFvalle	BI+BFmonte	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte
Costo implementazione	Min	200,000	2,940,000	5,550,000	6,040,000	3,360,000	3,360,000
Costo gestione	Min	50,000	940,000	560,000	750,000	1,020,000	1,020,000
Fattibilità tecnica	Max	1	9	3	4	5	7
Impatto sul bilancio idrico	Min	2	20	10	15	0	4
Contrasto alla salinizzazione	Max	1	9	9	9	9	9
Contrasto alla perdita di efficienza legata alla vicinanza con limiti idrodinamici a flusso infinito	Max	1	3	9	3	3	3
Tempistiche di bonifica	Min	2	10	8	15	8	5
Garanzia di operatività	Max	1	7	9	9	5	4

I risultati descritti nella matrice sono anche riportati in Figura 4 sotto forma di grafico Radar, al fine di poter meglio osservare la relazione tra gli scenari progettuali e i singoli criteri. Dal grafico è possibile osservare le differenti risposte tra gli scenari analizzati, in relazione al valore o punteggio assegnato per ogni scenario per ciascun criterio considerato. Ad esempio, si osserva che l'impatto sul criterio Bilancio idrico è particolarmente alto per lo scenario barriera idraulica ed è invece nullo per lo scenario barriera idraulica con re-immissione a valle. Inoltre, si può notare il differente Costo di realizzazio-

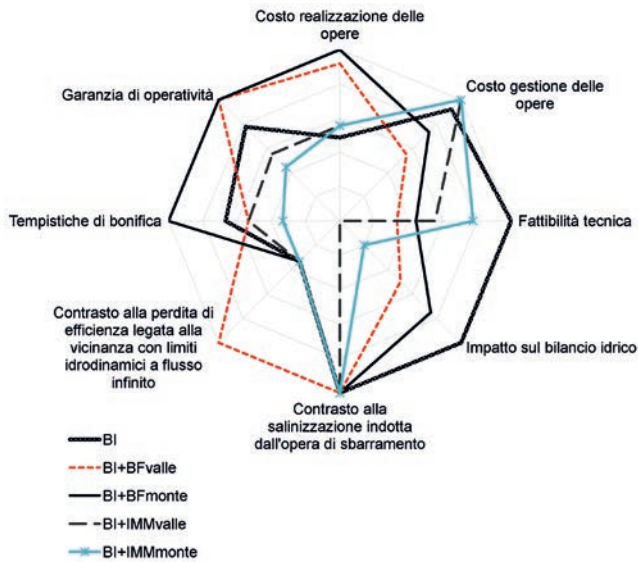


Fig. 4 - Grafico radar relativo alla Matrice Multi-Criterio degli Impatti.

Fig. 4 - Multi-Criteria impact graphic.

ne degli scenari, maggiormente elevato per la barriera idraulica con barriera fisica a valle/monte e ridotto per la semplice barriera idraulica.

Ai dati così prodotti si è applicato il modello CKYL per la generazione dell'*Outranking Matrix* (Tabella 13). Il modello prende in considerazione tutti i criteri considerati e permette di ottenere un confronto tra coppie di alternative progettuali (scenari) considerando l'integrazione di tutti i criteri in esame. È importante osservare che l'applicazione del modello CKYL è stata effettuata considerando un peso uguale a 1 per ogni criterio considerato, assegnando pertanto la medesima importanza a ciascuno dei criteri. Nella matrice di Tabella 13, ciascuno scenario è comparato con gli altri scenari e il valore esplicitato nelle celle rappresenta il punteggio ottenuto dall'applicazione dell'Eq. 3 che permette la valutazione di ciascun scenario considerando tutti i criteri in esame.

La massima probabilità di *ranking* è quella supportata dal maggior numero di criteri per ogni confronto tra singole coppie di alternative, sommando tutte le possibili coppie di alternative, come indicato nelle Eq. 4 e 5. L'*Outranking Matrix* ha permesso, quindi, di generare tutti i possibili ordinamenti delle alternative progettuali, posizionate in relazione al *ranking* ottenuto, definendo, quindi, quali sono gli scenari che hanno avuto un maggior numero di preferenze utilizzando i criteri selezionati. Essendo una matrice 5x5, le possibili combinazioni di scenari risultano essere pari al fattoriale di 5 (N!), cioè 120. Tali combinazioni vengono riportate nell'estratto di Tabella 14 in ordine di preferenza, sulla base di un punteggio calcolato attraverso la formula di Eq. 4.

La Tabella 14 elenca un estratto (valori con punteggio più elevato e più basso) di tutti i 120 possibili ordinamenti del-

Tab. 13 - Outranking Matrix.

Tab. 13 - Outranking Matrix.

	BI	BI+BFvalle	BI+BFmonte	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte
BI	0.0000	0.3125	0.5000	0.6250	0.6250
BI+BFvalle	0.6875	0.0000	0.7500	0.5000	0.4375
BI+BFmonte	0.5000	0.2500	0.0000	0.3750	0.3750
BI+IMMvalle	0.3750	0.5000	0.6250	0.0000	0.5000
BI+IMMmonte	0.3750	0.5625	0.6250	0.5000	0.0000

Tab. 14 - Elenco di tutte le possibili combinazioni in ordine di *ranking*.

Tab. 14 - List of all the possible combinations in order of ranking.

Id	1°	2°	3°	4°	5°	
1	BI+BFvalle	BI	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte	BI+BFmonte	5.875
2	BI+BFvalle	BI	BI+IMMmonte	BI+IMMvalle	BI+BFmonte	5.875
3	BI+IMMmonte	BI+BFvalle	BI	BI+IMMvalle	BI+BFmonte	5.75
4	BI	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte	BI+BFvalle	BI+BFmonte	5.625
5	BI	BI+IMMmonte	BI+BFvalle	BI+IMMvalle	BI+BFmonte	5.625

[omissis]

119	BI+BFmonte	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte	BI	BI+BFvalle	4.125
120	BI+BFmonte	BI+IMMmonte	BI+IMMvalle	BI	BI+BFvalle	4.125

le alternative progettuali, posizionati in ordine di preferenza, sulla base del punteggio numerico ottenuto sommando i valori dell'*Outranking Matrix* per tutte le coppie di alternative presenti (Eq.4). La sequenza di preferenza che ha ottenuto il punteggio più alto è quella che evidenzia quale sia la soluzione progettuale da preferire.

La metodologia multi criterio ha permesso, quindi, di definire che la realizzazione di una barriera idraulica integrata con una barriera fisica posta a valle idrogeologica risulta essere la migliore opzione progettuale secondo i criteri di valutazione prescelti.

Si noti che tale soluzione non coincide con quanto effettivamente realizzato dai progettisti che, per il caso in esame, hanno deciso di allestire un sistema di semplice barrieramento idraulico (comunque indicata come seconda preferenza pos-

sibile dall'analisi effettuata, quindi comunque nella parte alta del *ranking*, se tutti i criteri hanno lo stesso peso).

Per valutare la risposta della metodologia alle situazioni reali e per comprendere come l'attribuzione di pesi differenti ai singoli criteri possa influenzare il risultato dell'analisi multicriterio, è stata effettuata un'analisi di sensitività modificando il peso di un singolo criterio rispetto al peso dei criteri rimanenti. In particolare si è provveduto ad aumentare ciascun criterio di un numero di volte, variabile da 1,5 a 10, rispetto ai pesi degli altri criteri (i quali sono stati ricalcolati in modo da mantenere la somma dei pesi pari a 1).

L'analisi è stata eseguita su ciascun criterio.

In Tabella 15, Tabella 16, Tabella 17 e Tabella 18 viene riportato un estratto dei risultati.

Tab. 15 - Analisi di sensitività per il criterio "Costo di Realizzazione".

Tab. 15 - Sensitivity analysis for the criterion "Building costs."

Costo di realizzazione							
Numero di volte che il peso del criterio è più alto degli altri pesi	5	BI	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte	BI+BFvalle	BI+BFmonte	
		BI	BI+IMMmonte	BI+IMMvalle	BI+BFvalle	BI+BFmonte	
	2	BI	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte	BI+BFvalle	BI+BFmonte	
		BI	BI+IMMmonte	BI+IMMvalle	BI+BFvalle	BI+BFmonte	
	1.5	BI+BFvalle	BI	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte	BI+BFmonte	
		BI+BFvalle	BI	BI+IMMmonte	BI+IMMvalle	BI+BFmonte	
	1	BI+BFvalle	BI	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte	BI+BFmonte	
		BI+BFvalle	BI	BI+IMMmonte	BI+IMMvalle	BI+BFmonte	
			1°	2°	3°	4°	5°
	RANKING						

Tab. 16 - Analisi di sensitività per il criterio "Fattibilità Tecnica".

Tab. 16 - Sensitivity analysis for the criterion "Technical Feasibility".

Fattibilità Tecnica							
Numero di volte che il peso del criterio è più alto degli altri pesi	5	BI	BI+IMMmonte	BI+IMMvalle	BI+BFmonte	BI+BFvalle	
	2	BI	BI+IMMmonte	BI+IMMvalle	BI+BFvalle	BI+BFmonte	
	1.5	BI+BFvalle	BI	BI+IMMmonte	BI+IMMvalle	BI+BFmonte	BI+BFvalle
		BI	BI+IMMmonte	BI+IMMvalle	BI+BFvalle	BI+BFmonte	BI+BFvalle
		BI+BFvalle	BI	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte	BI+BFmonte	BI+BFvalle
	1	BI+BFvalle	BI	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte	BI+BFmonte	BI+BFvalle
		BI+BFvalle	BI	BI+IMMmonte	BI+IMMvalle	BI+BFmonte	BI+BFvalle
			1°	2°	3°	4°	5°
	RANKING						

Tab. 17 - Analisi di sensitività per il criterio "Tempistiche di bonifica".

Tab. 17 - Sensitivity analysis for the criterion "Remediation timing".

Tempistiche di bonifica							
Numero di volte che il peso del criterio è più alto degli altri pesi	5	BI+IMMmonte	BI+BFvalle	BI+IMMvalle	BI	BI+BFmonte	
		BI+IMMmonte	BI+IMMvalle	BI+BFvalle	BI	BI+BFmonte	
	2	BI+IMMmonte	BI+BFvalle	BI	BI+IMMvalle	BI+BFmonte	
	1.5	BI+BFvalle	BI	BI+IMMmonte	BI+IMMvalle	BI+BFmonte	
		BI+IMMmonte	BI+BFvalle	BI	BI+IMMvalle	BI+BFmonte	
	1	BI+BFvalle	BI	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte	BI+BFmonte	
		BI+BFvalle	BI	BI+IMMmonte	BI+IMMvalle	BI+BFmonte	
		1°	2°	3°	4°	5°	
	RANKING						

Tab. 18 - Analisi di sensitività per il criterio "Garanzia di operatività".

Tab. 18 - Sensitivity analysis for the criterion "Operation guarantee".

Garanzia di operatività						
Numero di volte che il peso del criterio è più alto degli altri pesi	5	BI+BFvalle	BI+BFmonte	BI	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte
	2	BI+BFvalle	BI	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte	BI+BFmonte
	1.5	BI+BFvalle	BI	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte	BI+BFmonte
	1	BI+BFvalle	BI	BI+IMMvalle	BI+IMMmonte	BI+BFmonte
		BI+BFvalle	BI	BI+IMMmonte	BI+IMMvalle	BI+BFmonte
		1°	2°	3°	4°	5°
RANKING						

Si evidenzia come l'attribuzione di un peso due volte maggiore al criterio "Costo di realizzazione" rispetto agli altri, muti la posizione preferenziale da BI+BFvalle a sola BI, evidenziando quindi, in modo conseguente, il peso differente che i progettisti hanno dato alla componente economica rispetto alle altre componenti di tipo ambientale o tecnico.

Il criterio "Fattibilità Tecnica" presenta in modo evidente l'importanza che può avere tale parametro nella scelta progettuale da attuare. Raddoppiando il peso di tale criterio, si ottiene una netta predominanza della soluzione progettuale di solo barrieramento idraulico, che è quella che presenta le minori problematiche logistiche in sito.

Per il criterio Tempistiche di bonifica mostra in modo evidente il peso che può avere tale parametro nella scelta progettuale da attuare si possono fare le seguenti considerazioni. Già aumentando di 1,5 volte il peso di tale criterio, si ottiene una predominanza della soluzione progettuale di barrieramento

idraulico accoppiato a sistema di immissione a monte (BI+IMMmonte), che è la soluzione che riduce maggiormente i tempi di bonifica, favorendo un disinquinamento più rapido dell'acquifero contaminato.

Nel caso del criterio Garanzia di operatività si può solo affermare che l'aumento di peso del parametro non fa che ribadire il risultato della prima analisi, che ha posto in prima posizione l'alternativa progettuale che maggiormente risulta efficace, anche in caso di malfunzionamento del sistema di emungimento.

Da ultimo è possibile osservare che l'opzione progettuale di barrieramento idraulico accoppiato a barriera fisica posta a monte idrogeologico (BI+BFmonte) risulta quasi sempre l'ultima opzione progettuale derivante dall'analisi, probabilmente in relazione agli alti costi di realizzazione a fronte di uno scarso vantaggio tecnico, soprattutto legato all'allungamento delle tempistiche di bonifica.

Conclusioni

Il presente studio ha affrontato il tema delle barriere idrauliche e idraulico-fisiche, descrivendo una metodologia di supporto alle decisioni implementata per valutare quale sia la tipologia di barrieramento maggiormente idonea ad un caso in esame.

Le opere di barrieramento degli acquiferi costituiscono, infatti, un diffuso strumento di contenimento e bonifica degli acquiferi, in uso da decenni. L'evoluzione tecnologica ha permesso di aumentare le tipologie di barrieramento utilizzabili, imponendo, tuttavia, la necessità di selezionare in modo opportuno la tecnologia maggiormente adeguata per i casi in esame, normalmente in funzione dell'assetto idrogeologico, delle caratteristiche della contaminazione, e di fattori tecnologici, socio-economici e ambientali. Ciò che però non si rileva in letteratura è una metodologia di screening iniziale e di selezione, che possa integrare le informazioni derivanti da criteri così differenti, mantenendo la maggiore oggettività possibile. Escludendo le opere minori, legate a piccoli insediamenti industriali, la scelta della tipologia di opera da realizzare risulta davvero difficile senza un metodo sistematico e il più possibile oggettivo, che possa, quanto meno, mettere in luce, numericamente, l'influenza che i vari fattori hanno, direttamente o indirettamente, sulla scelta. Tale problematica è tanto più evidente in aree ove sono presenti acquiferi produttivi, ove l'estensione delle zone impattate è considerevolmente ampia, ove sono preesistenti impianti industriali, fuori terra e sottoterra, che possono interferire con le opere di barrieramento, ove l'equilibrio dell'acquifero può essere perturbato in modo persistente e ove sono presenti interessi economici, sociali e ambientali spesso contrastanti.

Utilizzando i principi dell'analisi multi-criterio, è stata suggerita una metodologia di analisi riproducibile, basata sulla valutazione di differenti scenari progettuali, attraverso otto differenti criteri, di tipo sia tecnico che socio-economico e ambientale. La medesima metodologia può essere comunque applicata, modificando o estendendo sia i criteri che le alternative progettuali, in funzione delle specifiche necessità e caratteristiche dell'area in esame.

L'applicazione ad un caso reale in cui è già presente un'opera di barrieramento ha permesso di definire la migliore alternativa progettuale sulla base dei criteri utilizzati ed evidenziare le differenze tra i risultati dell'analisi multi-criterio e le scelte effettuate nella realtà dai progettisti. Il confronto tra le scelte attuate dai progettisti ed i risultati dell'analisi multi-criterio, nello specifico caso in esame, ha evidenziato una differenza tra il sistema di barrieramento realizzato e il sistema risultante come migliore dall'analisi, quando tutti i criteri scelti hanno la stessa importanza relativa. L'applicazione di una analisi di sensitività, svolta sull'effetto indotto dal peso di ciascun criterio sul risultato dell'analisi, ha permesso di trarre informazioni inerenti i singoli criteri. L'osservazione dell'effetto indotto dal peso assegnato ad ogni criterio, ha permesso di evidenziare il fattore su cui i progettisti hanno prioritariamente posto le basi per la scelta del tipo di barrieramento, sbilanciando l'analisi in una direzione ben definita.

BIBLIOGRAFIA

- Arrow K. J. and Raynaud H., 1986. *Social Choice and Multicriterion Decision Making*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Bayer P., M. Finkel and G. Teutsch, 2004. Hydraulic performance of a combination of pump-and-treat and physical barrier systems for contaminant plume management. *Ground Water* 42, no. 6: 856-867.
- Bayer P. and Finkel M., 2006. Conventional and Combined Pump-and-Treat Systems Under Nonuniform Background Flow. *Ground Water* 44. No. 2: 234-243.
- Borzoni M., 2011. Integrated assessment of renewable energies for decision making: A two-case analysis. PhD thesis. Scuola Superiore Sant'Anna Pisa (http://www.phdmanagement.sssup.it/documenti/awarded/borzoni_thesis.pdf)
- Borzoni M., Rizzi F. and Frey M., 2014. Geothermal Power in Italy: a Social Multi-Criteria Evaluation. *Renewable Energy*, 69, 60-73 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.026>)
- Bowen J. D. and K. D. Johnson, 1993. Pumping or slurry walls—Which works best for ground water containment? In *Engineering Hydrology, Proceedings of the Symposium, July 25-30, San Francisco, California*, ed. Chin Y. Kou, 808-813. New York: American Society of Civil Engineers.
- Diersch, H.-J.G. (2005): FEFLOW finite element subsurface flow and transport simulation system, Reference Manual, User's Manual and White Papers Vol. I, II, III, IV, WASY – Institute for Water Resources Planning and Systems Research, Berlin.
- Di Molfetta A., Sethi R. and Maldì L., 2002. Valutazione dell'efficienza degli interventi di Pump and Treat. *Siti Contaminati*, vol. 6; p. 8-16
- Di Molfetta A. and Rajandrea Sethi, 2012. *Ingegneria degli acquiferi*. Springer Verlag Italia.
- Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR). <http://www.frtr.gov/>
- Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M. (2005), *Multiple-Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys*. Springer International Series in Operations Research and Management Science, Springer, New York.
- Gamboa G. and Munda G., 2007. The problem of windfarm location: a social multi-criteria evaluation framework. *Energy Policy*, 35 (3), 1564-1583.
- Janssen R. and Munda G., 1999. Multi-criteria methods for quantitative, qualitative and fuzzy evaluation problems. In: van den Bergh, J. (Ed.), *Handbook of Environmental and Resource Economics*. Edward Elgar, Cheltenham, pp. 837-852.
- Kemeny J., 1959. *Mathematics without numbers*. Daedalus, 88:571-591.
- La Grega M. D., Buckingham P. L. and Evans J. C., 1993. *Hazardous waste management*. McGraw-Hill, New York.
- McDonald M. G. and Harbaugh A. W., 1984. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey. Open-File Report 83-875, 528 p.
- McDonald M. G. and Harbaugh A. W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1, 586 p.
- Munda G., 1995. Multi-criteria Evaluation in a Fuzzy Environment: Theory and Applications in Ecological Economics. Physica-Verlag, Heiderberg
- Munda, G. & Russi, D. (2008). Social multicriteria evaluation of conflict over rural electrification and solar energy in Spain. *Environment and Planning C*, 26 (4), 712-727.
- Munda, G., 2008. *Social Multi-Criteria Evaluation for a Sustainable Economy*. Springer, Berlin
- Munda G., 2009. A conflict analysis approach for illuminating distributional issues in sustainability policy. *European Journal of Operational Research*, 194 (1), 307-322.
- Roy B., 1996. *Multicriteria Methodology for Decision Analysis*. Kluwer, Dordrecht.
- Tosco T., Di Molfetta A. and Sethi R., 2010. Automatic Delineation of Capture Zones for Pump and Treat Systems: A Case Study in Piedmont. Italy. *Ground Water Monitoring & Remediation* 30, no. 2/ Spring 2010/ pages 46-52.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1997. *Cleaning Up the Nation's Waste Sites: Markets and Technology Trends*. Washington, D.C.: U.S. EPA.
- Young H. P. and Levenglick A., 1978. A consistent extension of Condorcet's election principle, *SIAM. Journal of Applied Mathematics* 35, 285-300.