



DICATA
Università degli Studi
di Brescia



DICAR
Università degli Studi
di Catania



DICEA
Sapienza, Università
di Roma

SiCon 2021
Workshop su: Siti Contaminati. Esperienze negli
interventi di risanamento

11-13 Febbraio 2021

**CONTAMINAZIONE DA SOLVENTI
CLORURATI – BONIFICA IN SITU
MEDIANTE DESORBIMENTO
TERMICO (IT-DSP™ e ET-DSP™)**

Davide Zanchetta ¹⁾, Simone Bruschi ¹⁾, Manuel Bierti ¹⁾,
Raul Mucciolella ¹⁾, Elena Sezenna ²⁾, Sabrina Saponaro ²⁾

¹⁾ Geostream S.r.l., ²⁾ Politecnico di Milano - DICA
m.bierti@geostreamgroup.com

CONTAMINAZIONE DA SOLVENTI – BONIFICA IN SITU MEDIANTE DESORBIMENTO TERMICO (IT-DSP™ e ET-DSP™)

Davide Zanchetta¹, Simone Bruschi¹, Manuel Bierti¹, Raul Mucciolella¹, Elena Sezenna², Sabrina Saponaro²,

¹ Geostream S.r.l., Via Zire s/n, 33010 Magnano in Riviera (UD),

m.bierti@geostreamgroup.com; ² Politecnico di Milano – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, p.za Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano (MI), sabrina.saponaro@polimi.it

Sommario. L'articolo presenta due casi di studio, ove la contaminazione del sottosuolo saturo da solventi clorurati e solventi monoaromatici è in trattamento mediante tecnologie di desorbimento termico in situ. Nel primo caso, localizzato in un paese del nord Europa, è utilizzato l'IT-DSP™ (Inductive-Thermal Dynamic Stripping Process), mentre nel secondo, localizzato in Italia, l'ET-DSP™ (Electro-Thermal Dynamic Stripping Process). In entrambi i siti, caratterizzati dalla presenza anche di litologie fini, il sistema di trattamento termico è abbinato ad un sistema di estrazione multifase (MPE).

Una volta attivato il sistema di riscaldamento, l'aumento di temperatura nel terreno è risultato pressoché costante, paria a circa 1 °C al giorno, fino al raggiungimento della temperatura target di bonifica (tra i 90 e i 100°C). Tra i vantaggi principali di questo metodo di bonifica è sicuramente il breve tempo necessario al raggiungimento degli obiettivi, in genere compreso tra 4 e 6 mesi.

1. INTRODUZIONE

I trattamenti termici in situ per la bonifica di siti inquinanti includono tutti i processi basati sul riscaldamento del terreno mirati a far volatilizzare e vaporizzare i contaminanti (e l'acqua) del terreno insaturo e/o saturo, così che possano essere facilmente estratti mediante sistemi di Soil Vapor Extraction (SVE) e/o Multi-Phase Extraction (MPE). La volatilizzazione di un composto chimico è infatti controllata dalla sua pressione di vapore, che aumenta all'aumentare della temperatura. La vaporizzazione può avvenire anche a temperatura più bassa rispetto a quella di ebollizione del composto puro, grazie alla presenza dell'acqua (ed eventualmente di co-contaminanti), per il fenomeno della co-distillazione. In funzione della temperatura raggiunta nel sottosuolo, comunque, possono innescarsi anche altri meccanismi di rimozione (es., biodegradazione, idrolisi, ossidazione), fenomeni che rendono il desorbimento termico in situ potenzialmente efficace per una vasta varietà di inquinanti volatili e semi-volatili (USACE, 2014).

Nel desorbimento termico in situ, la produzione di calore può avvenire sulla base di differenti meccanismi. Ad esempio, nell'Electrical Resistance Heating (ERH) si sfrutta l'effetto Joule, cioè la dissipazione di energia sotto forma di calore causata dal passaggio di corrente elettrica tra coppie di elettrodi infisse nel terreno, che è conduttore elettrico non ideale. Nel Thermal Conductive Heating (TCH), la sorgente di calore è una superficie metallica, tipicamente a geometria cilindrica, infissa nel terreno e opportunamente portata a elevata temperatura (fino a 1000 °C).

Il trasferimento di calore nel terreno può poi avvenire attraverso vari meccanismi, quali: a) la conduzione, cioè lo scambio di energia termica per contatto diretto tra solidi, liquidi o gas (senza spostamento di materia); b) la convezione, cioè il trasporto di energia per moto di un fluido caldo (causato da gradienti di densità del fluido o artificialmente indotto). In generale, in un processo termico in situ sono attivi più di un meccanismo, ma la convezione è quello principale in terreni ad alta permeabilità (sabbie e ghiaie), mentre la conduzione è dominante in materiali a bassa permeabilità (limi e argille).

L'articolo presenta due casi di studio ove la contaminazione da solventi monoaromatici (BTEX) e naftalene, nel primo, e da solventi clorurati (TCE, PCE, DCE), nel secondo, in entrambe i casi in zona satura del sottosuolo, è in trattamento mediante desorbimento termico in situ. Nel primo caso, localizzato in Svezia, è utilizzato l'IT-DSP™ (Inductive-Thermal Dynamic Stripping Process), mentre nel secondo, localizzato in Italia, l'ET-DSP™ (Electro-Thermal Dynamic Stripping Process). Per entrambi i casi, le timeline di progetto si

“Contaminazione da solventi – Bonifica in situ mediante desorbimento termico (IT-DSP™ e ET-DSP™)”

presentano come molto brevi, specialmente se confrontate ad altri sistemi più tradizionali di bonifica in 5 - 6 mesi, infatti, si prospetta il completamento degli interventi.

2. TECNOLOGIE IT-DSP™ E ET-DSP™

2.1 IT-DSP™

L'IT-DSP™ è una soluzione tecnologica del TCH, ove l'elemento riscaldante è una superficie cilindrica di materiale ferromagnetico (acciaio), portata ad alta temperatura per effetto della perdita di energia causata dalle correnti parassite (di Foucault) in essa indotte dal campo magnetico variabile generato da una bobina alimentata a corrente alternata posizionata all'interno dell'elemento (Figura 1). La dissipazione di energia sotto forma termica è potenziata dal fenomeno di isteresi cui è soggetta la camicia dell'elemento riscaldante (McGee e Vermeulen, 2002).

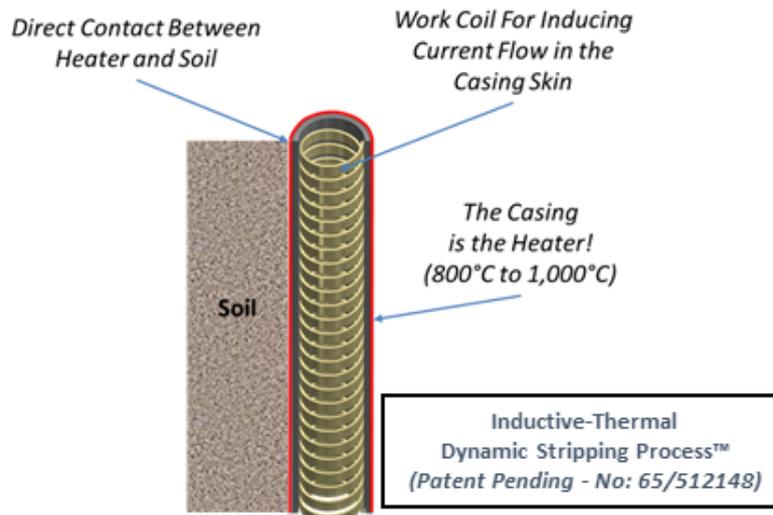


Figura 1. Elemento riscaldante nell'IT-DSP (EIN Presswire, 2021).

2.2 ET-DSP™

L'Electro-Thermal Dynamic Stripping Process è una soluzione tecnologica di ERH. In particolare, una delle caratteristiche peculiari è il sistema di iniezione di acqua nel terreno integrato negli elettrodi deputati alla erogazione della corrente elettrica (Figura 2). Infatti, all'aumentare della temperatura, il terreno tende a disidratarsi, venendo così a ridursi la sua conducibilità elettrica, che viceversa consente la circolazione della corrente alla base del riscaldamento. La circolazione d'acqua consente anche il raffreddamento dell'elettrodo, che resiste fino a temperature dell'ordine di 200 °C.

In entrambe le soluzioni tecnologiche, devono essere posizionati opportunamente pozzi di estrazione SVE o MPE per ottimizzare il trasferimento di calore per convezione e massimizzare la velocità di rimozione degli inquinanti. All'aumentare della temperatura del terreno, in tali pozzi aumenta la raccolta di materiale fine (da argille a sabbie fini) trascinato dal flusso convettivo.

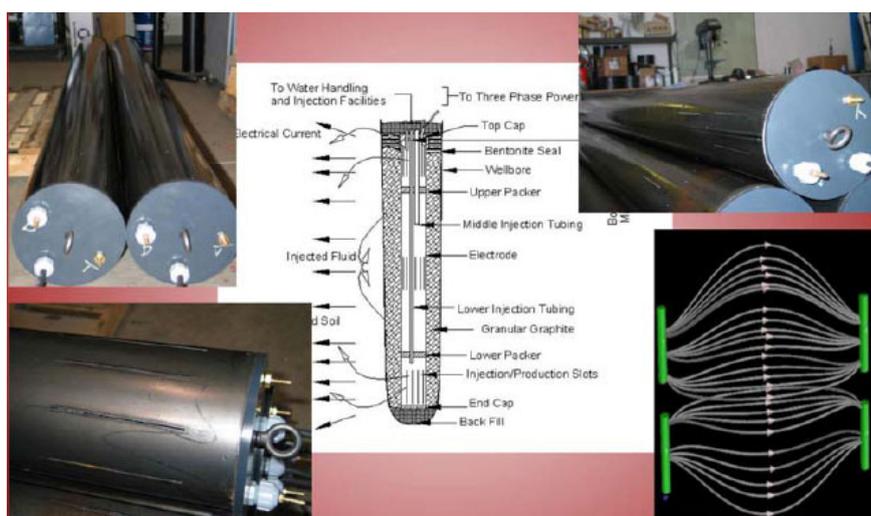


Figura 2. Elettrodi nell'ET-DSP (McGillan e McGee Corp., 2011).

3. CASE STUDY IT-DSP™

Il case study ove è in uso la tecnologia IT-DSP™ è un ex-stabilimento di produzione del gas a partire da combustibili fossili, situato in Svezia, la cui bonifica è legata alla riqualificazione dell'area.

3.1 Geologia e idrogeologia

Il terreno è caratterizzato dalla presenza di uno strato superficiale di materiale di riempimento costituito, fino a -3 m p.c., da sabbia, ghiaia, macerie, scorie, carbone e legno, e da -3 a -5 m p.c. da terreni fini (limo e argilla) mischiati a fanghi industriali e ghiaia. Da -5 m p.c. in giù, si trova il terreno naturale e a -15 m p.c. il substrato roccioso.

Il sito è ubicato in adiacenza ad un fiume. Il livello di falda naturale è indicativamente a -0,5 m p.c.

3.2 Contaminazione

La contaminazione del sito è caratterizzata dalla presenza di benzene, toluene, etilbenzene, xileni (BTEX) e naftalene. Alla temperatura di 80°C i BTEX raggiungono il punto di ebollizione, mentre il naftalene a tale temperatura raggiunge il punto di fusione; per tale motivo si prevede che al raggiungimento di una temperatura uniforme del terreno di circa 100°C, si avrà una significativa estrazione di BTEX in fase vapore e di naftalene in fase liquida.

La massa di contaminante iniziale è stata stimata in circa 600 kg, composta all'80% da naftalene e al 20% da BTEX.

3.3 Impianto termico

L'area oggetto di riscaldamento, di circa 876 m², ha geometria pressoché circolare. Essa è circondata da palancole fino a -8 m p.c. ed è dotata di un sistema di pompe di emungimento che permette di abbassare il livello di falda oltre -2 m p.c., per ridurre le ingenti perdite di energia dovute alla produzione di vapore acqueo.

Il sistema di riscaldamento, del tipo IT-DSP™, coinvolge il materiale tra -1,5 e -7,5 m p.c., con un volume stimato di circa 4.380 m³. Esso consta complessivamente di 68 elementi riscaldanti. Il sistema di alimentazione è costituito da un trasformatore di corrente trifase, che alimenta autonomamente i singoli elementi riscaldanti alla tensione di alimentazione desiderata, attraverso un sistema computerizzato e completamente remotabile. La potenza media in ingresso all'impianto è di circa 680 kW (11,3 kW a bobina di riscaldamento), con picchi di potenza, durante le fasi iniziali del trattamento, di circa 1.020 kW.

Cinque sensori di temperatura dislocati all'interno dell'area di riscaldamento integrano i sensori che si trovano in corrispondenza di ciascun elemento riscaldante, permettendo di monitorare in continuo la temperatura raggiunta nel sottosuolo.

3.4 Impianto MPE

Il sistema MPE, finalizzato alla captazione ed estrazione del flusso di vapori generati con il riscaldamento, colletta anche l’acqua derivante dal pompaggio per l’abbassamento del livello di falda. Esso è costituito da pozzi di estrazione verticali e orizzontali/superficiali dislocati all’interno del volume riscaldato.

I valori dei principali parametri di esercizio dell’impianto MPE sono i seguenti:

- Portata estrazione vapori: 650 m³/h
- Portata estrazione liquidi: 6 l/min
- Depressione ad ingresso impianto: -7 kPa
- Temperatura ad ingresso impianto: ≈ 65 °C

I flussi raccolti vengono poi trattati secondo lo schema mostrato in Figura 3.

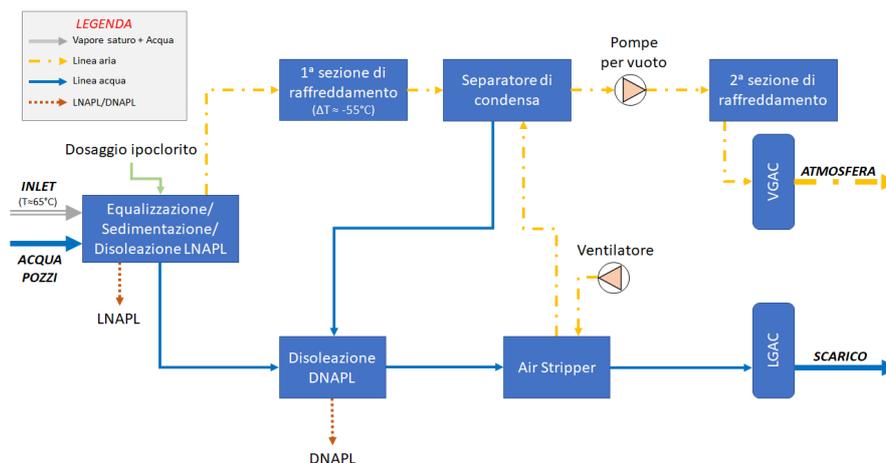


Figura 3. Case Study 1: schema a blocchi della sezione di trattamento dei flussi gassosi e liquidi estratti

4. CASE STUDY ET-DSP™

L’impianto ET-DSP™ è alla sua prima applicazione in Italia ed è in funzione in Nord Italia, presso uno stabilimento produttivo pienamente operativo.

“Contaminazione da solventi – Bonifica in situ mediante desorbimento termico (IT-DSP™ e ET-DSP™)”

Per limitare e/o valutare il potenziale rischio per i lavoratori dello stabilimento in relazione alla esposizione a temperature elevate, in corrispondenza delle tubazioni di collettamento e dei pozzi di estrazione, e alle potenziali fuoriuscite di contaminanti da fratture della pavimentazione, l'area di trattamento è stata recintata e vengono effettuati monitoraggi ambientali con cadenza settimanale.

Al fine di preservare l'esercizio degli impianti, inoltre, tutte le tubazioni metalliche dei sottoservizi che attraversavano l'area di riscaldamento sono state rilocate, mentre si è adottato un sistema di raffreddamento delle tubazioni plastiche con versamento di acqua al loro interno.

4.1 Geologia e idrogeologia del sito

La geologia del sito è caratterizzata da uno strato superficiale di ghiaia e sabbia, fino a circa -0,5 m p.c., seguito da uno strato, fino circa -8 m p.c., di terreno prevalentemente argilloso limoso.

Dal punto di vista idraulico, il sottosuolo presenta una falda libera con soggiacenza a circa -2 m p.c. Il gradiente è molto debole, in ragione della ridottissima permeabilità del sottosuolo.

4.2 Contaminazione del sito

La massa contaminante presente nel sottosuolo è principalmente composta da sostanze organiche clorurate quali:

- Percloroetilene (PCE), la cui temperatura di ebollizione è 121 °C;
- Tricloroetilene (TCE), la cui temperatura di ebollizione è 87 °C;
- Cis/trans 1,2-dicloroetilene (DCE), la cui temperatura di ebollizione è 55 °C;
- Cloruro di Vinile, presente nel sottosuolo già in forma gassosa.

L'obiettivo di temperatura media nel sottosuolo è 88 °C, con mantenimento della stessa fino al raggiungimento del plateau nella massa cumulata di inquinanti estratti nel tempo.

La massa totale di contaminanti stimata dalla caratterizzazione del sito è nell'ordine dei 1000 kg. E' stata inoltre riscontrata la presenza di DNAPL.

4.3 Impianto termico

L'area oggetto di riscaldamento è di circa 787 m², di cui 291 m² al di sotto di un edificio. La contaminazione è ubicata tra p.c. e -7 m p.c., ad esclusione della porzione di sottosuolo sotto l'edificio, ove è confinata entro -4 m p.c.

Il sistema di riscaldamento, del tipo ET-DSP™, coinvolge il materiale tra p.c. e -4,0/7,0 m p.c. in funzione della zona, con un volume stimato di circa 4.700 m³. Esso consta complessivamente di 60 elettrodi. La potenza media in ingresso all'impianto è di circa 348 kW, con picchi di 555 kW. La portata di iniezione d'acqua a ciascun elettrodo è di circa 0,3 l/min.

Trentasei sensori di temperatura sono dislocati in sei differenti punti all'interno dell'area oggetto di riscaldamento.

4.4 Impianto di estrazione

La sezione di estrazione si compone di:

- 38 pozzi SVE verticali;
- 20 pozzi SVE orizzontali;
- 5 pozzi MPE.

I valori dei principali parametri di esercizio dell'impianto di estrazione sono i seguenti:

- Portata estrazione vapori: 250 ÷ 300 m³/h
- Portata estrazione liquidi: 17,5 l/min
- Depressione ad ingresso impianto: -25 kPa
- Temperatura ad ingresso impianto: ≈ 60 °C

I flussi raccolti vengono poi trattati secondo lo schema mostrato in Figura 4.

“Contaminazione da solventi – Bonifica in situ mediante desorbimento termico (IT-DSP™ e ET-DSP™)”

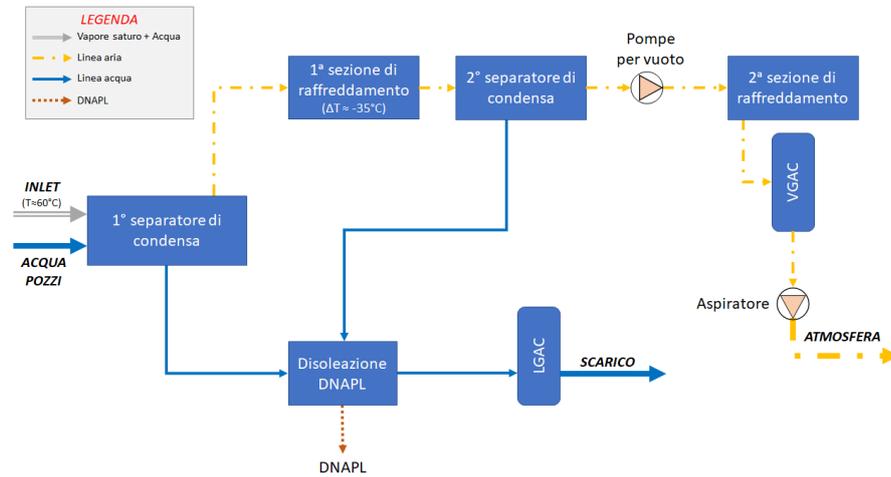


Figura 4. Case Study 2: schema a blocchi della sezione di trattamento dei flussi gassosi e liquidi estratti

5. RISULTATI AD OGGI RAGGIUNTI

1.1 Case study IT-DSP™

Ad oggi, dopo 125 giorni di operatività dell’impianto, sono stati impiegati 1.014 MWh, con una potenza media di 478 kW.

La temperatura media raggiunta nell’area di riscaldamento è pari a circa 80 °C (Figura 5). Si prevede occorrano altri 40-50 giorni per raggiungere la temperatura media di design (100 °C).

“Contaminazione da solventi – Bonifica in situ mediante desorbimento termico (IT-DSP™ e ET-DSP™)”

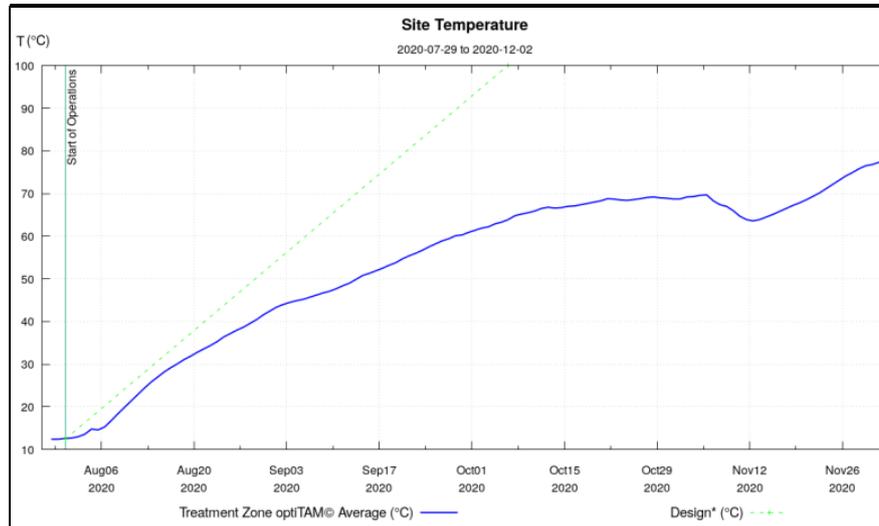


Figura 5. Case Study 1: temperatura media nel terreno nella zona di trattamento

Sinora, in totale sono stati estratti 12 kg di massa contaminante, costituita principalmente da BTEX; al raggiungimento della temperatura di design nel terreno, si attende l'aumento significativo e rapido della massa estratta.

1.2 Case study ET-DSP™

Ad oggi, dopo 100 giorni dall'avvio della fase di riscaldamento del terreno, sono stati impiegati 1.252 MWh, con una potenza media di 348 kW.

La temperatura media del sottosuolo è di circa 84 °C, come mostrato in Figura 6.

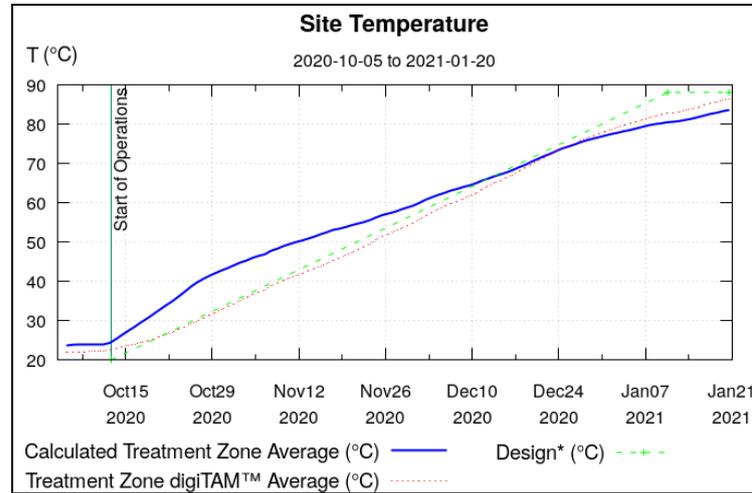


Figura 6. Case Study 2: temperatura media nel terreno nella zona di trattamento

La massa estratta è ad oggi di circa 260 kg, con un tasso di estrazione che si assesta sui 4÷5 kg/d, destinato a crescere con l’incremento della temperatura fino a quella obiettivo (88 °C).

6. CONCLUSIONI

I due case studies evidenziano come la rimozione degli inquinanti possa risultare significativa solo al raggiungimento della temperatura target di processo. Nel primo caso, essa deve essere ancora raggiunta. Nel secondo, si è viceversa quasi ad obiettivo, ma la maggiore differenza tra le temperature di ebollizione dei contaminanti porterà ad osservare molteplici picchi di estrazione, da curare con particolare attenzione nell’ottica di gestione della sezione di abbattimento degli inquinanti a piano campagna.

Tra le due soluzioni tecnologiche, il sistema ET-DPS™ richiede maggiore controllo del bilancio idrico e dei parametri di processo, alla luce della costante iniezione d’acqua in corrispondenza degli elettrodi; lo stesso, tuttavia, garantisce performance efficienti grazie ad una maggiore uniformità di riscaldamento del terreno.

Questi sistemi comportano costi di gestione elevati in termini di energia elettrica impiegata, per contro compensati da tempistiche ristrette nel raggiungimento degli obiettivi di bonifica e potenziale applicabilità anche in siti che presentano litologie fini. Questi due ultimi aspetti aprono soluzioni al trattamento di situazioni che, con tecnologie tradizionali, sempre se applicabili, richiederebbero tempistiche di bonifica di gran lunga superiori con conseguente impatto negativo in termini di costi di gestione ed eventuale fruibilità del sito.

BIBLIOGRAFIA

- EIN Presswire (2021) A Breakthrough in Thermal Remediation Technology, <https://0e190a550a8c4c8c4b93-fcd009c875a5577fd4fe2f5b7e3bf4eb.ssl.cf2.rackcdn.com/EINPresswire-485415506-a-breakthrough-in-thermal-remediation-technology-4.pdf>
- McGee B. C. W. e Vermeulen F. E. (2002). *Power losses in steel pipe delivering very large currents*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 1, pp. 25-32, doi: 10.1109/61.974184.
- McGillan e McGee Corp. (2011). Technical Description - ET-DSP In-Situ Thermal Remediation, <https://d3pcsg2wj9izr.cloudfront.net/files/29906/download/314509/ETDSP-Technical-Description-01.pdf>
- USACE (2014) *Design: In Situ Thermal Remediation*, Engineer Manual EM 200-1-21, U.S. Army Corps of Engineers, Washington DC, USA.