

# Messa in sicurezza d'emergenza di discariche a pendio dismesse da tempo mediante piante erbacee perenni a radicazione profonda

M. Zarotti,

Prati Armati srl

## SOMMARIO:

Le discariche a pendio dismesse da tempo sono accumuli di materiali di scarto di varia origine, tipo e composizione, accatastati dall'uomo nel corso di decenni: scarti dell'edilizia, rsu, manufatti contenenti plastica, vetro, metallo, pile, batterie, metalli pesanti, amianto, idrocarburi, etc. Il ripristino ambientale è complesso e costoso e si propende per la messa in sicurezza d'emergenza con obiettivi mirati: impedire apporto di nuovo materiale, isolare i rifiuti dall'ambiente, diminuire il percolato, mitigarne l'impatto visivo. Le soluzioni più utilizzate sono la minerale e la geosintetica, a cui si è ultimamente affiancata la soluzione vegetale che utilizza esclusivamente sementi di piante erbacee perenni a radicazione profonda. Tali interventi rientrano nella categoria delle tecniche "in situ". La soluzione vegetale è naturale, economica e consente di operare anche in zone a forte pendenza, direttamente sul tal quale, dove non sono utilizzabili le soluzioni tradizionali.

Keywords: messa in sicurezza, emergenza, discariche a pendio, suoli inquinati, metalli pesanti, tutela dell'ambiente

## 1 INTRODUZIONE

Il ripristino ambientale di discariche a pendio dismesse da tempo risulta spesso difficoltoso sia dal punto di vista tecnico, per l'elevata pendenza delle superfici da trattare, sia per la presenza di litotipi fortemente inquinati, oltre che costoso dal punto di vista economico ed energetico. Nella frequente impossibilità di eseguire un ripristino ambientale completo, si propende spesso per soluzioni di messa in sicurezza.

A livello internazionale i sistemi di copertura, così come i rivestimenti di fondo, hanno subito un'evoluzione nel tempo, dai sistemi realizzati con materiali naturali a quelli misti ed artificiali (es.: Daniel, 1993; Bouazza et al., 2002; Rowe, 2005; Daniel e Koerner, 2007; Fowmes et al., 2007). Le soluzioni più comunemente utilizzate (Manassero et al., 2000) sono la soluzione minerale (es. coperture naturali o coperture di argilla compattata, *Compacted Clay Liners CCL*) e quella geosintetica (es. coperture composite o, più recentemente, geocompositi bentonitici, *Geosynthetic Clay Liners, GCL*).

Secondo quanto previsto dalla Normativa Italiana (D.Lgs. 36/2003), la soluzione minerale deve prevedere la

copertura della discarica con una struttura multistrato, che comprende diversi strati di terreno, con specifiche funzioni e spessori minimi regolamentati, separati da geotessile non tessuto (schema in Figura 1a). La soluzione geosintetica, invece, prevede l'impiego di geomembrane, come nello schema di Figura 1b, generalmente in accoppiamento a geocompositi (Manassero et al., 2011; Rowe, 2013).

Entrambe le soluzioni comprendono, come ultimo strato, uno spessore di alcune decine di centimetri di terreno vegetale, su cui eseguire un inerbimento per tentare di diminuire l'impatto ambientale e favorire la rinaturalizzazione (Erickson, 1997).

Alcune specie erbacee vengono tradizionalmente usate per stabilire una copertura vegetale vigorosa, che prevenga la perdita di terreno per erosione provocata dagli agenti atmosferici (Gray e Leiser, 1989; Gray e Sotir, 1996; Morgan, 2009).

Esse, tuttavia, non possono essere utilizzate sul tal quale, in quanto non riescono a vegetare direttamente sul litotipo inquinato per l'elevata fitotossicità, né a conferire un miglioramento in termini di stabilizzazione superficiale vista la radicazione superficiale e poco resistente.

Un'alternativa promettente, oggetto di numerosi studi negli ultimi anni grazie a collaborazioni con molte Università e Centri di Ricerca nazionali, è rappresentata dall'installazione di piante erbacee a radicazione profonda (*Deep Rooting Plants, DRP*).

La tecnologia DRP prevede la realizzazione di un manto vegetale permanente applicato direttamente sul litotipo contaminato (Figura 1c), costituito da piante erbacee perenni naturali, autoctone, non ogm, a radicazione profonda, sottile e resistente (Bischetti et al., 2009; Rettori et al., 2010; Napoli et al., 2013).

La particolare fisiologia vegetale di queste specie consente, infatti, di operare in zone ove le condizioni climatiche e la contaminazione del suolo sono generalmente considerate proibitive per l'insediamento di vegetazione (Tordoff et al., 2000; Wong, 2003; Remon et al., 2005). Tali piante mostrano infatti la capacità di radicare in terreni aridi, rocce alterate o fratturate, terreni trattati con aggiunta di calce fino al 5% in peso, suoli inquinati da rifiuti, idrocarburi e metalli pesanti (Mendez e Maier, 2008; Shirdam et al., 2008; Kavamura e Esposito, 2010) in concentrazioni fino a 10 volte superiori ai limiti massimi ammessi dalla legge, pH variabili fra 4 e 11.

La loro installazione non richiede l'apporto di terreno vegetale o l'utilizzo di altri manufatti e materiali. Questa tecnologia può inoltre essere adoperata anche in presenza di pendenze elevate, laddove le tecnologie tradizionali trovano difficile applicazione.

Le DRP si sono dimostrate efficaci nel contrasto all'erosione idrica ed eolica (Cecconi et al., 2012) in molteplici condizioni pedoclimatiche, nella diminuzione del crepacciamento e dell'infiltrazione delle acque meteoriche.

Esse inoltre sono in grado di contribuire alla stabilizzazione superficiale dei versanti (Napoli et al., 2013), attraverso un doppio contributo: meccanico, mediante il rinforzo radicale (Bischetti et al., 2001; 2009; Bonfanti e Bischetti, 2001), ed idraulico, attraverso l'elevata capacità traspirativa (Cotecchia et al., 2014).

## 2 RADICAZIONE DELLE PIANTE ERBACEE

Per valutare la capacità della tecnologia DRP di vegetare anche in terreni contaminati, quali possono essere quelli presenti nelle discariche a pendio, sono state inizialmente effettuate prove di germinazione e accrescimento su 7 campioni di suolo prelevati da 7 differenti siti dal distretto di discariche minerarie di Montevecchio in Sardegna. Uno dei siti di prelievo è rappresentato in figura 2, ove sono abbancati sterili di tracciamento e residui di coltivazione di minerali come galena (solfuro di piombo), blenda o sfalerite (solfuro di zinco). Alcuni di questi suoli sono caratterizzati da elevata presenza di idrocarburi.

I versanti da cui sono stati prelevati i campioni per le prove vegetazionali risultavano completamente glabri e non inerbiti da decine di anni, con alta probabilità per via dell'impossibilità della vegetazione tradizionale di svilupparsi a causa di condizioni fitotossiche proibitive (Bradshaw et al., 1978; Sheoran et al., 2013).

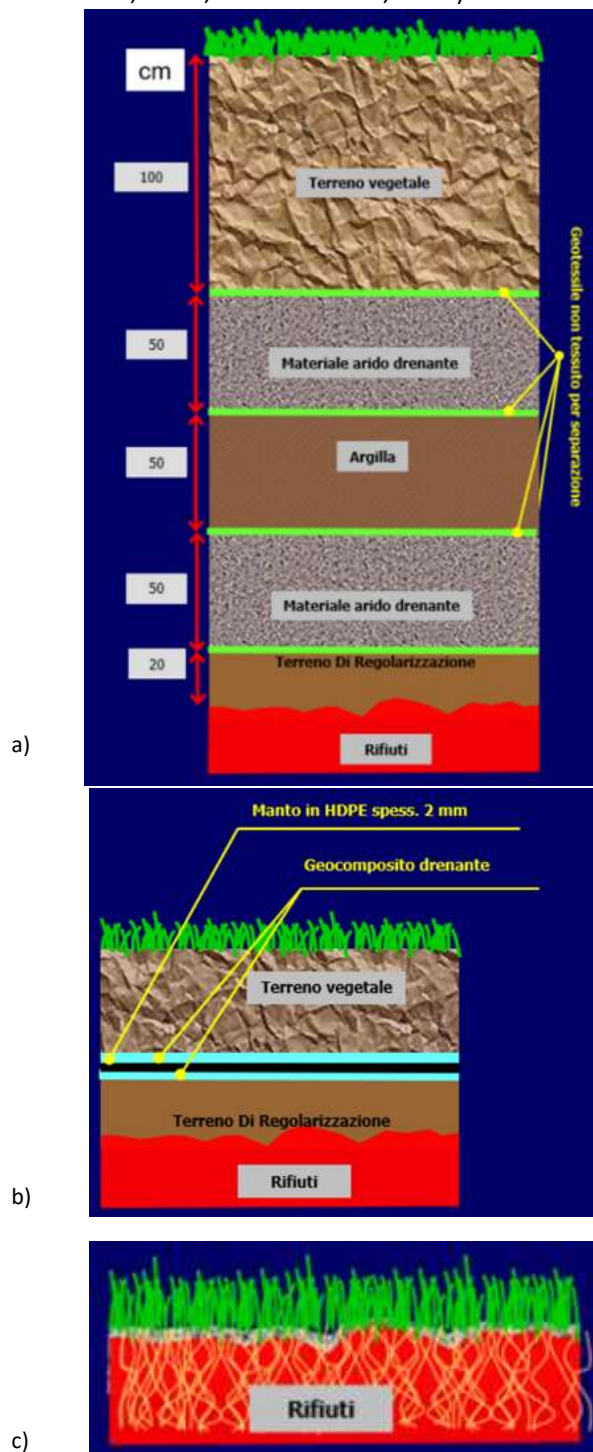


Figura 1 – Rappresentazione schematica di a) soluzione minerale-MIN, b) soluzione geosintetica- GCP, c) soluzione con piante erbacee a radicazione profonda (tecnologia DRP).

Le prove per la caratterizzazione dei valori di inquinamento sui campioni di terreno provenienti dai diversi siti sono state eseguite presso il Centro Ricerche ECOTEC (Ecotec Group, Sardegna; Figura 3). L'analisi degli inquinanti è stata condotta mediante spettrometria ottica di emissione al plasma ICP-OES (*Inductively Coupled Plasma-*

*Optical Emission Spectrometer*). I principali inquinanti rilevati nei diversi campioni di terreno prelevati sono stati arsenico, cadmio, cobalto, cromo, rame, mercurio, nichel, piombo, antimonio, selenio, zinco in concentrazioni anche di dieci volte superiori ai limiti massimi di legge ammissibili per le zone industriali. Il sito di Monteponi (Figura 2) si è rivelato il più fortemente inquinato da metalli pesanti; i valori massimi di inquinamento rilevati sono illustrati in Figura 4.



Figura 2 – Miniere di Monteponi (CI). Uno dei 7 siti situati presso il distretto minerario dell'Iglesiente da cui sono stati prelevati i 7 campioni per le prove di crescita. Come si può notare l'area inquinata è rimasta completamente glabra mentre nelle aree circostanti si nota un notevole rigoglio vegetativo, segno evidente di forti fitotossicità localizzate.

 <b>Centro Ricerche ECOTEC</b>	Codice del documento: <b>MPG 7.5.3.1.4 CRE</b>	Edizione n° 2 Revisione n° 0
	Titolo: <b>Rapporto di prova</b>	Pagina n° 1 di 1
<b>N°0010</b>		
Data di emissione: 01/06/10 Analisi richiesta da: Centro Ricerche Ecotec-VI strada Orini-Marcobianca Campione: C42710 Descrizione del campione: Terra da Monteponi		
Data di campionamento: 22/04/10 Compiuto da: Prati Armato Data di arrivo in laboratorio: 01/06/10 Note ed eventuali osservazioni: AN/040154 - Sottosito 1004		

Figura 3 – Rapporti di prova sui valori di inquinamento in vari siti del distretto minerario di Monteponi eseguiti dal Centro Ricerche Ecotec. Fonte: Centro ricerche ECOTEC-CA

A seguito delle rilevazioni di contaminazione nei 7 siti differenti, per ciascuno dei 7 campioni sono state eseguite prove di crescita e radicazione. In particolare, per ciascun campione di terreno sono stati realizzati 9 vasetti di prova.

Parametri determinati sul campione tq	Data inizio analisi	Unità di misura	Valori trovati	Valori di riferimento
As	01/06/10	mg/Kg	544,4	50
Cd	01/06/10	mg/Kg	140,3	15
Pb	01/06/10	mg/Kg	9263,0	1000
Zn	01/06/10	mg/Kg	20216,5	1500

Figura 4 – Valori massimi di inquinamento rilevati nel sito di Monteponi (Figura 2). Fonte: centro ricerche ECOTEC

Nei vasetti sono state seminate 9 specie differenti per verificarne la risposta alla fitotossicità del terreno. In Figura 5 sono mostrati i risultati delle prove di germinazione sul terreno di Monteponi ad alcuni mesi dalla semina. Come si vede, delle 9 specie seminate, due hanno dato una crescita ottimale e due una crescita parziale. La Figura 6 mostra una delle specie che ha esibito crescita ottimale, per la quale si è osservata una radicazione intensa, che ha raggiunto la massima profondità consentita dal recipiente.

Per confermare la capacità delle specie con migliore risposta di sopravvivere in queste condizioni di inquinamento, le stesse sono state trapiantate in contenitori più grandi, profondi 2 m, contenenti il medesimo litotipo (Figura 7). Le piante sono riuscite a vegetare e radicare profondamente.



Figura 5 – Risultati delle prove di germinazione sul terreno proveniente dalla miniera di Monteponi. Fonte: prati armati



Figura 6 – Radicazione ottimale anche in suolo fortemente fitotossico (valori riportati in figura 4). Fonte: prati armati





Figura 7 – Verifica di accrescimento radicale nel substrato fortemente inquinato da metalli pesanti (valori riportati in figura 4).  
Fonte: prati armati

Altre prove di germinazione sono state effettuate su suolo inquinato da idrocarburi, nel quale le concentrazioni misurate erano di 4.150 ppm (Figura 8). In questo caso sono state seminate 12 diverse specie, come mostrato in Figura 9a. Di queste, 4 hanno restituito risultati ottimali ad alcuni mesi dalla semina (Figura 9b), rivelandosi perciò specie tolleranti all'inquinamento da idrocarburi (Robson et al., 2003; Shahsavari et al., 2013).



Figura 8 – Suolo inquinato da idrocarburi in concentrazione 4.150 ppm prima della semina. Fonte: prati armati

a)



b)

Figura 9 – Prove di germinazione su terreno contaminato da idrocarburi: a) al momento della semina; b) a germinazione e accrescimento avvenuti. Fonte: prati armati

### 3 CASO DI STUDIO SU SCALA REALE

La tolleranza e capacità di attecchimento mostrate dalle piante erbacee a radicazione profonda anche in condizioni altamente fitotossiche ha dato l'impulso all'esecuzione di una sperimentazione in campo direttamente sul tal quale, su una discarica a pendio in Sicilia (PA) di circa 20.000 m<sup>2</sup>.

La discarica in questione (Figura 10) si trovava in forte stato di degrado con una marcata erosione superficiale che scopriva i rifiuti (Figura 11) e favoriva l'infiltrazione di acqua nel sottosuolo andando ad alimentare la produzione di percolato.

Le elevate pendenze del corpo rifiuti in discarica, comprese fra 30° e oltre 60°, rendevano inadatte le già menzionate tecniche tradizionali. Al contrario, la soluzione con piante erbacee a radicazione profonda è apparsa più facilmente percorribile.

A seguito dell'installazione della tecnologia DRP direttamente sullo strato più superficiale della discarica tal quale (Figura 11), a distanza di circa 12 mesi dall'intervento la discarica si presentava come in Figura 12. Sebbene sia necessario programmare specifiche indagini e prove sperimentali che supportino scientificamente

l'efficacia dell'intervento ed il rispetto dei requisiti di Normativa (ad es. in termini di conducibilità idraulica, resistenza alle sollecitazioni chimiche e meccaniche), i risultati raggiunti sono apparsi soddisfacenti e promettenti. Infatti, l'installazione della tecnologia DRP ha permesso di realizzare, in tempi relativamente brevi, un intervento che appare in grado di soddisfare i principali requisiti progettuali richiesti ad un sistema di copertura per discarica (Manassero et al., 2000; Pasqualini et al., 2003; Facciorusso, 2004).



Figura 10 – Stato della discarica a pendio pre-intervento; la situazione era invariata da molte decine di anni. Fonte prati armati



Figura 11 – Litotipo presente nello strato superficiale della discarica (litotipo *Homo sapiens sapiens*). Fonte prati armati

Innanzitutto, l'inerbimento con DRP assolve alla funzione di strato superficiale per il controllo dell'erosione idrica ed eolica (Wischmeier e Smith, 1965; 1978; Waldron, 1977), costituito da una fitta coltre vegetale che, ancorata da un apparato radicale profondo, non viene eradicata nel caso di eventi meteorici, anche di forte intensità e durata (Morgan, 2009; Bischetti et al., 2001; 2009; Cecconi et al., 2012; Rocco et al., 2016); tale strato è anche in grado di contrastare la deflazione eolica, limitando la mobilitazione di nubi di polveri inquinanti.

La tecnologia DRP inoltre realizza uno strato di protezione, in grado di isolare i rifiuti dall'ambiente esterno e dall'aggressione meteorica ed immobilizzarli all'interno della coltre vegetale. È così bloccato il trascinarsi a valle dei rifiuti affioranti, che vengono inglobati nella copertura vegetale: le piante erbacee in questo operano sia tramite la parte radicale, che contribuisce ad immobilizzare i rifiuti, sia tramite la parte fogliare, che li copre. Lo strato di protezione inoltre contrasta la formazione di fessurazioni e crepacciamenti, diminuendo significativamente l'infiltrazione di acqua negli strati profondi, la lisciviazione e l'infiltrazione degli inquinanti negli strati sottostanti del terreno e in falda.

Le piante erbacee a radicazione profonda realizzano inoltre uno strato di drenaggio, necessario nei sistemi di copertura per allontanare velocemente l'acqua meteorica e per ridurre il carico idraulico sulla copertura, che favorisce la percolazione, e per ridurre quindi anche la pressione dell'acqua che può determinare fenomeni di instabilità nella copertura. Le piante di questa tecnologia, infatti, presentano un folto apparato epigeo, in grado di favorire il ruscellamento delle acque meteoriche al di sopra della coltre erbacea allettata; esse sono inoltre dotate di elevata capacità traspirativa, grazie anche alle radici profonde e dense, permettendo così la restituzione dell'acqua di filtrazione per evapotraspirazione.

In ultimo, la tecnologia DRP si è rivelata efficace nel migliorare notevolmente l'impatto visivo dell'area trattata, reinserita così nel contesto al punto da rendere impossibile il riconoscimento dell'area originariamente degradata (Figure 12 e 13).



Figura 12 – Risultato dell'intervento con tecnologia DRP dopo un anno dalla semina. Fonte: prati armati

#### 4 ANALISI ENERGETICA

Il costo energetico per applicare questa tecnica nel caso di discariche a pendio è stato analizzato mediante un'analisi energetica e di inquinamento per la



sistemazione della discarica a pendio in provincia di Palermo discussa nella Sezione 3.



Figura 13 – Risultato dell'intervento con tecnologia DRP a 2 anni dall'intervento. Fonte: prati armati

Vanone e Summa (2012) hanno infatti condotto uno studio volto a quantificare il consumo di risorse naturali, intese come materie prime, associato alla realizzazione di tale tecnologia, effettuando poi un confronto con il consumo di risorse naturali richiesto dalle tecnologie più tradizionali, la soluzione minerale e la soluzione geosintetica, realizzate secondo gli schemi mostrati in Figura 1.

Sono stati presi in esame vari casi di studio, tra cui quello riferito alla discarica a pendio in Sicilia (PA), di cui si riportano i risultati. La superficie di riferimento per l'analisi è stata di 10.000 m<sup>2</sup>.

Per valutare l'impatto ambientale delle tre tecnologie, è stato adottato l'approccio metodologico *Life Cycle Assessment* (LCA; Ayres et al., 1996; Curran, 2012; Rocco et al., 2013). In tale valutazione è stato considerato il consumo di risorse naturali coinvolte nella produzione di tali sistemi, escludendo perciò dal dominio temporale dell'analisi la fase d'esercizio e di smantellamento. Tale ipotesi è accettabile poiché queste tecnologie non richiedono manutenzione e il loro smaltimento non è previsto né contemplato dalla Normativa, fatta eccezione per alcuni casi specifici (Rocco et al., 2013). Per la descrizione dettagliata della procedura, si rimanda a Vanone e Summa (2012), Taranto (2012) e Rocco et al. (2013; 2016).

Nel presente lavoro sono mostrati solo i fabbisogni energetici e le emissioni di inquinanti calcolati per le 3 applicazioni, tenendo in conto materiali (per l'idrosemina: semi, fertilizzanti, cellulosa, acqua, diesel), manufatti, trasporti (eccetto cellulosa e acqua, rinvenute sul posto) e messa a dimora (Vanone e Summa, 2012; Rocco et al., 2013). Sono state dunque confrontate le richieste energetiche, espresse in GJ (Figura 14) e l'inquinamento prodotto, in termini di emissioni di CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e *particulate matter*, pm (Figure 15-19), ipotizzando la

sistemazione della discarica con le tre diverse soluzioni (geosintetica-GCP; DRP; minerale-MIN).

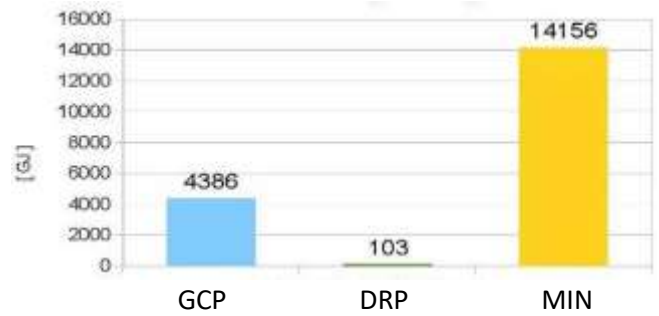


Figura 14 – Confronto del fabbisogno energetico espresso in GJ (tenendo conto che 1.000 GJ corrispondono all'energia contenuta in 24 t di petrolio). Fonte Politecnico di Milano Dip. Energia

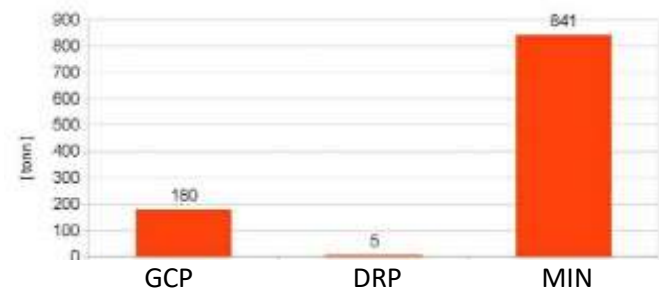


Figura 15 – Confronto delle emissioni di CO<sub>2</sub> Fonte Politecnico di Milano Dip. Energia

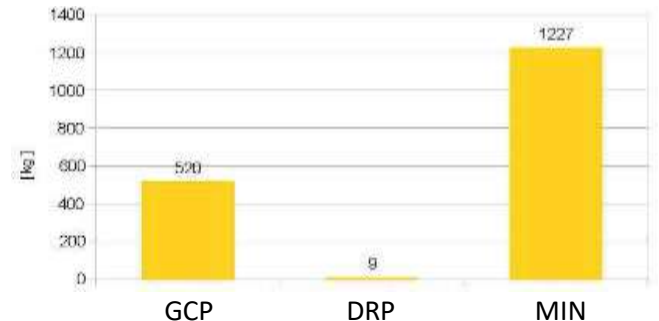


Figura 16 – Confronto delle emissioni di CO. Fonte Politecnico di Milano Dip. Energia

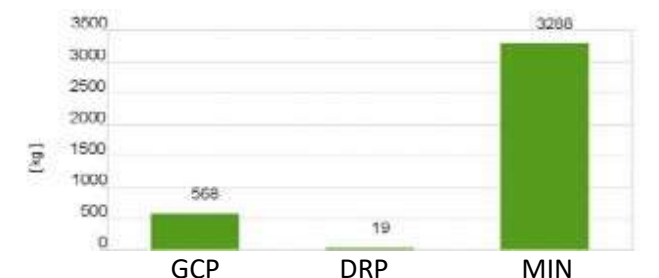


Figura 17 – Confronto delle emissioni di NO<sub>x</sub> Fonte Politecnico di Milano Dip. Energia

Lo studio ha messo in evidenza i considerevoli vantaggi in termini di abbattimento del fabbisogno energetico e delle emissioni di inquinanti, nella fase di installazione

dell'impianto, che derivano dall'adozione della tecnologia DRP rispetto alle soluzioni più tradizionali.

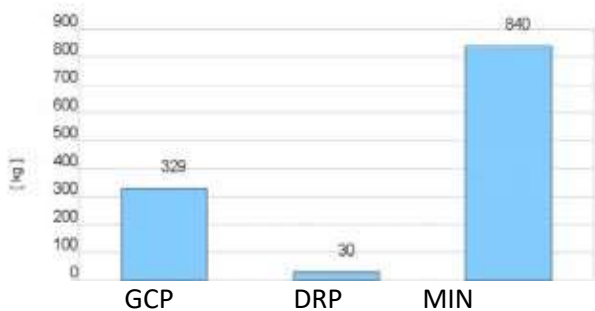


Figura 18 – Confronto delle emissioni di SO<sub>x</sub> Fonte Politecnico di Milano Dip. Energia

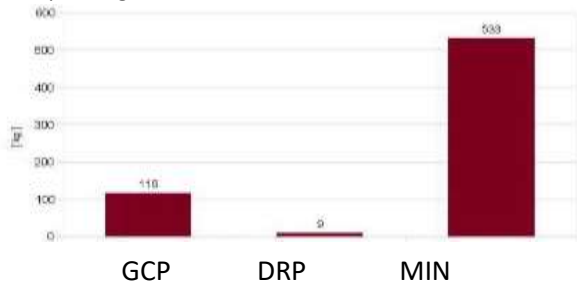


Figura 19 – Confronto delle emissioni di pm Fonte Politecnico di Milano Dip. Energia

La soluzione infine adottata è stata la DRP, come illustrato nella Sezione 3, che è stata infatti selezionata per la sistemazione definitiva di tutta la discarica (oltre 20.000 m<sup>2</sup>).

## 5 CONCLUSIONI

Le ricerche sinora effettuate, sia in laboratorio sia in campo, sulle piante a radicazione profonda e sui terreni trattati con DRP hanno messo in evidenza i vantaggi di questa tecnologia, il suo ampio campo di applicazione e la sua efficacia anche in scenari complessi. Numerosi studi sono ad oggi in corso, al fine di approfondire la conoscenza scientifica dei processi di interazione pianta-litotipo (contaminato) ed estendere significativamente la sperimentazione per supportare la validità ed efficacia della tecnologia.

Tuttavia, i risultati delle numerose applicazioni ad oggi effettuate in vari contesti (es. rilevati autostradali, discariche a pendio) appaiono estremamente promettenti e molto vantaggiosi dal punto di vista tecnologico rispetto alle tecniche tradizionali.

I tempi di realizzazione, gli eventuali rischi legati alle lavorazioni, i fabbisogni energetici, le emissioni di inquinanti (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e pm) relativi alla soluzione con piante a radicazione profonda, sono infatti drasticamente ridotti rispetto ad alcune tipiche tecniche di sistemazione di discariche a pendio dismesse da tempo. Inoltre, la tecnologia DRP si mostra potenzialmente efficace anche

laddove le soluzioni tradizionali non sono applicabili, come ad esempio su versanti ad elevata pendenza, >30°.

Le prerogative di questa tecnologia, che non richiede alcun tipo di manutenzione, la rendono idonea per interventi a basso costo energetico ed economico, alto pregio ambientale ed estetico.

## BIBLIOGRAFIA

- AYRES, R.U., AYRES, L.W., MARTINAS, K., (1996). Eco-Thermodynamics: Exergy and Life Cycle Analysis, 49.
- BISCHETTI G.B., BONFANTI F., GREPPI M. (2001). Misura della resistenza a trazione delle radici: apparato sperimentale e metodologia d'analisi. Quaderni di Idrone. Montana, 21/1, 349-360.
- BISCHETTI G.B., CHIARADIA E. A., EPIS T. (2009). Prove di trazione su radici di esemplari di piante Prati Armati®. Rapporto conclusivo. Dip di Ing Agraria, Università degli Studi di Milano.
- BONFANTI F., BISCHETTI G. (2001). Resistenza a trazione delle radici e modello di interazione terreno-radici. Istituto di Idraulica Agraria, Milano – Rapporto interno.
- BOUAZZA A., ZORNBERG J.G., ADAM D. (2002). Geosynthetics in waste containment facilities: recent advances. Geosynthetics - 7 ICG - Delmas, Gourc & Girard (eds) © 2002 Swets & Zeitlinger, Lisse ISBN 90 5809 523 1
- BRADSHAW, A.D., HUMPHREYS, M.O. AND JOHNSON, M.S. (1978). The value of heavy metal tolerance in the revegetation of metalliferous mine wastes. In: Goodman, G.T., Chadwick, M.J. (eds) Environmental Management of Mineral Wastes, The Netherlands, pp. 311-314.
- COTECCHIA F., PEDONE G., GUGLIELMI S. (2014). Interazione pendio-atmosfera: la risposta di pendii in argille ed il ruolo di mitigazione della vegetazione. Atti del convegno "L'Interazione pendio atmosfera e la protezione dei versanti". Auditorium Polo Universitario, 3 Ottobre 2014, Agrigento.
- CECCONI, M., PANE, V., NAPOLI, P., CATTONI, E. (2012). Deep roots planting for surface slope protection. Electron. J. Geotech. Eng. U 17, 2809e2820.
- CURRAN M.A. (2012). Life Cycle Assessment Handbook: a Guide for Environmentally Sustainable Products. Wiley.
- DANIEL D. E. (1993). Geotechnical practice for waste disposal, Chapman & Hall, London.
- DANIEL D.E., KOERNER R. (2007). Waste Containment Facilities: Guidance for Construction Quality Assurance and Construction Quality Control of Liner and Cover Systems. 2<sup>nd</sup> Edition. American Society of Civil Engineering. <https://doi.org/10.1061/9780784408599>
- ERICKSON LE. (1997). An overview of research on the beneficial effects of vegetation in contaminated soil. Ann N Y Acad Sci.; 829:30-35. doi:10.1111/j.1749-6632.1997.tb48563.x
- FACCIORUSSO J. (2004). Appunti dalle lezioni su: "Aspetti geotecnici nella progettazione delle discariche". Università degli Studi di Firenze, Corso di Geotecnica Ambientale.
- FOWMES G., DIXON N., JONES D.R.V. (2007). Landfill stability and integrity: the UK design approach. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Waste and Resource Management 160, 2, 51-61. doi: 10.1680/warm.2007.160.2.51
- GRAY D. H., LEISER A. T., 1989. Biotechnical slope protection and erosion control. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida.

- GRAY D. H., SOTIR R. B., 1996. *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide for Erosion Control*. John Wiley and Sons.
- KAVAMURA, V.N. AND ESPOSITO, E. (2010). Biotechnological strategies applied to the decontamination of soils polluted with heavy metals. *Biotechnol. Adv.* 28 : 61-69.
- MANASSERO M., BENSON C., BOUAZZA, A., (2000). Solid Waste Containment Systems. *Proceedings International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Vol. 1*, pp. 520–642.
- MENDEZ, M.O. AND MAIER, R.M. (2008). Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments-An emerging remediation technology. *Environ.Heal.Perspec.*116(3):278-283.
- MORGAN, R.P.C. (2009). *Soil Erosion and Conservation*. John Wiley & Sons.
- NAPOLI P., CECCONI M., PANE V. (2013). Il contributo degli impianti radicali profondi nella stabilizzazione superficiale dei versanti. *Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2013-IARG 2013*. Perugia, 16-18 settembre 2013.
- PASQUALINI E., FRATALOCCHI E., PATACCHINI C., STELLA M., VEGGI S. (2003). Stabilità delle discariche controllate per rifiuti solidi urbani. Stabilità e consolidamento dei pendii *Conferenze Di Geotecnica Di Torino XIX Ciclo*, 4, 5 e 6 novembre 2003.
- REMON E, BOUCHARDON JL, CORNIER B, GUY B, LECLERC JC, FAURE O. (2005). Soil characteristics, heavy metal availability and vegetation recovery at a former metallurgical landfill: Implications in risk assessment and site restoration. *Environ Polut.*; 137(2): 316-323. doi: 10.1016/j.envpol.2005.01.012
- RETTORI A., CECCONI M., PANE V., ZAROTTI C. (2010). Stabilizzazione superficiale di versanti con la tecnologia Prati Armati®: implementazione di un modello di calcolo per la valutazione del coefficiente di sicurezza. *Accademia Nazionale dei Lincei – X Giornata Mondiale dell’Acqua, Convegno: Frane e Dissesto Idrogeologico*, marzo 2010.
- ROBSON DB, KNIGHT JD, FARRELL RE, GERMIDA JJ. (2003). Ability of cold-tolerant plants to grow in hydrocarbon-contaminated soil. *Int J Phytoremed*;5(2):105-123. doi:10.1080/713610174
- ROCCO M., TARANTO F., COLOMBO E. (2013). Energy and Exergy Life Cycle Assessment of different anti-erosion systems. *Department of Energy, Politecnico di Milano*.
- ROCCO M., CASSETTI G., GADRUMI F., COLOMBO E. (2016). Exergy Life Cycle Assessment of soil erosion remediation technologies: an Italian case study. *Journal of Cleaner Production* 112 (2016) 3007-3017.
- ROWE R.K. (2005). Long-term performance of contaminant barrier systems. 45<sup>th</sup> Rankine Lecture, *Géotechnique* 55(9): 631-378.
- SHEORAN V., SHEORAN A.S., POONAM POONIA (2013). Phytostabilization of metalliferous mine waste. *Journal of Industrial Pollution Control*.
- SHAHAVERI E., ADETUTU E.M., ANDERSON P.A., BALL A.S. (2013). Tolerance of Selected Plant Species to Petrogenic Hydrocarbons and Effect of Plant Rhizosphere on the Microbial Removal of Hydrocarbons in Contaminated Soil. *Water Air and Soil Pollution* 224(4):1-14. DOI: 10.1007/s11270-013-1495-3
- SHIRDAM, R., ZAND, A. D., BIDHENDI, G. N. & MEHRDADI, N. (2008). Phytoremediation of hydrocarbon-contaminated soils with emphasis on the effect of petroleum hydrocarbons on the growth of plant species. *Phytoprotection*, 89 (1), 21–29. <https://doi.org/10.7202/000379ar>
- SMITH R. A. H., BRADSHAW A. D. (1979). The Use of Metal Tolerant Plant Populations for the Reclamation of Metalliferous Wastes. *Journal of Applied Ecology*, 16, 2 pp. 595-612. DOI: 10.2307/2402534
- TARANTO F. (2012). Exergy indicators for resource impact assessment: an application of erosion remediation techniques on highway slope. *Master of science in Environmental and Geomatic engineering, Politecnico di Milano*.
- TORDOFF, G.M., BAKER, A.J.M., WILLIS, A.J. (2000). Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous wastes. *Chemosphere* 41, 219e228.
- VANONE AO, SUMMA D. (2012). *Analisi del ciclo di vita delle principali tecnologie di protezione superficiale dei versanti*. Tesi Laurea Magistrale, Politecnico di Milano.
- WALDRON LJ, 1977. The shear stress resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, 41:843-849.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. (1965). Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountain. *Agr. Handbook*, n. 282, U.S. Dept. of Agr.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning, *Agr. Handbook*, n. 537, USDA, Washington, USA.
- WONG M.H. (2003). Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere* 50, 775-780.

## 6 ABSTRACT

### MESSA IN SICUREZZA DI DISCARICHE MEDIANTE PIANTE ERBACEE PERENNI A RADICAZIONE PROFONDA

Keywords: messa in sicurezza d'emergenza, discariche a pendio, suoli inquinati, metalli pesanti, tutela dell'ambiente.

The environmental restoration of contaminated sites and old landfills often turn out to be very difficult, mainly because plant species used for the renaturation of sterile and/or contaminated soils don't take roots easily. Over the years several techniques have been developed for soil protection and renaturation. Among these there is an emerging innovative technology that uses only natural herbaceous perennials plants with deep rooting system, and allows to operate in areas where climatic conditions were until a few years ago considered prohibitive for the development of vegetation: barren lands, altered or fractured rocks, soils treated with addition of lime up to 5% by weight, soil polluted by waste, hydrocarbons and heavy metals in concentrations up to 10 times higher than the upper limits admitted by law. In addition, these herbaceous plants show the ability to withstand high temperatures produced by the fermentation of organic waste in landfills.