

Strumenti di supporto per l'identificazione speditiva di discariche minerarie coltivabili.

Giovanna Antonella DINO

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino

giovanna.dino@unito.it

Abstract: La necessità di reperire materie prime (anche critiche) ha indotto i Paesi Europei ad adoperarsi per incentivare politiche che mirino alla salvaguardia delle risorse, al recupero/riciclo da cicli produttivi (*circular economy*) ed alla coltivazione di vecchie discariche, anche minerarie (*landfill mining*). Al fine di valutare in modo speditivo se le discariche minerarie (qui da intendersi come veri e propri potenziali giacimenti) risultino essere sufficientemente ricche da divenire potenzialmente sfruttabili, sono qui presentati due diversi metodi di indagine: un primo (REEP) più metodologico ed il secondo (DST) più operativo. Si tratta di strumenti utili per valutare dove concentrare risorse economiche e tempo da dedicare a più approfondite fasi di indagine. Tali strumenti di supporto sono stati applicati e validati su 3 siti minerari (due chiusi ed uno ancora in produzione) nel nord Italia. Gli strumenti presentati (ed oggetto di pubblicazioni, presenti o in corso, scientifiche dedicate) sono in fase di potenziamento.

Parole Chiave: discariche minerarie, gestione rifiuti estrattivi, materie prime, materie prime critiche, prodotti riciclati, economia circolare.

1. Introduzione

Negli ultimi anni l'approvvigionamento di materie prime minerali (RM), in particolar modo quelle critiche (CRM), è risultato essere fattore di rischio per l'economia europea. L'Europa, di fatto, dipende sempre più da altri paesi per l'importazione di CRM; negli ultimi 10 anni la lista delle CRM è stata aggiornata 3 volte, passando da 14 (nel 2010) a 27 (nel 2017). La necessità di reperire RM ha quindi spinto l'Europa ad adottare politiche tali da promuovere lo sfruttamento dei rifiuti da discarica (***landfill mining e l'enhanced landfill mining - LFM e ELFM***) e da cicli produttivi (***Circular Economy***), andando ad incentivare da un lato il recupero di RM/CRM/SRM con contemporanea bonifica dei terreni inquinanti, e, dall'altro, un sistema economico volto a minimizzare gli sprechi e sfruttare al meglio le risorse. In un sistema circolare, l'input di risorse e gli sprechi, le emissioni e le dispersioni di energia e lo spreco dei materiali sono ridotti al minimo.

I rifiuti (e le discariche minerarie, oggetto della presente ricerca) possono essere viste come riserve per l'estrazione di RM/CRM/SRM; diverse ricerche sono state finanziate per studiare come efficientare e potenziare lo sfruttamento dei rifiuti fluenti e delle discariche estrattive, di cava o miniera (Bellenfant et al., 2013; Careddu & Dino 2016; Dino et al. 2015, Dino et al. 2017, Luodes et al. 2012). D'altro canto, è sovente riscontrare diversi rischi ambientali e per la salute umana connessi alle discariche minerarie (Azam et al., 2007, González-Corrochano et al. 2014; Grimalt et al., 1999; Helios Rybicka 1996, Hudson-Edwards et al. 2001, Lim et al. 2009, Schaidler et al. 2007, Talavera Mendoza et al. 2016, Tiruta-Barna et al. 2007, WHO 2015). Va notato che la contaminazione delle matrici ambientali vicino alle discariche minerarie dipende in gran parte dal tipo di minerale estratto e dalle rocce incassanti, dai metodi di sfruttamento (estrazione e

lavorazione), dall'efficienza dello sfruttamento, dalla presenza di ambiente alcalino o acido, e dalle caratteristiche idrogeologiche e idrochimiche del sito. (Béjaoui et al. 2016, Gray 1997, Plante et al. 2015).

Il concetto di coltivazione in discarica inizia nei primi anni '90, focalizzandosi sulle attività di recupero delle risorse ancora presenti, sia in situ che ex-situ (Jones et al., 2013). Lo sfruttamento delle discariche dipende da parametri intrinseci, come dimensioni, ubicazione, età, tipo, composizione e livello di documentazione disponibile, disponibilità di tecnologie adeguate e condizioni sociali ed economiche al contorno (Laner et al., 2016). Per quanto riguarda le discariche minerarie, il LFM incentrato sul recupero di RM/CRM/SRM può essere schematizzato in quattro fasi: (1) esplorazione, compresa la caratterizzazione di siti e rifiuti; (2) estrazione e trasporto; (3) trattamento; e (4) risorse per il riciclaggio/smaltimento dei residui (**Fig.1**).

In base a come si gestisce la discarica si possono individuare 4 possibili scenari:

- il **primo scenario (DO NOTHING)** considera che le discariche minerarie non vengano rimaneggiate, con conseguenti rischi potenziali per acqua e suolo;
- il **secondo scenario (REMEDIATION)** presuppone una bonifica tradizionale *in-situ* (eg. bioremediation, capping, ecc ...);
- il **terzo scenario (LANDFILL MINING – LFM)** prevede la coltivazione di discariche minerarie per l'estrazione di RM, CRM e SRM. L'approccio LFM tradizionale produce ancora rifiuti che devono essere gestiti e messi in discarica, e i potenziali impatti ambientali devono essere minimizzati e mitigati di conseguenza;
- il **quarto scenario (ENHANCED LANDFILL MINING – ELFM)**, considera non solo il recupero delle RM/CRM ma anche il riutilizzo di rifiuti e sottoprodotti, grazie al trattamento mirato delle risulte ottenute dal primo ciclo di trattamento.

Figura 1. Gestione discariche minerarie: LFM e ELFM approach (Dino et al. 2018.a)

Nel presente articolo ci si concentrerà sullo sfruttamento delle discariche minerarie (LFM ed ELFM), andando a presentare approcci sistemici e strumenti speditivi per valutare quando una discarica (qui da intendersi come vero e proprio “giacimento”) può essere considerata sfruttabile o meno. Questi rappresentano i primi passi per valutare la “bontà” del “giacimento-discarica”; qualora il giacimento

indagato risultasse potenzialmente e sostenibilmente sfruttabile, si dovranno poi eseguire indagini di dettaglio per verificare (anche attraverso LCA, CBA, etc..) la sua effettiva coltivabilità.

2. Materiali e Metodi

In generale, non è possibile identificare una metodologia comune per il recupero CRM/SRM, poiché è strettamente connessa alle caratteristiche specifiche dei corpi minerali, alle tecniche di coltivazione e trattamento e all'efficienza dello sfruttamento. Pertanto, come nell'approccio di messa in discarica, la procedura di sfruttamento delle discariche estrattive non è unica a livello europeo e nazionale. È possibile, tuttavia, identificare metodologie operative per stimare la quantità, la qualità e il valore di RM/SRM/SRM presenti nelle discariche minerarie. Verranno qui presentati due diversi strumenti per valutare se una discarica/giacimento può ritenersi "oggetto di ulteriore indagine" (perché ad un primo screening si ottengono risultati positivi):

1. **REEP (Resource Efficiency e Environmental Protection) approach:** approccio che si basa sulla valutazione delle potenziali riserve ancora presenti in discarica. Per valutare se il recupero di CRM e SRM dalle discariche minerarie sia sostenibile, è fondamentale calcolare i quantitativi potenzialmente estraibili di CRM/SRM e valutare i potenziali rischi associati alla coltivazione delle discariche stesse. Sulla base della stima delle CRM/SRM e dell'analisi del rischio per l'area investigata, è possibile avere una prima idea della sostenibilità e della redditività relativa alla coltivazione della discarica mineraria investigata.
2. **DST (Decision Support Tool):** strumento informatico che mette in relazione dati quantitativi (legati alle riserve ancora presenti in discarica ed agli impatti economici relativi alla valorizzazione del giacimento) con dati qualitativi (impatti ambientali e sociali) al fine di definire lo/gli scenario/i più promettenti per la gestione/recupero delle discariche estrattive. Lo scopo del DST è di fornire una valutazione preliminare della fattibilità dello sfruttamento dei rifiuti estrattivi in modo semplice ma integrato; incorporando i fattori sociali, ambientali ed economici coinvolti nei processi di sfruttamento. Lo strumento identifica anche quali parametri contribuiscono a rendere sfruttabile la risorsa/rifiuto e valuta in modo speditivo i costi e i benefici. Lo strumento consente l'introduzione di informazioni specifiche del sito per stimare e mostrare all'utente la fattibilità dell'estrazione di una discarica mineraria

3. Step operativi

3.1 REEP approach

Come anticipato questo tipo di valutazione prevede di stimare (in parallelo) sia i quantitativi di CRM/SRM a discarica, sia di eseguire un'analisi di rischio sito specifica (Fig. 2).

Stima dei quantitativi di CRM/SRM presenti in discarica

Per stimare le CRM/SRM presenti in discarica, bisogna eseguire:

- **l'indagine del sito** (storia mineraria dell'area e caratterizzazione della discarica). Generalmente le informazioni sulla localizzazione delle discariche minerarie, il volume di rifiuti estrattivi presenti nelle vecchie discariche e il volume di scarti da attività minerarie ancora operative sono scarse o non facilmente accessibili. Pertanto, per determinare le caratteristiche dell'area indagata, quali morfologia, estensione, potenza, caratteristiche delle rocce originali, valutazione del volume da sfruttare, valutazione della resa di CRM/SRM presente nelle discariche, è fondamentale applicare un protocollo corretto per l'indagine sul sito, che comprenda, da un lato, l'utilizzo di strumenti di supporto geomatico, indagini geofisiche, etc..., al fine di valutare il volume da sfruttare, e, dall'altro, permetta di avere informazioni sulla geochimica e la mineralogia per calcolare il potenziale quantitativo di CRM/SRM da sfruttare (Dino et al, 2018.a).
- la **caratterizzazione degli scarti estrattivi** a discarica (proprietà fisiche, geochimiche e mineralogiche). Gli sfridi di coltivazione sono principalmente suddivisi in due frazioni: materiale fine e grossolano. La distribuzione granulometrica degli scarti indagati influenza la possibilità di pianificazione, coltivazione e recupero di RM/SRM. Le caratteristiche geochimiche dipendono dal rapporto tra le frazioni fini e grossolane e dalla distribuzione delle dimensioni delle particelle tra le frazioni fini (Amos et al., 2015). Tipologia e quantità di minerali (caratteristiche minero-petrografiche) presenti nei rifiuti sono fondamentali per capire se e come recuperare CRM/SRM
- la **stima delle materie prime recuperabili in situ**. Si basa sulla valutazione del volume e del valore del CRM / SRM da sfruttare. È fondamentale un'analisi di mercato delle materie prime da sfruttare, valutando il tenore di RM/SRM presente in discarica.

Protezione ambientale: analisi dei rischi

L'approccio relativo alla protezione ambientale prevede tre diversi passaggi operativi:

- la definizione di un **modello concettuale preliminare** basato sul background storico dell'area indagata;
- la **valutazione degli impatti ambientali** associati alla discarica mineraria.
- **l'analisi del rischio**: gli studi di analisi del rischio possono fornire misurazioni quantitative degli impatti causati dalla presenza di EW nel sito minerario. Questo può alla fine portare ad un approccio decisionale per la gestione degli scarti estrattivi e come affrontare la contaminazione presente nel sito. L'obiettivo è trovare soluzioni che identificano e affrontino i rischi dalla contaminazione in modo sostenibile. Il processo di valutazione del rischio prevede la costruzione di un modello concettuale specifico del sito che tenga conto dei materiali a discarica (fonte di contaminazione), del recettore e del percorso o mezzo attraverso il quale un recettore può essere esposto all'inquinante (Mehta et al. 2018).

Una valutazione positiva non sempre corrisponde al reale sfruttamento del "nuovo giacimento": infatti, se l'indagine tecnica preliminare è positiva, deve essere eseguita una valutazione più dettagliata delle CRM/SRM estraibili (calcolo del volume "reale", indagine geochimica più ampia e dettagliata, etc.), insieme alla valutazione delle azioni di salvaguardia ambientale necessarie per evitare/ridurre gli impatti relativi sfruttamento della discarica. Qualora il sito risulti essere sfruttabile, sarà necessaria un'analisi costi/benefici più mirata (CBA) e un'analisi del rischio specifica, considerando tutte le singole fasi tecnologiche presenti nella futura coltivazione.

3.2 Decision Support Tool

Il *Decision Support Tool (DST)* permette di valutare (quali-quantitativamente) le diverse possibili alternative per recuperare RM/CRM/SRM dalle discariche minerarie; metterle a confronto e decidere, in base ai risultati ottenuti, quale strada vada seguita. Le possibili alternative indagate sono:

1. bonifica e/o messa in sicurezza delle discariche minerarie;
2. produzione di filler per infrastrutture e strade;
3. produzione di aggregati da utilizzare in situ o ex situ (eg. aggregati per CLS, aggregati per la costruzione di strade, ballast ferroviario, etc...);
4. coltivazione per estrarre RM (e CRM) quali, eg.: feldspati (da discariche di granito), Zn/Pb (con associati Ga, Ge, In, Cd) da discariche di miniere a Zn/Pb;

5. recupero frazioni fini (*tailings* o frazione fine ottenuta dal trattamento al punto 4) per la produzione di substrati rivegetabili, geopolimeri, etc...

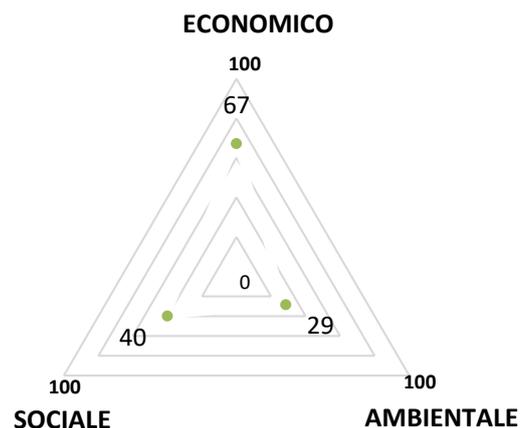
E' fondamentale, da un lato, definire il tipo di discarica mineraria oggetto di potenziale recupero (da rocce ornamentali o da attività minerarie s.s.) e, dall'altro proporre diversi scenari possibili ed associare ad ognuno le tecnologie e le azioni necessarie per coltivare la discarica.

I dati necessari da utilizzare per la valutazione della migliore soluzione possibile (sito specifica) sono:

- **dati generali** (tonnellate di materiale presente in discarica; tonnellate di rifiuti prodotte annualmente – nel caso di discariche attive; presenza di barriera di sottofondo della discarica; numero di residenti nel raggio di 1 km; valore dell'area una volta coltivata €/m² – residenziale, industriale, agricolo, discarica; distanza in km dalla discarica estrattiva all'impianto di trattamento, esistente);
- **dati economici** (costo del capitale per l'acquisto delle tecnologie necessarie; costi operativi; costi relativi al trasporto; costi per la gestione dei rifiuti; tasso di produzione per ogni processo produttivo, prezzo di vendita dei prodotti e sotto prodotti ottenuti dal recupero del materiale a discarica);
- **dati ambientali** (ovvero dati parametrizzati relativi a: GHG, PM, Odori, VOCs, NOx e Sox, contaminazione delle acque, contaminazione del suolo, interferenza con il biota, rumori, produzione d'acqua, recupero metalli);
- **dati sociali** (ovvero dati parametrizzati relative a: coinvolgimento della comunità, misure relative all'impatto sulla salute umana, considerazioni etiche, produzione di odori fastidiosi per i vicini, evidenze legate alla sostenibilità ed al livello di incertezza).

Il DST è, di fatto, un programma progettato su diversi fogli excel correlati, che permette di simulare (sulla base delle informazioni sito specifiche relative a impatti ambientali, economici e sociali) diversi possibili scenari (costruiti ad hoc in base ai possibili prodotti ed alle tecnologie che si intende impiegare). Sulla base dei dati inseriti, sarà possibile valutare lo/gli scenario/i migliore/i che risultante da analisi di fattibilità (di massima) relative al progetto di landfill mining che si vuole portare avanti. In base agli scenari proposti ed ai dati inseriti in ingresso (relativi ad impatto economico, sociale ed ambientale), il DST elabora diversi possibili scenari. Il parametro "criteri per la selezione dello scenario migliore" offre la possibilità di scegliere i criteri in base ai quali viene scelto il miglior scenario (eg. **Fig.3**); le opzioni possibili sono:

- Il caso migliore relativo al reddito netto
- Il caso migliore relativo ai ricavi
- Il caso migliore relativo a costi più bassi
- Il caso peggiore relativo al reddito netto
- Il caso peggiore relativo ai ricavi
- Il caso peggiore relativo ai costi più bassi
- Il miglior punteggio ambientale
- Il miglior punteggio sociale



	Worst case	Best case	Unit		Worst case	Best case	Unit
REVENUES	320.000	1.280.000	€	COSTS	1.514.000	1.106.000	€
Other revenues			€	Safety condition			€
Total amount of aggregates	64.000	64.000	tonnes	Remediation			€
Total amount of by-product	0	0	tonnes	excavation	350.000	310.000	€
Total amount of Pd-Zn concentrate	0	0	tonnes	Transport			€
Revenue from aggregates	320.000	1.280.000	€	Crushing & sieving	684.000	636.000	€
Revenue from Pb-Zn concentrate	0	0	€	magnetic separation			€
Revenue from by-products	0	0	€	gravimetric separation			€
Revenue from land			€	Flotation			€
Residential	155	0	€	Advanced flotation			€
Industrial	80	0	€	Waste management	480.000	160.000	€
Agricultural	10	0	€	Other cost (energie,...)			€
Nature	3	0	€				€
Landfill	0	0	€				€

Figura 3: esempio di informazioni in uscita dalle elaborazioni utilizzando il DST.

Conclusioni

I due strumenti presentati, uno più metodologico (REEP approach) e l'altro invece sviluppato mediante un semplice programma che gira su Excel (DST), sono stati utilizzati per valutare la bontà delle riserve presenti in tre siti pilota italiani: Montorfano (VB – discarica di graniti per l'estrazione di feldspati e SRM, con potenziale sfruttamento di REE), Campello Monti (VCO; sito minerario non più produttivo per l'estrazione di Nichel, con associate CRM quali PGE) e Gorno (BG, sito minerario non più produttivo per l'estrazione di Zn-Pb, con associate CRM quali Ga, Ge, In, Cd). I risultati, parzialmente pubblicati (o in corso di pubblicazione) su riviste scientifiche di settore (Dino et al. 2018.a, b) dimostrano che i siti di Montorfano (dati in corso di pubblicazione) e Gorno sono meritevoli di ulteriori indagini per valutare la sfruttabilità del giacimento. Il sito di Campello Monti, invece, non risulta, nelle condizioni attuali, sfruttabile. Tuttavia il valore di mercato del Nichel risulta essere in costante crescita e l'impatto dovuto alle discariche è un potenziale fattore di rischio, pertanto non si esclude che, in futuro, le discariche presenti in località Campello monti diventino potenziale riserva sfruttabile. Da sottolineare che il sito di Montorfano è attualmente in produzione per la coltivazione delle discariche di granito di Montorfano e Baveno, tale sito è stato scelto come caso studio reale per validare gli strumenti presentati.

Tali strumenti sono da considerarsi ancora come "work in progress" e ulteriori studi per potenziarli e renderli più operativi sono in corso.

Riferimenti Bibliografici

Amos, R.T.; Blowes, D.W.; Bailey, B.L.; Segó, D.C.; Smith, L.; Ritchie, A.I.M., 2015. Waste-rock hydrogeology and geochemistry. *Appl. Geochem.* 2015, 57, 140–156.

Azam, S., Wilson, G.W., Herasymuk, G., Nichol, C., Barbour, L.S., 2007. Hydrogeological behaviour of an unsaturated waste rock pile: a case study at the Golden Sunlight Mine, Montana, USA. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 66, 259–268.

Béjaoui, I., Kolsi-Benzina, N., Sappin-Didier, V., and Munoz, M., 2016. Health Risk Assessment in Calcareous Agricultural Soils Contaminated by Metallic Mining Activity Under Mediterranean Climate. *CLEAN – Soil Air Water* 44, 1385–1395.

Bellenfant, G., Guezennec, A., Bodenan, F., D'Hugues, P., Cassard, P., 2013. Re-processing of mining waste: Combining environmental management and metal recovery? *Mine Closure* 2013, Sep 2013, Cornwall, United Kingdom. 571-582.

Careddu, N., Dino, G.A., 2016. Reuse of residual sludge from stone processing: differences and similarities between sludge coming from carbonate and silicate stones—Italian experiences. *Environ Earth Sci.* 75:1075. ISSN: 1866-6280; doi:10.1007/s12665-016-5865-1

Dino, G.A., Passarella, I., Ajmone-Marsan, F., 2015. Quarry rehabilitation employing treated residual sludge from dimension stone working plant. *Environ Earth Sci.* 73: 7157-7164. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3895-0>

Dino, G.A., Danielsen, S.W., Chiappino, C., Engelsen, C.J., 2017. Recycling of rock materials as part of sustainable aggregate production in Norway and Italy. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. Thematic set: Construction Geomaterials.* 50 (4): 412-416.

Dino, G.A., Rossetti, P., Perotti, P., Alberto, W., Sarkka, H., Coulon, F., Wagland, S., Griffiths, Z., Rodeghiero, F., 2018.a. Landfill mining from extractive waste facilities: The importance of a correct site characterisation and evaluation of the potentialities. A case study from Italy. In *Sustainable management*

and exploitation of extractive waste: towards a more efficient resource preservation and waste recycling. Edited by Nicola Careddu, Svein Willy Danielsen, Giovanna Antonella Dino, Richard Prikryl. *Resources Policy SI*, Vol. 59, pp. 564 (December 2018). *Resources Policy*, 59: 50-61. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.04.012>. Impact Factor: 2.695.

Dino, G.A., Mehta N., Rossetti, P., Ajmone-Marsan, F., De Luca, D.A., 2018.b. Sustainable approach towards extractive waste management: Two case studies from Italy. In *Sustainable management and exploitation of extractive waste: towards a more efficient resource preservation and waste recycling*. Edited by Nicola Careddu, Svein Willy Danielsen, Giovanna Antonella Dino, Richard Prikryl. *Resources Policy SI*, Vol. 59, pp. 564 (December 2018). *Resources Policy*, 59: 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.07.009>. Impact Factor: 2.695.

González-Corrochano, B.; Esbrí, J.M.; Alonso-Azcárate, J.; Martínez-Coronado, A.; Jurado, V.; Higuera, P., 2014. Environmental geochemistry of a highly polluted area: The La Union Pb–Zn mine (Castilla-La Mancha region, Spain). *J. Geochem. Explor.* 144 (B), 345–354.

Gray, N.F., 1997. Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Environmental Geology*. 30, 62-71.

Grimalt, J.O.; Ferrer, M.; Macpherson, E., 1999. The mine tailing accident in Aznalcollar. *Sci. Total Environ.* 242, 3–11.

Helios Rybicka, E., 1996. Impact of mining and metallurgical industries on the environment in Poland. *Applied Geochemistry*. Vol. 11, pp. 3-9.

Hudson-Edwards, K.A.; Macklin, M.G.; Miller, J.R.; Lechler, P.J., 2001. Sources, distribution and storage of heavy metals in the Ro Pilcomayo, Bolivia. *J. Geochem. Explor.* 72, 229–250

Jones, P. T., Geysen, D., Tielemans, Y., Van Passel, S., Pontikes, Y., Blanpain, B., Quaghebeur, M. and Hoekstra, N., 2013. Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery: A critical review. *Journal of Cleaner Production*. 55, pp. 45–55.

Lim, M., Han, G.C., Ahn, J.W., You, K.S., Kim, H.S., 2009. Leachability of Arsenic and Heavy Metals from Mine Tailings of Abandoned Metal Mines. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 6, 2865–2879.

Laner, D., Cencic, O., Svensson, N. and Krook, J., 2016. Quantitative Analysis of Critical Factors for the Climate Impact of Landfill Mining. *Environmental Science & Technology*, 50, pp. 6882–6891

Luodes H., Kauppila P.M., Luodes N., Aatos S., Kallioinen J., Luukkanen S., Aalto J. 2012. Characteristics and the environmental acceptability of the natural stone quarrying waste rocks. *Bull. Eng. Geol. Environ* (2012) 71:257-261. DOI 10.1007/s10064-011-0398-z. Ed. Springer.

Mehta, N., Dino, G.A., Ajmone-Marsan, F., Lasagna, M., Romè, C. & De Luca, D.A., 2018. Extractive waste management : A risk analysis approach. *Sci. Total Environ.*

Plante, B., Benzaazoua, M., Bussiere, B., Kandji, E.H.B., Bouzahzah, H., 2015. Use of the EDTA in modified kinetic testing for contaminated deaignage prediction from waste rocks: case of Lac Tio mine. *Environmental Science and Pollution Research*. 22,7882-7896.

Schaider, L.A., Senn, D.B., Brabander, D.J., McCarthy, K.D., Shine, J.P., 2007. Characterization of Zinc, Lead, and Cadmium in Mine Waste: Implications for Transport, Exposure, and Bioavailability. *Environ. Sci. Technol.* 2007, 41, 4164–4171.

Talavera Mendoza, O., Ruiz, J., Díaz Villaseñor, E., Ramírez Guzmán, A., Cortés, A., Salgado Souto, S.A., Dótor Almazán, A., Rivera Bustos, R., 2016. Water-rock-tailings interactions and sources of sulfur and metals in the subtropical mining region of Taxco, Guerrero (southern Mexico): A multi-isotopic approach. *Appl. Geochem.* 66, 73–81.

Tiruta-Barna, L., Benetto, E., Perrodin, Y., 2007. Environmental impact and risk assessment of mineral wastes reuse strategies: Review and critical analysis of approaches and applications. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(4), p. 351–379.

World Health Organization (WHO), 2015. Lead poisoning and health. Fact Sheet 379. Reviewed August 2015. Available online : www.who.int/mediacentre/factsheets/fs379/en/ (accessed 11/12/ 2016).