

Selección de la mejor alternativa para la «decianuración» de soluciones residuales de la minería de oro mediante análisis multicriterio: aplicación de ELECTRE III

Applying ELECTRE III in selecting the best alternative to the decyanidation of gold mining tailings

Sara Renca¹, Abel Aguirre¹ y Diego Rincón¹

Resumen

El objetivo del presente trabajo es seleccionar la alternativa técnica más adecuada para la detoxificación de soluciones residuales de la cianuración en la minería de oro. En este proceso decisorio se aplica el análisis multicriterio de apoyo a la decisión (MCDA), más concretamente, la metodología ELECTRE (ELiminacion Et Choix Traduisant la RÉalité). Las entradas del proceso consisten en: un conjunto de alternativas viables para alcanzar el objetivo propuesto; los criterios relevantes para la toma de decisión -considerando los diversos ámbitos de la problemática en cuestión-; la evaluación de las alternativas y la importancia relativa o el peso de cada criterio. Aplicando el método ELECTRE III, se determina la evaluación global de cada una de las alternativas y se ordenan por orden decreciente de preferencia. Se procede posteriormente a un análisis de sensibilidad para medir el impacto de cada criterio en la ordenación de las alternativas.

Palabras clave: Análisis multicriterio, ELECTRE III, minería de oro, cianuro, decianuración

Abstract

Select the most appropriate technical alternative for the detoxification of residual solutions of the cyanidation in gold mining is the objective of the present work. In this decision making process, the multi-criteria decision analysis (MCDA) is used; specifically, the methodology ELECTRE (ELImination Et Choix Traduisant la RÉalité). Its inputs are a set of viable alternatives to achieve the proposed objective; the relevant criteria for the decision making, considering the various ambits of the problem in question; the evaluation of the alternatives and the relative importance or weight of each criterion. Applying the ELECTRE III method, the overall evaluation of each alternative is determined and they are ranked in descending order of preference. A sensitivity analysis is carried on to measure the impact of each criterion in the outranking of the alternatives.

Key words: Multicriteria analysis, ELECTRE III, gold mining, cyanide, decyanuration

Citar: Sara Renca, Abel Aguirre y Diego Rincón (2019). Selección de la mejor alternativa para la "decianuración" de soluciones residuales de la minería de oro mediante análisis multicriterio. *Cuadernos de Ingeniería. Nueva serie.* [Salta - Argentina], núm.11: 21-42.

¹ Instituto de Estudios Interdisciplinarios de Ingeniería. Facultad de Ingeniería. UCASAL

1. Introducción

La elevada cotización del oro en los mercados internacionales torna cada vez más atractiva la explotación de minerales de grado inferior, donde el oro normalmente se encuentra diseminado en grandes masas minerales. En estos casos, el cianuro es la sustancia química más atractiva para la recuperación del oro, tanto desde el punto de vista técnico como económico, ya que es uno de los escasos reactivos químicos que disuelven el oro en agua a un precio accesible. Mediante este proceso, es posible extraer el oro de menas pobres con rendimientos que pueden llegar al 90% (Pérez, 2007). Sin embargo, cuanto más pobre es la mena, mayor será el consumo de cianuro, y, consecuentemente, se incrementa el riesgo de posibles daños ambientales. De hecho, los impactos ambientales provocados por los residuos cianurados pueden ser muy significativos, dada la elevada toxicidad de los cianuros solubles sobre los organismos vivos que conforman la biota circundante (Eisler, 1991; Eisler y Wiemeyer, 2004). Lamentablemente, no siempre se toman las medidas necesarias para mitigar estos impactos negativos, que pueden ser devastadores, como se ha comprobado en diversas experiencias asociadas a la minería de oro (Amegbey y Adimado, 2003; Carmo et al. 2017; Cunningham, 2005; Mudder y Botz, 2004). Esto genera, además, una reacción adversa por parte de la sociedad, que se opone fuertemente a la utilización de este químico en la minería de oro (Samorna, 2013; Schein, 2016). Consecuentemente, el tratamiento adecuado de estos residuos se configura como un imperativo ambiental de máxima importancia. Existen diversas posibilidades técnicas de tratamiento, desde la degradación natural en los diques de relaves hasta procesos altamente complejos, que requieren plantas muy sofisticadas. Tradicionalmente, se ha empleado la degradación natural como método de tratamiento en la mayoría de las unidades de producción. En la actualidad, existen formas más eficaces para la eliminación del cianuro que pueden complementar o suplantar la degradación natural. En este sentido, ha sido determinante el desarrollo de procesos que incluyen métodos químicos, biológicos, electroquímicos y de hidrólisis térmica (Kuyucak y Akcil, 2013). La investigación continúa avanzando en la búsqueda de nuevas soluciones (Dwivedi et al., 2016; Estay et al., 2014; Hijosa-Valsero et al., 2013; Kumar et al., 2017; Uppal et al., 2017; Zheng et al., 2015) que brinden respuestas eficaces a las crecientes preocupaciones de comunidades y organismos reguladores. Esta situación conlleva al uso creciente de plantas de tratamiento altamente sofisticadas.

Los procesos de tratamiento de cianuro pueden ser clasificados en dos tipologías: procesos destructivos y regenerativos. En el primer caso, el cianuro es destruido, normalmente transformándose en compuestos menos tóxicos por medio de reacciones químicas o biológicas. Los procesos regenerativos son métodos de reciclado, en los cuales el cianuro se elimina de los efluentes para luego retornar al circuito hidrometalúrgico. Los métodos destructivos incluyen: degradación natural, clorinación alcalina, proceso SO_2/Aire (INCO), peróxido de hidrógeno, sulfato ferroso, ácido de Caro, ozonización, oxidación electrolítica y biodegradación (Botz et al., 2016; Kuyucak y Akcil, 2013). En lo que concierne a los métodos regenerativos, se pueden dividir en dos grandes grupos: los métodos químicos y los métodos a base de resinas. Entre los primeros, se incluyen los procesos AVR (Absorción, Volatilización y Reutilización), SART (Sulfidización, Acidificación, Reutilización y Espesamiento) (Bustos et al., 2010; Estay et al., 2012; Fleming, 2016; Hedjazi and Monhemius, 2014) y WPS (Washing – Pond Stripping) (Adams and Lloyd, 2008). Los métodos a base de resinas son más recientes y aún no se emplean

a escala industrial. Entre ellos se encuentran los procesos Vitrokele (Cyanosave), Augment y Hannah (Fleming, 2016; Xie et al., 2013).

En la actualidad se dispone de una amplia gama de alternativas técnicas para la detoxificación de los efluentes cianurados. Sin embargo, esta diversidad es ambivalente, ya que si bien incrementa las posibilidades de elegir la mejor alternativa, también aumenta la complejidad en el proceso decisorio. Este proceso exige que se tengan en cuenta una multiplicidad de criterios de naturaleza técnica, ambiental, social, económica y normativa, y, a menudo, incluye objetivos conflictivos. Además, hay que considerar los distintos puntos de vista de los decisores y de todos aquellos que directa e indirectamente son afectados por la actividad. Este proceso decisorio es de gran complejidad y requiere los instrumentos adecuados para ser llevado a cabo. Las aproximaciones intuitivas o heurísticas pueden simplificar el proceso, pero tienden a descartar puntos de vista opuestos y difícilmente controlan la incertidumbre inherente al mismo. Este tipo de problemática exige un proceso de análisis formal y exhaustivo, como lo es el Análisis Multicriterio de Apoyo a la Decisión (MCDA, por sus siglas en inglés).

De forma genérica, se puede definir un problema multicriterio como una situación en la que, en presencia de una familia F de criterios, se considera un conjunto A de acciones posibles, entre las cuales se pretende: seleccionar la mejor alternativa, a partir de un subconjunto A' de A lo más restricto posible (problemática de selección); ordenar las alternativas en forma decreciente de preferencia (problemática de ordenación); afectar cada alternativa a categorías (clases) pre-definidas (problemática de afectación); describir las acciones y caracterizar sus consecuencias, posibilitando la comparación de ventajas e inconvenientes relativos (problemática de descripción) (Ishizaka y Nemery, 2013). Para dar respuesta a distintas problemáticas, se fueron desarrollando una serie de métodos multicriterio de apoyo a la decisión (Huang et al. 2011), entre ellos los métodos ELECTRE (*ELimination Et Choix Traduisant la Réalité*).

El propósito del presente trabajo es presentar una metodología de apoyo a la decisión para seleccionar la mejor alternativa técnica de decianuración de los residuos de la minería de oro. Luego de la descripción del método seleccionado para tal fin, el mismo es aplicado a un caso práctico. Posteriormente, se presentan y discuten los resultados, que luego son sometidos a un análisis de sensibilidad y robustez. Finalmente, se realiza una breve conclusión.

2. Método ELECTRE III

Los métodos ELECTRE cuentan con una extensa trayectoria, desde que Bernard Roy desarrolló el primer método en 1966. Posteriormente surgieron otros métodos pertenecientes a esta familia: ELECTRE I y IV (selección), ELECTRE II, III, y IV (ordenación), ELECTRE TRI-B, TRI-C e TRI-NC (clasificación) (Figueira et al., 2013; Rogers et al., 2000). Su implementación cubre una vasta gama de dominios (Govindan y Jepsen, 2016).

Esta familia de métodos es particularmente relevante en procesos decisorios que involucran más de tres criterios y que satisfacen por lo menos una de las siguientes condiciones (Figueira et al., 2005):

1. Los desempeños de los criterios son expresadas en diferentes unidades, dificultando así su agregación en una escala común.
2. Al menos para un criterio, existen pequeñas diferencias de desempeño que no son significativas, en términos de preferencias (aunque la suma de pequeñas diferencias pueda serlo).

Esto requiere que se utilicen umbrales de indiferencia y preferencia.

3. La evaluación de las alternativas se hace, por lo menos para un criterio, utilizando una escala ordinal.
4. Puede no aceptarse el efecto compensatorio.

2.1 Simbología y conceptos básicos

- Sea $A = \{ a_1, a_2, \dots, a_p, \dots, a_n \}$ el conjunto de las acciones o alternativas, base del proceso de MCDA.
- Sea $F = \{ g_1, g_2, \dots, g_p, \dots, g_m \}$ la familia coherente de criterios, según los cuales se evalúan y comparan las alternativas de acuerdo a un determinado punto de vista. A cada criterio g se asocia una escala E_g , conjunto ordenado de los valores que g puede tomar, y un sentido de preferencia creciente (criterio a maximizar) o decreciente (criterio a minimizar).
- A cada alternativa de A le corresponde una evaluación según los m criterios de F , $g_j(a_i)$, $a_i \in A$ y $g_j \in F$. Esto posibilita que se construya la matriz de evaluación $n \times m$, con $g_j(a_i)$ en la línea i y en la columna j ($i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$), designada por “matriz de decisión”.
- Cada criterio g_j tiene asociado un coeficiente de ponderación o peso, w_j , que expresa su importancia relativa, con $\sum_{j=1}^m w_j = 1$.
- Para cada criterio g_j son definidos tres umbrales: de indiferencia, q_j , de preferencia, p_j , y de veto, v_j , con $v_j \geq p_j \geq q_j$.

El método ELECTRE III, como los demás métodos de su familia, parten de la comparación entre pares ordenados de alternativas para cada uno de los criterios, y llegan a un conjunto de parámetros que permite establecer una relación de prevalencia o sobreclasificación S , *a sobreclasifica a'* (aSa'), cuyo significado es *a es por lo menos tan conveniente como a'*. Al comparar las alternativas (a, a') $\in A \times A$, pueden ocurrir cuatro situaciones distintas ($\succ = Q \cup P$) (Figueira et al., 2013):

1. $aSa' \wedge a'Sa - a > a'$, (aPa' o aQa');
2. $aSa' \wedge a'Sa - a' > a$, ($a'Pa$ o $a'Qa$);
3. $aSa' \wedge a'Sa - a e a'$ son indiferentes, (aIa');
4. $aSa' \wedge a'Sa - a e a'$ son incomparables, (aRa' o $a'Ra$).

Siendo P, Q, I y R , respectivamente, preferencia estricta, preferencia débil, indiferencia e incomparabilidad.

La finalidad de ELECTRE III es ordenar las alternativas, desde las más convenientes a las menos convenientes. Esta secuencia comprende dos fases distintas: la construcción de la relación de sobreclasificación, en la primera fase, y la exploración de la relación de sobreclasificación, en la segunda fase (Figura 1). Los diversos puntos de vista son modelados a través de pseudo-criterios, es decir, criterios para los cuales se verifican las siguientes relaciones binarias, considerando $g(a) \geq g(a')$ (Bouyssou y Roy, 1987):

$$\begin{array}{ll} aPa' & \Leftrightarrow g(a) - g(a') > p(g(a')), \\ aQa' & \Leftrightarrow q(g(a')) < g(a) - g(a') \leq p(g(a')), \\ aIa' & \Leftrightarrow g(a) - g(a') \leq q(g(a')) \end{array}$$

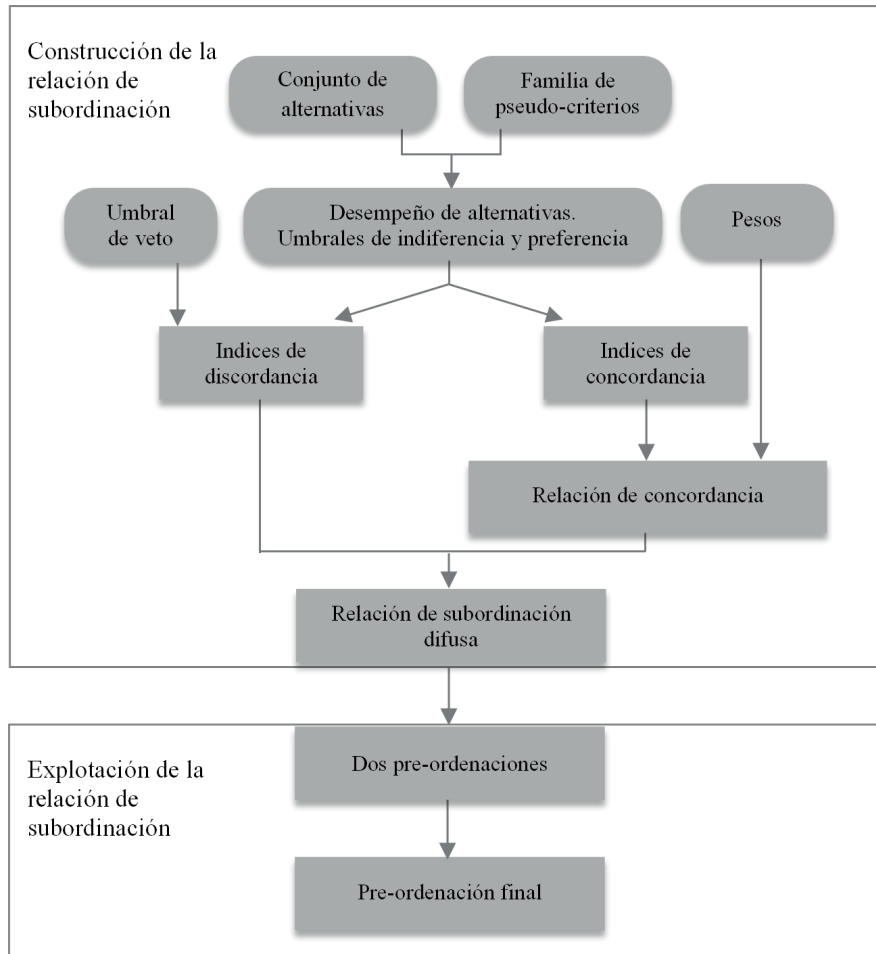


Figura 1 - Etapas del método ELECTRE III

2.2 Construcción de la relación de sobreclasificación

Para cada par ordenado de alternativas (a, a') , se calcula el grado de credibilidad de la hipótesis de sobreclasificación aSa' . Para ello, son definidos un índice de credibilidad $\delta(a, a')$, calculado a partir de un índice de concordancia, $C(a, a')$; y un índice de discordancia para cada criterio, $d_j(a, a')$, que se describe a continuación.

2.2.1 Índices de concordancia

El índice de concordancia expresa la veracidad de la aserción aSa' . Su valor es máximo e igual a 1 cuando la veracidad de la aserción es total; es mínimo e igual a 0 cuando la aserción es falsa y varía linealmente entre estas dos situaciones (Ecuación 1).

$$c_j(a, a') = \begin{cases} 1 & \Leftrightarrow g_j(a') - g_j(a) \leq q_j \\ \frac{g_j(a) - g_j(a') + p_j}{p_j - q_j} & \Leftrightarrow q_j < g_j(a') - g_j(a) \leq p_j \\ 0 & \Leftrightarrow g_j(a') - g_j(a) > p_j \end{cases} \quad (1)$$

La media ponderada de los índices de concordancia para los diversos criterios cuantifica la concordancia con la afirmación aSa' . Siendo w_j el peso del criterio g_j , el índice de concordancia global está representado por la Ecuación 2.

$$C(a, a') = \frac{\sum_{j=1}^m w_j \times c_j(a, a')}{\sum_{j=1}^m w_j} \quad (2)$$

2.2.2 Índices de discordancia

Los criterios que no apoyan la hipótesis de sobreclasificación aSa' pertenecen al subconjunto de los criterios discordantes. Esta desconformidad es cuantificada por el índice de discordancia, que alcanza su valor máximo, 1, cuando el criterio g_j ejerce su poder de veto, v_j , en la relación de sobreclasificación; y es mínimo, 0, cuando el criterio g_j no es un criterio discordante y varía linealmente entre estas dos situaciones (Ecuación 3).

$$d_j(a, a') = \begin{cases} 1 & \Leftrightarrow g_j(a') - g_j(a) > v_j \\ \frac{g_j(a') - g_j(a) - p_j}{v_j - p_j} & \Leftrightarrow p_j < g_j(a') - g_j(a) \leq v_j \\ 0 & \Leftrightarrow g_j(a') - g_j(a) \leq p_j \end{cases} \quad (3)$$

2.2.3 Índice de credibilidad

A partir de los índices de discordancia para cada criterio y del índice de concordancia global, se calcula el índice de credibilidad para la hipótesis de sobreclasificación, variando de 0 a 1, a través de la siguiente expresión:

$$\delta(a, a') = C(a, a') \times \prod_{j \in \bar{F}} \frac{1 - d_j(a, a')}{1 - C(a, a')} \quad (4)$$

\bar{F} es el subconjunto de la familia F que contiene los criterios para los cuales el índice de discordancia es superior al índice de concordancia global.

Si existe al menos un criterio para el cual el índice de discordancia es 1, el índice de credibilidad es nulo. Si el índice de concordancia global es 1, dado que todos los índices de discordancia son nulos, el índice de credibilidad también será 1. El conjunto de los índices de credibilidad define la relación de prevalencia difusa.

2.3 Explotación de la relación de sobreclasificación difusa

El objetivo de esta segunda fase de ELECTRE III es ordenar las alternativas desde la relación de prevalencia difusa resultante de la primera fase. Para eso, se construyen dos pre-ordenaciones distintas, designadas por *destilación descendiente* y *destilación ascendiente*, que posteriormente son combinadas en una ordenación.

En la destilación descendiente, las alternativas son ordenadas desde la más adecuada a la menos adecuada, mientras que en la destilación ascendiente las alternativas se ordenan de forma inversa. Ambas pre-ordenaciones son definidas con base a la calificación de cada una de las alternativas que se calcula de la siguiente manera:

- Sea λ_0 igual al valor máximo de la matriz de los índices de credibilidad:

$$\lambda_0 = \max_{a, a' \in A} \delta(a, a')$$

- Se define un nivel de corte λ_1 , próximo de λ_0 , tal que $\lambda_1 = \lambda_0 - s(\lambda_0)$; $s(\lambda_0)$ es el umbral de discriminación, que puede calcularse a partir de la Ecuación 5.

$$s(\lambda) = 0.3 - 0.15 \times \lambda \quad (5)$$

- Para el nivel de corte λ_1 , aSa' si el índice de credibilidad de aSa' es mayor que el nivel de corte y mayor que la suma del índice de credibilidad de $a'Sa$ con el umbral de discriminación, Ecuación 5.

$$aS^{\lambda_1}a' \Leftrightarrow \begin{cases} \delta(a, a') > \lambda_1 \\ \delta(a, a') > s(\delta(a, a')) + \delta(a', a) \end{cases} \quad (6)$$

Si estas dos condiciones se verifican, la afirmación *a sobreclasifica a'* es significativamente más probable que la afirmación *a' sobreclasifica a*.

- Las alternativas son distinguidas por su calificación $q(a)$, siendo la calificación de una alternativa a la diferencia entre el número de alternativas que ella sobreclasifica, $p(a)$, y el número de alternativas que la sobreclasifican a ella, $f(a)$. Para un nivel de corte λ_1 :

$$q^{\lambda_1}(a) = p^{\lambda_1}(a) - f^{\lambda_1}(a)$$

Este indicador expresa claramente la posición relativa de las alternativas dentro del conjunto A .

- En la destilación descendiente, se ordena la alternativa con mejor calificación y se extrae del conjunto. Se repite el proceso para las alternativas restantes, con el nivel de corte λ tomando valores sucesivamente menores desde λ_0 hasta 0.
- En la destilación ascendente, se ordena la alternativa con peor calificación y se extrae

del conjunto. Se repite el proceso para las alternativas restantes, con el nivel de corte λ tomando valores sucesivamente menores desde λ_0 hasta θ .

Finalizadas las dos destilaciones, los resultados obtenidos pueden ser agregados de la siguiente forma:

- a es mejor que a' si a tiene mejor posición que a' en por lo menos una de las dos destilaciones, y en la otra destilación a no tiene peor posición que a' .
- a es indiferente a a' si a y a' tienen la misma posición en las dos destilaciones.
- a y a' son incomparables si a tiene mejor posición que a' en una destilación y tiene peor posición en la otra destilación.

Las posibilidades de aplicación del método ELECTRE III son muy amplias, incluyendo ámbitos tan diversos como la ingeniería (Marzouk, 2011), la gestión de recursos naturales (Kumar et al., 2016), empresarial (Infante et al., 2014), de transportes (Žak y Kruszyński, 2015), ambiental (Hokkanen y Salminen, 1997; Karagiannidis y Moussiopoulos, 1997; Norese, 2006; Vlachokostas et al., 2014), el medio ambiente (Norese, 2006), la geología (Abedi et al., 2012), entre otros.

2.4 Peso de los criterios

Una de las etapas fundamentales en la utilización de los métodos ELECTRE, con excepción del método ELECTRE IV, es la asignación de los pesos que expresan la importancia relativa de cada criterio. La afirmación *a sobreclasifica a'* es altamente dependiente de tales ponderaciones (Bouyssou et al., 2000). En el método ELECTRE III, la concordancia con esta afirmación es cuantificada calculando la media ponderada de los índices de concordancia para los diversos criterios, índice de concordancia global, siendo los coeficientes de ponderación los pesos de cada criterio. La asignación de pesos por parte de los decisores, como insumo inicial, puede considerarse la tarea más compleja de los métodos de esta familia (Olson, 1995). De los diversos métodos de determinación de ponderaciones referidos en la bibliografía, se describen dos que se utilizan frecuentemente en el método ELECTRE III.

2.4.1 Método basado en la PCT

En el proceso de apoyo a la decisión, los decisores automáticamente jerarquizan los criterios de acuerdo a su importancia. Para explicar de qué forma sucede esto, Rogers y Bruen (1998) aplicaron una teoría del área de la Psicología, la “Teoría de los Constructos Personales” (PCT, por sus siglas en inglés). La PCT está basada en la modelación bipolar del sistema de preferencias humanas. Así, a cada criterio son asociados los dos casos (extremos) posibles. Cada criterio es comparado con los restantes, en pares ordenados, debiendo el decisor identificar el polo favorable de cada criterio. También debe decidir para cuál de los criterios desea menos la transición del polo más favorable a su opuesto. Los pesos de los criterios son determinados a partir del cálculo de la resistencia al cambio.

Una vez comparados todos los pares de criterios, los resultados se presentan en una matriz simétrica, denominada matriz de resistencia. En una celda de la matriz de resistencia, los resultados obtenidos son representados mediante la siguiente notación:

- X - el criterio en columna “resiste al cambio”;
- *Blanco* - el criterio en línea “resiste al cambio”;
- I - las dos alteraciones son igualmente indeseables;

- e - la alteración de un criterio implica la alteración del otro.

La Resistencia al Cambio (RC), es decir, el número de veces que el criterio resistió al cambio, se calcula sumando el número de blancos en línea y los “X” en columna, para cada criterio. La RC es considerada como una medida que expresa la importancia o peso de cada criterio, calculado por la Ecuación 7.

$$W_j = \frac{RC_j}{\sum_{j=1}^m RC_j} \quad (7)$$

2.4.2. Método SRF

El procedimiento para la determinación de los pesos según el método SRF (Simos-Roy-Figueira) sigue los siguientes pasos (Figueira y Roy, 2002):

1. A cada criterio se le asigna una tarjeta con su nombre. El decisor recibe el conjunto de las m tarjetas, correspondiente a los m criterios de la familia F .
2. El decisor recibe también algunas tarjetas blancas.
3. Se le pide que ordene las tarjetas en orden creciente de importancia. En caso que el decisor considere que existen criterios con la misma importancia, debe unir las tarjetas correspondientes con un clip. Se obtienen así \bar{m} clases de preferencia.
4. Se le pide al decisor que explicita la distancia en grado de importancia entre dos clases consecutivas. Para ello, puede ser necesario introducir una tarjeta blanca entre dos tarjetas, cuando considere que la distancia es dos veces más importante. Ninguna tarjeta blanca significa la distancia mínima μ entre dos tarjetas consecutivas, una tarjeta blanca significa una distancia de 2μ , dos tarjetas blancas significan una distancia de 3μ , y así sucesivamente.
5. Además, debe explicitar cuántas veces el mejor criterio es más importante que el peor, o sea, cuál es la relación entre el último criterio (el mejor) y el primero (el peor). Esta relación se representa mediante z .

A partir de la información precedente, el peso de cada uno de los criterios es determinado calculando primero los pesos no normalizados, $k_{(1)} \dots k_{(j)} \dots k_{(m)}$, asociados a cada subconjunto de *ex aequo* de acuerdo con su ordenación. Por convención $k_{(1)}=1$. Considerando las clases de preferencia, e'_r es el número de tarjetas blancas entre el nivel r y el nivel $r+1$ y $er = 1 + e'_r$. Si e es el número total de μ distancias ($e = \sum_{r=1}^{m-1} e_r$), $z = 1 + \mu \times e$. Los pesos no normalizados son calculados utilizando la Ecuación 8.

$$k_r = 1 + \mu \times (e_0 + \dots + e_{r-1}) \quad (8)$$

En el caso de que existan varios criterios *ex aequo* en el nivel r , todos estos criterios tienen el mismo peso k_r .

Sea k la suma de todos los pesos no normalizados, el peso normalizado $k'_{(r)}$ es calculado por la Ecuación 9.

$$k'_{(r)} = \frac{100 \times k_{(r)}}{k} \quad (9)$$

3. Aplicación del método ELECTRE III

En esta sección, se aplica el método ELECTRE III a la selección de la mejor alternativa técnica para la decianuración de los residuos de la minería de oro. Las alternativas en cuestión son aquellas para las cuales se dispone de información suficiente para que sean evaluadas según los criterios considerados pertinentes en el MCDA.

3.1 Alternativas

Los procesos de decianuración considerados, que conforman las alternativas del método ELECTRE III, pertenecen a las dos tipologías mencionadas en la sección 1: SO_2/Aire (INCO), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y ácido de Caro (procesos destructivos); y WPS, AVR, SART y recuperación por lavado de relaves (procesos regenerativos).

3.1.1 SO_2/Aire (INCO)

El proceso INCO (International Nickel Company's) consiste en la oxidación del cianuro libre y cianuro WAD (Ácido débil disociable) a cianato (OCN^-), que es un compuesto menos tóxico. Para alcanzar este efecto, se utilizan SO_2 y aire en presencia de un catalizador de cobre soluble (Cu^{+2}). Los metales de los complejos metálicos de cianuro, tales como Cu, Ni y Zn, una vez completada la reacción de oxidación, precipitan como compuestos de hidróxido metálico. Este proceso, aunque se utiliza principalmente para colas, también es eficaz en el tratamiento de soluciones. Sus principales desventajas son la falta de recuperación del cianuro y la producción de subproductos tóxicos, como el cianato y los sulfatos, en algunos casos. Aunque no exista normativa de regulación, la obtención de estos productos no deja de ser nociva para el ambiente, algo que hay que tener en consideración al elegir el método de decianuración más adecuado. El método tampoco es eficaz en la eliminación de tiocianato, amoníaco, nitrato y, en algunos casos, de cianuro de hierro; y no hay recuperación de cianuro (Mudder et al., 2001).

3.1.2 Peróxido de hidrógeno (H_2O_2) (PerH)

El proceso de tratamiento con peróxido de hidrógeno, desde el punto de vista químico, es bastante similar al proceso INCO, con la diferencia de que en vez de utilizarse dióxido de azufre y aire se emplea peróxido de hidrógeno. Al igual que en el proceso anterior, también se necesita cobre soluble como catalizador y se obtiene cianato como producto final de la reacción. Aunque también se puede aplicar en el tratamiento de colas, este proceso es más adecuado para el tratamiento de soluciones, ya que en aquel el consumo de peróxido de hidrógeno aumenta drásticamente, dejando de ser una opción atractiva desde el punto de vista económico. El cianuro libre y el cianuro WAD de las soluciones son oxidados a cianato. Los cianuros de hierro son eliminados por precipitación. Los metales presentes en soluciones compuestas, tales como Cu, Ni, y Zn, precipitan como compuestos hidróxido-metal al finalizar la reacción de oxidación. Este proceso tiene como desventajas el hecho de no recuperar el cianuro y de generar algunos subproductos tóxicos, como el cianato y el amoníaco, además de los elevados costos de los reactivos. Tampoco es eficaz para la eliminación de tiocianato y amoníaco y, en ocasiones, la concentración residual de los metales también es demasiado elevada (Mudder et al., 2001).

3.1.3 Ácido de Caro (H_2SO_2) (AcCr)

La oxidación del cianuro en este proceso se logra mediante la utilización de peroximonosulfúrico (H_2SO_5), comúnmente conocido como ácido de Caro. A semejanza de los dos métodos anteriores, este también presenta la desventaja de no recuperar el cianuro y, asimismo, de producir concentraciones significativas de productos tóxicos, como el cianato y el amoníaco. Es igualmente ineficaz en la destrucción del tiocianato. Por otra parte, la reacción de ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno para producir ácido de Caro también implica un peligro potencial (Mudder et al., 2001).

3.1.4 Recuperación de cianuro por lavado de relaves (Recl)

En este método, los relaves lavados pasan por un espesador, que posibilita la separación sólido-líquida. Al recuperarse el agua, también se recupera el cianuro, que es reciclado y entra de nuevo en el proceso hidrometalúrgico. Pueden incluirse varias etapas de lavado y engrosamiento para alcanzar niveles más altos de recuperación. Este es un proceso completamente físico, sin adición de productos químicos.

3.1.5 AVR

En el proceso AVR (Absorción, Volatilización y Reutilización), el cianuro libre y el cianuro WAD se convierten en gas cianuro de hidrógeno (HCN), disminuyendo el pH de la solución por adición de ácido sulfúrico. El cianuro de hidrógeno es posteriormente absorbido en una solución alcalina de hidróxido de sodio en contracorriente. La solución tratada, después de neutralizada, ingresa nuevamente en el circuito hidrometalúrgico. La eficiencia en la recuperación de cianuro WAD con este proceso puede variar en un rango comprendido entre el 70 al 95%, llegando incluso a valores superiores. AVR fue el primer proceso de recuperación utilizado en la minería de oro. Actualmente existen varias plantas en funcionamiento, entre ellas la planta Cerro Vanguardia en Argentina (Botz et al., 2004; Connelly, 2016). Una de las grandes ventajas de este proceso es la recuperación de cianuro para ser reutilizado como NaCN, con los consecuentes beneficios ambientales y económicos. Como limitación, no elimina el tiocianato (Mudder et al., 2001; Young y Jordan, 1995).

3.1.6 SART

Para tratar efluentes con altas concentraciones de cianuro de cobre se ha desarrollado el proceso SART (Sulfidización, Acidificación, Reutilización y Espesamiento). Su aplicación permite, además de la recuperación de cianuro, la recuperación de cobre. Para lograr el efecto, se acidifica la solución de tal manera de descomponer el complejo de cianuro de cobre. El sulfuro de cobre (Cu_2S) precipita y el cianuro es liberado como gas HCN. El sulfuro de cobre es posteriormente espesado y filtrado, y puede ser comercializado como subproducto del proceso de regeneración. El cianuro reciclado vuelve al circuito hidrometalúrgico para la recuperación de oro. SART es altamente eficaz en la recuperación de cobre y cianuro, pudiendo superar el 90% en ambos casos. Además, puede ser empleado para la recuperación de otros metales presentes en la solución, tales como Ag, Zn, Ni y Cd (Estay et al., 2014). Es una alternativa bastante atractiva, tanto del punto de vista ambiental como económico.

3.1.7 WPS

El proceso WPS (Washing-Pond Stripping) (Adams y Lloyd, 2008), de manera similar al SART, también posibilita la recuperación de cianuro y de metales. Los relaves, después de lavados, pasan por un espesador de alta capacidad. El cianuro libre del agua recuperada de la separación sólido-líquido también se puede recuperar. Esto se logra a través de un proceso de desorción y depuración del HCN, a elevadas temperaturas solares. Puede incorporarse adicionalmente una unidad para la separación de metales del agua del proceso.

3.2 Criterios

Los pseudo-criterios utilizados en el ELECTRE III requieren que se establezcan umbrales de indiferencia, de preferencia y de veto. La atribución de estos umbrales, por parte del decisor, tiene un carácter bastante subjetivo. Maystre et al. (1994) asocian el umbral de indiferencia al límite mínimo de imprecisión asociado a cada criterio y el umbral de preferencia al error máximo asociado al criterio en cuestión. El umbral de veto caracteriza las situaciones en que un criterio discordante puede, por sí mismo, vetar la hipótesis de sobreclasificación cuando la diferencia de desempeño entre dos alternativas es superior a ese umbral.

A continuación, se presentan los criterios de evaluación, la escala, el sentido de preferencia y los umbrales de indiferencia, preferencia y veto para cada uno de ellos.

3.2.1 Concentración de cianuro WAD (CWAD)

Este criterio representa la concentración de cianuro WAD después de aplicado el método de tratamiento de los efluentes de la planta de recuperación de oro, es decir, es la concentración a la entrada del dique de colas. Su escala es de tipo cardinal, tomando valores dentro del intervalo [8, 241] (Adams y Lloyd, 2008). Tiene un sentido de preferencia decreciente, ya que es un criterio a minimizar. Los umbrales de indiferencia, preferencia y veto adoptados para este criterio son, respectivamente, 2, 5 y 10. Este es el único criterio para el cual se considera el umbral de veto, ya que, por su naturaleza, es el único capaz de vetar la hipótesis de sobreclasificación.

3.2.2 Producción de subproductos tóxicos (SubT)

Desde el punto de vista ambiental, uno de los aspectos relevantes al comparar las diversas alternativas es la producción de subproductos tóxicos. Los procesos que involucran la destrucción de cianuro dan siempre como resultado algún subproducto nocivo para la biota, como es el caso del cianato, tiocianato, amoníaco o nitrato. Aunque sean menos nocivos que el cianuro, no dejan de ser relevantes.

Una de las principales cualidades de los métodos ELECTRE es la posibilidad de utilizar escalas de tipo cardinal y ordinal. Este criterio presenta una escala del segundo tipo, tomando valores de 0 cuando no se obtienen subproductos tóxicos y de 1 en el caso contrario. De este modo, su sentido de preferencia es decreciente. Los umbrales de indiferencia y de preferencia son nulos.

3.2.3 Riesgo de transporte y manejo de cianuro (RtmC)

La recuperación del cianuro, además de tener notorios beneficios económicos, posee la gran ventaja de disminuir los riesgos ambientales. La reducción de cianuro -a veces muy significativa- que se introduce en el proceso hidrometalúrgico disminuye los riesgos asociados a su transporte, almace-

namiento y manejo. Esta es la plusvalía ambiental que se desea expresar al introducir este criterio. Si se tuviera información referente al total de cianuro usado en la planta de recuperación de oro, bastaría calcular el porcentaje de cianuro recuperado en cada una de las alternativas a partir de los valores de la Tabla 1. Como no se dispone de dicha información, se calcula el porcentaje de cada alternativa con respecto a la alternativa que presenta el valor máximo para la recuperación de cianuro de sodio, WPS.

Es posible asociar una escala a expresiones verbales, a través de una codificación numérica de esas expresiones e indicar el sentido de preferencia. En la mayoría de los casos, la escala es aritmética, pero puede existir otro tipo de codificaciones, como la diferencia linealmente creciente o la progresión geométrica. Para este criterio se adoptó este último tipo de codificación, de modo que, cuando las alternativas se comparan se dé mayor importancia a la diferencia entre dos alternativas con el riesgo de transporte y manejo de cianuro de 40 - 20% y de 60 - 40%, y menor a la diferencia entre dos alternativas de 60 - 40% y 80 - 60% (Tabla 2). Así, en el primer caso, y de acuerdo con la evaluación numérica adoptada, la diferencia es de 4 y en el segundo es de 2.

Este criterio tiene una escala ordinal y el sentido de preferencia es decreciente. Los umbrales de indiferencia y preferencia son, respectivamente, 1 y 2.

Tabla 1: Recuperación de cianuro.

Alternativa	Recuperación de NaCN (Kg/a)
Recl	365,000
WPS	1,426,723
AVR	1,187,110
SART	955,905
INCO	0
AcCr	0
PerH	0

Fuente: Adams y Lloyd (2008)

Tabla 2: Riesgo de transporte y manejo de cianuro.

Recuperación de NaCN (%)	Evaluación numérica
100-80	1
80-60	2
60-40	4
40-20	8
20-0	16

3.2.4 Conformidad a la norma (CfNr)

Al introducir este criterio en el MCDA, se pretende expresar la conformidad con la recomendación de la Directiva Europea, según la cual, a partir del 1 de mayo de 2018, la concentración de cianuro WAD de los residuos a la entrada del dique de colas no debe superar los 10 mg/L. La escala asociada a este criterio es de tipo ordinal. Se asigna el valor 0 en caso de conformidad con la Directiva, es decir, cuando la concentración de cianuro WAD es igual o inferior a 10 mg/L; y el valor 1 en caso contrario. Por lo tanto, tiene un sentido de preferencia decreciente. Los umbrales de indiferencia y de preferencia son nulos.

3.2.5 Ingresos (Ingr)

Para cada una de las alternativas, se consideran los ingresos asociados a la recuperación de cianuro, en forma de NaCN; de cobre (Cu) y de oro (Au). Para el cálculo de los costos sólo se consideraron los que derivan del consumo de reactivos de cada proceso. Este criterio resulta de

la diferencia entre los ingresos y los costos asociados a los reactivos, adoptando los valores de Adams y Lloyd (2008). Los costos de capital de una planta de un proceso regenerativo son muy superiores a los de una planta de oxidación, sin embargo este incremento es compensado por los ingresos de las recuperaciones los subproductos que posibilitan y por la significativa disminución de gastos en reactivos. Esto se traduce en un período de recuperación del capital invertido bastante corto (Adams et al., 2008). Este criterio tiene una escala cardinal y un sentido de preferencia creciente. Sus umbrales de indiferencia y preferencia son 0,5 y 1,5, respectivamente.

4. Presentación y discusión de los resultados

Las 7 (siete) alternativas son evaluadas según los 5 (cinco) criterios seleccionados. Esos valores están plasmados en la matriz de evaluación de la Tabla 3.

Los pesos o coeficientes de importancia fueron determinados a través de los dos métodos anteriormente descritos, el método basado en la PCT (Tabla 4), y el método SRF (Tabla 5). En el primer caso, el criterio g_1 es el que presenta mayor peso, y el valor mínimo corresponde al criterio g_5 , concentración de cianuro WAD e ingreso, respectivamente.

Tabla 3. Matriz de evaluación.

Alternativa	Criterio				
	CWAD ^a	SubT	RtmC	CfNr	Ingr ^b
	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
Recl	241	0	8	1	1,7
WPS	24	0	1	1	7,0
AVR	8	0	1	0	5,0
SART	8	0	2	0	6,9
INCO	13	1	16	1	-1,1
AcCr	13	1	16	1	-5,5
PerH	13	1	16	1	-2,1

^a mg/L ^b US\$ $\times 10^6$ p.a.

Tabla 4. Pesos calculados con el método PCT

	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	RC_j	RCf_j^a	w_j
g_1	-					4	4.1	0.390
g_2		-	X	X		1	1.1	0.105
g_3			-	X		2	2.1	0.200
g_4				-		3	3.1	0.295
g_5					-	0	0.1	0.010

^a $RCf_j = RC_j + \frac{1}{\sum_{j=1}^5 RC_j}$ Para que el criterio g_5 pueda ser considerado

Al aplicar el método SRF, los criterios fueron ordenados de forma coherente con el método PCT, y se introdujo una tarjeta blanca entre los dos mejores criterios para reforzar la importancia relativa de la concentración de cianuro WAD. Así se obtiene, por orden creciente de importancia:

g_5, g_2, g_3, g_4 , tarjeta blanca, g_1 . En la Tabla 5 se presentan los pesos de los criterios para diversos valores de z . Se puede observar que, como en el método PCT, los criterios extremos también son g_1 y g_5 , máximo y mínimo, respectivamente; aumentando la distancia entre ellos con el aumento de z .

Del análisis comparativo de los pesos calculados por ambos métodos (Tabla 5), resulta que, en general, no se observan grandes diferencias en los resultados obtenidos. Sin embargo, si se toma como referencia el peso máximo w_1 , los valores más similares, al comparar ambos métodos, ocurren cuando $z = 10$. Para el peso mínimo w_5 , cuando $z = 20$ los valores se aproximan más.

Aunque no se pueda afirmar cuál de los dos métodos es más eficaz en la determinación de las ponderaciones, puede decirse que el nivel de imprecisión es mucho más significativo en el método SRF. En este caso, la imprecisión resulta de la ordenación de los criterios por parte del decisor, así como también del número de tarjetas blancas que introduce y del valor que le atribuye a z (Corrente et al., 2017). Podemos así afirmar, de acuerdo con Romero (1996), que los métodos basados en la comparación de pares de criterios parecen ser más consistentes, en comparación con otros métodos alternativos.

Tabla 5 : Pesos de los criterios.

Criterio	SRF (w_j)				PCT(w_j)
	(Z)				
	5	10	15	20	
g_1	0.363	0.404	0.419	0.427	0.390
g_2	0.130	0.113	0.106	0.103	0.105
g_3	0.188	0.185	0.184	0.184	0.200
g_4	0.247	0.258	0.263	0.265	0.295
g_5	0.072	0.040	0.028	0.021	0.010

Tabla 6 : Umbrales para cada criterio.

Criterio	Umbral		
	q_j	p_j	v_j
$g_1 \downarrow$	2	5	10
$g_2 \downarrow$	0	0	
$g_3 \downarrow$	1	2	
$g_4 \downarrow$	0	0	
$g_5 \uparrow$	0.5	1	

Para la aplicación del método ELECTRE III, además del cálculo de los pesos, se definieron también los umbrales de indiferencia (q) y de preferencia (p) para cada uno de los criterios y el umbral de veto (v) para el criterio g_1 (Tabla 6). Con el conjunto de coeficientes definido, son ordenadas las alternativas, como se muestra en la Figura 2a). De su análisis, resulta que las alternativas SART y AVR son las que ocupan la primera posición, *ex aequo*, en la ordenación del conjunto de las siete

alternativas. En segunda posición, se encuentran la alternativa WPS y las alternativas INCO, AcCr y PerH. Estas tres últimas son indiferentes entre sí e incomparables con WPS. En tercera y última posición se presenta la alternativa Recl. De esta manera, los métodos de recuperación SART y AVR resultan los más atractivos para la decianuración de los residuos de la minería de oro, según los criterios seleccionados y el conjunto de coeficientes definido. En segundo lugar, se encuentra otro método regenerativo, el WPS, que es incomparable en relación a los tres métodos destructivos. Entre estos últimos no se destaca ninguno, ocupan la misma posición en la ordenación del conjunto. El menos atractivo de los procesos es aquel que contempla el lavado de relaves y reciclado de cianuro, Recl.

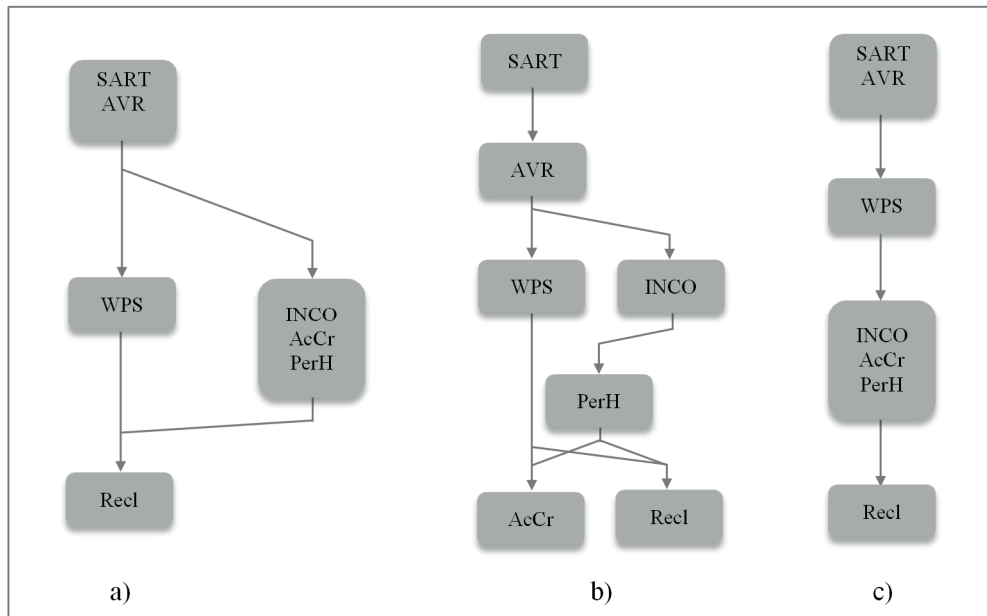


Figura 2. Ordenación según ELECTRE III.

5. Análisis de Sensibilidad y Robustez

Dado que la solución resultante de la aplicación de ELECTRE III depende en gran medida de los parámetros utilizados, es necesario proceder a un análisis de sensibilidad que permita probar la estabilidad de la solución encontrada, frente a la variación de los mismos parámetros, que reflejan las preferencias del decisor. Así, el análisis de sensibilidad fue realizado considerando:

- La importancia relativa o peso de cada criterio (w_j);
- El umbral de indiferencia de cada criterio (q_j);
- El umbral de preferencia de cada criterio (p_j);
- El umbral de veto de cada criterio (v_j).

Los umbrales que expresan la imprecisión e incertidumbre asociadas los datos sometidos al análisis multicriterio son tomados de forma arbitraria, aunque estén estrechamente relacionados con la naturaleza del criterio. Los pesos o factores de ponderación reflejan la importancia relativa

de cada criterio, y dependen sólo de las preferencias del decisor, con un grado de arbitrariedad más elevado que el de los umbrales.

El análisis de robustez tiene como objetivo determinar el dominio de la variación de ciertos parámetros para el cual la solución de base, encontrada en un primer análisis, permanece inalterada (Maystre et al., 1994). A través de este análisis, el decisor puede percibir cuál es el grado de estabilidad de la solución ante las variaciones impuestas.

Para evaluar la sensibilidad a la variación del peso de los criterios, se cambió la posición del criterio Ingr, desde la última posición, en la solución base, hasta la primera. En lo que se refiere a los umbrales, para cada criterio, se toman sus valores extremos, como sugiere Mena (2001). Así, para los umbrales de indiferencia, los valores extremos son 0 y el valor del umbral de preferencia. Para los umbrales de preferencia, el valor mínimo es el umbral de indiferencia y el valor máximo del umbral de veto. El límite inferior del umbral de veto es el umbral de preferencia y el superior es la máxima diferencia entre los valores de las alternativas.

La solución base (Figura 2 a), solo se altera cuando la relación entre los pesos de los criterios es: $w_1 > w_4 > w_5 > w_3 > w_2$; $w_1 > w_5 > w_4 > w_3 > w_2$ y $w_5 > w_1 > w_4 > w_3 > w_2$. Es decir, cuando el criterio Ingr ocupa, respectivamente, la tercera, segunda y primera posición, en grado de importancia. Podríamos decir que en esta variación de pesos, pasando Ingr desde un polo a otro, se cambia de una perspectiva más ambientalista a otra más económica. La primera valora más los criterios con repercusiones ambientales y menos el criterio económico, la segunda, al revés, atribuye una importancia máxima al criterio de naturaleza económica. En cuanto a la variación de los umbrales, la solución base sólo se altera cuando el umbral de veto del criterio CWAD es igual o superior a 14 (Figura 2 c).

La alternativa SART ocupa en todos los casos la primera posición, en ocasiones *ex aequo* con la alternativa AVR, y en otros casos sola. Cuando el criterio Ingr comienza a ser más valorado, la alternativa AVR pasa a la segunda posición. La alternativa WPS en ocasiones ocupa la segunda posición, en otras, la tercera; a semejanza de la alternativa INCO. Las alternativas PerH y AcCr son más inestables. La alternativa Recl ocupa siempre la última posición.

Asimismo, hay que tener en cuenta que la solución base permanece inalterada en el 66.7% de las situaciones en que ocurre un cambio de parámetros. Puede así concluirse que la solución base, resultante de la aplicación del método ELECTRE III es una solución robusta, presentando sólo pequeñas alteraciones. Esta robustez ofrece cierta seguridad al decisor, en el sentido que la solución propuesta por el método no conduce al fracaso cuando se alteran los parámetros propuestos (Vincke, 2013).

6. Conclusión

Las exigencias actuales en la utilización del cianuro en la minería de oro, tanto por parte de reguladores como de comunidades, requieren un mayor enfoque en la minimización de los impactos ambientales asociados. Este es un aspecto determinante que merece ser debidamente considerado, de tal manera de tornar más amigable, ambiental y socialmente, un sector productivo con un potencial económico muy elevado. La selección del proceso más adecuado para la detoxificación de los residuos cianurados es una tarea compleja, dada la multiplicidad de factores involucrados y la amplia gama de alternativas existentes. Como apoyo a este proceso decisorio, en este trabajo se presenta el método de análisis multicriterio ELECTRE III. Luego de describir algunas nota-

ciones y conceptos básicos de ELECTRE III, se detallan las dos fases para la ordenación de las alternativas: la construcción de la relación de sobreclasificación y la exploración de la relación de sobreclasificación. Los coeficientes de importancia o pesos utilizados por ELECTRE III son calculados a través de dos métodos distintos: PCT y SRF. Para la aplicación de ELECTRE III, se eligieron 7 alternativas, 4 de ellas del grupo de los procesos regenerativos y 3 de los destructivos. Las alternativas se evaluaron según 5 criterios, englobando los distintos ámbitos involucrados en la toma de decisión. Se realizó un análisis de sensibilidad y robustez para diferentes valores de ponderaciones de los criterios y de los umbrales de indiferencia, preferencia y veto, parámetros que dependen de las preferencias del decisor. Los resultados obtenidos indican que la alternativa SART ocupa siempre la primera posición en la ordenación del conjunto; en algunos casos sola, y en otros junto a la alternativa AVR. La peor alternativa es siempre Recl, sola o *ex aequo* con la alternativa AcCr.

La utilización del método ELECTRE III presenta ventajas en relación con otros métodos de análisis multicriterio, ya que permite incorporar la incertidumbre e imprecisión asociadas a la información sometida al análisis, a través de pseudo-criterios. Posibilita, además, que esa información pueda ser de tipo cualitativo o cuantitativo, y no presenta restricciones con respecto al número de criterios y de alternativas involucradas en el proceso.

Referencias

- Adams, M., Lawrence, R., & Bratty, M. (2008). Biogenic sulphide for cyanide recycle and copper recovery in gold-copper ore processing. *Miner. Eng.* 21, 509–517.
- Adams, M., & Lloyd, V. (2008). Cyanide recovery by tailings washing and pond stripping. *Miner. Eng.* 21, 501–508.
- Amegbey, N.A. y Adimado, A.A. (2003). Incidents of cyanide spillage in Ghana. *Miner. Process. Extr. Metall.* 112, 126–130.
- Betrie, G.D., Sadiq, R., Morin, K.A., & Tesfamariam, S. (2013). Selection of remedial alternatives for mine sites: A multicriteria decision analysis approach. *J. Environ. Manage.* 119, 36–46.
- Botz, M.M., Mudder, T.I. y Akcil, A.U. (2016). Cyanide Treatment, in: *Gold Ore Processing*. Elsevier, pp. 619–645.
- Botz, M.M., Scola, J.C., & Fueyo, R. (2004). *Cyanide recovery practice at Cerro Vanguardia*, SME Annual Meeting, Preprint 04-97 [WWW Document]. URL <http://elbow-creek.com/04-97.pdf> (accessed 5.30.17).
- Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Perny, P., Tsoukias, A., & Vincke, P. (2000). *Evaluation and Decision Models: A Critical Perspective*, International Series in Operations Research & Management Science. Springer US.
- Bouyssou, D., & Roy, B. (1987). La Notion De Seuils De Discrimination En Analyse Multicritère. *INFOR Inf. Syst. Oper. Res.* 25, 302–313.
- Bustos, S., Estay, H., & Arriagada, F. (2010). *Design, Developments and Challenges of the SART process*. Presented at the HydroProcess 2010, 3th International Workshop on Process Hydro-metallurgy, Santiago, Chile.
- Carmo, Flávio Fonseca do F.F., Kamino, L.H.Y., Junior, R.T., Campos, I.C. de, Carmo, Felipe Fonseca do, Silvino, G., Castro, K.J. da S.X. de, Mauro, M.L., Rodrigues, N.U.A., Miranda, M.P. de S., & Pinto, C.E.F. (2017). Fundação tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspect. Ecol. Conserv.* 15, 145–151.

- Connelly, D. (2016). *Cyanide Detox or Recovery* [WWW Document]. URL <https://www.linkedin.com/pulse/cyanide-detox-recovery-damian-connelly> (accessed 3.30.17).
- Corrente, S., Figueira, J.R., Greco, S., & Słowiński, R. (2017). A robust ranking method extending ELECTRE III to hierarchy of interacting criteria, imprecise weights and stochastic analysis. *Omega* 73, 1–17.
- Cunningham, S.A. (2005). Incident, Accident, Catastrophe: Cyanide on the Danube. *Disasters* 29, 99–128.
- Dwivedi, N., Balomajumder, C., & Mondal, P. (2016). Comparative investigation on the removal of cyanide from aqueous solution using two different bioadsorbents. *Water Resour. Ind.* 15, 28–40.
- Eisler, R. (1991). Cyanide Hazards to Fish, Wildlife, and Invertebrates: A Synoptic Review (*Organization Series No. Report 23 ; Biological Report 85(1.23)*), Contaminant Hazard Reviews. U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Laurel, MD.
- Eisler, R., & Wiemeyer, S.N. (2004). Cyanide hazards to plants and animals from gold mining and related water issues, in: *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Springer, pp. 21–54.
- Estay, H., Carvajal, P., Hedjazi, F., & Zeller, T.V. (2012). *The SART process experience in the Gedabek plant*. Presented at the HydroProcess 2012, 4th International Workshop on Process Hydrometallurgy, Santiago, Chile.
- Estay, H., Troncoso, E., & Romero, J. (2014). Design and cost estimation of a gas-filled membrane absorption (GFMA) process as alternative for cyanide recovery in gold mining. *J. Membr. Sci.* 466, 253–264.
- Figueira, J., Mousseau, V., & Roy, B. (2005). Electre Methods, in: *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, International Series in Operations Research & Management Science. Springer, New York, NY, pp. 133–153.
- Figueira, J., Roy, B. (2002). Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure. *Eur. J. Oper. Res., EURO XVI: O.R. for Innovation and Quality of Life* 139, 317–326.
- Figueira, J.R., Greco, S., Roy, B., & Słowiński, R. (2013). An Overview of ELECTRE Methods and their Recent Extensions: ELECTRE METHODS. *J. Multi-Criteria Decis. Anal.* 20, 61–85.
- Fleming, C.A. (2016). Cyanide Recovery, in: *Gold Ore Processing*. Elsevier, pp. 647–661.
- Govindan, K., & Jepsen, M.B. (2016). ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *Eur. J. Oper. Res.* 250, 1–29.
- Hedjazi, F., & Monhemius, A.J. (2014). Copper–gold ore processing with ion exchange and SART technology. *Miner. Eng.* 64, 120–125.
- Hijosa-Valsero, M., Molina, R., Schikora, H., Müller, M., & Bayona, J.M. (2013). Removal of cyanide from water by means of plasma discharge technology. *Water Res.* 47, 1701–1707.
- Hokkanen, J., & Salminen, P. (1997). Choosing a solid waste management system using multicriteria decision analysis. *Eur. J. Oper. Res.* 98, 19–36.
- Huang, I.B., Keisler, J., & Linkov, I. (2011). Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Sci. Total Environ.* 409, 3578–3594.
- Infante, C.E.D. de C., Mendonça, F.M. de e Valle, R. de A.B. do (2014). Análise de robustez com o método Electre III: o caso da região de Campo das Vertentes em Minas Gerais. *Gest. Produção* 21, 245–255.
- Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). *Multi-criteria decision analysis: methods and software*. Wiley, Chichester, West Sussex, United Kingdom.

- Karagiannidis, A., & Moussiopoulos, N. (1997). Application of ELECTRE III for the integrated management of municipal solid wastes in the Greater Athens Area. *Eur. J. Oper. Res.* 97, 439–449.
- Kumar, R., Saha, S., Dhaka, S., Kurade, M.B., Kang, C.U., Baek, S.H., & Jeon, B.H. (2017). Remediation of cyanide-contaminated environments through microbes and plants: a review of current knowledge and future perspectives. *Geosystem Eng.* 20, 28–40.
- Kumar, V., Del Vasto-Terrientes, L., Valls, A., & Schuhmacher, M. (2016). Adaptation strategies for water supply management in a drought prone Mediterranean river basin: Application of outranking method. *Sci. Total Environ.* 540, 344–357.
- Kuyucak, N., & Akcil, A. (2013). Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes. *Miner. Eng.* 50–51, 13–29.
- Marzouk, M.M. (2011). ELECTRE III model for value engineering applications. *Autom. Constr.* 20, 596–600.
- Maystre, L.Y., Pictet, J., & Simos, J. (1994). *Méthodes multicritères ELECTRE: description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- Mena, S.B. (2001). Une solution informatisée à l'analyse de sensibilité d'Electre III. *Biotechnol Agron Soc Env.* 5, 31–35.
- Mudder, T.I., & Botz, M.M. (2004). Cyanide and society: a critical review. *Eur. J. Miner. Process. Environ. Prot.* 4, 62–74.
- Mudder, T.I., Botz, M.M., & Smith, A. (2001). *Chemistry and Treatment of Cyanidation Wastes*, Second Edition. ed. London.
- Norese, M.F. (2006). ELECTRE III as a support for participatory decision-making on the localisation of waste-treatment plants. *Land Use Policy* 23, 76–85.
- Olson, D.L. (1995). *Decision Aids for Selection Problems*. Springer My Copy UK.
- Pérez, B.F. (2007). *Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro de aguas residuales de mina* (<http://purl.org/dc/dcmitype/Text>). Universidad de Oviedo.
- Rogers, M., & Bruen, M. (1998). Choosing realistic values of indifference, preference and veto thresholds for use with environmental criteria within ELECTRE. *Eur. J. Oper. Res.* 107, 542–551.
- Rogers, M.G., Bruen, M., & Maystre, L.-Y. (2000). *Electre and Decision Support: Methods and Applications in Engineering and Infrastructure Investment*. Springer US.
- Romero, C. (1996). *Análisis de las decisiones multicriterio*. Isdefe, Madrid.
- Uppal, H., Tripathy, S.S., Chawla, S., Sharma, B., Dalai, M.K., Singh, S.P., Singh, S., & Singh, N. (2017). Study of cyanide removal from contaminated water using zinc peroxide nanomaterial. *J. Environ. Sci.* 55, 76–85.
- Vincke, P. (2013). Outranking approach, in: *Multicriteria Decision Making: Advances in MCDM Models, Algorithms, Theory, and Applications*. Springer Science & Business Media, pp. 11.1-11.29.
- Vlachokostas, C., Michailidou, A.V., Matziris, E., Achillas, C., & Moussiopoulos, N. (2014). A multiple criteria decision-making approach to put forward tree species in urban environment. *Urban Clim.* 10, 105–118.
- Xie, F., Dreisinger, D., & Doyle, F. (2013). A Review on Recovery of Copper & Cyanide From Waste Cyanide Solutions. *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* 34, 387–411.
- Young, C.A., & Jordan, T.S. (1995). Cyanide Remediation: Current and Past Technologies, in: *Proceedings of the 10th Annual Conference on Hazardous Waste Research*, Kansas State University, Kansas.
- Žak, J., & Kruszyński, M. (2015). Application of AHP and ELECTRE III/IV Methods to Multiple Level,

Multiple Criteria Evaluation of Urban Transportation Projects. *Transp. Res. Procedia* 10, 820–830.
Zheng, Y., Li, Z., Wang, X., Gao, X., & Gao, C. (2015). The treatment of cyanide from gold mine effluent by a novel five-compartment electro dialysis. *Electrochimica Acta* 169, 150–158.

Recibido: julio de 2019

Aceptado: octubre de 2019

