

ENVIRONMENTAL INDICATORS FOR IMPACT ASSESSMENT IN MINING WASTE TREATMENTS

Alvarez Cabal, J. V.; Luiña Fernández, R.; Pecharroman Clemente, D.;
Rodríguez Pérez, F.

Universidad de Oviedo

Mining industry generates a great amount of waste in the concentration process, which must be stored in ponds and landfills. In order to reduce storage requirements, some waste treatments recover most of the water, transforming waste into a viscous fluid or paste. This treatment involves the installation of equipment and energy consumption for thickening and pumping. Efforts have been made to compare different treatments of solid waste by complex methodologies such as Life Cycle Assessment. But advantages like the reduction of water consumption (not adequately reflected in the Life Cycle Analysis), the relationship between treatment and the facility dismantling process, among others; are not adequately described. Another factor that must be considered, given the huge volume stored, is the failure risk, with serious environmental consequences. Existing methodologies for analyzing life cycle impacts are preferably oriented to industry, so in this paper a proposal of an adaptation that keeps in mind the peculiarities of the mining sector is presented.

Keywords: *Life Cycle Assessment; Water footPrint; Tailings; Waste management*

INDICADORES AMBIENTALES PARA LA VALORACIÓN DE IMPACTOS EN EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS MINEROS.

La industria minera produce gran cantidad de residuos en el proceso de concentración, que deben ser almacenados en balsas y vertederos. Para disminuir la necesidad de almacenamiento aparecen tratamientos que recuperan la mayor parte del agua transformando el residuo en un fluido viscoso o paste. Dicho tratamiento supone el montaje de equipos y un consumo de energía para el espesamiento y bombeo. Se han realizado esfuerzos para comparar diferentes tratamientos de residuos sólidos con metodologías tan complejas como el Análisis de Ciclo de Vida. Pero ventajas son un menor consumo de agua (no adecuadamente reflejado en los análisis de ciclo de vida), la relación entre el tratamiento y el desmantelamiento de la instalación, entre otros. Otro factor que debe ser considerado, dado el alto volumen almacenado es el riesgo de accidente con graves consecuencias ambientales. Las metodologías existentes de análisis de impactos del ciclo de vida están orientadas preferentemente al sector industrial, por lo que en esta ponencia se propone una adaptación que tenga presente las peculiaridades del sector minero.

Palabras clave: *Análisis de Ciclo de Vida; Huella de agua; Residuos mineros; Gestión de residuos*

Correspondencia: valer@api.uniovi.es

1. Introducción

Aunque mediatizado por la crisis económica, existe una demanda social por una minimización de los efectos medioambientales adversos de la actividad económica. Cuanto más visible son los efectos de la actividad tanto mayor es la presión social existente. Las Administraciones Públicas realizan esfuerzos para asegurar que se minimizan los impactos ambientales. También las empresas han incorporado este sentimiento a través de sus políticas de responsabilidad social corporativa. Por todo ello, en la toma de decisiones dentro de la empresa el factor sostenibilidad ambiental es cada vez más importante. Pero una vez que la sostenibilidad ambiental se integra como elemento decisorio, el problema pasa a ser el disponer de herramientas adecuadas para seleccionar la mejor opción. El concepto más interesante en este campo son los Análisis del Ciclo de Vida que incorporan la consideración de todas las etapas involucradas, desde la obtención de las materias primas y llegando hasta la disposición del producto o el desmantelamiento de la instalación.

El sector minero produce importantes impactos medioambientales, tanto en las explotaciones como en las plantas de tratamiento. Uno de los principales problemas es la gran cantidad de residuos generados (Kulczycka, 2008). Esta cantidad tendera a aumentar puesto que cada vez se explotan yacimientos con menores leyes por lo que el volumen de residuos es creciente, incluso para una producción constante. Las normas medioambientales son cada vez más restrictivas estableciendo limitaciones a las formas en que son tratados. Se requieren grandes extensiones y el almacenaje por largos periodos de tiempo se transforma en un problema medioambiental relevante. (Reid et al., 2008). Parte de los residuos son contaminantes pero incluso los inertes como los procedentes de la minería del hierro representan un problema creciente. Para dar idea de las cantidades se calcula que en las minas de hierro de Minas Gerais (Brasil) se genera una tonelada de residuos por cada tonelada de mineral, y esta cifra se considera menor que el promedio mundial. Además, parte de las minas están en lugares con escasez de agua o con lluvias muy irregulares, lo que hace la gestión del agua muy importante.

Para resolver los problemas del acumulo continuo de residuos, hay un interés creciente en el tratamiento y procesado de relaves (*tailings*) para disminuir el tamaño de las balsas de almacenamiento necesarias.

Sin embargo, el espesado de lodos requiere de importantes instalaciones y de un fuerte consumo energético, por lo que la alternativa de utilizar esta técnica se presenta como una comparación desde el punto de vista de la sostenibilidad entre ocupación de vertedero y uso de electricidad.

En el caso de llegar a espesados con gran reducción en el porcentaje de agua el consumo energético en el espesado y el movimiento de material es muy importante, por lo que es comparar esta solución con el almacenamiento para tomar las decisiones de cual es más sostenible desde el punto de vista medio-ambiental.

Para dicha toma de decisiones, sería necesario buscar una metodología que tuviera en cuenta el concepto de ciclo de vida, considerando todas las etapas del proceso. La metodología de Análisis de Ciclo de Vida se presenta como una buena alternativa, ya que es utilizada de forma muy habitual para evaluar el impacto ambiental generado por productos y procesos. Sigue los estándares establecidos por Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) y recogidos en ISO 14040 y 14044.

De acuerdo con la ISO14040 se define Análisis del Ciclo de Vida como la técnica para evaluar los aspectos ambientales y los impactos potenciales asociados a un producto, proceso o servicio” incluyendo las siguientes etapas: recopilar un inventario ambiental con todos los insumos y residuos generados en las distintas etapas del proceso (lo que constituye una

modelización del proceso), evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados con entradas identificados e interpretar los resultados para ayudar a tomar una decisión más adecuada (ISO 2006). El método es especialmente adecuado para la comparación entre alternativas.

La metodología del ciclo de vida se aplica a la minería y la industria de procesamiento de minerales en la década de los 90s. Inicialmente se usa con el objetivo de llevar a cabo inventarios del ciclo de vida en ACV comparativos entre metales y otros productos sustituidos. Su interés es ser parte de los procesos de obtención de materiales como el acero, por ejemplo. Pero no se consideró hasta más tarde el interés de realizar análisis orientados al propio proceso minero. A partir de proyectos como el *Minería, minerales y desarrollo sostenible* (MMSD) se llegó a la conclusión de que "el ACV es una herramienta útil para proporcionar una evaluación de las consideraciones medioambientales durante la toma de decisiones dentro de la industria", a pesar de las limitaciones de la herramienta.

En general, todos los ACV realizados reflejan sistemas de explotación minera muy simplificados en los que la gestión de los residuos no se llega a considerar. Sin embargo el tratamiento de los relaves y el cierre de la explotación son partes del ciclo de vida que afectan al impacto de la instalación de forma relevante. (Kulczycka, 2008). En la actualidad hay una tendencia a considerar la gestión de residuos sólidos como un proceso de unidad adicional (proceso de fin de vida). Por ejemplo, en los conjuntos de datos de Ecoinvent según se recoge en (Lesage, 2008) se describe el proceso de manejo de relaves sulfuroso pero considerando sólo la ocupación de tierras, no considerando las emisiones de los relaves en el tiempo y los requisitos de energía y material para el manejo de relaves sulfuroso.

Al intentar aplicar la metodología de ciclo de vida a una comparación entre tratamientos de relaves de minería de hierro se advierten problemas metodológicos importantes que limitan la calidad de la toma de decisiones basada exclusivamente en el Análisis de Ciclo de Vida.

En esta ponencia se repasan los principales inconvenientes observados al intentar utilizar el Análisis de Ciclo de Vida como herramienta de selección entre distintas opciones de tratamiento de residuos en la empresa minera. Para solventar los problemas detectado se ofrece herramientas complementarias que permiten una toma de decisiones más ajustada.

Se comenzará describiendo brevemente el tratamiento de espesamiento que se plantea como alternativa al almacenamiento en vertedero, mostrando sus ventajas e inconvenientes. Posteriormente se intentará ver como esos aspectos son recogidos por las distintas herramientas presentadas. detallando las ventajas que presenta para preguntarse si se ven reflejadas en el Análisis de Ciclo de Vida. Los datos de partida se toman de las experiencias recogidas en (Luiña, 2012).

2. Espesamiento de relaves

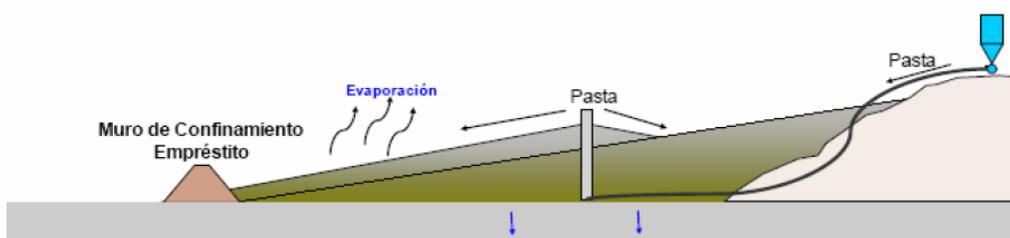
Toda planta minera en la que el proceso de concentración sea la flotación produce residuos sólidos que se denominan relaves, una suspensión de finos sólidos en líquido. Las proporciones de sólidos en agua son bajas y pueden variar en función de la instalación. Para su tratamiento hay varias alternativas:

- Descarga en un lugar con capacidad suficiente para almacenar los relaves a lo largo de todo el ciclo de vida de la planta
- Depósito en una balsa, habitualmente con un muro constituido por los desechos de granulometría más alta o por la construcción de un embalse
- Espesado transformándolo en el equivalente de un suelo húmedo. Cuando el espesado es más drástico se denomina paste. El paste es un lodo viscoso con un

porcentaje de finos suficientemente alto para que se comporte como un fluido de Bingham.

El tratamiento de paste incluye un espesador, siendo los cónicos los más habituales (Peck, 2007) (Jewel & Fourie, 2006). Debe estar colocado cerca de la zona de depósito para minimizar desplazamiento. La descarga se realiza de tal forma que se extiendan capas sucesivas con separación de varios días, tiempo suficiente para su secado. (Wennberg, 2010).

Figura 1. Esquema de tratamiento de espesado de relaves con el concentrador adyacente al depósito



Tras el concentrador el porcentaje de sólidos es de alrededor del 65%. Se considera que se puede llegar a recuperar el 90% del agua, incluyendo la recuperada en propio espesador y en la denominada “playa” que se forma en los límites del relave una vez depositado. (Wennberg, 2010)

Figura 2. Espesador (izquierda) y Relave espesado fluyendo sobre una capa ya en proceso de secado (derecha)



Las ventajas principales del espesado de relaves son las siguientes: (Valdebenito, 2010) (Ramirez 2007)

- Se reduce la necesidad de construir grandes depósitos, por lo que los materiales necesarios disminuyen
- Es mayor la recuperación de agua, reduciéndose las pérdidas por infiltración y evaporación.
- La necesidad de suelo para disponer los relaves es menor.
- Se pueden desarrollar actividades de vegetación o de remediación en forma paralela a la operación

- No existe riesgo de licuación
- No hay erosión por efecto del viento ni de las lluvias
- Aumenta la estabilidad sísmica
- Bajan los riesgos de fallo geo-mecánico de las presas convencionales

Figura 3. Depósito de Relave Espesado



Cuando se compara el espesado con otras opciones de tratamientos de relaves mediante el Análisis de Ciclo de Vida parte se reflejan parte de las ventajas antes mencionadas: menor uso de terreno, menor uso de materiales para las presas, el aspecto negativo del mayor consumo energético, pero otras no aparecen reflejadas plenamente. Cabe preguntarse si es debido a limitaciones del método.

El Análisis de Impacto de Ciclo de Vida (LCIA) incluye las etapas de clasificación, caracterización y ponderación. En ellas los distintos impactos son agrupados, transformados a unidades comunes y posteriormente ponderados entre sí hasta alcanzar un pequeño número de indicadores que representan los impactos totales. Aunque la metodología de ACV es universalmente aceptada, existen muchas metodologías de LCIA y su conveniencia es discutida. Cada método se ha desarrollado para entornos diferentes, con métodos y factores distintos. Los más utilizados en Europa son el Ecoindicador99 de origen holandés y Recipe, evolución del anterior y el previo CML suizo. El conjunto de indicadores intermedios es grande pero, por ejemplo, en muchas de las metodologías el uso del agua no está contemplado. La dificultad de ponderar el uso de agua como impacto y la dependencia del impacto de las condiciones geográficas del lugar de extracción ha hecho que la práctica totalidad de las metodologías no la incluyan (con excepción del efecto de los vertidos)

Aun las etapas con mayor consenso como la caracterización están en constante actualización. Uno de los puntos más conflictivos es que los potenciales impactos se consideran globales. Por ejemplo, el CO₂ emitido puede ser considerado como un factor que afecta al Cambio Climático independientemente de donde se produce. Pero en impactos locales y regionales, la localización es extremadamente importante. La acidificación no produce las mismas consecuencias en todos los lugares, depende de la situación geográfica, de los ecosistemas involucrados, y de la confluencia con otras emisiones.

La aplicación del Análisis de Valor Ganado realizada en (Luiña 2012) utiliza la metodología de evaluación de impactos del ciclo de vida Ecoindicador99. Esta metodología tiene la ventaja de ser bien conocida y tener muchas referencias en la bibliografía, pero para procesos como el que se aquí se detalla, muestran múltiples lagunas que pueden desvirtuar su utilidad en el proceso de toma de decisiones.

En esta ponencia se repasan las debilidades detectadas (debidas a la metodología de LCIA y no a deficiencias en el inventario, muy complejo en estos casos), que son:

- Uso del terreno
- Reducción del uso del agua
- Efecto local
- Riesgo de accidente o fuga

3. Uso del terreno

Entre los impactos potenciales en la gestión de relaves mineros, el deterioro de la potencialidad de uso del terreno es una de las principales preocupaciones para (Ripley, 1996) (Jolliet, 2004) (Rocio 2012). El uso superficial del terreno para actividades antropogénicas es reconocida como una amenaza potencial para especies y ecosistemas. A pesar de su importancia, la categoría de uso del terreno es uno de los impactos en las que las metodologías de análisis son más discutidas y donde se reconoce una necesidad de mejora. Las metodologías existentes no discriminan suficientemente entre distintos usos y transformaciones del suelo. Esta limitación es bien conocida y por ello en muchos ACVs realizados para la industria de mineral a menudo excluyen la categoría de uso de la tierra (Reid et al., 2008).

En estudios realizados sobre casos reales de espesamiento de relaves la disminución del uso del terreno no es considerada ventaja relevante excepto en explotaciones con localizaciones muy específicas, como en algunas explotaciones en Perú donde la orografía hace muy complicado disponer de lugares adecuados para los depósitos. Sin embargo, en los análisis de ciclo de vida realizados (Rocio 2012) se considera un factor muy relevante. Esta importancia se debe más que a errores a que otros factores como el uso del agua no son considerados, y por ello este aparece como destacado. El terreno es un factor en el que un planteamiento global como el realizado por las LCIA es difícilmente asumible. No solo se depende de las características de los ecosistemas presentes y de su extensión, sino de lo difícil de su recuperación posterior. Todos estos factores son muy difíciles de considerar los efectos locales.

La transformación del terreno se mide en unidades de superficie mientras que la ocupación del terreno deberá medirse en unidades de espacio*tiempo. El suelo es un recurso limitado, en la que su uso en una actividad limita otros, se causa una disminución en la biodiversidad, en las acciones regulatorias de los ecosistemas. Entre los efectos sobre la biodiversidad están la pérdida de espacio para los ecosistemas naturales, más efectos adicionales como la fragmentación de espacios naturales, cambio en las condiciones microclimáticas, etc.

Para la caracterización del uso del terreno existen muchos métodos, entre los que destacan IVAM y Kollner. (Kollner 2001) (Weidema 2001) En la caracterización se tiene en cuenta la densidad de especies del área a partir de una clasificación del terreno. Los modelos se basan en estudios de Holanda y Centro Europa, lo cual limita su aplicación a ecosistemas naturales muy diferentes. El modelo de Kollners está parcialmente integrado en Ecoindicador99 y tiene en cuenta el efecto local y el efecto regional o nacional (relativo al suelo como recurso limitado), a los que da igual peso en la ponderación.

Existen muchas propuestas y discusiones sobre los modelos de uso del terreno en los Análisis del Ciclo de Vida. Su aplicación a casos como el descrito en esta ponencia es complicada, puesto que los análisis de ciclo de vida pretenden ser independientes del tiempo y la geografía y las actividades mineras son dependientes de modo absoluto de la localización geográfica.

4. Reducción del uso de agua

Otra categoría importante que es necesario complementar es el uso del agua. En (Gunson, 2011) se recogen varios esfuerzos que se han hecho para cuantificar y entender el uso de agua en minería, centrándose en los indicadores de análisis y clave del ciclo de vida. Pero no hay ningún método de evaluación de impacto que cuantifique el impacto del consumo de agua o de ahorro; sólo es posible evaluar la contaminación que producen sus vertidos. En una de instalaciones utilizadas como referente, la de la mina de mineral de hierro de Khumani en Sudáfrica (Toit 2012) se indica como principal ventaja del espesamiento de relaves la reducción del consumo de agua. Esta mina está situada en una zona semiárida con precipitaciones anuales de 300 mm, en una zona que soporta una alta actividad minera. Con la adopción de un espesado en dos fases se ha bajado el consumo de agua del entorno de 0,22 m³/tonelada de producto a valores inferiores a 0,16 m³/t orientado a acercarse a niveles cercanos a 0,1 m³/t. Con una capacidad instalada de más de 8 millones de toneladas en la primera fase, el ahorro de consumo de agua es enorme.

Como resulta claro la importancia de este ahorro, no solo se debe a las cantidades sino al estrés hídrico de la zona. Para valorar la importancia de la reducción de impactos del agua será necesario considerar no solo los valores sino especialmente la posición geográfica y sus condicionantes de pluviosidad e hidrología. Un tratamiento global y uniforme del proceso se quedaría muy desvirtuado. La evaluación del impacto del uso del agua depende, por tanto, en gran medida del factor local

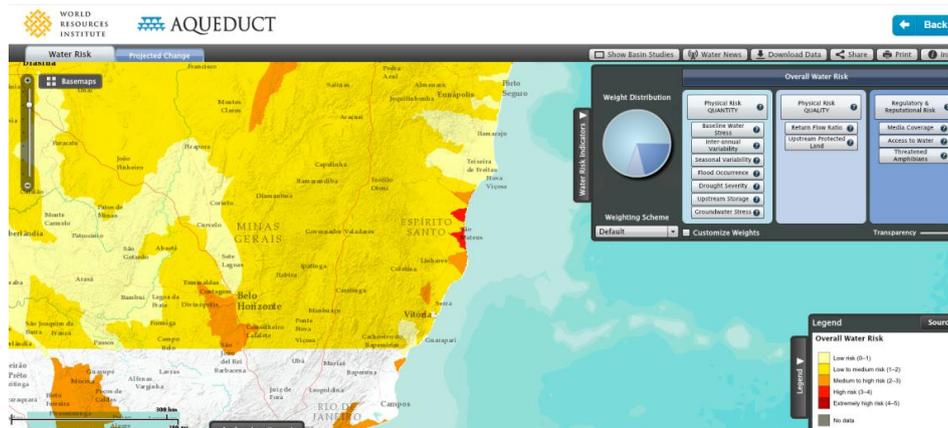
Para tratar los flujos de agua de un proceso es necesario categorizar los usos. Existen varias clasificaciones, por ejemplo (Owens 2002) separa los flujos de entrada y los de salida separando entre uso y consumo. En las metodologías de LCIA se trata sobre todo el cambio en la calidad del agua por los vertidos (así se trata en CML, Ecoindicator, IMPACT, ReCiPe). Esto se refleja en categorías como ecotoxicidad, nutrificación y acidificación. Pero no se considera al agua como un recurso finito. (Koehler 2008)(Steward et al 2005) plantean un esquema que refleja el consumo de agua hoy por sus consecuencias para futuras extracciones (por ejemplo desalación). Pero, la mayor parte de los métodos de LCIA no consideran el recurso agua como finito y no hay ningún tipo de caracterización.

Para el caso reflejado en esta ponencia, es adecuado el the Swiss Ecological Scarcity method 2006 (Frischknecht et al. 2008) con diferenciación geográfica asignando un ecofactor distinto en función del estrés hídrico de la zona. Pero queda pendiente la evaluación de los efectos de la reducción de agua disponible en los ecosistemas y en la salud humana.

La huella hídrica es un indicador del volumen de agua consumida o contaminada en un proceso productivo. Tiene tres componentes: azul, verde y gris y se mide como un volumen de agua. El agua azul es agua superficial o subterránea, el verde debida a las precipitaciones y la gris es la necesaria para diluir los vertidos.

El World Resource Institute's (WRI) dispone de una herramienta denominada Aqueduct Tool con una base de datos global de los indicadores de riesgos de agua. No solo hace referencia a la capacidad de suministro, sino también a su calidad, potencial presión regulatorios, impactos del cambio climático y dinámicas socio-económicas. Otro punto de interés es que próximamente mostrara información del estrés hídrico previsto para 2025, 2050 y 2095. Es un mecanismo de gestión del riesgo que puede ser utilizado para valorar entre diversas alternativas.

Figura 4. Herramienta Aqueduct



5. Efecto local

Una de las características que definen a los proyectos mineros es su dependencia de localizaciones geográficas específicas. La posición del yacimiento marca el lugar de la explotación y la sitúa en un entorno medioambiental y en una climatología específica.

Para los indicadores globales, una metodología genérica es adecuada, pero ponderar igualmente el consumo de agua en una mina en una zona desértica de Sudáfrica que en una mina radicada en una zona tropical de Brasil no es totalmente adecuado.

Como se ha visto en los apartados anteriores, el uso del agua y el efecto del terreno no pueden ser tratados de forma global. En otro tipo de procesos esa aproximación es válida pero no para la valoración de alternativas para el proceso de relaves mineros.

La respuesta es no intentar buscar la respuesta mediante una metodología de evaluación válida para todos los casos sino determinar, siguiendo unas pautas genéricas, una metodología especificada para caso, para cada proceso de toma de decisiones.

Sera necesario partir de un inventario similar a los de las metodologías de gestión de proyectos. Dado el ámbito del proyecto en que ciertos impactos asociados a la fase de uso son los más relevantes y a la dificultad de definir completamente la solución en las etapas iniciales de implantación (los cálculos deben ser corroboradas con concentradores a escala y con instalaciones en pendiente a escala para probar las características del relave, que depende de las características de la explotación). Por ello se recomienda una aproximación más cercana al Análisis de Ciclo de Vida Simplificado y centrado sobre todo en la fase de uso. En el Análisis de Ciclo de Vida Simplificado se pretende realizar un análisis selectivo, sin necesidad de definir por completo el ciclo de vida y centrándose en aquellas etapas más importantes. Esta aproximación se considera suficiente para tomar una decisión válida. Cada etapa del proceso produce una serie de efectos que pueden reflejarse en un eco-vector.

Cada aspecto reflejado en el inventario debe ser clasificado y caracterizado. La caracterización de aquellos impactos de carácter global se realizaría mediante una metodología global de las ya establecidas, mientras que los efectos locales, terreno y sobre todo agua serían caracterizados de forma específica. Esta etapa puede aplicarse con valores diferentes a cada ecovector (Sonneman 2008) correspondiente a cada etapa. La posterior ponderación se realizaría también ad-hoc. Estas etapas deben basarse en información disponible sobre los aspectos locales y en la opinión de expertos. La ponderación debería basarse en la opinión de expertos (del mismo modo en que se basan las metodologías globales existentes). En dicha ponderación se pueden introducir factores que normalmente no

son considerados como la probabilidad de que se produzcan fallos o accidentes que provoquen derrames con graves efectos medioambientales.

Este procedimiento permite que, por ejemplo, las etapas de construcción de la maquinaria sean tratadas con métodos globales para su caracterización y ponderación, mientras que en la fase de uso el uso del terreno y de agua pueda ser tratado de forma más específica adaptándose a la especificidad geográfica.

6. Accidentes y fallos

A partir de los años 70 se considera conocidos todos los factores técnicos para la construcción de balsas de relaves. El incremento de producción de las minas hace que aparezcan embalses de más de 100 metros de altura. Pero los fallos siguen sucediendo.

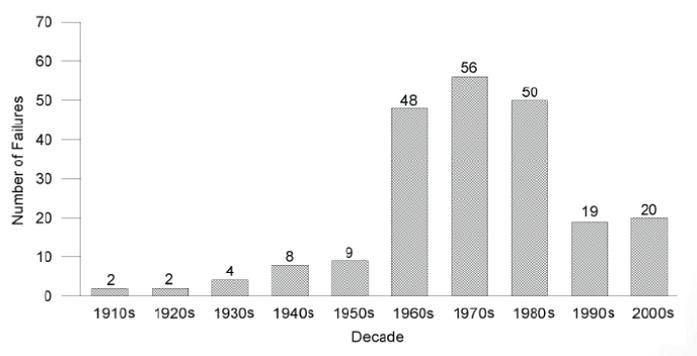
En los análisis de ciclo de vida medioambientales no se consideran los accidentes. Pero en este tipo de instalaciones, los accidentes puede ocurrir y los efectos medioambientales pueden ser gigantescos.

Figura 5 Rotura de presa de relaves en Cataguases (Brasil)



Las balsas de relaves se construyen en un periodo de tiempo largo, en etapas sucesivas y es necesario mantenerlos tras la clausura. Es difícil realizar un mantenimiento constante ya que se considera un gasto que no produce nada. Se estima el riesgo de fallo en el 0,1% a partir de datos de ICOLD (Comisión Internacional de Grandes Presas). Además, las bases de accidentes solo se El *ICOLD Committee on Tailings Dams and Waste Lagoons* encuentra que muchos incidentes no se comunican, por lo que las cifras pueden ser mayores.

Figura 6. Histórico de accidentes en presas de relaves



De los estudios realizado por ICOLD se desprende que no hay ninguna forma constructiva que evite con seguridad los fallos. Además el porcentaje de fallos no puede determinarse con exactitud puesto que no se conocen la totalidad de balsas. El número de fallos en la actualidad es muy bajo si se compara con la década de los 60 del siglo pasado, pero aún hay 20 accidentes por década.

El efecto del cambio climático aparece pues los fallos debidos a lluvias inusuales han pasado del 25% antes del 2000 al 40% en el periodo a partir del 2000. Los efectos sísmicos han prácticamente desaparecido.

7. Conclusiones

El espesamiento surge como una opción para el tratamiento de los relaves mineros. Los posibles beneficios medioambientales del método dependen de la instalación en la que se aplica. Al repartirse los efectos entre la fase de instalación, uso y desmantelamiento de la instalación, para una toma de decisiones adecuada desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental es imprescindible un enfoque que contemple todo el ciclo de vida.

Inmediatamente, lleva a considerar el análisis de ciclo de vida como la herramienta más adecuada para realizar la operación. Pero si se repasan los factores medioambientales considerados como principales ventajas del método, estos no aparecen.

El uso del terreno está basado en consideraciones relativas al mantenimiento de la diversidad, lo que puede no ser relevante para instalaciones de carácter puntual como las explotaciones mineras. Además las clasificaciones y los índices están orientados al mundo desarrollado mientras que la mayoría de las explotaciones están situados en otros países con menor densidad poblacional. El cómo considerar el uso del terreno es un aspecto tan complejo que no hay una alternativa que suponga una mejora en la apreciación que compense la dificultad de su aplicación.

El uso del agua es un elemento poco relevante en los procesos industriales, y en general no es considerado en las metodologías de análisis de ciclo de vida (si lo son es como indicador intermedio que no tiene ponderación en los indicadores finales). El problema es establecer una ponderación adecuada. Existen mecanismos como la huella hídrica que permite cuantificarlo. Conocer el valor no es suficiente puesto que debe considerarse el estrés hídrico de la zona. Están en desarrollo herramientas que permitirían ponderar el consumo de agua en función de la localización geográfica.

Las metodologías de análisis de impactos de ciclo de vida consideran que los factores temporales y geográficos no deben considerarse. El mismo proceso con las mismas entradas y salidas ofrecen los mismos resultados independientemente de su localización geográfica. En muchos procesos es adecuado, pero en el considerado esto es una limitación importante. Los valores de caracterización y ponderación deberán ser adaptados en función de aspectos relacionados con la localización geográfica, lo que hace que en cada evaluación deban ser definidos ad-hoc por expertos.

8. Referencias

- Frischknecht R, Steiner R, Jungblut N. (2006). Swiss Ecological Scarcity Method, Öbu—
Netzwerk für Nachhaltiges Wirtschaften, 2006
- ISO (2006) ISO14040 Environmental Management – Life cycle assessment. Principles and
framework
- Jewell, R., & Fourie, A. (2006). Above ground disposal. Australian centre for geomechanics
(Ed.), Paste and thickened tailings - A guide.

- Koehler, A. (2008). Water use in LCA: managing the planet's freshwater resources, Int J Life Cycle Assess, Edit Springer-Verlag.
- Köllner, (2001). Land use in Product Life Cycles and its Consequences for Ecosystem Quality. PhD Thesis.
- Kulczycka (2008). LCA for Minimisation of environmental Impact of Wastes from Zinc and Lead Industry. Polish Academy of Sciences, Mineral and Energy Economy Research Institute, Poland.
- Lesage P, Reid C, Margni M, et al. (2008). Use of LCA in the mining industry and research challenges. CIRAIQ, École Polytechnique de Montréal, Québec. Industrial NSERC Polytechnique-UQAT Chair, Environmental and Mine wastes Management, École Polytechnique de Montréal, Québec.
- Luiña, R. Ortega, F. Martínez, G. Pecharrmán, D. (2012). Valoración del interés del espesamiento de residuos mineros como herramienta de mejora ambiental, XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Valencia
- Peck, P. (2007). Avoiding Tailings Dam Failures. Good Practice in Prevention. Lund University.
- Ramirez (2007) Guía Técnica de Manejo de Relaves DSM/07/31, Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Seguridad Minera, Chile.
- Reid, C., Bécaert, V., Aubertin, M., Rosenbaum, R.K., & Deschênes, L. (2008). Life cycle assessment of mine tailings management in Canada. Journal of Cleaner Production.
- Steward M, Weidema B.(2005). A consistent framework for assessing the impacts from resource use—a focus on resource functionality, Int J Life Cycle Assess 10(4):240–247.
- Sonnemann, G.W., Schuhmacher, M., Castells F., (1999) Framework for the assessment of the environmental damages of a product, 9th Annual Meeting of SETAC-Europe, Leipzig, Germany, SETAC-Europe, Brussels, p. 78, Paper No. 4cr002
- T du Toit ,M. Crocier, (2012) Khumani Iron Ore Mine paste disposal and water recovery system The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy
- Valdebenito, R. (2010). Disposición de Relaves en Pasta, RELPAS.
- Weidema, B.P. & E. Lindeijer, (2001) Physical impacts of land use in product life cycle assessment. Final report of the Eurenviron-LCAGAPS sub-project on land use. Dpt of Manufacturing, Engineering & Management, Technical University of Denmark
- Wennberg, (2010) Wennberg Transporting Higly Concentrated Slurries with Centrifugal Pumps. The Thickened Minerals Tailings Example. Lulea University of Technology. Department of Chemical Engineering and Geosciences Mineral Processing.