

- A partir del algoritmo se puede negociar el precio de la venta del mineral cambiando el porcentaje de realización.
- Se puede identificar que comercializadoras son las que pagan mejor por la venta de minerales, cuáles son las que ocultan información y cuales tienen porcentajes de realización altos.
- Se han desarrollado a partir del algoritmo LIQMIN 1.0 un programa computacional y una aplicación de celular para que los usuarios puedan tener facilidades al momento de calcular y negociar el pago por la venta de minerales.
- Se ha evidenciado que la repercusión e la investigación es alto y que ha dado lugar a nuevas versiones basadas todas en el algoritmo LIQMIN 1.0.
- Se ha realizado capacitaciones al sector minero para que puedan utilizar esta herramienta de la mejor manera y en beneficio de ellos mismos.
- El algoritmo LIQMIN 1.0 resuelve un problema puntual en el sector minero cooperativista, ayuda a que este sector pueda recibir un rato justo y que su trabajo sea valorado en términos de un

pago justo por la venta del mineral que obtiene día a día arriesgando en muchas ocasiones su vida.

REFERENCIAS

- Ministerio de minería y metalurgia. (2020). “Marco Normativo Minero - SENARECOM 2020”
- Amelot, M. (2016). VBA Excel 2016: Programación en Excel: Macros y lenguaje VBA. Ediciones ENI.
- Prieto Martínez, J. J. (2003). La programación lineal con la hoja de cálculo Excel: una apuesta por las nuevas tecnologías. Suma: Revista sobre Enseñanza y Aprendizaje de las Matemáticas, 43, 73-78.
- Gutarra, N. (2017). Sílabo de Economía minera y evaluación de minas.
- Guzmán Juan Ignacio. (2019). Fundamentos de economía minera, Edit. REVERTE.

Artículo recibido en: 05.05.2022

Artículo aceptado: 04.04.2022

SAN CRISTÓBAL II. UN CASO DE INVENTARIO, CARACTERIZACIÓN, EVALUACIÓN DE RIESGOS, PRIORIZACIÓN Y REHABILITACIÓN DE UNA PRESA MINERA EN ESPAÑA

Julio César Arranz-González, Francisco Javier Fernández-Naranjo, Virginia Rodríguez-Gómez

Grupo de Residuos Mineros y Geoquímica Ambiental. Instituto Geológico y Minero de España (IGME), CSIC

e-mail: jc.arranz@igme.es

RESUMEN

La presa de relaves conocida como San Cristóbal II fue incluida en el año 2012 en el reciente inventario de instalaciones abandonadas de residuos mineros realizado en España por el IGME. Para pertenecer al inventario, una instalación de residuos mineros ha de haber alcanzado un mínimo de nivel de riesgo según una metodología preliminar de evaluación de riesgos desarrollada expresamente. El establecimiento de prioridades de actuación llevó a esta presa minera a ocupar la primera posición del listado de prioridades. Durante el año 2018 se aplicaron diferentes actuaciones de remediación, con un presupuesto de ejecución material de 1.241.584 €. Este trabajo explica todo el proceso seguido y concluye que, cuando se plantean acciones de remediación, puede ser interesante realizar una nueva evaluación de riesgos más refinada, detallada y cuantitativa.

SAN CRISTÓBAL II. A CASE OF INVENTORY, CHARACTERIZATION, RISK ASSESSMENT, PRIORITIZATION AND REHABILITATION OF A MINING IMPOUNDMENT IN SPAIN

ABSTRACT

The tailings dam known as San Cristobal II was included in 2012 in the recent inventory of abandoned mining waste facilities carried out in Spain by the IGME. A mining waste facility must have met a minimal risk level to be included in the inventory, as determined by a preliminary risk assessment technique created particularly for this purpose. The establishment of priorities for action led this mining tailings dam to occupy the first position on the list of priorities. During 2018, different rehabilitation actions were implemented, with a material execution budget of €1,241,584. This work explains the whole process followed and concludes that, when considering remediation actions, it may be interesting to perform a new, more refined, detailed, and quantitative risk assessment.

1. INTRODUCCIÓN

Durante más de diez años, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas, ha venido desarrollando trabajos de inventario y evaluación de riesgos de instalaciones abandonadas de residuos mineros (botaderos, presas de relaves y pilas de lixiviación). La evaluación de riesgos de las instalaciones se ha realizado siguiendo una metodología diseñada a tal efecto (Alberruche del Campo et al., 2014). Los resultados de las tareas de inventario y evaluación han dado lugar a sucesivas listas ordenadas de prioridades de actuación, la última de las cuales reúne un total de 109 instalaciones de residuos en el año 2022.

La presa de relaves conocida como San Cristóbal II (Mazarrón, provincia de Murcia), ocupó en determinado momento la primera posición de la lista, hasta que fue objeto de actuaciones de remediación que aconsejan la realización de una nueva evaluación más detallada. Este trabajo describe las tareas de inventario y los resultados de la evaluación de riesgos de la presa de relaves San Cristóbal II, así como las actuaciones de remediación y el efecto de las mismas sobre la evaluación.

2. DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO

La presa de relaves San Cristóbal II se encuentra situada en el municipio de Mazarrón, que pertenece a la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, en el Sureste de España y de la Península Ibérica (Figura 1). La población de Mazarrón se encuentra a unos 940 m hacia el Este.

Es una presa de relaves de flotación derivada de procesos de beneficio de plomo, plata y zinc a partir de una mena de polisulfuros metálicos rica en pirita. Desde el punto de vista metalogenético la zona en la que se encuentra, denominada Cerro de San Cristóbal y los Perules, es una de las mineralizaciones de plomo-zinc y plata económicamente más importantes del área, tratándose de filones de esfalerita y galena, acompañadas de pirita, arsenopirita, calcopirita y otros sulfuros, que arman siempre en dacitas y riódacitas profundamente alteradas y silificadas de origen magmático-subvolcánico relacionado con fases hidrotermales de las postrimerías del Terciario. Oyarzun et al. (2011) han proporcionado una explicación de cómo las características geológicas y ambientales determinan que las rocas huésped de la zona no tengan capacidad de amortiguación, lo que lleva a la formación de drenajes ácidos asociados a los residuos mineros.



Figura1. Esquema que muestra la ubicación de Mazarrón y ubicación de la presa de relaves San Cristóbal II, señalada con el código de inventario 976-II-3-007. Modificado de una fotografía aérea del año 2016 descargada de la página web <http://www2.ign.es/iberpix/visoriberpix/visorign.html>.

El macizo rocoso sobre el que se asienta la presa está constituido por rocas subvolcánicas cristalinas, dacitas y riolitas. Se trata de rocas impermeables y, por tanto, no susceptibles de albergar acuíferos o masas de agua. No obstante, la zona alberga un acuífero libre por minados (galerías, piques, pozos y túneles mineros), pues la mayoría de la extracción se hizo por minería de interior. Durante las tareas de inventario se midió el nivel piezométrico en el área del Cerro de San Cristóbal, el cual está completamente aislado con respecto a la presa de relaves, a cierta profundidad. Por otro lado, ensayos de mesozonación sísmica como el realizado en el Atlas Inventario de Riesgos Naturales de la Región de Murcia (ITGE-CARM, 1995) asignan a la zona de Mazarrón una aceleración sísmica variable entre 0,12 y 0,11g, lo que es relativamente alto para la Península Ibérica y para España.

En todo el Cerro de San Cristóbal-Los Perules existen otros muchos pasivos mineros, especialmente presas de relaves, botaderos de

mina, botaderos de gravimetría, escorias, antiguas instalaciones, y pequeños tajos. La zona posee un clima semiárido de tipo mediterráneo, con suelos de escaso desarrollo y predominio de formaciones de matorral o pastos, además de zonas de cultivo e infraestructuras. A 340 m aguas abajo se encuentra una carretera de cierta importancia.

Se sitúa en la cuenca hidrográfica de la Rambla de las Moreras, de carácter estacional. Las aguas de drenaje de la zona minera son canalizadas por los diferentes arroyos intermitentes y desembocan en la citada Rambla. La presa de San Cristóbal II está instalada sobre la cabecera de un arroyo que conecta la escorrentía de los taludes directamente con la rambla, situada unos 900 m aguas abajo. A unos 2,4 km aguas abajo se encuentra un Humedal de Importancia Internacional RAMSAR llamado Lagunas de las Moreras. Se trata de un humedal continental de influencia costera situado en el tramo final de la Rambla de las Moreras. Dicho humedal también ha sido catalogado como Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) que es una figura de protección que se

aplica en toda la Unión Europea. Es hábitat de diversas especies endémicas y en peligro de extinción.

3. DESCRIPCIÓN DE LA PRESA Y SUS RESIDUOS

Durante las labores de inventario, se buscó documentación, se realizaron visitas de campo y se tomaron muestras para su análisis, lo que sirvió para conocer las características de la presa y de los residuos. También se comprobó la naturaleza de las aguas que entraban en contacto con los mismos. Toda la información relevante obtenida en campo y en gabinete se plasmó en la correspondiente ficha de inventario.

La presa se construyó por el método de aguas arriba, empleando tablestacado en el contorno, que constituyó la barrera para evitar la salida de los sólidos. El dique se situó cerrando un valle de un arroyo de carácter intermitente. Los lodos de flotación o relaves eran vertidos desde el dique y, por un proceso de clasificación por granoselección, el material más grueso (arenas) quedaba en la zona próxima al cierre elaborado con las tablas, y el material más fino (limos y arcillas) escurría e iba a parar hacia la laguna de decantación. Con este método constructivo se alcanzó una altura máxima de dique de 32 m, con un ángulo de talud medio de 26°, ocupando una superficie de 1,8 ha y almacenando un volumen de 180000 m³. Durante su construcción, no se realizó la impermeabilización del vaso.

Existía un sistema de drenaje interno por chimenea central desde la laguna de decantación con salida por la base del dique, el cual llegó finalmente a obstruirse, lo que impedía el drenaje del agua de precipitación y escorrentía y la evacuación del agua infiltrada en la presa. Por ello, a pesar del clima semiárido, en épocas lluviosas se formaba en su superficie una laguna que almacenaba el agua de las precipitaciones y de la escorrentía superficial. El agua acumulada se infiltraba en los lodos, elevando teóricamente el nivel freático en la zona del dique. Se constató que el agua almacenada en superficie era de carácter muy ácido (pH 2,4), elevada

conductividad eléctrica (20400 μS/cm), y elevados contenidos en elementos potencialmente tóxicos tales como Al, Cd, Cu o Zn.

En la cola de la presa existían escombreras de gravimetría de color rojizo, fuertemente erosionadas, cuyo material era arrastrado y depositado sobre el vaso en la parte trasera empujando la laguna de decantación hacia las proximidades del dique. El dique presentaba un estado erosivo muy desarrollado, con abundantes cárcavas y procesos de sufusión o erosión interna. Los sedimentos procedentes del dique se apreciaban visualmente por todo el arroyo ocupado en su cabecera por la presa y a bastante distancia aguas abajo, incluso sobre parcelas de cultivo situadas a más de 600 m (Figura 1). En el dique también se observaron asentamientos y basculamientos.

Los residuos mineros fueron caracterizados superficialmente. En Arranz-González et al. (2016) es posible encontrar información de las características químicas y mineralógicas de estos residuos y los de otras dos presas de relaves cercanas. Es de destacar el carácter areno-limoso de estos residuos superficiales, su elevada acidez (pH 2,41, en proporción 1:1 sólido/agua), así como el predominio de cuarzo en la mineralogía, acompañado de pirita y jarosita, ghoetita y yeso, como minerales secundarios. En la estación seca (de mayo a septiembre), se formaban sales de sulfato ácido en la superficie de los relaves. Bustillo et al. (2010) las examinaron, identificando kieserita, halotriquita y szomolnokita.

Entre las características de los residuos que tienen mayor importancia en la metodología de evaluación de riesgos del IGME, está el análisis de los elementos potencialmente tóxicos. De acuerdo con la Decisión de la Comisión Europea 2009/359/CE, de todos los elementos analizados se tomó en consideración el contenido de: As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, V y Zn. Durante las labores de inventario se tomaron muestras compuestas superficiales.

El contenido en elementos totales se midió por métodos espectrométricos y espectrofotométricos después de digestión ácida. Los elementos que mostraron mayores concentraciones fueron As (450 mg/kg), Cd (3,1 mg/kg), Hg (4,4 mg/kg), Pb (2762 mg/kg), Sb (139 mg/kg) y Zn (4524 mg/kg). Con los contenidos totales medidos en los relaves y los niveles de fondo establecidos para suelos de la Región de Murcia se calculó el llamado Índice de Contaminación (Alberruche del campo et al. 2014; Arranz-González et al. 2016), el cual arrojó un valor de 94,6 que puede considerarse muy alto según Arranz-González et al. (2019), y que evidencia un elevado potencial para contaminar suelos y sedimentos del entorno a través de la emisión de partículas por erosión hídrica y eólica.

Además de los contenidos totales en elementos potencialmente tóxicos, la metodología del IGME también considera los elementos solubles en agua. Para ello, los residuos se sometieron a un ensayo de lixiviación estandarizado muy utilizado en Europa, el llamado EN 12457-2 (CEN, 2002), el cual evalúa los contenidos en elementos solubles en proporción 1/10 (sólido:agua desionizada). La medida de contenidos en el lixiviado se realizó mediante ICP-MS. Los resultados de aplicar dicho ensayo de lixiviación a los residuos de San Cristóbal II proporcionaron contenidos muy elevados de Al (153000 µg/L), Cd (346,1 µg/L), Cu (1128 µg/L), Se (13 µg/L), o Zn (135981 µg/L). Con los contenidos solubles medidos en los relaves y la comparación con un estándar de agua muy exigente, se calculó el llamado Cociente Promedio de Peligrosidad (Alberruche del campo et al. 2014; Arranz-González et al. 2016), el cual arrojó un valor de 818,4 que puede considerarse como muy alto según Arranz-González et al. (2019), lo que indicaría un gran potencial para contaminar las aguas y estaba entre los valores más elevados obtenidos para residuos mineros españoles.

4. EVALUACIÓN DE RIESGOS

La evaluación de riesgos de la presa de relaves San Cristóbal II se realizó aplicando la

metodología de Alberruche del Campo et al. (2014). Es importante señalar que el propósito de esta metodología es la realización de una evaluación preliminar, sencilla, pues se ha de aplicar a muchos elementos susceptibles de ser inventariados, lo que no impide que se pueda considerar la realización de un análisis de riesgo más exhaustivo siempre que se considere conveniente. Dicha metodología analiza los valores de funciones semi-cuantitativas simples de la probabilidad de ocurrencia (Índice de probabilidad) y de la severidad de las consecuencias (Índice de severidad), para una serie de escenarios de riesgo tipificados sobre tres tipos de receptores: población, medio natural y medio socio-económico. Cada escenario de riesgo sobre cada uno de los tres tipos de receptores tiene asociado un código o etiqueta. La estimación del Índice de probabilidad de ocurrencia para cada escenario y la estimación del Índice de severidad de las consecuencias sobre los distintos receptores proporciona valores entre 0 y 5 que permiten colocar los códigos de los escenarios en una matriz de riesgos. La matriz de riesgos proporciona una valoración cualitativa y una visualización inmediata de las dos dimensiones del riesgo y de la clasificación del mismo. Como suele ser habitual, utiliza un código de color de tipo semáforo, donde el verde se califica como riesgo MUY BAJO, el amarillo como BAJO, el amarillo anaranjado como MODERADO, el naranja como ALTO y el rojo como MUY ALTO (Figura 2). La idea es que toda aquella instalación de residuos mineros evaluada que tenga un código de escenario o más de uno dentro de los sectores amarillo-anaranjado, naranja o rojo, se incluya en el inventario. Esto viene a significar que aquellas instalaciones evaluadas cuyos códigos de escenarios de riesgo se sitúen todos en zona verde o amarilla presentarán un riesgo que puede ser aceptable sin ninguna intervención o, si acaso, puede ser suficiente algún tipo de vigilancia.

En cuanto a los riesgos asociados a procesos de contaminación, ya se ha mencionado el elevado potencial de los relaves para contaminar agua con elementos potencialmente tóxicos solubles. Sin embargo, en este caso, no existe ninguna masa de

agua subterránea afectada, ni pozos o manantiales destinados al abastecimiento de población o ligados a ecosistemas superficiales, por lo que no se valoró ningún escenario de contaminación sobre las aguas subterráneas. El llamado “escenario de generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales”, se evaluó teniendo en cuenta, además del ya mencionado Cociente Promedio de Peligrosidad, la distancia a cauces, que es nula en este caso, y la superficie desprotegida de la presa (1,81 ha). Con ello se obtuvo un Índice de probabilidad muy alto (4,5) y un Índice de severidad alto (3,5) para el medio natural, por la presencia de un espacio protegido a unos 2,4 km aguas abajo. En conjunto, el riesgo se calificó como MUY ALTO, como corresponde a la zona roja de la matriz de riesgos (Figura 2), donde aparece situado el correspondiente código de escenario C1NA. La severidad sobre la población del mencionado escenario no se valoró ante la ausencia de aprovechamiento de aguas superficiales para riego o abastecimiento humano.

El denominado escenario de “movilización de material particulado por acción del viento”, considera el efecto de la erosión eólica sobre los relaves y la dispersión que se produce. El Índice de probabilidad de dicho escenario depende de la granulometría de los residuos, la superficie expuesta, la aridez del clima, la velocidad media del viento en la zona y el grado de cobertura o ausencia de esta sobre la instalación. En el caso de San Cristóbal II, el Índice de probabilidad calculado resultó muy alto (4,3). La severidad, valorada a través del Índice de severidad resultó ser alta para la población, por la cercanía de Mazarrón y la existencia de áreas residenciales a menos de 1000 m, lo que permitió calificar el riesgo de este escenario para la población (C3PO) como MUY ALTO (zona roja de la Figura 2). El Índice de severidad del efecto de la movilización de material particulado por acción del viento sobre el medio natural (código C3NA) resultó bajo (1,7), con lo que se obtuvo un riesgo MODERADO (zona de color amarillo anaranjado de la matriz de riesgos en la Figura 2).

La elevada capacidad contaminante expresada mediante el índice de contaminación a la que se ha hecho referencia más arriba, interviene en la valoración del Índice de probabilidad del escenario “emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica”. Además se considera la erosividad climática de la zona, a través del factor R de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE en inglés), así como la superficie de talud, que es relativamente pequeña, el grado de protección y el estado erosivo del dique. El resultado obtenido para San Cristóbal II fue bajo (1,7). El Índice de severidad tiene en cuenta la distancia y el posible uso del agua de la masa receptora de sedimentos procedentes de la presa o el valor ecológico de la misma, resultando un valor muy bajo para la población (0,5) con lo que el riesgo resultó ser MUY BAJO (código C4PO), y alto para el medio natural (3,5), con lo que el riesgo resultó MODERADO para el medio natural (C4NA), como puede apreciarse en la Figura 2.

		SEVERIDAD DE LAS CONSECUENCIAS				
		MUY BAJA	BAJA	MEDIA	ALTA	MUY ALTA
PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	MUY ALTA		C3NA		C3PO C1NA FPREPO FPRESE C3PO	FPRENA
	ALTA					
	MEDIA					
	BAJA	C4PO			C4NA	
	MUY BAJA					

Figura 2. Matriz de riesgos representativa de la presa de relaves San Cristóbal II (código de inventario 976-II-3-007). Destaca la existencia de seis códigos de escenarios de riesgo situados en la zona roja de la matriz, a los que les corresponde la calificación de riesgo MUY ALTO.

La metodología del IGME tiene en cuenta también un escenario denominado “contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades”, el cual está pensado

solo para población en aquellos casos en los que los contenidos en determinados elementos son elevados (As, Cd, Cr, Hg, Ni, y Pb), y existe la posibilidad de que se produzca un contacto directo por inhalación, ingestión accidental o contacto dérmico, existiendo una elevada accesibilidad para personas, o se advierta que los depósitos de residuos son utilizados para el desarrollo de diversas actividades (recreativas, deportivas u otras). Para evaluarlo se compararon los contenidos en dichos elementos en los residuos con los Niveles Genéricos de Referencia de suelos para usos urbanos establecidos en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, concluyendo que eran muy superiores en el caso de Pb, As y Cd. Además se tiene en cuenta la presencia de población cercana y la accesibilidad a la instalación de residuos. En este caso, existe un área habitada muy cercana y se consideró que la accesibilidad de la población se ve facilitada por un reclamo sobre la zona minera, dado que tiene un interés histórico indudable, pero sin que se haya limitado el acceso a los lugares más peligrosos ni informado de los riesgos existentes. Con ello, se concluyó que el Índice de probabilidad se debía valorar como muy alto (5). El Índice de severidad consideró el tipo de actividad que previsiblemente realizaría la población cuando accede, tratándose en este caso de un uso recreativo no intensivo, lo que determinó un valor alto (3). El riesgo para este escenario de “contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades” (con código CD) resultó finalmente MUY ALTO (Figura 2).

Además de los escenarios de contaminación, la metodología del IGME contempla un escenario de “fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros”, cuyo riesgo se evalúa igualmente mediante un Índice de probabilidad e Índices de severidad sobre la población, el medio natural y el medio socioeconómico, con valores comprendidos entre 0 y 5, de modo que puedan ubicarse los correspondientes códigos en la misma matriz de riesgos. El Índice de probabilidad considera un total de 30 factores considerados claves y cuyos

valores se obtienen de tablas. Incluyen aspectos tales como (Alberruche del Campo et al., 2014): el diseño y las características constructivas del dique, la tipología y método constructivo, el material empleado y la geometría (altura, pendiente del talud y longitud del dique); el estado de conservación de los diques, o grado de integridad física de la presa; el volumen de residuos almacenados en la instalación; el emplazamiento, que depende de las características geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, hidrogeológicas y geotécnicas del mismo, por un lado, así como la peligrosidad asociada al emplazamiento, es decir los riesgos naturales asociados al lugar (sismicidad de la zona, inundaciones, eventos climáticos extremos, etc.), y, por último, el balance de humedad de los materiales que conforman el dique, por su fuerte influencia sobre la presión intersticial o presión de poros al que está sometido dicho material. La suma de los valores de todos los factores da una cifra que, como máximo, puede valer 400, aunque se transforma finalmente en una escala entre 0 y 5 dividiéndolo por 75. La aplicación de la metodología a la presa de relaves de San Cristóbal II determinó que el Índice de probabilidad obtenido fuera muy alto, con un valor de 4,4. El Índice de severidad de los efectos asociados a un posible fallo o rotura se evalúa partiendo de que esta estará asociada al alcance o recorrido de la masa de lodo y agua sobre el terreno situado aguas abajo de la estructura de contención. En general la ruta que seguirán los relaves liberados está determinada por la red de drenaje del lugar. Rico et al. (2008) desarrollaron una formulación empírica para estimar el alcance de un flujo de residuos mineros, el cual ha sido la base para valorar la severidad en la metodología del IGME. En función de la población, valores naturales o elementos del medio socioeconómico expuestos considerando el alcance y la topografía, y usando valores tabulados, se obtienen los correspondientes Índices de severidad. En este caso, se obtuvo un alcance de 2,54 km lo que supuso el máximo valor de severidad (5) para el medio natural, por la presencia del humedal Lagunas de las Moreras, lo que determina un

riesgo MUY ALTO (código FPRENA en la matriz de riesgos, Figura 2). Para el medio socioeconómico y la población el Índice de severidad se valoró como alto (3), lo que determina igualmente una calificación del riesgo como MUY ALTO (códigos FPRESE y FPREPO de la matriz de riesgo).

Fruto de la evaluación de riesgos, la presa de relaves San Cristóbal II (976-II-3-007) entró en el inventario a finales del año 2012.

5. PRIORIDADES DE ACTUACIÓN

A lo largo de toda la serie de trabajos realizados en años sucesivos para hacer inventario y evaluar los riesgos de las instalaciones de residuos cerradas y abandonadas se fue concibiendo un sistema para fijar las prioridades de actuación basado en los resultados de la evaluación. Después de chequear diversas opciones, el equipo de trabajo decidió finalmente basar la priorización en la forma en que quedaban plasmadas las evaluaciones en las matrices de riesgo, es decir, en función de la situación de los códigos de los escenarios en los diferentes sectores de color de la matriz. Hay que tener en cuenta que, aunque la metodología de evaluación usa índices numéricos, estos números no pretenden guardar una relación precisa con la magnitud real de las consecuencias o probabilidades. El objetivo de los índices numéricos es establecer una gradación más clara que la que se logra normalmente con un planteamiento totalmente cualitativo, pero no indican que se pueda considerar una metodología cuantitativa. Aunque en ocasiones se considera que el riesgo puede ser expresado como un producto de la probabilidad por la severidad de las consecuencias, esto no es siempre correcto, especialmente si ambas variables no son totalmente independientes, como es el caso de la rotura de presa de relaves donde el volumen de material influye tanto en la probabilidad de rotura como en la severidad de las consecuencias. Esto lleva a considerar el riesgo como una función de la probabilidad y de la severidad de las consecuencias: $Riesgo = f(\text{Probabilidad}, \text{Severidad})$. La función determina la ubicación del

correspondiente código de cada escenario sobre la matriz como si se tratara de un sistema de coordenadas.

Aplicando la fórmula que se estableció para ordenar las instalaciones del inventario según las prioridades de actuación para la aplicación de medidas de remediación se obtuvo una primera lista. En esa primera lista, la presa de relaves San Cristóbal II (976-II-3-007) quedó situada en primer lugar.

6. ACTUACIONES DE REMEDIACIÓN

Iniciado el año 2018, se realizaron algunas inspecciones por parte de personal técnico de la administración de minas de la Región de Murcia. En febrero de dicho año se emitieron informes en los que se llamaba la atención sobre el estado de la presa. Como consecuencia de episodios de lluvias intensas acaecidas a finales de enero y principios de febrero de 2018, el estado de deterioro del depósito de lodos se incrementó considerablemente, constatándose: profundización de las cárcavas del dique, incremento de la erosión interna, aparición de grietas de tracción cerca del dique, hundimiento del vaso, acumulación de gran cantidad de agua en la zona de la laguna de decantación, y abombamiento en la parte inferior del talud del dique.

En marzo de 2018 se determinó que debían acometerse actuaciones de rehabilitación con carácter de emergencia mediante un procedimiento de ejecución forzosa. El proceso jurídico que llevó a la ejecución final de las actuaciones fue complejo. Las actuaciones se llevaron a cabo a lo largo del año 2018, incluyendo: mejora de accesos; remodelado y estabilización geotécnica mediante escollera y escollera hormigonada en la base del dique; construcción de sistemas de sellado multicapa y aporte de tierra vegetal; construcción de sistemas de drenaje superficial y un canal perimetral que se inicia en el fondo, desciende por el oeste y se encauza al pie del dique; instalación de muros de gaviones para proteger la zona del vaso frente a sedimentos externos; protección de taludes con

mantas orgánicas y biorrollos, y vallado perimetral. La actuación supuso movilizar algo más de 10000 m³ de residuos para remodelar (un 5,7 % del volumen total), creándose dos bermas en el dique. La Figura 3 muestra un esquema del

sellado superficial y la Figura 4 muestra una comparativa del dique antes y después de las actuaciones.

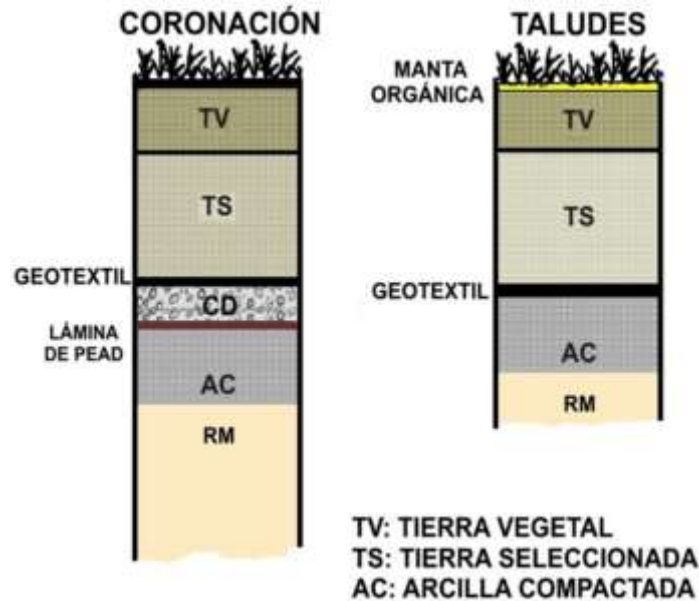


Figura 3. Esquema de la configuración de capas de sellado instaladas sobre la superficie de la presa San Cristóbal II (976-II-3-007).

El presupuesto de ejecución material de las actuaciones ascendió a 1.241.584 €. En dicho presupuesto, las partidas más importantes fueron las dedicadas a sistemas de sellado, remodelado y estabilización geotécnica, y sistemas de drenaje, que supusieron en conjunto algo más de un millón de euros.

7. REEVALUACIÓN DE RIESGOS

Después de conocer que se habían llevado a cabo las actuaciones de rehabilitación descritas someramente, el IGME fue requerido para reevaluar la instalación minera San Cristóbal II en la nueva situación.

Para ello, se revisó la documentación disponible sobre las actuaciones y se visitó de nuevo la presa minera. El conjunto de capas de sellado permite aceptar que las medidas aplicadas eliminan completamente los posibles escenarios de contaminación, tanto por emisión de efluentes como por emisión de sedimentos, siempre y

cuando se mantengan funcionales y no se deterioren, dado que impiden teóricamente el contacto de las aguas de lluvia y escorrentía con los residuos. En este sentido, todos los escenarios de contaminación que en su día fueron tenidos en cuenta y evaluados desaparecen. Igualmente, las capas de cubrición y el vallado perimetral eliminan la posibilidad de contacto directo de la población con los residuos.

En cuanto a la probabilidad de rotura o fallo, el Índice de probabilidad se ha reducido considerablemente, aunque el emplazamiento sigue siendo el mismo (cerrando un valle), lo que influye mucho en la valoración final de la probabilidad. El nuevo Índice de probabilidad con arreglo a la metodología del IGME resultaría bastante menor que el inicial. Sin embargo, aunque el refuerzo de escollera se limita aproximadamente a un tercio del talud, el cual tiene una altura de 32 m, se podría pensar que el valor calculado debería haber sido aún menor. Es

por esto que no es posible evitar que surjan algunas dudas en cuanto a la sensibilidad de la metodología del IGME para la evaluación de riesgos en casos como este.

Por otro lado, como ocurre con el emplazamiento, las condiciones del entorno no han cambiado, por lo que, en el hipotético caso de una rotura, la severidad de los efectos sobre el medio natural, la población y el medio socioeconómico será la misma. En particular, la severidad de los posibles efectos sobre el medio natural es máxima por la existencia del Humedal RAMSAR y Zona de Especial Protección de Aves (ZEPA) Lagunas de las Moreras. En este sentido, los Índices de severidad siguen siendo los mismos, siendo por lo que debería asignarse el máximo valor de severidad para los efectos sobre el medio natural, por la presencia del humedal Lagunas de las Moreras, lo que determinaría un riesgo ALTO.



Figura 4. Imagen de perfil del dique de la presa San Cristóbal II (976-II-3-007) en el año 2011 (arriba) y en

el año 2019 (abajo). Se puede reconocer un ligero retranqueo de la cabecera del talud, un rebaje de la pendiente y la presencia de canales para el control de la escorrentía, además de la cubrición con mantas orgánicas y biorrollos.

Ante las posibles dudas surgidas sobre los resultados de la aplicación de la metodología del IGME, hay que advertir que siempre se argumentó que es una metodología de evaluación de riesgos que se puede calificar de preliminar. Los criterios fundamentales para la evaluación del riesgo empleados son predominantemente cualitativos, conservadores (pesimistas) y economizadores desde el punto de vista de la adquisición de información, pues estaba diseñada para discriminar entre muchas instalaciones de un inventario con objeto de fijar prioridades de actuación. Llegados al punto en el que se plantea la rehabilitación o remediación, puede ser interesante realizar una nueva evaluación de riesgos más refinada, detallada y cuantitativa, para lo que se necesita adquirir nueva y más actualizada información sobre la instalación o instalaciones prioritarias, aplicando, si es necesario, modelos de simulación de los diferentes procesos involucrados y una mayor carga de trabajo especializado. Es por ello que en este momento se ha planteado realizar una reevaluación del riesgo, sobre la base de un análisis de estabilidad que se alimentará de datos obtenidos expresamente para el diseño de las medidas ejecutadas. Esta evaluación será la base para decidir si la presa de relaves San Cristóbal II se mantiene en el inventario. Este es un trabajo que, en la medida de lo posible, sería recomendable abordar ahora.

8. CONSIDERACIONES FINALES

Los trabajos de inventario son la clave para conocer la magnitud del problema que supone la existencia de Pasivos Ambientales Mineros desde una perspectiva territorial. Es deseable que estos inventarios se acompañen de alguna metodología o fórmula de evaluación de riesgos. Las metodologías de evaluación de riesgos que han de apoyar la toma de decisiones han de ser incuestionablemente sencillas, pues no pretenden

evaluar rigurosamente una instalación o Pasivo Ambiental Minero, si no establecer prioridades entre muchos. Por ello, como se ha visto, no están a salvo de generar incertidumbres. Con todo, es preferible tener una primera información de carácter técnico, de apoyo a las decisiones que se pudieran tomar de cara a reparar daños o a reducir riesgos. Es deseable que las actuaciones que se desarrollen después, y el análisis de riesgos que se aplique, se basen en nueva y más detallada información cuyo coste de adquisición no es asumible a escala de inventario.

En cualquier caso, todo esto requiere iniciativas, que normalmente asumirán las administraciones con dinero público. Sin entrar en las dificultades de orden jurídico que pueden presentarse, y que dependerán mucho de la normatividad existente en cada país, es en este punto donde mejor se entiende el carácter de pasivo gran parte del legado dejado por la minería abandonada. Ciertamente, desde la perspectiva de lo que sería un balance económico o empresarial, empieza a vislumbrarse que las inversiones de dinero público destinadas a inventariar, evaluar y rehabilitar o remediar los Pasivos Ambientales Mineros van a representar casi siempre una transmisión de costes a la sociedad que las empresas debieron evitar.

REFERENCIAS

Alberruche del Campo, E., Arranz González, J.C., Rodríguez Pacheco, R., Vadillo Fernández, L., Rodríguez Gómez, V., Fernández-Naranjo, F.J. 2014. Manual para la evaluación de riesgos de instalaciones de residuos de industrias extractivas cerradas o abandonadas. Instituto Geológico y

Minero de España-Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid.

Arranz-González, J., Rodríguez-Gómez, V., Rodríguez-Pacheco, R., Fernández-Naranjo, F.J., Vadillo-Fernández, L., Alberruche del Campo, E., 2019. *Guía para la rehabilitación de instalaciones abandonadas de residuos mineros*. MITECO. Madrid.

Bustillo, M.A., Aparicio, A., García, R. 2010. Surface saline deposits and their substrates in a polluted arid valley (Murcia, Spain). *Environmental Earth. Sciences*, 60:1215–1225

ITGE-CARM. 1995. *Atlas de inventario de riesgos naturales de la comunidad autónoma de la Región de Murcia*. Madrid.

CEN (2002) EN 12457. Characterisation of waste-leaching-compliance test for leaching of granular waste materials and sludges, Part 2: single stage batch tests at liquid to solid ratio 10 l/kg with particle size below 4 mm. CEN, Brussels

Oyarzun, R., Lillo, J., López-García, J.A., Esbrí, J.M., Cubas, P., Llanos, W., Higuera, P. 2011 The Mazarrón Pb–(Ag)–Zn mining district (SE Spain) as a source of heavy metal contamination in a semiarid realm: geochemical data from mine wastes, soils, and stream sediments. *Journal of Geochemical Exploration*, 109:113–124.

Rico, M., Benito, G. and Díez-Herrero, A. 2008. Floods from tailings dam failures. *Journal of Hazardous Materials*, 154: 79-87.

Artículo recibido en: 29.03.2022

Artículo aceptado: 03.05.2022