Revisión de la clasificación y cartografía de los depósitos de residuos mineros ubicados en la cuenca de la rambla del Beal en Cartagena

A review of mining wastes identification and cartography in rambla del beal watershed (Cartagena, Murcia, Spain)

García-García, C. Profesor Titular Universidad Politécnica de Cartagena. Ingeniero Técnico de Explotación de Minas y de Sondeos y Prospecciones Mineras. Dr. CC Geológicas.

Robles-Arenas, V.M. Profesora Asociada Universidad Politécnica de Cartagena. Doctora en CC. Geológicas.

Castejón Fernández, C. Ingeniero Técnico de Minas.

Rodríguez Pacheco, R. Científico Titular de OPIs. Grupo de Residuos Mineros y Geoquímica Ambiental. Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Ministerio de Ciencia e Innovación (MICIN). Dr. Ingeniero Civil.

PALABARAS CLAVE: Sierra Minera de Cartagena-La Unión, residuos mineros, cartografía, rambla del Beal, laguna del Mar Menor

KEYWORDS: Sierra Minera de Cartagena-La Unión, mining wastes, cartography, rambla del Beal, Mar Menor lagoon

RESUMEN
En el presente trabajo se exponen los resultados de una revisión de la clasificación y actualización de la cartografía de los residuos minero-metalúrgicos existentes en la cuenca de la rambla del Beal (Cartagena), generados durante más de veinte siglos de actividad minera. La explotación por minería de interior es la que más residuos peligrosos generó (desde la mitad del siglo XIX hasta el último tercio del siglo XX), mientras que el mayor volumen fue generado por minería a cielo abierto (desde 1949 hasta el cese de toda actividad minera en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión en 1991). Las acumulaciones de residuos han sido catalogadas de acuerdo al proceso minero-metalúrgico que los originó y a su disposición sobre el terreno, lo que permite identificar espacialmente la distribución y extensión ocupada por los depósitos que constituyen una mayor problemática tanto para el entorno próximo como para la laguna del Mar Menor.

ABSTRACT
This paper shows the results of mining wastes classification review and mapping updating of each type and deposit of mining-metallurgical wastes located in rambla del Beal watershed (Cartagena), deposited over more than twenty centuries of mining activity. Underground mining is responsible of the most hazardous mining waste (active from the mid-19th century to the last third of the 20th century), while the largest volume of waste was generated by open-pit mining (from 1949 until the end of mining activities in the Sierra Minera de Cartagena-La Unión in 1991). The accumulations of wastes have been cataloged according to the mining-metallurgical process that originated them and their disposal on the ground, which makes possible to spatially identify the distribution and extension occupied by the deposits that constitute a major problem for the immediate environment and for the Mar Menor lagoon.

INTRODUCCIÓN

En la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (SMCTLU), por su largo historial minero y su estado actual, se han realizado diferentes inventarios de balsas y escombreras de residuos por parte del Instituto Geológico y Minero de España (IGME, ITGE) en los años 1974, 1986, 1999 y 2002. En particular, mencionar los estudios de García-García (2004) y Rodríguez *et al.* (2011) que, además, de cartografiar, caracterizaron física y químicamente las principales acumulaciones de balsas de lodos y escombreras. También se han desarrollado estudios sobre la afección de las aguas subterráneas por la actividad minera (Robles-Arenas *et al.*, 2006; Robles-Arenas, 2007; Alcolea *et al.*, 2010 y 2012).

Son numerosas las publicaciones relacionadas con aspectos ecológicos y de restauración ambiental, todas ellas se encuentran recopiladas en el informe denominado "Estudio del estado del arte de las investigaciones, estudios, publicaciones y líneas de investigación iniciadas de las diferentes administraciones, universidades y otros organismos científicos sobre las explotaciones mineras de la SMCTLU y sus efectos en el Mar Menor" elaborado por el grupo de investigación Contaminación de Suelos de la Universidad de Murcia a petición de la Dirección General del Mar Menor.

La casuística de las acumulaciones de residuos en la SMCTLU es amplísima, tanto por los diferentes procesos minero-metalúrgicos que los generaban como por dónde o cómo eran verti-

dos, pues no existía un control sobre los residuos generados por la minería, de manera que eran vertidos directamente en los cauces de las ramblas. El vertido de los lodos de minería y otros residuos mineros a los cauces se prohibió en la SMCTLU en el año 1956 (Vilar, 1985), siendo estos residuos la principal fuente de contaminación de las masas de agua (Alcolea, 2015). Es tal el potencial contenido en metal de estos residuos que en 1980 ya se trató de hacer una valoración no exhaustiva del contenido en plomo y cinc mediante calicatas y sondeos (SMMP, 1980).

OBJETIVOS

La finalidad de este trabajo se enmarca en la cartografía e identificación de acumulaciones de residuos minero-metalúrgicos ubicados en la cuenca hidrográfica de la rambla del Beal. Para ello se realiza:

- Análisis de la información disponible sobre las estructuras mineras existentes en la zona de estudio.
- Revisión de la clasificación existente.
- Delimitación de la divisoria de aguas y red de drenaje de la rambla del Beal.
- Cartografía de detalle de los depósitos de residuos minero-metalúrgicos y clasificación según su origen y disposición sobre el terreno.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE SOBRE LAS ESTRUCTURAS MINERAS EXISTENTES EN LA SIERRA MINERA DE CARTAGENA-LA UNIÓN

Previamente a describir los diferentes depósitos de residuos identificados en el sector objeto de estudio es conveniente hacer un repaso de diferentes términos mineros recogidos en la legislación.

Definiciones

Orden de 26 de abril de 2000 por la que se aprueba la Instrucción Técnica Complementaria 08.02.01 del capítulo XII del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera "Depósitos de lodos en procesos de tratamiento de industrias extractivas.

- ***Balsa de lodos****: conjunto constituido por un hueco en la superficie del terreno, de origen natural o artificial, y por la acumulación de lodos producidos en el proceso de tratamiento de rocas o minerales y depositados dentro de dicho hueco.*
- ***Lodo****: producto en forma de pasta, torta o hidromezcla, generado en el proceso de tratamiento de las industrias extractivas, con relación sólido/líquido concreta para cada caso, y con tamaño de grano generalmente comprendido entre arena y limo.*

Del **Real Decreto 975/2009**, de 12 de junio, se toman del artículo 3.7. las siguientes definiciones:

- ***Residuos mineros:*** *aquellos residuos sólidos o aquellos lodos que quedan tras la investigación y aprovechamiento de un recurso geológico, tales como son los estériles de mina, gangas del todo uno, rechazos, subproductos abandonados y las colas de proceso e incluso la tierra vegetal y cobertera en determinadas condiciones, siempre que constituyan residuos tal y como se definen en la* ***Ley 10/1998, de Residuos****.*
- ***Residuos mineros peligrosos****: aquellos residuos mineros calificados como peligrosos en la legislación vigente de residuos peligrosos.*
- ***Residuo minero inerte****: aquel que no experimente ninguna transformación física, química o biológica significativa. Los residuos inertes no son solubles ni combustibles, ni reaccionan física ni químicamente de ninguna otra manera, ni son biodegradables, ni afectan negativamente a otras materias con las cuales*

entran en contacto, de forma que puedan provocar la contaminación del medio ambiente o perjudicar la salud humana. La lixivialidad total, el contenido de contaminantes en ellos y la ecotoxicidad del lixiviado deberán ser insignificantes y, en particular, no deberán suponer riesgo para la calidad de las aguas superficiales ni subterráneas.

- ***Instalación de residuos mineros**: cualquier zona designada para la acumulación o el depósito de residuos mineros, tanto en estado sólido como líquido o en solución o suspensión, para plazos de las siguientes duraciones: 1.º Sin plazo alguno para las instalaciones de residuos mineros de categoría A y las instalaciones de residuos mineros caracterizados como peligrosos en el plan de gestión* de residuos mineros [...].

  Se considera que forman parte de dichas instalaciones cualquier presa u otra estructura que sirva para contener, retener o confinar residuos mineros o tenga otra función en la instalación, así como, entre otras cosas, las escombreras y las balsas. Los huecos de explotación rellenados con residuos mineros tras el aprovechamiento del mineral con fines de rehabilitación o de construcción no tienen la consideración de instalaciones de residuos mineros, si bien están sujetos a lo dispuesto en el artículo 13.
- ***Escombrera:** instalación de residuos mineros construida para el depósito de residuos mineros sólidos en superficie.*
- ***Balsa**: instalación de residuos mineros natural o construida para la eliminación de residuos mineros de grano fino junto con cantidades diversas de agua libre, resultantes del tratamiento y beneficio de recursos minerales y del aclarado y reciclado del agua usada para dicho tratamiento y beneficio.*
- ***Lixiviado**: cualquier líquido que se filtre a través de los residuos mineros depositados y que proceda de una instalación de residuos mineros o esté contenido en ella, incluido el drenaje contaminado que pueda tener un efecto negativo sobre el medio ambiente si no se trata adecuadamente.*
- ***Presa**: estructura construida y diseñada para contener agua o residuos mineros en una balsa.* (Siempre sobre la superficie del terreno)

Del **Real Decreto 777/2012**, de 4 de mayo, se toman del artículo 3.7. las siguientes definiciones:

- ***Residuos mineros**: aquellos residuos sólidos o aquellos lodos que quedan tras la investigación y aprovechamiento de un recurso geológico, tales como son los estériles de mina, gangas del todo uno, rechazos, subproductos abandonados y las colas de proceso e incluso la tierra vegetal y cobertera en determinadas condiciones, siempre que constituyan residuos tal y como se definen en la **Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.***
- ***Residuo minero inerte**: aquel que no experimente ninguna transformación física, química o biológica significativa. Los residuos inertes no son solubles ni combustibles, ni reaccionan física ni químicamente de ninguna otra manera, ni son biodegradables, ni afectan negativamente a otras materias con las cuales entran en contacto, de forma que puedan provocar la contaminación del medio ambiente o perjudicar la salud humana. La lixiviabilidad total, el contenido de contaminantes en ellos y la ecotoxicidad del lixiviado deberán ser insignificantes y, en particular, no deberán suponer riesgo para la calidad de las aguas superficiales ni subterráneas. Las características específicas de los residuos mineros inertes se desarrollan en el **anexo I**.»*
- ***Tratamiento**: preparación, concentración y beneficio. El proceso o la combinación de procesos mecánicos, físicos, biológicos, térmicos o químicos que se aplican a los recursos minerales, incluidos los de explo-*

tación de canteras, con el fin de extraer el mineral y que incluye el cambio de tamaño, la clasificación, la separación, el lixiviado y el reprocesamiento de residuos previamente desechados, pero excluye las operaciones de fusión, los procesos industriales térmicos (distintos de la incineración de piedra caliza) y los procesos metalúrgicos.

De modo general, y resumiendo, se puede decir que:

- Las **balsas de lodos mineros** son estructuras de grandes dimensiones, que almacenan lodos con tamaño de partículas inferior a 1 mm, procedentes de los lavaderos de flotación diferencial. Es lo que en términos locales de la SMCTLU y en este informe se conoce como balsa o pantano. Otro término para definirlas es el de presa.
- Las **escombreras** presentan acumulaciones de material con granulometría superior a 1 mm, que tienen distinta procedencia, como preparación de labores, estrío a mano, concentración gravimétrica, escorias de fundición, desmonte, etc.

Clasificación de las estructuras mineras por su tipología en la smctlu

Los documentos más completos e integradores sobre residuos minero-metalúrgicos de la SMCTLU, son García *et al.* (2003) y García-García (2004), donde cada depósito fue identificado con un código, cartografiado (Fig. 1), caracterizado físico-químicamente y clasificado según el tipo de material presente. Se cuantificó el área total ocupada por los residuos con un valor aproximado de 9 km^2 y un volumen de 175 Mm^3 en tierra y de unos 25 Mm^3 en el mar (tabla 1). Dentro de los ocho tipos de residuos definidos, las escombreras de los pozos mineros se consideran residuos procedentes de la minería, aunque hoy en día apenas son perceptibles en muchos casos por el efecto de la escorrentía y la actividad antrópica posterior al periodo minero dados los años transcurridos desde su apertura. En cuanto a su cuantificación existirían, al menos 1902, una por pozo inventariado.

El catálogo presentado en García-García (2004) establece las siguientes categorías, entre paréntesis se indica el número de ítems inventariados:

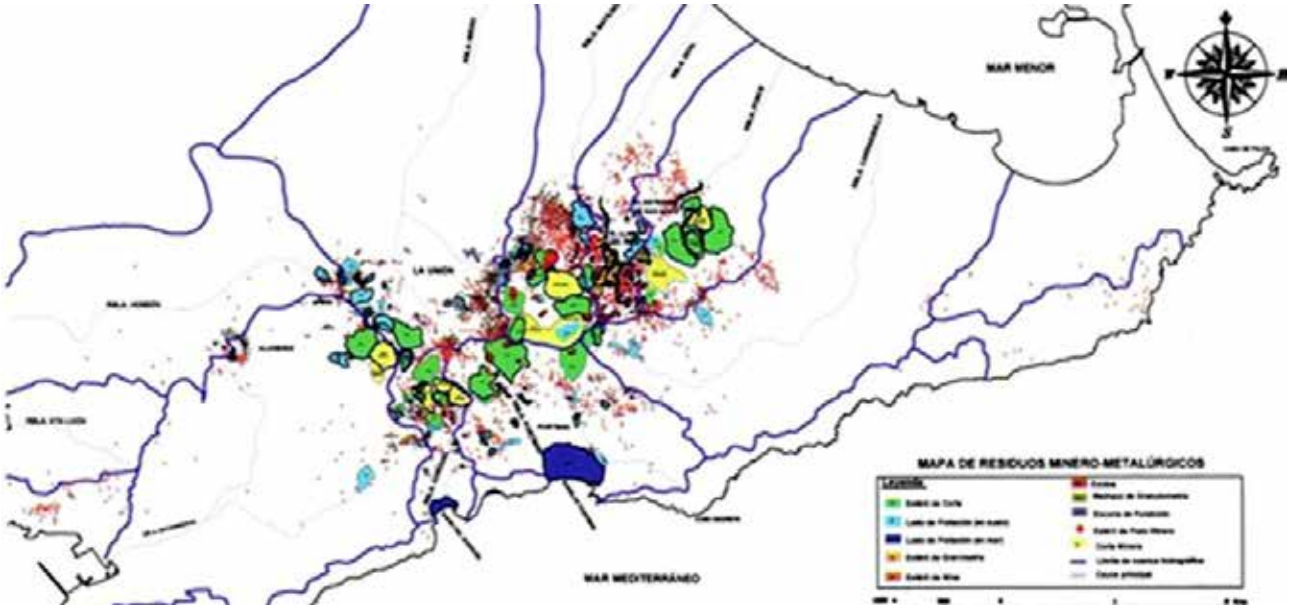


Figura 1. Cartografía de los residuos mineros inventariados en la SMCTLU (García-García, 2004).

Tabla 1. Clasificación, extensión y volumen de los residuos minero-metalúrgicos identificados en la SMCTLU (García-García 2004).

Tipo de residuo según su origen (Denominación)	Nº depósitos	Extensión (km^2)	Volumen (Mm^3)
1. Estéril de corta (vacie)	32	4,21	135,99
2. Lodo de flotación (balsa, pantano)	89	2,18	22,89
2. Lodo de flotación (en mar)	2	0,83	25,00
3. Estériles de concentración gravimétrica (terrera de gravimetría)	119	0,65	3,73
4. Estéril de mina (escombrera de mina)	176	0,48	3,01
5. Óxido (gossan o mineral oxidado) (escombrera de óxidos)	11	0,26	6,93
6. Rechazo de granulometría (montones)	1	0,06	0,59
7. Escoria de fundición (gacheros)	19	0,13	0,66
8. Estéril de pozo minero (escombrera de pozo minero)	1902	0,02	0,51
Total	**449 + 1902**		

Mm^3: millones de metros cúbicos.

a. Pozos mineros (1902)
b. Depósitos de residuos minero-metalúrgicos (449)
c. Cortas mineras y canteras (17)
d. Yacimientos minerales investigados y evaluados por la Sociedad Minero Metalúrgica de Peñarroya-España (15)
e. Bienes culturales, naturales y patrimoniales (286).

Pero el interés y preocupación por las acumulaciones de residuos mineros se remonta a 1974, cuando el Ministerio de Industria y Energía realizó en ese año, a través del IGME, un "Inventario Nacional de las Balsas y Escombreras" derivadas de la explotación y beneficio de minerales (IGME, 1974); la SMCTLU la dividieron en seis zonas e incluyeron estructuras de más de 100 m^3 que se resumen en la tabla 2.

Tabla 2. Relación de escombreras y balsas de la SMCTLU inventariadas por el IGME en 1974

ESCOMBRERAS			
En uso		Fósiles	
Nº	**Volumen m^3**	**Nº**	**Volumen m^3**
44	7.763.600	2.090	21.943.435
Total: 2.134 escombreras, 29.707.035 m^3			

BALSAS			
En uso		Fósiles	
Nº	**Volumen m^3**	**Nº**	**Volumen m^3**
14	4.787.650	63	10.228.500
Total 77 balsas, 15.016.150 m^3			

Tabla 3. Relación de escombreras y balsas de la SMCTLU inventariadas por el IGME en 1986

ESCOMBRERAS			
En uso		Fósiles	
Nº	**Volumen m³**	**Nº**	**Volumen m³**
18	185.043.100	102	52.400.800
Total: 120 escombreras, 237.443900 m³			

BALSAS			
En uso		Fósiles	
Nº	**Volumen m³**	**Nº**	**Volumen m³**
2	370.000	74	17.233.500
Total 76 balsas, 17.603.500 m³			

Posteriormente se realizó una revisión y actualización del inventario de balsas y escombreras en 1986, que se resume en la tabla 3.

En 1999 el IGME encargó a la Universidasd Politécnica de Cartagena la revisión del inventario de balsas de 1986, la cual se llevó a cabo durante los meses de julio a diciembre de ese año, por tres áreas del departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica: Explotación de minas, Ingeniería Cartográfica y Geodinámica, como resultado se inventariaron **78 balsas** todas inactivas, con un volumen de **13.439.000 m³.** Detalle en la tabla 4.

Tabla 4. Relación de balsas de la SMCTLU. Año 1999

Zona de la SMCTLU	Nº de balsas
La Unión y una nueva	27
Llano del Beal	13
Portmán	16
Ponce y una nueva	8
Gorguel	14
Total	**78**

Más tarde, en el año 2002 el IGME llevó a cabo una revisión y ampliación de los datos contenidos en las fichas del inventario del año 1999 (IGME, 2002).

La diferencia en el número de balsas de los diferentes inventarios puede deberse a que algunas balsas tienen diferentes niveles y a veces se considera cada uno de ellos como una balsa.

Entre los años 2003 a 2007, por encargo de la Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM), fueron realizados estudios sobre catorce balsas de lodos de flotación de las veintinueve que fueron evaluadas como más peligrosas por sus altos contenidos de metales o por su inestabilidad geotécnica, de ellas solo 2 se encuentran en la rambla del Beal total o parcialmente ("Encontrada-Cartagena" (978-1-0009), Faz *et al.* (2005) y "Llano del Beal" (0978-1-0006; 0978-1-0007), Faz *et al.* (2007).

Información disponible sobre las estructuras mineras existentes en la cuenca hidrográfica de la rambla del Beal

La información con más detalle disponible sobre el inventario de residuos minero-metalúrgicos incluidos en la cuenca de la rambla del Beal se cita en García-García (2004), se identifican cinco de los ocho tipos de residuos establecidos para toda la SMCTLU (tabla 5), se han excluido las escombreras de pozos mineros que por las modificaciones que han sufrido por agentes geológicos externos y la actividad antrópica posterior al periodo minero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo del trabajo consta de tres etapas:

1ª. Recopilación y revisión de información de inventarios previos, informes inéditos, tesis doctorales, artículos científicos, etc.
2ª. Trabajo de campo para identificar y cartografiar de las diferentes tipologías de residuos mineros en el área delimitada por cuenca hidrográfica de la rambla del Beal.
3. Integración de toda la información.

Tabla 5. Resumen de los depósitos de residuos minero-metalúrgicos ubicados en la cuenca de la rambla del Beal en García-García (2004).

Denominación del depósito	Código	Cantidad	Extensión (km^2)	Volumen (Mm^3)
Vacies	V	3	0,117	4,28
Balsas de Flotación	F	6	0,177	2,36
Terreras de Gravimetría	G	19	0,329	2,30
Escombreras de mina	EM	21	0,133	1,11
Gacheros	A	1	0,001	0,00
Total		**50**	**0,757**	**10,05**

En los siguientes apartados se detalla la sistemática llevada a cabo para la actualización de la cartografía.

Actualización de la cartografía de residuos minero-metalúrgicos

Se ha partido de una cartografía previa digital del inventario de 2004, la cual se encontraba como archivos .dwg/.dxf con un sistema de referencia de coordenadas en desuso actualmente, ED50. Por lo tanto, el primer paso ha sido *regeorreferenciar* toda la información al sistema actual ETRS89 huso 30 (Real Decreto 1071/2007 de 27 de julio, por el que se regula el Sistema Geodésico de Referencia Oficial en España).

En QGIS se han incluido todas las capas y las poligonales de los diferentes residuos junto con ortofotografías aéreas (PNOA máxima actualidad disponibles en el Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional), para proceder a la corrección de las líneas perimetrales del área ocupada por los depósitos de residuos minero-metalúrgicos, modificaciones debidas a actuaciones antrópicas llevadas a cabo desde 2004 hasta la actualidad y por errores de proyección del archivo digital. El trazado de estos polígonos corregidos ha sido comprobado depósito a depósito tras varias campañas de campo mediante el uso de un Tablet 4G.

Se ha procedido a la actualización de la divisoria de aguas superficiales de la cuenca hidrográfica de la rambla del Beal, pues tanto en las salidas de campo como con el uso de diferentes softwares se evidenciaban diferencias al respecto de la red de drenaje considerada en estudios previos (García-García 2004; Robles-Arenas *et al.*, 2006; Alcolea, 2015). Para esta tarea concreta se emplearon los modelos digitales del terreno (MDE) disponibles en el Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (https://www.ign.es), las ortofotografías anteriormente mencionadas y la extensión Fill Sinks (Wang and Liu) disponible en el proveedor de algoritmos SAGA (Sistema Automatizado para el Análisis Geocientífico).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Red hidrográfica y divisoria de aguas de la rambla del Beal

Uno de los resultados de este trabajo ha sido la delimitación de la divisoria de aguas y red hidrográfica de la cuenca de la rambla del Beal (Fig. 2), que difiere de la que se halla en García-García (2004) ya que las actuaciones antrópicas sobre la superficie de esta han tenido consecuencias sobre la red de drenaje. El área resultante es de 8,07 km^2.

Tipología de los depósitos de residuos mineros identificados en la cuenca hidrográfica de la rambla del Beal

Tras el reconocimiento *in situ* y la realización de la cartografía, se ha procedido a una revisión de la clasificación de los tipos de depósitos

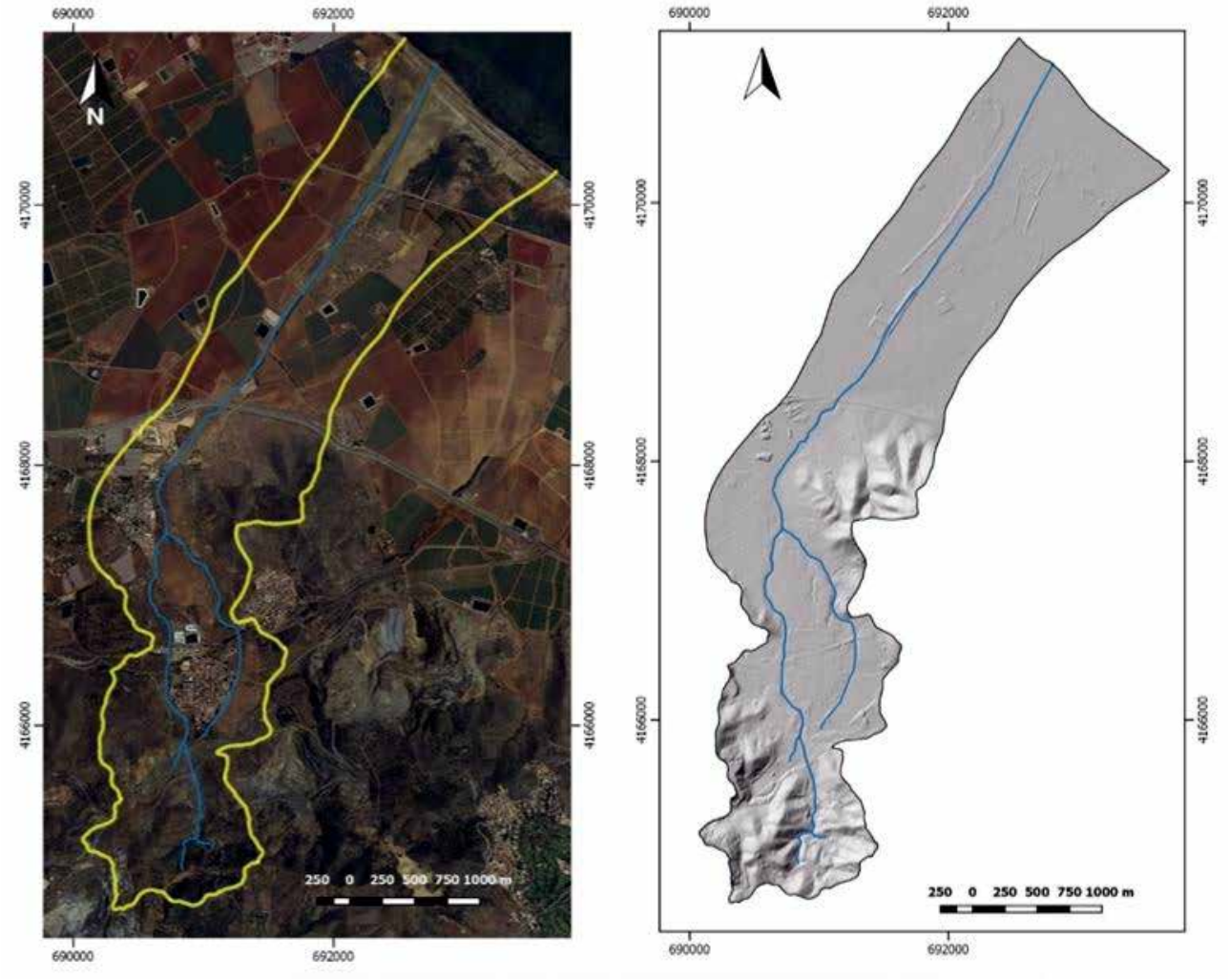


Figura 2. Delimitación de la cuenca hidrográfica de la rambla del Beal.

atendiendo al proceso minero-metalúrgico que los generó y a su disposición sobre el terreno como consecuencia de su vertido o de procesos posteriores. En la tabla 6 se muestra una comparativa entre la nomenclatura de García-García (2004) y la de este estudio. En concreto, se han introducido seis nuevas categorías; dos relativas a los lodos procedentes de lavaderos de flotación diferencial, para distinguir aquellas acumulaciones que se encuentran en los cauces (FE), de los restos balsas que no se han eliminado totalmente (FR) frente a las balsas/presas de lodos en sentido estricto (FB); se han incluido una escombrera de óxidos (OX) y otra de granulometría (RG) que no fueron identificadas en el estudio anteriormente mencionado; y se incluyen otras dos nuevas categorías, una para materiales resultado del proceso de estrío mecánico-manual (ES) y una última categoría, para incluir aquellas superficies que en algún momento estuvieron cubiertas por residuos y ahora han sido desplazados o movilizados sin una completa eliminación (SR) quedando cubiertas por residuos mineros de uno o varios tipos.

A continuación, se describen brevemente cada uno de los procesos minero-metalúrgicos

Tabla 6. Comparativa en la nomenclatura de residuos mineros-metalúrgicos empleada en García-García (2004) y este estudio, junto con el número de depósitos y extensión ocupada en la cuenca hidrográfica de la rambla del Beal en 2019.

Denominación del depósito (García-García, 2004)	Código	Denominación del depósito	Código	N.º depósitos	Extensión m²	% ocupado
1 Estériles de flotación diferencial	F	1 Balsa (terrera, presa, pantano) en tierra	FB	5	211032	2,6
	. .	2 Lodo depositado o arrastrado en la red hidrográfica	FE	3	1016683	12,59
	. .	3 Restos de una balsa de lodos sin eliminar completamente	FR	7		
2 Rechazo de concentración gravimétrica	G	4 Escombrera de gravimetría	GV	28	102063	1,26
3 Estéril de corta minera	V	5 Escombrera o vacie de corta	VA	3	165806	2,05
4 Material procedente de explotación de mina	E	6 Escombrera de mina	EM	15	23265	0,29
5 Material procedente de excavación de pozo minero	EP	7 Escombrera de pozo	EP	223	6690	0,08
6 Óxidos de yacimiento de sulfuros	. .	8 Escombrera de óxidos	OX	1	25	0,0003
7 Escoria de fundición	GA	9 Gachero	GA	1	265	0,003
8 Rechazo de concentración por medios densos	. .	10 Escombrera de granulometría	RG	1	370	0,005
9 Material procedente de estrío de mina	. .	11 Escombrera de estrío mecánico-manual	ES	9	77443	0,96
10 Superficie cubierta por residuos	. .	12 Superficie cubierta por residuos mineros	SR	3	238754	2,96
		Total, depósitos		**77+(223)**	**1842396**	**22,83**

que permiten el establecimiento de la clasificación de depósitos. En la tabla 6 se detalla el número de depósitos identificados de cada tipo de residuos y el área total ocupada, y en la figura 3 se muestra una imagen ejemplo de cada uno de los depósitos identificados y en la figura 4 la distribución espacial resultado de este trabajo.

En el tipo (**GV**), rechazo por concentración gravimétrica, acumula materiales que proceden del final del proceso de concentración de metales (Pb-Zn) por separación gravimétrica. También contiene diferentes tipos de metales potencialmente contaminantes.

En los estériles de corta minera (**VA**) y de pozo minero (**EP**) se trata del material geológico eliminado para acceder hasta la masa mineralizada, motivo por el que se pueden encontrar algunas muestras mineralizadas, pero que no representa el fondo geoquímico de estos materiales.

El tipo **EM** designa aquel material procedente de explotación de mina, o bien se trata de una escombrera de un pozo minero con un volumen superior al de la excavación del mismo o de una excavación iniciada en superficie para aprovechamiento de mineralización, por tanto, se considera que se ha depositado en la escombrera

Figura 3. Ejemplo de los 12 tipos de residuos identificaos en la cuenca de la rambla del Beal.

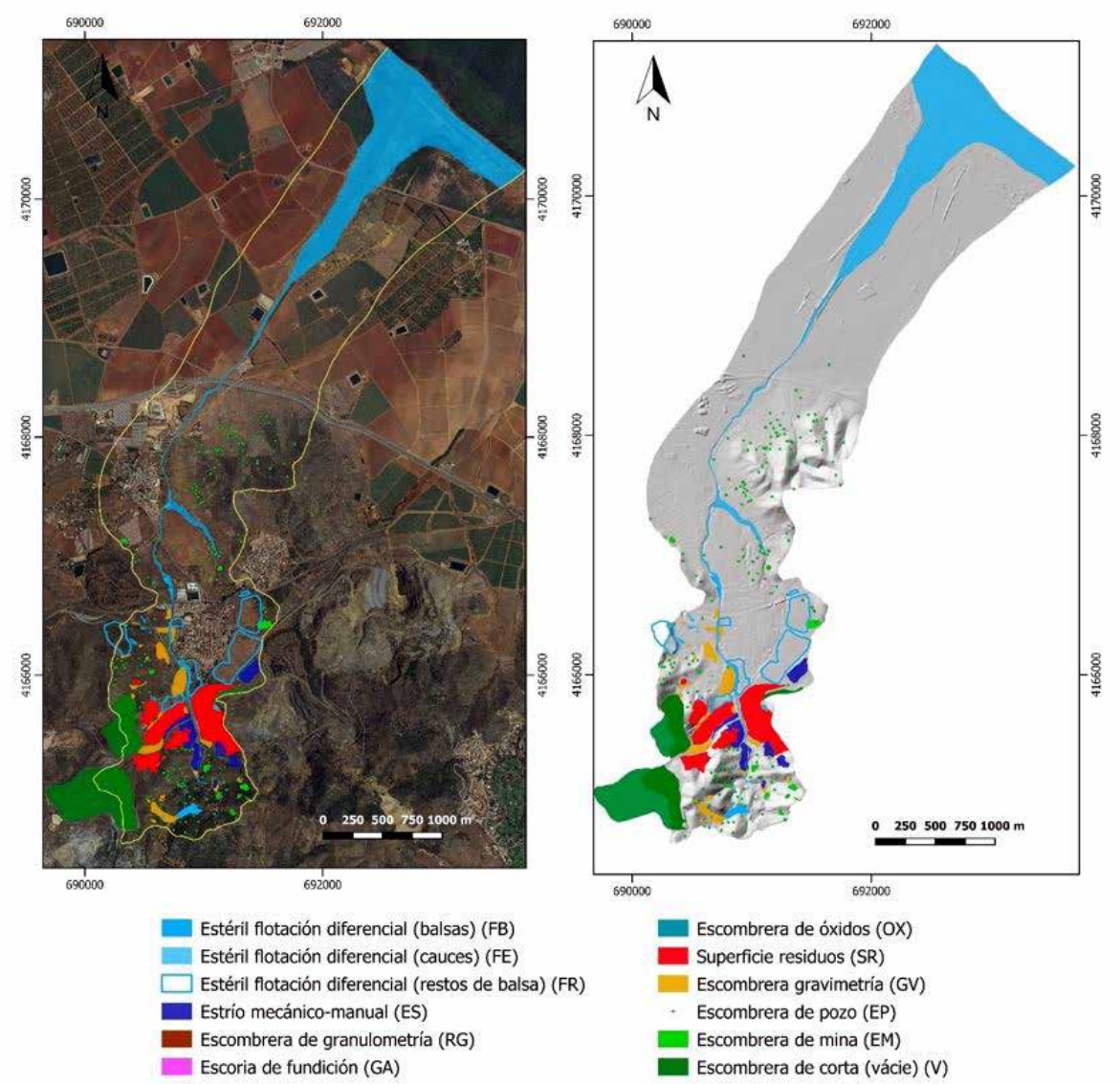
parte de la explotación interior y los materiales pueden contener mineralización, con metales potencialmente contaminantes.

Los estériles de flotación diferencial son los lodos que proceden del todo-uno del que no se pudo extraer más concentrado de metal en el momento de su tratamiento, por tanto, estos materiales aun contienen metales potencialmente contaminantes para el medio. En la rambla del Beal se encuentran en balsas o presas mineras (**FB**), como en los cauces (**FE**), ocupando en algunos tramos por completo el lecho, ya se trate de lodos vertidos directamente o bien arrastrados por el agua de escorrentía que erosiona las balsas que se encuentran aguas arriba. La tercera categoría relacionada con los lodos de flotación es la que evidencia restos de balsas que no han sido totalmente retiradas (**FR**).

Los depósitos clasificados como **OX**, incluyen terreras principalmente compuestas por óxidos, es decir, rocas procedentes de la montera de oxidación, donde los minerales se encuentran mayoritariamente como óxidos y no pudieron ser concentrados por ningún proceso minero-metalúrgico en el momento de su explotación.

Los gacheros (**GA**), como se conoce localmente a la escoria de fundición, se trata de rocas resultantes del proceso de fundición de

Figura 4. Cartografía de residuos minero-metalúrgicos presentes en la cuenca hidrográfica de la rambla del Beal.



metales. Son materiales inconfundibles por sus características físicas, gran peso específico y por presentar concentraciones de plomo reseñables (García-García 2004; Alcolea, 2015).

En el tipo **RG**, resulta del proceso de concentración por flotación diferencial, en el que se hace un proceso intermedio para eliminar los materiales menos densos. En este caso también hay concentraciones de metales potencialmente contaminantes.

ES identifica las grandes acumulaciones de material procedente de estrío de mina, son materiales cuyo origen y fecha de depósito no ha sido posible certificar, proceden de un estrío realizado por medios manuales y mecánicos. No cabe duda de que se encuentran *in situ,* como mínimo pueden datar de principios del siglo XX.

Por último, se ha establecido una categoría denominada **SR**, para poder cartografiar e inventariar las superficies con residuos mineros, donde hubo acumulaciones y han sido desmanteladas, retirados los residuos o distribuidos sobre el terreno, quedando actualmente parcial e irregularmente cubierta el suelo por residuos de cualquiera de los tipos mencionados con anterioridad. De estas superficies se desconoce la potencia de material existente, en algunos casos, actualmente, es posible identificar las huellas de ripado de *bulldozer*.

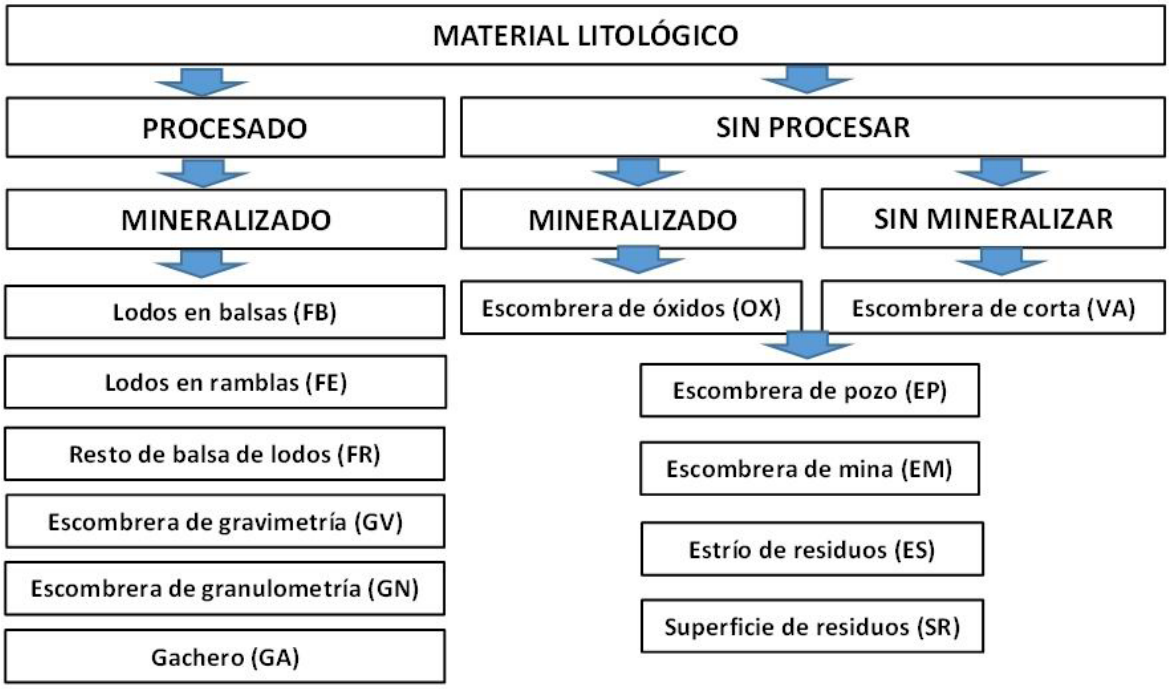


Figura 5. Esquema de clasificación de los residuos generados a partir del material litológico de la Sierra de Cartagena-La Unión en función del proceso industrial al que han sido sometidos.

En el esquema de la figura 5 se muestra de un modo gráfico cómo partiendo de cada litología y según a los procesos que se haya sometido, hay materiales que apenas han sufrido transformación, como aquellos que proceden del proceso minero de arranque, carga, transporte y vertido en la escombrera, mientras que otros, antes de ser depositados, han experimentado un proceso industrial que le induce una profunda transformación.

En cuanto a los depósitos de residuos que se generan durante la explotación de menas metálicas en minería de interior y a cielo abierto, se sintetizan en los esquemas de las figuras 6 y 7 respectivamente.

En la figura 6 se hace una distinción entre pozos que tienen diferentes funciones, pozo minero para investigación (derecha) de los que se han cartografiado 223 en la rambla del Beal (Fig. 4 y tabla 6), cuyo objetivo es la localización de mineral, bien en filones o masivo, son los pozos más abundantes en la SMCTLU. Una vez localizada la masa de mineral o el filón, a muro de la misma se construye un pozo minero de explotación (izquierda), de los que se han cartografiado 15 en este estudio (Fig. 4 y tabla 6), cuya finalidad es la bajada y subida del personal y la extracción del mineral a través de las galerías que conducen hasta los frentes de explotación.

Los estériles de flotación diferencial son los lodos que proceden del todo-uno del que no se pudo extraer más concentrado de metal en el momento de su tratamiento, por tanto, estos materiales aun contienen metales potencialmente contaminantes para el medio

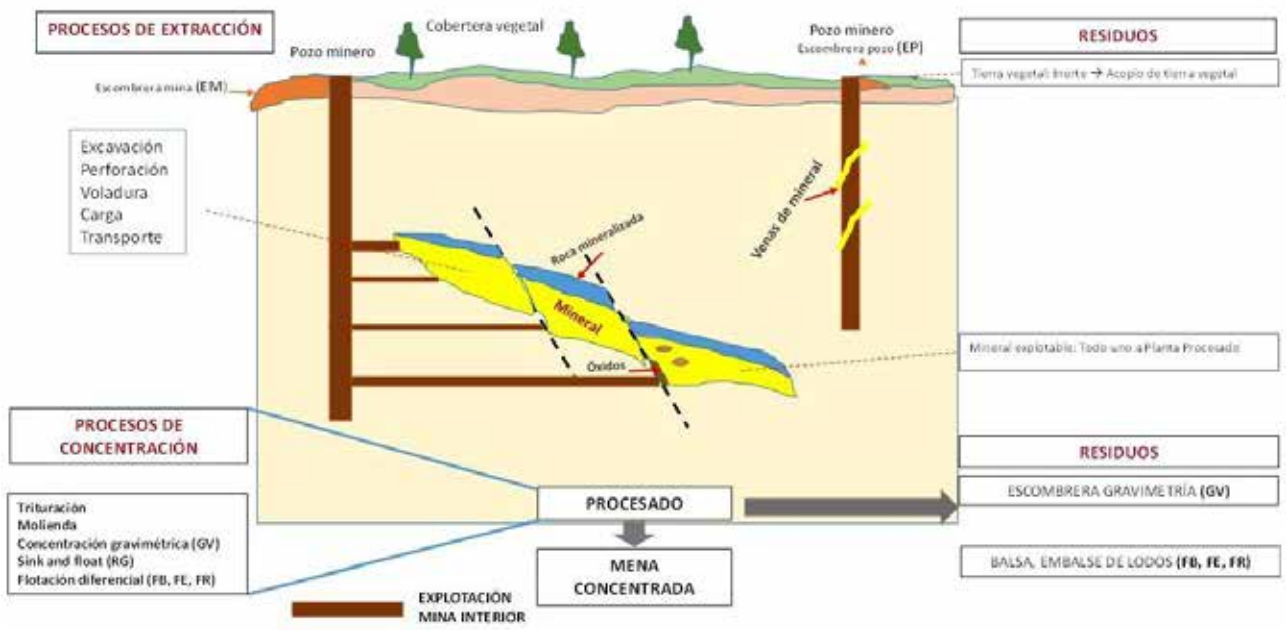


Figura 6. Esquema general de los procesos de extracción y concentración, y residuos generados en una explotación minera metálica por interior.

CONCLUSIONES

Como conclusiones de este trabajo, se pueden citar las siguientes:

Se ha establecido la divisoria de la cuenca hidrográfica de la rambla del Beal. Ocupa un área de 8,07 km^2.

Se han definido los procesos minero-metalúrgicos que se han desarrollado en la SMCTLU durante su actividad productiva.

Se han identificado 12 tipos diferentes de depósitos de residuos atendiendo al proceso minero-metalúrgico que los generó y en dónde o cómo se depositaron.

Se han cartografiado detalladamente cada uno de los depósitos de residuos constando que ocupan una superficie de 1,84 km^2, lo que representa el 23 % del área total de la cuenca hidrográfica. ■

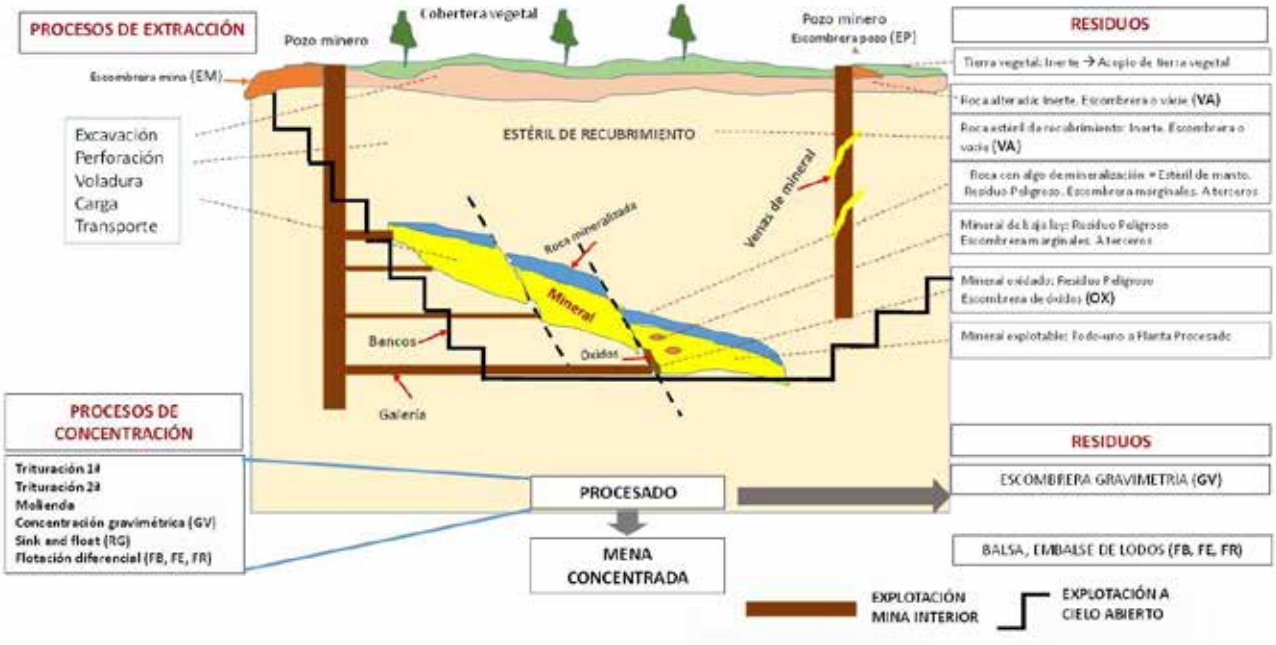


Figura 7. Esquema general de los procesos de extracción y concentración, y residuos generados en una explotación minera metálica por interior y a cielo abierto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCOLEA, A. "Geoavailability of Ni, Cu, Zn, As, Cd, and Pb in the Sierra de Cartagena-La Unión (SE Spain)". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena, 2015, 351 p.

ALCOLEA, A., IBARRA, I., CAPARRÓS, A., RODRÍGUEZ, R. "Study of the MS response by TG-MS in an acid mine drainage efflorescence". Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2010, nº 101, p. 1161-1165

ALCOLEA, A., VÁZQUEZ, M., CAPARRÓS, A., IBARRA, I., GARCÍA, C., LINARES, R., RODRÍGUEZ, R. "Heavy metal removal of intermittent acid mine drainage with an open limestone channel". Minerals Engineering, 2012, vol. 1, p. 86-98

FAZ CANO, A., ACOSTA AVILÉS, J.A., ALCARAZ APARICIO, M., ARACIL ÁVILA, E., CARMONA GARCÉS, D.M., GARCÍA GARCÍA, C., MANTECA MARTÍNEZ, J.I., MARTÍNEZ MARTÍNEZ, S., MARTÍNEZ-PAGÁN, P., MARTÍNEZ SEGURA, M.A., MUÑOZ GARCÍA, M.A., RODRÍGUEZ PACHECO, R., TRIGUEROS TORNERO, E., Y ZANUZZI GOTTA, A. "Evaluación de riesgos y definición de medidas correctoras en depósitos de lodos abandonados procedentes de procesos de actividad extractiva en la Región de Murcia. Aplicación al depósito "Encontrada-Cartagena (978-1-0009)". Universidad Politécnica de Cartagena, 2005, 217 p.

FAZ CANO, A., ACOSTA AVILÉS, J.A., ALCARAZ APARICIO, M., ARACIL ÁVILA, E., CARMONA GARCÉS, D.M., GARCÍA GARCÍA, C., MANTECA MARTÍNEZ, J.I., MARTÍNEZ MARTÍNEZ, S., MARTÍNEZ-PAGÁN, P., MARTÍNEZ SEGURA, M.A., MONTIEL GUARDIOLA, NURIA., MUÑOZ GARCÍA, M.A., RODRÍGUEZ PACHECO, R., TERÁN MITA, T.A., TRIGUEROS TORNERO, E., Y ZANUZZI GOTTA, A. "Evaluación de riesgo y definición de medidas correctoras en depósitos de lodos abandonados procedentes de procesos de actividad extractiva en la Región de Murcia. Aplicación al depósito "El Llano del Beal" (Nº 0978-1-0006; 0978-1-0007)". Universidad Politécnica de Cartagena, 2007, 159 p.

GARCÍA-GARCÍA C. "Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia-España)". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena, 2004, 424 p.

GARCÍA-GARCÍA, C., MANTECA, J.I. Y QUERALT, I. "Caracterización e inventariado de los depósitos de residuos mineros en la Sierra de Cartagena (Murcia)". Actas del IV Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. Utrillas (Teruel), 2003, 519-530 p.

IGME (Instituto Geológico y Minero de España) "Inventario Nacional de Balsas y Escombreras". Murcia. 1974, 151 p.

IGME (Instituto Geológico y Minero de España) "Inventario Nacional de Balsas y Escombreras". Murcia. 1986, 162 p.

IGME (Instituto Geológico y Minero de España) "Inventario Nacional de Balsas. Región de Murcia". 2002, 270 p.

ITGE (Instituto Tecnológico Geominero de España) "Estudio geológico-hidrogeológico de la Sierra Minera (Murcia)". Tomo I Memoria, 1996, 306 p.

ITGE (Instituto Tecnológico Geominero de España) "Inventario Nacional de Balsas. Región de Murcia". 1999, 270 p.

ROBLES ARENAS, V.M. "Caracterización hidrogeológica de la sierra de Cartagena-La Unión (SE de la península ibérica). Impacto de la minería abandonada sobre el medio hídrico". Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2007, 146 p.

ROBLES-ARENAS V.M., RODRÍGUEZ, R., GARCÍA, C., CANDELA, L. "Sulphide-mining impacts in the physical environment: Sierra de Cartagena-La Unión (SE Spain) case study". Environmental Geology, 2006, vol. 51, nº 1, p. 47-63

RODRÍGUEZ, R., GARCÍA-GARCÍA, C., ZARROCA, M., ROQUÉ, C., LINARES, R., OLDECOP, L. "Características geológicas y geotécnicas de los lodos de flotación de la Sierra de Cartagena-La Unión (SE España)". Boletín Geológico y Minero, 2011, nº 122, p. 127-144

SMMP (1980) Estudio de recursos no convencionales externos (trabajo inédito)

VILAR, J.B., EGEA BRUNO, P.M. "La minería murciana contemporánea (1840-1930)". Ed. Caja Murcia-Universidad de Murcia, 1985. ISBN 84-505-1119-4