

Impactos de la minería en el medio hidrológico

Javier Lillo

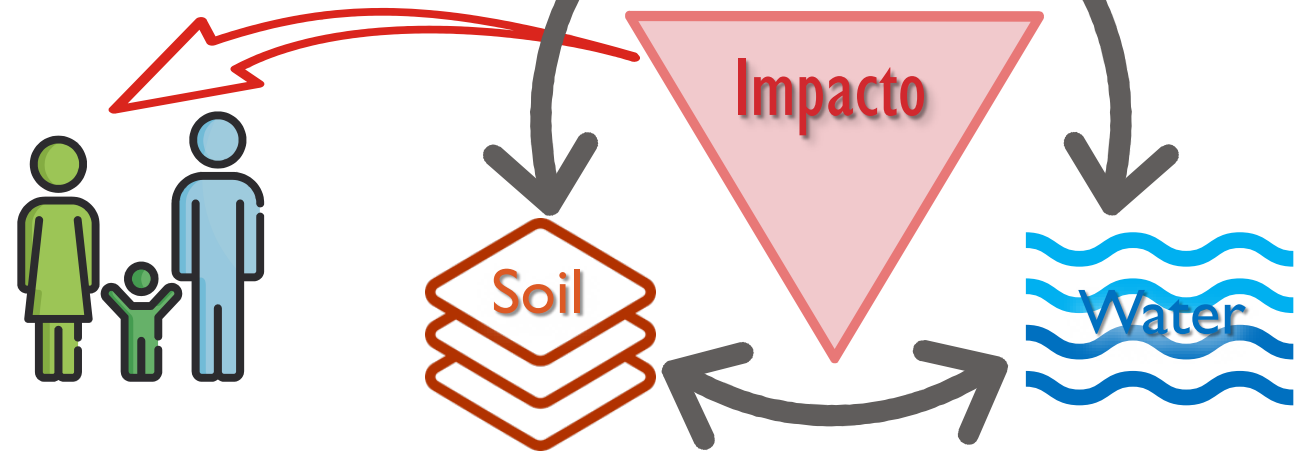
Universidad Rey Juan Carlos

INTRODUCCIÓN

Impactos en el medio hidrológico

La actividad minera provoca una serie de impactos, tanto directos como indirectos, en las **condiciones físicas y químicas** iniciales del medio hidrológico. Estas alteraciones afectan a las funciones ecosistémicas del recurso y su sostenibilidad.

Los impactos se transfieren a otros compartimentos ambientales, afectándolos negativamente.

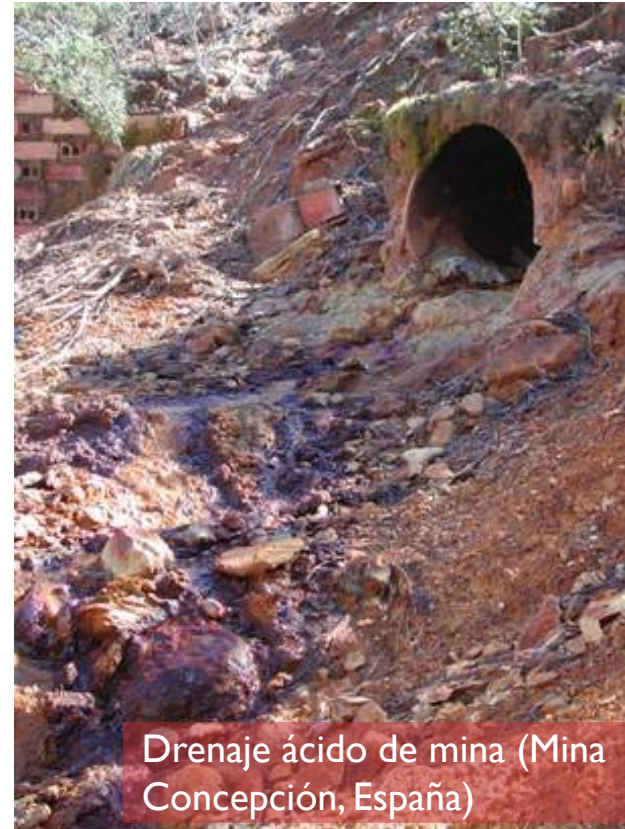


INTRODUCCIÓN

Impactos en el medio hidrológico

Las modificaciones en las condiciones originales pueden afectar directamente al agua, al medio por donde esta fluye, circula o se almacena, o en algunos casos a ambos.

Las aguas superficiales y subterráneas se deben considerar como un **único recurso**. Los impactos negativos en unas, se trasladarán indefectiblemente a las otras.



Drenaje ácido de mina (Mina Concepción, España)

IMPACTOS FÍSICOS

Impactos en el medio hidrológico

Los impactos físicos suponen, fundamentalmente, una alteración en las condiciones hidráulicas del sistema. Así, afectarán a:

1. Flujo (escorrentía superficial, flujo subterráneo)
2. Almacenamiento (niveles y reservas)
3. Interacciones entre aguas superficiales y subterráneas
4. Interacciones entre las aguas y otros sistemas o compartimentos ambientales (atmósfera, suelos, etc.)

Todos estos aspectos están interrelacionados, y su afección no ocurre de forma independiente.

IMPACTOS FÍSICOS

Impactos en el medio hidrológico

¿Cómo? Por:

- La instalación o formación de barreras físicas:
 - Diques y presas contruidos con esa función específica
 - Acumulaciones de materiales y residuos (escombreras, rellenos, colmataciones)
 - Modificación en las propiedades hidráulicas del material original (sellado, compactación, cementación)

IMPACTOS FÍSICOS

Impactos en el medio hidrológico

¿Cómo? Por:

- La modificación de perfiles y niveles de base en cursos fluviales:
 - Desvíos de cauces
 - Represamientos y embalsamientos (la instalación de barreras de cierto tamaño supone, en muchos casos, la alteración del perfil del río y la formación de un nivel de base local)
 - Excavaciones

IMPACTOS FÍSICOS

Impactos en el medio hidrológico

¿Cómo? Por:

- La excavación y formación de conductos y huecos, o estructuras que puedan facilitar, favorecer, impedir o modificar el flujo del agua:
 - Túneles, galerías, pozos
 - Fracturación inducida por voladuras
 - Huecos de disolución

La excavación en minería subterránea genera una severa alteración de las condiciones hidráulicas del sistema hidrogeológico.



IMPACTOS FÍSICOS

Impactos en el medio hidrológico

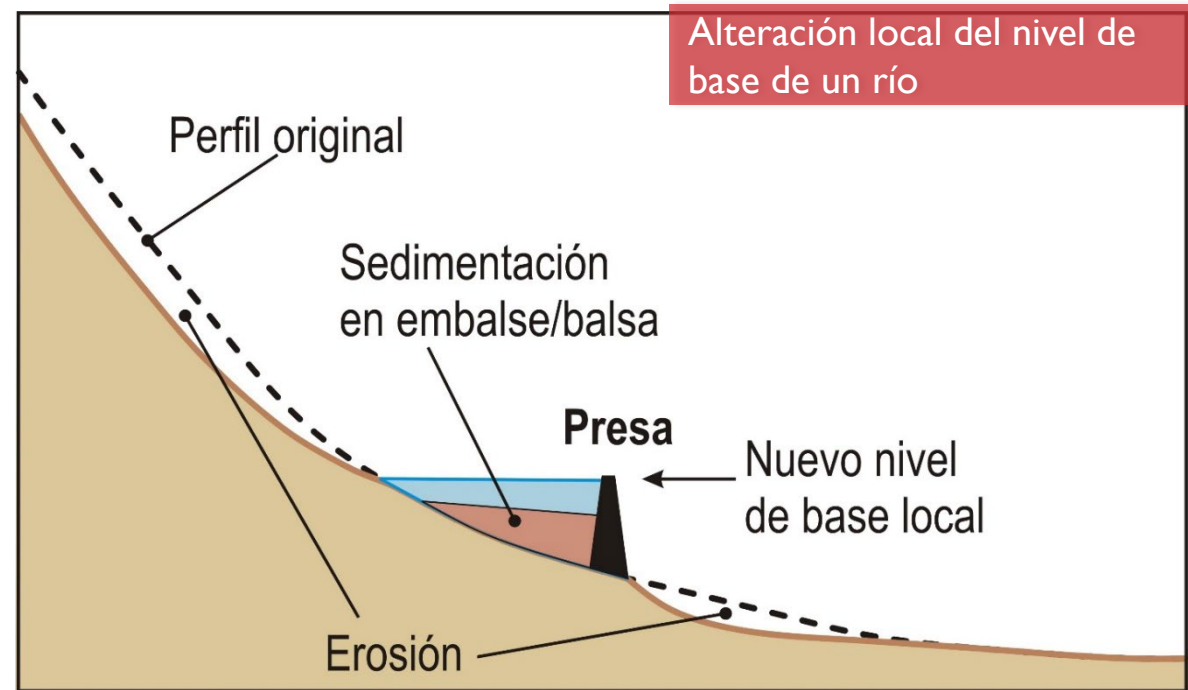
¿Cómo? Por:

- La variación en el propio volumen (reservas) de agua, que condicionará a su vez, variaciones en los niveles de agua:
 - Extracción
 - Acumulación
 - Inyección o recarga forzada

IMPACTOS FÍSICOS

Impactos en el medio hidrológico

Las modificaciones en los cursos fluviales implican, muchas veces, cambios en el perfil original y la variación de los niveles de base locales, alterándose el balance entre la tasa de **erosión** y tasa de **sedimentación** aguas abajo y aguas arriba del lugar de la alteración.



(*Oyarzun et al., 2011*)

IMPACTOS FÍSICOS

Impactos en el medio hidrológico

La erosión se ve facilitada por:

- La existencia de zonas donde se ha reducido la infiltración como consecuencia del **sellado** del terreno —por construcciones, compactación del suelo, cementaciones, deposición de material, etc.—.
- La **pérdida de cubierta vegetal** causados por la actividad minera.

Si se conjugan **pérdida de infiltración + aumento de escorrentía superficial + mayor exposición del material a la erosión**, se genera entonces un escenario de una gran remoción de material, aumentando con ello la carga en suspensión (muchas veces contaminante) de las corrientes superficiales.



IMPACTOS FÍSICOS

Impactos en el medio hidrológico

La **erosión** puede ser significativa en aquellos casos en los que no se realiza una labor adecuada de conservación —por ejemplo, en explotaciones mineras abandonadas—.



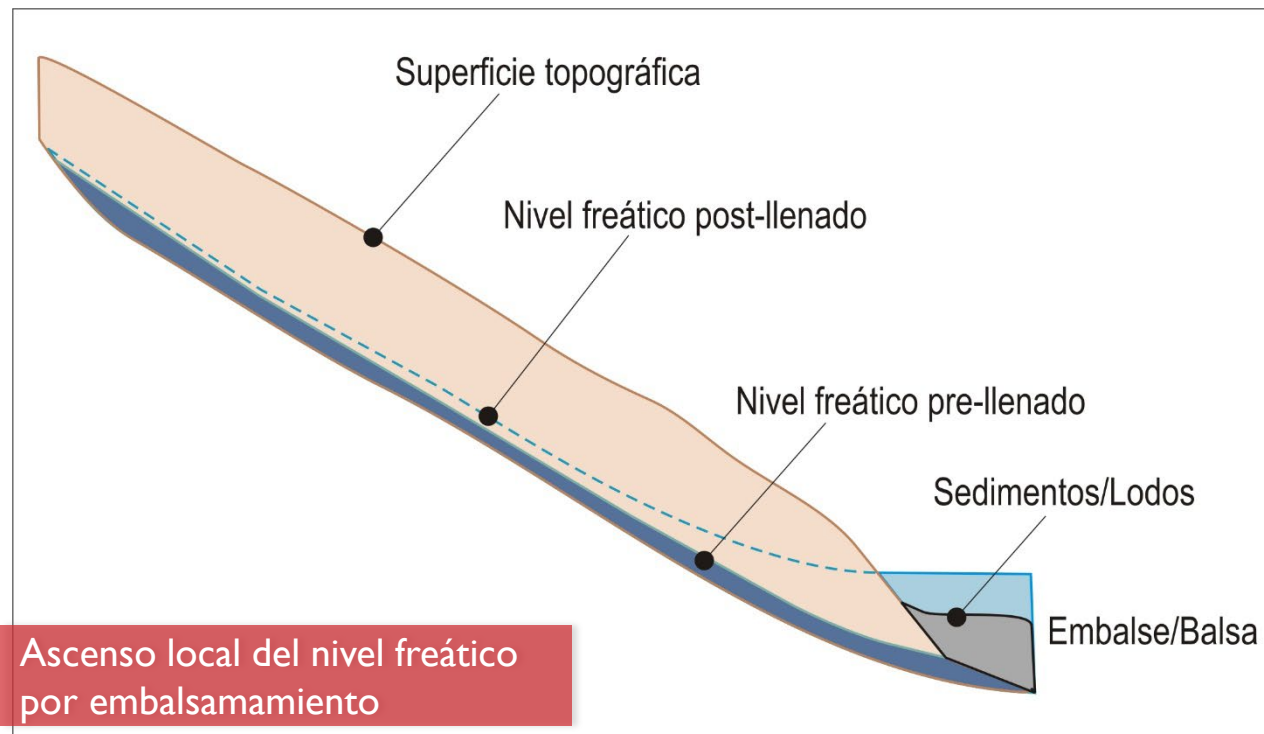
Erosión en balsas de lodos abandonadas (Mazarrón, España)



IMPACTOS FÍSICOS

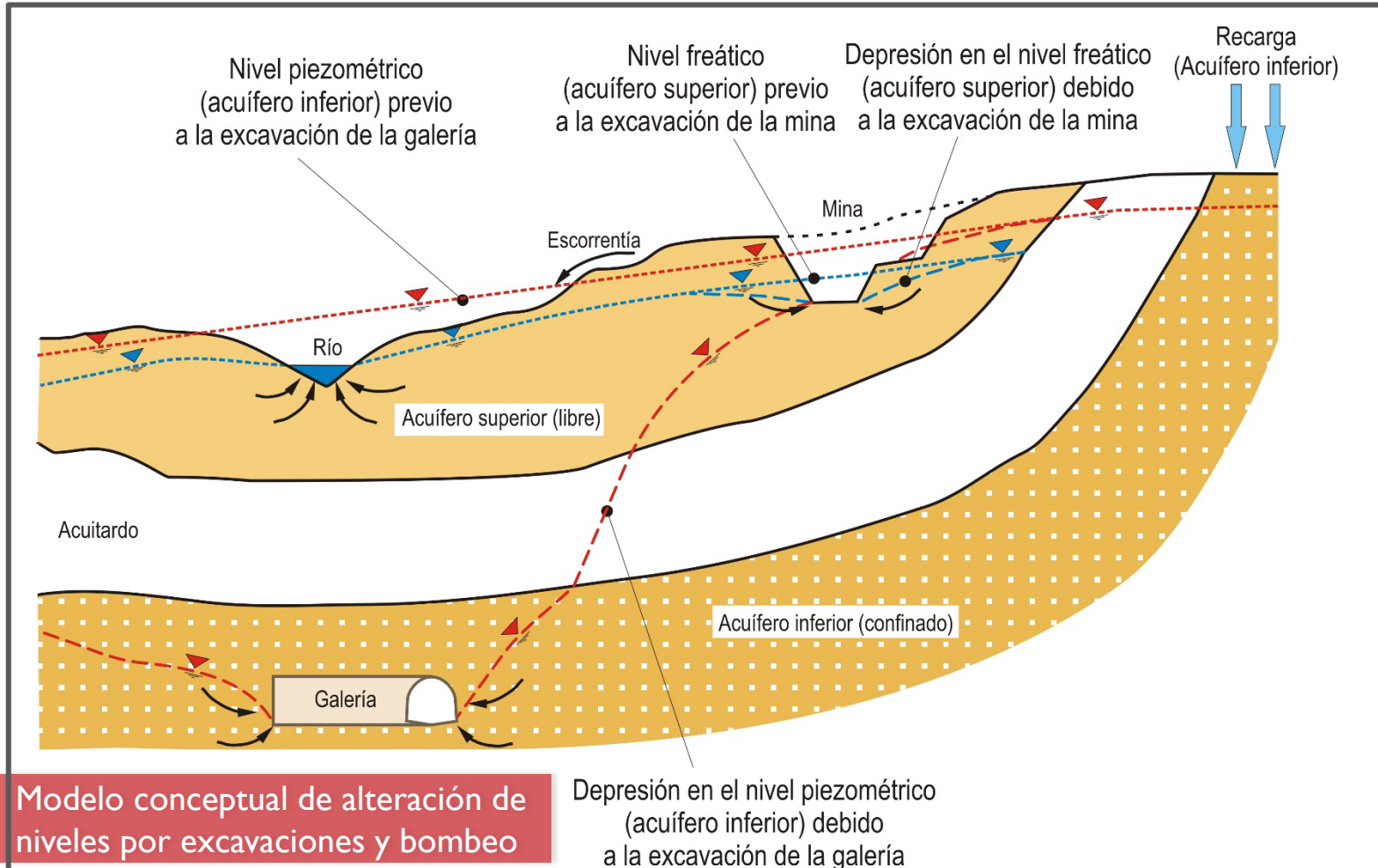
Impactos en el medio hidrológico

Los embalsamientos pueden elevar la cota del nivel freático en el entorno de la balsa, de manera que formaciones que antes estaban en condiciones "secas" o no saturadas, pasan a estar en condiciones saturadas, y por ello, mecánicamente inestables.



IMPACTOS FÍSICOS

Impactos en el medio hidrológico



Modelo conceptual de alteración de niveles por excavaciones y bombeo

(Oyarzun et al., 2011)

IMPACTOS FÍSICOS

Impactos en el medio hidrológico

La generación de huecos y el aumento de la permeabilidad por voladura darán lugar a:

- Descenso de niveles,
- Modelo de flujo original (al generarse vías de circulación preferente o sumideros locales).

Ambos factores, van a provocar a su vez:

- Pérdida de las reservas de agua subterránea
- Aumento de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación
- Pérdida de zonas y puntos de descarga de agua a la superficie e inoperatividad y secado de pozos de extracción de agua
- Subsistencia del terreno

IMPACTOS FÍSICOS

Impactos en el medio hidrológico

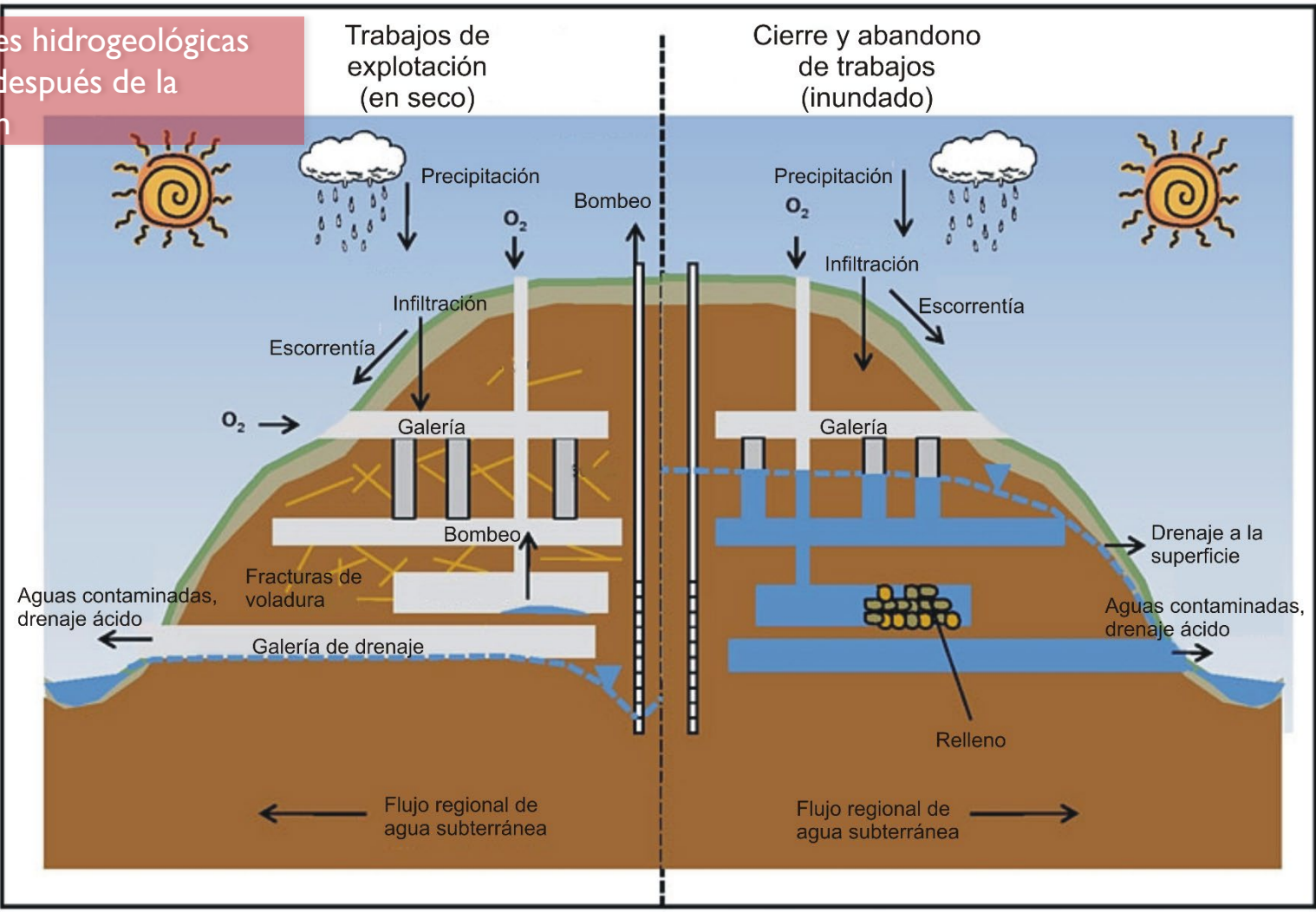
Cuando cesa la actividad, los niveles vuelven a adoptar su posición original, y los huecos (galerías, pozos y cortas a cielo abierto) quedan nuevamente ocupados por agua, actuando de **vías y espacios preferentes** para su circulación y acumulación.

Así, en cualquier caso, las características hidráulicas de los acuíferos —tales como permeabilidad, capacidad de almacenamiento y conductividad hidráulica— y el modelo de flujo originales habrán quedado profundamente modificados, incluso si los huecos han sido rellenados por materiales de rechazo o estériles.

IMPACTOS FÍSICOS

Impactos en el medio hidrológico

Condiciones hidrogeológicas durante y después de la explotación



IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico

Los impactos químicos suponen, fundamentalmente, una **pérdida de la calidad de las aguas**. Así, incluyen:

1. Contaminación (generalmente, por **metales pesados** y sustancias utilizadas en los procesos metalúrgicos)
2. **Acidificación**, salinización, alcalinización

Y en relación a la calidad, podríamos incluir también:

1. Aumento de **carga en suspensión** en aguas superficiales

Como ocurría con los impactos físicos, muchas veces estos impactos están interrelacionados entre ellos, estando también muy condicionados con aquellos.

IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico

¿Qué genera la contaminación?

ALTERACIÓN SUPERGÉNICA (METEORIZACIÓN): Alteración química y física de los minerales y rocas al quedar expuestos en la superficie terrestre. Los principales agentes responsables son el agua, el oxígeno del aire y la biota (sobre todo, microorganismos)

- Sustancias liberadas en la **alteración supergénica** de los minerales primarios extraídos, que quedan expuestos a la atmósfera y a la acción del agua
- Sustancias utilizadas en **procesos extractivos y metalúrgicos** (aceites, cianuro, mercurio, ácidos, etc.)



Depósito de amalgamación de oro con Hg (Andacollo, Chile)

IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico

¿Cuáles son los principales **agentes** que intervienen en la contaminación y en la **generación/dispersión/acumulación** de ésta?

GENERACIÓN/ACUMULACIÓN EN LA FASE SÓLIDA: Minerales primarios pueden liberar contaminantes cuando se alteran. Minerales secundarios como **óxidos*** de Fe, pueden retener contaminantes por adsorción y coprecipitación

- La fase sólida (reacción con el agua y la fase gaseosa, y acumulación de los contaminantes)
- El **agua** (reacción con los minerales, y transporte de los contaminantes)
- La fase gaseosa (reacción del oxígeno con minerales, y transporte de los contaminantes)



IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico

¿Cuáles son las principales **fuentes** de la contaminación?

CONTAMINACIÓN GEOGÉNICA:

Es generada por la propia existencia de depósitos minerales, aunque no exista actividad minera. Sin embargo, la excavación va facilitar la exposición (y por tanto, la meteorización) de la masa mineral

- El propio yacimiento mineral (al quedar expuesto a la atmósfera y el agua)
- Los depósitos de residuos:
 - Escombreras de estériles (roca de caja), de mena con poco mineral (baja ley)
 - Balsas de lodos
 - Escorias
- Las actividades e instalaciones de procesamiento metalúrgico:
 - Trituración y molienda (*chancado*) → polvo
 - Flotación, lixiviación, amalgamación → lodos, pilas, lixiviados
 - Tostación, fundición (hornos) → gases, escorias

IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico



Residuos de calcinación
(Mazarrón, España)



Escombreras de estériles
(Bustarviejo, España)

Trapiche (molino artesanal para
amalgamación con Hg, Andacollo, Chile)



IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico

Polvo en mina a cielo abierto (Radomiro Tomic, Chile)



Emisiones gaseosas en horno (Chuquicamata, Chile)

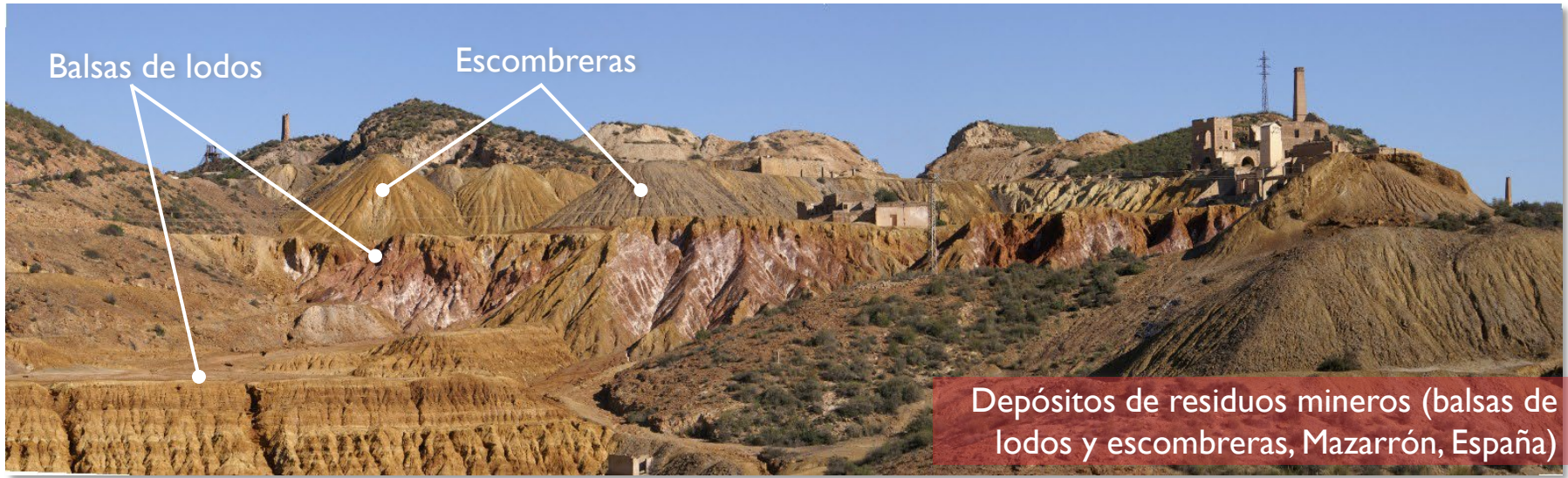
CONTAMINACIÓN GASEOSA:
Asociada a la emisión de partículas,
aerosoles, gases, radiación



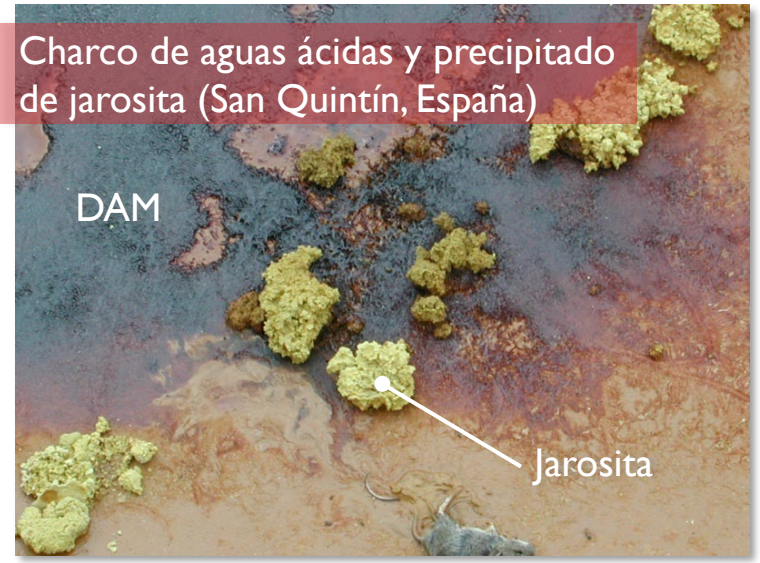
Aerosoles en cianuración (El Soldado, Chile)

IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico



CONTAMINACIÓN de SUELOS:
 asociada a la deposición de partículas,
 acumulación de vertidos, entrada de
 lixiviados y drenaje ácido (DAM)



IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico



Aguas ácidas subsuperficiales en lodos mineros (Monte Romero, España)



Drenaje ácido de mina (Mina Concepción, España)



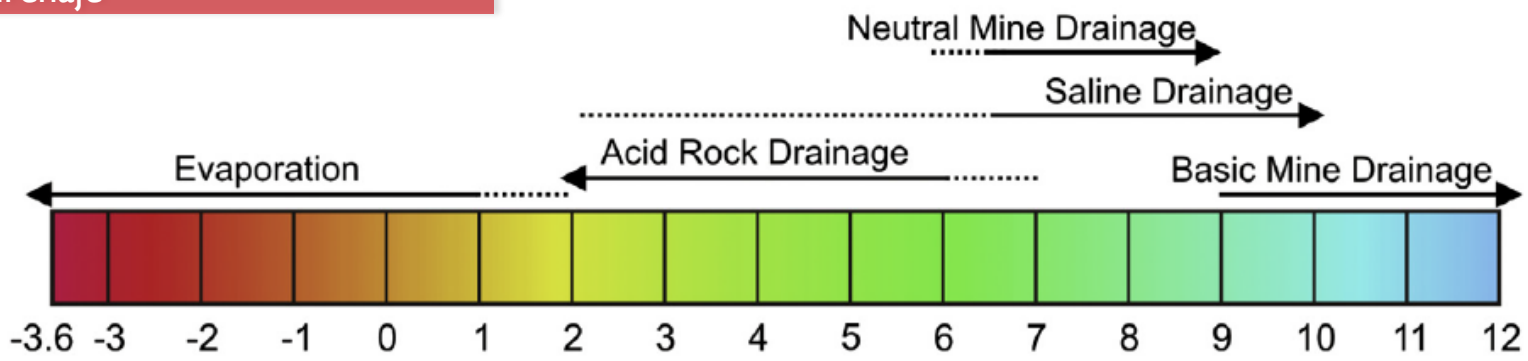
Lixiviados de cobre (Mina Sur Calama, Chile)

CONTAMINACIÓN de AGUAS:
 asociada a incorporación de
 sedimentos y coloides, entrada
 de lixiviados y drenaje ácido
 (DAM) ricos en metales pesados

IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico

Tipos de aguas mineras de drenaje



Typical drainage characteristics:

Acid Rock Drainage:

- acidic pH
- moderate to elevated metals
- elevated sulfate
- treat for acid neutralization and metal and sulfate removal

Neutral Mine Drainage:

- near neutral to alkaline pH
- low to moderate metals. May have elevated Zn, Cd, Mn, Sb, As or Se
- low to moderate sulfate
- treat for metal and sometimes sulfate removal

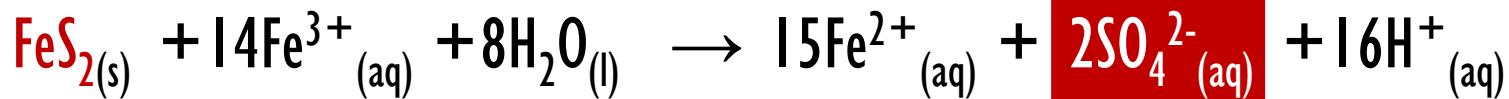
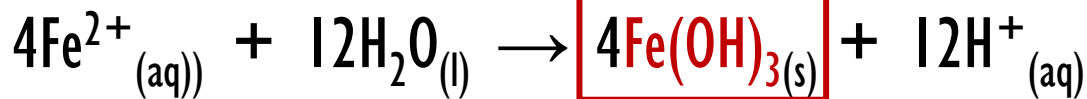
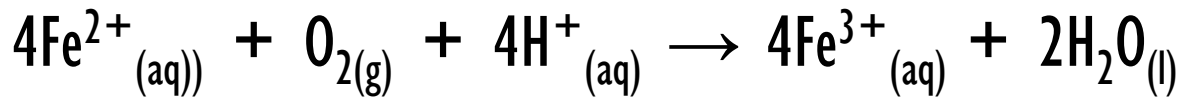
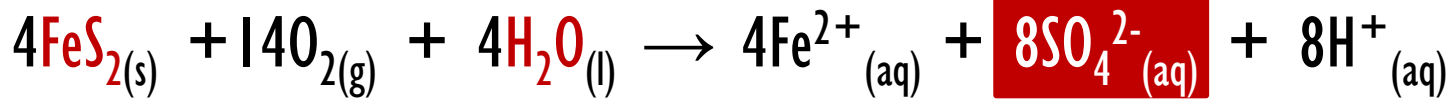
Saline Drainage:

- acidic to alkaline pH
- low metals. May have moderate Fe
- moderate sulfate
- treat for sulfate and sometimes metal removal

IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico

DRENAJE ÁCIDO DE MINA (DAM): se forman **aguas ácidas** por disolución oxidativa de la **pirita** (mineral sulfuro de hierro)

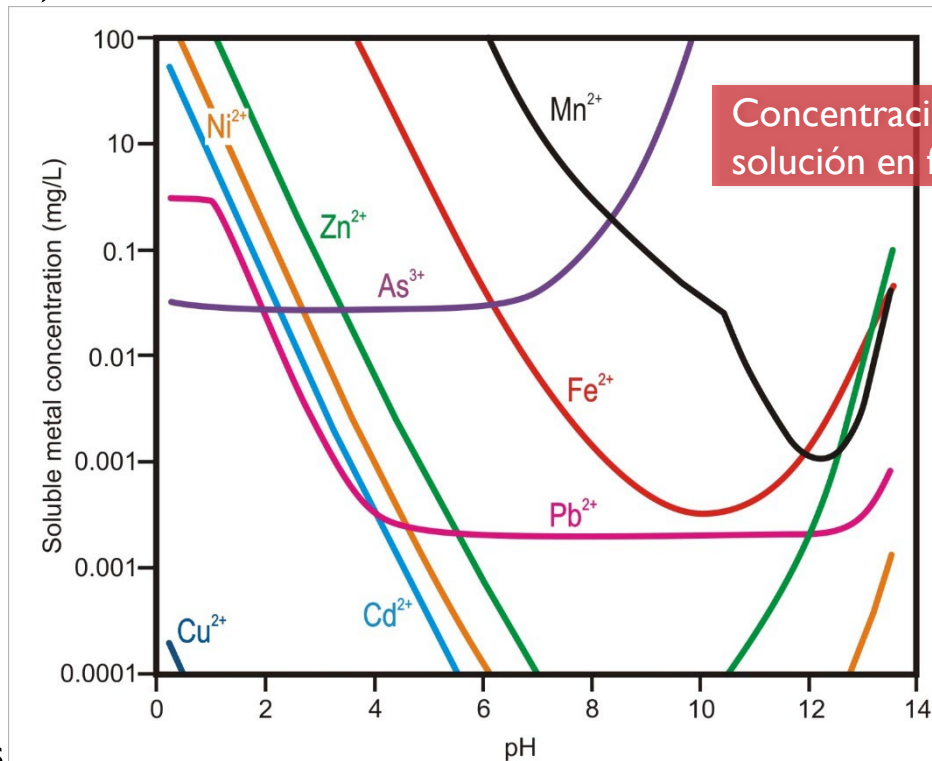


Dos agentes oxidantes: O_2 y Fe^{3+} Precipita hidróxido de Fe **“ferrihidrita”**

IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico

DRENAJE ÁCIDO DE MINA (DAM): con el descenso de pH, aumenta la **solubilidad de los metales** (hay excepciones como el Hg), y por tanto la movilidad de ellos al ser transportados por el agua ácida. Además de la contaminación, los suelos afectados sufrirán una acidificación

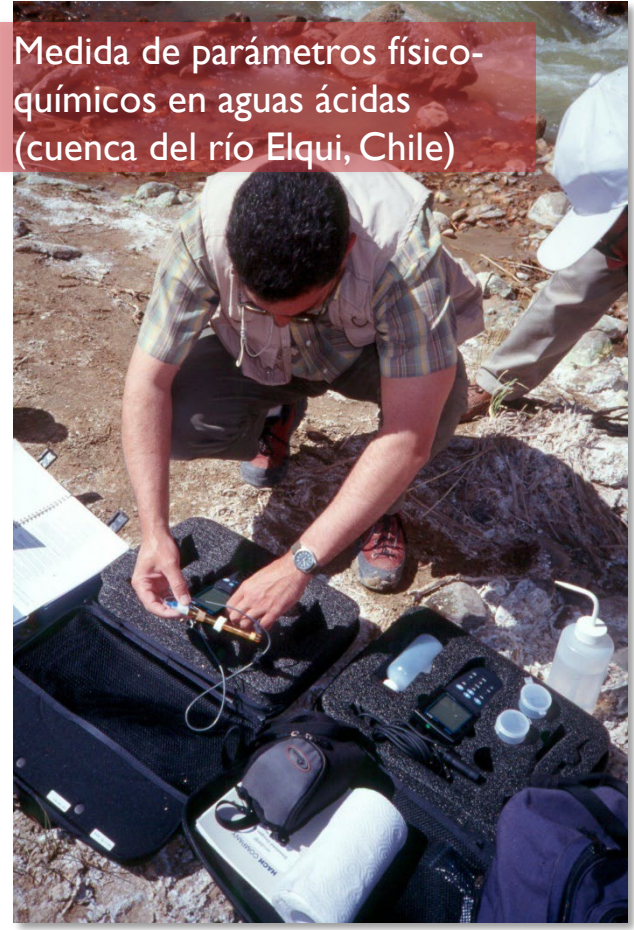


(Adaptado de Lewis, 2010 <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.06.010>)

IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico

DRENAJE ÁCIDO DE MINA (DAM): se puede identificar visualmente por el color “betadine” del agua y la presencia de precipitados (hidróxidos de Fe y sales), también mediante análisis con pHímetro (por su bajo pH) y conductímetro (por su alta carga de iones disueltos)



IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico

	Unidades	Rango	
pH		1,82 - 2,7	Composición de DAM en una mina de sulfuros (Riotinto, España)
Conductividad	$\mu\text{S.cm}^{-1}$	2,3 - 17,95	
As	mg.L^{-1}	0,23 - 1,54	
Cd	mg.L^{-1}	1,02 - 2,86	
Cu	mg.L^{-1}	84,42 - 643,3	
Fe	mg.L^{-1}	1.129 - 3.100	
Zn	mg.L^{-1}	50,9 - 1.494	
Mn	mg.L^{-1}	51,6 - 219,1	
SO ₄ ⁼	mg.L^{-1}	1.040 - 16.000	

(De la Torre et al. 2011 <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0510-1>)

IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico

Parameter	Units	Acid mine drainage		Acidic mine pit lakes		Límites Admisibles
		Average ^a	Extreme case ^b	Average ^c	Extreme case ^d	
pH	S.U.	2.7	0.82	2.6	1.2	
T	°C	21	16.5	23	24	
EC	mS/cm	7.9	-	5.3	55.6	
Eh	m	627	625	782	584	
DO	mg/L	3.8	-	7,6	0	
DO	% sat.	42	-	93	0	
SO ₄	mg/L	7.460	134.200	4.000	41.900	250
Na	mg/L	32	37	31	78	
K	mg/L	3	130	2	12	
Mg	mg/L	414	3.036	357	1.957	
Ca	mg/L	162	137	180	286	
Fet	mg/L	1.494	74,215 ⁽¹⁾	332	36.675	
Fe(II)	mg/L	801	40,600 ⁽²⁾	15	32.500	
Fe(III)	mg/L	476	28,630 ⁽²⁾	312	3.950	
Al	mg/L	386	7.556	123	1.919	0.05
Mn	mg/L	37	38	34	128	
Cu	mg/L	64	1.945	20	1.350	0.01
Zn	mg/L	169	1.096	31	6.670	0.12
As	µg/L	303	2.123	91	158.730	10
Cd	µg/L	490	13.759	102	18.020	0.25
Co	µg/L	3.413	2.447	1.100	18.689	20
Cr	µg/L	118	52	38	1.295	50
Ni	µg/L	1.063	3.220	656	5.214	20
Pb	µg/L	61	108	122	5.402	10
Th	µg/L	23	376	6		
Tl	µg/L	27	2.683	4		
U	µg/L	64	981	7		
V	µg/L	65	6.756	27		

Composición promedio de DAM en 25 minas de sulfuros de la Faja Pirítica (España)

IMPACTOS QUÍMICOS

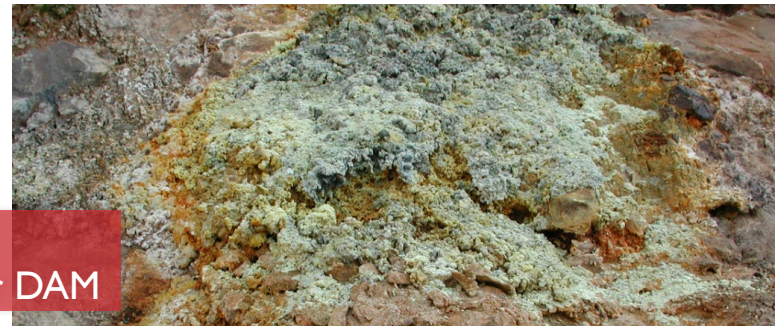
Impactos en el medio hidrológico

Aguas abajo de su origen, y con la distancia, el DAM experimenta una **atenuación** en la acidez y carga de contaminantes, debido a:

SECUENCIA DE ATENUACIÓN: La retención de metales en la fase sólida por coprecipitación y adsorción, asociada al ascenso del pH, sigue este orden:

$\text{Fe(III)} > \text{Pb} > \text{Al} > \text{Cu} > \text{Zn}$
 $> \text{Fe(II)} > \text{Cd}$

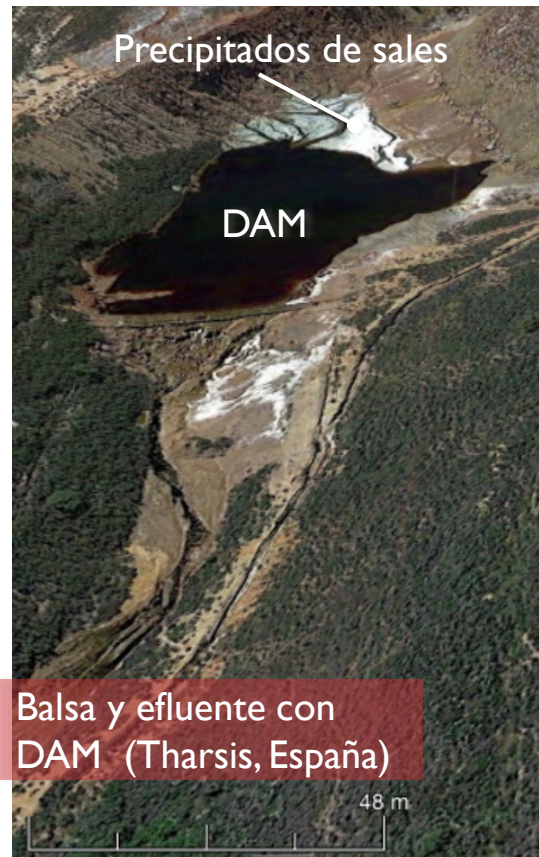
- **Dilución**, por mezcla con otras aguas más puras o menos contaminadas
- **Coprecipitación** en sales, hidróxidos, oxihidróxidos, óxidos
- **Adsorción** superficial en coloides y partículas de materia orgánica y minerales (hidróxidos, oxihidróxidos, óxidos, arcillas, etc.)



Precipitados de hidrosulfatos por DAM

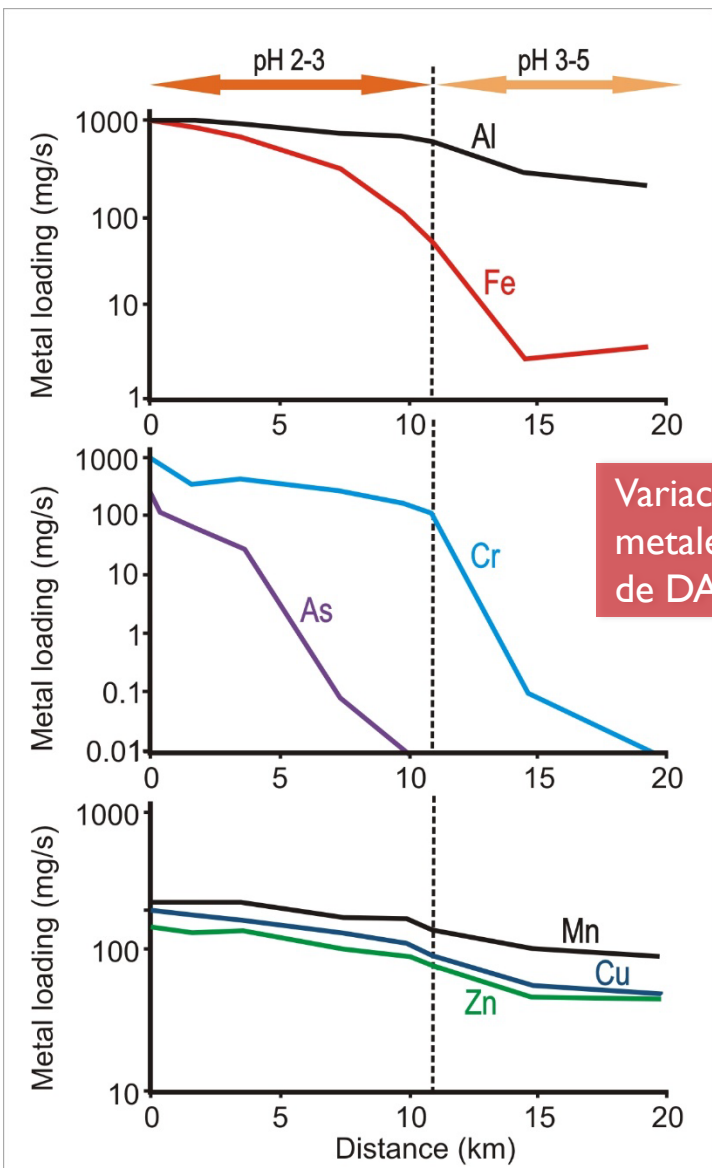
IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico



Balsa y efluente con DAM (Tharsis, España)

(Imagen de Google Earth, 2016)



Variación de la carga en metales del agua en un efluente de DAM (Tharsis, España)

(Adaptado de Sánchez España, 2008 http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_34.pdf)

IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico

Los principales mecanismos de extracción de metales pesados de las aguas van a ser la coprecipitación y la adsorción.

En la práctica, es muy difícil distinguir el mecanismo de retención del contaminante en la fase sólida, precipitación-coprecipitación *versus* adsorción, de ahí que muchas veces se utilice el término general de **adsorción**

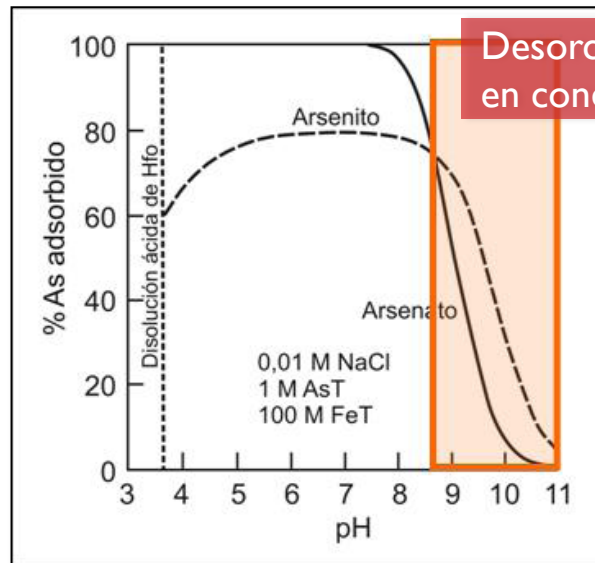


IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico

En la coprecipitación, el metal o metaloide queda incorporado en la estructura del mineral (para movilizarse de nuevo al agua, se requiere la disolución del mineral). En el caso de la adsorción quedaría más o menos fuertemente retenido en su superficie, pudiendo ser desorbido, si las condiciones del medio cambian (pH, concentración, competencia con otros iones, etc).

Tanto la coprecipitación/disolución como la adsorción/desorción son muy dependientes del **pH** y la abundancia de especies disueltas en el agua.



(Adaptado de Smedley y Kinniburgh, 2001)

IMPACTOS QUÍMICOS

Impactos en el medio hidrológico

La pérdida de calidad por carga en suspensión es la manifestación de la alta tasa de erosión que puede afectar a depósitos poco o nada consolidados. En este caso, la escorrentía superficial incorpora una carga de partículas, tanto por arrastre como en **suspensión**. En muchos casos, además se trata de partículas con una concentración elevada en metales pesados. Este impacto puede ser más acusado en los eventos extremos de precipitación.



Avenida en la rambla de Las Moreras (Mazarrón, España)

REFERENCIAS

Impactos en el medio hidrológico

REFERENCIAS:

Drahota, P., Filippi, M., Ettler, V., Rohovec, J., Mihaljevič, M., & Šebek, O. (2012). Natural attenuation of arsenic in soils near a highly contaminated historical mine waste dump. *Science of the Total Environment*, 414, 546-555. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.003>

Lewis, A. E. (2010). Review of metal sulphide precipitation. *Hydrometallurgy*, 104(2), 222-234. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.06.010>

Oyarzun, R., Higuera, P., & Lillo, J. (2011). Minería ambiental: una introducción a los impactos y su remediación. https://www.aulados.net/Libros_Aula2pontonet_GEMM/Libro_Mineria_MA.pdf

de la Torre, M. L., Grande, J. A., Graiño, J., Gómez, T., & Cerón, J. C. (2011). Characterization of AMD pollution in the river Tinto (SW Spain). *Geochemical comparison between generating source and receiving environment. Water, Air, & Soil Pollution*, 216, 3-19. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0510-1>

Sánchez España, J. (2008). Acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt: an overview with special emphasis on generation mechanisms, aqueous composition and associated mineral phases. *Macla: revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, (10), 34-43.

http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_34.pdf

LICENCIA DE USO

Impactos en el medio hidrológico

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

CC-BY-NC-SA This license requires that reusers give credit to the creator. It allows reusers to distribute, remix, adapt, and build upon the material in any medium or format, for noncommercial purposes only. If others modify or adapt the material, they must license the modified material under identical terms.

Impactos de la minería en el medio hidrológico by Javier Lillo is licensed under CC BY-NC-SA 4.0.

To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>

javier.lillo@urjc.es

