

## Tratamiento de aguas sulfatadas de origen superficial producidas por una mina de carbón a cielo abierto

Alan Campos-Sánchez  
Mayda Ulloa-Carcassés

### Resumen

El propósito de este estudio fue seleccionar el método más idóneo de tratamiento de aguas sulfatadas producidas por una mina de carbón a cielo abierto en Venezuela. Muestras de agua tomadas en superficie, medio y fondo de los cuerpos de agua, en tres áreas, fueron sometidas a análisis básico, gravimétrico, volumétrico y colorimétrico. Los resultados indicaron que el pH está en límites permitidos por las normativas ambientales vigentes, mientras los sólidos suspendidos totales, disueltos totales, totales y sulfatos superan los valores normados. Se seleccionó el método humedal aeróbico como el más eficiente para la remoción de sulfatos, en función de las características fisicoquímicas de las aguas sulfatadas provenientes de la mina y por ser sistemas que utilizan la energía natural para purificar el agua, su costo de construcción y mantenimiento es sensiblemente inferior a los tratamientos convencionales y porque, al ser réplicas de ecosistemas naturales, se integran al medio ambiente.

**Palabras clave:** tratamiento de aguas; aguas sulfatadas; sulfatos; mina de carbón; minería a cielo abierto.

## Treatment of sulphated water of surface origin produced by an open pit coal mine

### Abstract

The purpose of this study was to select the most suitable method of treatment of sulfated water produced by an open pit coal mine in Venezuela. Samples of water taken on surface, middle and bottom of water bodies in three areas were subjected to basic, gravimetric, volumetric and colorimetric analysis. The results indicated that the pH is within limits permitted by current environmental regulations, while total suspended solids, total dissolved solids, and sulfates exceed the normed values. The aerobic wetland method was selected as the most efficient for the removal of sulfates, depending on the physicochemical characteristics of the sulphated waters from the mine and because they are systems that use natural energy to purify water, its construction and maintenance costs are significantly inferior to the conventional treatments and because, being replicas of natural ecosystems, they are integrated to the environment.

**Keywords:** water treatment; sulfated waters; sulfates; coal mine; opencast mining.

## 1. INTRODUCCIÓN

El carbón mineral es una roca sedimentaria de color negro, de fácil combustión, que contiene más del 50 % en peso y más del 70 % en volumen de material carbonoso (incluida la humedad inherente). Se forma a partir de la compactación y el endurecimiento por calor y presión de restos de plantas químicamente alteradas y carbonizadas, durante el tiempo geológico (Guevara 2012).

Es un recurso de gran valor como fuente de exportación para producir energía. Sin embargo, su explotación descontrolada en minas a cielo abierto trae como consecuencia el deterioro de la reserva forestal y del recurso agua, indispensable para la supervivencia de los seres vivos. Al mismo tiempo, es una actividad industrial que por su alto impacto ambiental, social y cultural se considera insostenible, por definición, en la medida en que la explotación del recurso supone su agotamiento.

Este tipo de minería puede tener efectos contaminantes muy serios sobre las aguas superficiales y subterráneas, debido a que en la extracción del carbón mineral se utiliza agua y el drenaje de las mismas puede afectar el ecosistema y la vida acuática en los caños y ríos cercanos, por la generación de importantes cantidades de aguas sulfatadas.

Las aguas sulfatadas son originadas de manera natural. Cuando las rocas que contienen minerales sulfatados se extraen a cielo abierto o en vetas en minas subterráneas, estos materiales reaccionan con el aire o con el agua para formar ácido sulfúrico. El ácido lixivia la roca fuente mientras esté expuesta al aire y al agua. Este proceso se mantiene en el tiempo y puede durar cientos de años, hasta que los sulfatos sean extraídos completamente. El ácido es transportado desde la mina por el agua, las lluvias o por corrientes superficiales y, posteriormente, depositado en los estanques, arroyos, ríos, lagos y mantos acuíferos cercanos, degradando severamente la calidad del agua; además, puede aniquilar la vida acuática (Gamonal 2012).

Es así que los volúmenes de aguas empleados en el proceso productivo de las empresas carboníferas se transforman, por su carga de sulfatos y sólidos, en efluentes altamente contaminantes que producen efectos nocivos como sedimentación, daño a la biota en general (disminución de la población de peces y otros recursos vivos), eutrofización, daños a la salud humana y, principalmente, el deterioro de la calidad fisicoquímica y bacteriológica de los cuerpos de agua.

Por tales razones, esta industria debe garantizar el tratamiento adecuado de sus efluentes para mantener los parámetros de calidad del agua según el

uso que hacen de ella las comunidades en sus entornos, para lograr mantener los estándares y cumplir las normativas establecidos por las leyes ambientales.

La mina objeto de estudio se dedica a la exploración, producción, transporte y comercialización de este mineral. El yacimiento está constituido por más de veinte mantos de carbón explotables, con un espesor total mayor de treinta metros. Se explota a cielo abierto, bajo un sistema de fosa abierta. Es común la acumulación de agua en el fondo de mina, producto de la escorrentía de las lluvias, por lo que debe ser bombeada para continuar con el avance de la minería para poder alcanzar las metas de producción.

No obstante, antes de descargar estos efluentes en los ríos y caños cercanos, se deben someter a tratamiento para la eliminación de los elementos que lo contaminan, no solo para cumplir con ciertas especificaciones que regula el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MPPA), sino además, para mitigar el impacto ambiental producido con la finalidad de lograr la recuperación de los sistemas afectados y elevar los estándares de políticas ambientales de la empresa carbonífera.

Por esta razón, esta investigación tuvo como objetivo general seleccionar el método idóneo de tratamiento de aguas sulfatadas de origen superficial producidas por una mina de carbón a cielo abierto en la República Bolivariana de Venezuela.

La investigación se justifica en la necesidad de preservar las cuencas hidrográficas de los ríos, riachuelos y caños localizados en el área de influencia de la mina, los que constituyen fuentes de abastecimiento de los embalses de agua que abastecen a la ciudad y a varias comunidades campesinas de la zona de influencia de la mina

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

Se realizó una investigación de tipo descriptiva, exploratoria de campo, con un diseño no experimental. Se desarrolló a través de las siguientes etapas metodológicas:

### **2.1. Identificación de impactos ambientales**

A través de la bibliografía consultada (Conesa 1997; Canter 1998; Espinoza 2002), la observación directa y consultas a expertos, se determinaron las alteraciones más significativas ocasionadas por la minería a cielo abierto del carbón en función de los factores susceptibles de recibir impactos.

## **2.2. Determinación de los análisis básicos, gravimétrico, volumétrico y colorimétrico a los cuerpos de agua sulfatadas**

Los puntos de muestreo se ubicaron en las tres zonas en que se divide el área de estudio (zona 1, zona 2 y zona 3). Se tomaron muestras de agua en superficie, medio y fondo de los cuerpos de agua y se midieron parámetros, tanto en sitio como en laboratorio, atendiendo a las especificaciones de los exámenes fisicoquímicos realizados por el laboratorio seleccionado.

Para los análisis básicos, volumétricos, gravimétricos y colorimétricos de las muestras se emplearon los procedimientos descritos en el manual *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2005), que establece que el cálculo del ion sulfato se realiza por el método nefelométrico, mediante turbidímetro nefelométrico.

Los resultados obtenidos se compararon con los límites permisibles establecidos en la norma (Gaceta Oficial No 38.595 2007; Gaceta Oficial No 5.021 1995) y se clasificaron las aguas atendiendo a los niveles de calidad exigibles de acuerdo a los usos a que se destinen: aguas destinadas al uso doméstico y al uso industrial que requiera agua potable (Tipo 1); aguas destinadas al uso agropecuario (Tipo 2); aguas marinas o de medios costeros destinadas a la cría y explotación de moluscos consumidos en crudo (Tipo 3); aguas destinadas a balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia (Tipo 4); aguas destinadas para usos industriales que no requieren agua potable (Tipo 5); aguas destinadas a la navegación y generación de energía (Tipo 6); y aguas destinadas al transporte, dispersión y desdoblamiento de poluentes sin que se produzca interferencia con el medio ambiente adyacente (Tipo 7).

## **2.3. Análisis y selección del método más eficiente para la remoción del sulfato en aguas sulfatadas**

Para el análisis y selección del método más eficiente para la remoción del sulfato en aguas sulfatadas se emplearon los criterios de remoción según Guevara (2012), que considera los parámetros: sólidos suspendidos, DBO, DQO, nitrógeno, fósforo, patógenos y metales pesados. De igual manera, se tuvo en cuenta las limitantes establecidas por el Ministerio de Energía y Petróleo de la República Bolivariana de Venezuela, respecto a considerar en la selección, aspectos económicos, ambientales y socioculturales.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Identificación de los impactos ambientales

El drenaje proveniente de las aguas del proceso de extracción del carbón mineral produce degradación física, química y biológica sobre el hábitat y la vida acuática en los caños y ríos del área de influencia de la mina (Tabla 1).

Tabla 1. Principales impactos ambientales del sulfato en el agua

Aspecto	Relación
<b>Físico/Químico</b>	Procesos químicos que hacen que el azufre contenido en el carbón mineral contamine el aire, agua y la tierra
<b>Biológicos</b>	Alteración de la cuenca de los ríos del área de influencia
<b>Humanos</b>	Pauperización de indígenas y aborígenes

#### 3.2. Determinación de los análisis básicos, gravimétrico, volumétrico y colorimétrico a los cuerpos de agua sulfatadas

Las Tablas 2 y 3 muestran los parámetros que fueron medidos, tanto en sitio como en laboratorio, atendiendo a las especificaciones de los exámenes fisicoquímicos realizados por el laboratorio. Los resultados comparados con los límites máximos permisibles para aguas destinadas al uso doméstico y al uso industrial que requiera agua potable (Tipo 1) aparecen en la Tabla 4.

Tabla 2. Parámetros determinados en sitio a las aguas sulfatadas de origen superficial producidas por la mina de carbón a cielo abierto

Parámetros	Método selectivo	Norma asociada
pH	Electrodo selectivo	SMWW 4500-OG
Temperatura (°C)	Electrodo selectivo	SMWW 2550-B
Oxígeno Disuelto (mg/L)	Electrodo selectivo	SMWW 4500-NO2-B
Salinidad (%)	Electrodo selectivo	SMWW 2550-B
Conductividad (µmhos/cm)	Electrodo selectivo	SMWW 2550-B
Color Real (Uc-Pt-Co) (BN)	Comparación Visual	SMWW 2120-B
Sólidos Suspendidos Totales (SST, mg/L)	Gravimétrico	SMWW 2540-D
Sólidos Disueltos Totales (SDT, mg/L)	Gravimétrico	SMWW 2540-C
Sólidos Totales (ST, mg/L)	Cálculos	No aplica
Turbidez (NTU)	Turbidimétrico	SMWW 2130-B
Dureza (mg/L)	Volumétrico	SMWW 2340-C
DBO (mg/L)	Electrodo selectivo	SMWW 5210-B

DQO (mg/L)	Volumétrico	SMWW 5220-B
Aceites y Grasas (mg/L)	Gravimétrico	SMWW 5220-B
Hidrocarburos (mg/L)	Gravimétrico	SMWW 5220-B
Sulfuros (mg/L)	Volumétrico	SMWW 4500-S <sup>2</sup> -F
Fósforo total (mg/L)	Colorimétrico	SMWW 4500-P,B,E
Sulfatos (mg/L)	Turbidimétrico	SMWW 4500-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -E
Nitrógeno Total (mg/L)	Cálculos	No aplica
Nitratos (mg/L)	Colorimétrico	SMWW 4500-NO <sub>3</sub> -E
Nitrito (mg/L)	Colorimétrico	SMWW 4500-NO <sub>2</sub> -B

Tabla 3. Elementos determinados por el método de plasma inductivamente acoplado a las aguas sulfatadas producidas por la mina de carbón. Norma asociada: SMWW 3120-B

Elementos	
Aluminio (mg/L)	Sílice (mg/L)
Vanadio (mg/L)	Boro (mg/L)
Cinc (mg/L)	Cromo (mg/L)
Níquel (mg/L)	Calcio (mg/L)
Cobre (mg/L)	Potasio (mg/L)
Plomo (mg/L)	Manganeso (mg/L)
Arsénico (mg/L)	Magnesio (mg/L)
Cadmio (mg/L)	Hierro (mg/L)

Tabla 4. Comparación de los valores obtenidos en las tres zonas con los valores límites normados

Tipo de análisis	Parámetros	Superficie (0 m)	Medio (20 m)	Fondo (40 m)	Límite ambiental permisible
<b>Zona 1</b>					
Básico	pH	8,37	8,30	8,31	6-9
Gravimétrico	SST (mg/L)	4,00	<1,00	<1,00	80
Gravimétrico	SDT (mg/L)	7 712	7 676	7 736	---
Gravimétrico	ST (mg/L)	7 716	7 676	7 736	---
Colorimétrico	Sulfatos (mg/L)	6439,08	5812,83	5712,1	1 000
<b>Zona 2</b>					
Básico	pH	8,45	8,47	8,46	6-9
Gravimétrico	SST (mg/L)	4,00	<1,00	<1,00	80
Gravimétrico	SDT ( mg/L)	7 724	7 676	7 640	---

Gravimétrico	ST ( mg/L)	7 724	7 676	7 740	---
Colorimétrico	Sulfatos (mg/L)	5 824,08	5 387,87	5 600,35	1 000
<b>Zona 3</b>					
Básico	pH	8,45	8,47	8,46	6-9
Gravimétrico	SST (mg/L)	4,00	<1,00	<1,00	80
Gravimétrico	SDT ( mg/L)	7 932	7 374	7 374	---
Gravimétrico	ST ( mg/L)	7 932	7 374	7 374	---
Colorimétrico	Sulfatos (mg/L)	5 790	5 792	5 309	1 000

Tabla 5. Comparación de los datos obtenidos del análisis volumétrico de las aguas sulfatadas con lo establecido en el Decreto 883

Parámetros	Superficie (0 m)	Medio (20 m)	Fondo (40 m)	Límite permisible Decreto 883 Capítulo III. Sección III. Artículo 10
<b>Zona 1</b>				
<b>Dureza (mg/L)</b>	5 696	3 702	3 822	*
<b>DBO (mg/L)</b>	<2,0	<2,60	<2,60	60
<b>DQO (mg/L)</b>	5,88	5,88	6,86	350
<b>Zona 2</b>				
<b>Dureza (mg/L)</b>	3 361,84	3 742,32	3 742,32	*
<b>DBO (mg/L)</b>	<2,0	<2,60	<2,60	60
<b>DQO (mg/L)</b>	4,90	5,88	5,88	350
<b>Zona 3</b>				
<b>Dureza (mg/L)</b>	3 983,76	4 064,24	3 863,04	*
<b>DBO (mg/L)</b>	<2	<2	<2	60
<b>DQO (mg/L)</b>	5,39	5,88	6,84	350

En el análisis de los resultados se destacan los valores de las concentraciones de sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, sólidos totales y sulfatos, ya que estos son los de mayor interés por parte de la empresa carbonífera.

### 3.3. Análisis y selección del método más eficiente para la remoción del sulfato en aguas de minas de carbón

Las técnicas más usuales para la remoción de los sulfatos en minas de carbón a cielo abierto se localizan en los métodos terciarios o de remediación, que tienen como objetivo recolectar y tratar el drenaje contaminado. Estos métodos terciarios se dividen en tratamientos activos y pasivos.



La selección de las técnicas, sobre la base de lo planteado por Aduvire (2006) y Guevara (2012), se fundamentó en factores económicos y medioambientales y tomando en cuenta las ventajas y desventajas de los mismos. De igual manera, el Ministerio de Energía y Petróleo, organismo rector de la empresa carbonífera, estableció como condicionantes para la selección del método los aspectos económicos, ambientales y socioculturales.

Los resultados obtenidos permitieron determinar que el método terciario más indicado para el tratamiento de las aguas sulfatadas en la mina caso de estudio es el pasivo biótico, de tipo humedal aeróbico, debido a que son característicos para flujos superficiales y, a su vez, cumple con condiciones de mantenimiento y costo de construcción mínimas y garantiza la remoción de los contaminantes.

#### **4. DISCUSIÓN**

De la evaluación fisicoquímica de las muestras de agua y sedimento provenientes de los tres puntos de muestreo y su comparación con los límites máximos permisibles en las normas ambientales se obtuvo lo siguiente:

- Los valores de las concentraciones de SST (en superficie, medio y fondo) cumplen con los límites permisibles de la norma.
- El contenido de sulfatos no cumple con la normativa legal establecida.
- Todas las concentraciones de SST, SDT, ST y sulfatos, en las muestras evaluadas, se mantienen en rangos de valores elevados para un cuerpo de aguas que descarga en forma directa a ríos, embalses o lagos.
- El pH de las aguas sulfatadas tiene un valor de 8, cumpliendo con los límites establecidos en la ley.
- Las concentraciones de los elementos metaloides y no metaloides cumplen con los límites establecidos en la norma.

El método de humedal aeróbico es el método más eficaz a aplicar en las aguas sulfatadas de origen superficial, producidas en una mina de carbón a cielo abierto, para la remoción de sulfato, no solo por su utilidad en la captación o inmovilización de contaminantes, ya que involucra fenómenos como: floculación, precipitación, co-precipitación, sedimentación, filtración, absorción, adsorción, volatilización, complexación (formación de complejos), intercambio aniónico, intercambio catiónico, captación de nutrientes por

parte de las plantas y las reacciones de oxidación-reducción (Tabla 6), sino también por ser sistemas que utilizan la energía natural ambiental para purificar el agua, presenta costo de construcción y mantenimiento sensiblemente inferior a los tratamientos convencionales y por ser réplicas de ecosistemas naturales, se integran muy bien al medio ambiente y ofrecen una alternativa de alto valor ecológico y estético para el tratamiento de residuos.

Tabla. 6 Relación entre los principales parámetros fisicoquímicos y los mecanismos fisicoquímicos mediante los cuales se logra su remoción en un humedal

<b>Parámetros</b>	<b>Principales mecanismos de remoción</b>
Sólidos suspendidos	Sedimentación, precipitación y filtración
DBO y DQO	Sedimentación de materia orgánica, filtración, absorción, degradación microbiana (aerobia y anaerobia) ejercida principalmente por bacterias que crecen sobre la superficie de las plantas o que forman parte de las biopelículas (biofilms) del humedal
Nitrógeno	Amonificación, nitrificación, desnitrificación, volatilización, asimilación por parte de plantas y microorganismos
Fósforo	Absorción, precipitación (con aluminio, hierro, calcio...), adsorción, captación por parte de las plantas y microorganismos
Patógenos	Sedimentación y filtración, depredación, muerte natural, muerte por acción de la radiación ultravioleta, secreción de antibióticos desde las raíces de las plantas
Metales pesados	Absorción en las raíces de las plantas y detritos, sedimentación, precipitación, filtración

## 5. CONCLUSIONES

- Los principales impactos ambientales de la minería del carbón se manifiestan en la contaminación del aire, del agua y de la tierra debido a procesos químicos del azufre contenido en el carbón mineral, alteración de la cuenca del área de influencia de la mina y pauperización de indígenas.
- Los resultados obtenidos de la evaluación fisicoquímica de las aguas sulfatadas de origen superficial producidas por la mina de carbón a cielo abierto mostraron en los puntos de las zonas 1, 2 y 3 valores de Ph (en superficie, medio y fondo) de 8, cumpliendo así con los límites establecidos por la ley, de igual forma que los elementos metaloides y no metaloides; no obstante, las concentraciones SST, SDT, ST y

sulfatos (en superficie, medio y fondo) mantienen rango de valores elevados para un cuerpo de aguas que descargue de forma directa o indirecta a ríos, embalses o lagos.

- El análisis de los métodos de remoción de sulfatos permitió seleccionar como el más eficiente, en función de las características fisicoquímicas de las aguas sulfatadas provenientes de la mina, el de tipo de humedal aeróbico, no solo por su utilidad en la captación y/o inmovilización de contaminantes, sino también por ser sistemas que utilizan la energía natural para purificar el agua, presenta costo de construcción y mantenimiento sensiblemente inferior a los tratamientos convencionales y al ser réplicas de ecosistemas naturales se integran al medio ambiente.

## 6. REFERENCIAS

- ADEVIRE, O. 2006: Drenaje ácido de mina. Generación y tratamiento. Instituto Geológico y Minero de España. Disponible en: [http://info.igme.es/SIDIMAGENES/113000/258/113258\\_0000001.pdf](http://info.igme.es/SIDIMAGENES/113000/258/113258_0000001.pdf)
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th.
- CANTER, L. 1998: *Manual de evaluación de impacto ambiental. Técnicas para la elaboración de los estudios de impacto*. McGraw Hill, España.
- CONESA, V. 1997: *Guía metodológica para la evaluación de impacto ambiental*. 3 ed. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- DECRETO 883. Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos. *Gaceta Oficial de la República de Venezuela* No 5.021, Caracas, 11 de octubre de 1995.
- ESPINOZA, G. 2002: Fundamentos de evaluación de impacto ambiental. Banco Interamericano de Desarrollo, BID y Centro de Estudios para el Desarrollo, CED, Santiago, Chile.
- GAMONAL, P. 2012: Tratamiento de drenaje de ácidos de minas en humedales construidos. Disponible en: [www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid...84d0](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid...84d0)
- GUEVARA, A. 2012: Utilización de los humedales construidos en el tratamiento del drenaje ácido de minas. Disponible en: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7010/2/145088.pdf>
- LEY DE AGUAS. *Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela* No 38.595, Caracas, 2 de enero de 2007.

Alan Campos-Sánchez, [alantesiempre@gmail.com](mailto:alantesiempre@gmail.com)

Máster en Geología. Instituto Universitario de Tecnología de Maracaibo. Zulia  
Venezuela

Mayda Ulloa-Carcassés, [mulloac@ismm.edu.cu](mailto:mulloac@ismm.edu.cu)

Doctora en Ciencias Económicas. Profesora Titular

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba