

# Propuesta de tratamiento del agua subproducto de la pequeña minería extractiva de carbón en el municipio de Cucunubá, departamento de Cundinamarca, Colombia. Estudio de caso para la mina El Siral S.A.S.

Water treatment proposal to address the byproducts generated by artisanal and small-scale coal mining in the municipality of Cucunuba, department of Cundinamarca Colombia. Study case for El Siral S.A.S. mine

---

Castro Escandón María Alejandra, Pardo Urbano Daniela, Cortés O. William Giovanni

## Resumen



Las actividades extractivas de carbón generan impactos en el agua. Dichos impactos deben ser caracterizados, evaluados y controlados para la conservación de este recurso debido a su importancia. La actividad económica de extracción y comercialización del carbón, es de gran relevancia a lo largo del país, así como lo es en municipios del departamento de Cundinamarca, como Cucunubá, donde no se encuentran estudios enfocados en los efectos de la minería. Es por esto que el presente documento se enfoca en generar una propuesta de tratamiento para el agua subproducto de la actividad extractiva de carbón en la mina El Siral S.A.S, la cual se desarrolló mediante una caracterización del proceso minero en el área de estudio, la toma de muestras en dos puntos (tubo de salida de la mina, P1, y el reservorio, P2) para su posterior análisis

## Abstract



Coal mining activities have dramatic impacts on surface and groundwater. In order to preserve this valuable natural resource, impacts from these activities should be characterized, evaluated and mitigated. From an economical point of view, the extraction and commercialization of coal is of great importance throughout Colombia, specially in the department of Cundinamarca and its municipalities, which according to public and private records there are no indications that studies about the effects and impacts of coal mining had been performed in the area. For that reason, and in order to address the lack of studies in the area, this paper presents a proposal in order to treat the byproducts generated by the coal mining operations that take place at the El Siral S.A.S. mine. In order to perform this study, a mine drainage characteriza-

---

Recibido / Received: Marzo 07 del 2016 Aprobado / Approved: Abril 30 del 2016

Tipo de artículo / Type of paper: Investigación Científica y Tecnológica Terminada.

Afiliación Institucional de los autores / Institutional Affiliation of authors: Universidad El Bosque

Autor para comunicaciones / Author communications: William Giovanni Cortés O, cortesgiovanni@ubosque.edu.co

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés.

en el laboratorio de las características físicas y químicas; por último la determinación de los procesos unitarios necesarios para controlar los parámetros cuyas concentraciones excedieron o estaban en el límite, según los rangos de la Resolución 631 de 2015 del MADS. Los parámetros en los que se enfocó la propuesta de los procesos fueron: pH (P1:9,87 y P2:9,40) y sólidos suspendidos totales SST (P1:858,7 mg/L y P2:404,0 mg/L). Después de valorar los procesos unitarios consultados, se procedió a generar la propuesta final, que en el caso de los sólidos se estableció el uso de un filtro modificado y para la neutralización del pH la adición de óxido de fósforo (V).

**Palabras clave:** Tratamiento de agua, proceso de extracción de carbon.

tion took place at the output of the mine and the reservoir. This characterization revealed that pH (9.87 and 9.40) and the total suspended solids (TSS) (858.7 mg/L and P2: 404.0 mg/L) are above the regulations established by the Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) (Environmental and sustainable development ministry). After assessing the process, suggestions of a modified filter and adding phosphorus oxide (V) were made, in order to address the problems with TSS and pH respectively.

**Keywords:** Coal mining, Surface water. Ground water, mine drainage characterization

## Introducción

El estudio se enfocó en evaluar el impacto que tiene la minería de carbón en las fuentes hídricas, específicamente en el municipio de Cucunubá, Cundinamarca, debido a la importancia económica de esta actividad para el área de estudio y la poca información encontrada relacionada con este tema, es aquí donde nace la importancia de este trabajo, pues genera información específica que fortalece el proceso de toma de decisiones por parte de la mina, permitiendo prevenir, controlar y disminuir los impactos generados.

## Marco teórico

En este apartado se abordaran los conceptos requeridos para llevar a cabo la propuesta de tratamiento del agua subproducto de la minería de carbón; es así que el primero de ellos es calidad del agua; la cual se define como el grupo de concentraciones, especificaciones, sustancias orgánicas e inorgánicas y la composición y estado de la biota encontrada en un cuerpo de agua. La calidad del cuerpo de agua muestra variaciones especiales y temporales debido a factores internos y externos del cuerpo de agua. Se determina en función de una serie de parámetros físicos, químicos y biológicos [1].

Por otra parte la actividad específica es la extracción de carbón el cuál es una roca sedimentaria, de color negro a negro pardo, de fácil combustión. En general, su principal uso es en la producción de energía, pero el carbón también tiene aplicaciones industriales: es usado en calderas en la fabricación del cemento, papel, ladrillos, cerámica, vidrio, caucho; industria metalúrgica; ingenios de azúcar, entre otros, y como materia prima para la fabricación de pilas, lámparas de arco, aparatos eléctricos y carbón activado [2].

La minería como tal se define como una ciencia que incluye el uso de técnicas y actividades que tienen que ver con el descubrimiento y la explotación de yacimientos minerales. Estrictamente hablando, el término se relaciona con los trabajos subterráneos encaminados al arranque y al tratamiento de una mena o la roca asociada [2].

Uno de los parámetros del agua que condiciona su calidad es el pH; se define como el logaritmo negativo de la concentración de hidrogeniones:

$$pH = -\text{Log} [H^+] (1)$$

En el caso del agua el pH es de 7, que quiere decir que es una solución que presenta la misma cantidad de hidrogeniones que de grupos hidroxilos y se considera un pH neutro; si el pH presenta niveles inferiores será ácido y si presenta niveles superiores será básico [3].

De la misma manera, los sólidos suspendidos totales (SST) influyen en la calidad del agua impidiendo el ingreso de la luz solar, corresponde a la cantidad de material (sólidos) que es retenido después de realizar la filtración de un volumen de agua. Es importante como indicador puesto que su presencia, como se mencionó anteriormente, disminuye el paso de la luz a través de agua evitando su actividad fotosintética en las corrientes la cual es importante para la producción de oxígeno. Tienen un diámetro de aproximadamente  $5,0 \mu$  a  $1000 \mu$  [4].

Por último, el tratamiento del agua. Se puede clasificar por el tipo de proceso en [5]: procesos físicos los cuales buscan la remoción de material en suspensión empleando principalmente rejillas, trituradores, sedimentador primario, espesadores y filtración. Por otra parte, los procesos químicos implican la aplicación de productos químicos para la eliminación o conversión de los contaminantes, incluye precipitación, adsorción y desinfección y los procesos biológicos se llevan a cabo gracias a la actividad biológica de los microorganismos, con estos se realiza la eliminación de las sustancias orgánicas biodegradables presentes, eliminación del N y P y producción de gases.

## Metodología

El enfoque metodológico del proyecto fue mixto. Los datos sólo fueron recolectados una vez, haciéndolo de tipo transversal. Fue un estudio descriptivo ya que buscaba especificar las propiedades y características de un fenómeno, que en este caso fue el impacto que tiene la extracción de carbón en el agua [6].

El estudio se desarrolló mediante visitas de campo a la mina de estudio, que permitieron identificar el proceso de extracción del carbón y los puntos en que el agua es generada. Teniendo en cuenta esta información se procedió a realizar un muestreo, con el fin de caracterizar física y químicamente el agua subproducto de la mina, partiendo de los parámetros establecidos en la Resolución 631 de 2015. Este análisis se realizó en las

instalaciones de la Universidad El Bosque, durante el mes de julio y agosto del 2015. Luego se procedió a analizar los resultados obtenidos con el fin de explicar las posibles causas de la presencia o ausencia de los parámetros en los puntos de muestreo.

Actualmente, la mina cuenta con un sistema de tratamiento. Además se identificaron los puntos en los que el sistema de tratamiento y/o el reservorio, pueden influir en los resultados obtenidos en el laboratorio. Se procedió a realizar una revisión bibliográfica de los procesos unitarios necesarios para controlar los parámetros identificados. Dichos procesos fueron evaluados mediante la asignación de valores, con el fin de elegir la mejor opción de tratamiento, con base en cinco criterios establecidos, que abarcaron diferentes aspectos relevantes.

## Resultados, análisis y discusión

El proceso de extracción de carbón del Siral S.A.S. es manual ya que cada minero separa el carbón de la piedra con ayuda de un martillo neumático. Este martillo consiste en un brazo articulado que tiene una punta de aleación de acero de gran resistencia y dureza, que por medio de la aplicación de vibración a la roca, permite quebrarla en fragmentos de menor tamaño [2]. Al realizar esta operación se produce material particulado debido a los pequeños fragmentos de roca y carbón.

A medida que se va realizando la extracción, se perforan las paredes de los acuíferos, lo que provoca que el agua entre en contacto con el material extraído, por lo que es necesario bombearla al exterior de la mina. Para esto, se utiliza una bomba sumergible de 7.5 Hp (equivalente a 5592,8 W) y una manguera de 2 in (5,08 cm) de diámetro que llega al tanque (Figura 1) donde el agua es almacenada y tratada, y de allí llega al reservorio por medio de un tubo de 5,08 cm de diámetro y que tiene una longitud de aproximadamente 40 m (Figura 1).

Luego de la extracción se realiza el cargue del material con una pala y se deposita al coche que tiene una capacidad aproximada de 800 kg. Cuando es llenado, el coche por medio de unos rieles que van hacia el exterior y es impulsado por el malacate que está ubicado en una cabina en el exterior de la mina. El coche llega a la tolva, lugar donde se va almacenando el carbón y cuando se llena, se deposita en los camiones para transportarlo al centro de acopio.

**Figura 1.** Distribución en la mina El Siral S.A.S. Fuente: Mina El Siral, autores.



Fuente: Propia de los autores

Partiendo de la revisión bibliográfica del origen y las posibles causas de la presencia de los parámetros establecidos en la Resolución 631 de 2015, y el análisis del Hoja No. 209 Escala 1:100.000, del Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del departamento de

Cundinamarca [7], se identificaron parámetros que no eran necesarios analizar.

En la siguiente tabla se presentan los resultados del análisis de las muestras de los dos puntos (tubo de salida de la mina, P1, y el reservorio, P2):

**Tabla 1.** Comparación de resultados con la Resolución 631 de 2015

Parámetro	Unidades	Rango	Tubo salida mina		Reservorio	
			Valor	Cumple	Valor	Cumple
<b>Generales</b>						
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	9,87	No	9,40	No
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O2	150	31,1	Si	89,7	Si
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L O2	50	0	Si	-	-
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/L	50	858,7	No	404,0	No
Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	2	<0,1	Si	<0,1	Si
Fenoles	mg/L	0,2	0,10	Si	0,11	Si
<b>Compuestos de nitrógeno</b>						
Nitratos	mg/L	Análisis y Reporte	25	-	10	-
<b>Iones</b>						
Cloruros	mg/L	500	20,2	Si	20,0	Si
Sulfatos	mg/L	1200	1080	Si	1200	Si*
Sulfuros	mg/L	1	0	Si	0,02	Si

Parámetro	Unidades	Rango	Tubo salida mina		Reservorio	
			Valor	Cumple	Valor	Cumple
<b>Otros</b>						
Acidez Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	45	-	97,5	-
Alcalinidad Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	161	-	109	-
Color real	PCU	Análisis y Reporte	184	-	68	-
Dureza Cálctica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	21	-	27	-
Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	542	-	806	-
<b>No establecidos en la Resolución</b>						
Caudal	L/s			1,083		-
Conductividad	mS/cm		1,89	-	1,80	-
Olor	Umbral		4,67	-	3,67	-
Turbidez	NTU		33,5		5,9	
Sabor	°C		50	-	50	-
Salinidad práctica	ppt		1,17	-	1,10	-
Resistividad	mS/cm		0,000523	-	0,000552	-
Sólidos disueltos (multiparámetro)	mg/L		959	-	906	-
Sólidos disueltos	mg/L		956,00	-	938,67	-

Fuente: autores, Resolución 631 de 2015.

El pH obtenido tanto para el punto 1 el como 2 se considera básico, ya que éste está por encima por encima de 7. Además que los valores de pH registrados en el laboratorio son inferiores a los registrados en campo, así como los valores del punto dos son menores (menos básicos) al punto 1; esto se puede deber a que el pH puede variar por el intercambio de CO<sub>2</sub> del agua con el aire cuando se presentan largos intervalos entre la toma de muestra y la medición del pH, lo cual concuerda con los resultados obtenidos, ya que el pH en el laboratorio fue medido un día después del muestreo.

En este caso y de acuerdo con los rangos de pH obtenido (>8) se establece que la capacidad amortiguadora de la muestra se debe medir en función de la alcalinidad. La alcalinidad en aguas naturales se debe a la disolución de rocas calizas, ya que aportan bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos [8].

Los valores de alcalinidad en el punto 1 de muestreo corresponde a una alcalinidad alta ya que se encuentra entre los rangos de >150 mg/L CaCO<sub>3</sub>, mientras que la alcalinidad del punto 2 es moderada al ser un valor entre 75 – 150 mg/L CaCO<sub>3</sub> [9]. La disminución de los valores de alcalinidad del punto 2 con respecto al punto1 se puede deber al aumento de la concentración del CO<sub>2</sub> presente en el agua, proveniente tanto de la disolución del CO<sub>2</sub> atmosférico como de la oxidación de la materia orgánica, el cual reacciona con el agua y con el carbonato presente, generando iones hidrogeno, lo que acidifica el agua.

En cuanto los SST, pueden ser influenciados por las partículas de carbón. El alto valor obtenido para este parámetro se relaciona con los resultados de color, ya que este es causado por los SST, material coloidal y sustancias en solución [10].

Después de haber identificado los parámetros que excedían la norma, se procedió a realizar la evaluación de los procesos unitarios, con el fin de generar la propuesta. Para su calificación se tuvo en cuenta cinco criterios: calidad del agua, costo, remoción del contaminante, mantenimiento y complejidad a los que se les asignó un valor de acuerdo a su importancia, formulando la siguiente ecuación:

$$= 3CA + 3C + 2R + M + 2CO$$

Cada uno de los criterios fue calificado con una escala de 1 a 4, siendo 4 excelente y 1 malo.

Para el caso de los SST, se evaluaron 5 tipos de filtros: multimedia, de bolsas, filtro lento de arena, filtro modificado y de mallas o rejillas (Tabla 2). El filtro modificado (Figura 2) obtuvo la puntuación más alta con 44 puntos (Tabla 3) por sus características: su lecho filtrante está compuesto por piedras, gravillas y arena de río, material que también se conoce como “mixto” y es organizado de forma descendente (el grano con mayor diámetro se ubica al principio del tubo y el de menor diámetro, al final), que es por donde pasa el flujo de agua [11]. Estos lechos van dispuestos encima de un plástico que recubre la tierra en donde se realice la excavación.

**Tabla 2.** Valoración de indicadores para los diferentes tipos de filtración

Indicador	Tipo de filtro (ponderación)				
	Multimedia	De bolsas	Filtro lento de arena	Filtro modificado	Rejillas o mallas
Características del agua	3	4	2	4	4
Costo	2	2	3	4	3
Remoción del contaminante	1	4	4	4	4
Necesidades de mantenimiento	4	2	4	4	4
Complejidad	2	4	3	4	4

Fuente: autores, [11], [12], [13].

**Tabla 3.** Calificación total para los tipos de filtros

Tipo de filtración	Calificación total
Multimedia	25
De bolsas	36
Filtro lento de arena	33
Filtro modificado	44
Rejillas o mallas	41

Fuente: Propia de los Autores

Para neutralizar el pH se tuvo en cuenta 3 óxidos: Trióxido de azufre, óxido de fósforo (V), y dióxido de carbono, los cuales al entrar en contacto con el agua reaccionan generando iones hidrogeno, acidificando el agua. De acuerdo a la ecuación planteada se obtuvo que la opción más viable era el óxido de fósforo (V) el cual obtuvo 44 puntos. Algunas características a resaltar es que no adiciona iones al agua que puedan modificar su calidad, como en el caso del trióxido de azufre que adiciona iones sulfatos, así mismo el costo comparado con las otras opciones es inferior.

En la Figura 3. se muestra el sistema de tratamiento propuesto, conformado por el filtro modificado para el control de los sólidos suspendidos y la adición de óxido de fósforo (V) para la neutralización del pH.

Figura 2. Filtro modificado. Fuente: autores [11].

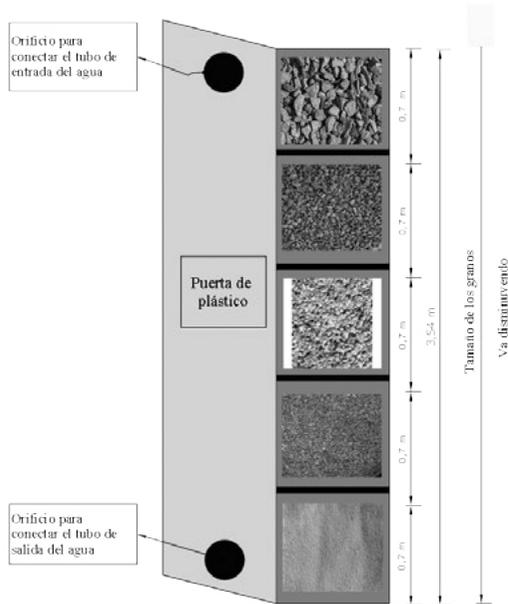
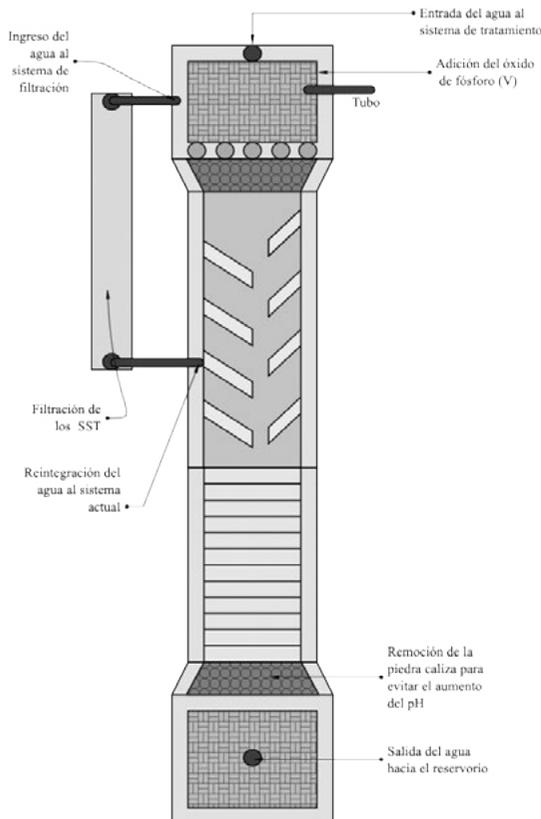


Figura 3. Sistema de tratamiento propuesto.



Fuente: autores

## Conclusiones

- El análisis del proceso de extracción del carbón en la mina El Siral S.A.S., permitió conocer que el agua sólo es extraída de los acuíferos que se encuentran a medida que se realiza la excavación y extracción del mineral, y que no cumple ninguna función dentro del proceso minero.
- Las características físicas y químicas del agua al salir de la mina cuyas concentraciones exceden o están cerca de exceder los rangos establecidos en la Resolución 631 de 2015 son: pH y SST.
- Como se demostró en la evaluación de los procesos unitarios, el sistema propuesto se caracteriza por no utilizar energía eléctrica, tener un mantenimiento manual y ser una de las alternativas más económicas, lo que lo hace viable teniendo en cuenta las necesidades de la mina.
- A partir de la caracterización del proceso de extracción de carbón de la mina El Siral S.A.S. y la evaluación de las características físicas y químicas de las muestras de agua tomadas, se generó la propuesta de tratamiento de agua que consiste en la adición de óxido de hierro (V) y la instalación del filtro modificado.

## Bibliografía

- [1] Ministerio de Minas y Energía, *Glosario Técnico Minero*, Bogotá, 2003.
- [2] J. M. A. Palacio y D. G. Martínez, «Técnicos Especialistas de Laboratorio Del Servicio Vasco de Salud-osakidetza,» Madrid, MAD, 2008, pp. 255-256.
- [3] Corponariño, «Corponariño,» 27 Septiembre 2002. [En línea]. Available: <http://corponarino.gov.co/modules/wordbook/entry.php?entryID=367>.
- [4] J. M. Lizarazo Becerra y M. I. Orjuela Guitierrez, «Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2013.
- [5] R. H. Sampieri, *Metodología de la Investigación*, México: McGraw Hill, 2010.
- [6] Instituto Geográfico Agustín Codazzi, «Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del departamento de Cundinamarca. Tomo II,» Bogotá, 2000.

- [7] SENA; Ministerio de Desarrollo Económico, «Programa de capacitación y certificación del sector de agua potable y saneamiento básico,» SENA, Bogotá, 1999.
- [8] V. Sneoeyink y D. Jenkins, Química del agua, México D.F: Limusa, 1990.
- [9] O. Delgadillo, A. Camacho, L. Pérez y M. Andrade, «Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales,» Cochabamba, Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua, 2010, p. 57.
- [10] M. O. O. Gutiérrez, Interviewee, Ingeniero ambiental y sanitario. [Entrevista]. 22 Octubre 2015.
- [11] Biraden, «Biraden,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.biraden.com.uy/division-filtracion-y-separacion/equipamiento/22-filtros-de-arena-filtros-de-carbon-activado-filtros-multimedia.html>.
- [12] METCALF & EDDY, INC., «Ingeniería de aguas residuales,» Aravaca, McGraw Hill, 1995, pp. 98, 283 - 289.

---

## Los Autores



### **Maria Alejandra Castro Escandón**

---

Estudiante X semestre de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería. Universidad El Bosque. Correo electrónico: [mcastroen@gmail.com](mailto:mcastroen@gmail.com).



### **Daniela Pardo Urbano**

---

Estudiante de Ingeniería Ambiental de X semestre de la Universidad El Bosque. Correo electrónico: [upardodaniela@gmail.com](mailto:upardodaniela@gmail.com).



### **William Giovanni Cortés Ortiz**

---

Licenciado en Química, Magister en Ciencias Ambientales y actualmente estudiante de Doctorado en Ingeniería Ciencia y Tecnología de Materiales; enfoca sus estudios en el tratamiento de aguas y aprovechamiento de residuos agroindustriales mediante procesos catalíticos, con el fin de conseguir materias primas útiles para la obtención de productos químicos de interés comercial.