

DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DEL PROCESO PRODUCTIVO Y DRENAJE MINERO EN LA EXPLOTACIÓN DE CARBÓN (SOCHA-BOYACÁ)

ARTÍCULO CIENTÍFICO

RECIBIDO: 15/09/2019 ACEPTADO: 15/03/2020 ÚLTIMA VERSIÓN: 15/07/2020

ENVIRONMENTAL DIAGNOSIS OF THE PRODUCTIVE PROCESS AND MINING DRAINAGE IN COAL EXPLOITATION (SOCHA-BOYACÁ)

¹ Paulina Alejandra Vergara Buitrago

Como citar este artículo: Vergara, P. (2020) Diagnóstico ambiental del proceso productivo y drenaje minero en la explotación de carbón (Socha- Boyacá) , revista Dynamikos 1 (2). Recuperado de:
<https://teinco.edu.co/wp-content/uploads/2021/07/Revista-Dinamicos-No2.pdf>

RESUMEN

Introducción: En los últimos años la minería ha representado unos de los factores más importantes para el crecimiento económico en Colombia, ha llegado a formar una de las tres locomotoras mineras de desarrollo del país, debido a la extraordinaria riqueza mineral presente en el territorio nacional. Esta actividad económica genera impactos sobre los recursos naturales y la salud humana, en los componentes bióticos y abióticos del ecosistema, posicionando al recurso hídrico como uno de los más afectados por la alteración en sus condiciones fisicoquímicas y biológicas, impactando fuentes hídricas. **Metodología:** Este proyecto realizó un diagnóstico ambiental del proceso productivo asociado al drenaje minero en la explotación de carbón de una mina del municipio de Socha (Boyacá), a partir de un estudio descriptivo de la problemática y datos de tipo cuantitativo obtenidos a partir de matrices ambientales y estudios de laboratorio. **Resultados:** Entre las principales problemáticas se observó la pérdida de cobertura vegetal en la zona, activación de procesos erosivos y afectación sobre las propiedades fisicoquímicas del agua. **Discusión y Conclusiones:** El drenaje ácido minero analizado cuenta con características no aptas de acuerdo a lo definido en la normativa ambiental colombiana, por lo cual se hace necesario implementar sistemas de tratamiento para estos vertimientos a fin de evitar la alteración sobre las condiciones fisicoquímicas y biológicas de los cuerpos hídricos en Socha.

PALABRAS CLAVE: Carbón, drenaje minero, impacto ambiental, medidas de manejo

ABSTRACT

Introduction: In recent years, mining has represented one of the most important factors for economic growth in Colombia, it has formed itself as one of the three mining locomotives of development in the country, due to the extraordinary mineral wealth present in the national territory. This economic activity generates impacts on natural resources and human health, on the biotic and abiotic components of the ecosystem, positioning the water resource as one of the most affected by the alteration in its physicochemical and biological conditions, impacting water sources. **Methodology:** This project carried out an environmental diagnosis of the production process associated with mining drainage in coal exploitation in the municipality of Socha (Boyacá), based on a descriptive study of the problem and quantitative data obtained from environmental matrices and Laboratory studies. **Results:** Among the main problems was the loss of vegetation cover in the area, activation of erosive processes and impact on the physicochemical properties of the water. **Discussion and Conclusions:** The acid mining drainage analyzed has unsuitable characteristics according to what is defined in Colombian environmental regulations, for which it is necessary to implement treatment systems for these discharges in order to avoid altering the physicochemical and biological conditions of water bodies in Socha.

KEYWORDS: Coal, environmental impact, management measures, mining drainage.

[CV] [ORCID] Gestora en investigaciones de la facultad de ingenierías. Fundación Universitaria Navarra, UNINAVARRA (Colombia). pa.vergara@uninavarra.edu.co Tr. 17 b N° 32 a 08, Tunja (Boyacá)
<https://orcid.org/0000-0002-3071-777X> índice h 2

Artículo traducido por Paulina Vergara (Gestora de investigaciones, Fundación Universitaria Navarra)

1. INTRODUCCIÓN

La actividad minera, como la mayor parte de las actividades que el hombre realiza para su subsistencia, crea alteraciones en el medio natural, desde las más imperceptibles hasta las que representan claros impactos sobre el medio en que se desarrollan. La minería una de las actividades más antiguas de la humanidad, consiste en la obtención selectiva de minerales a partir de la corteza terrestre (Oyarzun et al., 2011).

Colombia cuenta con una geología que facilita la producción y el desarrollo de la minería, disponiendo de una variada oferta de productos mineros, de gran escala como lo son el carbón y el níquel, y de menor escala como el oro, el platino, las esmeraldas, la caliza, la sal, la roca fosfórica, las arcillas, las arenas silíceas, los minerales de cobre y manganeso, la magnesita, la barita, el yeso y varios tipos de rocas ornamentales (Ministerio de Minas y Energía, 2003).

Sin embargo, es necesario prestar especial atención a la dimensión ambiental de la extracción minera, tener claridad sobre las acciones y mejores prácticas utilizadas por las empresas mineras, especialmente las de gran escala, lo cual permite entablar un diálogo con las comunidades y la sociedad sobre los riesgos de la extracción minera (FEDESARROLLO, 2012).

Aun cuando los impactos ambientales de la minería varían según el tipo de mineral y de mina, se trata de una actividad intrínsecamente insustentable, pues implica la explotación de un recurso no renovable mediante procedimientos destructivos o contaminantes, como la trituración, la molienda, el lavado, clasificación de los minerales, la refinación y la fundición. En la actualidad resulta doblemente destructiva por su gran escala y por la tecnología que ha acrecentado su capacidad productiva (Carrere, 2004).

Según, Wathern (1988), un impacto ambiental es el resultado de un cambio en un parámetro ambiental, que se produce durante un período especificado y dentro de un área definida, como resultado de una actividad en particular, en comparación con la situación que se habría producido si la actividad no se hubiera iniciado.

Cambios en los mercados internacionales del carbón han hecho que la extracción y transformación del mineral se multipliquen, que nuevos frentes de exploración y explotación surjan continuamente y que exista creciente interés asignación/adquisición de títulos mineros y por adelantar trámites de ambiental (Unidad Administrativa Especial de Gestión de Tierras Despojadas y ANM, 2015).

La actividad minera representa una fuente de empleo y riqueza para empresas nacionales e internacionales, pero a la vez constituye una gran amenaza para los ecosistemas estratégicos como el de páramo, un área que cada día gana mayor importancia regional como fuente de agua y vida para la población (Instituto de investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2008).

La resolución 631 de 2015 establece los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y los cuerpos de alcantarillado. Esta busca reducir y controlar las sustancias contaminantes que llegan a los ríos, embalses, lagunas, cuerpos de agua naturales o artificiales de agua dulce, y al sistema de alcantarillado público, para de esta forma, aportar al mejoramiento de la calidad del agua y trabajar en la recuperación ambiental de las arterias fluviales del país.

Los drenajes ácidos de minas (DAM), son el contaminante ácido y ferruginoso más impactante sobre los efluentes naturales de agua, es por ello que se caracteriza por ser el principal problema ambiental que tiene que enfrentar la minería mundial, debido a la naturaleza del contaminante, su extensión y dificultad de resolución (Pantoja, 2012). El Ministerio de Minas y Energía (2003), define las aguas residuales derivadas de fuentes o procesos industriales como cualquier elemento, sustancia o compuesto en estado líquido proveniente de cualquier actividad que pueda afectar al recurso agua, al suelo o al subsuelo en condiciones naturales. Llamadas también residuos industriales líquidos.

El drenaje de aguas de mina es un lixiviado producido por los estériles acumulados durante la extracción que provoca una alteración de las condiciones físico-químicas del agua. Los drenajes pueden clasificarse en función del pH (Lottermosser, 2007, basado en la clasificación de Morin y Hutt, 1997): Extremadamente ácida ($\text{pH} < 1$). Ejemplos extremos de acidez generados por reacciones de oxidación de sulfuros e hidrólisis. Las rocas están muy enriquecidas en pirita y los materiales amortiguadores de la acidez agotados. Ácida ($\text{pH} < 5.5$). Acidez generada por la oxidación de sulfuros ricos en hierro, comúnmente encontrados en metales básicos, oro y minas de carbón.

La oxidación de la pirita y de otros sulfuros es la fuente principal de hidrogeniones en las aguas de mina. Sin embargo, esta oxidación, además de promover la mencionada acidez, libera metales y sulfatos al agua acelerando el lixiviado de otros elementos. Como consecuencia, este drenaje ácido se asocia con la liberación de sulfato, metales pesados (Fe, Cu, Pb, Zn, Cd, Co, Cr, Ni, Hg), metaloides (As, Sb) y otros elementos (Al, Mn, Si, Ca, Na, K, Mg, Ba). Concretamente, cabe destacar las altas concentraciones de sulfatos ($> 1000 \text{ mg/l}$) y de Fe y Al ($> 100 \text{ mg/l}$), y en menor proporción de Cu, Cr, Ni, Pb y Zn ($> 10 \text{ mg/l}$) (Lottermosser, 2007).

De los distintos tipos de drenajes existentes, el drenaje ácido es el más común. El lixiviado producido es responsable de una disminución del pH y de un incremento en la concentración y contaminación de metales pesados como Fe, Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Hg y As. El drenaje ocurre cuando los sulfuros metálicos (especialmente pirita, Fe_2S) quedan expuestos a las condiciones físico-químicas existentes en la superficie terrestre, es decir, al aguay al oxígeno atmosférico, dando lugar a una serie de reacciones que generan este drenaje (Paktunc, 1999).

Por tanto, la pirita permanecerá en estado reducido mientras no exista una perturbación que modifique la condición anaeróbica en la que se encuentra en el sustrato (Gray, 1997). Mientras que, si los sulfuros son expuestos en superficie, entonces, son oxidados produciendo un agua ácida cargada de sulfatos, metales pesados y metaloides (Lottermosser, 2007).

Según el último censo minero de las 14.357 unidades de producción minera (UPM) censadas en Colombia, el 18% están ubicadas en Boyacá, siendo el departamento con más UPM en el país (Ministerio de Minas y Energías, 2012). Sin embargo, la operación de la actividad minera carece de estrategias de planificación que permitan el desarrollo sostenible de la misma. Por otro lado, los bajos índices de formalidad para el desarrollo de proyectos disminuyen el potencial de aprovechamiento y valorización de los minerales con los que cuenta el departamento (Suarez, 2018).

La actividad minera produce impactos significativos en el ambiente, uno de los recursos afectados directamente es el hídrico por la contaminación a la cual es expuesto en razón a la inexistencia de un tratamiento efectivo de aguas residuales mineras. En la quebrada el Tirque, el río Sopaga, el río Gachaneca y la quebrada el Salvio que corresponden la cuenca del río Chicamocha en Boyacá se registró elevadas concentraciones de plomo, hierro y, en algunos casos, mercurio y aluminio por encima de los límites permisibles en zonas con influencia de actividades minera (Agudelo et al., 2016).

Las aguas provenientes de la actividad minera son una de las mayores fuentes de contaminación y deterioro de la calidad de estas, por esto se hace importante realizar un análisis de las fuentes hídricas que reciben aguas residuales minerales, estos análisis traerán un beneficio en la parte ambiental, ya que se preverán impactos generados por los metales pesados y otros compuestos presentes en ella, y a su vez determinar la mejor opción de tratamiento para estas aguas teniendo en cuenta que éstas fuentes son abastecedoras del recurso hídrico para las poblaciones.

Las evaluaciones ambientales buscan minimizar los impactos que se generan sobre el medio ambiente y los recursos naturales, con el fin de identificar estrategias como el tratamiento de aguas residuales mineras, a fin de evitar la alteración sobre las propiedades fisicoquímicas del agua, ya que los efluentes mineros son vertidos sobre cuerpos de agua. Razón por la cual, es necesario crear condiciones paisajísticas a través del establecimiento de especies nativas con el propósito de recuperar la cobertura vegetal, brindar hábitat a diferentes especies, y ofrecer un espacio ambientalmente apropiado.

En el departamento de Boyacá, se han generado problemas ambientales relacionados con la contaminación de fuentes hídricas, por lo cual este proyecto estuvo orientado al diagnóstico del proceso productivo y drenaje minero de carbón en una mina del municipio de Socha, partiendo de la identificación de impactos ambientales y posterior caracterización fisicoquímica del drenaje ácido para así poder plantear alternativas de solución, a fin de cumplir la normativa actual y buscar el desarrollo de un proyecto minero ambiental sostenible, que logre la preservación y conservación del medio ambiente.

2. METODOLOGÍA

Material y métodos El estudio fue realizado en el municipio de Socha, vereda el Mortiño, en una explotación amparada dentro de un contrato de concesión minera y con aprobación de un plan de manejo ambiental.

El enfoque del estudio fue de tipo descriptivo, con datos de tipo cuantitativo. Con el estudio descriptivo se busca conocer las situaciones, características o distribución de un fenómeno en una población en un momento de corte en el tiempo, el caso de estudios que describen la presencia de un determinado factor ambiental (Veiga et al., 2008).

El instrumento técnico utilizado se basó en listas de chequeo y matrices de identificación de impactos ambientales, empleando técnicas de valoración cualitativa (García, 2015), se valora de forma subjetiva, aunque el resultado obtenido sea numérico, una serie de cualidades de los impactos de cada una de las alternativas, asignando valores prefijados según esa cualidad sea alta, media baja, además se empleó técnica de observación directa con el fin de visualizar directamente área de estudio.

Proceso de caracterización del proyecto minero:

Fase I: Revisión de información en las oficinas de la autoridad ambiental competente Corpoboyacá y la Agencia Nacional Minera, para identificar las características del proyecto minero desde el punto de vista ambiental y minero.

Fase II: Visita de campo a fin de evidenciar el proyecto, aplicación de instrumentos de identificación de impactos ambientales.

El instrumento técnico a utilizar para la identificación y evaluación de impactos, se basó en listas de chequeo y matrices de evaluación de impactos ambientales, empleando técnicas de valoración cualitativa y cuantitativa (Conesa, 2010), de igual forma por medio de la observación directa se analizó el área de estudio.

De acuerdo a Toro (2009), en el proceso de construcción de una propuesta metodológica genérica para estudios de impacto ambiental en Colombia incorporó los índices de importancia de la actividad y de importancia de la vulnerabilidad ambiental, permitiendo valorar el impacto ambiental total que puede producir un proyecto en el contexto colombiano. De esta manera, se logra aumentar el nivel de objetividad en el momento de evaluar el impacto que una determinada acción puede causar sobre un determinado factor.

1. Identificación de impactos significativos en una matriz de doble entrada tipo Leopold con las acciones y factores ambientales.

2. Determinación del nivel de significancia del impacto, calificando de manera cualitativa la magnitud y la importancia. **Fase III:** Toma y análisis de muestras de aguas con afectación de vertimiento minero: los análisis fisicoquímicos de las aguas residuales mineras, se llevaron a cabo en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), en el cual se analizaron (pH, color, turbiedad, conductividad, dureza total y hierro total), para lo cual se tomaron 10L de agua residual minera. Además, se toman muestras para ser analizadas por el laboratorio Analizar Laboratorio Físicoquímico Ltda. certificado por el IDEAM, en el cual se analizaron (pH, conductividad, sólidos suspendidos totales, hierro total, sulfatos, DBO5, DQO y grasas y aceites), donde analizo la muestra antes y después del tratamiento minero de tanques, con el fin de identificar la efectividad del este tratamiento.

Fase IV: Interpretación de resultados y planteamiento de recomendaciones. En este proceso, se generaron apreciaciones críticas de la experiencia de trabajo y se proponen acciones constructivas al respecto.

3. RESULTADOS

A través de las actividades humanas se consume y contamina el agua; con el aumento de la población mundial, se espera que estas actividades se intensifiquen y que la demanda por agua continúe aumentando en las próximas décadas (Rosegrant y Rigler, 2000).

Colombia es uno de los 10 países con mayor disponibilidad de recurso hídrico en el mundo (World Wide Fund for Nature, 2012), sin embargo, el aumento de las actividades económicas y de la población lo ponen en riesgo, especialmente en ciertas regiones áridas y semiáridas, en las cuales se vienen presentando problemas, como la contaminación de aguas superficiales, la disminución en los caudales y el deterioro de las aguas subterráneas (Ministerio de Medio Ambiente e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010).

La pérdida de la cobertura vegetal, contaminación de suelos, subsidencias y activación de procesos erosivos constituyen impactos identificados en el proyecto minero del municipio de Socha (Tabla 1). Los residuos peligrosos como grasas, solventes y aceites deben ser manejados con especial cuidado para evitar el contacto con fuentes hídricas subterráneas.

Tabla 1. Identificación de impactos ambientales situación actual

Actividad	Efecto	Impacto	Registro fotográfico
Mantenimiento de la maquinaria en el área minería	Alteración visual del paisaje	Disminución de flora y fauna del lugar	 Figura 1. Residuos peligrosos
Generación de residuos (plantas, grasas y aceites, repuestos)	Contaminación suelo	Pérdida de condiciones de cobertura del lugar	
Extracción del mineral	Inestabilidad del subsuelo Alteraciones geomorfológicas	Activación de procesos erosivos en superficie Presencia de subsidencias	 Figura 2. Residuos de estériles
Disposición de estériles	Pérdida de cobertura vegetal y de hábitats terrestres Cambio de las condiciones físico químicas y biológicas del suelo	Desplazamiento de especies faunísticas Pérdida de fertilidad	

Fuente: Completamente generada por el autor, 2020.

Para la lubricación del malacate se está utilizando aceite quemado, el cual salpica por fuera de la caseta de aislamiento, generando así la disposición inadecuada de un residuo peligroso que produce pérdida de la cobertura vegetal y de fertilidad del suelo. Además, al realizar disposición de estériles generados de la explotación minera, se están ocasionando cambio en las condiciones fisicoquímicas y biológicas.

Con los resultados obtenidos de las matrices de identificación se ponderan los principales impactos encontrados (Tabla 2) y se plantean medidas de manejo ambiental tendientes a prevenir, controlar, mitigar, corregir y/o compensar los impactos ambientales que se generan en las diferentes etapas del proyecto minero (Cely, 2013).

Tabla 2. Matriz de evaluación de impactos ambientales

Actividad	Efecto	Impacto	Registro fotográfico
Transporte de mineral desde el socavón hacia la superficie	Derriame de grasas y/o aceites Contaminación del suelo por residuos peligrosos Contaminación en el aire Contaminación auditiva	Pérdida de cobertura vegetal Pérdida de fertilidad del suelo Emisión de gases de efecto invernadero de combustión Incremento en decibeles por uso de maquinaria	 Figura 3. Aceites del malacate
Vertimientos mineros	Alteración en la calidad de agua de la quebrada el Tirque Contaminación del suelo	Disminución de oxígeno disuelto en la quebrada Alteración de las propiedades fisicoquímicas del agua Cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo Disminución de la fertilidad del suelo	 Figura 4. Tanques de tratamiento
Mantenimiento y limpieza de la mina	Alteración visual del paisaje Contaminación del suelo	Pérdida de fertilidad del suelo Pérdida de condiciones de cobertura del lugar	 Figura 5. Residuos de hojas secas

Fuente: Completamente generada por el autor, 2020.

	FACTOR AMBIENTAL	IMPACTO AMBIENTAL	Vertimientos mineros														
			I n	E X	M O	P E	V R	S I	A C	E F	P R	R B	P O	I A P	V ul	ImpP ro	ImpTo tal
GEOFORMAS	Geomorfología	Activación de procesos erosivos en su superficie	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	20	20	3.9	13.6
		Presencia de subsidencias	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	20	20	3.9	13.6
PAISAJE	Visibilidad	Alteración de calidad visual del paisaje	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	20	20	3.9	13.6
	Estructura	Cambio en el relieve	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	20	20	3.9	13.6
	Fisionomía	Cambio composición floral vegetal original	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	20	20	3.9	13.6
SUELO	Uso	Conflicto de uso del suelo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	20	20	3.9	13.6
	Fertilidad	Cambios en las propiedades físico-químicas del suelo	4	2	2	2	2	2	4	4	2	4	0.5	40	40	19.0	31.6
		Disminución de la fertilidad del suelo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	20	20	3.9	13.6
AGUA	Caudales	Alteración en lo volúmenes de caudal	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	20	20	3.9	13.6
	Aguas superficiales	Disminución de oxígeno disuelto en la quebrada	4	2	2	2	2	2	4	4	4	4	0.5	80	80	20.0	56.0
	Aguas subterráneas	Alteración de las propiedades físico-químicas del agua	4	2	2	2	2	2	4	4	4	1	0.5	80	80	18.5	55.4
	Patrones de drenaje	Alteraciones dinámicas de aguas subterráneas	4	2	2	2	2	2	4	4	4	4	0.5	80	80	20.0	56.0
ATMÓSFERA	Calidad del aire	Emisión de gases de efecto invernadero	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	20	20	0.0	12.0
	Ruido	Incremento de decibeles por uso de maquinaria	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	20	20	0.0	12.0
FLORA	Coberturas vegetales	Pérdida de condiciones de cobertura del lugar	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	40	40	3.9	25.6
	Composición vegetal	Disminución de flora	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	20	20	3.9	13.6
	Diversidad vegetal	Perdida de especies vegetales	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	20	20	3.9	13.6
FAUNA	Diversidad fauna	Disminución de fauna	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	20	20	3.9	13.6
	Cadenas alimenticias	Desplazamiento de especies faunísticas	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	40	40	3.9	25.6
	Hábitat	Modificación de hábitats	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	20	20	3.9	13.6
	Población	Desplazamiento de especies faunísticas	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	40	40	3.9	13.6
	Hidrofauna	Alteración de los hábitats acuáticos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.1	40	40	1.3	24.5
COMUNIDAD	Población	Arribo de población flotante	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.1	20	20	1.3	12.5
	Ocupación del territorio	Alteración de los espacios naturales	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.1	20	20	1.3	12.5
	Bienestar social	Cambio en las prácticas culturales	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.1	20	20	1.3	12.5
CULTURA	Uso y manejo del entorno	Cambio en las condiciones naturales del entorno	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.1	20	20	1.3	12.5
ECONOMÍA	Sistemas productivas	Activación económica en la zona	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.1	20	20	1.3	12.5
	Sistema extractivos	Incremento de tráfico y deterioro del bienestar de la población	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.1	20	20	1.3	12.5
	Empleo	Generación de empleo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.1	20	20	1.3	12.5

Fuente: Completamente generada por el autor, 2020.

Tabla 3. Rangos de calificación de los impactos ambientales en la metodología cualitativa

	Irrelevante	0<1<25
	Moderado	25<1<50
	Severo	50<175
	Crítico	1<75

Fuente: Adaptado de Autor a partir de la referencia, Año de publicación

Los impactos clasificados como severo, están relacionados con el recurso hídrico, disminución de oxígeno disuelto en la quebrada, alteración de las propiedades fisicoquímicas del agua y alteraciones dinámicas de aguas subterráneas. La minería junto a ríos es algo catastrófico para el acuífero, ya que destruye la comunicación hidráulica del sistema río-acuífero-río, al desaparecer las aguas confinadas en la zona donde se desarrolla la explotación (Contraloría General de la República, 2014).

Análisis de laboratorio: Se realizaron análisis de las características fisicoquímicas del efluente minero, los resultados obtenidos se contrastaron con los valores máximos permisibles presentados en la Resolución 2115 de 2007, por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano y Resolución 631 de 2015, por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

En la Tabla 4 Resultados aguas residuales mineras analizadas en el laboratorio de la escuela de Ingeniería Ambiental de la UPTC (Tabla 4).

Tabla 4. Características fisicoquímicas agua residual minera

Parámetro	Valores permisibles (Resolución 2115 de 2007)	Muestra	Expresadas como	Método
pH	6.5 a 9.0	6.86	Unidades	SM 4500-H-B
Conductividad	1000	2730	(µS/cm)	2510 B. Laboratory Method
Hierro	0.3	80	mg/L Fe	Espectrofotométrico phenantrolinaEPA W.N
Dureza total	300	390	mg/L CaCO ₃	SM 2340 C.EDTA Método titulométrico

(Fuente: Completamente generada por el autor, 2020.)

El valor del potencial de hidrogeno pH, se encuentra dentro del rango establecido por la norma, sin embargo, la conductividad con 1730 µS/cm, el contenido de hierro 79.7 mg/L y dureza total 90 mg/L CaCO₃ se encuentran por fuera del rango permitido en la norma.

Se realizó la prueba de jarras a fin de determinar las condiciones óptimas de funcionamiento para el tratamiento de las aguas residuales mineras, este método permite establecer alternativas químicas relacionadas con las dosis de floculante a emplear.

Para realizar el montaje se empleó el policloruro de aluminio como floculante y la cal para ajustar el pH. La dilución del policloruro de aluminio, se preparó con 10 gr de esté diluidos en agua destilada en un balón volumétrico de 100 ml hasta aforar y cal al 1% de concentración A cada jarra se le agregó 1L de muestra de agua residual sin tratar. Los valores de pH obtenidos en cada una de las jarras se ajustan al rango establecido de (6.5 a 9.0) (Tabla 5).

Tabla 5. Prueba de jarras

Prueba jarras	(ml Cal)	(ml dilución policloruro de Al)	pH
1	2	30	6.58
2	3	40	6.60
3	3	50	6.59
4	3	60	6.55
5	3	70	6.46
6	3	80	6.45

Fuente: Completamente generada por el autor, 2020.

Para tratar el agua residual minera generada en el proyecto minero, las dosis de la jarra 6: 3ml Cal y 80 ml de policloruro de Al, constituyen una guía ya que los valores en color fueron de 10.685 UPC, resultado inferior al máximo aceptable establecido por la norma (15 UPC) y la turbiedad próxima al valor máximo permisible de 2 UNT (Tabla 5).

Tabla 6. Resultados de color y turbiedad en cada jarra

Característica	Turbiedad	Color
Cruda	146	151.06
1	11.3	11.7
2	11.2	11.09
3	8.03	10.48
4	7.7	15.37
5	9.07	12.31
6	2.05	10.65
Unidades	UNT	UPC
Valor máximo	2	15
Método	EPA W.N	Espectrofotométrico

Fuente: Completamente generada por el autor, 2020.

Para calcular la concentración de cal diluida que se empleó en la jarra 6, despejamos la concentración de solución diluida en la fórmula de concentración $C1V1=C2V2$, donde:

V1= volumen de solución cal

C1=concentración solución original cal

V2= volumen de muestra

C2=concentración solución diluida

$C2 = (C1V1) / V2$

$C2 = (10\text{gr/L} \cdot 0.003\text{L}) / 1\text{L}$

$C2 = 0.03\text{gr/L cal}$

Al medir la concentración de hierro en la jarra 6 se obtuvo un valor de 13mg/L Fe, disminución del 83.75%, comparado con el valor obtenido en el vertimiento minero de 80 mg/L Fe, sin embargo, el valor no cumple con lo definido por la norma.

Estudios realizados en la cuenca carbonífera el Bierzo muestran que las zonas cercanas a los focos de contaminación tienen una concentración mayor de metales que el tramo fluvial tomado como control o punto limpio (Herrero, 2014).

A continuación, se presentan los resultados aguas residuales mineras a la salida de la manguera y después del sistema de tratamiento analizadas en el laboratorio Analizar Laboratorio Físicoquímico Ltda. (Tabla 7).

Tabla 7.

Parámetro	Valores permisibles (R. 2115 de 2007 / R. 613 de 2015*)	Efluente minero	Después del sistema de tratamiento	Expresadas como	Método
pH	6.5 a 9.0	6.65	7.5	Unidades	SM 4500-H+B
Conductividad	1000	2160	397	($\mu\text{S}/\text{cm}$)	SM 2510 B
Hierro total	0.3	13.7	0.2	mg/L Fe	SM 3500-Fe
Sólidos suspendidos totales	50*	79	9.24	SST mg/L	SM 2540 D
Sulfatos	250	1166	152.83	mg/L SO_4^{-2}	SM 4500- SO_4^{-2} E
DBO ₅	50*	4	2	mg/L O_2	SM 5210 B
DQO total	150*	23	11.89	mg/L O_2	SM 5220 D
Grasas y aceites	10*	5.27	5.27	mg/L AyG	mg/L AyG

Fuente: Completamente generada por el autor, 2020

El pH en el vertimiento minero fue de 6.65 Unidades y después del sistema de tratamiento de 7.5 Unidades, aumentando en 0.85 Unidades, que representa un aumento del 12.78%, sin embargo, el valor se encuentra dentro de los rangos establecidos por la norma. Los valores obtenidos para conductividad en el drenaje minero correspondieron a 2160 mS/cm, y después del sistema de tratamiento de 397 mS/cm, se disminuyó 1763 mS/cm, lo cual representa una remoción del 81.62%, cumple con lo definido por la norma de 1000 mS/cm.

El hierro total a la salida de la manguera fue de 13.7 mg/L Fe y después del sistema de tratamiento de 0.2 mg/L Fe, bajo 13.5 mg/L Fe, que representa una remoción del 98.54%, se encuentra dentro de los valores establecidos por la normatividad. Los sólidos suspendidos totales a la salida de la manguera fueron de 79 SST mg/L y después del sistema de tratamiento de 29 SST mg/L, bajaron 50 SST mg/L, que representa una remoción del 63.29%, se encuentra dentro del valor máximo permisible definido.

Los sulfatos a la salida de la manguera fueron de 1166 mg/L SO_4^{-2} y después del sistema de tratamiento de 152.83 mg/L SO_4^{-2} , disminuyeron 1013.17 mg/L SO_4^{-2} , que representa una remoción del 86.89%, se encuentran dentro del valor máximo definido. La DBO₅ del efluente minero fue de 4 mg/LO₂ y posterior al sistema de tratamiento 2 mg/LO₂, bajo 2 mg/LO₂, que representa una remoción del 50%, cumple con el valor máximo permisible definido.

La DQO a la salida de la manguera fue de 23 mg/LO₂ y después del sistema de tratamiento de 11.89 mg/LO₂, bajo 11.11 mg/LO₂, que representa una remoción del 48.30%, cumple con lo definido por la norma. Para el ensayo de grasas y aceites, el agua de drenaje minero presente en los 2 puntos de muestreo resultados <5.27, cumplen con el valor máximo permisible definido por la norma.

El drenaje ácido del proyecto minero muestra valores por fuera de los límites permisibles con respecto a la norma frente a conductividad, hierro total y sólidos suspendidos totales, razón por la cual se hace necesario complementar el sistema de tanques con un tratamiento físicoquímico, con el fin de no alterar las características de los cuerpos de agua próximos a la mina.

La explotación de minerales frecuentemente origina reacciones químicas. Los que entran en contacto con el agua como la piritita y otros minerales inestables de azufre presentes en los estériles de los yacimientos, generando un proceso acelerado de oxidación, que da como resultado final la acidificación del agua (Ministerio de Minas y Energía y Ministerio del Medio Ambiente, 2015). De acuerdo al estudio realizado por Agudelo et al., (2015), en la quebrada el Tirque del municipio de Socha se encontraron niveles elevados de aluminio.

Es de vital importancia atender las afectaciones ambientales que genera la minería de carbón, debido a que muchas de estas pueden ser de carácter irreversible para el medio ambiente, dado que no se le está dando el tiempo necesario a los ecosistemas para recuperarse y volver a su estado inicial, generando que los entes territoriales deban invertir en la recuperación de estos ecosistemas (Leguizamón y Ruiz, 2019).

Los resultados obtenidos en la matriz de identificación de impactos y evaluación de impactos sirven para la realización del manejo ambiental de la mina, cuya ejecución se realiza a través de las fichas que se definen a continuación (Tabla 8), los proyectos mineros adaptarán y precisarán las fichas que considere pertinentes de acuerdo al proceso de gestión ambiental y que consideren mejor implementar.

Tabla 8. Programas de manejo ambiental planteados.

Programa	Nombre del subprograma
Programa de manejo de suelos	Subprograma Gestión de Residuos Industriales
Programa de manejo del mineral y estériles	Subprograma Manejo de la estabilidad del suelo
Programa de manejo de residuos industriales	Subprograma manejo de aguas residuales mineras
Programa de manejo del recurso hídrico	Subprograma de manejo del mineral
Programa de protección y conservación paisajístico, de especies vegetales y faunísticas	Subprograma de protección y conservación paisajístico, especies vegetales y faunísticas

Fuente: Completamente generada por el autor, 2020.

Estos programas tienen como objetivo, prevenir y controlar los hundimientos del terreno ocasionados por la apertura de túneles y por el deficiente manejo de aguas superficiales y subterráneas, adoptar las medidas de disposición adecuada del mineral extraído en las actividades de explotación, para la prevención, mitigación y corrección de los impactos ambientales asociados e implementar un manejo adecuado de los residuos industriales que se generan del mantenimiento de la maquinaria en el área minería y demás actividades (llantas, grasas y aceites, repuestos).

Así como, garantizar el adecuado manejo de las aguas que han entrado en contacto con los yacimientos de carbón, patios de acopio y estériles, con el fin de prevenir el deterioro que pueda causar al ambiente y cumplir con los parámetros establecidos por la legislación nacional vigente, así como fomentar una cultura de valorización de los servicios ambientales y de la conservación de las áreas protegidas estableciendo mecanismos de control que promuevan el uso racional de las especies vegetales evitando la afectación y uso de bosques naturales.

Los programas de manejo ambiental contienen las medidas agrupadas por fichas, dirigidas a prevenir, controlar, mitigar, corregir y/o compensar los impactos ambientales que se generan en la etapa de explotación del proyecto minero sobre los componentes socioeconómico, geológico, hídrico, paisaje y biótico del área de estudio del proyecto.

Estas fichas consideran las acciones para desarrollar y la tecnología que se debe utilizar, de acuerdo con las interrelaciones de las actividades con el ambiente. Su estructuración tiene en cuenta aspectos como los requisitos legales, los impactos ambientales y su grado de afectación, así como la vinculación de la comunidad para lograr un adecuado manejo de dichos impactos.

Según, Suarez (2018), el departamento de Boyacá posee una gran riqueza ambiental que está inmersa en un proceso creciente de demanda de recursos naturales. Es el caso de los recursos mineros, que marcan uno de los sectores más importantes en la economía del departamento y el país, aun cuando sus sistemas de explotación y aprovechamiento en la mayoría de los casos, carecen de tecnificación y formalidad.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

de las mayores fuentes de contaminación y deterioro de la calidad de estas, por esto se hace importante realizar un análisis de las fuentes hídricas que reciben aguas residuales minerales, estos análisis traerán un beneficio en la parte ambiental, ya que se preverán impactos generados por los metales pesados y otros compuestos presentes en ella, y a su vez determinar la mejor opción de tratamiento para estas aguas teniendo en cuenta que éstas fuentes son abastecedoras del recurso hídrico para las poblaciones.

Se identificaron impactos ambientales en superficie entre los más notorios se encuentran: pérdida de condiciones de cobertura del lugar, activación de procesos erosivos en superficie y alteración de las propiedades fisicoquímicas del agua entre otras. Se presenta el fenómeno subsidencia o hundimiento del suelo debido a las excavaciones de galerías, túneles, extracciones mineras y extracción de agua subterránea realizadas, lo cual ocasiona una pérdida en el volumen del suelo, afectación de los drenajes y cambios en el curso de las corrientes.

El deterioro del recurso hídrico, representa un problema de gran relevancia en la actualidad, teniendo en cuenta que existen diferentes causas que han originado este problema y que estas en la mayoría de los casos no son identificadas a tiempo para poder realizarles algún control, se deben analizar las características del agua contaminada con el fin de tratarlas de manera adecuada.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, a través de la Vicerrectoría de Investigaciones y Extensión, con el proyecto "Análisis del impacto ambiental ocasionado por proceso productivo y drenaje minero en explotación de carbón" Al Grupo de Investigación Sostenibilidad Ambiental, Biodiversidad y Agroecología - UPTC. Así como a los miembros de la comunidad de Socha.

REFERENCIAS

- Agudelo, C., Quiroz, L., García, J. C., Robledo, R., y García-Ubaque, C. A. (2016). Evaluación de condiciones ambientales: aire, agua y suelos en áreas de actividad minera en Boyacá, Colombia. *Revista de Salud Pública*, 18, 50-60. 10.15446/rsap.v18n1.55384
- Carrere, R. (2004). Minería, impactos sociales y ambientales, Montevideo, MMBT/Oxfam/UICN Recuperado de: http://wrm.org.uy/es/files/2013/04/Mineria_Impactos_sociales_y_ambientales.pdf
- Castellanos, A., y Ruíz, J. (2019). Impactos ambientales de la minería de carbón sobre el recurso hídrico en el departamento de Boyacá. *Boletín Semillas Ambientales*, 13(2), 24-35.
- Cely, A. (2013). Formulación del plan de manejo ambiental en la mina cochinillos (Samacá – Boyacá). (Trabajo de pregrado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C.
- Conesa, V. (2010). Guía metodológica para la evaluación el impacto ambiental, Bilbao, Ediciones Mundi Prensa.
- Contraloría General de la República. (2014). Minería en Colombia: Daños ecológicos y socio-económicos y consideraciones sobre un modelo minero alternativo. Imprenta Nacional de Colombia: Bogotá D.C.
- FEDESARROLLO. (2012). Impacto socioeconómico de la minería en Colombia. Recuperado de: <https://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/375>
- García, L. (2015). Metodologías para desarrollar estudios de impacto ambiental. Recuperado de: <http://www.gestiopolis.com/metodologias-para-desarrollar-estudios-de-impacto-ambiental/>
- Gray, N. (1997). Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Environmental geology*, 30(1-2), 62-71. <https://doi.org/10.1007/s002540050133>
- Herrero Barrero, T. (2014). Impacto de los drenajes ácidos en los ecosistemas acuáticos producidos por la minería del carbón en El Bierzo: bioacumulación de metales pesados y evolución de las comunidades biológicas. (Tesis doctoral). Universidad de León, España.
- Instituto Alexander von Humboldt. (2008). Estudio sobre el estado actual del macizo del páramo de Rabanal en: Proyecto Páramo Andino.
- Lottermoser, B. (2007). Mine Wastes. Characterization, Treatment, Environmental impacts. Second edition. Springer. 304 p. En: Barrero, H. (2014). Impacto de los drenajes ácidos en los ecosistemas acuáticos producidos por la minería del carbón en el Bierzo: bioacumulación de metales pesados y evolución de las comunidades biológicas. Universidad de León.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 631 de 2015. Publicado en el Diario Oficial No 49.486 de 18 de abril de 2015. Colombia.
- Ministerio de Medio Ambiente e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). Estudio nacional del agua. Bogotá D.C., Colombia. Pp. 256.
- Ministerio de Minas y Energía. (2003). Glosario Técnico Minero. Recuperado de: <http://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/glosariominero.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía. (2012). Censo minero departamental (2010-2011). Bogotá D.C.
- Ministerio de Minas y Energía, y Ministerio del Medio Ambiente. (2015). Guía minero ambiental, explotación. Recuperado de: <http://www.simec.gov.co/Portals/0/Documental/1161.pdf>
- Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Resolución 2115 de 2007. Publicado en el Diario Oficial No 46.679 de 4 de julio de 2007. Colombia.
- Morin, K Hutt, N. (2001). Environmental geochemistry of minesite drainage: Practical theory and case studies, Digital Edition MDAG Publishing, British Columbia.
- Oyarzun, R., Higuera, P., y Lillo, J. (2011). Minería ambiental: una introducción a los impactos y su remediación. Manual. Ediciones GEMM-Aula2punto.net. Recuperado de: <https://eprints.ucm.es/14046/>
- Paktunc, A. (1999). Characterization of mine wastes for prediction of acid mine drainage. In *Environmental impacts of mining activities* (pp. 19-40). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Pantoja, E. (20112). Aplicación de la electrocoagulación y floculación sobre el tratamiento del drenaje ácido de minas de carbón (trabajo de pregrado). Universidad del Valle, Cali.
- Rosegrant, M., y Ringler, C. (2000) Impact on food security and rural development of transferring waterout of agriculture, *Water Policy* 1(6): 567-586. En: Cuantificación y análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca del río Porce (trabajo de maestría) Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Pp. 13.
- Suárez, S. (2018). Zonificación ambiental para la planificación de la operación minera en el Departamento de Boyacá (trabajo de Maestría). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja.
- Toro, J. (2009). Análisis constructivo del proceso de evaluación de impacto ambiental en Colombia. Propuestas de mejora (tesis doctoral). Universidad de Granada, Granada, España.
- Unidad Administrativa Especial de Gestión de Tierras Despojadas y Agencia Nacional de Minería. (2015). Cartilla Minera, Bogotá. D.C.
- Veiga de Cabo, J., De la Fuente, E., y Zimmermann, M. (2008). Modelos de estudios en investigación aplicada: conceptos y criterios para el diseño. *Medicina y seguridad del trabajo*, 54(210), 81-88.
- Wathern, P. (1988). Environmental Impact Assessment. Theory and Practice. (P. Wathern, Ed.). London: Taylor and Francis Group. ¿En qué se diferencia un impacto de un aspecto ambiental? Recuperado de: <http://eia-un.blogspot.com/>
- World Wide Fund for Nature. 2012. Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica Bogotá D.C., Colombia. Pp. 48.