

**EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS Y LAS
CONCENTRACIONES DE METALES PESADOS EN EFLUENTES DE UNA
ZONA DE EXPLOTACIÓN DE MINERÍA ARTESANAL DE ORO EN EL
DEPARTAMENTO DE BOLÍVAR: ESTRATEGIAS DE TRATAMIENTO DE
EFLUENTES**

RAYMUNDO NICOLÁS GUERRERO CORDERO

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES
SUE CARIBE
UNICOR
2020**

**EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS Y LAS
CONCENTRACIONES DE METALES PESADOS EN EFLUENTES DE UNA
ZONA DE EXPLOTACIÓN DE MINERÍA ARTESANAL DE ORO EN EL
DEPARTAMENTO DE BOLÍVAR: ESTRATEGIAS DE TRATAMIENTO DE
EFLUENTES**

RAYMUNDO NICOLÁS GUERRERO CORDERO

Trabajo de grado presentado en la modalidad de trabajo de investigación, como
requisitos para optar al título de Magister en Ciencias Ambientales.

DIRECTOR

JOSÉ LUÍS MARRUGO NEGRETE

Doctor en Ciencias Químicas

Grupo de investigación en aguas Química Aplicada y Ambiental

CODIRECTOR

JOSÉ JOAQUÍN PINEDO HERNÁNDEZ

Magíster en Ciencias Ambientales

Grupo de Investigación en Aguas Química Aplicada y Ambiental

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES
SUE CARIBE
UNICOR
2020**

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Montería, Abril de 2020

El presente trabajo investigativo lo dedico a Dios, por darme fuerza y dedicación para continuar en este proceso de obtener uno de mis anhelos más deseados.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por ser mi guía y acompañarme en el transcurso de mi vida, brindándome paciencia y sabiduría para culminar con éxito mis metas propuestas.

A mis padres Raymundo y Yolanda quienes con su amor, apoyo incondicional y esfuerzo durante toda mi vida me han forjado como una persona de bien; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este.

A mi amada esposa Juana por estar acompañándome siempre en todo este proceso con su amor, paciencia y comprensión y por ese optimismo que siempre me impulso a seguir adelante.

A mis hijos Emil José y Ray de Jesús por ser mi fuente de motivación e inspiración para poder superarme cada día más y así poder luchar para que la vida nos depare un futuro mejor.

A mis hermanas Karen y Norma a mis sobrinos Karelys, Kaleth y Karol quienes me han brindado apoyo, amor y comprensión en mi vida.

A la universidad de Córdoba, departamento de postgrado por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría.

A aquellas grandes personas que hacen posible el conocimiento en las aulas de clase, los excelentes profesores del programa de maestría y todas las personas que contribuyen de una y otra forma para cumplir con este logro

Al Dr José Luis Marrugo por sus conocimientos invaluable que me fueron de gran ayuda para llevar a cabo esta investigación, y sobre todo su gran paciencia para esperar a que este trabajo pudiera llegar a su fin y a los pares evaluadores por las valiosas contribuciones que hicieron al final; fortaleciendo esta investigación.

TABLA DE CONTENIDOS

	Pag
RESUMEN	10
ABSTRAC	12
INTRODUCCIÓN	14
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 Minería	16
2.1.1 Tipos de minería	17
2.1.1.2 Minería subterránea	18
2.1.1.3 Minería de superficie	18
2.1.1.4 Minería a cielo abierto	18
2.2. MINERÍA DE ORO EN COLOMBIA	19
2.3 Impactos Ambientales	20
2.3.1 Agua	20
2.3.2 Aire	22
2.3.3 Suelos	22
2.4 Impactos debido a los procesos de extracción	24
2.4.1 Impactos por amalgama	24
2.4.2 Impactos por cianuración	24
2.5 MARCO LEGAL	25
2.5.1 Límites máximos permisibles	29
2.6 Contaminantes generales en la minería	30
2.6.1 Metales pesados y lixiviación	30

2.6.2	Drenaje ácido de la minería (DAM)	31
2.6.3	Residuos sólidos - Las escombreras	32
2.6.4.	Erosión y sedimentación	33
3.	OBJETIVOS	34
3.1	Objetivo general	34
3.1.1	Objetivos específicos	34
4.	METODOLOGÍA	35
4.1	Área de estudio	35
4.2	Recolección de muestras	37
4.3	Caracterización fisicoquímica y análisis de muestras	37
4.4	Índice de contaminación	38
4.5	Evaluación de riesgo para salud	39
4.4	Alternativas de tratamientos	43
4.5	Análisis estadístico	43
5.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	45
5.1	Caracterización fisicoquímica de efluentes mineros	45
5.2.	Evaluación de riesgo potencial en salud	56
5.3	Alternativas de tratamientos de efluentes mineros	61
5.3.1	Sedimentadores y desarenadores	61
5.3.2	Neutralización	64
5.3.3	Filtro con carbón activado	64
5.3.4	Precipitación química (coagulación - floculación)	65
5.3.5	Humedales construidos	66

5.3.6	Relaveras y lechos se secado	67
6	CONCLUSIÓN	70
	REFERENCIAS	72
	Anexos	83

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Caracterización fisicoquímica efluentes y comparación con otros estudios	46
Tabla 2. ACP - Cargas de componentes principales	55
Tabla 3. Dimensiones recomendadas para desarenadores	63
Tabla 4. Dosificados y material de revestimiento en función de coagulante	66

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Ubicación distrito minero San Martin de Loba	36
Figura 2. Componentes principales de mayor porcentaje de variabilidad de resultados	54
Figura 3. Figura 2. Dosis diaria promedio a través de varias vías de exposición (ADD, mg/kg/día). a) Dérmica, b) Oral.	57
Figura 4. Riesgo no carcinogénico evaluado en función del cociente de riesgo (HQ) para los diferentes metales pesados.	58
Figura 5. Sistema de tratamiento propuesto para tratamiento de efluentes en la zona de explotación minera San Martin de Loba, departamento de Bolívar	69

RESUMEN

Este proyecto evaluó la caracterización fisicoquímica de efluentes del distrito minero de San Martín de Loba, departamento de Bolívar, generando datos para la evaluación de riesgo en salud y la planificación y propuesta de un sistema de tratamiento de efluentes. Se realizó un muestreo aleatorizado de efluentes mineros, considerando la distribución espacial de sitios de procesos de extracción de oro en el distrito minero. La caracterización fisicoquímica se realizó en función de la normatividad 0631 de 2015. La concentración de los parámetros SST, SO_4 , S, CN, Hg, Cd, Fe, Pb, Cu y Cr en el efluente superó los límites permisibles establecidos por la resolución 0631 de 2015 para actividades de extracción de oro y otros metales preciosos en una relación de SST (44.2), SO_4 (1.1), S (1.8), CN (6.4), Hg (2650), Cd (2), Fe (19), Pb (7.5), Cu (2.7) y Cr (376). El análisis estadístico multivariado de componentes principales (CP), deduce que la contaminación de los efluentes puede estar asociada a fuentes geofísicas y geológicas. Además, de las actividades de procesamiento de minerales. La evaluación de riesgo en salud demuestra que excepto Cr y Hg presentan valores de índice de riesgo (HQ) menor que uno (1), indicando que éstos metales representan un riesgo potencial para la salud. Para el tratamiento efluentes mineros se propone la utilización de métodos activos que precisan de una operación continua y métodos pasivos en los que la intervención del hombre es mínima. En general los resultados de este proyecto permiten presentar un diagnóstico inicial de la problemática de contaminación de los efluentes mineros

de la zona de estudio y serán útiles para seguir desarrollando estrategias de mitigación ambiental por las autoridades ambientales y de salud pertinentes; respondiendo a la necesidad en el manejo y conservación de los recursos naturales y salud pública.

Palabras claves: efluente, minería, metales pesados, Colombia

ABSTRACT

Project evaluated the physicochemical characterization of effluents from the mining district of San Martin de Loba, Bolívar department, generating data for the planning and proposal of an effluent treatment system. A random sampling of mining effluents was performed, considering the spatial distribution of gold mining process sites in the mining district. The physicochemical characterization was carried out in accordance with the regulations 0631 of 2015. The concentration of the parameters SST, SO₄, S, CN, Hg, Cd, Fe, Pb, Cu and Cr in the effluent exceeded the permissible limits established by resolution 0631 2015 for gold and other precious metals mining activities in a ratio of SST (44.2), SO₄ (1.1), S (1.8), CN (6.4), Hg (2650), Cd (2), Fe (19) , Pb (7.5), Cu (2.7) and Cr (376). Any treatment technology for this effluent should focus on these contaminants. The multivariate statistical analysis of main components, deduces that the effluent contamination may be associated with geophysical and geological sources. In addition, mineral processing activities. For the treatment of mining effluents, the use of active methods that require continuous operation and passive methods in which human intervention is minimal is proposed. The health risk assessment shows that except Cr and Hg have risk index (HQ) values less than one (1), indicating that these metals represent a potential health risk. For the treatment of mining effluents, the use of active methods that require continuous operation and passive methods in which human intervention is minimal is proposed. In general, the results of this project allow us to present an initial diagnosis of the problem of contamination of the mining effluents of the study area and will be useful to

continue developing environmental mitigation strategies by the relevant environmental and health authorities; responding to the need in the management and conservation of natural resources and public health.

Keywords: effluent, mining, heavy metals, Colombia

1. INTRODUCCIÓN

La minería en Colombia, en nuestro país constituye uno de los principales motores económicos y en los últimos años se ha intensificado, entre ellas la minería de oro en el departamento de Bolívar, actividad económica tradicional desde la época de la Colonia. Departamento que produce cerca de 4 toneladas anuales, lo que representa el 6% del total nacional. El potencial minero en el sur de Bolívar, se encuentra una presencia importante de productores tradicionales y crece el interés de empresas del sector. El impacto ambiental asociado con la explotación de oro, es uno de los principales desafíos que el sector minero debe superar (Hilson, 2003), ya que la presión por los principios de producción más limpia está aumentando en todo el mundo, junto con estándares ambientales más restrictivos, incluidos los asociados con los recursos hídricos (Lobo et al., 2015). Normalmente, los efluentes resultantes del procesamiento del mineral contienen sustancias peligrosas como metales pesados, metaloides, ácidos y químicos de proceso (Chan y Dudeney, 2008). En muchos países en desarrollo, las industrias eliminan sus efluentes sin una caracterización, cuantificación y tratamiento adecuados debido a la falta de legislación y aplicación de las leyes adecuadas, así como debido a limitaciones económicas y tecnológicas (Monser y Adhoum 2002; Acheampong et al. 2010; Sekabira et al. 2010). Colombia no es la excepción a esta problemática. Un paso importante en la selección de un sistema de tratamiento es estudiar las características físicas y químicas de la corriente de efluentes del proceso en cuestión (Igbinosa y Okoh 2009). El estudio de las características de una corriente de aguas residuales ayuda a identificar los

contaminantes presentes en las aguas residuales y proporcionará información sobre el tratamiento o una alternativa de tratamiento requerido para cumplir con los límites reglamentarios para la descarga. Razón por lo cual el objetivo de este estudio fue la caracterización fisicoquímica de los efluentes en una zona de explotación minera de oro (San Martín de Loba) para la planificación y propuestas en diseño de un sistema de tratamiento de efluentes. Además, la valoración de los contaminantes con el ánimo de establecer una línea base que sirva de soporte para tomar decisiones en el control de la contaminación, manejo y planificación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Minería

Según el documento, Así es la minería del Ministerio de Minas, de 2009, esta es considerada como la actividad económica mediante la cual se extraen selectivamente de la corteza terrestre, diferentes tipos de minerales que son básicos para la producción de materiales empleados por la sociedad moderna y que son básicos en el diario vivir. La minería reúne un conjunto de actividades que relacionan el descubrimiento, exploración y explotación de yacimientos.

Por consiguiente, una mina es una excavación que tiene como propósito la explotación económica de un yacimiento mineral, que puede ser a cielo abierto o subterráneo. (MINMINAS, 2009). El yacimiento mineral es un cuerpo mineral que claramente puede ser explotable. Estos a su vez se pueden clasificar en cuatro grupos principales, como son vetas, diseminado, aluvial, contacto. Dentro de estos yacimientos minerales se pueden encontrar cinco categorías; están los minerales metálicos, minerales industriales, materiales de construcción, gemas y combustibles.

- **Metálicos:** Incluyen los metales preciosos (el oro, la plata y los metales del grupo del platino), los metales siderúrgicos (Hierro, níquel, cobalto, titanio, vanadio y cromo), los metales básicos (cobre, plomo, estaño y cinc), los metales ligeros (magnesio y aluminio), los metales nucleares (uranio, radio

y torio) y los metales especiales, como el litio, el germanio, el galio o el arsénico.

- **Industriales:** Incluyen los de potasio y azufre, el cuarzo, la trona, la sal común, el amianto, el talco, el feldespato y los fosfatos.
- **Materiales de Construcción:** Incluyen la arena, la grava, los áridos, las arcillas para ladrillos, la caliza y los esquistos para la fabricación de cemento. En este grupo también se incluyen la pizarra para tejados y las piedras pulidas, como el granito, el travertino o el mármol.
- **Gemas:** Incluyen los diamantes, los rubíes, los zafiros y las esmeraldas.
- **Combustibles:** Incluyen el carbón, el lignito y la turba. El uranio se incluye con frecuencia entre los combustibles. De acuerdo al Código de Minas, en Colombia no se incluyen dentro de los minerales el petróleo y el gas.

2.1.1. Tipos de minería

Si bien existen varios tipos de minería, estos se pueden ordenar, dependiendo de la ubicación en la cual se encuentren los minerales y del modo de extracción del mismo que se emplee para obtenerlo. Entre ellos tenemos, la minería subterránea, minería de superficie y minería a cielo abierto, aunque existen

algunos métodos que, podrían denominarse mixtos o combinados (Bustillo y López, 1996; UPME-MME-UC, 2016).

2.1.1.1. Minería subterránea

La mina subterránea es la que desarrolla su actividad de explotación en el interior de la tierra y puede profundizar en ella a través de túneles, ya sean verticales u horizontales. (MINMINAS, 2009). En la minería subterránea la extracción de estéril suele ser prácticamente insignificante a lo largo de la vida de la mina, pues solo procederá de las labores de acceso y preparación. En este grupo de métodos, el control del terreno o de los huecos, una vez extraído el material, es una de las consideraciones más importantes que intervienen en la forma de explotar un yacimiento.

2.1.1.2. Minería de superficie

Es el método contrario a lo que es la minería subterránea, ya que esta se va realizando sobre la superficie de la tierra y se desarrolla en forma progresiva por capas o terrazas en terrenos previamente delimitados. Se emplea en lugares donde los minerales están a poca profundidad. Existen varias formas de hacer una explotación en superficie tales como: canteras, minería a cielo abierto, explotaciones al descubierto y minas de placer (MINMINAS, 2009).

2.1.1.2. Minería a cielo abierto

Se caracteriza por los grandes volúmenes de materiales que se deben remover. La disposición del yacimiento y el recubrimiento e intercalaciones de material estéril determinan la relación estéril/mineral con que se debe extraer este último. Este parámetro, comúnmente denominado ratio, puede ser muy variable de unos depósitos a otros, pero en todos condiciona la viabilidad económica de las explotaciones y, consecuentemente, la profundidad que es posible alcanzar por minería de superficie (MINMINAS, 2011).

2.2. MINERÍA DE ORO EN COLOMBIA

Conforme a un boletín de prensa emitido por la Contraloría General de la República y citado por Casallas y Martínez (2014), se afirma que en Colombia hay 17 departamentos y 80 municipios donde se llevan a cabo procesos de extracción artesanal, pequeña o industrial de oro y según la UPME. Antioquía y Bolívar poseen la mayor cantidad de minas del país y producen alrededor de 18.8 toneladas de oro anuales, si bien departamentos como Chocó, Córdoba, Caldas y Tolima también tienen amplia presencia de la actividad extractiva del metal.

La actividad de extracción del oro en el país se podría nominar como atomizada, es decir, existen múltiples actividades de extracción en diferentes zonas, la mayoría de las cuales no cuenta con una legalidad o formalización en su actividad; según Casallas y Martínez (2014), tomando datos oficiales, existen 4.133 unidades de minería que son equivalentes al 29% de la minería con o sin título minero, de las cuales 3584 son ilegales. Esto representa el 40% del total de

la ilegalidad de minería en el país, lo cual indica que de cada cinco unidades ilegales dos pertenecen al oro.

2.3. Impactos Ambientales.

El proceso de extracción del oro tiene unas consideraciones importantes en Colombia: muchas veces se hace para la subsistencia, y por lo tanto, se recurre a técnicas ancestrales que generan de por sí bajo impacto ambiental negativo, pero así mismo pequeñas producciones del mineral; por otra parte, actividades de mayor capacidad de producción pueden o no estar vinculadas a las autorizaciones respectivas que el Estado colombiano otorga (títulos mineros y licencias ambientales), y usan métodos que les permiten remover mayores cantidades de metal precioso; considerando tres principales técnicas que se usan mundialmente para la extracción del oro (Bateo, amalgamación con Hg y extracción con cianuro) que generan grandes efectos negativos en los diferentes compartimientos ambientales.

2.3.1. Agua

La actividad minera puede impactar las fuentes hídricas superficiales por manejo inadecuado de aguas en el interior de la mina, por aumento en los sólidos y turbidez por partículas en suspensión y en arrastre; afectación de las rondas y cauces de los ríos y la red de drenajes natural, alterando su dinámica fluvial y equilibrio hidrológico; desaparición de cuerpos de agua como quebradas y

manantiales; estos impactos pueden ser de carácter directo, en algunos casos a largo plazo y en algunos casos puede ser irremediable (CGR, 2012).

En el caso de las aguas subterráneas, los impactos suelen ser mayores sobre todo por afectaciones químicas mediante el vertido de desechos líquidos y sólidos derivados de actividades mineras (aguas ácidas, hidrocarburos, aceites de equipos). Esta potencialidad crece en la medida en que aumenta la permeabilidad del suelo, la profundidad de los niveles freáticos y la presencia de medidas de recubrimiento naturales o artificiales que aisle los desechos y materiales contaminantes de la minería (McMahon y Remy, 2003; CGR, 2012). También en las aguas subterráneas se presenta un serio problema para la permanencia de los acuíferos: los flujos de agua hacia los tajos mineros, su salida a superficie y su extracción por bombeo desde el frente minero, producen abatimientos de los niveles de agua a nivel local y dependiendo de la escala de la minería a nivel regional. Se presenta; contaminación por mezclas con agua de mala calidad; redireccionamiento de flujos y desecación de acuíferos; desaparición de manantiales por las excavaciones realizadas en minería subterránea.

Para el caso de las aguas superficiales, se presenta la acidificación de las aguas de quebradas y drenajes cercanos a minas de oro y carbón, que por procesos de precipitación y disolución se pueden retener y formar compuestos insolubles que se depositan posteriormente en el suelo (CGR, 2012).

Otro daño que se debe consideración dentro de los impactos al sistema hídrico es el que posiblemente genere los ríos impactados por el drenaje ácido de la mina, que pueden llegar a tener un valor del pH de 4 o menos. Es poco probable que las plantas, animales y peces puedan sobrevivir en ríos con tales condiciones. Los impactos en la vida acuática pueden ir desde la muerte inmediata de peces hasta efectos sub-letales, que afectan su crecimiento, comportamiento o la capacidad reproductiva. Incluso, el hecho de acumularse en los en los lechos de los sistemas loticos por largos periodos de tiempo, constituyen una fuente de contaminación a largo plazo que afecta los insectos acuáticos que viven ahí, y a los peces que se alimentas de estos (ELAW, 2010).

2.3.2. Aire

El transporte de emisiones en el aire ocurre durante casi todas las etapas del ciclo de vida de la mina, exceptuando el cierre y abandono. Las mayores fuentes de contaminación de las operaciones mineras son: Material particulado, las emisiones de gases de fuentes móviles y emisiones gaseosas provenientes de la quema de combustible en fuentes fijas como voladuras y procesamiento de minerales (ELAW, 2010).

2.3.3. Suelos

La minería puede producir sobre el suelo y subsuelo alteraciones de carácter físico, físico-químico; dentro de las afectaciones físicas están la remoción

superficial del suelo y la de los materiales de cobertura, en los niveles más superficiales compuestos por suelos orgánicos pueden ocasionar su infertilidad o en el peor de los casos mantienen su fertilidad pero permiten el paso de contaminantes a través del agua o por incorporación directa sobre niveles orgánicos. La minería a cielo abierto contempla la modificación de la topografía y del paisaje en general. En la minería subterránea, cada túnel o galería se constituye en un filtro artificial de drenaje de las aguas subterráneas, pudiendo llegar a secar completamente o a disminuir de manera definitiva el caudal de aguas superficiales ubicadas en superficie (CGR, 2012).

Los impactos físico-químicos y químicos que genera la minería se centra en la producción de contaminantes gaseosos, líquidos y sólidos que de forma directa o indirecta va a recibir el suelo como receptáculo de los desechos propios de esta actividad (CGR, 2012).

El mayor impacto que produce la minería es la adición de la fase líquida al suelo y subsuelo, generalmente los elementos incorporados presentan una composición muy diferente a la que habitualmente se infiltra en el mismo (aguas lluvias). En algunos casos los contaminantes se acumulan en formas lábiles, de alta solubilidad que no solo afectan la composición del suelo y subsuelo, sino que pueden estar disponibles para que los animales y las coberturas vegetales puedan captarlos y sufrir efectos tóxicos (CGR, 2012; Fierro, 2012).

El impacto provocado por contaminación se puede generar a través de los talleres de mina, de la presencia de hidrocarburos en grandes cantidades cuyo vertido accidental suele ser bastante común, y tienen una gran facilidad de flujo y de infiltración en el suelo. Otros edificios mineros (lavaderos, depósitos de explosivos, oficinas, etc.) pueden producir efectos más o menos importantes, en función de factores diversos: existencia de instalaciones anexas, empleo de reactivos más o menos tóxicos, condiciones de almacenamiento de estos, etc. (CGR, 2012).

2.4. Impactos debido a los procesos de extracción

2.4.1. Impactos por amalgama

El uso del mercurio genera un sinnúmero de afectaciones en diferentes compartimentos ambientales: la matriz aire se puede ver alterada por la introducción del mercurio al momento de evaporar la amalgama, lo que desencadena que el material se precipite con la lluvia y que tenga contacto tanto con el agua como con el suelo. A nivel del suelo y del agua, se puede presentar la generación de sulfuros, fruto de un sistema inapropiado de concentración gravimétrica, producción de sólidos gruesos y finos como resultado de un almacenamiento inapropiado, así como la acidificación de cuerpos de agua y contaminación con mercurio de sus sedimentos (CGR, 2014).

2.4.2. Impactos por cianuración

Por parte de la cianuración, se evidencia entre otros, los siguientes impactos: producción de polvo, temblores y explosiones, luego de realizar lavados con ácidos debido a que se pueden presentar dióxido de azufre si el terreno lo posee. El polvillo fino, generado por la extracción, es muy volátil, nocivo y puede ser fácilmente arrastrado por el viento; además es posible que llegue más lejos. También se pueden dar filtraciones de cianuro, metales pesados, nitritos, dióxido de carbono etc., que son depositados en diques para su contención; estos representan un alto riesgo, dado que deben ser controlados hasta por 20 años y durante este tiempo pueden infiltrarse contaminando suelos, aguas subterráneas e incluso aguas superficiales (Casallas & Martínez, 2014).

2.5. MARCO LEGAL

Se realizará un análisis conceptual de las normas aplicables a las unidades de producción minera (UPM) que realizan vertimientos, con el fin de obtener un análisis del marco legal aplicable a la guía de orientación para el minero sobre el correcto manejo de vertimientos.

En primer término, debe tenerse en cuenta el contenido del Decreto 2811 de 1974 “Código Nacional de Recursos Naturales Renovables (RNR) y de Protección al Medio Ambiente”, como el primer marco normativo en América Latina que recogió los principios establecidos en la conferencia de Estocolmo sobre Medio Humano de 1972. En este se considera al ambiente como un patrimonio común, el Estado

y los particulares deben participar en su preservación y manejo, adicionalmente regula el manejo de los RNR, la defensa del ambiente y sus elementos.

En el Artículo 138°-Prevención y control de contaminación, “se fijaran zonas en que quede prohibido descargar, sin tratamiento previo y en cantidades y concentraciones que sobrepasen los niveles admisibles, aguas negras o residuales de fuentes industriales o domésticas, urbanas o rurales, en las aguas, superficiales o subterráneas, interiores o marinas” y en el Artículo 150° aguas subterráneas, “se organizara la protección y aprovechamiento de aguas subterráneas”.

El Decreto 1449 de 1977 sobre disposiciones sobre conservación y protección de aguas, bosques, fauna terrestre y acuática, en su Artículo 2 estipula que “en relación con la conservación, protección y aprovechamiento de las aguas, los propietarios de predios están obligados a no incorporar en las aguas cuerpos o sustancias sólidas, líquidas o gaseosas, tales como basuras, desechos, desperdicios o cualquier sustancia tóxica, o lavar en ellas utensilios, empaques o envases que los contengan o hayan contenido”.

En el Decreto 1541 de 1978, los artículos del 211 a 219 están enfocados al control de vertimientos y en el Artículo 231, dispone la reglamentación de vertimientos a una corriente o depósito de agua, el cual fue derogado por el Decreto 3930 de 2010.

En el Decreto 1594 de 1984 referente a normas de vertimientos de residuos líquidos, en los Artículos del 37° a 50° -Criterios de calidad de agua, Artículos del 60° a 71°, Vertimiento de residuos líquidos y los Artículos del 72° a 97° Normas de vertimientos. Derogado por el Decreto 3930 de 2010, estos decretos fueron recogidos por el decreto 1079 de mayo de 2015.

La Constitución Política de 1991, en su Artículo 8°, establece la obligación del Estado y de las personas para la conservación de las riquezas naturales y culturales de la nación, al mismo tiempo en el artículo 80°, establece la planificación del manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.

La reforma constitucional pone sobre la mesa la situación de la institucionalidad ambiental existente, dando como resultado la Ley 99 de 1993, con la que se crea el Ministerio del Medio Ambiente y organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y reforma el sector público encargado de la gestión ambiental.

En 1997 se promulga la Ley 373, mediante la cual se constituye el programa para el uso eficiente y ahorro del agua, en su Artículo 5°, reuso obligatorio del agua.” Las aguas utilizadas, sean éstas de origen superficial, subterráneo o lluvias, en cualquier actividad que genere afluentes líquidos, deberán ser reutilizadas en actividades primarias y secundarias cuando el proceso técnico y económico así lo ameriten y aconsejen según el análisis socio-económico y las normas de calidad ambiental”. Bajo este contexto, y con el fin de recopilar las regulaciones establecidas para el vertimiento generado a cuerpos de agua superficiales o

subterráneos, en 2010 se reglamenta el Decreto 3930 con las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el ordenamiento del recurso hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados.

En diciembre de este mismo año, se modifica parcialmente el decreto anterior, por el Decreto 4728, fijando los parámetros y los límites máximos permisibles de los vertimientos a las aguas superficiales marinas, a los sistemas de alcantarillado público y al suelo en su Artículo 1°.

Además El Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial se compromete a que dentro de los diez (10) meses, contados a partir del 23 de diciembre de 2010, fecha de la publicación del Decreto 4728, a expedir las normas de vertimientos puntuales a aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, Igualmente, deberá establecer las normas de vertimientos al suelo y aguas marinas, dentro de los treinta y seis (36) meses, contados a partir de la fecha de publicación.

El 17 de marzo de 2015 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece los parámetros y los valores límites permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, fijando los valores máximos permisibles de los parámetros fisicoquímicos en los diferentes sectores productivos en Colombia, en concordancia con el decreto 4728 de 2010.

2.5.1. Límites máximos permisibles

Los vertimientos generados por la actividad minera están regulados por la norma presentada el 17 de marzo del 2015, Resolución 0631 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible donde se establecen los parámetros y los valores Límites Máximos Permisibles (LMP) en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas residuales, sin considerar el volumen de la descarga ni la capacidad de asimilación del cuerpo receptor y se constituyen cuáles son los parámetros fisicoquímicos a monitorear. Esta norma de vertimientos reglamenta el artículo 28° del Decreto 3930 de 2010, que deroga el Decreto 1594 de 1984, con el objetivo de ejercer control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua, generadas de los sectores económicos del país, en esta guía se hará énfasis en la minería de oro y carbón.

El control de los parámetros se realizará a partir de la medición de la cantidad de sustancias descargadas, la cual tiene un efecto directo en la calidad del agua. La medición se realizará en mg/l para obtener un valor a partir de la concentración.

En esta norma se revisa los vertimientos puntuales que se realizan en la minería de metales preciosos (oro), considerando 56 parámetros, entre características físicas y químicas, para cada uno se estableció un límite máximo permitido cumplible con los recursos técnicos, tecnológicos y económicos.

Las autoridades ambientales son las responsables de hacer un seguimiento y control al cumplimiento de la norma sobre quienes desarrollen actividades mineras y en su proceso de beneficio generen aguas residuales no domésticas

vertidas sobre cuerpos de agua superficiales. A lo largo de la guía se proponen estrategias, acciones, tratamientos y tecnologías, para mejorar el vertimiento. En especial aquellos parámetros como el pH, DQO, DBO₅, SST, grasas y aceites, cloruros, sulfatos y metales pesados, que se ven alterados normalmente en las operaciones unitarias desarrolladas en las minería aurífera evidenciada en el país.

2.6. Contaminantes generales en la minería

Existen diferentes tipos de contaminantes generados a partir de los procesos mineros y que pueden afectar la calidad del agua de un cuerpo receptor.

2.6.1. Metales pesados y lixiviación

La contaminación por metales pesados es causada cuando algunos metales como el arsénico, cobalto, cobre, cadmio, plomo, oro, plata y zinc, contenidos en las rocas excavadas o expuestos en vetas en una mina subterránea, entran en contacto con el agua. Caso contrario con Hg el cual se utiliza para extraer el metal precioso (Au), causando problemas de contaminación. Los metales son extraídos y llevados generalmente por vertimiento directo río abajo, mientras el agua lava la superficie rocosa o vertidos para el proceso de recuperación. Aunque los metales pueden ser movidos en condiciones de pH neutral, la lixiviación es particularmente acelerada en condiciones de pH bajo, tales como las creadas por el drenaje ácido de la minería. En los suelos y sistemas acuáticos, los metales

son contaminantes persistentes, que se bioacumulan a través de las cadenas tróficas (Manahan, 2003). Existen diferentes factores fisicoquímicos y biológicos que afectan la toxicidad de los metales (Duffus, 2002; Kakkar y Jaffery, 2005); entre los primeros están la especie química, el pH, la salinidad, la temperatura, la presencia de otros metales y de otros contaminantes (Tessier et al., 1979).

2.6.2. Drenaje ácido de la minería (DAM)

Cuando las grandes cantidades de roca que contienen minerales sulfatados, son excavadas en tajo abierto o en vetas en minas subterráneas, estos materiales reaccionan con el aire o con el agua para crear ácido sulfúrico (Tabelin et al., 2017). Cuando el agua alcanza cierto nivel de acidez, un tipo de bacteria común llamada "*Tiobacillus Ferroxidante*", puede aparecer acelerando los procesos de oxidación y acidificación, lixiviando aun más los residuos de metales de desecho. El ácido lixiviara la roca mientras que la roca fuente este expuesta al aire y al agua. Este proceso continuara hasta que los sulfatos sean extraídos completamente; este es un proceso que puede durar cientos, o quizás miles de años (Gaikwad y Gupta, 2008). El ácido es transportado desde la mina por el agua, las lluvias o por corrientes superficiales, y posteriormente depositado en los estanques de agua, arroyos, ríos, lagos y mantos acuíferos cercanos. El DAM degrada severamente la calidad del agua y puede aniquilar la vida acuática, así como volver el agua prácticamente inservible (Zhao et al., 2017).

2.6.3. Contaminación química

Este tipo de contaminación ocurre cuando algunos agentes químicos (tales como el cianuro y el ácido sulfúrico, utilizados por compañías mineras para la separación del material deseado, del mineral en bruto) se derraman, gotean, o se trasladan del sitio minero a un cuerpo de agua cercano. Estos químicos así como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- pueden ser también perjudiciales para los humanos y la fauna (Chan y Dudeney, 2008; Langsch et al., 2012).

2.6.4. Residuos sólidos - Las escombreras

Una vez que los minerales han sido procesados y recuperados, la roca sobrante se vuelve otra forma de desperdicio minero que se ubican en las escombreras. Las escombreras contienen los mismos metales pesados tóxicos y formaciones de ácido mineral que produce el desecho de roca. También pueden contener agentes químicos usados para el procesamiento del mineral en bruto, tales como cianuro o ácido sulfúrico, produciendo problemas ambientales (Tost et al., 2018). Las escombreras son usualmente colocadas en la superficie, en áreas de contención o en lagunas de oxidación, y en un número creciente de operaciones bajo tierra, donde el desecho es usado como relleno para las áreas que fueron excavadas. Si son asegurados inapropiadamente, los contaminantes de los desechos mineros pueden lixiviar hacia la superficie o a los mantos de agua subterránea causando una contaminación seria que puede perdurar durante muchas generaciones (Hudson-Edwards et al., 2011).

2.6.5. Erosión y sedimentación

El desarrollo minero perturba el suelo y las rocas en el transcurso de la construcción y mantenimiento de caminos, basureros y excavaciones a la intemperie. Por la ausencia de prevenciones adecuadas y estrategias de control, la erosión de la tierra expuesta puede transportar una gran cantidad de sedimentación a arroyos, ríos y lagos. La sedimentación excesiva puede obstruir riveras, la delicada vegetación de estas y el hábitat para la fauna y organismos acuáticos (Mullan, 2013).

Estos procesos suelen ser complejos, poco conocidos y difíciles de predecir cuantitativamente en vastas áreas geográficas (Mitasova et al., 2013) Las implicaciones ambientales de la erosión son bien conocidas y es la degradación de la tierra más crítica y los problemas de gestión de los recursos hídricos de las cuencas de los ríos en todo el mundo (Zhang et al., 2009).

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Evaluar las características fisicoquímicas y las concentraciones de metales pesados (Cd, Pb, Zn, Ag, Fe, Cr, Ni, Cu, Hg, As) de efluentes en una zona de explotación de minería artesanal de oro en el departamento de Bolívar para poder establecer riesgo en salud y estrategias de tratamiento de los efluentes.

3.1.1. Objetivos específicos

- Determinar las características físicas y químicas los efluentes mineros en función de los parámetros establecidos por la normatividad colombiana (Resolución 0631 de 2015).
- Valorar el riesgo para la salud asociados a metales pesados en efluentes de mina del distrito minero de San Martín de Loba.
- Correlacionar las concentraciones de metales pesados con las características físicas y químicas de los efluentes de mina para identificar si existe origen común entre los parámetros.
- Identificar alternativas para el tratamiento de efluentes considerando bajos costos, utilización de recursos del medio y materiales autóctonos que se puedan utilizar de la zona.

4. METODOLOGÍA

4.1. Área de estudio

En el departamento de Bolívar la minería aurífera contempla diferentes zonas o distritos mineros, entre ellas la ubicada en el Municipio de San Martín de Loba localizado al norte del país y al sur oriente del departamento de Bolívar (Figura 1). Caracterizada por ser una de las zonas de mayor influencia de minería aurífera en el norte de Colombia (Olivero et al., 2014; UPME-MME-UC, 2016), a 445 km de la capital del departamento, Cartagena y 15 minutos por vía fluvial del Municipio de El Banco- Magdalena, encontrándose incomunicado por vía terrestre de los departamentos limítrofes. Abarca una extensión superficial de 414 Km² y una altura de 10 m.s.n.m en la cabecera municipal. Pertenece a la cuenca de la región Momposina, a la margen sur del Brazo de Loba del río Magdalena. San Martín de Loba es una población de origen indígena, que se encontraba bajo el dominio de los indios Malibúes, evolucionando a través del tiempo, pasando de una comunidad indígena con vocación minera a una comunidad mestiza y de vocación minera, agropecuaria y pesquera. La base de la economía de San Martín de Loba son las actividades agrícola, pecuaria, pesquera, comercial y minera, siendo esta última la principal fuente de contaminación por Hg en el municipio debido a la utilización de tecnologías muy rudimentarias (Roman et al., 2018).

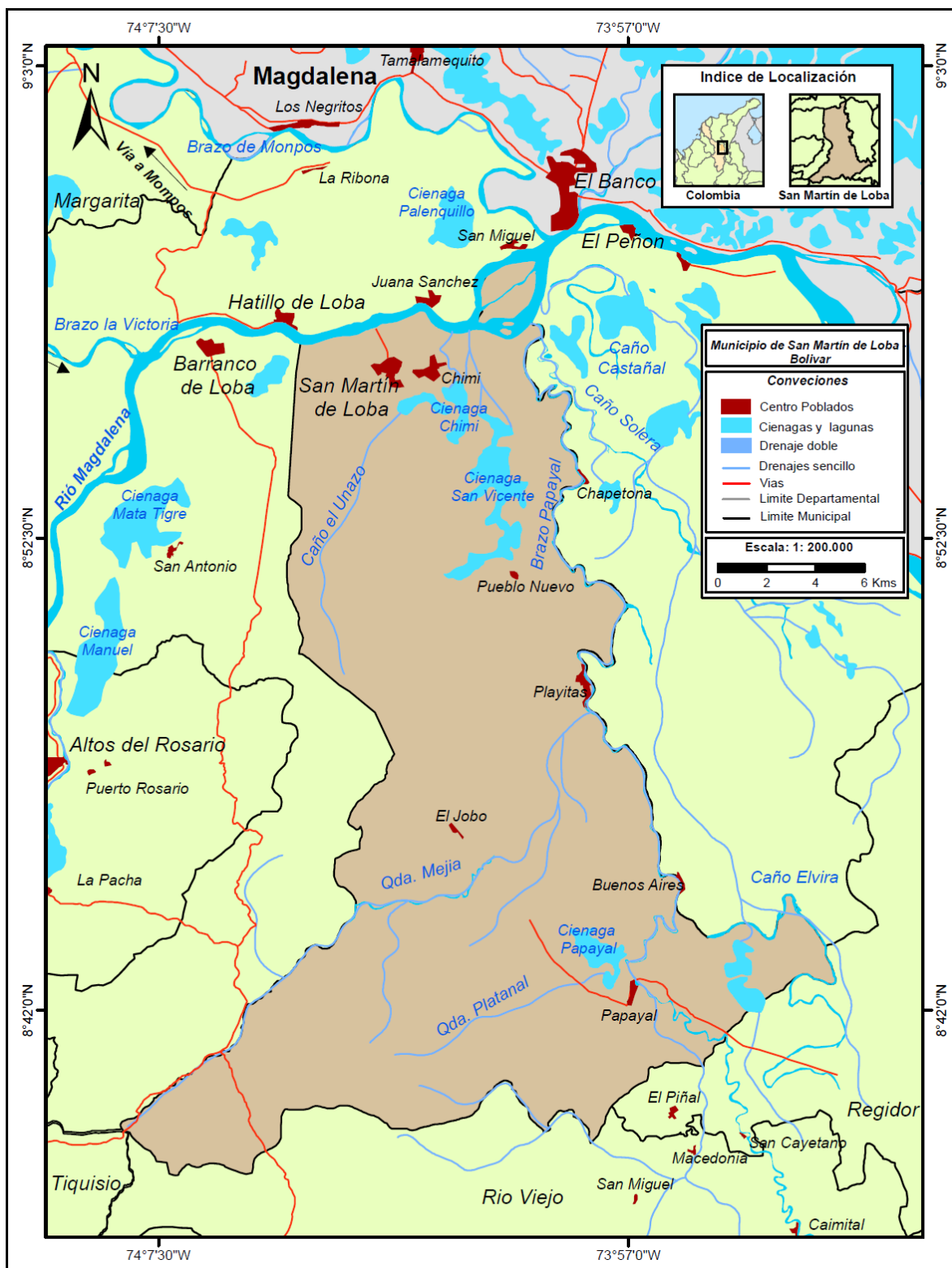


Figura 1. Ubicación distrito minero San Martín de Loba

4.2. Recolección de muestras

Se realizó un muestreo aleatorizado en función del número y distribución espacial de sitios de procesos de extracción de oro en el distrito minero del municipio San Martín de Loba, departamento de Bolívar. Las muestras de aguas residuales fueron recolectadas en un lugar de alta turbulencia para garantizar una buena mezcla, considerando el punto de descarga de efluentes de la planta de procesamiento y del punto de entrada al proceso. El muestreo y preservación de la muestra en función de los parámetros fisicoquímicos, se realizó de acuerdo con los procedimientos descritos en la American Public Health Association (APHA, 2012). Las muestras fueron transportadas al laboratorio en recipientes de plástico previamente lavados (HNO_3 – 10%, agua destilada) y rotuladas, hasta su posterior análisis.

4.3. Caracterización fisicoquímica y análisis de muestras

Para caracterizar las aguas residuales, se considero los parámetros fisicoquímicos según la normatividad (Resolución 0631 de 2015), entre ellos: pH, conductividad eléctrica (CE), turbidez, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos sedimentables (SSSED), sólidos disueltos totales (SDT), grasas y aceites, fenoles, sustancias activas al azul de metileno (SAAM), hidrocarburos totales (HTP), ortofosfatos, fósforo total, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total,

cianuro total, cloruros, sulfatos, sulfuros, arsénico, cadmio, zinc, cobre, cromo, mercurio, níquel, plata plomo, acidez, alcalinidad total, dureza cálcica, dureza total. La temperatura, pH, CE, SDT, alcalinidad total, acidez y turbidez de las muestras se determinaran *in situ*. La determinación de los parámetros fisicoquímicos excepto Hg se realizó en el laboratorio de acuerdo con los procedimientos normalizados descritos por American Public Health Association (APHA, 2012).

Para determinar la concentración Hg en las muestras se utilizó el método directo por descomposición térmica detectado por espectrometría de absorción atómica, utilizando un equipo DMA-80 (Direct Mercury Analyzer) (USEPA, 1998). Para el análisis de As, Cu, Zn, Cd, Ni, Cr, Ag y Pb, las muestras fueron sometidas a un proceso de digestión ácida con HNO₃ en un horno de microondas (por triplicado) utilizando el Método 3111A (APHA, 2012). Los análisis se realizó empleando un espectrofotómetro de absorción atómica Thermo Elemental Solaar S4 acoplado generación de hidruros (As), llama (Cu, Zn, Ni, Cr) y horno de grafito (Cd, Pb, Ag). El control de calidad analítico de metales en aguas se realizó empleando el material de referencia certificado en aguas 'Trace Metals Water' (NIST-1641d y NIST-1643e), obteniendo porcentaje de recuperación de 98 ± 1.2 .

4.4. Índice de contaminación (IC)

El índice de contaminación fue calculado acorde la metodología descrita por Adamu et al. (2015).

$$CI = \sum \frac{C_s}{C_{Mal}} \quad (1)$$

Donde, C_s : concentración del metal en la muestra, C_{Mal} : Concentración permisible en función de la normatividad (Resolución 0631 de 2015). Clasificación del índice de contaminación: $CI > 5$ (contaminado), $CI 1-5$ (ligeramente contaminado) y $CI < 1$ (no contaminado).

4.5. Evaluación de riesgo para la salud

La evaluación de riesgos para la salud en este estudio constó de cuatro pasos fundamentales. Identificación de peligros, evaluación de exposición, evaluación de dosis-respuesta y caracterización de riesgos (USEPA, 1991; Maria et al., 2017).

De acuerdo con Armah et al. (2013), la identificación del peligro implica la revisión de investigaciones clave para identificar cualquier posible problema de salud que puedan causar los metales pesados. La evaluación de la exposición implica la determinación de la cantidad, la duración y el patrón de exposición a los metales pesados. La evaluación de dosis-respuesta estima la cantidad de metales pesados que se necesitarían para causar diversos grados de efectos sobre la salud que podrían conducir a enfermedades (Liu et al., 2012). Finalmente, la caracterización del riesgo implica la evaluación del riesgo de que los metales pesados causen cáncer u otras enfermedades en la población general. En este estudio, la ingestión de agua de la mina y el contacto dérmico con el agua de la mina fueron

considerados las rutas principales a través de las cuales los trabajadores y los residentes están expuestos a posibles contaminantes metálicos.

La evaluación del riesgo para la salud de cada metal pesado se basó en la cuantificación del nivel de riesgo y se expresó en términos de un riesgo para la salud cancerígeno o no cancerígeno. Se utilizó dos índices de riesgo de toxicidad: factor de pendiente (SF) para la caracterización del riesgo carcinógeno y la dosis de referencia (RfD) para la caracterización no carcinógena (Boateng et al., 2015).

El cálculo de la magnitud, frecuencia y duración de la exposición humana a cada metal pesado en el medio ambiente se informará como dosis diaria promedio, ADD, a través de varias vías de exposición (Liu et al., 2013; Asare-Donkor et al., 2016) para cada muestra de agua como:

$$ADD_{oral-water\ intake} = \frac{C_W \times I_R \times EF \times ED}{B_W \times AT} \quad (2)$$

$$ADD_{dermal-water\ intake} = \frac{C_W \times CF \times AF \times S_A \times ABS \times EF \times ED}{B_W \times AT} \quad (3)$$

donde ADD es la duración de la exposición (mg/kg-día), C_W es la concentración de metales pesados en el agua de la mina (mg/L); I_R es la tasa de ingestión (L/día), EF frecuencia de exposición: 350 días/año; ED es la duración de la exposición: 30 años, AT es el tiempo promedio para los no carcinógenos: (10,950 días, es decir, 365×30), B_W es el peso corporal: 70 kg, S_A es el área expuesta de la piel: 5700 cm², AF es el factor de adherencia: 0.07 mg·cm⁻², ABS es el factor de absorción dérmica en agua: 0.03 (As) y 0.001 (cada metal), Factor de conversión de unidades CF: 10⁻⁶ kg/mg (USEPA, 2011), AT es el tiempo promedio para

cancerígenos: 70 años (25,550 días, es decir, 365×70) (USEPA, 2001; Zhang et al. 2015).

El riesgo no cancerígeno se caracteriza normalmente en términos de un cociente de peligro (HQ). Este índice se define como la relación de ADD (mg/kg/día) (calculado en la evaluación de exposición) a la concentración de dosis de referencia (RfD) (mg/kg/día) (seleccionado por la evaluación de toxicidad) y puede calcularse como sigue (USEPA, 1991; Lim et al. 2008):

$$\text{Hazard quotient (HQ)} = \frac{\text{ADD}}{\text{RfD}} \quad (4)$$

Si HQ es superior a 1.0, existe un riesgo inaceptable de efectos adversos no cancerígenos para la salud, mientras que si el HQ es inferior a 1.0, es un nivel de riesgo aceptable.

El índice de peligro (HI) para un contaminante es la suma de todos los cocientes de peligro para las vías de exposición múltiple. Los HQ calculados para metales individuales para cada ruta se sumaran para calcular HI y estimar el riesgo de todos los contaminantes metálicos. Las evaluaciones de riesgos de una mezcla de sustancias químicas, los HQ individuales se suman para formar el índice de peligro (HI):

$$\text{Hazard index (HI)} = \sum \text{HQ} \quad (5)$$

Generalmente se reconocen dos categorías de evaluación de riesgos para la salud sobre la base del índice de peligro HI. Si el HI excede 1.0, esto implica que los contaminantes tuvieron efectos adversos no cancerígenos, mientras que si el HI <1 significa un nivel de riesgo aceptable (Lim et al. 2008).

El riesgo carcinogénico puede definirse como la ingesta diaria promedio (ADD) (calculada en la evaluación de las vías de exposición dérmica) multiplicada por el factor de pendiente carcinogénico (SF) (seleccionado por la evaluación de toxicidad) y puede calcularse utilizando la siguiente fórmula (Wongsasuluk et al. 2014):

$$\text{Carcinogenic risk} = \text{ADD}_{\text{life}} \times \text{SF} \quad (6)$$

El riesgo acumulativo de cáncer se puede calcular a partir de:

$$\text{Total Carcinogenic risk} = \sum \text{ADD}_{\text{life}} \times \text{SF} \quad (7)$$

donde el riesgo de cáncer representa la probabilidad de un riesgo de salud individual de por vida debido a los carcinógenos; ADD_{life} es la dosis diaria promedio de carcinógenos ($\text{mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$); SF es el factor de pendiente de la curva dosis-respuesta ($\text{mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$). Un riesgo aceptable está dentro del rango de 10^{-6} – 10^{-4} (USEPA, 2001), lo que significa que en promedio la probabilidad es que aproximadamente 1 por 1,000,000 desarrolle cáncer como consecuencia de la exposición (Lim et al., 2008). De acuerdo con la base de datos IRIS, solo se ha derivado un factor de pendiente para Pb (USEPA IRIS, 2011).

4.6. Alternativas de tratamientos

La normatividad indica que el vertimiento de residuos no debe o deberá modificar la calidad del cuerpo receptor. Lo anterior indica que la caracterización de los efluentes mineros es de gran importancia para la identificación de patrones o calidad de las aguas residuales de la zona de estudio, con el ánimo de dar a conocer los problemas de contaminación y apuntar a futuro el posterior tratamiento. En este contexto, se realizó revisión bibliográfica en base de datos científicas acerca de tratamientos de efluentes mineros para conocer e identificar diferentes alternativas de tratamientos implementadas, por ejemplo humedales artificiales propuesto por Marrugo et al. (2016) para la remoción de Hg en efluentes mineros. Posterior a la revisión bibliográfica se estableció una alternativa considerando la caracterización fisicoquímica y que normalmente los efluentes resultantes del procesamiento del mineral contienen sustancias peligrosas como metales pesados, metaloides, ácidos y químicos de proceso. Además, debido a la posibilidad que la calidad de los efluentes varía según la litología y zona mineralizada, se considero la posibilidad de agruparlas por similitud de pH y carga metálica o grupos de parámetros con características similares para conducir las y tratarlas por separado, mediante distintas alternativas. Sin embargo, la alternativa o alternativas para abordar el tratamiento fue considerado en función de bajos costos, utilización de recursos del medio y materiales autóctonos que se puedan utilizar de la zona.

4.7 Análisis estadístico

Los resultados para cada muestra se presentan como la media $\pm$ la desviación estándar de las determinaciones por triplicado. Se utilizó una prueba t Student para evaluar si existen diferencias significativas entre las concentraciones promedio de los parámetros fisicoquímicos entre las estaciones de muestreo. Se realizó análisis de correlación de Pearson, componentes principales (PC) y cluster (CA) se utilizaron para verificar las relaciones significativas entre los parámetros fisicoquímicos y el origen común entre los parámetros. Los resultados del PC se interpretaron de acuerdo con las fuentes antropogénicas hipotéticas de la zona de estudio. El criterio de significación será $p < 0.05$. El análisis estadístico se realizó empleando el software estadístico SPSS v23.0.0.0.

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. Caracterización fisicoquímica de efluentes mineros

La Tabla 1 presenta el resumen estadístico descriptivo de la caracterización fisicoquímica para evaluar la calidad del agua en función de los parámetros establecidos por la normatividad colombiana (Resolución 0631 de 2015). La concentración de los parámetros SST, SO_4 , S, CN, Hg, Cd, Fe, Pb, Cu y Cr en el efluente supero los límites permisibles establecidos por la resolución 0631 de 2015 para actividades de extracción de oro y otros metales preciosos en una relación de SST (44.2), SO_4 (1.1), S (1.8), CN (6.4), Hg (2650), Cd (2), Fe (19), Pb (7.5), Cu (2.7) y Cr (376). Lo anterior indica que el proceso de extracción influye de manera significativa en la concentración de los parámetros fisicoquímicos con respecto al afluente. Cabe resaltar que aunque la normatividad no presenta límites permisibles para diferentes parámetros fisicoquímicos; es de gran importancia analizar y reportar en el cuerpo de agua receptor con el ánimo de no generar problemas de contaminación, debido al grado de toxicidad de algunos de estos parámetros. Además, considerando las características fisicoquímicas del afluente las cuales se incrementan en la mayoría de los parámetros en función de los procesos de extracción y en algunos casos superando los límites permisibles; resulta de gran importancia realizar monitoreo en función del tiempo en el efluente y cuerpo de agua receptor con el ánimo de evitar problemas de contaminación. Asimismo, permite conocer la dinámica de contaminación mediante la cual se podrían establecer sistemas de tratamientos.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica efluentes y comparación con otros estudios.

Parámetro	Afluente (media $\pm$ s)	Efluente (media $\pm$ s)	Res 0631	Referencias*			
				1	2	3	4
pH	7.7 $\pm$ 0.74	8.2 $\pm$ 1.5	6-9	9.8 $\pm$ 0.7	7,7	1.3 $\pm$ 0.2	1,5 $\pm$ 0.23
Turbidez (NTU)	44.9 $\pm$ 6.0	146.5 $\pm$ 85.4	---	---	---	---	---
Acidez (mgCaCO ₃ /L)	40.4 $\pm$ 21.46	50.2 $\pm$ 40.4	Análisis y reporte	---	---	---	---
Alk (mgCaCO ₃ /L)	175.6 $\pm$ 85.1	176.4 $\pm$ 90.1	Análisis y reporte	---	---	---	---
CE (μ S/cm)	834.9 $\pm$ 398.	1180.1 $\pm$ 1020.1	---	4560 $\pm$ 433	---	18700 $\pm$ 15600	12420 $\pm$ 1010
SST (mg/L)	571.3 $\pm$ 299.5	2208.6 $\pm$ 411.0	50	---	---	73 $\pm$ 23.8	---
SD (mg/L)	421.5 $\pm$ 202.6	594.0 $\pm$ 509.8	---	2280 $\pm$ 220	---	---	---
ST (mg/L)	833.4 $\pm$ 1175.3	2752.3 $\pm$ 404.5	---	143000 $\pm$ 64000	---	---	---
SSED (mg/L)	< LD	0.4 $\pm$ 0.2	2.0	---	---	---	---
As (mg/L)	0.03 $\pm$ 0.01	0.04 $\pm$ 0.037	0.10	7.2 $\pm$ 2.7	12,11	14.9 $\pm$ 3.8	580 $\pm$ 94
Cd (mg/L)	0.14 $\pm$ 0.43	0.12 $\pm$ 0.1	0.05	---	---	---	---
Fe (mg/L)	8.02 $\pm$ 23.95	38.1 $\pm$ 19.6	2.0	3.8 $\pm$ 6.1	2,16	467 $\pm$ 206	---
Pb (mg/L)	0.36 $\pm$ 1.0	1.5 $\pm$ 0.9	0.2	0.2 $\pm$ 0.2	0,07	---	---
Zn (mg/L)	0.99 $\pm$ 1.6	1.5 $\pm$ 1.8	3.0	---	0,01	82 $\pm$ 8.7	---
Ni (mg/L)	0.02 $\pm$ 0.01	0.03 $\pm$ 0.01	0.5	---	---	102 $\pm$ 19	---
Cu (mg/L)	0.22 $\pm$ 0.27	2.7 $\pm$ 1.4	1.0	7.8 $\pm$ 3.9	7,98	95.7 $\pm$ 24.6	---
Cr (mg/L)	31.9 $\pm$ 17.1	188.0 $\pm$ 32.1	0.5	---	---	---	---
Hg (mg/L)	0.27 $\pm$ 0.5	5.3 $\pm$ 4.4	0.002	---	---	---	---
Ag (mg/L)	< LD	0.1 $\pm$ 0.01	0.2	---	---	---	---
DBO ₅ (mg/L)	8.4 $\pm$ 3.7	8.8 $\pm$ 0.9	50	4.3 $\pm$ 1.1	---	---	---
DQO (mg/L)	29.4 $\pm$ 13.3	28.5 $\pm$ 13.2	150	1240 $\pm$ 171	---	---	---
OD (mg/L)	5.5 $\pm$ 1.1	5.9 $\pm$ 1.7	---	---	---	---	---
G y A (mg/L)	< LD	< LD	10	---	---	---	---

Tabla 1- Continuación

Parámetro	Afluente (media ± s)	Efluente (media ± s)	Res 0631	Referencias*			
				1	2	3	4
P (mg/L)	0.58 ± 0.18	0.8 ± 0.1	Análisis y reporte	---	---	---	---
PO ₄ (mg/L)	0.3 ± 0.14	0.46 ± 0.2	Análisis y reporte	13.5 ± 5.8	---	---	---
NKT (mg/L)	3.3 ± 0.3	6.2 ± 5.7	---	---	---	---	---
NH ₃ (mg/L)	1.45 ± 0.1	4.6 ± 0.3	Análisis y reporte	50.8 ± 24.1	---	---	---
NO ₂ (mg/L)	0.5 ± 1.6	0.7 ± 0,6	Análisis y reporte	---	---	---	---
NO ₃ (mg/L)	3.80 ± 3.2	5.1 ± 2.6	Análisis y reporte	7.6 ± 1.7	---	---	---
Cl ⁻ (mg/L)	31.7 ± 20.3	37.5 ± 23.2	500	---	---	---	---
SO ₄ (mg/L)	1140.8 ± 526.2	1339.2 ± 625.8	1200	644 ± 117	---	18.2±3.8	5501 ± 614
S ⁻ (mg/L)	1.6 ± 1.1	1.8 ± 1.8	1.0	---	---	---	---
D Ca (mgCaCO ₃ /L)	109.5 ± 66.5	167.1 ± 149.0	Análisis y reporte	---	---	---	---
DT (mgCaCO ₃ /L)	262.4 ± 141.1	344.5 ± 165.6	Análisis y reporte	---	---	---	---
CN ⁻ (mg/L)	23.3 ± 24.5	6.4 ± 3.1	1.0	66.3 ± 32.5	2,58	---	---
Fenoles	< LD	< LD	0.2	---	---	---	---
Hidrocarburos totales	< LD	< LD	10	---	---	---	---
SAAM	< LD	< LD	Análisis y reporte	---	----	---	---

* Referencias

1. Acheampong et al. 2013
2. Acheampong et al. 2014
3. Amaral et al. 2018
4. Reis et al. 2018

La relación DBO y DQO indica si las aguas residuales son tóxicas, biodegradables o estables (Samudro y Mangkoedihardjo, 2012). La relación DBO/DQO fue 0.33, lo que indica bajos niveles de materia orgánica biodegradable en las aguas residuales (efluente) y expresa el grado de contaminación bajo de un agua residual con materia orgánica degradable por oxidación biológica (Samudro y Mangkoedihardjo 2010; Emenike et al., 2011; Ardila et al., 2012; Samudro y Mangkoedihardjo 2012). Por lo tanto, los niveles de DQO registrados para el efluente pueden atribuirse al oxígeno que se requiere principalmente para la oxidación de los compuestos orgánicos e inorgánicos. En general el efluente producido puede clasificarse como inorgánico con una alta carga de compuestos no biodegradables.

Los valores de pH para el afluente se encontraron dentro del límite de descarga. Las aguas residuales mostraron una buena capacidad de amortiguación, como se evidencia a partir de las bajas desviaciones estándar (Tabla 1). Un aumento en el pH en el efluente podría deberse a la oxidación del hierro (II) a iones de hierro (III) (Barnes y Clarke, 1964; Wilkin y McNeil, 2003), mientras que una disminución puede atribuirse posiblemente a la formación de ácido sulfúrico como resultado de oxidación.

Los valores altos de turbidez, SST y SSED en el efluente del proceso se pueden atribuir a la presencia de altas cantidades de rocas trituradas y materiales de tierra de los que se extrajo el oro. Los altos valores de la CE y SD se deben posiblemente a la presencia de altas cantidades de sólidos en suspensión y

electrolitos disueltos, como por ejemplo SO_4^{2-} (1339.2 mg/L), CO_3^{2-} (344.5 mg/L), Fe^{3+} (38.1 mg/L), NO_3^- (5.1mg/L), Cu^{2+} (2.7 mg/L), Pb^{2+} (1.5 mg/L) y PO_4^{3-} (0.46 mg/L) en el efluente del proceso.

Además, iones disueltos de hierro, sulfato e hidrógeno obtenidos de la oxidación del sulfuro mineral pueden causar un aumento en los SD y la acidez del agua de la mina (Alegbe et al., 2019) y consiguiente también aumento de la conductividad; generando que el recurso hídrico no sea apto para actividades agrícolas características que se desarrollan en zonas aledañas. Para los compuestos inorgánicos (NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} y SO_4^{2-}) analizados, no se presenta límite de permisible. Sin embargo, se indica según la normatividad que se analice y reporte por lo cual el contenido de nitrato (forma más oxidada de compuestos de nitrógeno) y fosfatos, se debe monitorear con frecuencia ya que estos son precursores de eutrofización en las aguas superficiales (Li et al., 2007, 2009). El contenido el SO_4^{2-} posiblemente se encuentra asociado al material parental y la biodegradación de tiocianato debido al proceso de extracción de oro por la aplicación de cianuro en ciertos procesos mineros (Gould et al., 2012).

En función de los procesos mineros se puede presentar contaminación por cianuro y mercurio en los efluentes, al ser utilizados para la actividad de extracción de oro *in situ* o por actividades mineras desarrolladas en la cuenca arriba de las fuentes hídricas que contaminan las aguas y posterior son utilizadas en otros procesos mineros cuenca debajo en función de la red de distribución hídrica. Por lo cual la contaminación por cianuro principalmente se debe al uso como químico en la

actividad de extracción en ciertos procesos mineros que se presentan en la zona de estudio. Aunque la biodegradación del cianuro reduce la concentración de cianuro libre, resulta en la formación de subproductos, como el cianato, tiocianato, sulfato, amoníaco, nitrato y concentraciones elevadas de metales (Gould et al., 2012). La tasa de conversión natural de cianuro a NH_3 depende en gran medida de las condiciones ambientales y puede no producir un efluente de calidad deseable que cumpla con las regulaciones de descarga (Lucile et al., 2010). Lo anterior se debe tener en cuenta debido a que la descarga continua de efluentes contaminados puede disminuir la velocidad a la que ocurren las transformaciones de cianuro natural.

Finalmente, la contaminación del efluente con metales pesados resulta de la consecuencia del método de procesamiento y el tipo de mineral aurífero procesado. Cabe resaltar que metales como Hg, Cr y Fe incrementan en mayor medida con respecto al afluente. En el caso del Hg debido a que es utilizado para el proceso de amalgamación del metal precioso oro (Au). A diferencia de Cr y Fe que se generan de los procesos de molienda y trituración del material parental. En general la calidad del agua de los efluentes se como fuertemente contaminado ($\text{CI} = 3064$; $\text{CI} > 5$), considerando como referencia la concentración máxima permisible establecida en la resolución 0631 de 2015, demostrando una gran variabilidad en la concentración de metales donde se encuentra como principales precursores de contaminación Cr, Hg, Pb, Cd y Fe reflejando tanto las fluctuaciones por tipo de proceso en la calidad del drenaje como la variación en la concentración de parámetros determinados de un sitio a otro.

La composición de las aguas residuales mineras es muy variada, ya que depende del tipo de mineral/metal extraído, las características geoquímicas locales, los procesos que se utilizan, etc. Pero en general, independientemente de sus especificidades, los efluentes mineros presentan componentes importantes como Al^{3+} , Si^{+4} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- y SO_4^{2-} y también pueden presentar metales pesados / metaloides como Hg, Cd, Cr, Hg y As (Chan y Dudeney, 2008; Langsch et al., 2012). Al comparar los resultados se observa que la mayoría de los parámetros fisicoquímicos son inferiores a los reportadas por Acheampong et al. (2013, 2014), Amaral et al. (2018), Reis et al. (2018) en efluentes de zonas de explotación mineras en diferentes países (Tabla 1). Lo anterior indica que aunque exista problemática de contaminación por vertimiento de los efluentes a cuerpos de aguas receptores (UPME-MME-UC, 2014b; UPME-MME-UC, 2016); comparadas con otras zonas a nivel mundial, la problemática de contaminación en cuerpos de aguas receptores sin previo tratamiento que regularmente se presenta a nivel nacional sería o se presenta en menor grado. Cabe resaltar que las características del cuerpo receptor juegan un papel primordial en la problemática; por lo cual las autoridades ambientales además establecer sistemas de tratamiento para los efluentes; deben aplicar sistemas de monitoreos en función del tiempo. En consecuencia, el deterioro de sistemas acuáticos por vertimiento de efluentes mineros debe mitigarse mediante acciones que propendan por la recuperación y preservación del ecosistema y por el desarrollo sostenible de actividades socioeconómicas, lo cual en primera

instancia teniendo en cuenta la caracterización fisicoquímicas y alternativas de tratamiento, el cual implica un manejo de buenas prácticas mineras.

Para identificar y analizar la fuente de origen o relación entre los diferentes parámetros fisicoquímicos, se aplicó un análisis estadístico de componentes principales (ACP). El cual reduce el tamaño de los datos al extraer un pequeño número de factores (Componentes principales, PC) para explorar la similitud del comportamiento de distribución entre parámetros y analizar las relaciones entre las variables observadas (Anexo 1) (Ma et al., 2015). Además, la aplicación de ACP a los datos muestra la carga de cada parámetro en los componentes principales (Tabla 2), lo que permite identificar las fuentes de contaminantes en las aguas residuales. Los valores de carga superiores a 0.71 se consideran altos, mientras que los valores inferiores a 0.32 son bajos (Liu et al. 2003 ; Yongming et al. 2006). Los valores de carga positivos indican que la contribución de la variable aumenta al aumentar la carga en la dimensión, mientras que los valores de carga negativos indican una disminución (Mazlum et al. 1999). El método PCA conduce a una reducción de la dimensión inicial del conjunto de datos a siete componentes que explica el 100 % de la variación total de datos. Los resultados de PCA con mayor porcentaje de variabilidad de los resultados se muestran en la figura 2.

El primer componente principal (PC1), con altas cargas de SST, Cd, Pb, Zn, DBO, DQO, P, NKT, NH₃ y NO₂ explicó 31.6% de la varianza total. PC1 podrá explicarse como el impacto de la fuente geofísica (SST, Cd, Pb, Zn) y la materia orgánica (DBO, DQO, NKT, NH₃ y NO₂) en el efluente. Los resultados de Pb también se

pueden atribuir a fuentes petrogénicas debido a la utilización de motores a gasolina. Cabe resaltar que la alta carga de OD indica la importancia del oxígeno para la biodegradación de la materia orgánica y la (bio) oxidación de los sulfuros de metales pesados en los efluentes (An et al., 2010). Por lo tanto, PC1 está relacionado con la fuente del mineral aurífero y las bacterias involucradas en la (bio) oxidación del mineral. PC2 representa 22.4 % de la variabilidad total de los datos, atribuido a Fe, Cr, Ni, Cu, Hg y Cd como metales representativos, asociado a la contribución del mineral indicando una fuente geológica de contaminación. Sin embargo, para Hg se encuentra relacionado con el proceso de extracción del mineral aurífero. Cabe resaltar que PC2 presenta una carga alta de PO_4 asociado posiblemente a contribución de materia orgánica o compuestos inorgánicos de fosfatos como por ejemplo fosfato de calcio presentes en el material parental. PC3 contribuyó con 14.5% a la varianza total explicada, con altos valores de carga positiva para SO_4 y turbidez, mostrando otra contribución tanto del procesamiento como de las fuentes geoquímicas de contaminación.

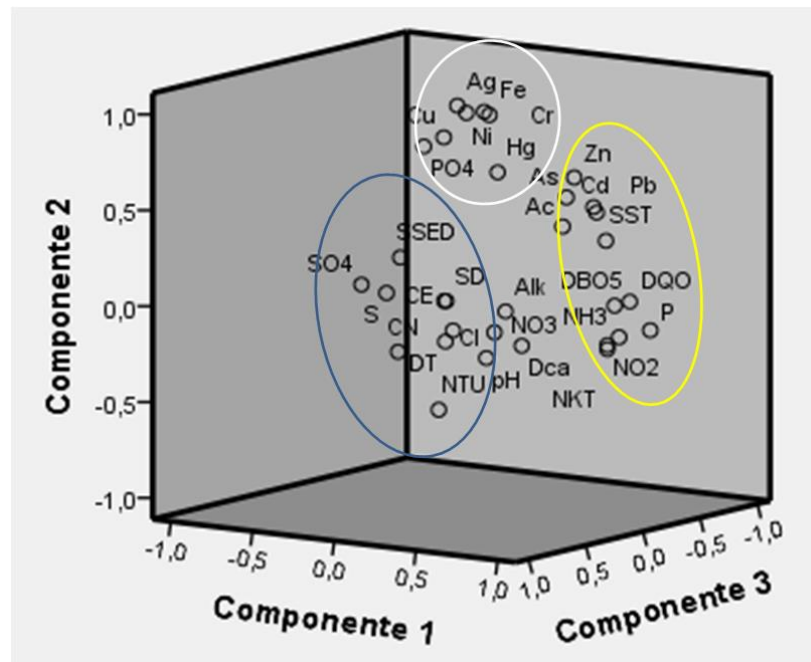


Figura 2. Componentes principales de mayor porcentaje de variabilidad de resultados

Tabla 2. ACP - Cargas de componentes principales

Parámetro	Componente							Parámetro	Componente						
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7		PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
DBO ₅	0.992	0.068	-0.055	-0.024	-0.071	-0.048	-0.002	P	0.676	-0.204	-0.685	-0.006	-0.057	-0.093	0.142
NH ₃	0.991	-0.104	0.037	-0.011	-0.073	-0.022	-0.007	As	0.192	0.446	-0.643	-0.379	0.431	0.143	0.036
NO ₂	0.964	-0.139	0.102	-0.035	-0.180	-0.065	0.053	S	-0.258	0.036	0.286	0.883	0.171	-0.105	-0.176
NKT	0.952	-0.164	0.085	0.087	-0.148	-0.089	-0.146	DCa	0.492	-0.180	0.176	0.763	0.027	-0.199	0.267
SST	0.913	0.391	0.041	-0.063	-0.039	-0.065	-0.045	pH	0.361	-0.239	0.297	0.741	-0.286	0.101	0.287
DQO	0.870	0.028	-0.096	0.220	0.245	0.187	0.299	NTU	0.176	-0.506	0.450	-0.656	0.256	0.056	-0.107
OD	0.680	0.143	-0.856	-0.198	-0.189	0.087	-0.151	SSSED	-0.334	0.180	0.058	-0.047	0.886	0.148	-0.209
Cd	0.842	0.528	0.021	-0.045	-0.049	-0.072	-0.053	CN	-0.189	-0.264	0.284	-0.035	0.834	-0.304	-0.155
Pb	0.824	0.555	0.021	-0.061	-0.053	-0.052	-0.063	CE	-0.109	-0.033	-0.004	-0.065	-0.056	0.989	0.033
Zn	0.705	0.697	0.021	-0.004	-0.035	-0.091	-0.083	SD	-0.112	-0.037	-0.028	-0.065	-0.056	0.988	0.038
Ag	-0.040	0.990	-0.022	-0.068	0.023	-0.082	-0.071	NO ₃	0.380	-0.110	0.254	-0.499	0.462	0.523	-0.207
Fe	0.131	0.978	-0.011	-0.091	0.047	-0.100	-0.078	DT	-0.015	-0.218	0.118	0.286	-0.377	-0.039	0.844
Cr	0.185	0.970	0.020	-0.055	0.004	-0.120	-0.081	Cl	-0.095	-0.194	-0.063	-0.231	-0.617	0.263	0.668
Ni	-0.072	0.931	-0.146	0.030	-0.046	0.276	0.165	Hg	0.448	0.742	0.323	0.184	-0.327	-0.067	0.018
Cu	-0.059	0.837	0.070	0.457	0.141	-0.146	-0.205	Ac	-0.017	0.234	-0.908	-0.052	-0.114	-0.148	0.286
PO ₄	-0.162	0.783	0.098	-0.295	0.322	0.379	-0.130	SO ₄	0.004	0.192	0.88	0.082	0.085	-0.086	0.410
Alk	-0.329	-0.233	-0.856	-0.198	-0.189	0.087	-0.151								
Eigenvalues	10.112	7.177	4.635	4.117	3.016	1.842	1.102								
% variance	31.6	22.4	14.5	12.9	9.4	5.8	3.4								
Cumulative %	31.6	54.0	68.5	81.4	90.8	96.6	100.0								

PC4 representa 12.9% de la varianza total con cargas altas de pH, S y DCa (Tabla 2). Lo anterior sugiere posiblemente una fuente geológica de contaminación en lugar del procesamiento de minerales. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las condiciones de pH pueden variar significativamente en función de las condiciones medioambientales. La contribución de PC5 a la varianza es del 9.4%. Presenta una alta carga positiva para CN y SSED. PC4 muestra el impacto del proceso de extracción del mineral aurífero en la calidad del efluente. Lo anterior sugiere una fuente geofísica de contaminación y procesamiento de minerales.

PC6 explicó el 5.8% de las variaciones de datos y tiene una carga con mayor valor positiva para CE, SD y NO₃, lo que refleja la contribución de los iones inorgánicos en los efluentes. Esto indica el impacto del origen geoquímico del mineral y el proceso de extracción de oro en la calidad de los efluentes. PC6, por lo tanto, mostró una fuente mixta de contaminación, es decir, de procesamiento y geológica. La CE y SD, por lo tanto deben ser considerados parámetros fisicoquímicos importantes a considerar en el tratamiento del efluente. PC7 con la contribución más baja de la variabilidad de los datos (3.5%) y cargas altas positivas para DT y Cl⁻ indican posiblemente fuentes geológicas.

5.2. Evaluación de riesgos para la salud

La figura 3 muestra el promedio de ADD a través de la ingesta diaria y las vías de exposición dérmica para los metales pesados. La exposición por metales por ADD

oral es mayor que ADD dérmica. ADD para metales pesados ingeridos y exposición dérmica presentaron el orden: Cr > Fe > Hg > Cu > Pb > Zn > Cd > Ag > As > Ni y Cr > Fe > Hg > Cu > Pb > Zn > As > Cd > Ag > Ni, respectivamente. Ni contribuyó con la ADD oral y dérmica más baja, mientras que Cr, Fe y Hg contribuyen con la exposición más alta; obteniendo valores que se encuentran entre 200 a 7000 veces superior respecto al valor más bajo.

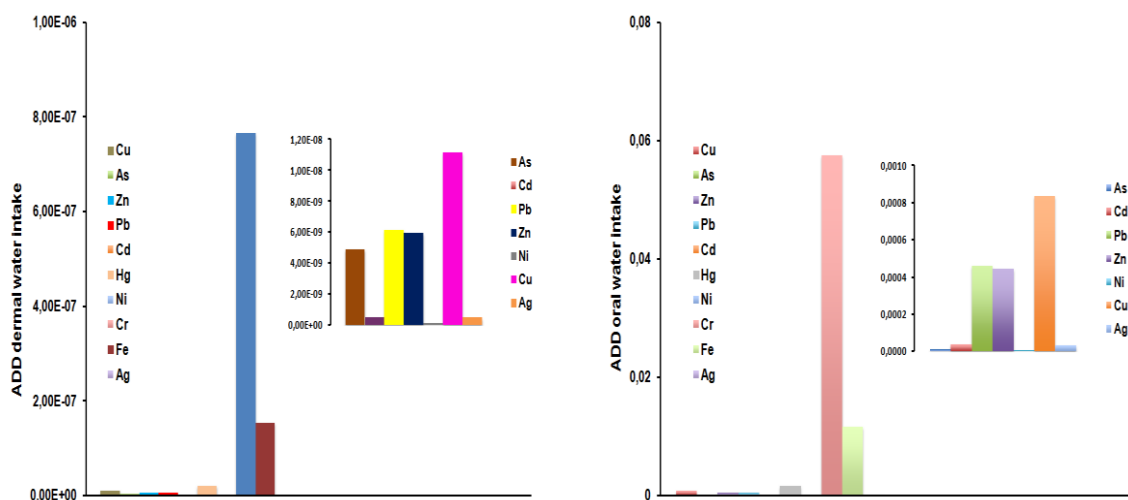


Figura 3. Dosis diaria promedio a través de varias vías de exposición (ADD, mg/kg/día). a) Dérmica, b) Oral.

El riesgo no carcinogénico evaluado por el coeficiente de peligro (HQ) y estimación del riesgo de todos los contaminantes metálicos (HI) presentaron el siguiente orden: Cr > Hg > Pb > Cd > As > Cu > Fe > Ag > Zn > Ni (Figura 4). El riesgo potencial asociado a HQ por exposición oral es superior a HQ por exposición dérmica. Excepto Cr y Hg presentan valores de HQ oral <1. HI > 1 (HI =50); con mayor aporte de Cr y Hg. Lo anterior indica que éstos metales representan un riesgo potencial para la salud por exposición dérmica y oral para

los trabajadores o residentes locales; asociado a la dinámica de extracción o proceso de beneficio del metal precioso (Au) desarrollados en la zona de estudio que incrementan la concentración de estos metales en los efluentes, con posterior descarga en cuerpo de aguas receptores afectando la calidad de la misma y generando problemas de contaminación en el ecosistema con repercusiones en la población debido a los procesos de bioacumulación y biomagnificación en la cadena trófica.

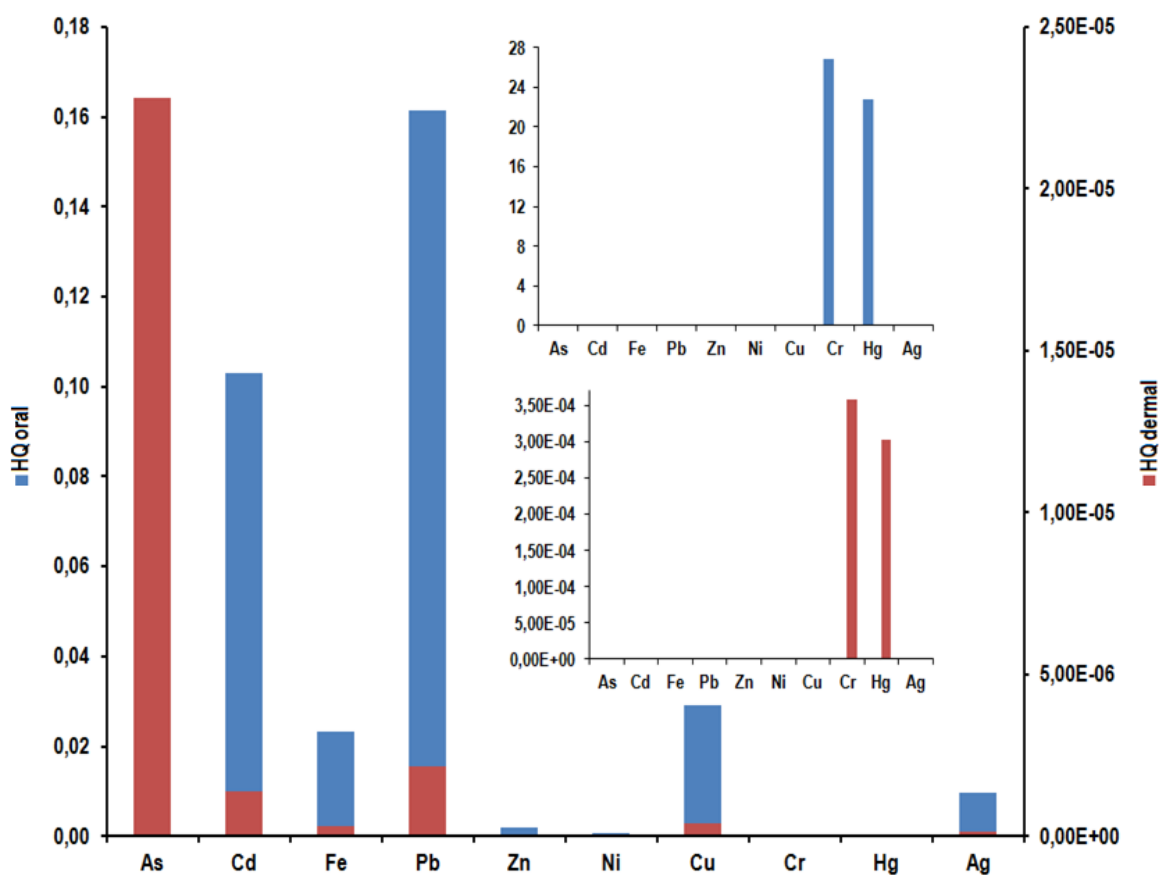


Figura 4. Riesgo no carcinogénico evaluado en función del cociente de riesgo (HQ) para los diferentes metales pesados.

El cromo es un elemento que se encuentra naturalmente en rocas, animales, plantas y en el suelo, en donde existe en combinación con otros elementos para

formar varios compuestos. El cromo se considera un elemento esencial natural, donde solo las formas trivalentes (Cr (III)) y hexavalentes (Cr (VI)) tienen importancia biológica. La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ha determinado que los compuestos de cromo (VI) son carcinogénicos en seres humano (ASTDR, 2000). La EPA ha establecido un nivel de contaminación máximo de 0.1 mg/L para la cantidad total de cromo en el agua potable. En promedio la concentración de Cr en los efluentes fue 188 mg/L por lo que se debe tener en cuenta que si incluso una pequeña exposición oral diaria podría contribuir sustancialmente a la exposición a Cr; corroborado con el valor de HQ oral = 26.8, resultado muy superior al referencia (HQ = 1); indicando un riesgo potencial para los residentes o trabajadores de la zona de estudio. A diferencia de los resultados de HQ para la exposición dérmica donde se presento que $HQ < 1$, indicando que no se presenta riesgo potencial por este tipo de exposición.

Cabe resaltar que Hg ocupa el tercer lugar después de Cr y Fe en función de ADDs. Además, presenta resultados muy superiores a la unidad para HQ oral ($HQ=22.7$), lo cual representa un problema de exposición (incluso a pequeñas cantidades) que puede causar graves problemas de salud presentados tras ingestión donde la exposición crónica podría generar trastornos neurológicos y del comportamiento, con síntomas como temblores, insomnio, pérdida de memoria, efectos neuromusculares, cefalea o disfunciones cognitivas y motoras (Kondo, 2000; Choi et al., 2014).

El hierro es considerado un tóxico único, ya que no es xenobiótico (Tenenbeim, 1998; Jover et al., 2001). La intoxicación aguda, aumenta la absorción intestinal y se satura la transferrina, quedando gran cantidad de hierro libre circulante que se deposita en los tejidos y causa alteración de los mecanismos celulares (Díez et al., 2003). Hierro corresponde al segundo metal en cuanto a la exposición diaria como en la exposición dérmica, lo que podría indicar efectos perjudiciales. Sin embargo, el valor de HQ fue menor a uno (1), lo que indica que no existe un riesgo potencial acumulativo para la salud a través de la ingesta diaria directa y la exposición dérmica a los habitantes.

Es importante tener en cuenta que el Pb no tiene una función biológica y de acuerdo con la base de datos IRIS es el único metal que presenta factor de pendiente (SF) para el evaluar riesgo acumulativo por cáncer (Garcia et al., 2010; USEPA IRIS, 2011). Por lo cual los resultados de este metal son de gran importancia en la evaluación de riesgos para la población. Los resultados de ADDs son bajos comparados con los obtenidos para Cr y Hg. Además, el valor de HQ es < 1 ; lo que no representa riesgo potencial. Aunque se debe destacar que incluso a bajas concentraciones podría presentar efectos en la salud como nefrotoxicidad y neurotoxicidad (Garcia et al., 2010). El riesgo acumulativo por cáncer de los efluentes mineros fue 3.1×10^{-11} ; asociado a Pb como único metal con valores de referencia (SF). El riesgo carcinogénico no excedió en el rango generalmente aceptado de 10^{-6} – 10^{-4} (USEPA, 2001). Por lo que este valor significa que la probabilidad es que aproximadamente 3 por 10,000,000,000,000 personas desarrolle cáncer como consecuencia de la exposición.

5.3. Alternativas de tratamientos de efluentes mineros

Para el tratamiento efluentes mineros en el distrito minero de San Martín de Loba, se propone la utilización de métodos activos que precisan de una operación continua, como sucede en una planta química de tratamiento y métodos pasivos en los que la intervención del hombre es mínima, por ejemplo humedales artificiales.

La caracterización fisicoquímica de efluentes mineros en el distrito minero de San Martín de Loba demuestra que los efluentes presentan altos contenidos de material en suspensión alterando la turbiedad del agua debido a los procesos mecánicos (físicos) entre ellos trituración, molienda y concentración. Además, presentan niveles de metales pesados y cianuro superiores a los límites permisibles en función de la normatividad colombiana (resolución 0631 de 2015). Lo anterior se debe a las características del material parental y la utilización de Hg; como también cianuro para el proceso de extracción del mineral aurífero; generando la necesidad de establecer sistemas de tratamiento que van desde la reducción de sólidos suspendidos en el agua y neutralización hasta la eliminación de metales pesados en los efluentes. A continuación, se describen los sistemas de tratamiento recomendados para tratar los efluentes.

5.3.1. *Sedimentadores y desarenadores*

- Aplicación: pretratamiento de efluentes, para la retención y remoción de material extraño arenas gruesas. Remoción entre 50% - 70% (SST) y entre 25% - 40% (DBO₅) (UNAD, 2015).
- Información necesaria: Cantidad y calidad del agua residual, Tipo de suelo y permeabilidad, Temperatura (media mensual y anual), Requerimientos de calidad para descargas superficiales y subsuperficiales (Resolución 0631 de 2015), Nivel freático, Topográficos: pendiente del terreno, Hidrológicos: precipitación (promedio máximo mensual), evapotranspiración y evaporación (promedio mensual)
- Características desarenadores: ubicados antes de tanques de sedimentación primaria y su diseño debe permitir el control de la velocidad del agua. Se recomienda instalar como mínimo dos unidades. Cada unidad debe tener la capacidad para operar con los caudales de diseño cuando la otra unidad está en limpieza. El tiempo de retención hidráulico debe basarse en el tamaño de las partículas que deben separarse; se recomienda un tiempo entre 20 segundos y 3 minutos. Operación y mantenimiento de acuerdo a lo establecido en el documento RAS 2017 Título E, en el que se recomienda lo siguiente: Los desarenadores con un caudal inferior a 50 L/s sean limpiados manualmente; para caudales mayores de 150 L/s se recomienda una limpieza mecánica. Para caudales intermedios debe justificarse la selección realizada. La tabla 3 muestra diferentes desarenadores a considerar a implementar según la información necesaria.

Tabla 3. Dimensiones recomendadas para desarenadores

Parámetro	Flujo horizontal	airado	tipo vórtice
Profundidad (m)	2--5	2--5	2.5--5
Longitud (m)	---	8--20	---
Ancho (m)	---	2.5--7	---
Relación largo/ancho	2.5:1- 5:1	3:1- 5:1	---
Relación ancho/profundidad	1:1 - 5:1	1:1 - 5:1	---
Diámetro (m)			
Cámara superior	---	---	1--7
Cámara inferior			1--2

Fuente: RAS 2017. TÍTULO E.

- Características sedimentadores: deben diseñarse para el caudal máximo horario esperado considerando tanques rectangulares y circulares. El tiempo de retención se determina con base en el caudal de aguas residuales y en el volumen del tanque de sedimentación. Se recomienda un período de retención mínimo de una hora tanto para los sedimentadores circulares como para los rectangulares. Para los tanques de sedimentación circulares se recomienda un rango de profundidades de 2.5 m a 4 m. En el caso de tanques rectangulares se recomienda un rango de profundidades entre 2 m y 5 m. Los sólidos sedimentados se almacenan temporalmente en el fondo de los equipos; estos deben ser removidos periódicamente. Las entradas deben diseñarse para dispersar la corriente de alimentación, difundir homogéneamente el flujo por todo el tanque. operación y mantenimiento se llevarán a cabo de acuerdo a lo establecido en el documento RAS 2017 Título E.

5.3.2. *Neutralización*

Existen diversas maneras para aumentar la alcalinidad. Sin embargo, de mayor aplicación y método pasivo se propone Drenaje anoxico en roca caliza (DARC) caracterizado por ser un lecho de roca caliza enterrado, a través del cual circula el agua con características de acidez, y en la que se disuelven carbonatos (principalmente carbonato cálcico) en un medio prácticamente carente de oxígeno. Cabe resaltar que los efluentes en general presentan valores de pH entre 6.5 a 8 unidades.

Se proponen dos estudios independientes para el diseño de los drenajes anóxicos en roca caliza, la metodología de Skousen (1994) para calcular el tiempo de la caliza considerando su disolución y la metodología de Watzlaf (1997) y la Agencia de Protección Ambiental -EPA (2000), para calcular la cantidad de grava caliza requerida para neutralizar la acidez de un afluente.

5.3.3. *Filtro con carbón activado*

Posterior al tratamiento mediante sedimentadores, se propone como unidad alterna de remoción de altas concentraciones de sólidos suspendidos la Filtración con arena, grava y carbón activado, mediante el uso de un filtro percolador.

Tratamiento secundario de los vertimientos generados, posterior a la sedimentación. El lecho del filtro podría contener rocas y medios de filtración

similares. La escoria de roca o cualquier medio filtrante no debe contener más de 5% por peso de materia cuya dimensión mayor sea tres veces su dimensión menor. No contendrá material delgado alargado y achatado, polvo, barro, arena o material fino, además de una capa de carbón activado con una profundidad mínima de 90 cm y máxima de 180 cm sobre los desagües, excepto cuando los estudios justifiquen una construcción especial (Ministerio de Desarrollo Económico 2000), periódicamente debe controlarse si los tubos de la regadera y sus aberturas están bloqueados y, en caso necesario, deben limpiarse. Esto rige también para todos los otros dispositivos de alimentación (sifones). En el caso de que existan varios filtros percoladores, la entrada de los efluentes debe distribuirse de acuerdo con la capacidad de cada uno de ellos.

5.3.4. *Precipitación química (coagulación - floculación)*

Para la coagulación, la dosis óptima de coagulante se debe mezclar adecuadamente con efluente. La dosis óptima varía dependiendo de las características fisicoquímicas del agua. Para determinar periódicamente la dosis óptima de coagulante se debe realizar “La prueba de jarra” dicha prueba se debe realizar con base a la Norma Técnica Colombiana NTC 3903. Cada tipo de coagulante requiere un sistema de dosificación específico dado la corrosión que este pudiera generar. La tabla 4 muestra la clase de dosificador y el material con el que se recomienda diseñar, de acuerdo con el tipo de coagulante. En caso de emplear otro material distinto de los mencionados en la tabla 5, éste debe ser resistente a la corrosión generada por la solución química.

Tabla 4. Dosificados y material de revestimiento en función de coagulante

Coagulante	Tipo de dosificador	Tuberías	Material Tanques de disolución (protegidos contra la corrosión)
Sulfato de aluminio	Dosificador en seco o en solución con tanques	Caucho, plástico, PVC	
Cloruro férrico en solución	Dosificador en solución con tanque	Caucho, plástico	Concreto revestido con pintura bituminosa o epóxica
Cloruro férrico en cristales	Dosificador en solución con tanque	Caucho, plástico, PVC	Plástico
Cloruro férrico anhidro	Dosificador en solución con tanque	Plástico, PVC	Acero inoxidable, concreto con revestimiento cerámico o plástico
Sulfato férrico	Dosificador en seco o en solución con tanque y agitador	Caucho, plástico, PVC	
Sulfato ferroso	Dosificador en seco o en solución con tanque y agitador	Caucho, plástico, PVC	Acero inoxidable, concreto revestido
Aluminiato de aluminio	Dosificador en seco o en solución con tanque y agitador	Caucho, hierro fundido, plástico	Hierro, concreto, acero inoxidable

Fuente: RAS-2017, Título C

- *Mezcladores hidráulicos*

Se utilizan arreglos tales como canales o cámaras con deflectores que producen condiciones turbulentas de flujo. Guía de Orientación para el Manejo de Vertimientos (CEPIS, 1988). Las estructuras hidráulicas se diseñarán bajo los criterios establecidos en el documento RAS 2017, título C.

5.3.5. *Humedales construidos*

Se propone la utilización de humedales construidos de flujo subsuperficial para eliminar las concentraciones de metales en los efluentes mineros posterior a las unidades de sedimentación y neutralización, debido a la mayor capacidad de remoción con respecto al humedal de flujo superficial (admiten mayor carga

orgánica), bajo riesgo de contacto del agua con las personas, menor aparición de insectos y menor utilidad para proyectos de restauración ambiental debido a la falta de lámina de agua accesible. Además, este sistema de tratamiento se proyecta como alternativa de tratamiento por su bajo costo de mantenimiento (García y Corzo, 2008).

Los humedales construidos como alternativa para reducir las concentraciones de metales en los efluentes, deberán localizarse aguas abajo de las unidades de sedimentación o decantación. De acuerdo con el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS- (2017), “debe hacerse una evaluación de las características del suelo, localización de cuerpos de agua, topografía, localización geográfica, líneas de propiedad y vegetación existente para localizar adecuadamente el humedal”. Según García y Corzo (2009), en este tipo de sistemas el agua circula horizontalmente a través del medio granular y los rizomas y raíces de las plantas. La profundidad del agua es de entre 0,3 m y 0,9 m. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados y con cargas de alrededor de 6 mg DBO/m² día.

5.3.6. *Relaveras y lechos se secado*

Se recomienda la construcción de relaveras para almacenar temporalmente y tratar las arenas y demás estériles sólidos procedentes de la etapa de beneficio de la minería de oro. Adicionalmente se propone construir lechos de secado como sistema para reducir la humedad (deshidratar) de los lodos depositados en el

fondo de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales en la minería de oro (lodos de los sedimentadores, DARC y humedales). La construcción de los lechos de secado ayudará en el proceso de manejo (transporte), reducción de la contaminación, además evitara la generación de aguas filtradas de los lodos y la posibilidad de aprovecharlos lo cual dependerá de las características fisicoquímicas de los mismos. Estos sistemas deben ser implementados en la minería subterránea o a cielo abierto de subsistencia, pequeña, mediana y gran escala.

Acorde a los diferentes procesos unitarios anteriormente mencionados el diagrama general de sistema de tratamiento a proponer se muestra en la figura 5.

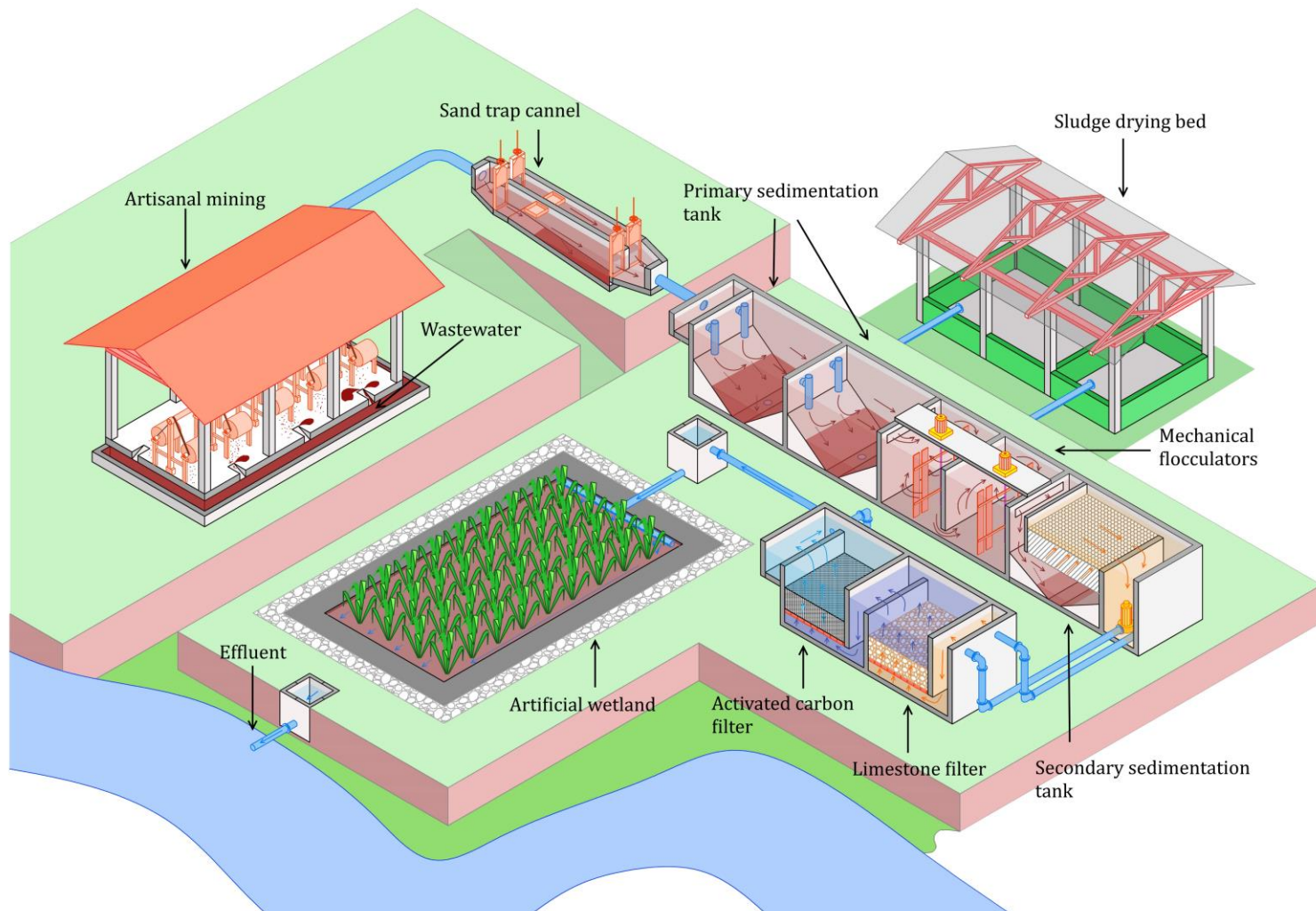


Figura 5. Sistema tratamiento con base en los procesos unitarios

6. CONCLUSIONES

La caracterización fisicoquímica de efluentes mineros en el distrito minero de San Martín de Loba demuestra que los efluentes presentan altos contenidos de material en suspensión debido a los procesos mecánicos (físicos). Además, presentan niveles de metales pesados y cianuro superiores a los límites permisibles en función de la normatividad colombiana (resolución 0631 de 2015); generando la necesidad de establecer sistemas de tratamiento que van desde la reducción de sólidos suspendidos y remoción de metales pesados en los efluentes.

La aplicación de análisis estadístico componentes principales, indica que las fuentes de contaminantes en las aguas residuales de la zona de explotación minera se han identificado como geológicas, geofísicas y asociadas con el proceso beneficio para la extracción del oro.

La evaluación de riesgos para la salud de metales pesados (Cr, Fe, Hg, Cu, Pb, Zn, Cd, Ag) mostró que los valores del cociente de peligro (HQ) para Cr y Hg, así como el valor del índice de peligro (HI) para todos los metales es > 1 ; lo que indica que el riesgo no cancerígeno tiende a ser significativo para las vías de exposición por efluentes mineros. El riesgo de cáncer de estar expuesto al plomo a través de efluentes mineros no excedió los límites de riesgo aceptables de $10^{-6} - 10^{-4}$ para fines regulatorios.

La alternativa de tratamiento de efluentes propuesta para el distrito minero del municipio San Martín de Loba en el departamento de Bolívar, considera procesos unitarios desde la reducción de altos contenidos de material en suspensión y metales pesados; empleando métodos activos que precisan de una operación continua, métodos pasivos en los que la intervención del hombre es mínima y utilizando recursos del medio y materiales autóctonos de la zona para su construcción ó aplicación en los procesos.

REFERENCIAS

Acheampong M.A, Meulepas R.J, Lens P.N (2010) Removal of heavy metals and cyanide from gold mine wastewater. J Chem Technol Biotechnol 85:590–613.

Acheampong M.A., Meulepas R.J., Lens P.N. (2013). Assessment of the effluent quality from a gold mining industry in Ghana. Environ Sci Pollut Res (2013) 20:3799–3811.

Acheampong M.A., Lens P.N. (2014). Treatment of gold mining effluent in pilot fixed bed sorption system. Hydrometallurgy 141 (2014) 1–7.

Alegbe M.J., Ayanda O.S., Ndungu P., Nechaev A., Fatoba O.O., Petrik L.F. (2019). Physicochemical characteristics of acid mine drainage, simultaneous remediation and use as feedstock for value added products. Journal of Environmental Chemical Engineering, 7: 103097.

Amaral C.S., Grossi B., Ramos L., Ricci C., Andrade H. (2018). Integrated UF–NF–RO route for gold mining effluent treatment: From bench-scale to pilot-scale. Desalination, 440:111–121.

An Q, Wu Y, Wang J, Li Z (2010) Assessment of dissolved heavy metal in the Yangtze River estuary and its adjacent sea, China. Environ Monit Assess 164:173–187

APHA, 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 25th ed. New York: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, DC.

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) 2000. Summary of public health chrome, Atlanta, GA: Department of Health and Human Services in the U.S, Public Health Service.

Ardila A.N. (2012). Remoción fotocatalítica de DQO, DBO5 y COT de efluentes de la industria farmacéutica. Revista Politécnica 15, 9-17.

Barnes I., Clarke F.E. Geochemistry of Ground Water in Mine Drainage Problems. Geological Survey Professional Paper 473-A, (1964), p. 6.

Bustillo, M., López, C., 1996. Recursos minerales, Tipología, Prospección, Evaluación, Explotación, Mineralurgia, Impacto Ambiental. Madrid, España: Móstones.

Casallas, M., Martínez, J., 2014. Contaminación de suelos con metales pesados e hidrocarburos en Colombia. Bogotá: Universidad EAN.

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). (1988). Sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades:

tecnología de pequeños sistemas de abastecimiento de agua en países en desarrollo. Lima, Perú. 391 p.

Contraloría General de la República. (2014). 17 departamentos y 80 municipios tienen problemas de contaminación por uso de mercurio. Recuperado de: <http://goo.gl/mMSBYF>

Chan, B.K.C., Dudeney, A.W.L., 2008. Reverse osmosis removal of arsenic residues from bioleaching of refractory gold concentrates, Miner. Eng. 21 (4), 272–278.

Choi AL, Mogensen UB, Bjerve KS, Debes F, Weihe P, Grandjean P, Budtz Jørgensen E. (2014). Negative confounding by essential fatty acids in methylmercury neurotoxicity associations. Neurotoxicol. Teratol. 42, 85–92.

Díez Sáez C, Esteban López J, Ayala Curiel J. Intoxicación por hierro y otros metales. En: Mintegui S. Grupo de Trabajo de Intoxicaciones. Manual de intoxicaciones en pediatría. Madrid: Ediciones Ergon SA; 2003. p. 191-201.

Duffus, J.H. 2002. "Heavy metals" a meaningless term? (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry. 74: 793-807.

ELAW, 2010. Alianza Mundial de Derecho Ambiental. Guía Para Evaluar EIAs de Proyectos Mineros. 132. USA.

Emenike, C., Fauziah, S., Agamuthu, P. (2011). Characterization of Active Landfill Leachate and Associated Impacts on Edible Fish (*Oreochromis mossambicus*). Malaysian Journal of Science, 30(2):99-104.

Fierro, M.J., 2012. Políticas mineras en Colombia. (J. Estrada Álvarez, Ed.) Bogotá, Bogotá, Colombia: Digiprint Editores E. U.

Gaikwad, R.W., Gupta, D.V., 2008. Review on removal of heavy metals from acid mine drainage, Appl. Ecol. Environ. Res. 6, 81–98.

García, J., Corzo, A., 2008. Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya.

Garcia-Leston, J., Mendez, J., Pasaro, E., & Laffon, B. (2010). Genotoxic effects of lead: an updated review. Environmental International, 36, 623–636.

Gould DW, King M, Mohapatra BR, Cameron RA, Kapoor A, Koren DW (2012) A critical review on destruction of thiocyanate in mining effluents. Miner Eng 34:38–47

Hilson, G. Defining “cleaner production” and “pollution prevention” in the mining context, Miner. Eng. 16 (2003) 305–321.

Hudson-Edwards, K.A., Jamieson, H.E., Lottermoser, B.G., 2011. Mine wastes: past, present, future. *Elements* 7 (6), 375-380.

Igbinosa, E.O., Okoh, A.I., 2009. Impact of discharge wastewater effluents on the physico-chemical qualities of a receiving watershed in a typical rural community. *Int J Environ Sci Technol* 6(2):175–182.

Jover D, Francisco, Andreu G, Lucio, Robert G, Jaqueline, & Merino S, Jaime. (2001). Intoxicación aguda por hierro en un caso. *Revista médica de Chile*, 129(6), 660-662.

Kakkar, P., Jaffery, F.N., 2005. Biological markers for metal toxicity. *Environ Toxicol Pharmacol*. 19: 335-349.

Kondo, K (2000). Congenital Minamata disease: Warnings from Japan's experience. *J Child Neurol*, 15, 458-464

Langsch, J.E., Costa, M., Moore, L., Morais, P., Bellezza, A., Falcão, S., 2012. New technology for arsenic removal from mining effluents, *J. Mater. Res. Technol.* 1 (3), 178–181.

Liu W.X, Li X.D, Shen Z.G, Wang D.C, Wai O.W.H, Li Y.S (2003). Multivariate statistical study of heavy metal enrichment in sediments of the Pearl River Estuary. *Environ Pollut* 121:377–388

Li M, Wu Y-J, Yu Z-L, Sheng G-P, Yu H-Q (2007) Nitrogen removal from eutrophic water by floating-bed-grown water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) with ion implantation. *Water Res* 41:3152–3158

Li M, Wu Y-J, Yu Z-L, Sheng G-P, Yu H-Q (2009) Enhanced nitrogen and phosphorus removal from eutrophic lake water by *Ipomoea aquatica* with low-energy ion implantation. *Water Res* 43:1247–1256

Lucile A, Lena A, Björn O (2010) Geochemical evaluation of mine water quality in an open-pit site remediated by backfilling and sealing. In: Wolkersdorfer C (ed) Freund, A (eds): *Mine Water & Innovative Thinking*. Sydney, Nova Scotia (CBU Press), pp 515–519

Lobo, F.L., Costa, M.P., Novo, E.M., 2015. Time-series analysis of Landsat-MSS/TM/OLI images over Amazonian waters impacted by gold mining activities, *Remote Sens. Environ.* 157, 170–184.

Ma, X.L., Zuo, H., Tian, M.J., Zhang, L.Y., Meng, J., Zhou, X.N., Min, N., Chang, X.Y., Liu, Y., 2015. Assessment of heavy metals contamination in sediments from

three adjacent regions of the Yellow River using metal chemical fractions and multivariate analysis techniques. Chemosphere 144 (3), 264e272.

Manahan, S., 2003. Toxicological chemistry and biochemistry. 3rd ed. CRC Press LLC. Boca Raton, FLA, 423p.

Mazlum N, Ozer A, Mazlum S (1999) Interpretation of water quality data by principal components analysis. Tr J of Eng and Environ Sci 23:19–26

McMahon, G., Remy, F., 2003. Grandes Minas y la Comunidad-Efectos socioeconómicos en Latinoamérica, Canadá y España (Primera ed.). (A. C. S.A., Ed.) Bogotá, Colombia: Alfaomega Colombia S.A.

Ministerio de Desarrollo Económico (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS – 2017), Sección II, Título E, Tratamiento de Aguas Residuales. Bogotá.

Mitasova, H., Barton, M., Ullah, I., Hofierka, J., Harmon, R.S., 2013. GIS-based soil erosion modeling. In: Treatise on Geomorphology. Elsevier Inc.

MME, 2019. Ministerio de Minas y Energía. (2009). Así Es La Minería. Documento informativo, Bogotá. D.C.

Mullan, D., 2013. Soil erosion under the impacts of future climate change: assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems. *Catena* 109, 234–246.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2011). Términos de Referencia-Estudio de Impacto Ambiental Para Explotación A Cielo Abierto de Oro TR- ECAO-1-01.

Mitchell, J.W., 2009. An assessment of lead mine pollution using macroinvertebrates at Greenside Mines, Glenridding. *Earth & E-environ* 4:27–57.

Monser, L., Adhoum, N., 2002. Modified activated carbon for the removal of copper, zinc, chromium and cyanide from wastewater. *Sep Purif Technol* 26:137–146.

Olivero, J., Young, F., Caballero, K., 2014. Contaminación por mercurio en aire del distrito minero de San Martín de Loba en el departamento de Bolívar, Colombia. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 30 (1) 7-13.

Reis B.G., Araújo A.L.B., Amaral M.C.S., Ferraz H.C. (2018). Comparison of Nanofiltration and Direct Contact Membrane Distillation as an alternative for gold mining effluent reclamation. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 133: 24–33.

Rocha, L., Olivero, J., Caballero, K., 2018. Impacto de la minería del oro asociado con la contaminación por mercurio en suelo superficial de San Martín de Loba, sur de Bolívar (Colombia). *Rev. Int. Contam. Ambie.* 34 (1) 93-102.

Samudro G, Mangkoedihardjo S (2010). Review on BOD, COD and BOD/COD ratio: a triangle zone for toxic, biodegradable and stable levels. *Int J of Acad Res* 2(4):235–239

Samudro G, Mangkoedihardjo S (2012). Urgent need of wastewater treatment based on BOD footprint for aerobic conditions of receiving water. *J Appl Sci Res* 8(1):454–457

Sekabira, K., Oryem Origa, H., Basamba, T.A., Mutumba, G., Kakudidi, E., 2010. Assessment of heavy metal pollution in the urban stream sediments and its tributaries. *Int J Environ Sci Technol* 7(3):435–446.

Tabelin, C.B., Sasaki, R., Igarashi, T., Park, I., Tamoto, S., Arima, T., Ito, M., Hiroyoshi, N., 2017. Simultaneous leaching of arsenite, arsenate, selenite and selenate, and their migration in tunnel-excavated sedimentary rocks: II. Kinetic and reactive transport modeling. *Chemosphere* 188, 444–454.

Tenenbeim M. Toxicokinetics and toxicodynamics of iron poisoning. *Toxicol Lett* 1998; 28; 102-103: 653-6.

Tessier, A., Campbell, P.G.C., Bisson, M., 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Anal Chem 51(7): 814-51.

Tost, M., Hitch, M., Chandurkar, V., Moser, P., Feiel, S., 2018. The state of environmental sustainability considerations in mining. J. Clean. Prod. 182, 969-977

UPME-MME-UC, 2014b. Unidad de Planeación Minero Energética, Ministerio de Minas y Energía, Universidad de Córdoba. Incidencia real de la minería del carbón, del oro y del uso de mercurio en la calidad ambiental con énfasis especial en el recurso hídrico - Diseño de herramientas para la planeación sectorial. Informe Técnico (Reporte Final). Bogotá D.C.

UPME-MME-UC, 2016. Unidad de Planeación Minero Energética, Ministerio de Minas y Energía, Universidad de Córdoba. Identificación y caracterización de Unidades Básicas de Beneficio Aurífero en 261 Municipios de Colombia. Informe Técnico (Reporte Final). Bogotá D.C.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Manejo de aguas residuales en pequeñas comunidades. Recuperado el 12 de noviembre de 2015 de: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358041/EXE/leccin_22_sedimentadores.html

USEPA (2001) Risk assessment guidance for superfund: volume III— part A, process for conducting probabilistic risk assessment. US environmental protection agency, Washington, DC (EPA 540-R-02-002)

USEPA IRIS (2011) (US Environmental Protection Agency)'s integrated risk information system, 2011. Environmental Protection Agency Region I, Washington DC 20460. US EPA, 2012. <http://www.epa.gov/iris>

Wilkin R.T., McNeil M.S. (2003). Laboratory evaluation of zero-valent iron to treat water impacted by acid mine drainage, *Chemosphere* 53: 715–725.

Yongming H, Peixuan D, Junji C, Posmentier E.S (2006). Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China. *Sci Total Environ* 355:176–186.

Zhang, Y., Degroote, J., Wolter, C., Sugumaran, R., 2009. Integration of Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) into a GIS framework to assess soil erosion risk. *Land Degrad. Dev.* 20 (1), 84–91.

Zhao, Q., Guo, F., Zhang, Y., Ma, S., Jia, X., Meng, W., 2017. How sulfate-rich mine drainage affected aquatic ecosystem degradation in northeastern China, and potential ecological risk. *Sci. Total Environ.* 609, 1093–1102.

Anexo 1. Análisis de correlación parámetros fisicoquímicos

	Acidez	Ag	Alk	As	Cd	CE	Cl	CN	Cr	Cu	D Ca	DBO	DQO	DT	Fe	Hg
Acidez																
Ag	-0,06															
Alk	0,78	-0,10														
As	0,50	0,52	0,61													
Cd	-0,02	-0,03	-0,19	0,14												
CE	-0,08	-0,12	0,22	0,07	-0,13											
Cl	0,38	-0,01	0,35	0,12	0,03	0,38										
CN	-0,32	-0,18	-0,09	0,00	-0,19	-0,30	-0,47									
Cr	-0,19	0,46	-0,36	0,23	0,82	-0,34	-0,11	-0,23								
Cu	-0,11	0,98	-0,13	0,43	-0,04	-0,16	-0,09	-0,11	0,45							
D Ca	-0,09	-0,41	-0,54	-0,67	0,25	-0,21	-0,25	-0,08	0,04	-0,32						
DBO	-0,07	0,98	-0,20	0,46	0,03	-0,16	-0,08	-0,24	0,51	0,95	-0,29					
DQO	0,11	0,00	0,04	0,26	0,93	0,02	0,21	-0,15	0,71	0,02	0,13	0,01				
DT	0,20	-0,40	-0,18	-0,59	-0,03	0,02	0,58	-0,34	-0,25	-0,40	0,57	-0,37	-0,01			
Fe	-0,08	0,84	-0,17	0,57	0,50	-0,22	-0,04	-0,14	0,83	0,81	-0,28	0,85	0,48	-0,44		
Hg	-0,30	-0,20	-0,57	-0,54	0,69	-0,01	0,15	-0,34	0,53	-0,15	0,66	-0,12	0,61	0,51	0,12	

Continuación Anexo 1. Análisis de correlación parámetros fisicoquímicos

	Acidez	Ag	Alk	As	Cd	CE	Cl	CN	Cr	Cu	D Ca	DBO	DQO	DT	Fe	Hg
NH3	0,00	-0,13	-0,18	0,10	1,00	-0,11	0,04	-0,18	0,77	-0,13	0,29	-0,06	0,92	0,01	0,41	0,70
Ni	0,32	-0,09	0,57	0,15	-0,10	0,74	0,77	-0,49	-0,28	-0,11	-0,35	-0,18	0,16	0,26	-0,19	0,01
NKT	-0,04	-0,15	-0,20	0,03	0,98	-0,14	-0,03	-0,12	0,76	-0,12	0,35	-0,09	0,93	0,01	0,39	0,74
NO2	-0,08	-0,20	-0,56	-0,30	0,56	-0,12	-0,23	-0,28	0,40	-0,23	0,76	-0,03	0,32	0,30	0,08	0,64
NO3	-0,43	0,46	-0,45	0,19	0,05	0,09	-0,44	-0,12	0,34	0,37	-0,14	0,56	-0,20	-0,51	0,45	-0,11
NTU	-0,50	0,19	-0,43	0,22	0,18	0,04	-0,18	0,39	0,26	0,07	-0,24	0,22	0,04	-0,36	0,35	-0,08
P	0,57	-0,25	0,49	0,33	0,55	-0,23	0,08	-0,35	0,36	-0,29	-0,07	-0,22	0,50	-0,10	0,08	0,10
Pb	-0,07	0,92	-0,16	0,54	0,35	-0,17	0,00	-0,25	0,75	0,90	-0,31	0,93	0,34	-0,40	0,98	0,07
pH	-0,14	-0,14	-0,27	-0,50	0,40	0,06	0,30	-0,25	0,27	-0,01	0,52	-0,15	0,52	0,54	0,01	0,81
PO4	-0,31	-0,12	0,16	0,24	-0,22	0,73	0,06	0,36	-0,37	-0,17	-0,46	-0,18	-0,10	-0,37	-0,16	-0,36
S	-0,32	-0,16	-0,22	-0,57	-0,23	-0,11	-0,32	0,33	-0,22	0,05	0,43	-0,20	-0,11	0,14	-0,29	0,21
SD	-0,06	-0,13	0,24	0,08	-0,13	1,00	0,39	-0,30	-0,34	-0,17	-0,21	-0,16	0,02	0,02	-0,22	-0,02
SO4	-0,55	0,66	-0,71	-0,15	-0,04	-0,16	0,01	0,01	0,35	0,66	0,05	0,68	-0,10	0,08	0,54	0,24
SSED	-0,22	-0,32	0,26	0,10	-0,35	0,15	-0,34	0,83	-0,49	-0,27	-0,33	-0,42	-0,23	-0,46	-0,36	-0,53
SST	-0,03	-0,03	-0,20	0,15	1,00	-0,12	0,03	-0,17	0,82	-0,04	0,25	0,03	0,93	-0,03	0,50	0,68
Zn	-0,10	0,46	-0,23	0,33	0,84	-0,24	-0,06	-0,29	0,99	0,45	-0,03	0,51	0,76	-0,30	0,84	0,49

Continuación Anexo 1. Análisis de correlación parámetros fisicoquímicos

	NH3	Ni	NKT	NO2	NO3	NTU	P	Pb	pH	PO4	S	SD	SO4	SSED	SST
Ni	-0,09														
NKT	0,99	-0,10													
NO2	0,58	-0,42	0,55												
NO3	0,00	-0,42	-0,07	0,35											
NTU	0,17	-0,41	0,08	0,20	0,65										
P	0,57	0,10	0,53	0,17	-0,20	-0,29									
Pb	0,26	-0,12	0,23	0,02	0,47	0,25	0,00								
pH	0,41	0,30	0,50	0,18	-0,53	-0,48	-0,03	0,01							
PO4	-0,20	0,32	-0,24	-0,33	0,21	0,51	-0,38	-0,19	-0,35						
S	-0,22	-0,07	-0,07	-0,18	-0,45	-0,50	-0,40	-0,25	0,58	-0,16					
SD	-0,11	0,75	-0,14	-0,12	0,08	0,02	-0,22	-0,17	0,05	0,72	-0,11				
SO4	-0,10	-0,29	-0,11	0,10	0,42	0,41	-0,67	0,60	0,16	-0,10	0,08	-0,17			
SSED	-0,32	-0,06	-0,28	-0,52	-0,16	0,24	-0,25	-0,44	-0,35	0,68	0,27	0,15	-0,33		
SST	1,00	-0,11	0,98	0,57	0,06	0,22	0,53	0,35	0,39	-0,20	-0,25	-0,13	-0,03	-0,33	
Zn	0,79	-0,16	0,77	0,35	0,31	0,21	0,43	0,76	0,26	-0,31	-0,26	-0,24	0,26	-0,48	0,84

Anexo 2. Conglomerado de resultados parámetros fisicoquímicos

P	pH	NTU	Ac	Alk	CE	SST	SD	ST	SSED	As	Cd	Fe	Pb	Zn	Ni	Cu	Cr	Hg	Ag
			mgCaCO ₃ /L		μS/cm	mg/L	mg/L			mg/L									
E	7,99	10	34	350	290	39	145	145	<0,1	0,0998	0,00026	0,29	0,060	<L.D	<L.D	<L.D	0,062	1,26	<0,05
E	7,98	113	34	160	1057	3772	528,5	528,5	<0,1	0,0927	1,37400	80	3,331	4,1	0,06	0,54	0,134	1,19	<0,05
E	8,04	10	25	215	1050	46	525	525	<0,1	0,0021	0,00923	0,07	0,003	0,15	0,03	<L.D	37	0,03	<0,05
E	8,85	4	30	125	1742	< 6	871	874	<0,1	0,0016	0,00013	0,41	0,005	<L.D	0,02	0,12	43	0,03	<0,05
E	7,54	15	24	265	785	61	392,5	392,5	<0,1	0,0021	0,00016	0,25	0,021	<L.D	0,02	<L.D	36	0,01	<0,05
E	8,54	139	24	175	430	148	215	215	<0,1	0,0195	0,00135	0,87	0,058	0,09	0,01	<L.D	45	0,01	<0,05
E	6,02	3,12	80	90	750	< 6	375	378	<0,1	0,0018	0,00117	0,16	0,000	0,10	0,02	<L.D	41	0,06	<0,05
E	7,12	0,87	38	125	560	< 6	280	283	<0,1	0,0147	0,00005	0,18	0,000	<L.D	0,02	<L.D	37	0,08	<0,05
E	7,63	173	32	72	630	410	315	315	<0,1	0,0147	0,01010	4	0,461	1,10	0,02	0,02	44	0,22	<0,05
E	7,52	25	38	110	780	82	390	393	<0,1	0,0015	0,00102	1,28	0,002	0,39	0,02	<L.D	36	0,11	<0,05
E	7,56	1,43	85	245	1110	12	599,4	874	<0,1	<L.D	<L.D	0,18	0,000	<L.D	0,03	<L.D	<L.D	0,00	<0,05
S	8,41	169	28	225	4200	213	2100	2313,5	0,5	0,0521	0,00070	1,30	0,114	0,07	0,04	<L.D	0,043	3,57	<0,05
S	10,2	184	48	125	930	13825	465	14290	<0,1	0,0528	0,36100	48	3,715	4,1	0,02	0,27	274	10,98	<0,05
S	10,2	118	48	125	1130	183	565	748	<0,1	0,0026	0,00055	0,40	0,000	<L.D	0,03	<L.D	39	7,32	<0,05
S	10,84	12,7	22	140	760	86	380	466,5	0,5	0,0024	0,00371	1,74	0,003	0,41	0,02	1,9	51	5,95	<0,05
S	7,52	176	32	255	700	197	350	547,1	0,1	0,0033	0,00093	1,24	0,056	0,13	0,01	<L.D	42	5,12	<0,05
S	7,67	171	38	40	1118	236	559	795	<0,1	0,0064	0,00097	0,26	0,035	0,13	0,01	<L.D	44	5,67	<0,05
S	6,99	>1000	84	155	970	7380	485	7865,5	0,5	0,0880	0,25800	265	2,822	4,3	0,08	3,0	1102	14,63	0,14
S	7,17	124	28	180	660	146	330	476,3	0,3	0,0280	0,00596	5	0,515	1,13	0,02	0,03	97	2,74	<0,05
S	6,15	304	22	160	550	566	275	841,8	0,8	0,0636	0,00043	13	0,013	0,04	0,01	<L.D	35	0,06	<0,05
S	7,84	188	42	145	883	1453	441,5	1894,5	<0,1	0,0929	0,03500	80	9,284	2,8	0,02	8,5	196	2,38	0,08
S	7,43	18,08	160	390	1080	10	583,2	593,5	0,3	0,0915	0,00008	2,39	0,002	<L.D	0,03	<L.D	<L.D	0,01	<0,05

Continuación. Anexo 2. Conglomerado de resultados parámetros fisicoquímicos

P	DBO5	DQO	SST	G Y A	P	PO4	NKT	NH3	NO2	NO3	Cl-	SO4	S-	Dca	DT	CN-
	mg/L													mgCaCO ₃ /L	mg/L	
E	< 2.14	20,12	39	<2	<0,30	0,3	< 1.0	< 1.0	3,76	2,21	40,78	1300	3,6	250	500	<2,5
E	< 2.14	43,1	3772	2.5	<0,30	0,54	< 1.0	< 1.0	<0.05	8,99	19,29	1037,5	<0.5	77	156	<2,5
E	< 2.14	11,49	6	<2	<0,30	< 0,1	< 1.0	< 1.0	<0.05	2,1	66,48	1350	2,4	68	464	<2,5
E	< 2.14	22,99	< 6	<2	0,51	< 0,1	3,47	< 1.0	<0.05	<0.5	<3.15	887,5	0,5	20	28	51,5
E	< 2.14	< 9,3	9	<2	<0,30	< 0,1	< 1.0	< 1.0	0,021	0,5	57,98	825	0,9	77	267	<2,5
E	11,1	45,98	8	<2	<0,30	< 0,1	< 1.0	< 1.0	<0.05	3,55	8,99	887,5	2,1	62	114	9,0
E	< 2.14	< 9.3	< 6	<2	<0,30	< 0,1	< 1.0	< 1.0	<0.05	5,24	9,99	1175	1,4	186	307	<2,5
E	< 2.14	31,61	< 6	<2	<0,30	< 0,1	< 1.0	< 1.0	0,31	2,63	12,4	1000	0,7	124	214	9,2
E	9,9	28,74	410	<2	0,44	< 0,1	< 1.0	< 1.0	0,56	2,24	27,79	1762,5	2,6	136	210	<2,5
E	< 2.14	14,37	82	<2	<0,30	< 0,1	< 1.0	< 1.0	<0.05	9,6	27,79	2175	0,9	144	286	<2,5
E	4,1	45,98	12	<2	0,78	0,53	3,1	1,45	0,09	0,9	45,68	149	0,4	60	340	<2,5
S	< 2.14	28,74	56	<2	<0,30	0,34	< 1.0	< 1.0	<0.05	5,48	52,28	1075	1,2	66	310	<2,5
S	60	63,22	4762	2.5	0,83	< 0,1	12,76	4,59	1,16	4,4	34,19	1200	<0.5	310	374	<2,5
S	< 2.14	25,86	8	<2	<0,30	< 0,1	< 1.0	< 1.0	0,2	<0.5	84,97	2012,5	1,7	234	750	<2,5
S	< 2.14	28,74	19	<2	<0,30	< 0,1	2,86	< 1.0	<0.05	<0.5	<3.15	1337,5	6,4	348	370	4,2
S	< 2.14	< 9.3	9	<2	<0,30	< 0,1	2,98	< 1.0	0,153	1,4	40,08	900	1,1	49	249	<2,5
S	11.3	14,37	31	<2	<0,30	< 0,1	< 1.0	< 1.0	1,37	8,38	<3.15	1687,5	1,4	466	490	<2,5
S	13	25,86	< 6	<2	<0,30	0,49	< 1.0	< 1.0	<0.05	1,86	19,99	1375	1,8	88	230	<2,5
S	2.7	17,24	< 6	<2	0,71	0,11	< 1.0	< 1.0	<0.05	6,18	15,4	950	0,8	56	236	<2,5
S	< 2.14	22,99	673	<2	<0,30	0,26	< 1.0	< 1.0	<0.05	5,14	8,99	1425	1,0	79	198	8,6
S	6.30	28,74	102	<2	<0,30	0,12	< 1.0	< 1.0	<0.05	8,33	31,09	2587,5	0,8	16	180	<2,5
S	7,4	28,74	125	<2	0,81	< 0,1	< 1.0	< 1.0	<0.05	<0.5	50,48	181	<0.5	126	402	<2,5