

Análisis Físicoquímico de los Drenajes de Túnel en la Sociedad Minera de Santander y la
Sociedad Minera Calvista, en el Municipio de California, Santander

Maira Alejandra Trujillo García

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Química

Director

Omar Andrés Benavides Prada

Prof. Escuela de Ingeniería Química

Tutor

Víctor Julio Moreno Monsalve

Coordinador Grupo de Seguimiento para la Sostenibilidad CDMB

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Hoy quiero dedicar este gran logro a Dios y la virgencita, por iluminarme cada día y darme la fortaleza que necesitaba. A mi nonita María Esther Morantes de García, que desde el cielo sé que se siente muy orgullosa de todo lo que he logrado.

A mi mamá Ligia Amparo García Morantes, mi ejemplo a seguir y mi mayor motivación, la que me ha apoyado y aconsejado desde el primer día.

A mi tío Jairo Alirio García Morantes, que ha estado siempre para mí, apoyándome en cada paso que doy, siendo como un padre para mí, y dándome esas palabras alentadoras siempre que lo necesité.

A toda mi familia, mis tíos, mi nonito Gilberto, mi prima Kathe, que en ningún momento me dieron la espalda, por el contrario, estuvieron en cada paso que he dado.

Y a ti Cesar David Navas Suarez, mi amor, compañero y amigo, esta es una de nuestras primeras metas que cumplimos juntos.

Agradecimientos

Quiero comenzar dando gracias a Dios por permitirme ser lo que hoy soy, por este gran logro en mi vida, por una etapa que culmina con éxito y por las que llegan. Quiero darte las gracias a ti mamá, por tu gran esfuerzo para sacarme adelante, por ser una guerrera y convertirme en la mujer que soy y llegaré a ser, por cada consejo durante mi carrera, por celebrar conmigo mis triunfos y alentarme en los momentos complicados, las palabras se me hacen cortas para decirte cuan agradecida estoy contigo y lo orgullosa que me siento de ser tu hija, este logro es de las dos.

A ti tío Jairo quiero agradecerte por tu apoyo incondicional, por ser esa persona tan maravillosa y especial que tengo en la vida, por estar siempre para mí, gracias por todos los consejos, por tu esfuerzo para verme triunfar, he sido muy afortunada al tenerte, gracias por ser como un papá para mí, y por celebrar juntos cada triunfo que tenemos.

Quiero también agradecerte a ti tía Saira, por estar en todos los momentos de mi vida, en cada meta cumplida, en los buenos momentos y no tan buenos, por tu alegría y tus consejos también, y sobre todo por el apoyo que siempre me has brindado.

A mis tíos, padrinos y mi nonito, por ser tan especiales conmigo, por brindarme tanto amor y apoyo que sin duda me hacen sentir la mujer más afortunada, gracias por acompañarme en este camino.

A la CDMB, por permitirme desarrollar mi proyecto de grado en sus instalaciones, por los conocimientos y experiencias que adquirí a lo largo de mi práctica empresarial y por su acogida.

Y, por último, a mi director de proyecto por su dedicación y esfuerzo para que todo saliera bien.

Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Descripción de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga –CDMB	13
2. Objetivos	14
2.1 Objetivo General	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. Marco Conceptual	14
3.1 Análisis Fisicoquímico	14
3.2 Drenaje Acido de Mina (DAM)	15
3.2.1 Control del Drenaje Ácido de Mina (DAM)	16
3.3 Vertimiento	16
3.4 Normatividad	17
3.4.1 Resolución 631 de 2015	17
3.5 Índice de Calidad de Agua (ICA)	17
4. Metodología	20
4.1 Etapa 1	20
4.2 Etapa 2	21
4.3 Etapa 3	21
5. Resultados	22
5.1 Análisis pH	22
5.2 Análisis de Caudal	23

ANÁLISIS FISICOQUÍMICO DE LOS DRENAJES DE TÚNEL	5
5.3 Análisis de Sólidos Suspendidos.....	24
5.4 Análisis de Grasas y Aceites.....	25
5.5 Contenido de Iones	26
5.6 Contenido de Metales	27
5.7 Demanda Química y Bioquímica de Oxígeno	29
5.8 Interpretación ICOS	30
5.9 Resultados ICOS	30
5.10 Propuesta de Mejora.....	34
6. Conclusiones.....	39
7. Recomendaciones	40
Referencias Bibliográficas	41
Apéndices.....	45

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Metodología Propuesta</i>	20
Figura 2. <i>Análisis de pH</i>	23
Figura 3. <i>Caudal 2021</i>	24
Figura 4. <i>Sólidos Suspendidos 2021</i>	25
Figura 5. <i>Grasas y Aceites 2021</i>	26
Figura 6. <i>Contenido de Iones</i>	27
Figura 7. <i>Demanda Química y Bioquímica de Oxígeno 2021</i>	29
Figura 8. <i>Humedal Artificial de Flujo</i>	38

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Drenajes a los Cuales se les Realizó Análisis Físicoquímico</i>	22
Tabla 2. <i>Contenido de Metales</i>	28
Tabla 3. <i>Interpretación de Índices de Contaminación del Agua (ICOS)</i>	30
Tabla 4. <i>Índices de Calidad y Contaminación</i>	31
Tabla 5. <i>Especies Tropicales Nativas</i>	35

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. <i>Resultados Obtenidos</i>	45
Apéndice B. <i>Cálculos Índices De Contaminación</i>	53

Resumen

Título: Análisis Fisicoquímico de los Drenajes de Túnel en la Sociedad Minera de Santander y la Sociedad Minera Calvista, en el Municipio de California, Santander*

Autor: Maira Alejandra Trujillo García **

Palabras Claves: Drenaje De Túnel, Análisis Fisicoquímico, Vertimiento.

Descripción:

En el presente trabajo se realiza la caracterización fisicoquímica de diferentes drenajes de túnel de antigua minería ubicados en el municipio de California, Santander, se analizan parámetros como pH, caudal, sólidos suspendidos, contenido de iones, contenido de metales, demanda química y bioquímica de oxígeno, se hallan los índices de contaminación de agua ICOS, con el objetivo de conocer en qué estado se encuentran dichas aguas, y si están o no contaminando las quebradas, esto se realiza mediante la comparación con la norma; en colaboración con la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.

Así mismo es presentada una propuesta de mejora, la cual consta de la implementación de humedales artificiales de flujo subsuperficial, para el tratamiento de dichas aguas antes de que sean vertidas directamente a las quebradas.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Omar Andrés Benavides Prada, Prof. Escuela de Ingeniería Química. Tutor: Víctor Julio Moreno Monsalve, Coordinador Grupo de Seguimiento para la Sostenibilidad CDMB

Abstract

Title: Physicochemical Analysis of the Tunnel Drainage in the Santander Mining Society and the Calvista Mining Society, in the Municipality of California, Santander*

Author: Maira Alejandra Trujillo García**

Key Words: Tunnel Drainage, Physicochemical Analysis, Shedding

Description:

In the present work, the physicochemical characterization of different old mining tunnel drainages located in the municipality of California, Santander is carried out, parameters such as pH, flow rate, suspended solids, ion content, metal content, chemical and biochemical demand of oxygen, the ICOS water contamination indices are found, in order to know what state these waters are in, and whether or not they are contaminating the streams, this is done by comparing them with the norm; in collaboration with the Regional Autonomous Corporation for the Defense of the Bucaramanga Plateau.

Likewise, an improvement proposal is presented, which consists of the implementation of artificial subsurface flow wetlands, for the treatment of said waters before they are discharged directly into the streams.

* Degree work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Omar Andrés Benavides Prada, Prof. School of Chemical Engineering. Tutor: Víctor Julio Moreno Monsalve, CDMB Sustainability Monitoring Group Coordinator

Introducción

La minería es una actividad productiva que se encarga de extraer, procesar y transformar minerales o materiales del subsuelo (o suelo) para usos industriales y energéticos, así como para la obtención de materiales de construcción, metálicos, domésticos y preciosos, entre otros usos (Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, 2015). La minería se clasifica como legal e ilegal (más conocida como artesanal); la actividad legal trae consigo un concepto técnico, económico, ambientalmente sostenible y amparado por la ley (Areandina, 2019). Por ende, es muy importante que todo título minero tenga un plan de manejo ambiental, ya que este es el que ayuda a prevenir, mitigar, corregir o compensar los impactos ambientales que se generan al llevar a cabo un proceso de estos (ANLA, 2019).

En este orden de ideas, empresas como las Corporaciones Autónomas Regionales son las encargadas de hacer seguimiento a estos planes de manejo ambiental, además tienen el deber de velar por el buen manejo de los recursos hídricos, garantizando sostenibilidad y el buen uso del mismo.

La minería ilegal, por el contrario, no está amparada bajo los criterios jurídicos del código minero, la extracción no se realiza de manera técnica, y la finalidad es obtener el recurso sin tener en cuenta las consecuencias medioambientales (Areandina, 2019).

Existen varios tipos de explotación minera: la minería a cielo abierto, con pozos de perforación, submarina y subterránea (Servicio Geológico Mexicano, 2017); la construcción de esta última causa desestabilización en el régimen de aguas en la roca, debido a la creación de nuevos conductos de agua, originando desagüe que puede provocar un descenso considerable del nivel freático y degrada seriamente la vegetación (Estrucplan, 2012), aun cuando no haya explotación.

Esto se convierte en preocupación de las sociedades mineras, ya que tienen que buscar una solución para no afectar a la población ni al ambiente y evitar sanciones. Por ello, se realizan análisis fisicoquímicos en los cuales se estudia el pH, el contenido de metales, de grasas, demanda química de oxígeno, turbiedad, dureza, entre otros (Sardiñas, 2006), pues determinan el estado de contaminación de las fuentes hídricas y, de acuerdo con esto, se realiza respectivo tratamiento para el vertimiento de los drenajes.

La situación mencionada anteriormente la está viviendo el municipio de California, Santander, debido a que la minería artesanal realizada años atrás dejó drenajes de túnel, los cuales son vertidos directamente a las quebradas. Actualmente, esta situación es enfrentada por las empresas mineras Minesa y Sociedad Minera Calvista, estas realizan periódicamente caracterización fisicoquímica a dichos drenajes con el fin conocer el estado de dichos drenajes y prevenir la contaminación de las quebradas y afectación a la comunidad.

Por todo lo anterior, este proyecto realizó la caracterización fisicoquímica del agua de túnel de estas sociedades mineras, verificando o no el cumplimiento de la norma ambiental y generando una propuesta de mejora para el tratamiento de efluentes mineros. Este estudio se desarrolló en colaboración con la CDMB en la modalidad de práctica empresarial.

1. Descripción de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga –CDMB

Es un ente corporativo de carácter público, el cual se encarga de la ejecución de las políticas, planes, programas y proyectos sobre medio ambiente, aplicando las disposiciones legales vigentes sobre su administración, manejo y aprovechamiento (CDMB, 2022).

Entre sus funciones se encuentra otorgar concesiones, permisos y licencias ambientales requeridas por la ley para el uso, aprovechamiento de los recursos naturales renovables o para llevar a cabo actividades que afecten o puedan afectar el medio ambiente.

Así mismo hacer la evaluación, control y seguimiento ambiental de los usos del agua, el aire y los demás recursos naturales renovables, lo que incluye el vertimiento, o incorporación de sustancias a las aguas en cualquiera de sus formas.

También tiene la función de ordenar y establecer las normas para el manejo de las cuencas hidrográficas ubicadas dentro del área de su jurisdicción, conforme a las disposiciones superiores y a las políticas nacionales.

En su jurisdicción la CDMB hace parte del nororiente del departamento de Santander, abarcando una superficie de 486360 hectáreas, equivalentes al 15,9 % de la totalidad del Departamento. El área de influencia de la CDMB está integrada por los siguientes trece municipios: Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Vetas, California, Suratá, Matanza, Charta, Tona, El Playón y Rionegro y Lebrija (CDMB, 2022).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Analizar los drenajes de túnel de las empresas Sociedad Minera de Santander y Sociedad Minera Calvista, en el municipio de California, Santander.

2.2 Objetivos Específicos

Caracterizar el agua proveniente de los túneles de minería en la Sociedad Minera de Santander y la Sociedad Minera Calvista.

Determinar el cumplimiento de la norma ambiental, según lo establecido por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB).

Realizar una propuesta de mejoramiento para el tratamiento del agua proveniente de los túneles de minería.

3. Marco Conceptual

3.1 Análisis Físicoquímico

Son aquellos procedimientos de laboratorio que se efectúan a una muestra de agua para evaluar sus características físicas, químicas o fisicoquímicas (Aguilera, 2012). Entre los parámetros físicos que son evaluados al hacer un análisis físicoquímico se encuentra: color, olor, sabor, elementos flotantes temperatura, sólidos, conductividad, caudal. Entre los químicos se encuentra: pH, materia orgánica, demanda química y bioquímica de oxígeno, nitrógeno y compuestos derivados (amoníaco, nitratos, nitritos, etc.), fósforo, aceites y grasas, hidrocarburos, detergentes, cloro, fluoruros, sulfatos y sulfuros, fenoles, cianuros, metales pesticidas, dióxido de carbono,

metano, ácido sulfhídrico y también son evaluados parámetros biológicos como coliformes (Tinoco & et.al, 2003). Es muy importante realizar dichos análisis, puesto que permiten conocer el nivel de microorganismos, sustancias químicas y compuestas que están presentes en el agua y que pueden ser perjudiciales para el consumo humano y para el ambiente en general, al encontrarse por encima de su límite (FUNASA, 2013).

3.2 Drenaje Acido de Mina (DAM)

Drenaje ácido de mina (DAM) es el agua contaminada proveniente de la explotación minera, ya sea superficial o profunda; generalmente de alta acidez, rica en sulfato y con niveles elevados de metales pesados, principalmente hierro, manganeso y aluminio. Debido a la alta cantidad de hierro oxidado, estos drenajes son, por lo general, de color rojizo. Así mismo, el drenaje ácido de la mina ocurre cuando los minerales del sulfuro se ponen en contacto con el oxígeno y el agua, condiciones favorables para su oxidación química o a la oxidación rápida por bacterias como *thiobacillus ferrooxidans*. Algunos autótrofos de hierros oxidados como *leptospirillum ferrooxidans*, *thiobacillus thiooxidans* y *sulfolobolusbrierleyii* se pueden asociar también a la oxidación mineral biológica. Como resultado de esa oxidación, es generado el ácido sulfúrico (Gamoral, 2013).

El drenaje ácido de minas de metal presenta un problema más severo que la mayoría de drenajes de carbón, debido a que los agentes prioritarios de contaminación, tal como AS, Cd, Pb, Hg, Cu y Zn, pueden estar presentes en peligrosas concentraciones (Jaramillo de los Ríos & Contreras Guaitarilla, 2019). Por lo general, este drenaje contaminado puede incluir lo siguiente: pH bajos causando acidez, y niveles de sulfatos, nutrientes, metales (disueltos o totales), nucleídos radiactivos, sólidos disueltos totales (SDT), y sólidos suspendidos totales (SST) por encima de los límites.

Generalmente el drenaje ácido tiene valores de pH por debajo de 7 hasta 1.5, alcalinidad decreciente y acidez creciente (Ministerio de Minas y Energía, 2020).

3.2.1 Control del Drenaje Ácido de Mina (DAM)

Los métodos de tratamiento convencionales o activos de aguas ácidas tienen un costo elevado, por lo que no pueden ser mantenidos por un período prolongado una vez finalizada la vida de la mina, y más aun teniendo en cuenta que el problema de las aguas ácidas pueden perdurar, según las estimaciones de Younger (1997), por cientos de años. En la última década se han investigado diferentes métodos de tratamiento pasivo, entre los que se destacan: humedales superficiales, que pretenden reproducir los fenómenos y procesos de los humedales naturales, creando un ambiente propicio para el desarrollo de ciertas plantas, comunidades de organismos y musgos, los cuales participan en la depuración del agua (López & et.al, 2002); humedales de flujo subsuperficial vertical, donde las aguas a tratar circulan de arriba abajo, a través de un material filtrante en el cual se encuentra la vegetación; humedales de flujo subsuperficial horizontal, donde el agua atraviesa un material filtrante, que puede ser grava, en la que está la vegetación y que filtra partículas y microorganismos, y degrada el material orgánico (Arce, 2018). Se ha comprobado que dichos métodos dan buenos rendimientos en la neutralización del pH y en la eliminación de metales pesados; además, requieren poco mantenimiento y su bajo costo puede ser asumido durante largos períodos de tiempo (de 20 a 40 años) una vez clausurada la instalación minera (Watzlaf, 1997).

3.3 Vertimiento

Se refiere a la descarga de aguas residuales, como en efecto quedó consignado en el artículo 6° del Decreto 1594 de 19841 y, en el cual se precisa de manera adicional, que se trata de una descarga practicada a un cuerpo de agua o al alcantarillado. Sin embargo, la ambigüedad surge

cuando se habla de control y manejo de vertimientos, pues, una vez producido el vertimiento, no se llevan a cabo las alternativas de control y manejo correcto (Londoño & et.al, 2002).

3.4 Normatividad

3.4.1 Resolución 631 de 2015

Para el caso de los vertimientos, la norma que los regula a nivel nacional es la Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en la cual son establecidos los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. En el Título VI, Artículo 10, se fijan los parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permitidos en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas (ARND) a cuerpos de aguas superficiales de actividades de minería (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Los parámetros fisicoquímicos que se monitorearon fueron a vertimientos de cuerpos de aguas superficiales de las actividades de minería, como la extracción de oro y otros metales preciosos.

3.5 Índice de Calidad de Agua (ICA)

El ICA es un número, entre 0 y 1, que indica el grado de calidad de un cuerpo de agua, en términos del bienestar humano independiente de su uso. Este número es una agregación de las condiciones físicas, químicas y en algunos casos microbiológicas del cuerpo de agua, el cual da señales de problemas de contaminación. Igualmente, tiene en cuenta una serie de factores ambientales a través de variables simples, las cuales permiten el análisis de orígenes de la contaminación: oxígeno disponible, materia orgánica, sólidos, mineralización, acidez, entre otros, y características importantes de la columna de agua como la temperatura (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, sf). No obstante, el desarrollo de índices de contaminación (ICO) ha demostrado ventajas sobre los ICA, puesto que estos involucran en un solo parámetro

numerosas variables y, gracias a ello, se identificaron correlaciones frecuentes entre múltiples variables físicas y químicas, generando la formulación de los siguientes cuatro índices de contaminación (Ramírez, Restrepo, & Viña, 1997)

- **Índice de contaminación por mineralización (ICOMI):** se expresa en numerosas variables: conductividad, como reflejo del conjunto de sólidos disueltos; dureza, que recoge los cationes calcio y magnesio; y alcalinidad, que hace lo propio con los aniones carbonatos y bicarbonatos.

$$ICOMI = \frac{1}{3} * (I_{Conductividad} + I_{Dureza} + I_{Alcalinidad}) \quad (\text{Ec. 1})$$

- **Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO):** depende de variables como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), coliformes totales y el porcentaje de saturación del oxígeno.

$$ICOMO = \frac{1}{3} * (I_{DBO} + I_{Coliformes\ totales} + I_{Oxígeno\%}) \quad (\text{Ec. 2})$$

- **Índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS):** se determina tan sólo mediante la concentración de sólidos suspendidos.

$$ICOSUS = 0.02 + 0.03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad (\text{Ec. 3})$$

Sólidos suspendidos mayores a 340 mg/L tienen un ICOSUS igual a uno (1), mientras que sólidos suspendidos menores a 10 mg/L muestran un ICOSUS de cero(0).

- **Índice de contaminación trófico (ICOTRO):** se fundamenta en la concentración del fósforo total. A diferencia de los índices anteriores, en los cuales se determina un valor particular entre 0 y 1, la concentración del fósforo total define por sí misma una categoría la cual se muestra a continuación (Ramírez, Restrepo, & Viña, 1997): Oligotrófico < 0,01 mg/L

Mesotrófico 0,01 – 0,02 mg/L

Eutrófico 0,02 – 1 mg/L

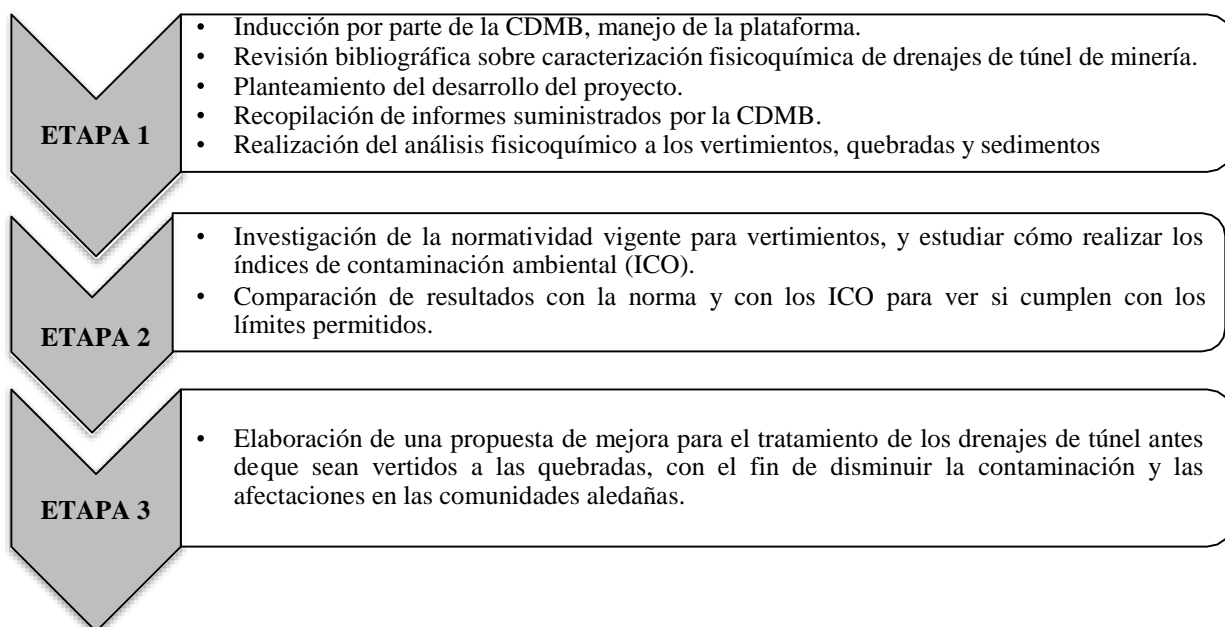
Hipereutrófico >1 mg/L

4. Metodología

En la Figura 1 se muestran las tres etapas en las que se estructuró el presente trabajo para alcanzar los objetivos planteados.

Figura 1.

Metodología Propuesta



4.1 Etapa 1

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica para conocer conceptos propios sobre minería, análisis fisicoquímicos, vertimientos, aguas superficiales, normatividad, etc. Posteriormente, se realizó la recopilación de los informes de caracterización fisicoquímica realizados a los drenajes de túnel de las empresas mineras Sociedad Minera de Santander y la Sociedad Minera Calvista, en el municipio de California, Santander. Estos informes fueron suministrados por la Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) y permitió llevar a cabo el análisis fisicoquímico de los vertimientos, las quebradas aguas arriba y abajo, aledañas a cada una de los túneles mineros, y los sedimentos.

4.2 Etapa 2

Luego del análisis realizado se efectuó la respectiva comparación con la norma vigente, en este caso la Resolución 631 de 2015, por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir quienes realicen vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales. Para las quebradas y sedimentos se realizaron los índices de contaminación (ICO), el cual permite saber el nivel de contaminación que tienen el agua, estas comparaciones se harán con el fin de saber si las aguas están siendo afectadas por los drenajes de túnel de estas empresas mineras.

4.3 Etapa 3

Por último, se realizó una propuesta de mejora para el tratamiento de las aguas de túnel antes de ser vertidas. Dentro de las diversas opciones se tiene la implementación de humedales artificiales, que son zonas construidas por el hombre en las que, se reproducen mecanismos de eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales, son un tipo de alternativa para tratar el agua, mediante diversos tipos de especies vegetales adaptadas a las condiciones del agua a tratar (Arce, 2018), entre estas especies tropicales se encuentra la *Colocasia esculenta*, *Petiveri alliacea*, *Echinochloa colona*, *Heliconia psittacorum*, *Gynerium sagittatum* (Peña & et.al, 2013). Estas son las que hacen que se pueda purificar el agua, eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos en suspensión, nitrógeno, fósforo e incluso productos tóxicos, a través de la hiperacumulación y transformación de dichos compuestos gracias a sus propiedades biológicas (Arce, 2018).

5. Resultados

A continuación, se presenta el análisis de los informes presentados por las empresas mineras sobre la caracterización físicoquímica de los drenajes de túnel. En la Tabla 1 se encuentra el listado de los diferentes drenajes del municipio de California, Santander.

Tabla 1.

Drenajes a los cuales se les Realizó Análisis Físicoquímico

1	El Tesorito	7	Ventanas
2	Chamizales	8	El Tigre
3	El Hoyo	9	El Cuatro
4	Amaya	10	San Antonio
5	Bm-102	11	BM-8
6	Mascotas 2	12	Los Sapos

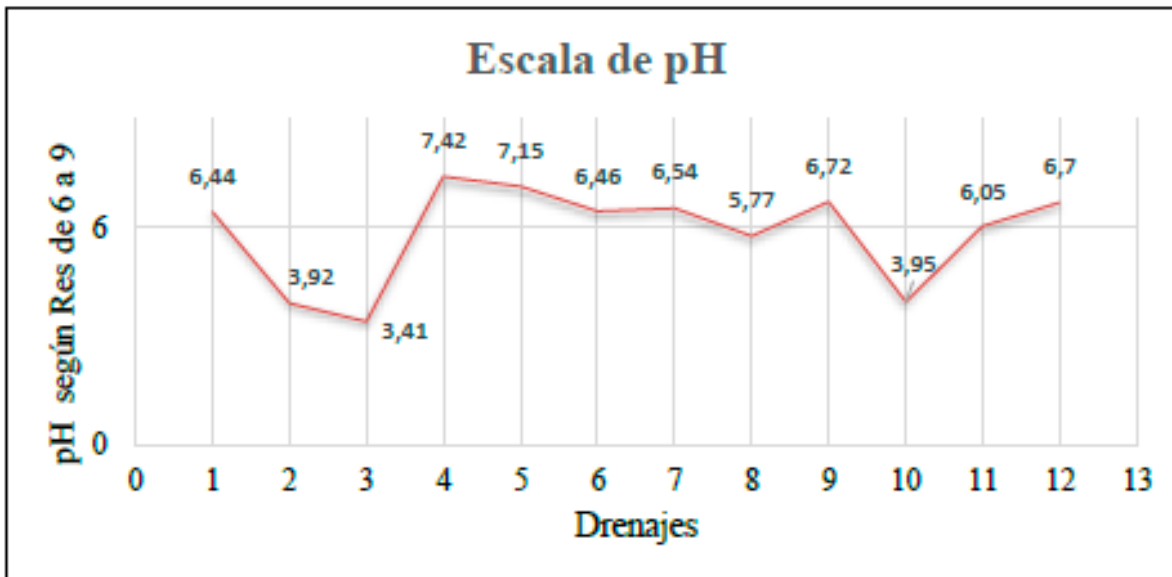
5.1 Análisis pH

En la Figura 2 se puede observar que, para el año 2021, los drenajes 2, 3, 8 y 10 no cumplen con los índices de pH que especifica la resolución 631 (valor por debajo de 6). Esta acidez puede causar el desbalance de los químicos del agua y movilizar a los contaminantes que ocasionan condiciones tóxicas; además de afectar a la vida acuática, generando desplazamiento y reducción de poblaciones (JAPAC, 2016). También, se transportan concentraciones de metales, entre los cuales se encuentra manganeso y hierro, perjudiciales cuando el pH presenta valores bajos debido a que son más solubles. Por lo anterior es importante que el agua sea tratada para neutralizar la concentración de pH registrada, siendo el tratamiento pasivo como humedales una posible solución, basado en los mismos procesos biológicos que se dan en los humedales naturales, teniendo como resultado la eliminación de metales y la neutralización del pH (López & et.al,

2002).

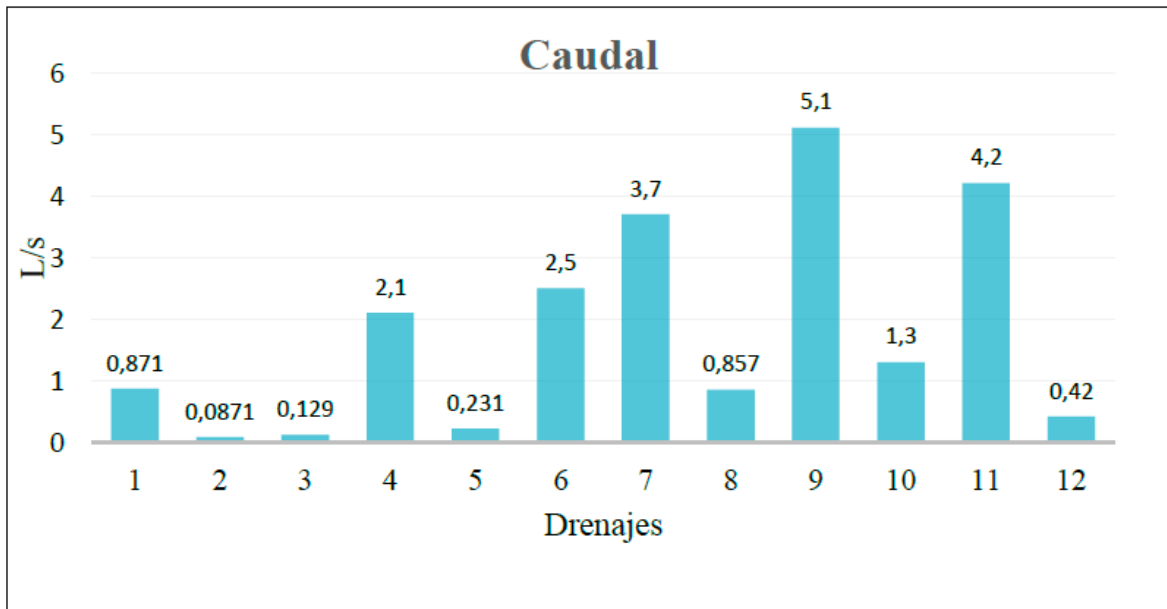
Figura 2.

Análisis de pH



5.2 Análisis de Caudal

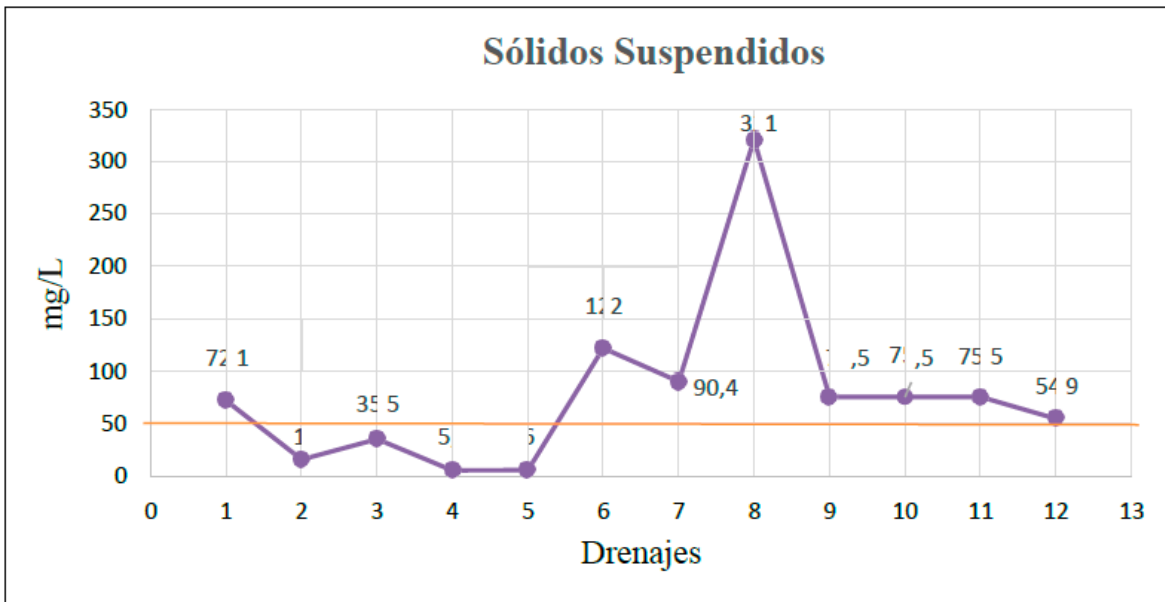
Según lo registrado en la Figura 3, los caudales registrados son relativamente bajos; la mitad no superan el litro por segundo. Esto puede ser bueno ya que no se estaría presentando contaminación directa a las quebradas. Las mediciones de caudal se orientan a conocer las características geométricas e hidráulicas del cauce en diferentes estados hidrológicos, que se encuentran relacionados con temporadas de lluvia; teniendo en cuenta que el caudal depende de las condiciones climáticas en que se haya tomado la muestra, el mayor caudal lo registró el drenaje 9 con un valor de 4,2 L/s tomado en día nublado.

Figura 3.*Caudal 2021*

5.3 Análisis de Sólidos Suspendedos

Según la norma, el valor máximo permitido para sólidos suspendidos en el agua es de 50 mg/L; por lo tanto, los drenajes 1, 6, 7, 8, 9, 10 y 11 sobrepasan los límites, de acuerdo con lo expuesto en la Figura 4. Se evidencia un crecimiento en el registro de los sólidos en suspensión puede ser por la erosión de los suelos, detritus orgánico y plancton. Comúnmente las impurezas visibles son ocasionadas por sólidos suspendidos como limo y arena; la materia suspendida consta de partículas muy pequeñas que no pueden ser eliminadas por medio de deposición. Sin embargo, el contenido de esta es muy variable según los cursos de agua, ya que cada uno de ellos está en función de la naturaleza de los terrenos atravesados, del clima, la pluviometría, vertimientos, entre otros (PSL Proanálisis, 2021). Este reporte es importante porque los contaminantes y patógenos se transportan en la superficie de las partículas; cuanto menor sea el tamaño de partícula, mayor será el área de superficie total por unidad de masa de partícula en gramos y, por consiguiente, mayor será la carga contaminante que posiblemente se conducirá (Estrucplan, 2012).

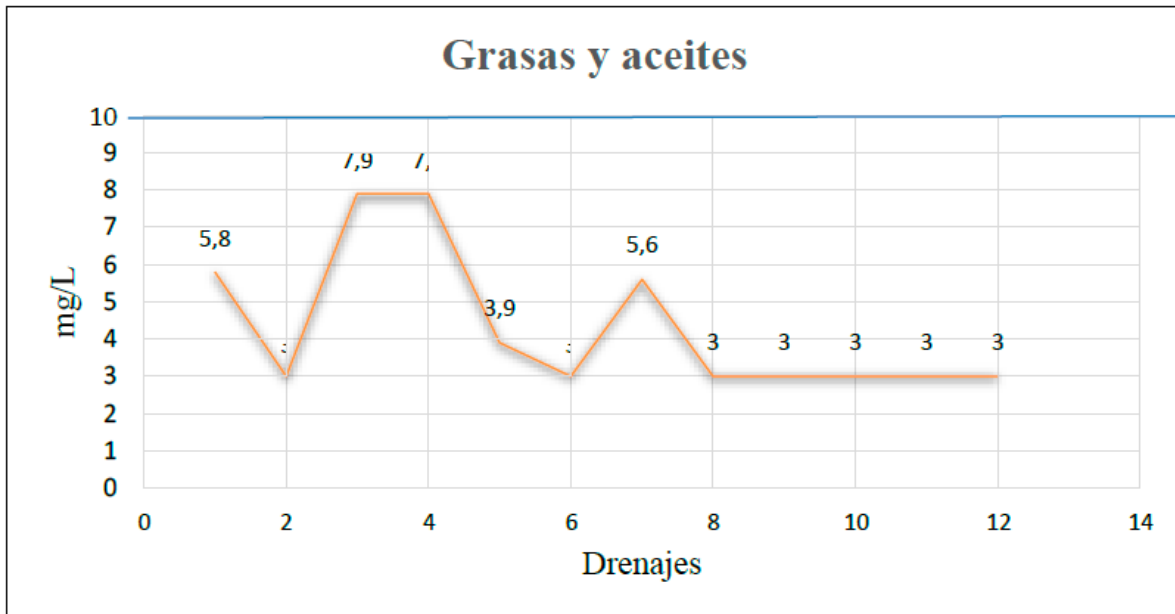
Figura 4.

Sólidos Suspendidos 2021

5.4 Análisis de Grasas y Aceites

De acuerdo con la resolución, el límite permitido para aceites y grasas es de 10 mg/L y, según lo expuesto en la Figura 5, todos los drenajes se encuentran por debajo de este valor. La contaminación de aguas con sustancias aceitosas ser generada por causas naturales o antropogénicas; por ejemplo, cuando la vegetación se encuentra en avanzado estado de descomposición liberará grasa, así como restos procedentes de procesos industriales. Al ser difícil de metabolizar por parte de las bacterias, estas sustancias se permanecen flotando en el agua (PSL Proanálisis, 2021).

Figura 5.

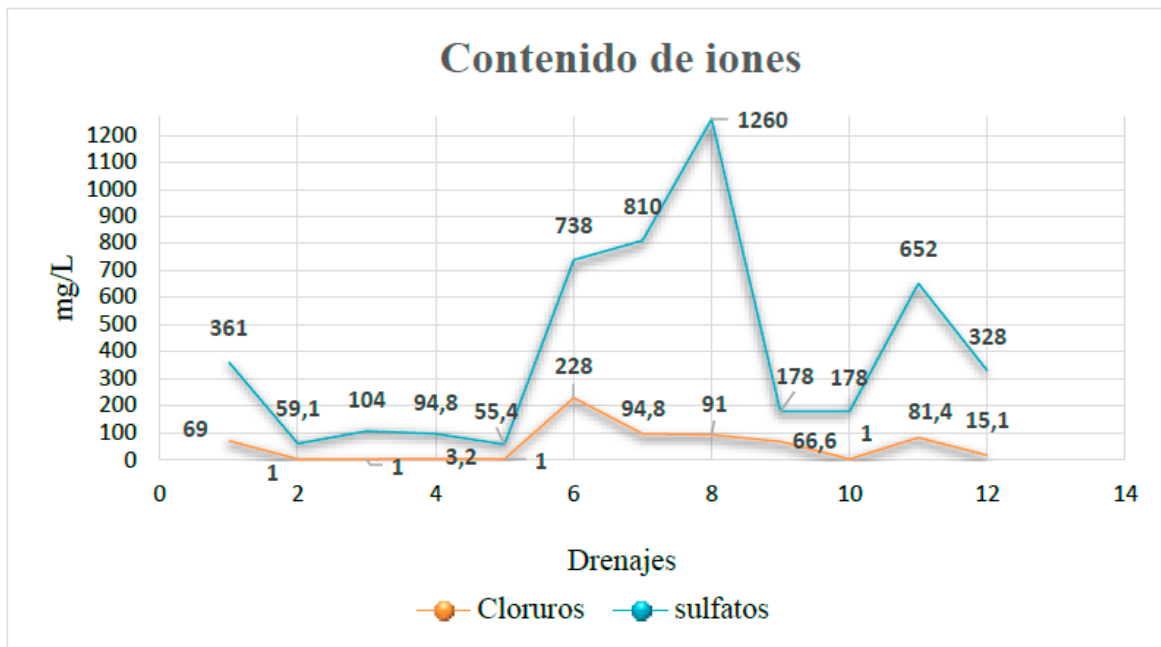
Grasas y Aceites 2021

5.5 Contenido de Iones

Según la resolución, el límite permitido para cloruros es de 250 mg/L, y para sulfatos se fija en 1200 mg/L. De acuerdo con lo reportado en la Figura 6, los drenajes se encuentran por debajo los valores requeridos, a excepción del drenaje 8 que presenta un leve incremento de contenido de sulfato, lo cual puede ser por la disolución de yesos y la oxidación bacteriana de sulfuros. Los resultados presentados no son considerados como concentraciones que puedan afectar las características propias del recurso hídrico (PSL Proanálisis, 2021).

Figura 6.

Contenido de Iones



5.6 Contenido de Metales

La Tabla 2 muestra el registro de metales en los diferentes drenajes. En hierro, todos exceden el límite permitido a excepción del drenaje 5, debido a que las aguas subterráneas se encuentran la mayor parte sometidas a condiciones de bajo oxígeno, generando un ambiente reductor que incrementa la solubilización del hierro (PSL Proanálisis, 2021). En arsénico, los drenajes 6, 8 y 10 están por encima la norma, mientras que en cadmio los drenajes 8 y 10 son los que sobrepasan el valor final. A nivel del cobre, los drenajes 3, 8 y 10 están arriba de 1 mg/L; este elemento se encuentra en la naturaleza integrado en numerosos compuestos: óxidos, hidróxidos, sulfato de cobre o carbonato cúprico. Por otra parte, los drenajes 8, 9 y 10 sobrepasan los límites de zinc (3 mg/L). Teniendo presente que estos drenajes son procedentes de minería, se puede inferir que el Zn encontrado esté relacionado con las rocas ígneas. El resto de metales se mantienen dentro de la norma.

Tabla 2.

Contenido de Metales

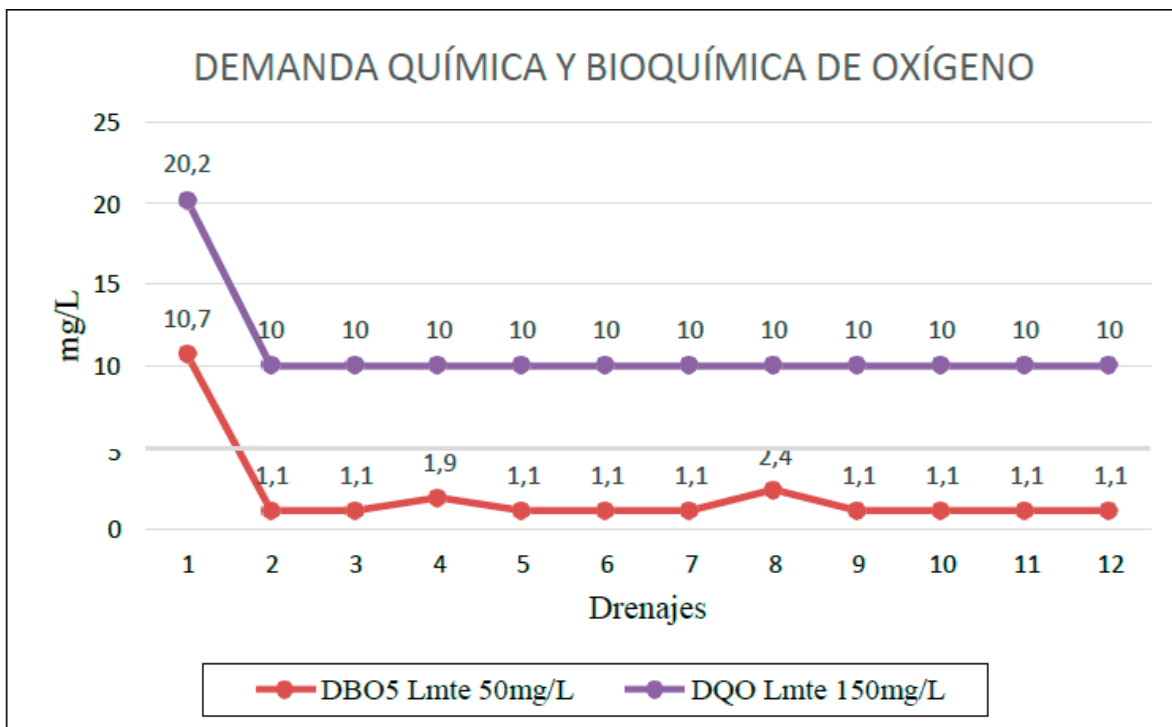
Año 2021											
	Arsénico	Cadmio	Cobre	Cromo	Hierro	Mercurio	Níquel	Plata	Plomo	Zinc	
1	0,05	0,021	0,034	0,1	7,3	0,0015	0,1	0,01	0,01	0,908	mg/L
2	0,05	0,001	0,27	0,1	2,6	0,0015	0,1	0,01	0,01	0,101	mg/L
3	0,05	0,019	5	0,1	7,3	0,0015	0,1	0,01	0,01	0,214	mg/L
4	0,05	0,03	0,232	0,1	8,9	0,0015	0,1	0,01	0,01	0,965	mg/L
5	0,05	0,04	0,292	0,1	2	0,0015	0,1	0,01	0,01	0,564	mg/L
6	0,123	0,02	0,1	0,1	12,5	0,0015	0,1	0,01	0,01	0,074	mg/L
7	0,05	0,01	0,053	0,1	6,5	0,0015	0,1	0,01	0,01	0,059	mg/L
8	0,206	0,063	8,4	0,1	85,4	0,0015	0,188	0,01	0,01	3,7	mg/L
9	0,05	0,029	0,6	0,1	5,9	0,0015	0,1	0,01	0,01	8,8	mg/L
10	0,344	0,379	7,9	0,1	17,4	0,0015	0,1	0,01	0,01	8,8	mg/L
11	0,05	0,009	0,834	0,1	14,2	0,0015	0,1	0,01	0,01	0,179	mg/L
12	0,05	0,001	0,772	0,1	9,3	0,0015	0,1	0,01	0,01	0,203	mg/L
Límite Permitido	0,1	0,05	1	0,5	2	0,002	0,5	0,5	0,2	3	mg/L

5.7 Demanda Química y Bioquímica de Oxígeno

La Figura 7 muestra que ninguno de los drenajes sobrepasa los límites de demanda bioquímica de oxígeno (50 mg/L) ni la demanda química de oxígeno (150 mg/L). Se evidencia que el drenaje 1 presenta valores más altos que los demás; esto puede ser debido a la descomposición de material vegetal que se encontraba presente, y también por suciedad que presentaba el ducto de descarga a la hora de tomar la muestra. Por otra parte, la demanda bioquímica de oxígeno se refiere al oxígeno necesario para descomponer la materia orgánica bioquímica; esta demanda es relacionada con las sustancias carbonadas, nitrogenadas y ciertos compuestos químicos reductores. La demanda química de oxígeno es la cantidad de oxígeno utilizado por los cuerpos reductores presentes en el agua sin la participación de organismos vivos (PSL Proanálisis, 2021).

Figura 7.

Demanda Química y Bioquímica de Oxígeno 2021



5.8 Interpretación ICOS

En Tabla 3 se presenta cómo interpretar los índices de contaminación del agua (ICOS), los cuales se dan en escalas de 0,2 y por colores. Desde 0 a 0,2 indica que no existe contaminación y su escala de color es el azul; si los ICOS se encuentran entre un valor mayor a 0,2 y 0,4 el grado de contaminación será bajo y su color es el verde; entre 0,4 y 0,6 el grado de contaminación será medio y su color es amarillo; valores entre 0,6 y 0,8 indican contaminación alta y su escala de color será el naranja; y, finalmente, entre 0,8 y 1 muestra contaminación muy alta y su color será el rojo (Ramírez & et.al, 1999).

Tabla 3.

Interpretación de Índices de Contaminación del Agua (ICOS)

ICO	Grado de contaminación	Escala de color
0 - 0,2	Ninguna	Azul
>0,2 - 0,4	Baja	Verde
>0,4 - 0,6	Media	Amarillo
>0,6 - 0,8	Alta	Naranja
>0,8 - 1	Muy alta	Rojo

Nota. Ramírez et al, (1999). *Índices de contaminación para caracterización de aguas continentales y vertimientos*. Formulación. CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53831999000100008

5.9 Resultados ICOS

La Tabla 4 muestra el grado de contaminación de las quebradas de acuerdo con los índices de contaminación ICOTRO e ICOSUS. Los análisis fueron realizados aguas arriba y abajo del vertimiento, con el fin de poder evidenciar el cambio que se está generando al verter los drenajes directamente.

Tabla 4.*Índices de Calidad y Contaminación*

Punto de monitoreo					ICOT	G.Contaminació	ICOSU	G.Contaminació
					RO	n	S	n
Quebrada Chicagua	aguas arriba del	vertimiento 2021			0,05	Eutrófico	0	Ninguna
Quebrada Chicagua	aguas abajo del	vertimiento 2021			0,05	Eutrófico	0	Ninguna
Quebrada La Baja	aguas arriba del	vertimiento 2021			0,05	Eutrófico	0	Ninguna
Quebrada La Baja	aguas abajo del	vertimiento 2021			0,05	Eutrófico	0,416	Media
Quebrada. Angosturas	aguas arriba del	Vertimiento Túneles (BM5, BM7 y BM8) 2021			0,05	Eutrófico	0	Ninguna
Quebrada. Angosturas	aguas abajo del	Vertimiento Túneles (BM5, BM7 y BM8) 2021			0,05	Eutrófico	0	Ninguna
Quebrada. Angosturas	aguas arriba del	Vertimiento Túneles (BM5, BM7 y BM8) 2020			0,05	Eutrófico	0,62	Alta
Quebrada. Angosturas	aguas abajo del	Vertimiento Túneles (BM5, BM7 y BM8) 2020			0,05	Eutrófico	0,92	Muy alta

Punto de monitoreo	ICOT RO	G.Contaminación n	ICOSU S	G.Contaminación n
Quebrada La Baja aguas arriba del Vertimiento de los Túneles Mascotas 1, Mascotas 2 y BM25 2021	0,05	Eutrófico	0	Ninguna
Quebrada La Baja aguas abajo del Vertimiento de los Túneles Mascotas 1, Mascotas 2 y BM25 2021	0,05	Eutrófico	0	Ninguna
Quebrada La Baja aguas arriba del Vertimiento de los Túneles Mascotas 1, Mascotas 2 y BM25 2020	0,05	Eutrófico	1,04	Muy Alta
Quebrada La Baja aguas abajo del Vertimiento de los Túneles Mascotas 1, Mascotas 2 y BM25 2020	0,05	Eutrófico	2,66	Muy Alta
Quebrada La Baja aguas arriba del Vertimiento Túneles Ítala Dos y Ventanas 2021	0,05	Eutrófico	0	Ninguna
Quebrada La Baja aguas abajo del Vertimiento Túneles Ítala Dos y Ventanas 2021	0,05	Eutrófico	0	Ninguna
Quebrada La Baja aguas arriba del Vertimiento Túneles Ítala Dos y Ventanas 2020	0,05	Eutrófico	0,62	Alta
Quebrada La Baja aguas abajo del Vertimiento Túneles Ítala Dos y Ventanas 2020	0,05	Eutrófico	0,62	Alta
Quebrada La Baja aguas arriba del Vertimiento de los Túneles Chucho 1 y El Tigre 2021	0,05	Eutrófico	0	Ninguna

Punto de monitoreo	ICOT	G.Contaminació	ICOSU	G.Contaminació
	RO	n	S	n
Quebrada La Baja aguas abajo del Vertimiento de los Túneles Chucho 1 y El Tigre 2021	0,05	Eutrófico	0	Ninguna
Quebrada La Baja aguas arriba del Vertimiento de los Túneles Chucho 1 y El Tigre 2020	0,05	Eutrófico	0,74	Alta
Quebrada La Baja aguas abajo del Vertimiento de los Túneles Chucho 1 y El Tigre 2020	0,05	Eutrófico	1,16	Muy Alta
Quebrada La Baja aguas arriba del Vertimiento Túnel BM 42, El Tesorito y El Cuatro 2021	0,05	Eutrófico	0	Ninguna
Quebrada La Baja aguas abajo del Vertimiento Túnel BM 42, El Tesorito y El Cuatro 2021	0,05	Eutrófico	0	Ninguna
Quebrada La Baja aguas arriba del Vertimiento Túnel BM 42, El Tesorito y El Cuatro 2020	0,05	Eutrófico	0,74	Alta
Quebrada La Baja aguas abajo del Vertimiento Túnel BM 42, El Tesorito y El Cuatro 2020	0,05	Eutrófico	1,46	Muy Alta
Quebrada Páez 2021	0,05	Eutrófico	0	Ninguna
Quebrada San Juan 2021	0,057	Eutrófico	0	Ninguna
Quebrada La Baja - Caserío La Baja 2021	0,05	Eutrófico	0	Ninguna
Quebrada La Higuera 2021	0,05	Eutrófico	0	Ninguna
Quebrada Aserradero 2021	0,05	Eutrófico	0	Ninguna

Según el análisis de resultados realizado, los drenajes 2, 3, 8 y 10 presentaron un pH ácido es decir por debajo de 6, lo que requerirá un adecuado tratamiento para neutralizar el pH y no se generen afectaciones; en sólidos suspendidos siete de los doce drenajes analizados sobrepasaron los valores límites permitidos, lo cual es preocupante. En el análisis de grasas y aceites todos se encuentran dentro de la norma. Se evidenció presencia de metales como hierro, zinc, cobre, cadmio y arsénico, a nivel más crítico en los drenajes 8 y 10 estos que presentaban valores por encima del límite en comparación con la resolución 631 de 2015, estos drenajes son pertenecientes a la empresa Minesa, la cual es responsable del control de los mismos.

Como se observa en la Tabla 4 al hallar los índices de contaminación ICOS, se registraron altos niveles de contaminación en el año 2020, sobretodo aguas abajo, es decir, que evidentemente las quebradas sí se están viendo afectadas después de que se hacen los vertimientos. (Ver Apéndice B1). Para el año 2021 según los índices calculados las quebradas no presentan contaminación, puede ser que los contaminantes hayan disminuido, por el arrastre que lleva el caudal y con el pasar del tiempo.

La mayoría de drenajes requieren un tratamiento adecuado para disminuir la contaminación que presentan y que al hacer los vertimientos no se presenten afectaciones a las quebradas.

5.10 Propuesta de Mejora

Se propone la implementación de la fitorremediación porque es una herramienta ecotecnológica con diversas ventajas: bajo costo, fácil implementación y mantenimiento, no genera contaminantes secundarios y es una tecnología social, estética y ambientalmente más aceptada, en comparación a las técnicas fisicoquímicas (Garbisu, 2008). La fitorremediación utiliza plantas para eliminar, absorber, destruir o transformar contaminantes del suelo, agua y aire. En este proceso, las plantas son seleccionadas, principalmente, por su potencial fisiológico (fotosíntesis,

respiración, proceso metabólico), sus tasas de crecimiento, la profundidad de sus raíces, su habilidad para degradar contaminantes y capacidad de acumular elementos inorgánicos a niveles mucho más altos que otras especies creciendo bajo las mismas condiciones ambientales (Peña & et.al, 2013). En este orden de ideas, las plantas retienen los nutrientes y los guardan en raíces y retoños, o, para el caso de metales pesados, los acumulan en otros tejidos ambientales (Peña & et.al, 2013). En la Tabla 5 se presentan algunas de las especies vegetales nativas tropicales, y que son encontradas en nuestro país, que pueden ser utilizadas para la fitorremediación.

Tabla 5.*Especies Tropicales Nativas*

Especie	Aplicación
<i>Colocasia esculenta</i> (Oreja de burro)	Fitorremediación de mercurio Reducción de nitrato, fósforo, sulfato. Reducción de pesticidas y herbicidas. Eliminación de nitrato, fosforo y DQO. Eliminación de NH ₄ ⁺ y NO ₃ ⁻ Eliminación de Cd.
<i>Petiveri alliacea</i> (Anamú)	Efecto del nitrógeno e irradiación en la eficiencia fotosintética
<i>Echinochloa colona</i> (Liendre depuerco)	Efecto en la germinación por sometimiento a Cr(VI)
<i>Vetiveria zizanioides</i> (Vetiveria)	Reducción de nitrógeno amoniacal, total, fósforo total, DBO, DQO. Efectos en el crecimiento por exposición a Lixiviados. Efecto por el riego con fertilizantes
<i>Heliconia Psittacorum</i> (Heliconia)	Eliminación de DBO ₅ , DQO, Nitrato, TKN, NH ₄ , orto fosfato y SST. Eliminación de DQO, P-PO ₄ , NH ₄ , NO ₃ . Eliminación de Materia orgánica y nutrientes. Eliminación de metales pesados: Cd (II), Cr (VI), Pb (II) y Hg (II). Eliminación de Cr (VI) y Nitrógeno. Eliminación de DQO, DBO ₅ y NH ₄ ⁺

Especie	Aplicación
<i>Gynerium sagittatum</i> (Caña brava)	Biomasa y crecimiento de la especie. Eliminación de DBO5, DQO, NH4+ y NO3. Eliminación de Cr (VI) y Nitrógeno. Eliminación de metales pesados: Cd (II), Cr(VI), Pb (II) y Hg (II)

Nota. Peña et al, (2013). Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso heliconia psittacorum (heliconiaceae). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 37 no. 145. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-3908201300040000

De acuerdo a lo reportado en la bibliografía, (Peña & et.al, 2013) desarrollaron un humedal construido con *Heliconia psittacorum*, comparando su desempeño con humedales sin vegetación y con la especie más empleada y sembrada en procesos de eliminación de contaminantes en aguas residuales: *Phragmites australis* (Zhi et al, 2012). En términos generales, encontraron que estas dos especies ayudan a la eliminación de contaminantes en igual proporción, arrojando un rango entre el 60 y el 80 % de remoción. Por otra parte, (Gutiérrez, 2009) registró un mejor desempeño de especies mencionadas en la eliminación de demanda química y bioquímica de oxígeno para la condición de más alta carga contaminante aplicada al reactor, sembrado con la especie *Heliconia sp.* Así mismo, (Madera et al, 2013) concluye que en la eliminación de demanda química y bioquímica de oxígeno no había diferencias entre las especies *Heliconia sp* y *Phragmites au*, pero mostraron que el uso de la especie nativa permite crear ambientes agradables estéticamente debido a su floración, la cual puede ser comercializada. En el caso de los metales pesados, (Cortes et al, 2013) y (Madera et al, 2013) reportaron que la *Heliconia* es una especie acumuladora de metales, con gran desempeño en la eliminación de metales pesados (Cd, Pb, Hg y Cr VI); de la matriz líquida contaminada con múltiples metales, se alcanzó una eliminación superior al 90 %, indicando que no se presentaron procesos de inhibición en la especie por la toma de metales, ni

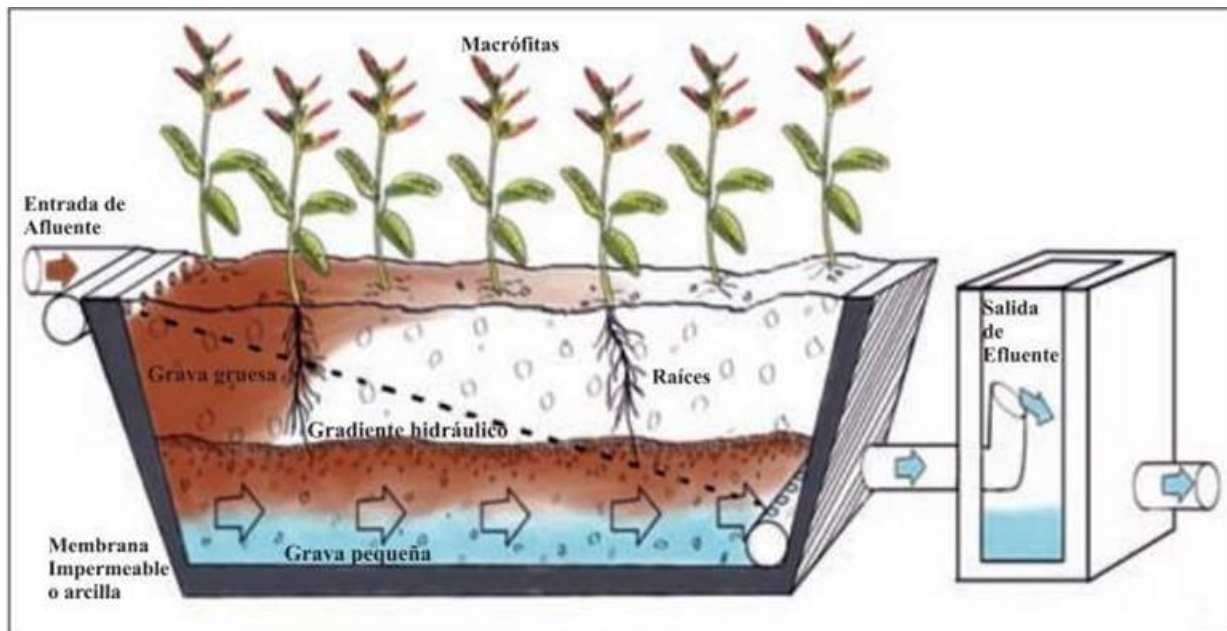
signo de daño como hojas amarillas (Peña & et.al, 2013).

Lo que concluyeron con estos estudios es que la *Heliconia psittacorum* presenta un potencial fitorremediador ya que esta planta se aclimatiza adecuadamente a las condiciones en los humedales para el tratamiento de aguas residuales, tiene una capacidad de eliminación de DBO₅, DQO y sólidos suspendidos, mayor a 60% en la mayoría de los estudios, además crece y se desarrolla rápidamente.

De acuerdo con lo reportado en la literatura, se propone la implementación de humedales artificiales con *Heliconia Psittacorum*, pues evidencia resultados positivos en la eliminación de contaminantes (entre un 60 a 90 %); además, presenta ventajas como la rápida adecuación al ambiente y resistencia al mismo, y produce un entorno agradable (ornamentación) por las flores que produce (Peña-Salamanca, Madera-Parra, Sánchez, & Medina-Vásquez, 2010). Así mismo, Colombia es uno de los países con más diversidad en Heliconias con 94 variedades, representando el 50 % del total de las especies (Peña & et.al, 2013).

En este orden de ideas, en la Figura 8 se puede observar un humedal subsuperficial de flujo horizontal, compuesto de un medio filtrante, grava pequeña para la parte inferior y gruesa para la parte superior, un tipo de vegetación y microorganismos asociados, cada uno desempeñando funciones que favorecen el tratamiento del agua a través de la captura y fijación de la materia orgánica, y su posterior incorporación a los procesos fisiológicos de plantas y microorganismos. El agua entra por la parte superior, distribuyéndose por los medios filtrantes y raíces, y saliendo por la parte inferior del humedal ya descontaminada.

Figura 8.

Humedal Artificial de Flujo

Nota. Peña et al, (2013). Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso heliconia psittacorum (heliconiaceae). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 37 no. 145. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-3908201300040000

Por último, se propone también realizar un pretratamiento a los drenajes con el fin de aumentar el pH, pues las plantas se ven afectadas en su crecimiento y funcionalidad. Dentro de las opciones se plantea utilizar hidróxido de sodio para recuperar el valor del pH; posteriormente, el drenaje podrá seguir al tratamiento en el humedal para eliminar el resto de contaminantes y mantener su neutralidad (Yáñez Torrente, 2017).

6. Conclusiones

Se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica a doce drenajes de túnel de mina, pertenecientes a las empresas Minesa, Galway y Calvista, ubicados en el municipio de California, Santander. Se pudo evidenciar presencia de metales pesados, pH bajos y altos índices de sólidos suspendidos. De igual manera, de acuerdo con los índices de contaminación ICOS, para el año 2020 se concluyó que las quebradas estaban siendo contaminadas con los vertimientos que se le realizan; sin embargo, para el año 2021 los índices de contaminación habían disminuido notablemente, es decir, las quebradas ya no registraban contaminación, posiblemente por la gran cantidad de sólidos suspendidos se quedaron en los drenajes o al arrastre del agua.

Los resultados obtenidos fueron analizados y comparados con la norma (Resolución 631 de 2015), (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) mostrando que la mayoría de los drenajes presentan valores por encima de los límites permitidos, siendo los drenajes 8 y 10 los más críticos, pertenecientes a la empresa Minesa. Dichos drenajes arrojaron valores de sólidos suspendidos entre 321 y 75,5 mg/l cuando el límite es de 50 mg/L, además de un alto contenido de iones y metales pesados. Estas empresas son notificadas del mal tratamiento a los drenajes y vertimientos para que implementen una medida de solución. El incumplimiento de las normas ambientales conlleva a sanciones según la Ley 1333 de 2009 por parte de las corporaciones ambientales, como lo son multas, la revocatoria o caducidad del permiso ambiental (MINAMBIENTE, 2009).

Por último, la implementación de humedales artificiales sería una solución para reducir la contaminación en los drenajes de túneles de minería en el municipio de California, Santander. Se concluyó que la especie más apta para la construcción de estos humedales es la *Heliconia*

Psittacorum, debido a características como su potencial fitorremediador, su capacidad para acumular metales pesados sin afectar sus propiedades fisiológicas, y el hecho de eliminar sólidos suspendidos, así como por su rápido crecimiento y desarrollo, y ser una especie abundante en nuestro país. Así mismo, sería pertinente realizar un pretratamiento con hidróxido de sodio para subir la concentración de pH, con el fin de evitar la degradación de las plantas debido a la acidez.

7. Recomendaciones

- Se recomienda estudiar la zona en la que serían implementados estos humedales, con el fin de conocer la geografía del lugar y así poder dimensionar de manera correcta el tamaño de los humedales.
- Es necesario tener en cuenta que el tiempo de residencia varía según el tamaño del humedal y por lo tanto de la carga hidráulica, a mayor carga hidráulica menor tiempo de residencia y a menor carga hidráulica mayor tiempo de residencia.
- Como el caudal de estos drenajes es pequeño, pero sin embargo contaminante, es recomendable realizar la implementación del humedal para así disminuir estos contaminantes, se sugieren las siguientes medidas para su construcción: altura 0.35 m, ancho 0.80 m, apertura 0.09 m, base 0.65 m, y su profundidad 0.33 m.

Referencias Bibliográficas

- Aguilera. (2012). *Procedimiento de análisis físicoquímico de agua potable*. Obtenido de <https://sig.unillanos.edu.co/phocadownloadpap/PD-GAA-73%20PROCEDIMIENTO%20DE%20ANALISIS%20FISICOQUIMICO%20DE%20AGUA%20POTABLE>
- ANLA. (2019). *Manual de licencias ambientales en Colombia*. Obtenido de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/manual_de_licencias_ambientales_en_colombia.pdf
- Arce. (2018). *Humedales artificiales: una alternativa para tratamiento de aguas de producción*. Tesis de especialización, Fundación Universidad de América.
- Areandina. (2019). *Minería legal vs extracción ilegal en Colombia*. Obtenido de <https://www.areandina.edu.co/noticias/mineria-legal-vs-extraccion-ilegal-en-colombia>
- CDMB. (2022). *Funciones*. Obtenido de <http://www.cdmb.gov.co/web/asi-es-la-cdmb/funciones>
- Estrucplan. (2012). *Los múltiples impactos ambientales de la minería subterránea*. Obtenido de [https://noalamina.org/informacion-general/impactos-de-la-mineria/item/8757-los-multiples-impactos-ambientales-de-la-mineria-subterranea#:~:text=La%20miner%C3%ADa%20subterr%C3%A1nea%20puede%20contaminar,apertura%20de%](https://noalamina.org/informacion-general/impactos-de-la-mineria/item/8757-los-multiples-impactos-ambientales-de-la-mineria-subterranea#:~:text=La%20miner%C3%ADa%20subterr%C3%A1nea%20puede%20contaminar,apertura%20de%20)
- FUNASA. (2013). *Manual práctico de análisis de agua*. Brasilia. Obtenido de https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/manual_practico_analisis_agua_4_ed.pdf
- Gamoral. (2013). *Tratamiento de drenaje de ácido de minas en humedales construidos*. Obtenido de

<http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/Recursos/archivos/MineriaDesarrolloSostenible/MedioAmbiente/DAMhumedales>

Garbisu. (2008). *Fitorremediación*. Obtenido de

<https://www.ecologistasenaccion.org/17857/fitorremediacion/>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (sf). *Indicadores*. Obtenido de

<http://www.ideam.gov.co/web/agua/indicadores1#:~:text=%C3%8Dndice%20de%20calidad%20de%20Agua,humano%20independiente%20de%20su%20uso>

JAPAC. (2016). *Descubre cómo afecta el pH al agua*. Obtenido de

<https://japac.gob.mx/2016/06/20/descubre-como-afecta-el-ph-al-agua/>

Jaramillo de los Ríos, A. F., & Contreras Guaitarilla, M. A. (2019). *Tratamiento del drenaje ácido*

de minas de carbón mediante humedales artificiales- Caso de estudio quebrada el Chocho en el corregimiento de Montebello Cali. Obtenido de

<https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/11980/T08976.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Londoño, & et.al. (2002). *Manejo de vertimientos y desechos en Colombia. Una visión general*.

Obtenido de <https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1050&context=ep>

López, & et.al. (2002). *Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y*

perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*, 113 (1): 3-21, ISSN: 0366-0176.

Obtenido de https://www.igme.es/Boletin/2002/113_1_2002/4-ARTICULO%20TRATAMIENTOS.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 631 de 2015*. Obtenido de

<http://www.emserchia.gov.co/PDF/Resolucion631.pdf>

Ministerio de Minas y Energía. (2020). *Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas*

- prácticas para estandarizar los procesos de drenajes ácidos mineros*. Obtenido de minenergia.gov.co/documents/10192/24281330/PROPUESTA+LINEAMIENTOS+TECNICOS+DE+POLITICO
- Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia. (2015). *ABECÉ de la minería*. Obtenido de <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/abc-mineria.pdf>
- Peña, & et.al. (2013). *Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso heliconia psittacorum (heliconiaceae)*. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 37 no. 145. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-3908201300040000
- Peña-Salamanca, E. J., Madera-Parra, C. A., Sánchez, J. M., & Medina-Vásquez, J. (2010). *Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrofitas*. Obtenido de *Revista EIA.*: https://www.accefyn.com/revista/Vol_37/145/469-481.pdf
- PSL Proanálisis. (2021). *Monitoreo de calidad de drenajes de agua natural de la zona minera Galway*. Bucaramanga.
- Ramírez, & et.al. (1999). *Índices de contaminación para caracterización de aguas continentales y vertimientos. Formulaciónes. CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53831999000100008
- Ramírez, A., Restrepo, R., & Viña, G. (1997). *Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulaciónes y aplicación. C.T.F Cienc. Tecnol. Futuro* vol.1 no.3. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53831997000100009

- Sardiñas. (2006). *Evaluación físico-química y microbiológica del agua de la presa El Cacao (Cotorro, Cuba)*. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 6: 202-206. Obtenido de https://saludpublica.ugr.es/sites/dpto/spublica/public/inline-files/bc51015aa031684_Hig.Sanid_Ambient.6.202-20
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). *Explotación minera*. Obtenido de https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Explotacion-minera
- Tinoco, & et.al. (2003). *Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros físicoquímicos y contaminantes marinos (Aguas, sedimentos y organismos)*. Obtenido de <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/13536/ManualdeTecnicasAnaliticas>
- Watzlaf. (1997). *Passive treatment acid mine drainage indown- flow limestone systems. U.S.* Pittsburgh: Department of Energy Tecnology Center, 233-244.
- Yáñez Torrente, S. (2017). *Influencia del pH en la eficiencia del tratamiento de aguas residuales en humedales contruidos de flujo vertical. [Tesis de grado, Universidade da Cataluña]*. Obtenido de https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/20315/YanezTorrente_Sandra_TFG_2018.pdf?

Apéndices

Apéndice A. Resultados Obtenidos

Figura A1.

Gráfica de pH 2020

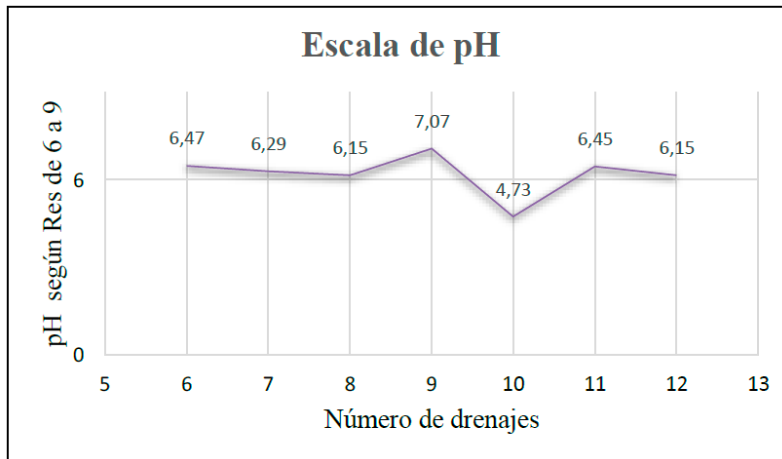


Figura A2.

Gráfica de caudal 2020

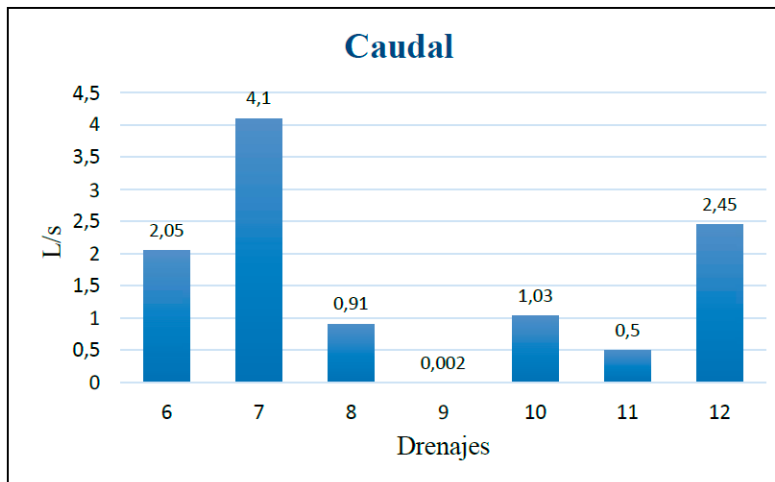


Figura A3.

Gráfica sólidos suspendidos 2020

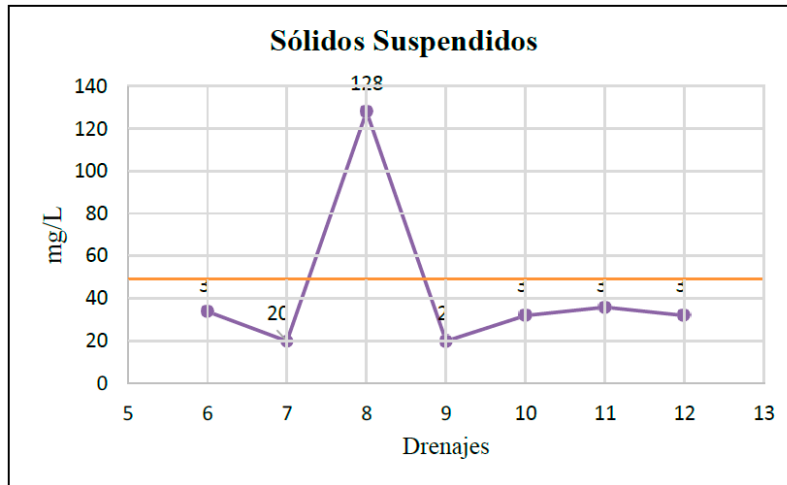


Figura A4.

Gráfica grasas y aceites 2020

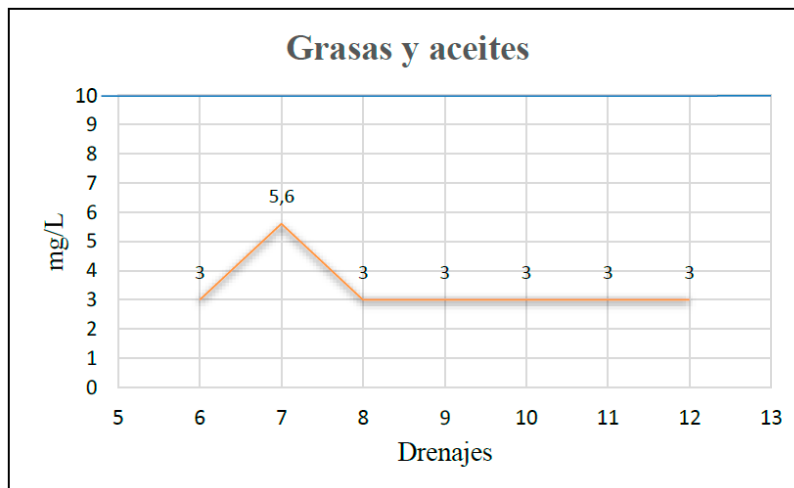


Figura A5.

Gráfica contenido de iones 2020

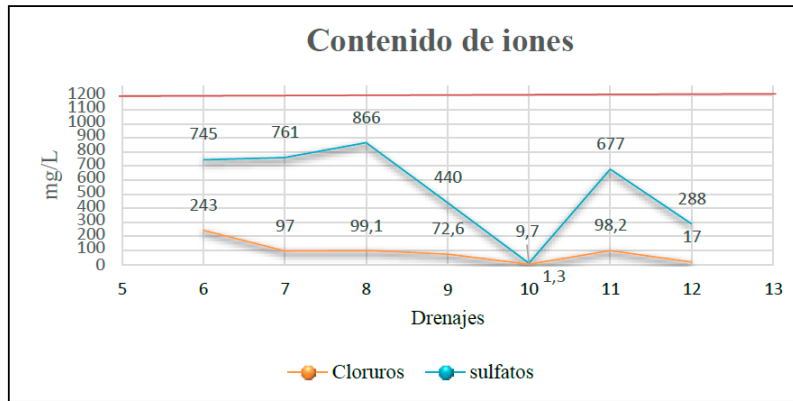


Tabla A1.

Análisis contenido de metales 2020

Año 2020											
Contenido de metales											
	Arséni co	Cad mio	Cob re	Cro mo	Hier ro	Mercu rio	Níqu el	Plat a	Plom o	Zin c	
6	0,124	0,002	0,138	0,1	12,3	0,0015	0,1	0,0 02	0,01	0,0 78	m g/ L
7	0,05	0,001	0,028	0,1	7,5	0,0015	0,1	0,0 02	0,01	0,0 6	m g/ L
8	0,295	0,035	5	0,1	42,2	0,0015	0,108	0,0 02	0,01	1,8	m g/ L
9	0,05	0,04	0,599	0,1	6,3	0,0015	0,1	0,0 02	0,01	0,5 49	m g/ L

10	0,37	0,312	7,1	0,1	14,6	0,0015	0,1	0,0 02	0,01	9,7	m g/ L
11	0,05	0,011	0,338	0,1	15,6	0,0015	0,1	0,0 2	0,01	0,1 66	m g/ L
12	0,05	0,009	0,688	0,1	9,6	0,0015	0,1	0,0 2	0,01	0,1 8	m g/ L
Límite Permitido	0,1	0,05	1	0,5	2	0,002	0,5	0,5	0,2	3	m g/ L

Figura A6.

Gráfica demanda química y bioquímica de oxígeno 2020

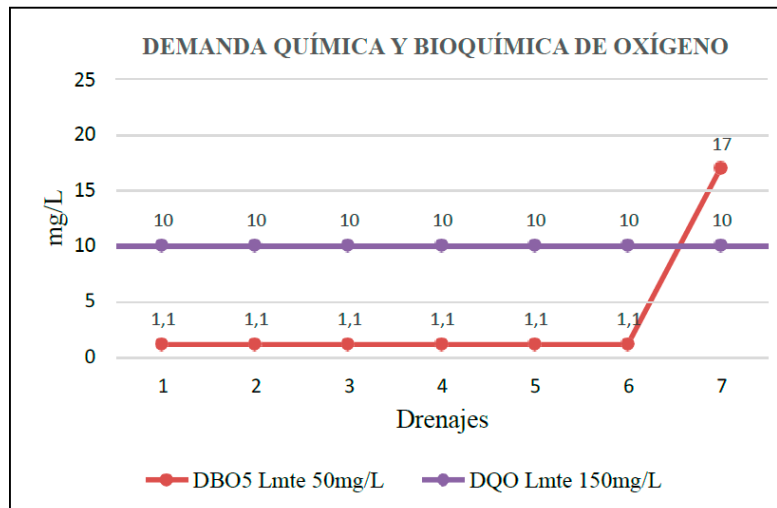
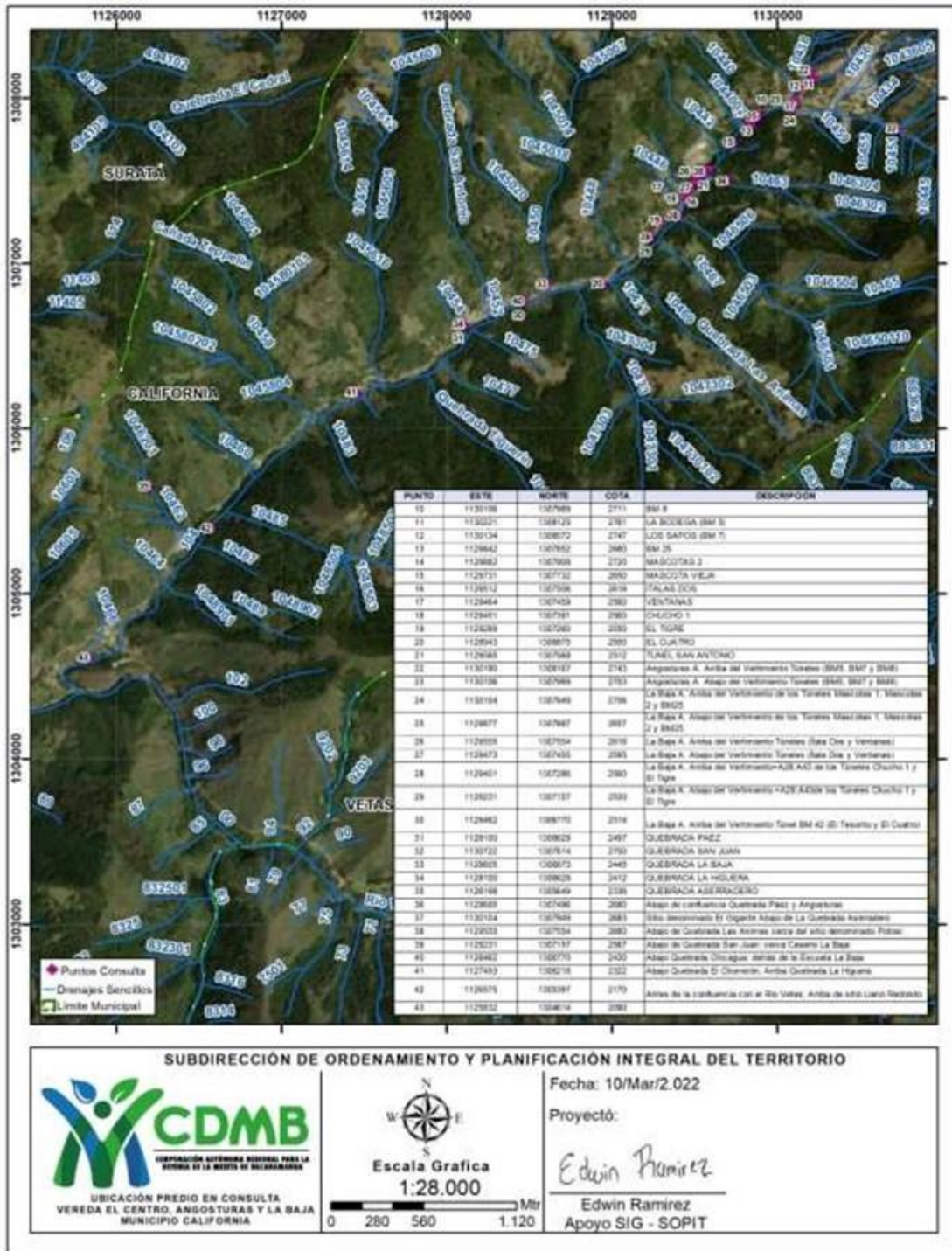


Figura A7.

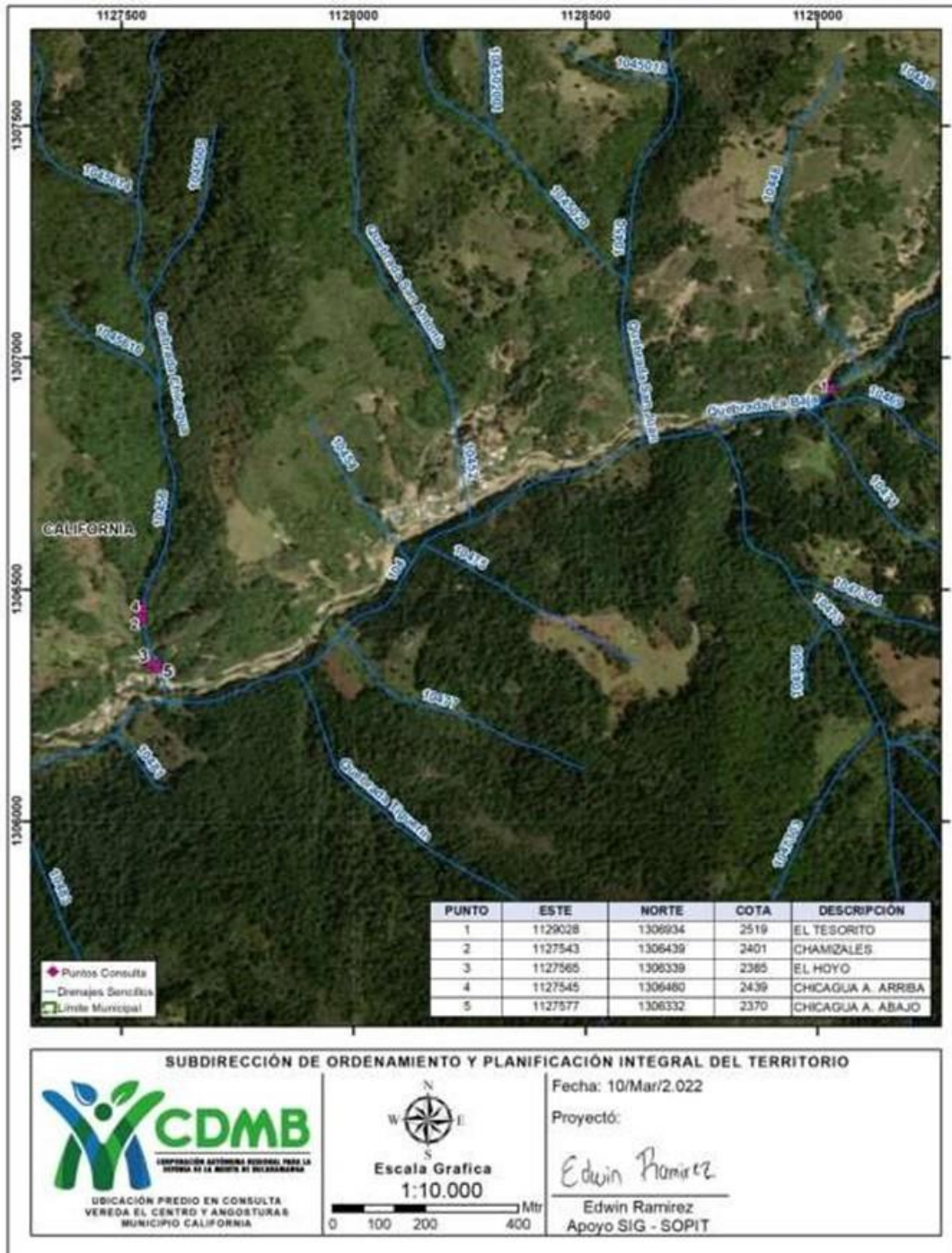
Ubicación geográfica drenajes y quebradas Empresa Minesa.



Nota. Adaptado de Ramírez (2022a)

Figura A8.

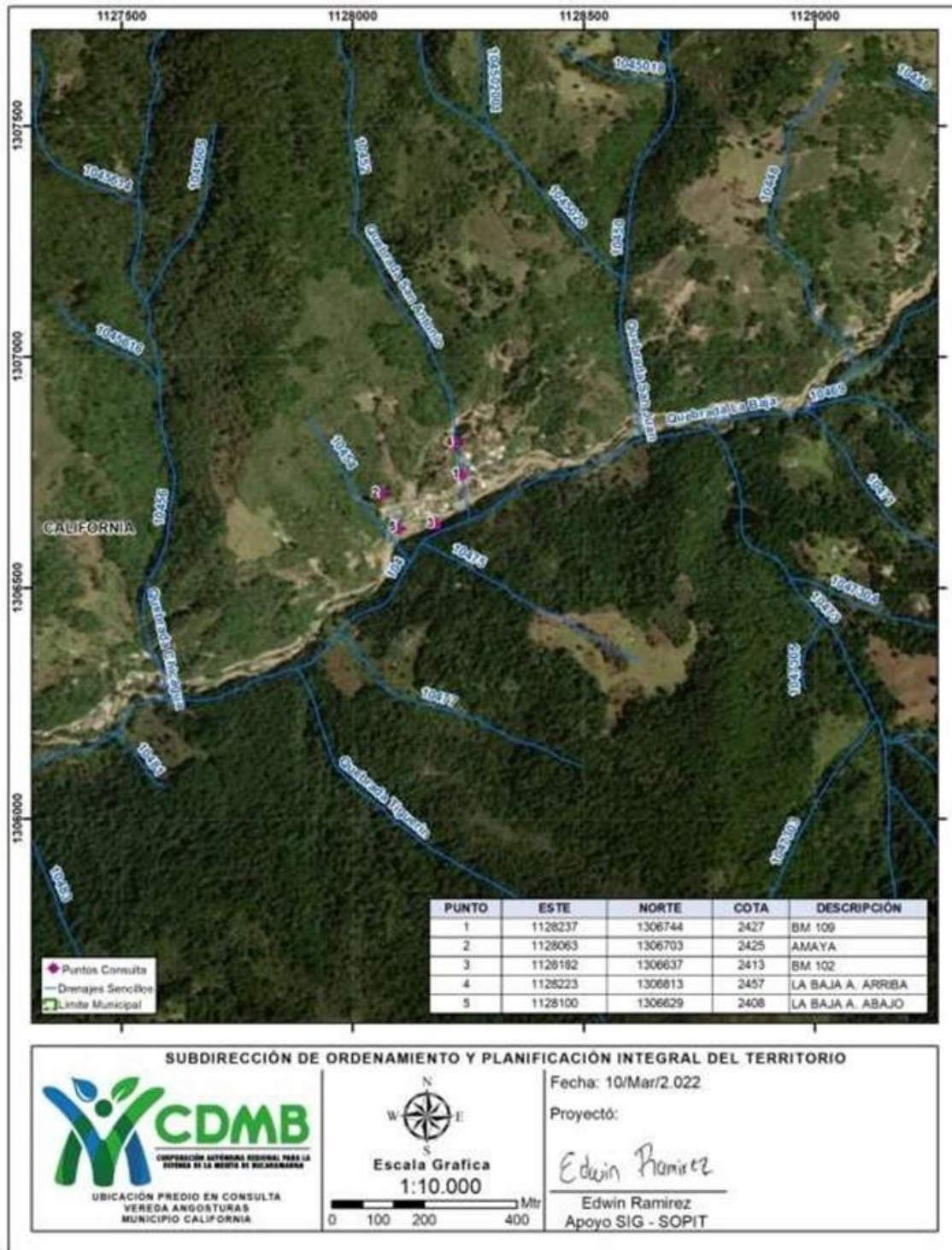
Ubicación geográfica drenajes y quebradas Empresa Calvista.



Nota. Adaptado de Ramírez (2022b)

Figura A9.

Ubicación geográfica drenajes y quebradas Empresa Galway.



Nota. Adaptado de Ramírez (2022c)

Apéndice B. Cálculos Índices De Contaminación

➤ Quebrada Chicagua aguas abajo del vertimiento Túneles BM49, BM51, BM54, BM60, BM61 Y BM62 2021.

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 5,5$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene:

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

➤ Quebrada Chicagua aguas abajo del vertimiento de Túneles BM49, BM51, BM54, BM60, BM61 Y BM62 2021

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 5,5$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene:

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

➤ Quebrada La Baja aguas arriba del vertimiento Túneles BM104, BM109 y BM102

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 7$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada La Baja aguas abajo del vertimiento Túneles BM104, BM109 y BM102

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 13,2$$

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,396$$

$$\text{ICOSUS} = 0,416$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada. Angosturas aguas arriba del Vertimiento Túneles (BM5, BM7 y BM8) 2021

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 5,5$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada. Angosturas aguas. Abajo del Vertimiento Túneles (BM5, BM7 y BM8)

2021

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 5,5$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada. Angosturas aguas Arriba del Vertimiento Túneles (BM5, BM7 y BM8)

2020

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 20$$

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,6$$

$$\text{ICOSUS} = 0,62$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada Angosturas aguas abajo del Vertimiento Túneles (BM5, BM7 y BM8) 2020

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 30$$

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,9$$

$$\text{ICOSUS} = 0,92$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada La Baja aguas Arriba del Vertimiento de los Túneles Mascotas 1, Mascotas 2 y BM25 2021

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 8$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada La Baja aguas abajo del Vertimiento de los Túneles Mascotas 1, Mascotas 2 y BM25 2021

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 8$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada La Baja aguas abajo del Vertimiento de los Túneles Mascotas 1, Mascotas 2 y BM25 2020

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 34$$

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 1,02$$

$$\text{ICOSUS} = 1,04$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada La Baja aguas arriba del Vertimiento de los Túneles Mascotas 1, Mascotas 2 y BM25 2020

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 88$$

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 2,64$$

$$\text{ICOSUS} = 2,66$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada La Baja aguas arriba del Vertimiento Túneles Ítala Dos y Ventanas 2021

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 5,5$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada La Baja aguas abajo del Vertimiento Túneles Ítala Dos y Ventanas 2021

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 5,7$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada La Baja aguas arriba del Vertimiento Túneles Ítala Dos y Ventanas 2020

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 20$$

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,6$$

$$\text{ICOSUS} = 0,62$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada La Baja aguas abajo del Vertimiento Túneles Ítala Dos y Ventanas 2020

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 20$$

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,6$$

$$\text{ICOSUS} = 0,62$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada La Baja aguas arriba del Vertimiento de los Túneles Chucho 1 y El Tigre 2021

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 5,5$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada La Baja aguas abajo del Vertimiento de los Túneles Chucho 1 y El Tigre

2021

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 5,5$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada La Baja aguas arriba del Vertimiento de los Túneles Chucho 1 y El Tigre

2020

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 24$$

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,72$$

$$\text{ICOSUS} = 0,74$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada La Baja aguas abajo del Vertimiento de los Túneles Chucho 1 y El Tigre

2020

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 38$$

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 1,14$$

$$\text{ICOSUS} = 1,16$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada La Baja aguas arriba del Vertimiento Túnel BM 42, El Tesorito y El Cuatro

2021

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 5,5$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada La Baja aguas abajo del Vertimiento Túnel BM 42, El Tesorito y El Cuatro

2021

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 5,5$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada La Baja aguas arriba del Vertimiento Túnel BM 42, El Tesorito y El Cuatro

2020

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 24$$

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,72$$

$$\text{ICOSUS} = 0,74$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

➤ Quebrada La Baja aguas abajo del Vertimiento Túnel BM 42, El Tesorito y El Cuatro
2020

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 48$$

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 1,44$$

$$\text{ICOSUS} = 1,46$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

➤ Quebrada Páez M-1 2021

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 5,5$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

➤ Quebrada San Juan M-19 2021

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 5,5$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,057 se encuentra en Eutrófico

➤ Quebrada La Baja - Caserío La Baja M-29 2021

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 5,9$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada La Higuera M-30 2021

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 5,5$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico

- Quebrada Aserradero M-36 2021

$$\text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * \text{Sólidos suspendidos} \quad \text{ICOSUS} = 0,02 + 0,03 * 5,5$$

Sólidos suspendidos < 10mg/L tiene

$$\text{ICOSUS} = 0$$

ICOTRO fósforo=0,050 se encuentra en Eutrófico