



**Universidad
Popular del Cesar**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
AMBIENTAL Y SANITARIA**



**LA ACREDITACIÓN ES
EL COMPROMISO DE TODOS**

**EFICACIA DE UN ELECTROCOAGULADOR PARA REMOVER HIERRO Y
TURBIDEZ EN EFLUENTES DE DRENAJES ÁCIDOS PRODUCIDOS EN
UNA MINA CARBONÍFERA DE LA JAGUA DE IBIRICO, CESAR**

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE

INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO

PRESENTA:

LEINER MANUEL CAMACHO THERAN

HENRY DAVID RODRÍGUEZ MOYA

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS

PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA

VALLEDUPAR-CESAR

2020

www.unicesar.edu.co
Campus Universitario Sabanas
Valledupar Cesar Colombia



**Universidad
Popular del Cesar**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
AMBIENTAL Y SANITARIA**



**LA ACREDITACIÓN ES
EL COMPROMISO DE TODOS**

**EFICACIA DE UN ELECTROCOAGULADOR PARA REMOVER HIERRO Y
TURBIDEZ EN EFLUENTES DE DRENAJES ÁCIDOS PRODUCIDOS EN
UNA MINA CARBONÍFERA DE LA JAGUA DE IBIRICO, CESAR**

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO**



PRESENTA:

**LEINER MANUEL CAMACHO THERAN
HENRY DAVID RODRÍGUEZ MOYA**

DIRECTOR

**YIM JAMES RODRÍGUEZ DÍAZ
Ing. del Medio Ambiente**

ASESOR METODOLOGICO

**HERNANDO C. OÑATE BARRAZA
Ing. Sanitario y Ambiental**

ASESOR TÉCNICO

**OSCAR DAVID BELEÑO DÍAZ
Ing. Ambiental y Sanitaria**

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
VALLEDUPAR-CESAR**

2020

www.unicesar.edu.co
Campus Universitario Sabanas
Valledupar Cesar Colombia



**Universidad
Popular del Cesar**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
AMBIENTAL Y SANITARIA**



**LA ACREDITACIÓN ES
EL COMPROMISO DE TODOS**

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado



DEDICATORIA

A nuestros padres, familiares y amigos, por el apoyo invaluable y el amor, que durante años nos han inspirado a cumplir nuestros objetivos y hoy día nos permiten hacer realidad nuestros sueños.



AGRADECIMIENTOS

A Dios porque en los momentos de dificultades y angustias nos dio las fuerzas para culminar con éxito nuestras metas sin desfallecer.

A nuestros padres por sus apoyos incondicionales, en estos años de compañía y por ser nuestro modelo a seguir.

A nuestros hermanos y familias por su apoyo y comprensión en cada uno de los momentos difíciles.

A nuestro equipo de trabajo, en especial merece reconocimiento el ingeniero Yim Rodríguez por toda su perseverancia e interés en nuestros conocimientos y con quien estamos profundamente en deuda por su confianza depositada en nosotros.

A la empresa minera y todos sus colaboradores, por ser unos aliados en nuestra educación, desarrollo personal y acompañarnos en todo el camino universitario.

A nuestros amigos, compañeros y docentes por cada una de las experiencias vividas.

Y por último, a toda aquella persona que de una u otra manera contribuyó a la realización de este trabajo.



TABLA DE CONTENIDO.

1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
2.	JUSTIFICACIÓN	3
3.	OBJETIVOS	4
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	4
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
4.	MARCO DE REFERENCIA	5
4.1	ANTECEDENTES.....	5
4.2	MARCO TEORICO.....	7
4.2.1	Agua.....	7
4.2.2	Agua residual.....	7
4.2.3	Tratamientos de aguas residuales.....	8
4.2.4	Aguas residuales en minería.....	9
4.2.5	Drenajes ácidos mineros (DAM).....	10
4.2.6	Electrocoagulación (EC).....	10
4.2.7	Minería en Colombia.....	12
4.3	MARCO CONCEPTUAL.....	14
4.4	MARCO CONTEXTUAL.....	18
4.5	MARCO LEGAL.....	19
5.	MARCO METODOLÓGICO.....	26
5.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	26
5.2	NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	26
5.3	LÍNEA Y SUBLINEA DE INVESTIGACIÓN.....	26
5.4	POBLACIÓN.....	26
5.5	MUESTRA.....	26
5.6	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	27
5.7	DESARROLLO METODOLOGICO.....	28
5.7.1	ETAPA 1. Caracterización de los parámetros fisicoquímicos y biológicos. 28	
5.7.1.1	Actividad 1. Recolección de información básica y reconocimiento de la zona de estudio.....	28



5.7.1.2	Actividad 2. Recolección de muestras.....	28
5.7.1.3	Actividad 3. Caracterización de los parámetros físico-químicos y biológicos. 30	
5.7.2	Eta 2. Implementar un electrocoagulador a escala laboratorio.....	42
5.7.2.1	Actividad 1. Rediseño y configuración del electrocoagulador a escala laboratorio.....	42
5.7.2.2	Actividad 2. Tratamiento en el electrocoagulador a escala laboratorio.....	43
5.7.2.3	Actividad 3. Determinación los parámetros (pH, turbidez, DQO, DBO, sólidos totales, sólidos sedimentados, sólidos disueltos, conductividad, sulfatos, contenido de hierro, aluminio y zinc) en el efluente del tratamiento.	43
5.7.3	Eta 3. Evaluar la eficacia del tratamiento.....	44
5.7.3.1	Actividad 1. Análisis de los valores obtenidos de los parámetros estudiados.	44
5.7.3.2	Actividad 2. Determinación de la eficacia del tratamiento.	44
5.8	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	45
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	46
6.1	ETAPA 1. CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS.....	46
6.2	ETAPA 2. IMPLEMENTAR UN ELECTROCOAGULADOR A ESCALA LABORATORIO.....	51
6.3	ETAPA 3. EVALUAR LA EFICACIA DEL TRATAMIENTO.....	53
	CONCLUSIÓN.....	74
	RECOMENDACIONES.....	75
	BIBLIOGRAFÍA.....	76
	ANEXOS.....	81



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del proyecto minero “explotación integral de carbón del flanco occidental del sinclinal de La Jagua de Ibirico”	18
Figura 2. Localización del vertimiento sobre el caño Santa Cruz proyecto (explotación integral del flanco occidental del sinclinal de La Jagua de Ibirico).....	18
Figura 3. Instalacion de vatimetro de alta precision digital.....	51
Figura 4. Dimensiones de placas de aluminio y hierro galvanizado para electrodos ...	52
Figura 5. Montaje del sistema de Electrocoagulación de drenajes acidos mineros	53

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Reservas de Carbón en el territorio Nacional.	13
Tabla 2. Leyes, decretos y resoluciones.	19
Tabla 4. Códigos de parámetros involucrados.....	27
Tabla 5. Requerimientos de conservación y almacenamiento de muestras de agua... ..	29
Tabla 6. Métodos y procedimientos para la caracterización de parámetros involucrados.....	30
Tabla 7. Resultados obtenidos en la caracterización del PIT sur de la mina La Jagua antes del tratamiento.	46
Tabla 8. Dimensiones del electrocoagulador.....	52
Tabla 9. Características de operación de electrocoagulación de drenajes ácidos mineros.	53
Tabla 10. Diseño Factorial de Múltiples Niveles	54
Tabla 11. Información del factor	54
Tabla 12. Hoja de trabajo.....	54
Tabla 13. Análisis de Varianza.....	57
Tabla 14. Resumen del modelo	57
Tabla 15. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 6 placas aluminio y 10 V.....	60
Tabla 16. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 6 placas de aluminio y 15 V.	60
Tabla 17. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 6 placas de aluminio y 20 V.	61
Tabla 18. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 10 placas metálicas (5 Fe y 5 Al) y 10 V.....	62
Tabla 19. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 10 placas metálicas (5 Fe y 5 Al) y 15 V.....	62
Tabla 20. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 10 placas metálicas (5 Fe y 5 Al) y 20 V.....	63



Tabla 21. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 12 placas (6 Fe y 6 Al) metálicas y 10 V.....	64
Tabla 22. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 12 placas metálicas (5 Fe y 5 Al) y 15 V.....	64
Tabla 23. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 12 placas metálicas (5 Fe y 5 Al) y 15 V.....	65
Tabla 24. Resultados obtenidos en el efluente del sistema de electrocoagulación.	66
Tabla 25. Costos de energía eléctrica de la operación del sistema de electrocoagulación.	72

LISTAS DE GRÁFICA.

Gráfica 1. Efectos principales para % de eficacia de remoción.....	55
Gráfica 2. Interacción para % de eficacia.....	56
Gráfica 3. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.....	56
Gráfica 4. Grafica de residuo para % de eficacia.	58
Gráfica 5. Grafica de Probabilidad de RESI1	59
Gráfica 6. Diagrama de contorno - % de eficacia (Voltaje vs. Número de placas).....	59
Gráfica 7. Comportamiento del pH y turbidez en el sistema de electrocoagulación con 6 placas de Aluminio – para 10, 15 y 20 V respectivamente.	61
<i>Gráfica 8. Comportamiento del pH y turbidez en el sistema de electrocoagulación con 10 placas metálicas (5 Fe y 5 Al) – para 10, 15 y 20 V respectivamente.</i>	<i>63</i>
Gráfica 9. Comportamiento del pH y turbidez en el sistema de electrocoagulación con 12 placas metálicas (6 de Al y 6 de Fe) – para 10, 15 y 20 V respectivamente.	65



INTRODUCCIÓN

Los drenajes ácidos mineros (DAM), según Aduvire (2006) son una de las fuentes fundamentales de contaminación de las aguas en el planeta, tanto superficiales como subterráneas se ven afectadas en grandes proporciones debido a la toxicidad derivada de sus componentes orgánicos y componentes metálicos que son perjudiciales tanto para fauna y flora, como para el mismo ser humano.

La minería es uno de los sectores productivos con mayor grado de uso del agua, ya que la utiliza en un sinnúmero de operaciones y con sus excavaciones produce grandes volúmenes principalmente por la infiltración de acuíferos intervenidos y la escorrentía superficial. Estas aguas proceden de la actividad extractiva de minerales tales como el carbón, que es de gran abundancia en nuestra región y que ha traído consigo un número considerable de afectaciones físicas, químicas y biológicas en los cursos de los ríos donde son vertidas, generando la muerte de animales, vegetación y alteraciones en las propiedades físicas del agua como el color y el sabor de estas.

Los drenajes ácidos de minas son el resultado de la oxidación de algunos sulfuros minerales al entrar en contacto con el oxígeno del agua y del aire, esto se debe principalmente a que durante la explotación de los yacimientos de carbón gran cantidad de minerales y rocas quedan expuestos a la descomposición atmosférica de estas, proceso conocido físicamente como meteorización.

Como alternativa innovadora y uso de energías limpias, en este trabajo desarrollamos la electrocoagulación a escala laboratorio de los drenajes ácidos mineros con el fin de garantizar un óptimo tratamiento de estas aguas, y se presentan los resultados encontrados a partir de este en parámetros en algunos metales como hierro, aluminio y zinc, asimismo el pH, DQO, DBO turbidez y conductividad, además del análisis realizado a la remoción de estos parámetros producto del tratamiento aplicado.



1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Los sistemas de tratamiento de drenajes ácidos mineros en casi la totalidad de los países del mundo y América Latina incumplen a nivel general de lo requerido en materia ambiental por la cantidad de agua contaminada y la poca infraestructura e inversión en estas plantas. La mayoría de las empresas del país no hacen tratamiento de las aguas residuales y muchas de sus técnicas de tratamiento están funcionando deficientemente, o lo que es más preocupante sin ser operadas, por lo tanto es necesario un tratamiento de estas aguas con la finalidad de mitigar el impacto ambiental y ecológico causado, implementando sistemas menos costosos y sofisticados en cuanto a operación y mantenimiento que los convencionales (CEPAL, 2011).

Debido a que el problema de los drenajes ácidos de mina solo comenzó a ser estudiado hace poco tiempo y a que los trabajos mineros existen hace más de un siglo, los DAM o DAR han contaminado grandes extensiones de cuerpos hídricos en países como Estados Unidos, Australia, Canadá, entre otros y por ende han tenido que ser investigados y tratados. En la actualidad se cuenta con una gran variedad de técnicas para tratar los drenajes ácidos y neutros de mina, a manera general los sistemas de tratamiento para DAM se dividen en dos grandes grupos: activos y pasivos (Chaparro, 2015).

Se evidenció en la parte alta del río Santa Cruz, ubicado a las afueras del municipio de La Jagua de Ibirico (Cesar), una problemática, rastros de vertimientos de aguas tratadas que provienen de las lagunas de estabilización de la mina La Jagua (ANLA, 2018).

Las lagunas de estabilización que la empresa posee, son para el manejo y tratamiento de drenajes ácidos mineros, que generalmente contienen sólidos en suspensión, sólidos coloidales, iones disueltos y reactivos residuales utilizados en los procesos mineros, tales como los colectores (muy tóxicos), espumantes (tóxicos), floculantes, coagulantes y dispersantes. Aunque cabe destacar que debido al gran volumen de estos riles mineros se le realiza un tratamiento deficiente, incompleto e irresponsable, y sus aguas se caracterizan



por tener un potencial de hidrogeno (pH) ácido y asimismo contienen grandes cantidades disueltas de metales pesados como el hierro. Estas aguas provienen principalmente del procesamiento de carbón y otros minerales (en su área de concentración), que es donde se genera la mayor cantidad de residuos, asimismo en las descargas e infiltraciones de aguas claras y drenajes ácidos de mina, las cuales representan un alto potencial de impacto ambiental negativo en cursos de aguas superficiales y subterráneos, con probables daños a los sistemas acuático y terrestre, en estos efluentes ácidos generados por la lixiviación natural de materiales (ANLA, 2018).

Una de las estrategias para optimizar el sistema de tratamiento de drenajes ácidos mineros de la Mina La Jagua con el fin de mejorar la eficiencia en la remoción de los contaminantes, es diseñando un sistema de tratamiento de aguas ácidas en conjunto con un mecanismo de electrocoagulación, que es un método eficiente y adecuado, para el manejo de aguas ácidas y con altos contenidos de metales pesados, para evitar o controlar la contaminación del recurso hídrico y garantizar su disponibilidad.

Estudiaremos los efectos de este tratamiento a escala laboratorio de las aguas típicamente tratadas en las plantas de la empresa minera, para contrarrestar metales pesados, remover sólidos y efectuar ajustes de pH. De la misma manera, se analizará si estas aguas pueden servir como nuevas fuentes de minerales, mediante el uso de técnicas especializadas actuales y evitar que estos se desechen.

Además, la necesidad de desarrollar una serie de estrategias de manejos sustentable del agua empleando tecnologías convencionales para una correcta optimización de los DAM, provenientes del sector operativo y extractivo de la mina e implementar un sistema de recirculación del agua en actividades al interior de la empresa, o en el caso más extremo verterlos de manera óptima y al Rio Santa Cruz para su posterior reutilización en la actividad agrícola, ganadera y otros usos, cumpliendo con los estándares exigidos por la normatividad legal vigente en aras de contribuir al buen desarrollo de los procesos operativos de la empresa.



2. JUSTIFICACIÓN

Como estudiantes de la universidad popular y en calidad de becados de la Fundación La Jagua queremos hacer una contribución a la empresa en brindarle una alternativa de tratamiento para las aguas ácidas de este punto de explotación la cual se basa en el tratamientos de estas aguas, mediante la utilización de un electrocoagulador para la remoción de turbidez y hierro, este proyecto desea evaluar la eficacia de la electrocoagulación como una alternativa de tratamiento, la cual en investigación se han encontrado remociones superiores al 90% como la presentada por Pantoja, en 2012 en su trabajo de grado denominado "Aplicación de la electrocoagulación y floculación sobre el tratamiento del drenaje ácido de minas de carbón", dónde observó que la implementación de electrocoagulación de hierro y floculación química logra reducir el valor de turbidez en 99%, DQO 41%, hierro 99%, manganeso 96%, zinc 94% y sulfatos 38% con un mínimo consumo energético (0.3 kWh/m3).

Con este proyecto se busca minimizar los impactos ambientales utilizando una estrategia innovadora y amigable con el medio ambiente como lo es la utilización de la electrocoagulación para un correcto tratamiento de aguas residuales, que a su vez este modelo de optimización es sostenible y es necesaria la intervención de personal capacitado para su eficiente desarrollo.

Teniendo en cuenta la configuración empleada del sistema de tratamiento de drenajes ácidos de la mina La Jagua, las técnicas actuales de tratamiento y el aumento de la actividad minera, se hace necesaria la evolución y renovación de este sistema para tratar los drenajes ácidos con alto grado de contenido de hierro y pH muy bajo, asimismo poner en funcionamiento medidas de manejo ambiental complejas que solucionen esta problemática, en definitiva. Es de vital importancia desarrollar este proyecto en nuestro municipio, ya que lo hacemos con el fin de preservar las fuentes de agua, de igual manera la fauna y flora presente en este río. Asimismo, cabe resaltar que agua tratada podría ser reutilizada y aprovechada en el sector agropecuario del municipio debido a que posee características fisicoquímicas acordes para el agua de riego, solventado buena parte el consumo de agua necesario para la producción en este sector.



3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL.

Evaluar la eficacia del electrocoagulador en la remoción de hierro y turbidez, variando el pH en el sistema de tratamiento de los drenajes ácidos mineros producidos en la zona de PIT sur de la mina La Jagua.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Caracterizar los parámetros físico-químicos tales como pH, turbidez, DQO, DBO, sólidos totales, sólidos sedimentados, sólidos disueltos, conductividad, sulfatos, contenido de hierro, aluminio y zinc en los drenajes ácidos producidos en el PIT sur de la mina La Jagua.
- Implementar un electrocoagulador a escala laboratorio para la depuración de drenajes ácidos mineros.
- Evaluar la eficacia en la remoción de los parámetros de pH, turbidez, DQO, DBO, sólidos totales, sólidos sedimentados, sólidos disueltos, conductividad, sulfatos, contenido de hierro, aluminio y zinc en el efluente del electrocoagulador.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1 ANTECEDENTES.

- **(Ruiz, 2017) desarrolló un “prototipo de una celda de electrocoagulación abastecida con energía fotovoltaica para tratamiento de aguas residuales en la industria minera”**

En los cuales obtuvo una reducción muy significativa de las aguas tratadas con electrocoagulación con respecto a las aguas del afluente; en parámetros tales como sólidos totales que pasó de 2400 mg/L a 1525 mg/L, pH de 6,087 a 5,367, turbidez de 42,05 NTU a 7.018 NTU, acidez de 2,3 ppm a 6,4 ppm, DQO de 109,34 ppm a 94.44 ppm. Además presentó variaciones de disminución de los sólidos sedimentados, dureza cálcica, cloruros y sulfatos. Por otra parte, fue notable el aumento de la acidez del agua durante el proceso y el O₂ disuelto.

- **(Ferniza, 2017) en su estudio “eficiencia de un sistema acoplado electrocoagulación-fitorremediación para la remoción de Pb, Cu, Cd y Zn, presentes en efluentes mineros”**

Este estudio presenta los resultados de un tratamiento de electrocoagulación-fitorremediación acoplado para la reducción de cobre, cadmio, plomo y zinc; Presente en solución acuosa el cual simuló las características de las aguas mineras con un pH de 5,27 y al de las pruebas y de manera controlada obtuvo un valor de 9. Además los resultados indicaron que el tratamiento acoplado redujo las concentraciones de metales en 99,2% de Cu, 81,3% de Cd y 99,4% de Pb.

- **(Oncel, Muhcu, Demirbas, 2013) en su investigación “Un estudio comparativo de precipitación química y electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de drenaje ácido de carbón”**

El cual proporcionó una comparación cuantitativa entre la precipitación química y electrocoagulación (EC) para la eliminación de metales pesados como Fe, Al, Ca, Mg, Mn, Zn, Si, Sr, B, Pb y Cr, a partir de aguas



residuales de drenaje de la mina de carbón (CMDW) a escala de laboratorio. El pH óptimo para la eliminación de la mayoría de los metales pesados de CMDW por la precipitación química con hidróxido de sodio fue 8, excepto para Ca, Sr y B (pH 10 o superior). Las eficiencias de eliminación al pH óptimo variaron de 28.4% a 99,96%. La influencia de la densidad de corriente y el tiempo de operación en el proceso de la EC se exploró en la eliminación, eficiencia y costo operativo. Los resultados del proceso de la EC mostraron que la eliminación de metales presentes en CMDW aumentó al aumentar la densidad de corriente y el tiempo de operación. El proceso de la EC fue capaz de lograr mayores eficiencias de remoción (> 99.9%) en un tiempo de electrocoagulación de 40 min, una densidad de corriente de 500 A /m² y un pH de 2,5 en comparación con los resultados obtenidos con la precipitación química a pH 8. Los costos operativos en las condiciones óptimas de funcionamiento también se determinaron en 1,98 s / m³ para la CE y 4.53 s / m³ para la precipitación química. El proceso EC fue más efectivo que el químico. La electrocoagulación tiene el potencial de eliminar ampliamente las desventajas del tratamiento clásico, técnicas para lograr un tratamiento económico y sostenible de aguas residuales contaminadas.

- **(Pantoja, 2012) En su trabajo evaluó la “Aplicación de la electrocoagulación y floculación sobre el tratamiento del drenaje ácido de minas de carbón”**

En este trabajo haciendo uso combinado de electrocoagulación y floculación como una alternativa para el tratamiento de estos drenajes. Se tomaron en cuenta factores como la carga aplicada, densidad de corriente, pH en la floculación, y cantidad de floculante. Los resultados se cuantificaron con la medición de parámetros tales como turbiedad, cantidad de sulfatos y pH final. Además realizó mediciones de las cantidades de metales removidos, DQO, sólidos totales, conductividad y color. La implementación de electrocoagulación de hierro y floculación química logró reducir el valor de turbidez en 99%, DQO 41%, hierro 99%, manganeso 96%, zinc 94% y sulfatos 38% con un mínimo consumo energético (0.3 KW.h/m³).



4.2 MARCO TEORICO.

4.2.1 Agua.

El agua es un componente químico muy abundante en la biósfera y uno de los más importantes, ya que casi toda la vida en la tierra, utiliza agua como medio fundamental para el funcionamiento del metabolismo, de ahí la importancia de éste recurso. Cerca del 97% total de agua se encuentra en los océanos y otros cuerpos de agua salina y no se puede utilizar para diversos propósitos. Del 3% restante, casi el dos se encuentra distribuida en los témpanos de hielos glaciares, en la atmosfera, por lo que no es accesible (Domínguez, 2016).

4.2.2 Agua residual.

Se consideran aguas residuales a todas aquellas aguas que provienen del uso del hombre en sus actividades y por ello son contaminadas con sustancias y/o microorganismos, lo que genera la necesidad de desecharlas. Para la FAO (2016), el agua residual es aquella que no tiene valor inmediato para el fin para el que se utilizó ni para el propósito para el que se produjo debido a su calidad, cantidad o al momento en que se dispone de ella. No obstante, las aguas residuales de un usuario pueden servir de suministro para otro usuario en otro lugar.

Según su origen, las aguas residuales resultan de la combinación de líquidos y residuos transportados por el agua, que proviene de residencias, oficina, edificios comerciales e instituciones, junto con los residuos de las industrias y actividades agrícolas, así como de las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que también puede agregarse eventualmente al agua residual.

De acuerdo con el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua de la Universidad de Salamanca, las aguas residuales pueden tener distintos orígenes, aunque se resaltan los siguientes:

- **Aguas Residuales Domésticas o Aguas Negras:** Su generación se da por la suplección de las necesidades básicas de los seres humanos. Proceden de las heces y orina humanas, del aseo personal y de la cocina y de la limpieza de la

casa. Suelen contener gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como restos de jabones, detergentes, lejía y grasas (Espigares & Pérez, s.f)

- **Aguas Residuales Industriales:** Las cuales son provenientes de los diferentes procesos productivos como la minería, la agricultura y entre otros. Contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos y grasas y otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal (Espigares & Pérez, s.f). En general, su composición depende de la actividad industrial que desarrolle la empresa.
- **Aguas Residuales Agrícolas:** Procedentes de las labores agrícolas en las zonas rurales. Estas aguas suelen participar, en cuanto a su origen, en las aguas urbanas que se utilizan, en numerosos lugares, para riego agrícola con o sin un tratamiento previo (Espigares & Pérez, s.f).

4.2.3 Tratamientos de aguas residuales.

Actualmente existen muchas variedades y tipos de tratamiento de aguas residuales, cada uno de estos se podría decir que es aplicable de acuerdo a la características físico química y biológicas del efluente a tratar, no es lo mismo un efluente domestico que un efluente industrial, los dos presentan muchas diferencias en su composición por lo tanto la elección del tipo de tratamiento a realizar se determina de acuerdo a sus características (Aguilar, 2015).

Los contaminantes presentes en aguas residuales pueden eliminarse con procesos químicos, físicos y/o biológicos. Los métodos individuales de tratamiento de aguas suelen clasificarse en operaciones físicas unitarias, procesos químicos unitarios y procesos biológicos unitarios. Los métodos de tratamiento en los que predominan la acción de fuerzas físicas se conocen como operaciones unitarias, entre estas se encuentran el desbaste, mezclado, floculación, sedimentación, flotación, transferencia de gases y filtración. Los métodos en los cuales la eliminación o conversión de los contaminantes se consigue con la adición de productos químicos o gracias al desarrollo de ciertas reacciones químicas, se conocen como procesos químicos unitarios y



fenómenos como la precipitación, adsorción y la desinfección son ejemplos de procesos convencionales en el tratamiento de aguas (Pinzón Gamboa, 2010).

Los principales métodos de tratamiento de las aguas residuales urbanas tienen tres fases: el tratamiento primario, que incluye la eliminación de arenillas, la filtración, el molido, la floculación (agregación de los sólidos) y la sedimentación; el tratamiento secundario, que implica la oxidación de la materia orgánica disuelta por medio de lodos biológicamente activo, que seguidamente es filtrado y el tratamiento terciario donde se emplean métodos biológicos avanzados para la eliminación del Nitrógeno, métodos físicos y químicos, tales como la filtración granular y la adsorción por carbono activado. La manipulación y eliminación de los residuos sólidos representa entre un 25 y un 50% del capital y los costos operativos de una planta de tratamiento. El tratamiento de las aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes presentes en el agua de uso humano.

El objetivo del tratamiento es producir agua limpia (o efluente tratado) o reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o lodo (también llamado bio-sólido) convenientes para su disposición o reuso. Las aguas residuales son provenientes de tocadores, baños, regaderas o duchas, cocinas, etc.; que son desechados a las alcantarillas o cloacas. En muchas áreas, las aguas residuales también incluyen algunas aguas contaminadas provenientes de industrias y comercios (Romero, 2005).

4.2.4 Aguas residuales en minería.

Las aguas residuales de la minería de carbón son aguas industriales, provenientes del interior de la tierra y que contienen una gran cantidad de metales pesados.

En este contexto, estas aguas residuales son uno de los problemas contaminantes más graves de la minería, puesto que tales aguas contienen un alto contenido de sales disueltas, un pH ácido y altos contenidos de metales pesados como el hierro, el aluminio, el manganeso y el zinc (Pantoja, 2012).

Por otra parte, dependiendo del territorio donde se ubica la mina, Pantoja (2012) afirma que se presentan ciertas concentraciones de sustancias tóxicas, entre ellos metales como el cobre, el níquel, el cromo, el plomo y el arsénico. Tales sustancias representan una amenaza para el medio ambiente cuando su disposición no es la adecuada, haciendo evidente su impacto ambiental en la calidad del agua, en la composición de los suelos y la atmósfera.

4.2.5 Drenajes ácidos mineros (DAM).

El DAM es el contaminante ácido y ferruginoso más grave en los efluentes naturales de agua, es por ello que se caracteriza por ser el principal problema ambiental que tiene que enfrentar la minería mundial, debido a la naturaleza del contaminante, su extensión y dificultad de resolución.

Estos drenajes se caracterizan por su acidez (pH 2.9-3.3), alto contenido de sales disueltas (sulfatos 2246mg/L), y elevadas concentraciones de metales pesados como el Hierro (576.4mg/L), Aluminio (33.2 mg/L), Manganeseo (9.1 mg/L) y Zinc (1.42 mg/L).

Dependiendo del territorio en donde se ubican los DAM, algunos presentan ciertas concentraciones de sustancias tóxicas, entre ellos metales como el cobre, níquel, cromo, plomo y arsénico. Estas sustancias son perjudiciales cuando se descargan sin ningún tratamiento a los efluentes hídricos, reflejando una reducción en la calidad del agua y un impacto muy negativo en la atmósfera y el suelo.

4.2.6 Electrocoagulación (EC).

La electrocoagulación “EC” (coagulación asistida electroquímicamente) utiliza como funcionamiento a la celda electrolítica y la reacción que se produce “electrólisis” (Cantera, 2013).

Es un proceso de corrosión acelerada que utiliza la electricidad para eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos en el agua que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsionados (Zodi, 2010). Consiste en inducir corriente eléctrica al agua a través de placas metálicas paralelas de hierro y aluminio generalmente son las más utilizadas (Morales y Acosta, 2010), la

corriente eléctrica proporciona la fuerza motriz que provoca una serie de reacciones químicas: Ánodo (oxidación del metal (M) a su catión (Mn+)); simultáneamente en el Cátodo el agua es reducida a hidrógeno (H₂) y ion hidroxilo (OH⁻), este último al unirse al catión metálico da forma a un coagulante de las impurezas, mientras el hidrogeno producido por esta reacción forma una espuma que contiene materia orgánica, estos agregados son los flóculos (Mercado, 2013).

Los flóculos de hidróxido metálico son menos coloidales y solubles, cuando esto ocurre los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se adhieren al flóculo, los cuales posteriormente precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundaria (Zarou, 2010). Los procesos de electrocoagulación se ven afectados por la naturaleza y concentración del contaminante, el pH del agua residual y la conductividad; estos factores determinan y controlan las reacciones ocurridas en el sistema y la formación del coagulante (Cantera, 2013).

Su ciclo empieza cuando las rocas mineralizadas se exponen a la acción del aire y agua, ocasionando un proceso complejo que lleva al desarrollo de fenómenos físicos, químicos y biológicos (Cheng, 2009). Estos procesos se pueden resumir en los siguientes:

- Procesos de oxidación que llevan a la transformación de sulfuros en sulfatos con producción de ácido. Se ha evidenciado que a ciertas condiciones estos son catalizados por bacterias como Thiobacillus Ferrooxidans, T. Thiooxidans, T. Thioparus
- Reacciones secundarias entre los productos de las reacciones anteriores y los minerales residuales presentes en la roca; en este se evidencia la disolución de metales pesados por el contacto con el ácido generado. Algunos metales encontrados son plomo, zinc, cobre, arsénico, mercurio, cadmio, aluminio, manganeso entre otros.
- Disolución y arrastre de los productos por el agua de lluvia o escorrentía, generando el DAM de carbón.



4.2.7 Minería en Colombia.

La minería en Colombia constituye uno de los principales motores económicos del país. En los últimos años Colombia ha intensificado su explotación minera en razón del uso de nuevas tecnologías y de la llegada de inversionistas extranjeros al país. Colombia cuenta con una ubicación privilegiada desde el punto de vista metalúrgico debido al marco geológico que la caracteriza, pues posee dos grandes provincias arquitectónicas: el Cinturón Andino.

En éstas provincias arquitectónicas se presentan gran variedad de ambientes geológicos que han sido identificados en otros países con yacimientos de: minerales y piedras preciosas, metales básicos, productos mineros industriales, rocas ornamentales, uranio y carbón, factores que atraen las inversiones extranjeras para realizar labores de exploración y explotación.

Las condiciones geológicas y geográficas de Colombia hacen que su subsuelo sea rico en todo tipo de minerales e hidrocarburos con potencial de explotación económica. En cuanto a la minería carbonífera tenemos que el carbón mineral o hulla es un combustible de procedencia fósil, de color negro brillante, arde con facilidad y produce mucho calor. Además de su uso como combustible en las fábricas, el carbón se emplea en altos hornos, locomotoras, barcos, etc.

La destilación de la hulla permite obtener gran cantidad de subproductos de mucha importancia como gas, coque, alquitrán que proporciona aceites, sustancias para perfume, pinturas, plásticos, neumáticos, explosivos, medicinas, insecticidas, pavimentos, etc. Colombia tiene inmensas reservas de carbón en las tres cordilleras especialmente en la Oriental. Posee minas en los departamentos de Cesar, Boyacá, Antioquia, Cundinamarca, Norte de Santander, La Guajira y Valle del Cauca (Sistema de Información Minero Colombiano, 2015).



Tabla 1. Reservas de Carbón en el territorio Nacional.

Reservas de carbón en Colombia	
Departamento	Reservas probadas(Millones de toneladas)
La Guajira	3.694,64
Cesar	1.770,91
Córdoba	378,19
Antioquia	87,07
Valle del Cauca	40,51
Cundinamarca	221,84
Boyacá	153,95
Santander	55,20
Norte de Santander	105,30
TOTAL	6.507,61

Fuente: SIMCO, 2015.



4.3 MARCO CONCEPTUAL.

Agua residual: Es un tipo de agua que está contaminada con sustancias fecales y orina, procedentes de desechos orgánicos humanos o animales.

Ánodo: Es un electrodo en el que se produce una reacción de oxidación, mediante la cual un material, al perder electrones, incrementa su estado de oxidación.

Catión: Ión que tiene carga positiva y procede de un elemento electropositivo.

Cátodo: Es un electrodo que sufre una reacción de reducción, mediante la cual un material reduce su estado de oxidación al recibir electrones.

Celda: Es un objeto tridimensional que forma parte de otro objeto con un mayor número de dimensiones.

Coagulante: Sustancia que funciona creando una reacción química y eliminando las cargas negativas que causan que las partículas se repelan entre sí, provocando o acelerando la coagulación.

Coloide: Mezcla de sustancias que se encuentra entre las soluciones y las suspensiones y cuyas partículas tienen un tamaño entre los 10 y 100 nanómetros.

Conductividad: Es la propiedad natural de los cuerpos que permiten el paso a través de sí del calor o la electricidad.

Corriente: Es el movimiento de cargas eléctricas a través de un material conductor. Puede ser continua, que es aquella de intensidad constante en la que el movimiento de las cargas siempre es en el mismo sentido, o alterna que se caracteriza por ser variable, en la que las cargas eléctricas cambian el sentido del movimiento de manera periódica.

Corrosión: Es el desgaste o deterioro de un material que sufren los materiales metálicos a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno.



Depuración: En el tratamiento de aguas, son las operaciones químicas, biológicas y físicas cuyo objetivo es reducir o eliminar la contaminación, donde se higieniza, filtra o reacondiciona el líquido.

Drenaje: Hace referencia a la red de tuberías o estructura física que interconectadas entre sí efectúan la evacuación de los líquidos pluviales o de cualquier otro tipo.

Eficacia: Corresponde al uso racional de los medios para alcanzar un objetivo predeterminado, es decir, cumplir un objetivo con el mínimo de recursos disponibles y tiempo.

Efluente: Son aguas servidas con desechos sólidos, líquidos o gaseosos que son emitidos por viviendas y/o industrias, generalmente a los cursos de agua; o que se incorporan a estas por el escurrimiento de terrenos causado por las lluvias.

Electrocoagulación: Consiste en un proceso de desestabilización de los contaminantes del agua ya estén en suspensión, emulsionados o disueltos, mediante la acción de corriente eléctrica directa de bajo voltaje y por la acción de electrodos metálicos de sacrificio, normalmente aluminio/hierro

Electrolisis: Es un proceso químico por medio del cual una sustancia o un cuerpo inmersos en una disolución se descomponen por la acción de la corriente eléctrica continua.

Energía: Es la capacidad de realizar un trabajo o hacer funcionar cosas.

Escorrentía: Es el agua de lluvia que discurre por la superficie de un terreno. También se define como la corriente de agua que se vierte al rebasar su depósito o cauce naturales o artificiales. Se le conoce con el nombre de aliviadero.

Flóculo: Es un conjunto de partículas pequeñas aglutinadas en partículas más grandes y con mayor capacidad de sedimentación que se obtiene mediante tratamiento físico, químico o biológico.



Hidrofóbico: Son sustancias que no se pueden mezclar con en el agua o que son repelidas por ella. Este fenómeno ocurre cuando la molécula en cuestión no es capaz de interaccionar con las moléculas de agua ni por interacciones ión-dipolo ni mediante puentes de hidrógeno.

Impacto: Son el conjunto de efectos o alteraciones que un hecho produce sobre el entorno, medio físico e incluso personas.

Lejía: Son líquidos corrosivos y transparente que, en disolución acuosa, son un fuerte oxidante, y que suele utilizarse como desinfectante, como decolorantes y en general como solventes de materias orgánicas.

Pit: Es un sumidero o método de explotación de minería a cielo abierto, en el cual se realiza un banqueo descendente y se forma una pirámide circular hacia la profundidad.

Prototipo: Hace referencia a cualquier tipo de dispositivos en pruebas, o un objeto diseñado para una simulación o demostración de cualquier tipo.

Remoción: Es la acción y efecto de remover o la privación de cargo o empleo.

Residuo: Todo elemento que es considerado desecho producto de una actividad, proceso o servicio, y que es necesario eliminar o extraer.

Riles: Son aguas que resultan del procesamiento y elaboración de distintos productos, y que deben ser debidamente tratados, de manera de que no perjudiquen los cuerpos de aguas.

Soluble: Hace referencia a la sustancia o cuerpo que se puede disolver al interactuar con otro líquido.

Sostenible: Es un sistema en equilibrio entre un individuo y su entorno, o también lo podemos definir como el desarrollo que es capaz de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer los recursos y posibilidades de las futuras generaciones.



Sulfuro: Es el compuesto covalente que resulta de la combinación del azufre - elemento químico no metal- y otros minerales o radicales.

Toxicidad: Hace referencia a la capacidad de una sustancia química (artificial o natural) de producir efectos perjudiciales sobre un ser vivo, al entrar en contacto con él. De igual modo, se puede definir como el grado de efectividad que poseen las sustancias que, por su composición, se consideran tóxicas.

Vertimiento: Son el conjunto de materiales o líquidos de desecho que se vierten en algún lugar, especialmente los procedentes de instalaciones industriales o energéticas.

Voltaje: Es una magnitud física, con la cual podemos cuantificar o “medir” la diferencia de potencial eléctrico o la tensión eléctrica entre dos puntos. Si dos puntos que tienen una diferencia de potencial se unen mediante un conductor se producirá un flujo de electrones.

Yacimiento: Es la formación o el lugar donde se hallan naturalmente las rocas, minerales, gases o fósiles en grandes variaciones, formas y origen. También se define como el sitio donde se encuentran restos arqueológicos.

4.4 MARCO CONTEXTUAL.

El proyecto minero “La Jagua” se localiza en el centro del departamento del Cesar a 120 km al sur de Valledupar, en jurisdicción de los municipios de Becerril y La Jagua de Ibirico, a 17 km y 1 km, respectivamente. El polígono minero que conforma el proyecto se ubica específicamente en inmediaciones de los centros poblados urbanos de Estados Unidos perteneciente al municipio de Becerril y centro poblado urbano de La Victoria de San Isidro del municipio de La Jagua de Ibirico.



Figura 1. Localización del proyecto minero “explotación integral de carbón del flanco occidental del sinclinal de La Jagua de Ibirico”.
Fuente: SIG Web, ANLA.



Figura 2. Localización del vertimiento sobre el caño Santa Cruz proyecto (explotación integral del flanco occidental del sinclinal de La Jagua de Ibirico).
Fuente: software libre Google Earth y coordenadas tomadas en campo.

4.5 MARCO LEGAL.

El objetivo de esta normatividad es determinar, establecer y evaluar los principales parámetros químicos, físicos y biológicos establecidos por la ley ambiental colombiana y sus principales entes u organismos de control, de igual manera nos proporcionan información en cuanto a los datos y procesos requeridos para la operación, manejo y control de calidad de los sistemas y plantas de tratamiento de aguas residuales en el país.

Tabla 2. Leyes, decretos y resoluciones.

Leyes, decretos y resoluciones	Descripción
Constitución política	
Artículo 8	Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la nación.
Artículo 79	Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.
Artículo 80	El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.

<p>Artículo 95</p>	<p>Proteger los recursos culturales y naturales del país y velar por la conservación de un ambiente sano.</p>
<p>Leyes</p>	
<p>Ley 9 de 1979</p>	<p>En esta ley para la protección del Medio Ambiente establece las normas generales que servirán de base a las disposiciones y reglamentaciones necesarias para preservar, restaurar u mejorar las condiciones necesarias en lo que se relaciona a la salud humana, asimismo los procedimientos y las medidas que se deben adoptar para la regulación, legalización y control de los descargos de residuos y materiales que afectan o pueden afectar las condiciones sanitarias del Ambiente.</p> <p>Las normas de protección de la calidad de las aguas se aplican tanto para aguas públicas como privadas.</p> <p>Para el control sanitario de los usos del agua se tendrán en cuenta las siguientes opciones, sin que su enunciación indique orden de prioridad.</p>
<p>Ley 99 de 1993</p>	<p>Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.</p>



Decretos	
Decreto 1076 de 2015.	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, y su objetivo es compilar y racionalizar las normas de carácter reglamentario que rigen el sector Ambiente.
Decreto 1594 de 1984.	Esta norma declara las condiciones y los compuestos permitidos del vertimiento de líquidos. Cuando quiera que el presente Decreto se refiera a recurso, se entenderá por tallas aguas superficiales, subterráneas y marinas, incluidas las aguas servidas. La sigla EMAR utilizada en el presente Decreto, corresponde a la entidad encargada del manejo y administración del recurso.
Decreto 3100 de 2003.	Proyectos de inversión en descontaminación hídrica. Son todas aquellas inversiones cuya finalidad sea mejorar la calidad físico químico y/o bacteriológico de los vertimientos o del recurso hídrico. Incluyen la elaboración y ejecución de los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico. Igualmente, comprende inversiones en interceptores, emisarios finales y sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas y, hasta un 10% del recaudo de la tasa podrá utilizarse para la cofinanciación de estudios y diseños asociados a los mismos.



Decreto 2667 de 2012	Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones. Establece que los proyectos de inversión en descontaminación y monitoreo de la calidad del recurso hídrico son todas aquellas inversiones para el mejoramiento, monitoreo y evaluación de la calidad del recurso hídrico, incluyendo la elaboración y ejecución de los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico, inversiones en interceptores, emisarios finales y sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas.
Resoluciones	
Resolución 0330 de 2017	Reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de diseño construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo.



<p>Resolución 708 de 2012</p>	<p>En el que el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), estableció a las empresas CARBONES DE LA JAGUA S.A. -CDJ, CONSORCIO MINERO UNIDO S.A. -CMU y CARBONES EL TESORO – S.A. CET, el Plan de Manejo Ambiental Unificado para el desarrollo de la actividad de la Operación Integrada de los contratos mineros 285/95 (CDJ), 132/92 (CET), 109/90 (CMU) y DPK-141 (CDJ) y HKT-08031 (CDJ) y actividades conexas; en el sentido de incluir los permisos, autorizaciones y/o concesiones para el uso, aprovechamiento y de los recursos naturales renovables otorgados en beneficio del referido proyecto.</p>
<p>Resolución 0631 de 2015.</p>	<p>Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.</p> <p>Reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010. Establece los parámetros y límites máximos de vertimientos medidos en concentración, para Aguas Residuales Domésticas (ARD) y Aguas Residuales No domésticas (ARND), clasificadas en 73 actividades industriales, comerciales y del sector</p>



	servicios.
Resolución n° 00655 de 2018.	Por la cual la AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES (ANLA) impone una medida preventiva de suspensión de actividades debido a una presunta contaminación y mortandad de fauna silvestre en el caño Santa Cruz, al parecer originado por punto de vertimiento de aguas industriales en el sector sur de la operación conjunta PLJ
Otros	
CONPES 3177 de 2002.	<p>ACCIONES PRIORITARIAS Y LINEAMIENTOS PARA LA FORMULACION DEL PLAN NACIONAL DE MANEJO DE AGUAS RESIDUALES</p> <p>Este documento somete a consideración del CONPES las acciones prioritarias y los lineamientos para la formulación del Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales (PMAR) con el fin de promover el mejoramiento de la calidad del recurso hídrico de la Nación.</p> <p>La política de agua potable y saneamiento básico establece la necesidad de formular un Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales donde sea viable y sostenible económica, social y ambientalmente. Para ello se requiere la articulación de instrumentos</p>



	<p>económicos y financieros y recursos para la inversión en tratamiento de aguas residuales, teniendo en cuenta la vulnerabilidad de las fuentes hídricas, así como la capacidad de pago de la población, la sostenibilidad financiera e institucional de las empresas para la prestación de los servicios de acueducto y alcantarillado y las metas de aumento de coberturas de dichos servicios.</p>
--	--

Fuente: Autores, 2020.

5. MARCO METODOLÓGICO.

5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN.

El tipo de investigación fue experimental, consistió en la manipulación de una (o más) variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular. El experimento provocado por el investigador, le permite introducir determinadas variables de estudio manipuladas por él, para controlar el aumento o disminución de esas variables y su efecto en las conductas observadas (Grajales, 2000)

5.2 NIVEL DE INVESTIGACIÓN.

El nivel de nuestra investigación fue explicativa con cierto grado de exploratoria ya que con este tipo de investigación se buscó establecer las causas en distintos tipos de estudio, estableciendo conclusiones y explicaciones para enriquecer o esclarecer las teorías, confirmando o no la tesis inicial o bien se obtiene la información inicial para continuar con una investigación más rigurosa, o bien se deja planteada y formulada una hipótesis.

5.3 LÍNEA Y SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN.

La línea de investigación es sostenibilidad y gestión ambiental. Mientras que este estudio se adecua a la Sublínea de gestión integral del recurso hídrico (3), específicamente en lo referente al Tratamiento de aguas residuales (3,3).

5.4 POBLACIÓN.

La población tenida en cuenta en esta investigación fueron las aguas de drenaje ácidos producidas en el PIT sur de la mina La Jagua, que son vertidas al caño santa cruz, del cual es aprovechado por las comunidades situadas aguas abajo.

5.5 MUESTRA.

El muestreo fue de tipo compuesto, estaba formada por varias muestras simples recogidas a lo largo de un período de tiempo y combinadas según unas proporciones concretas, referidas a parámetro de interés como el caudal (Roble, 2011). Se tomaron 4 muestras de las aguas de drenaje ácidos

producidos en el PIT sur de la mina La Jagua. Estas muestras se tomaron durante un periodo de 2 meses, es decir una muestra quincenal para tener en cuenta si se presentaban variaciones o lluvias en la zona de estudio.

5.6 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.

Para la realización de este trabajo se utilizaron los métodos estándares (SM, por sus siglas en inglés Standar Method) para la toma de muestras de los parámetros. Asimismo, para el desarrollo de este se usaron las instalaciones del laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria en la Universidad Popular del Cesar y el laboratorio Nancy Flórez García S.AS para análisis de las muestras y determinación de los parámetros estudiados para garantizar los resultados confiables.

Tabla 3. Códigos de parámetros involucrados.

PARAMETRO	MÉTODO	
Hierro (Fe) Total	SM 3030K / 3111B	Espectrométrico
Turbidez	SM 2130B	Nefelométrico
pH (potencial de hidrógeno)	SM 4550-H+B	Electrométrico
DQO (demanda química de oxígeno)	SM 5220C – Reflujo cerrado	Volumétrico
DBO (demanda biológica de oxígeno)	SM 5210B / EPA 360.3	Incubación 5 días
Conductividad eléctrica	SM 2510B	Electrométrico
ST (sólidos totales)	SM 2540B	Gravimétrico
SST (sólidos suspendidos totales)	SM 2540D	Gravimétrico
SD (sólidos disueltos)	SM 2540C	Gravimétrico
Sulfatos	SM 4500 – SO ₄ E	Turbidimétrico
Zinc (Zn)	SM 3030K / 3111B	Espectrométrico
Aluminio (Al)	SM 3030K / 3111D	Espectrométrico
Temperatura	SM 2550B	Electrométrico

Fuente: Autores, 2020.

5.7 DESARROLLO METODOLOGICO.

Para la implementación de la electrocoagulación como método para remoción de Fe, PH y turbidez en las aguas acidas del PIT sur de la mina La Jagua a escala laboratorio desarrollamos una sucesión de etapas o fases para la descripción y justificación de la metodología propuesta a lo largo de este trabajo.

5.7.1 ETAPA 1. Caracterización de los parámetros fisicoquímicos y biológicos.

5.7.1.1 Actividad 1. Recolección de información básica y reconocimiento de la zona de estudio.

Se realizaron visitas a campo para reconocer las instalaciones de la mina y el PIT donde se realiza las descargas de las aguas ácidas. En estas visitas se identificaron los puntos donde se realizó la toma de muestras con el propósito de disponer de información previa que nos sirvió para el desempeño de este estudio.

5.7.1.2 Actividad 2. Recolección de muestras.

Para la recolección de las muestras fue necesario establecer previamente el formato que nos permitió identificar las muestras y tener un orden, por tal razón este formato (Anexo 1) contó con las siguientes especificaciones:

- El número de muestras realizadas previamente identificadas, el punto de muestreo, las características de las aguas residuales y el laboratorio donde se analizaron las muestras.
- Se tuvo en cuenta que las muestras tomadas eran compuestas debido a que se hicieron varias recolecciones en el mismo punto pero en diferentes tiempos. Luego se recolectaron las muestras necesarias en los puntos de muestreo antes establecidos de la siguiente manera:
- Se rotularon los recipientes donde se tomaron las muestras previo a la caracterización, estos recipientes fueron de plástico y libre de impurezas.

- Se tomaron las muestras y se selló el recipiente para evitar cualquier tipo de contaminación.
- Finalmente se transportó la muestra con sumo cuidado hasta el laboratorio de ingeniería ambiental y sanitaria de la Universidad Popular del Cesar y al laboratorio Nancy Flórez García S.A.S (para estudio de metales), donde se realizó el análisis de los parámetros a evaluar, evitando la contaminación de la muestra o cualquier accidente. Para ello, se siguió el procedimiento establecido en el instructivo para la toma de muestras de aguas residuales (TI0187) elaborado por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) en el año 2007.

Tabla 4. Requerimientos de conservación y almacenamiento de muestras de agua.

Parámetro	Preservación	Almacenamiento máximo Recomendado / Regulatorio
DBO	Refrigeración	6h/48h
DQO	Analizar tan pronto sea posible, o adicionar H ₂ SO ₄ a pH < 2.0, refrigerar	7d/28d
Conductividad eléctrica	Refrigeración	28 d/28 d
Metales en general	Para metales disueltos filtrar inmediatamente, adicionar HNO ₃ a pH<2	6 meses/6 meses
pH	Analizar inmediatamente	0.25 h/0.25 h
Sólidos	Refrigeración	7 d/ 2-7 d
Sulfatos	Refrigeración	28 d /28 d
Temperatura	Analizar inmediatamente	0.25 h/ 0.25 h
Turbidez	Analizar el mismo día, guardar en oscuridad hasta 24 horas; refrigerar	24 h/48 h

Fuente: Autores, 2020.

5.7.1.3 Actividad 3. Caracterización de los parámetros físico-químicos y biológicos.

En esta actividad se monitorearon los parámetros fisicoquímicos y biológicos del afluente, posteriormente fueron analizados en el laboratorio (pH, turbidez, temperatura, DQO, DBO, sólidos totales, sólidos sedimentados, sólidos disueltos, conductividad, sulfatos, contenido de hierro, aluminio y zinc) con el fin de especificar a través de los datos las propiedades o características de las muestras y evaluar las condiciones de estas aguas. Cabe destacar que algunos parámetros (Al, Fe, Zn y Sulfatos) iniciales fueron obtenidas a partir de registros internos de la Mina en documentos elaborados en el periodo correspondiente de enero a mayo del año 2020. Como se mencionó anteriormente para la caracterización y estudio de los parámetros involucrados se usó los procedimientos establecidos en la guía de métodos estándares.

Tabla 5. Métodos y procedimientos para la caracterización de parámetros involucrados.

PARÁMETRO	MÉTODO	PROCEDIMIENTO
Hierro Total Zinc	SM 3030K / 3111B Espectrométrico Método de llama directa aire- acetileno	a) En primer lugar, preparamos y limpiamos los equipos y recipientes a usar. b) Transferimos 45 ml de muestra bien mezclada a un recipiente de digestión previamente pesado. c) A continuación, pipeteamos 5 ml de HNO ₃ concentrado en el recipiente y apriete la tapa previamente pesada. Distribuimos las muestras de manera uniforme en el carrusel. d) Calentamos las muestras a 160°C en 10 minutos y luego eleve la temperatura a 170 °C durante los siguientes 10 minutos. e) Encendimos el generador de microondas y verificamos que el plato giratorio esté girando y que el ventilador de extracción esté encendido.



		<p>f) Dejamos enfriar los recipientes durante 5 minutos antes de sacarlos de la unidad y que las muestras se enfríen, fuera de la unidad, a temperatura ambiente.</p> <p>g) Pesamos el recipiente y registramos el valor.</p> <p>h) Finalmente, destapamos y ventilamos cada muestra en la campana extractora y la transferimos a una botella de plástico.</p>
Turbidez	<p>SM 2130B</p> <p>Nefelométrico</p> <p>Turbidímetro: HACH 2100AN</p>	<p>a) Primero, se tomó una alícuota de 500 ml.</p> <p>b) Se calibró el turbidímetro de acuerdo a las instrucciones del fabricante.</p> <p>c) Se agitó la muestra suavemente y esperamos hasta que las burbujas de aire desaparecieran y la pusimos en la célula de muestra del turbidímetro;</p> <p>d) Se hizo la lectura de la primera lectura de turbidez que muestra el equipo directamente en la escala del instrumento o en la curva de calibración apropiada.</p> <p>e) Retiramos la celda, desechamos la muestra, enjuagamos tres (3) veces con agua destilada antes de realizar la siguiente lectura.</p> <p>f) Al finalizar el ensayo, lavamos la celda con agua de la llave y luego repetidas veces con agua destilada.</p>
pH (potencial de hidrógeno)	<p>SM 4550-H+B</p> <p>Electrométrico</p> <p>Equipos:</p>	<p>a) En primer lugar, recolectamos un poco de agua en un beacker de 50 ml u otro recipiente;</p> <p>b) Se lavó el sensor del equipo con agua</p>



	Waterproof Multiparámetro y HANNA HI98194	destilada y sumergimos la sonda del multiparámetros en el agua; c) Oprimimos la tecla específica para que inicie la lectura del pH. Luego se esperamos hasta que el valor en la pantalla se estabilizó; d) Finalmente, se registró la lectura con la sonda del multiparámetros aún dentro del agua medidos en el laboratorio y campo, respectivamente.
DQO (demanda química de oxígeno)	SM 5220C – Reflujo cerrado Volumétrico	a) Inicialmente, recolectamos las muestras en botellas de plástico o de vidrio. La muestra se preservó en campo por adición de H ₂ SO ₄ concentrado y se mantuvo refrigerada hasta el momento del análisis. b) Lavamos toda la vidriería con jabón alcalino o con soda, se enjuagó con agua de la llave, posteriormente se dejó en ácido sulfúrico al 10% por unos 30 minutos y posteriormente se enjuagó con agua destilada. c) Tomamos con pipeta volumétrica 50 ml de muestra y añadimos 1 gr. de HgSO ₄ , agregamos muy lentamente 5 ml de ácido sulfúrico concentrado para disolver el sulfato de mercurio, enfriamos la mezcla para evitar posibles pérdidas el material volátil. d) Añadimos 25 ml de la solución de dicromato 0.25 N y mezclamos; haciendo girar el matraz en un chorro de agua fría, adicionamos cuidadosamente 70 ml del



		<p>reactivo de ácido sulfúrico, mezclamos cuidadosamente.</p> <p>e) Conectamos el matraz al refrigerante y dejamos en reflujo durante 2 horas.</p> <p>f) Enfríamos y lavamos el condensador con agua destilada. Desconectamos el condensador de reflujo y diluimos la mezcla hasta aproximadamente el doble de su volumen.</p> <p>g) Enfríamos a temperatura ambiente y titulamos el exceso de dicromato con solución FAS, utilizando 2- 3 gotas de ferroína. El punto final se da con el cambio de color manifiesto del azul verdoso al marrón.</p> <p>Si cuando se adicionamos los reactivo, la mezcla toma un color verdoso debemos desechar la muestra y comenzar de nuevo con una alícuota menor.</p> <p>h) Realizamos un ensayo en blanco utilizando agua destilada</p>
<p>DBO (demanda biológica de oxígeno)</p>	<p>SM 5210B / EPA 360.3 Incubación 5 días</p>	<p>a) Inicialmente, preparamos y limpiamos los equipos y recipientes a usar.</p> <p>b) Preparación del agua de dilución: Llenamos la garrafa con agua destilada, la necesaria para el análisis, teniendo en cuenta que el gasto aproximado es de 300 ml por botella winkler y van a utilizar, 3 botellas para blanco, 3 botellas para cepa más agua de dilución, 3 botellas para estándar, 4 botellas para muestras y 1,5 L adicionales.</p>



		<p>c) Verificamos que la temperatura del agua de dilución sea de $20 \pm 30^{\circ}\text{C}$.</p> <p>d) Agregamos 1 ml de cada una de las siguientes soluciones, por cada litro de agua de dilución a preparar: Solución tampón de fosfatos, Solución de sulfato de magnesio, Solución de cloruro de calcio, Solución de cloruro de hierro (III).</p> <p>d) Alistamos 3 botellas por cada muestra, blanco, blanco con cepa y estándar a procesar, registramos el volumen de la alícuota que se tomó de la muestra y la dilución previa y adicionamos 2 ml de la Cepa o Semilla.</p> <p>e) Para la lectura del blanco: Alistamos y rotulamos (blanco) tres botellas Winkler, adicionamos agua de dilución hasta la mitad del cuello de la botella.</p> <p>f) Tomamos la medida del oxígeno inicial de los blancos, leímos las otras dos botellas de blancos como muestras, registramos los datos e incubamos a $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ por cinco días.</p> <p>g) Utilizamos una de las botellas del blanco para calibrar el oxímetro al quinto día y leímos el oxígeno disuelto residual de los blancos, blanco con cepa, estándares y muestras.</p> <p>h) Luego para la lectura de blanco con adición de cepa: Alistamos y rotulamos (blanco + cepa) tres botellas Winkler.</p>
--	--	--



		<p>Adicionamos 2 ml de cepa o semilla y agua de dilución solamente hasta la mitad del cuello de la botella. Seguidamente, leímos el oxígeno inicial de los blancos con adición de cepa y por último, registramos los datos e incubamos a 20 +/-3°C por cinco días.</p> <p>i) Al quinto día leímos el oxígeno disuelto residual.</p> <p>j) Para la lectura de estándar: Alistamos y rotulamos (estándar) tres botellas Winkler. Adicionamos 2 ml de cepa o semilla y 6 ml del estándar correspondiente. Luego, adicionamos agua de dilución solamente hasta la mitad del cuello de la botella. Leímos el oxígeno inicial de los estándares, registramos los datos e incubamos a 20+/- 3°C por cinco días. Finalmente, leímos el oxígeno disuelto residual a los 5 días de incubación.</p> <p>k) Por último, para el procesamiento de la muestra: Después de establecer la cantidad de muestra (5-50 ml), agitamos la muestra para homogenización completa y se sirvió en un vaso de precipitado la muestra, ajustamos el pH de la muestra entre 6,5 y 7,5 con ácido sulfúrico 1M o hidróxido de sodio 1 M. Alistamos y rotulamos (muestra con dilución) cuatro botellas Winkler.</p> <p>l) Adicionamos a cada botella la cantidad de muestra que se ha establecido.</p>
--	--	--



		<p>Adicionamos 2 ml de cepa y agua solamente hasta la mitad del cuello de la botella, leímos el oxígeno inicial de las cuatro botellas de muestra (Si al medir el oxígeno disuelto inicial, ha descendido a menor de 6, preparar otra botella utilizando un volumen de muestra menor)</p> <p>m) Registramos los datos e incubamos a $20^{\circ} \pm 3^{\circ} \text{C}$ por cinco días. Pasados los días leemos el oxígeno disuelto residual.</p> <p>n) En definitiva, calculamos la DBO5 con los resultados obtenidos.</p>
Conductividad eléctrica	SM 2510B Electrométrico Equipo: Waterproof Multiparámetro	<p>a) Al principio, recolectamos un poco de agua en un beacker de 50 ml u otro recipiente;</p> <p>b) Después de calibrar según instructivos del equipo, se lavó el sensor con agua destilada e introducimos la sonda de conductividad a la muestra homogénea agua para determinar la conductividad;</p> <p>c) Oprimimos la tecla para que iniciara la lectura. Luego se esperó hasta que el valor en la pantalla se estabilizó;</p> <p>d) Para concluir, se hizo la lectura con la sonda del multiparámetros aún dentro del agua.</p>



ST (sólidos totales)	SM 2540B Gravimétrico	<p>a) Inicialmente, calentamos la cápsula vacía en la mufla a 550 °C durante 1 hora, enfriamos y pesamos.</p> <p>b) Transferimos 100 ml de la muestra o el volumen adecuado a la cápsula pesada (el volumen de muestra está en relación con la cantidad de sólidos que contiene la muestra, elegimos un volumen de muestra que proporcione un residuo entre 2,5 y 200 mg) y evaporamos en una placa caliente,</p> <p>c) Después llevamos la cápsula con la muestra evaporada a una estufa a 103-105°C durante 1 hora,</p> <p>d) Enfriamos la cápsula en el desecador y pesamos,</p> <p>e) Repetimos la operación hasta peso constante.</p>
SST (sólidos suspendidos totales)	SM 2540D Gravimétrico	<p>a) Primero, insertamos el disco con la cara rugosa hacia arriba en el embudo de filtración,</p> <p>b) conectamos el vacío y lave el disco con 20 ml de agua destilada</p> <p>c) Continuamos la succión hasta eliminar totalmente los residuos de agua.</p> <p>d) Secamos el disco en la estufa a 103°C durante una hora.</p> <p>e) calcinamos en la mufla a 550°C±50°C durante 20 minutos, enfriamos en el desecador y pesamos.</p> <p>f) Medimos 100 ml de muestra o un volumen que proporcione entre 2,5 y 200 mg de residuo. Insertamos el filtro en el</p>

		<p>embudo de filtración, conectamos el vacío e iniciamos la succión.</p> <p>g) Filtramos la muestra previamente agitada a través del filtro de fibra de vidrio.</p> <p>h) Lavamos con 3 porciones de 10 ml de agua destilada, continúe la succión por cerca de 3 minutos.</p> <p>i) Secamos el filtro en la estufa a 103°C-105°C durante una hora, enfriamos en el desecador y pesamos.</p> <p>j) Finalmente, repetimos el ciclo de secado, enfriamiento y pesamos hasta peso constante.</p>
SD (sólidos disueltos)	<p>SM 2540C Gravimétrico</p> <p>Equipo: Waterproof Multiparámetro</p>	<p>a) Para iniciar, seleccionamos en el multiparámetros la opción TDS.</p> <p>b) Recolectamos un poco de agua en un beacker de 50 ml;</p> <p>c) Se lavó el sensor del equipo con agua destilada y sumergimos la sonda del multiparámetros en el agua;</p> <p>d) Luego se esperó hasta que el valor en la pantalla se estabilizó;</p> <p>e) Se hizo la lectura con la sonda del multiparámetros aún dentro del agua.</p>
Sulfatos	<p>SM 4500 – SO₄E Turbidimétrico</p>	<p>a) Empezamos midiendo con pipeta volumétrica 100 ml de cada uno de los patrones, transferimos a un Erlenmeyer de 250 ml.</p> <p>b) Adicionamos 20 ml de la solución tampón a cada uno de los patrones, agitamos en un agitador magnético.</p> <p>c) Mientras se agita, adicionamos 0,2 - 0,3</p>



		<p>gr. de cloruro de bario ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en cristales.</p> <p>d) Después, agitamos durante 60 ± 2 segundos contados a partir de la adición del $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ a velocidad constante.</p> <p>e) Medimos la absorbancia de la solución a 420 nm.</p> <p>f) Trazamos una curva de Absorbancia Vs. concentración.</p> <p>g) Luego medimos 100 ml de muestra.</p> <p>h) Realizamos un blanco para corrección por color y turbidez, sin adicionar el $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.</p> <p>i) Determinamos la concentración de la muestra en la curva patrón.</p>
Aluminio	SM 3030K / 3111D Espectrométrico	<p>a) Para todas las muestras se asegura de que las concentraciones de ácidos y modificadores de matriz sean las mismas en las muestras y los estándares.</p> <p>b) mezclamos 100 ml de la muestra con 25 ml de solución de calcio antes de aspirar.</p> <p>c) Instalamos una lámpara de cátodo hueco para el metal en el instrumento y ajustamos aproximadamente el dial de longitud de onda.</p> <p>d) Ajustamos el ancho de la hendidura para el elemento que se está midiendo. Aplicamos a la lámpara la corriente sugerida y dejamos que el instrumento se caliente hasta la fuente de energía se estabiliza, generalmente alrededor de 10 a 20 min.</p>



		<p>e) Configuramos los accesorios de la lámpara y ajustamos el caudal especificado para dar la máxima sensibilidad al metal que se está midiendo y se enciende la llama hasta que se estabilice durante unos minutos</p> <p>f) Aspiramos un blanco consistente de una solución ácida que contenga la misma concentración de ácido en las muestras.</p> <p>g) Pusimos en cero el instrumento y ajustamos la tasa de aspiración para obtener la máxima sensibilidad.</p> <p>h) Ajustamos el quemador tanto vertical y horizontalmente para obtener la máxima respuesta.</p> <p>i) Tratamos en blanco nuevamente y vuelva a poner a cero el instrumento. Registramos la absorbancia de este cuando está recién preparado.</p> <p>j) Después de ajustar la longitud de onda. Instalamos óxido nitroso cabeza del quemador y encendemos acetileno.</p> <p>k) Apagamos el acetileno. Con suministro de aire y óxido nitroso encendido. fijamos la válvula de unión en T en óxido nitroso y ajustamos el flujo</p> <p>l) Encendemos el acetileno y se encendió hasta obtener una llama amarilla brillante. Con un movimiento rápido giramos la válvula de conmutación a óxido nitroso. La llama debe tener un cono rojo sobre el quemador.</p>
--	--	---

		<p>m) Después de que la llama de óxido nítrico haya sido encendido, dejamos que el quemador alcance el equilibrio térmico antes de comenzar.</p> <p>n) Atomizamos el agua que contenga 5 ml de HNO₃ / y atomizamos un estándar del metal deseado con un centrado cerca del punto medio del rango de concentración óptimo y ajustamos el quemador a la luz para obtener la máxima respuesta.</p> <p>o) seleccionamos al menos tres concentraciones de soluciones metálicas estándar.</p> <p>p) Registre las absorbancias y agregamos 2 ml de solución de KCl a 100 ml de estándar antes de la aspiración.</p> <p>q) Finalmente, para el análisis de muestras, enjuagamos el atomizador aspirando agua que contiene 1,5 ml de HNO₃ a una muestra, agregamos 2 ml de solución de KCl y determinamos su absorbancia.</p>
Temperatura	<p>SM 2550B Electrométrico</p> <p>Equipo: Waterproof Multiparámetro</p>	<p>a) Primero, recolectamos un poco de agua en un beaker de 50 ml;</p> <p>b) Se lavó el sensor del equipo con agua destilada y sumergir la sonda del multiparámetros en el agua;</p> <p>c) Luego se esperó hasta que el valor en la pantalla se estabilizó;</p> <p>d) Se hizo la lectura con la sonda del multiparámetros aún dentro del agua.</p>

Fuente: Autores, 2020

Cabe destacar que para la realización de la caracterización de estos parámetros en varios casos fue necesario conservar mediante enfriamiento del agua intervenida, por lo que antes de realizar la medición de las muestras o patrones, extrajimos las mismas de la nevera y esperamos a que la temperatura de la muestra se estabilizara en relación a la temperatura del ambiente de laboratorio.

5.7.2 Etapa 2. Implementar un electrocoagulador a escala laboratorio.

5.7.2.1 Actividad 1. Rediseño y configuración del electrocoagulador a escala laboratorio.

En esta actividad se implementó a escala laboratorio un sistema de depuración de drenajes ácidos mineros mediante electrocoagulación, que fue previamente diseñado por Beleño, O. (2019) y se encuentra dentro de las instalaciones de la Universidad Popular del Cesar. Antes de usarlo realizamos ciertos ajustes para mejorar el manejo del equipo.

Este sistema de depuración de electrocoagulación tanque de forma geométrica de ortoedro elaborado en material acrílico transparente, el cual nos permitió observar los procesos electro físicoquímicos como la coagulación, floculación y flotación, durante la operación del equipo, cabe destacar que este material posee la ventaja de ser no conductor de corriente, por lo tanto nos previno de posibles accidentes como la electrocución, al momento de manipular el equipo.

Entre las características más notables de este equipo destacaron: la capacidad de 12 litros, 13 ranuras para la inserción de electrodos el cual mejoramos añadiendo pares de conectores pinza tipo caimán para facilitar el fijamiento y la maniobrabilidad de los electrodos. Para nuestro tratamiento utilizamos electrodos en placas de aluminio y hierro galvanizado con una conexión en paralelo, cada uno con un espesor de aproximadamente 1.5 mm.

Además, este equipo consta de una fuente de poder variable de corriente directa DC, con una tensión eléctrica de alrededor de 45-48 voltios variables con 30 amperios, al cual le hicimos una modificación del sistema manual de calibración del voltaje por uno digital integrado, suplantando los medidores

externos para facilitar la lectura y mejorar la precisión en la aplicación de energía eléctrica en el sistema.

5.7.2.2 Actividad 2. Tratamiento en el electrocoagulador a escala laboratorio.

Para el manejo del equipo se tuvo en cuenta todas las medidas de seguridad dentro de las instalaciones del laboratorio de Ingeniería Ambiental, se verificó el estado de los conectores eléctricos, de igual manera se comprobó que la fuente de voltaje estuviese apagada y desconectada de las líneas de distribución eléctrica, luego se procedió a acoplar los electrodos de aluminio y hierro de forma intercalada en los ranuras del tanque, estos a su vez están colocados en paralelo al interior del tanque.

Posterior al montaje de las placas, procedimos a estabilizar el voltaje digitalmente nulo (cero) para evitar fluctuaciones de corriente cuando se llene el tanque. Al momento de manipular el agua, utilizamos elementos de bioseguridad aislantes (gafas y guantes), asimismo usamos instrumentos de plástico para el llenado del tanque, después de ello subimos el voltaje que utilizamos, para encontrar la corriente y el tiempo de retención necesario para tratar estas aguas, en nuestro caso lo variamos entre 10, 15 y 20 voltios con el fin de determinar el pH adecuado para el tratamiento.

Este mismo procedimiento se realizó con cada muestra de agua teniendo en cuenta que ya ha sido obtenida la corriente y el tiempo de retención.

5.7.2.3 Actividad 3. Determinación los parámetros (pH, turbidez, DQO, DBO, sólidos totales, sólidos sedimentados, sólidos disueltos, conductividad, sulfatos, contenido de hierro, aluminio y zinc) en el efluente del tratamiento.

Una vez determinados los parámetros, las muestras a utilizar fueron sometidas al tratamiento. Finalizado el tratamiento se determinó: los sólidos totales, sólidos sedimentados, pH, turbidez, DQO, DBO, sólidos totales, sólidos sedimentados, sólidos disueltos, conductividad, sulfatos, contenido de hierro, aluminio y zinc, presentes en el agua del efluente con tratamiento.

5.7.3 Etapa 3. Evaluar la eficacia del tratamiento.

5.7.3.1 Actividad 1. Análisis de los valores obtenidos de los parámetros estudiados.

Los resultados obtenidos luego de haber implementado el tratamiento en el electrocoagulador, se analizaron para realizar el procesamiento estadístico de los datos por medio de gráficas.

5.7.3.2 Actividad 2. Determinación de la eficacia del tratamiento.

Los resultados de las aguas antes, durante y después del tratamiento se analizaron y evaluaron para determinar la eficacia del tratamiento, teniendo en cuenta los parámetros (pH, turbidez, DQO, DBO, sólidos totales, sólidos sedimentados, sólidos disueltos, conductividad, sulfatos, contenido de hierro, aluminio y zinc), y así determinamos los porcentajes de remoción de cada parámetro, con el fin de emitir conclusiones y recomendaciones acertadas y fiables.

Para los parámetros seleccionados se calculó el porcentaje de eficacia de remoción como lo recomienda Morales (2013), de la siguiente manera:

$$\text{Remoción} = \left(\frac{VPi - VPf}{VPi} \right) * 100$$

Dónde: VPi = Valor parámetro inicial.

VPf = Valor parámetro final.

Adicionalmente, se determinó el valor del consumo energético que utiliza cada montaje durante su ejecución en el laboratorio con el fin de evaluar los costos y estimar la rentabilidad de las variables en cuanto al gasto de electricidad. Para ello, empleamos la ecuación propuesta por Akbal (2011), que se define como:

$$CE = \frac{P * I * T}{* V}$$

En donde: CE = Consumo de energía, en kWh .

P = Potencia eléctrica, en *voltios*.

I = Intensidad de corriente, en *amperios*.

V = Volumen de agua, en L .



Con los resultados obtenidos a partir de esta ecuación se calculó el consumo energético por cada litro/segundo, teniendo en cuenta los precios unitarios establecidos por la empresa Electricaribe, responsable del suministro del servicio en la región caribe.

5.8 DISEÑO EXPERIMENTAL.

Se realizó la implementación de una técnica estadística que nos permitió identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro del estudio experimental de este trabajo, de igual modo para establecer y estudiar las variables que afecta, sus relaciones y con ello obtener la información necesaria para su mejora y rentabilidad.

Para desarrollar tal modelo experimental se hizo uso del programa estadístico MINITAB 18, que es un programa íntegro de estadística básica y avanzada, ideal para analizar datos de investigaciones, que incluye estadísticas descriptivas, pruebas de hipótesis, intervalos de confianza, análisis de regresión, análisis de varianza, control de procesos y series de tiempo, entre otros. También cuenta con la visualización de gráficas (barra, interacción, probabilidad, contorno y otras), asimismo posee un amplio rango de métodos estadísticos.

Este diseño se hace necesario, ya que el resultado de este trabajo depende de cierta cantidad de variables que no controlamos y que debemos ajustar para potenciarlo.

Con el uso de la herramienta MINITAB 18, elaboramos un diseño factorial de múltiples niveles, que es según Sánchez (2000), el apropiado para este tipo de análisis, puesto que al aplicar esta metodología sabremos exactamente cómo influye cada factor (y cada combinación de factores, en razón de que a veces varios factores producen efectos inesperados) para así poder tomar una decisión de qué nos conviene poner o quitar en nuestros ensayos de electrocoagulación. La finalidad es que la obtención de datos reales por medio de experimentos puede ser muy caro. Por tanto, hemos de optimizar el costo del experimento. Para ello, una estrategia habitual es realizar experimentos con sólo dos niveles para cada uno de los factores a considerar.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

6.1 ETAPA 1. CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS.

Para conocer el mecanismo de acumulación de los drenajes ácidos mineros al interior de la mina La Jagua, fue necesario realizar una visita a campo en el PIT sur de la operación minera, donde junto al acompañamiento de profesionales pertenecientes a la empresa minera, se nos proporcionó los documentos correspondientes a las caracterizaciones de las aguas residuales ácidas durante el año 2018 y 2019. En esta inspección técnica (Anexo A), se identificó el punto para tomar las muestras, pudimos constatar las dimensiones y el volumen aproximado de los drenajes ácidos y asimismo las características organolépticas de estos.

Posterior a la charla, se realizó una caracterización in situ de los variables conductividad, pH y temperatura. Luego de culminar la visita, trasladamos las muestras del afluente de agua hacia las instalaciones del laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria para su estudio, de igual manera se trasladó una muestra al laboratorio Nancy Flórez García S.A.S para el análisis de metales.

En la tabla 7 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del afluente del PIT sur de la mina La Jagua, antes del tratamiento y se evalúan de acuerdo a las especificaciones establecidas en la normatividad de vertimientos puntuales para el sector de actividades de minería descritas en el artículo 10. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 6. Resultados obtenidos en la caracterización del PIT sur de la mina La Jagua antes del tratamiento.

Parámetro	Concentración	Unidad	Resolución 0631 de 2015	
			Limite	Observación
Hierro (Fe) Total	2,34	mg/L	2	NC
Turbidez	3,69	NTU	--	NCR
pH (potencial de hidrógeno)	3,60	UnipH	6-9	NC

DQO (demanda química de oxígeno)	<20	mg O ₂ /L	150	C
DBO (demanda biológica de oxígeno)	<2	mg O ₂ /L	50	C
Conductividad eléctrica	2179	μS/cm	--	NCR
ST (sólidos totales)	2406	mg/L	10	NC
SST (sólidos suspendidos totales)	5,48	mg/L	50	C
SD (sólidos disueltos)	2241	mg/L	2	NC
Sulfatos	1608	mg SO ₄ /L	1200	NC
Zinc (Zn)	1,44	mg/L	0,05	NC
Aluminio (Al)	<1	mg/L	Análisis - reporte	NCR
Temperatura	31,2	°C	--	NCR

Dónde: C= Cumple, NC= No cumple y NCR= No lo contempla la resolución.

Fuente: Autores, 2020.

Con base en la *tabla 7*, se realiza la comparación de los valores para las actividades de minería establecidos en el artículo del 10 de la resolución 0631 de 2015 con los resultados obtenidos en el afluente del sistema de tratamiento mediante electrocoagulación de drenajes ácidos de minas. A continuación se escriben y se argumentan los resultados obtenidos en el afluente del sistema.

- **Hierro (Fe) Total.**

La concentración de hierro en el drenaje ácido (2,34 mg/L), no cumplió con lo estipulado en la normatividad vigente. Según Montero (2014), la actividad minera, al exponer grandes volúmenes de rocas, puede conllevar a la oxidación de los minerales presentes en la misma. En ese sentido, la pirita es un mineral común en los mantos de carbón, cuyo producto de su oxidación puede generar ácido sulfúrico (disociado en sus iones) y la precipitación de oxi-hidróxidos de hierro.

- **Turbidez.**

El valor de esta característica fue de 3,69 NTU. En la normatividad colombiana se describe que este no es un indicador de remoción de contaminantes, sin

embargo evaluamos el resultado de acuerdo a las normas internacionales como la EPA, que señala que para los sistemas que usan agua de superficie no puede superar las 5 unidades, por lo tanto cumple con lo requerido dentro de la norma internacional, a su vez esta norma afirma que la alta turbidez suele asociarse a altos niveles de microorganismos causantes de enfermedades, como por ejemplo, virus, parásitos y algunas bacterias, como los coliformes totales y fecales. La turbiedad, según Contreras (2015), es un parámetro de especial importancia para la calidad de agua, es un indicativo de contaminación y provoca el descenso de penetración de luz en las aguas superficiales desencadenando una reducción en la fotosíntesis, afectando la vida y crecimiento de las especies que allí habitan, reduciendo la diversidad y por ultimo provocando modificaciones en la cadena alimenticia.

- **pH (potencial de hidrógeno).**

Este parámetro no cumplió con lo exigido en la normatividad de vertimientos, ya que se encuentra muy por debajo de lo establecido en la legislación actual, según Aduvire (2006) esto es el resultado de una serie de reacciones químicas complejas que sufren los minerales sulfurosos que se oxidan al momento de entrar en contacto y al tiempo de exposición con el agua y el aire. Este pH de 3,60 se pudo catalogar dentro del rango muy ácido en la escala de potencial de hidrógeno.

- **DQO (demanda química de oxígeno).**

La demanda química de oxígeno (<20 mg O₂/L), cumplió con los requerimientos de la norma de vertimientos, tuvo un valor aceptable (entre 30 y 120) que es típico de aguas superficiales con capacidad de autodepuración para este parámetro (CONAGUA, 2008). Este es un parámetro importante a determinar en análisis de agua, ya que se relacionan con la cantidad de contaminante orgánicos e inorgánicos susceptibles de oxidarse (Lizama, 2014).

- **DBO (demanda biológica de oxígeno).**

La demanda biológica de oxígeno (<2 mg O₂/L), cumplió con lo establecido en la legislación vigente, ya que su valor fue inferior con lo establecido en la

normatividad, con ello según CONAGUA (2008), indica que es un agua residual con muy bajo contenido de materia orgánica biodegradable. La biodegradabilidad es la capacidad que tiene la solución para ser descompuesta por algunos microorganismos del ambiente (principalmente bacterias aerobias), hasta sus elementos constituyentes más simples, en un período de tiempo relativamente corto (Crites y Tchobanoglous, 2000; citado por Pantoja, 2012)

Conductividad eléctrica.

Este parámetro no se consideró dentro de esta norma, sin embargo su alto valor de 2179 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se pudo dar debido a la presencia masiva de metales pesados tanto en las rocas como en el drenaje de minas. Según Montero (2014), la conductividad eléctrica refleja la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, y está directamente relacionada con la concentración de sales disueltas en el agua, por lo tanto la conductividad eléctrica está relacionada con TDS, de igual manera establece que hay una estrecha relación entre este indicador y el pH, en las aguas con características fuertemente acidas poseen altos valores de conductividad. Por ultimo afirma que la este parámetro también depende de la temperatura del agua: mientras más alta la temperatura, más alta sería la conductividad eléctrica.

- **ST (sólidos totales)**

Este parámetro no cumplió con lo requerido en la legislación vigente, ya que excedió los valores al presentar 2241 mg/L, lo que indicó que esta agua posee una alta carga contaminante, típico las aguas superficiales con un fuerte impacto de descargas residual.

- **SST (sólidos suspendidos totales).**

El valor de 5.48 mg/L de este parámetro cumplió con lo establecido en la normatividad vigente, lo que indicó que tiene buena calidad en esta característica. Esto se debe principalmente a que la gran cantidad de agua que hay en este depósito se encuentra en estado de reposo y las partículas o coloides están precipitados.

- **SD (sólidos disueltos).**

Este parámetro no aprobó con lo estipulado en la legislación, ya que sobrepasó los niveles establecidos en estas con un valor de 2 mg/L. Esto según CONAGUA (2008), indica que hay presencia de sales, minerales, metales o cualquier otro compuesto inorgánico u orgánico menor a 1,5 micras disueltas en el agua. Generalmente el DAM se caracteriza por concentraciones elevadas de sólidos disueltos como las sales coloidales, una alta concentración de este parámetro es un indicador que contaminantes dañinos, como el hierro, manganeso, sulfato, bromuros y arsénico, también pueden estar presentes en el agua (Zeballos, 2016).

- **Sulfatos.**

Este indicador no cumplió con la normatividad de vertimientos de aguas residuales, con un valor de 1608 mg SO₄/L sobrepasando lo establecido. Según la guía GARD estos iones se deben al contenido de sulfuros presentes en la estructura de las rocas y que se oxidan. La generación de estas sales insolubilizan los metales pesados presentes.

- **Zinc (Zn).**

Este parámetro no cumplió con lo estipulado en la normatividad legal vigente, esto se debe al alto contenido de este mineral en la estructuras de las rocas. Según Gammons (2010), la extracción y procesamiento de yacimientos metálicos y del carbón constituyen un factor en la pérdida de la calidad de los cuerpos de aguas superficiales y subterráneos, permitiendo el aumento en solución de altas concentraciones de metales como Al, Fe, Mn, Zn, Cu, As y Cr.

- **Aluminio (Al).**

Este parámetro no se exige dentro de la normatividad vigente en nuestro país, sin embargo, se debió analizar y se obtuvo una concentración menor a 1 mg/L, evidenciando la presencia de este metal en el agua, y como se mencionó anteriormente en lo establecido por Gammons (2010), su presencia es común en yacimientos de carbón.

- **Temperatura.**

La temperatura no se contempla su límite dentro de la norma de vertimientos, a pesar de ello se caracterizó y se obtuvo que fue de más de 30°C, esto se debe a que fue tomada in situ en horas cercanas al mediodía.

6.2 ETAPA 2. IMPLEMENTAR UN ELECTROCOAGULADOR A ESCALA LABORATORIO.

Con las modificaciones al cableado y digitalización integrada de los componentes electrónicos del sistema de electrocoagulación, se logró establecer mejores lecturas. Para digitalizar la fuente de poder usamos un vatímetro y analizador de alta precisión (150 A).

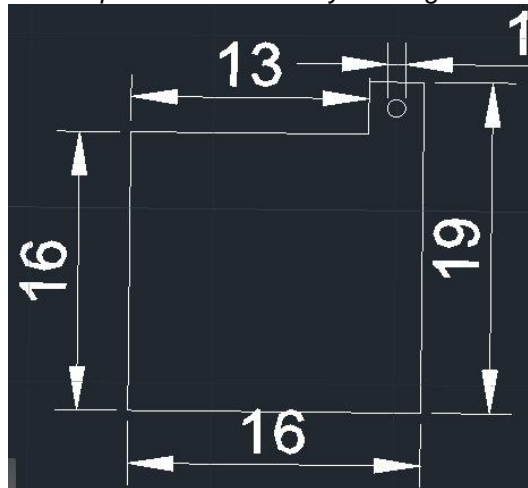
Figura 3. Instalacion de vatimetro de alta precision digital.



Fuente: Autores, 2020.

Para el dimensionamiento de los electrodos de placas tanto de aluminio como de hierro galvanizado, usamos la siguiente estructura, que se acopla a las características internas del tanque y se ajusta a los conectores piza instalados.

Figura 4. Dimensiones de placas de aluminio y hierro galvanizado para electrodos



Fuente: Autores, 2020.

Las dimensiones y características del sistema de electrocoagulación que se tuvieron fueron las siguientes:

Tabla 7. Dimensiones del electrocoagulador.

Componente	Característica	Dimensión	Unidad de medida
Tanque reactor	Grosor	3	Mm
	Ancho	20	Cm
	Largo	30	Cm
	Alto	20	Cm
	Borde libre	5	Cm
Tolva para lodos	Largo superior	30	Cm
	Largo inferior	5	Cm
	Alto	7	Cm
	Ancho	5	Cm
Electrodos de metal (hierro y aluminio)	Grosor	1.5	Mm
	Alto	16	Cm
	Largo	16	Cm
	Pestaña	3*3	Cm
	Cantidad de placas	12-13	-
Fuente de energía	Tipo de corriente	DC	-
	Voltaje	45-48	A
	Amperaje	30	V

Fuente: Autores, 2020.

El montaje del sistema de electrocoagulación de drenajes ácidos mineros finalmente quedó como se presenta a continuación en la gráfica número 10:

Figura 5. Montaje del sistema de Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros



Fuente: Autores, 2020.

6.3 ETAPA 3. EVALUAR LA EFICACIA DEL TRATAMIENTO.

Para el llevar a cabo este estudio, se empleó un modelo experimental con una serie de pruebas de ensayo y error en la puesta en marcha del sistema de electrocoagulación, que constaba de las siguientes características:

Tabla 8. Características de operación de electrocoagulación de drenajes ácidos mineros.

Características de la operación	
Volumen	10 litros
Voltaje	Variable(10,15 y 20 voltios)
N° de placas	Variable (Fe, Al o combinación)
Tiempo	30 minutos (10-20-30)

Fuente: Autores

Se aplicó cada una de las características mencionadas anteriormente, variando los factores (voltaje y el número de placas metálicas), con el fin de determinar las condiciones ideales del proceso usando el mínimo número de experimentos y con ello, el pH óptimo para el posterior análisis de los parámetros que se caracterizaron. El procedimiento general para resolver el diseño se resume en los siguientes puntos:

- Se realizó un análisis previo de los datos utilizando técnicas descriptivas:

La variable respuesta fue el % de eficiencia, mientras que los factores: (A) Voltaje y (B) Número de placas, en un total de 3 bloques. Como se presenta a continuación:

Tabla 9. Diseño Factorial de Múltiples Niveles

Factores:	2	Réplicas:	3
Corridas base:	9	Total de corridas:	27
Bloques base:	1	Total de bloques:	3
Número de niveles: 3. 3			

Fuente: Autores, 2020.

Con los resultados de los pH obtenidos con la operación del sistema de electrocoagulación en el laboratorio, se calculó la eficacia en el aumento del pH con el fin de llevarlo a valores neutros (pH=7). A partir de los anteriores datos se determinó cada uno de los análisis estadísticos establecidos para el modelo factorial de múltiples niveles.

Tabla 10. Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Voltaje	3	10, 15, 20
Número de placa	3	6, 10, 12

Fuente: Autores, 2020.

El procedimiento del experimento se sintetiza en la tabla de la hoja de trabajo:

Tabla 11. Hoja de trabajo

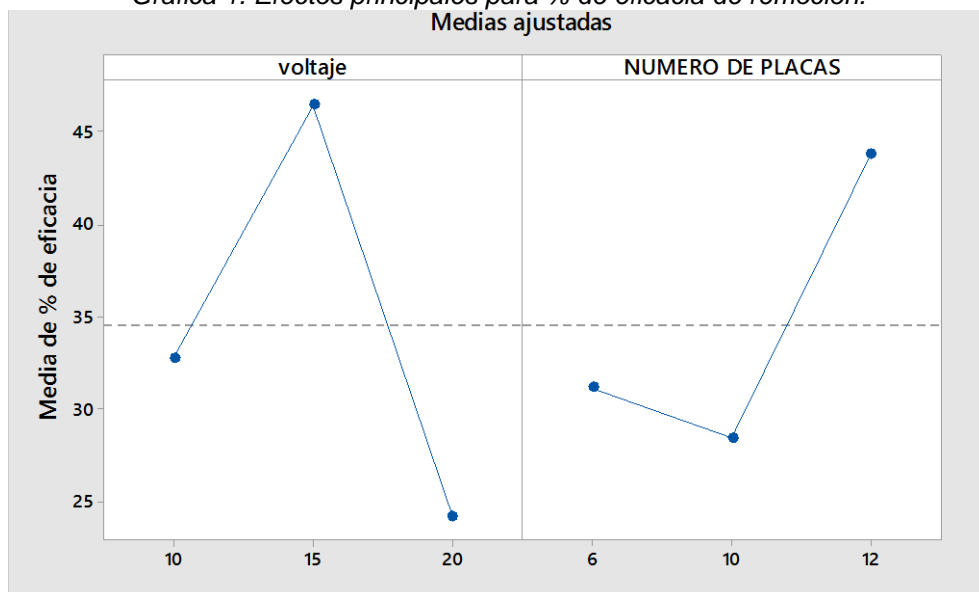
OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	Voltaje	Número de placas	% de eficacia
1	1	1	1	10	6	32,50
2	2	1	1	10	10	24,44
3	3	1	1	10	12	28,06
4	4	1	1	15	6	26,11
5	5	1	1	15	10	32,78
6	6	1	1	15	12	87,50
7	7	1	1	20	6	23,06
8	8	1	1	20	10	26,11
9	9	1	1	20	12	17,78
10	10	1	2	10	6	45,56
11	11	1	2	10	10	29,44
12	12	1	2	10	12	29,17

13	13	1	2	15	6	33,06
14	14	1	2	15	10	29,17
15	15	1	2	15	12	73,61
16	16	1	2	20	6	25
17	17	1	2	20	10	27,78
18	18	1	2	20	12	18,61
19	19	1	3	10	6	47,50
20	20	1	3	10	10	27,50
21	21	1	3	10	12	30,83
22	22	1	3	15	6	23,89
23	23	1	3	15	10	31,11
24	24	1	3	15	12	81,11
25	25	1	3	20	6	24,11
26	26	1	3	20	10	28,06
27	27	1	3	20	12	27,78

Fuente: Autores, 2020.

- Se estimaron los efectos de los factores e interacciones: Se realizó una pre-selección de aquellos efectos que se consideran no significativos.

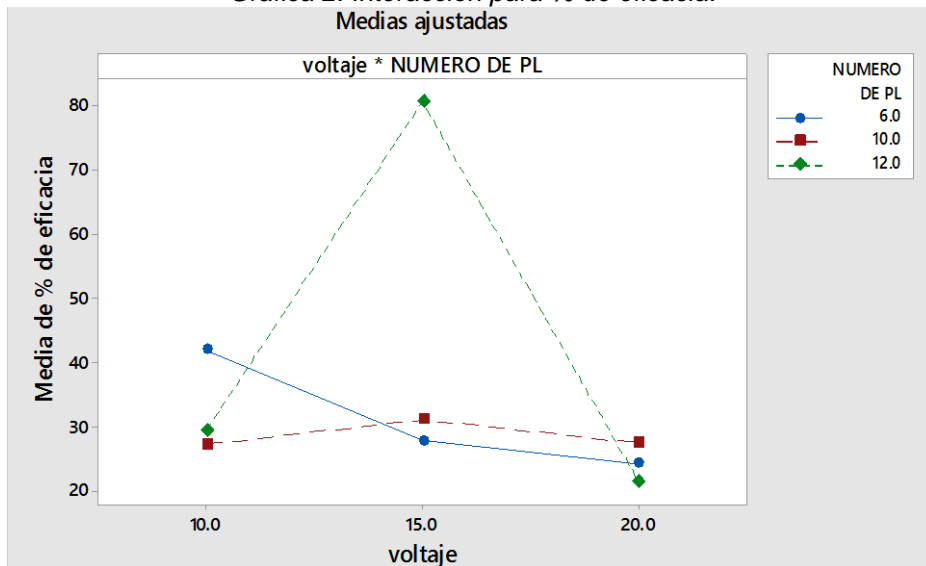
Gráfica 1. Efectos principales para % de eficacia de remoción.
Medias ajustadas



Fuente: Autores, 2020.

En la gráfica se pudo observar que en 15 v se obtiene un mayor éxito para la realización del estudio y asimismo, pudimos observar que en un número de placas con 12 (corresponde a 6 placas de Al y 6 de Fe galvanizado) se tendrá una mejor eficacia del tratamiento.

Gráfica 2. Interacción para % de eficacia.
 Medias ajustadas

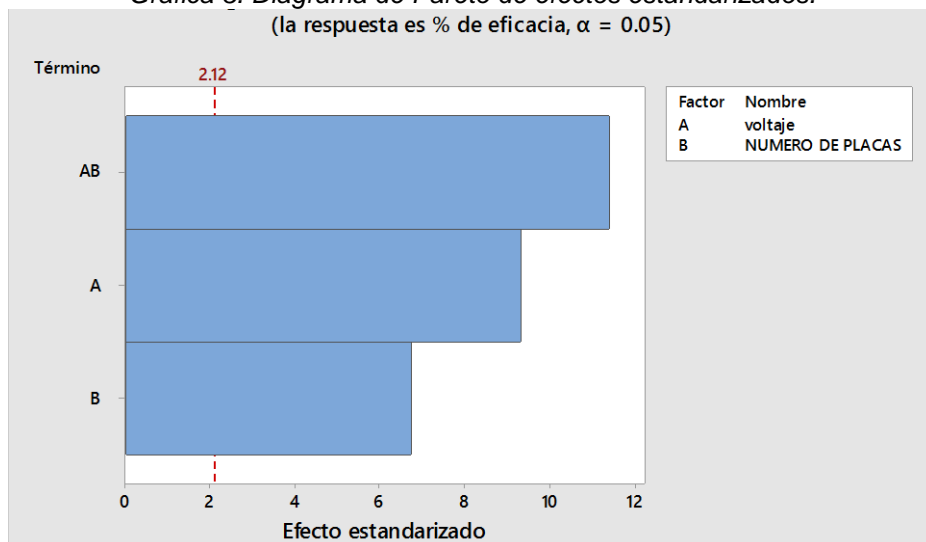


Fuente: Autores, 2020.

En esta gráfica pudimos constatar la interacción entre número de placas y el voltaje, el cual nos arrojó que la mejor interacción para obtener la mayor eficacia sería con a partir de un voltaje de 15 y un número de placa de 12 electrodos.

- Se representó dichas estimaciones en un diagrama de Pareto:

Gráfica 3. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.
 (la respuesta es % de eficacia, $\alpha = 0.05$)



Fuente: Autores, 2020.

En esta gráfica pudo verse que los efectos tienen gran influencia en la variable respuesta. Aquí se logró inferir que tanto el voltaje como el número de placas, influyen de manera significativa positiva. Debido que están por delante del nivel

de referencia, de igual forma, se observó que el efecto que más influye es la combinación de ambos factores.

- Se construyó la tabla ANOVA con los efectos y se contrastó su significatividad:

Tabla 12. Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	10	8022.70	802.27	38.52	0.000
Bloques	2	31.09	15.54	0.75	0.490
Lineal	4	3468.64	867.16	41.64	0.000
Voltaje	2	2262.55	1131.28	54.32	0.000
Número de placa	2	1206.09	603.04	28.96	0.000
Interacciones de 2 términos	4	4522.98	1130.74	54.30	0.000
Voltaje*Número de placa	4	4522.98	1130.74	54.30	0.000
Error	16	331.21	20.83		
Total	26	8344.92			

Fuente: Autores, 2020.

Con estos datos tuvimos una mejor estimación de la varianza residual.

Las hipótesis son: $H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4$

$H_1: \tau_i \neq 0$, por lo menos una media es diferente

$\alpha = 0,05$, nivel de significancia

El valores de p son menores que el nivel de significancia e indican que las medias de los tratamientos son diferentes, y se concluyó que el voltaje y el número de placas son factores que influyen en el tratamiento. Y existe diferencia significativa en los tratamientos.

- Se hizo un diagnóstico de los residuos para comprobar que el modelo es el adecuado.

Tabla 13. Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
4.56353	96.01%	93.52%	88.64%

Fuente: Autores, 2020.

Se consideran solo estos efectos, y con ello desarrollamos la ecuación de regresión sustituyendo cada uno de los factores por constantes con el fin de facilitar su comprensión y su posterior uso, tal ecuación es la siguiente:

Ecuación de regresión.

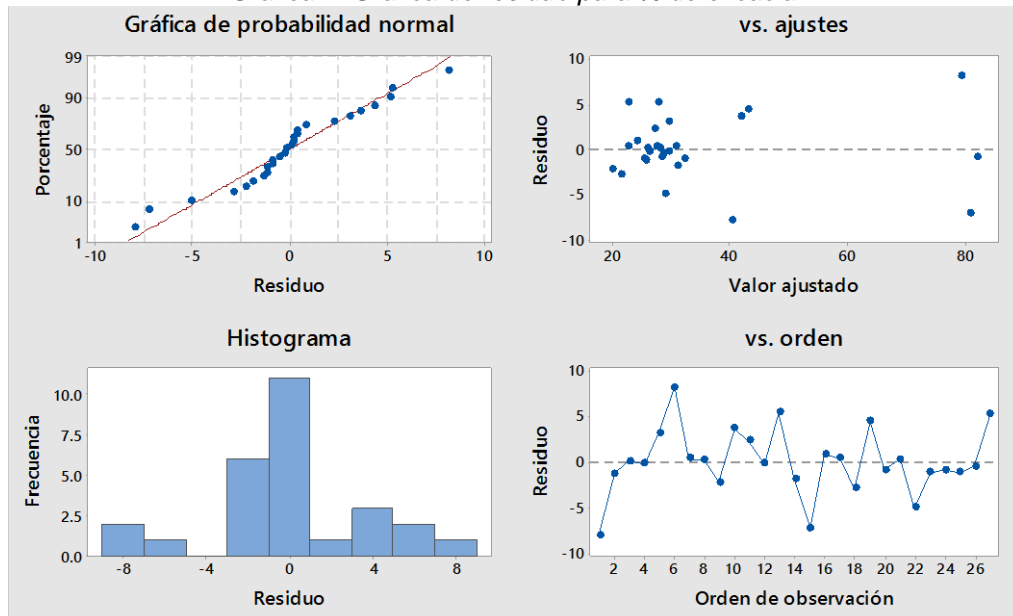
$$\% \text{ de eficacia} = 34.506 - 1.73 * (A) + 11.98 *(B) - 10.25 *(C) - 3.30 (D) - 6.02 *(E) + 9.32 *(F) + 12.38 *(G) + 0.37 *(H) - 12.75 *(I) - 15.49 *(J) - 9.44 *(K) + 24.94 *(M) + 3.12 *(N)+ 9.07 *(Ñ) - 12.19 *(O)$$

Donde:

A: Voltaje_10 D: Número de placa_6 G: Voltaje*Número de placa_10 6
 B: Voltaje_15 E: Numero de placa_10 H: Voltaje*Número de placa_10 10
 C: Voltaje_20 F: Número de placa_12 I: Voltaje*Número de placa_10 12

J: Voltaje*Número de placa_15 6 N: Voltaje*Número de placa_20 6
 K: Voltaje*Número de placa_15 10 Ñ: Voltaje*Número de placa_20 10
 M: Voltaje*Número de placa_15 12 O: Voltaje*Número de placa_20 12

Gráfica 4. Grafica de residuo para % de eficacia.

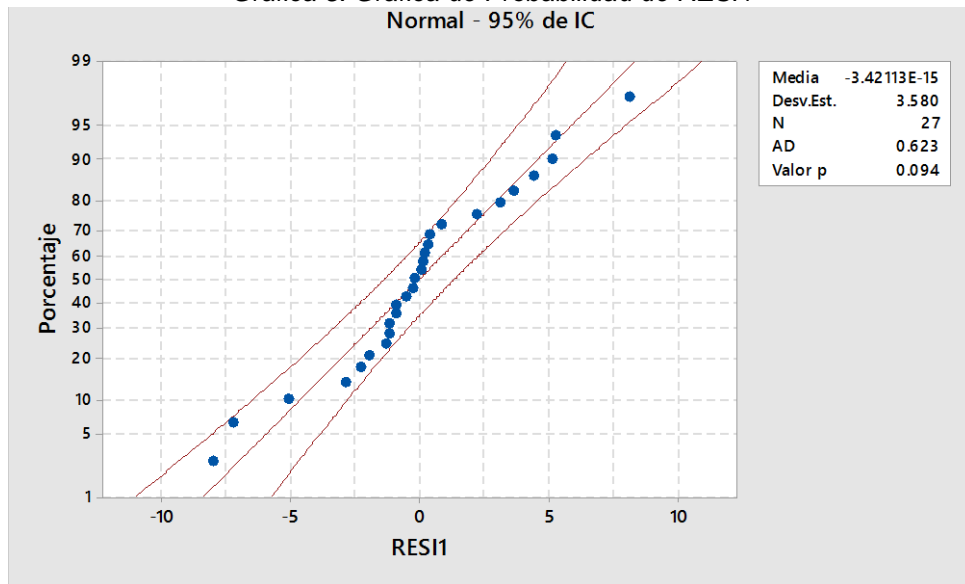


Fuente: Autores, 2020.

Para la *Normalidad*, se pudo observar que los residuos están cercanos a la línea de ajuste, con lo que concluimos que los datos son normales y no se tiene valores atípicos. Por otro lado, para la *Varianza constante* se notó que los residuos están distribuidos de forma aleatoria.

Y finalmente, en la variable *Independencia*, se logró observar que los residuos son independientes, debido a que no tienen un patrón en el orden cronológico.

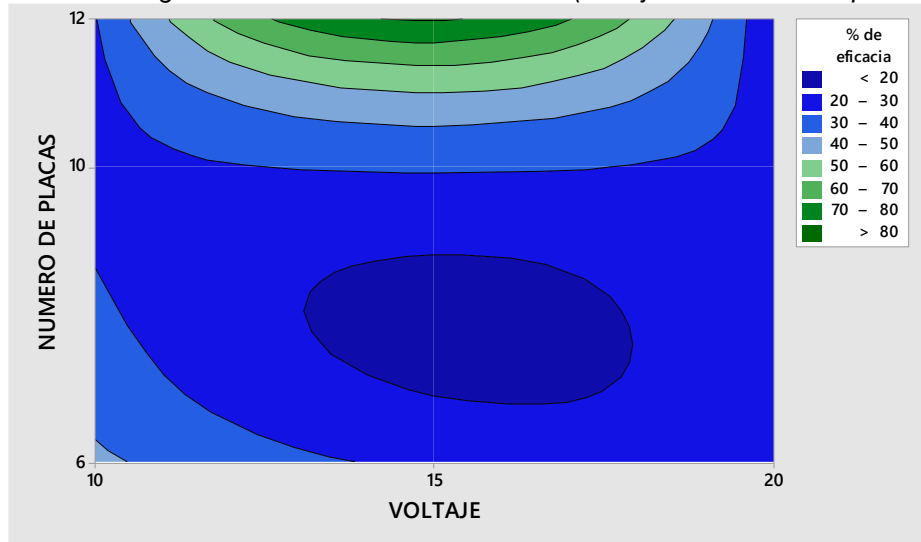
Gráfica 5. Grafica de Probabilidad de RESI1
Normal - 95% de IC



Fuente: Autores, 2020.

- Por último, se construyó la recta de contorno y se obtuvo con ella las condiciones de los factores que proporcionan mejores valores de la variable respuesta.

Gráfica 6. Diagrama de contorno - % de eficacia (Voltaje vs. Número de placas).



Fuente: Autores, 2020.

Por lo tanto, el experimento correspondiente a la fila 6 de la hoja de trabajo (tabla 12) es el que proporcionó el menor número de defectos. Los mejores resultados para la electrocoagulación de drenajes ácidos mineros se tendrán

con el montaje que tiene un voltaje de 15V y 12 placas metálicas (combinación de igual número de placas de Fe y Al).

Después de poner en operación el sistema de electrocoagulación de drenajes ácidos mineros a escala laboratorio, dentro de las instalaciones del laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad Popular del Cesar logramos establecer los resultados óptimos de cada uno de los parámetros requeridos en esta investigación. De igual manera, a algunos de estos se les observó el comportamiento, como lo muestran las siguientes tablas:

- **Comportamiento para el tratamiento de drenajes ácidos mineros con 6 placas de Aluminio.**

Para estas pruebas se usó un montaje con un volumen de 10 litros de agua durante un lapso de 30 minutos ($Q=20$ L/h), alternando en tres veces el voltaje aplicado inicialmente 10 voltios, seguido una de 15 voltios y finalmente de 20 voltios. Con ello se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 14. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 6 placas aluminio y 10 V.

Sistema de depuración con un voltaje de 10 y número total de placas 6					
Tiempo (min)	pH	Conductividad (μS/cm)	Turbiedad (NTU)	Temperatura ($^{\circ}$C)	SDT (ppm)
0	4,36	2365	2,04	28,1	1201
10	4,77	2314	2,14	27,8	1259
20	5,24	2302	3,6	27,4	1221
30	5,31	2261	5,43	26,9	1161

Fuente: Autores, 2020.

Tabla 15. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 6 placas de aluminio y 15 V.

Sistema de depuración con un voltaje de 15 y número total de placas 6				
Tiempo (min)	pH	Conductividad (μS/cm)	Turbiedad (NTU)	Temperatura ($^{\circ}$C)
0	4,36	2387	3,6	24,1
10	4,46	2348	10,3	24,5
20	4,46	2330	18,7	24,5
30	4,79	2272	30,2	25

Fuente: Autores, 2020.

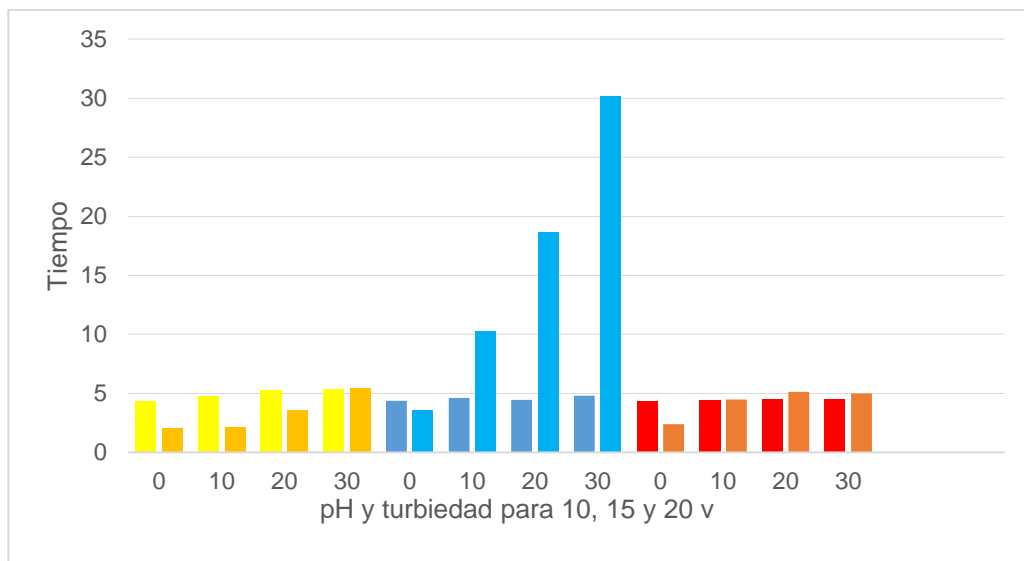
Tabla 16. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 6 placas de aluminio y 20 V.

Sistema de depuración con un voltaje de 20 y número total de placas 6				
Tiempo (min)	pH	Conductividad (µS/cm)	Turbiedad (NTU)	Temperatura (°C)
0	4,36	2394	2,4	21,4
10	4,43	2339	4,49	24,1
20	4,5	2332	5,14	24,5
30	4,47	2345	4,99	24,5

Fuente: Autores, 2020.

Con estos resultados (Tablas 16, 17 y 18) construimos el siguiente gráfico con el fin de comparar los valores de los tratamientos variando el voltaje, y con ello se consiguió que:

Gráfica 7. Comportamiento del pH y turbidez en el sistema de electrocoagulación con 6 placas de Aluminio – para 10, 15 y 20 V respectivamente.



Fuente: Autores, 2020.

De acuerdo con los resultados de las tablas 16, 17 y 18, se concluye que entre los tratamientos en los que se aplicó 10 y 20 voltios respectivamente, hay una similitud entre los valores obtenidos del pH con una media entre 4,92 y 4,5 unidades, del mismo modo en ambos montajes el comportamiento de la turbidez fue ascendente, inicialmente tuvo valores superiores a 2 NTU y al finalizar resultaron cercanos a las 5 NTU. Mientras que en el montaje con 15 voltios la turbidez ascendió doblando los valores cada 10 minutos, cumpliendo

con lo establecido por Restrepo (2006), que el pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. Sin embargo no se tuvo el resultado esperado en cuanto a aumentar el pH a un nivel óptimo o neutral de acuerdo a lo establecido en la normatividad de vertimientos.

- **Comportamiento para el tratamiento de drenajes ácidos mineros con 10 placas metálicas.**

Para estas pruebas se emplearon 3 montajes con las siguientes especificaciones: 5 placas de Aluminio y 5 de hierro galvanizado intercaladas como cátodo y ánodo, con una capacidad de 10 litros de agua durante un lapso de 30 minutos, alternando en tres veces el voltaje aplicado en 10, 15 y 20 voltios. Con ello obtuvimos los siguientes resultados:

Tabla 17. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 10 placas metálicas (5 Fe y 5 Al) y 10 V.

Sistema de depuración con un voltaje de 10 y número total de placas 10					
Tiempo (min)	pH	Conductividad (µS/cm)	Turbiedad (NTU)	Temperatura (°C)	SDT (ppm)
0	4,36	2457	2,95	20,2	1205
10	4,48	2485	2,97	22,5	1158
20	4,66	2307	2,98	23,6	1222
30	4,59	2181	2,88	24,6	1201

Fuente: Autores, 2020.

Tabla 18. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 10 placas metálicas (5 Fe y 5 Al) y 15 V.

Sistema de depuración con un voltaje de 15 y número total de placas 10					
Tiempo (min)	pH	Conductividad (µS/cm)	Turbiedad (NTU)	Temperatura (°C)	SDT (ppm)
0	4,36	2317	2,95	20,9	1205
10	4,65	2445	2,99	22,6	1158
20	4,72	2307	3,02	22,7	1222
30	4,78	2181	3,15	23,2	1200

Fuente: Autores, 2020.

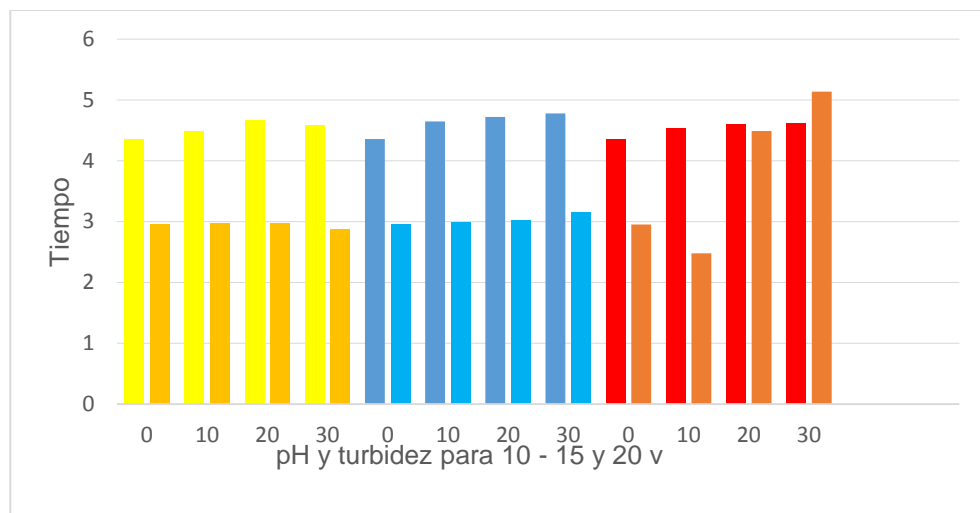
Tabla 19. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 10 placas metálicas (5 Fe y 5 Al) y 20 V.

Sistema de depuración con un voltaje de 20 y número total de placas 10					
Tiempo (min)	pH	Conductividad (µS/cm)	Turbiedad (NTU)	Temperatura (°C)	SDT (ppm)
0	4,36	2372	2,95	28,5	1196
10	4,54	2306	2,48	28,4	1172
20	4,6	2166	4,49	28,6	1168
30	4,61	2019	5,14	28,7	1162

Fuente: Autores, 2020.

A partir de los anteriores datos en los parámetros de turbiedad y potencial de hidrogeno, de las tablas (19, 20 y 21), se elaboró la siguiente gráfica:

Gráfica 8. Comportamiento del pH y turbidez en el sistema de electrocoagulación con 10 placas metálicas (5 Fe y 5 Al) – para 10, 15 y 20 V respectivamente.



Fuente: Autores, 2020.

Con el análisis de las tablas 19, 20 y 21, se pudo establecer que el comportamiento de ambos parámetros se tornó similar en la aplicación de los tres voltajes, con valores del pH estables con una media aproximada de 4,52 para el montaje de 10 voltios, 4,63 para el montaje de 15 voltios y 4,40 para el montaje de 20 voltios, respectivamente. Evidencia que no se superó las 5 unidades de pH.

De igual manera la turbidez tuvo valores constantes en los tratamientos de 10 y 15 voltios, mientras que en el de 20 voltios este aumento significativamente de 2,95 a 5,14 NTU, sustentando lo establecido por Rojas, (2018), quien afirma

que a una DC elevada, la disolución del aluminio de los electrodos aumenta, dando lugar a una mayor cantidad de precipitado, pero también influyendo en las características del floc formado (lo cual puede dificultar su separación) y en la generación de burbujas de H₂.

- **Comportamiento para el tratamiento de drenajes ácidos mineros con 12 placas metálicas.**

Para estas pruebas se hizo uso de un montaje con las siguientes características: un volumen de 10 litros de agua durante un lapso de 30 minutos. En esta se utilizó 6 placas de aluminio y 6 de hierro galvanizado intercalados en el sistema como cátodo y ánodo. Además, se alternó el voltaje en 10, 15 y 20 voltios. Con ello se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 20. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 12 placas (6 Fe y 6 Al) metálicas y 10 V.

Sistema de depuración con un voltaje de 10 y número total de placas 12					
Tiempo (min)	pH	Conductividad (µS/cm)	Turbiedad (NTU)	Temperatura (°C)	SDT (ppm)
0	4,36	2363	4,34	19,8	1201
10	4,61	2344	3,57	22,3	1195
20	4,65	2330	3,48	23,4	1175
30	4,71	2318	3,58	24,4	1181

Fuente: Autores, 2020.

Tabla 21. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 12 placas metálicas (5 Fe y 5 Al) y 15 V.

Sistema de depuración con un voltaje de 15 y número total de placas 12					
Tiempo (min)	pH	Conductividad (µS/cm)	Turbiedad (NTU)	Temperatura (°C)	SDT (ppm)
0	4,36	2412	2,14	20,6	1199
10	6,75	2327	5,36	20,9	1195
20	6,52	2317	6,5	21,1	1164
30	6,25	2306	11,2	23	1159

Fuente: Autores, 2020.

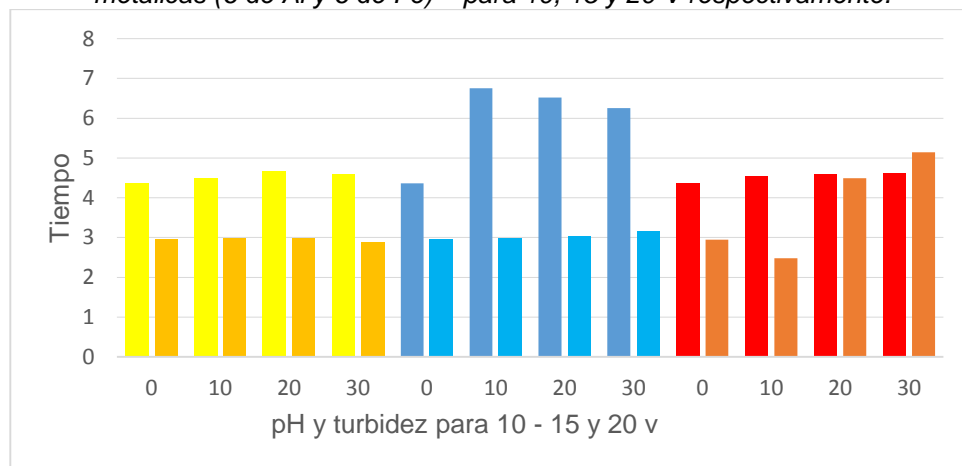
Tabla 22. Electrocoagulación de drenajes ácidos mineros con un sistema de depuración de 12 placas metálicas (5 Fe y 5 Al) y 15 V.

Sistema de depuración con un voltaje de 20 y número total de placas 12					
Tiempo (min)	pH	Conductividad (µS/cm)	Turbiedad (NTU)	Temperatura (°C)	SDT (ppm)
0	4,36	2424	2,13	21,4	1201
10	4,24	2406	2,68	24,7	1193
20	4,27	2426	3,49	24,8	1195
30	4,6	2368	3,87	25,9	1173

Fuente: Autores, 2020.

Con estos resultados obtenidos en las tablas 21, 22 y 23, se elaboró la siguiente gráfica y se comparó los valores obtenidos en los distintos montajes realizados para el tratamiento de los drenajes ácidos de minas, variando el voltaje. Con ello logró analizar el comportamiento como se representa a continuación:

Gráfica 9. Comportamiento del pH y turbidez en el sistema de electrocoagulación con 12 placas metálicas (6 de Al y 6 de Fe) – para 10, 15 y 20 V respectivamente.



Fuente: Autores, 2020.

En los valores que se obtuvieron en las tablas 21, 22 y 23, se observó el comportamiento de las pruebas, para los montajes de 10 y 15 voltios para la característica turbidez afluente, mostrando el mismo valor inicial de 2,95 y un efluente de 2,88 y 3,15 NTU, respectivamente. Esto se debe a la formación de flocs que se pudo evidenciar durante la ejecución del tratamiento. Sin embargo el montaje de 15 voltios cumplió con el objetivo de neutralizar a un valor superior al exigido por la normatividad para el vertimiento de los drenajes ácidos partiendo de un valor preliminar de 4,36 y en un lapso de 10 minutos ascendió a 6,75. El cambio en el pH se debe según Rojas (2018), a la

disolución del aluminio de los electrodos utilizados, formando especies químicas de aluminio.

Por otro lado el tratamiento de 20 voltios no tuvo gran relevancia con respecto a las anteriores pruebas realizadas, confirmando lo establecido por Restrepo (2006), una densidad de corriente demasiado grande produce una disminución significativa en la eficacia.

Bajo el criterio de rentabilidad, realizamos las determinaciones analíticas de los parámetros restantes teniendo en cuenta su costo en el laboratorio, por lo que se le realizó tal estudio al efluente producto del tratamiento de 12 placas metálicas (6 de Fe y 6 de Al) al cual se le aplicaron los 15 voltios, y partir de ello se obtuvo que:

Tabla 23. Resultados obtenidos en el efluente del sistema de electrocoagulación.

Parámetro	Concentración		Unidad	Resolución 0631 de 2015	
	Inicial	Final		Límite	Observación
Hierro (Fe) Total	2,34	<0,100	mg/L	2	C
Turbidez	3,69	2,14	NTU	--	NCR
pH	3,6	6,75	UnipH	6-9	C
DQO (demanda química de oxígeno)	<20	30.8	mg O2/L	150	C
DBO (demanda biológica de oxígeno)	<2	11	mg O2/L	50	C
Conductividad eléctrica	2179	2019	µS/cm	--	NCR
ST (sólidos totales)	2406	93	mg/L	10	NC
SST (sólidos suspendidos totales)	5,48	9	mg/L	50	C
SD (sólidos)	2241	1159	mg/L	2	NC

disueltos)					
Sulfatos	1654	1829	mg SO4/L	1200	NC
Zinc (Zn)	1,44	<1	mg/L	0,05	C
Aluminio (Al)	<1	<1	mg/L	--	NCR
Temperatura	31,2	23	°C	--	NCR

Dónde: C= Cumple, NC= No cumple y NCR= No lo contempla la resolución. Fuente: Autores, 2020.

Con los resultados obtenidos después del tratamiento con electrocoagulación (efluente) que representan en la tabla 24, se hizo una comparativa con la resolución 0631 de 2015 (para los indicadores que contempla la resolución) y se logró establecer que:

- **Hierro (Fe) Total.**

Finalmente en este parámetro se evidenció una notable reducción en su concentración, pasando de un valor de 2,34 a menos de 0,10 mg/L cumpliendo con lo establecido en la norma. Esto según Castañeda (2018), se debe a la formación de óxidos que durante el tratamiento se flocculan y luego se decantan, debido a las condiciones óptimas que brinda el electrocoagulador, como la densidad y el tiempo de retención

$$Remoción = \left(\frac{2.34 - 0.1}{2.34} \right) * 100 = 95.73\%$$

Con ello se obtuvo una remoción cercana al 96% demostrando el poder de eliminación de este metal pesado por parte del sistema de electrocoagulación.

- **Turbidez.**

En este parámetro tuvimos una disminución significativa pasando de 3,69 a 2,14 NTU, donde se apreció el agua con una apariencia gelatinosa, con flóculos de color verdoso debido el desprendimiento de metales. Estos resultados, según Pantoja (2012) se deben a que luego de la formación de hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa, y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o

atracciones electrostáticas. Con ello se calculó la remoción obteniendo así un porcentaje de aproximadamente el 42%.

$$\text{Remoción} = \left(\frac{3,6 - 2,14}{3,16} \right) * 100 = 42\%$$

- **pH (potencial de hidrógeno).**

Este parámetro tuvo gran incidencia dentro del proceso de electrocoagulación y en sus resultados fue evidente su cambio. Según el Castañeda (2015), el OH formado en el cátodo aumenta el pH de las aguas residuales y por lo tanto induce la precipitación de iones metálicos como hidróxidos correspondientes y precipitación con hidróxidos de hierro, es por ello que se aumenta los pH en todas las pruebas desde un pH mínimo de 3,60 hasta un pH máximo de 6.75.

$$\text{Remoción} = \left(\frac{6,75 - 2,14}{3,16} \right) * 100 = 40,55\%$$

En este parámetro también se tuvo un gran resultado en cuanto a eficacia sobrepasando el 96%, con el fin de ajustarlo en una solución neutral durante el tratamiento. Finalmente este parámetro cumplió con el límite permisivo para el vertimiento de aguas residuales, establecido en la legislación vigente.

- **DQO (demanda química de oxígeno).**

La demanda química de oxígeno aumentó notablemente de <20 a 30,8 mg O₂/L debido al proceso de oxidación que padece el drenaje ácido durante el tratamiento. Ciertas sustancias inorgánicas como el hierro ferroso, sulfuros, sulfitos, tiosulfatos y nitritos, según Del Ángel (1994) (citado por Mayor, 2018) se oxidan bajo condiciones de la prueba, creando una DQO inorgánica, la cual interfiere cuando se estima el contenido orgánico de un agua residual. Aun aumentando su concentración como en este caso, este parámetro se encuentra dentro del límite establecido por la normatividad legal de vertimientos.

- **DBO (demanda biológica de oxígeno).**

En este parámetro hubo un aumento considerable de la concentración de <2 a 11 mg O₂/L, sin embargo, este valor es inferior al límite permisible establecido

en la norma. Este resultado puede ser producto de los procesos químicos durante y después de poner en marcha el sistema de depuración de drenajes ácidos de minas. Este aumento según puede darse bruscamente como consecuencia de oxidación de las aguas residuales, el incremento de la biodegradabilidad de la solución indica que se logra un alto porcentaje de recuperación (Crites y Tchobanoglous, 2000)(citado por Pantoja, 2012).

- **Conductividad eléctrica.**

La conductividad eléctrica esta interrelacionada con la cantidad de metales y los iones disueltos durante la electrocoagulación del agua, fue evidente la reducción de más del 40% de su concentración después de ejecutar las pruebas, pasando de 2177 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 2019 en un tiempo de residencia de 30 minutos.

$$\text{Remoción} = \left(\frac{2177 - 2019}{2019} \right) * 100 = 40,55\%$$

Este resultado coincide con lo propuesto por Castañeda (2018), quien observó la conductividad en muestras de aguas acidas disminuyen a medida que se incrementa el proceso de electrocoagulación reportando inicial de 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 5,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en un tiempo de 60 minutos. Este parámetro la legislación colombiana no lo contempla como indicador de contaminación del agua, asimismo la normativa internacional como la dispuesta por la *EPA* no establece valores máximos permisibles para el vertimiento de este tipo de aguas.

- **Sólidos**

ST (sólidos totales): En este parámetro obtuvo un valor inicial de 2406 y final de 93 mg/L , es evidente un gran porcentaje de remoción de más del 96% de su concentración, lo que indica que hubo una disminución muy significativa en la cantidad de partículas suspendidas en el agua. A pesar de ello este valor no está dentro del límite permisible establecido para su vertimiento. (Monsalve O & Cardona Gómez, 2014) para el proceso de electrocoagulación es importante tener en cuenta que se obtiene como resultados sólidos sedimentables, suspendidos y floculos. Estos sólidos se van a adherir a las paredes del reactor y de los electrodos, puede evidenciar que el uso de electrodos de aluminio

favorece la formación de sólidos suspendidos y sólidos sedimentables teniendo en cuenta el tiempo de residencia y el voltaje suministrado al electrocoagulador.

$$\text{Remoción} = \left(\frac{2406 - 93}{2406} \right) * 100 = 96,13\%$$

SST (sólidos suspendidos totales): Los sólidos suspendidos totales aumentaron su concentración de 5,48 a 9 mg/L, indicando que quedaron en solución partículas asociadas al constante desprendimiento de metales de las placas y a la reacción de formación de hidróxidos de hierro o aluminio.(Aduvire,2006). No obstante, este valor final se encuentra dentro del rango permisible para el vertimiento de aguas residuales.

SD (sólidos disueltos): Los sólidos disueltos del afluente del sistema de tratamiento de drenajes ácidos mediante electrocoagulación, disminuyeron notablemente de 2241 a 1159 mg/L, es decir, en un porcentaje del 48,28%, esto se asocia a la decantación de las partículas coloidales presentes en el agua tratada. Pese a esta considerable descenso, el valor de los sólidos disueltos en el efluente del sistema no cumplen con el límite establecido en la resolución 0631 de 2015.

$$\text{Remoción} = \left(\frac{2241 - 1159}{2241} \right) * 100 = 48,28\%$$

- **Sulfatos.**

El contenido de sulfatos después de tratar el agua no cumple con el límite establecido por la normatividad, debido a que aumentó su concentración tuvo un aumento muy considerable, de un valor de 1654 a 1829 mg SO₄/L esto obedece a lo establecido por Castañeda (2018), a la conversión de sulfuros por oxidación en sulfatos. El aumento se le atribuye a los aniones SO₄-2 presentes en el drenaje que no alcanza a ser precipitado en el tiempo de residencia aplicado en este montaje.

- **Zinc (Zn).**

Este metal disminuyó su concentración, de un valor de 1,44 a <1 mg/L, esto se debe al proceso de oxidación que sufren los elementos metálicos presentes en el drenaje ácido durante la electrocoagulación, coincidiendo con lo establecido por Guerra (2012) en trabajo "tratamiento de agua para remoción de plomo aplicando nanotecnología" en el que afirma que ciertos metales pesados como Cu, Zn y Pb precipitan como carbonatos cuando el pH asciende. Sin embargo, el rango de medición obtenido finalmente no establece un valor fijo que nos permita establecer si este parámetro cumple con el límite permisible para el vertimiento de aguas residuales, el cual exige una concentración máxima de 0,05 mg/L.

- **Aluminio (Al).**

Este metal no presentó variación alguna de los resultados proporcionados por el Laboratorio Ambiental Nancy Flórez, ya que el equipo no nos arrojó cifras exactas de su concentración, sin embargo conocemos el nivel de tolerancia o rango de medición del equipo HACH DR3900 de 1 % a 0,50 - 2,0 Abs (rango de longitud de onda 340 - 900 nm), pero ello no significa que no hay presencia del mismo, sino que está por debajo del nivel de lectura.

- **Temperatura.**

Este parámetro fue de vital importancia dentro del proceso de electrocoagulación, ya que se logró observar su variabilidad durante la ejecución del sistema de depuración de drenajes ácidos de minas. Este también se vio afectado por los procesos de conservación durante el estudio. A propósito, Chen (2004), encontró que la eficiencia de la corriente empleada para el aluminio se incrementa hasta los 60° C, efecto que se atribuye a la destrucción de la película de óxidos de aluminio que se forma en la superficie de los electrodos.

- **Consumo de energía eléctrica y comportamiento del equipo de electrocoagulación.**

Según lo establecido por Restrepo (2006), el proceso de electrocoagulación permite la remoción de una alta cantidad de contaminante en una sola operación, situación que convierte a esta tecnología en una opción económica y ambiental para el tratamiento de las aguas residuales de muchas industrias. El capital y los costos de operación son mucho menores comparativamente con un tratamiento por coagulación química, incluso se puede llegar a recuperar los costos de capital en menos de un año. Estos costos dependen del caudal a tratar, de la naturaleza del agua residual, de los contaminantes a ser removidos y de la región o localidad en la que se desea realizar el tratamiento.

El comportamiento del equipo se evaluó teniendo en cuenta las variaciones y alternancias entre el voltaje, el número de placas y el tiempo. Cabe destacar que para todos los montajes se utilizó un volumen de 10 litros (0,10 m³) de drenajes ácidos, un lapso de tiempo de 30 minutos (0,5 h) y teniendo en cuenta que en nuestro departamento el Kw/h tiene un costo de 546,42 la unidad. Para calcular el precio de energía eléctrica consumida tenemos que:

Tabla 24. Costos de energía eléctrica de la operación del sistema de electrocoagulación.

Montaje	Número de placas	Voltaje	Amperaje	consumo Kw/h	Costo
A	6 de Aluminio	10 V	12,5 A	6,25	\$3415,12
		15 V	12,5 A	9,375	\$5122,68
		20 V	12,5 A	12,5	\$6830,25
B	10 placas (5 de Hierro y 5 de Aluminio)	10 V	12,5 A	6,25	\$3415,12
		15 V	12,5 A	9,375	\$5122,68
		20 V	12,5 A	12,5	\$6830,25
C	12 placas (6 de Hierro y 6 de Aluminio)	10 V	12,5 A	6,25	\$3415,12
		15 V	12,5 A	9,375	\$5122,68
		20 V	12,5 A	12,5	\$6830,25

Fuente: Autores, 2020.



La implementación del sistema de electrocoagulación de drenajes ácidos mineros logra reducir el valor de turbidez en 40%, hierro 96% y el aumento significativo del pH a una categoría neutral alrededor de 6,75 utilizando un mínimo consumo de energía (0.9375 kWh/m³). A pesar de que el efluente final del sistema de depuración de drenajes ácidos de minas cumplió con los límites permisibles establecidos en la resolución 0631 de 2015 en cuanto a características tales como contenido de hierro, pH, DBO y DQO; otros parámetros como sulfatos y sólidos disueltos tienen valores por encima de lo exigido en la normatividad de vertimientos.

CONCLUSIÓN

Las características iniciales del drenaje ácido minero estudiado, sobrepasan los límites permisibles para el vertimiento de aguas residuales del sector minero establecidos en la resolución 0631 de 2015, en parámetros fisicoquímicos tales como pH, hierro, zinc, sulfatos y sólidos, que como consecuencia ha conllevado a la pérdida de la calidad del agua.

La combinación de las placas de electrodos con mejor resultado fue los de la combinación hierro-aluminio, debido a que los flóculos formados presentaban mayor tamaño y consistencia. Por el contrario, los electrodos de combinación hierro-hierro producían un efecto de oxidación no deseado en el tratamiento del agua residual.

Con la implementación del sistema de electrocoagulación en el tratamiento de drenajes ácidos mineros se determinaron las condiciones adecuadas utilizando una densidad de corriente menor a 15 voltios y un número de 12 placas metálicas combinadas (hierro y aluminio) se logró resultados óptimos alcanzando una remoción superior al 95% en hierro y un aumento del pH de un medio ácido (3,6) a un valor neutral (6,75) empleando un tiempo de retención mínimo de 5 minutos en el equipo lo que proporciona una relación costo-beneficio interesante donde el precio de 1 L/s de este tratamiento es de \$67500 COP por hora.

El modelo estadístico factorial de múltiples niveles, nos indicó que para la eficiencia en la remoción de pH alcance un 85%, la mejor configuración es usando un número de 12 placas metálicas intercaladas de hierro galvánico y aluminio, empleando densidad de corriente de 15 voltios en el sistema, y que estos influyen de manera significativa dentro del proceso de electrocoagulación de drenajes ácidos de minas.

La electrocoagulación es una tecnología trascendental y de gran interés para el tratamiento de los drenajes ácidos mineros y de otras aguas residuales contaminadas con metales pesados en solución, ya que elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.



RECOMENDACIONES

Considerando los resultados de los estudios previos y la importancia que se está dando a los tratamientos de aguas sin el uso de reactivos o químicos contaminantes, recomendamos que la electrocoagulación si se puede utilizar como una alternativa eficiente para la remoción de metales pesados y neutralizar el agua en los drenajes ácidos mineros.

Los resultados del proceso de electrocoagulación evidenciaron la necesidad de efectuar la remoción de los lodos acumulados en el reactor con el fin de mejorar las condiciones hidráulicas de funcionamiento para mejorar el desempeño del equipo, por lo tanto se recomienda hacer mayor enfoque en el análisis de lodos precipitados y que alternativa de uso se les puede dar en el medio ambiente.

De igual manera, emplear una configuración distinta que varíe el tiempo de retención y la intensidad de corriente con el fin de establecer la influencia de estos parámetros en la eficiencia de remoción del hierro en estas aguas residuales. Sería oportuno evaluar otros sistemas posteriores a la electrocoagulación, se recomienda emplear el uso de un sistema de sedimentación con el fin de reducir la concentración de sólidos.

Se propone a la empresa el uso del sistema de electrocoagulación como alternativa para el tratamiento y eliminación de contaminantes de las aguas ácidas producidas en la actividad minera. Por su parte se le sugiere a las autoridades ambientales mantener un monitoreo constante a los cuerpos de agua intervenidos por la empresa, para controlar cualquier afectación en la fauna y flora que dependen del recurso hídrico de la zona.

Es necesario proseguir con estudios de esta línea de investigación para fortalecer estos procesos, necesarios para potenciar la tecnología del sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales, no sólo producto de la minería, sino de otros sectores productivos que generen metales y otras sustancias disueltas, y con ello eliminar contaminantes de los cuerpos de agua.



BIBLIOGRAFÍA

- Akbal, F., Camci, S. (2011). *Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation*. *Desalination*, 269(1-3), 214-222
- Aduvire, O. (2006). *Drenaje ácido de mina: Generación y tratamiento*. https://web.archive.org/web/20170828190044/http://info.igme.es/SIDIMAGENES/113000/258/113258_0000001.PDF.
- Agencia de Protección Ambiental, Estados Unidos. *Estándares del reglamento nacional primario de agua residual*. Obtenido de: <http://water.epa.gov/drink/agua/estandares.cfm>
- Aguilar, S., Solano, G. (2018). *Evaluación del impacto por vertimientos de aguas residuales domésticas, mediante la aplicación del índice de contaminación (ICOMO) en caño grande, localizado en Villavicencio-Meta*. Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás. Obtenido de: <http://hdl.handle.net/11634/14218>.
- Beleño, O. (2019). *Evaluación un electrocoagulador tipo Bach, con electrodos de hierro conectado en paralelo a escala laboratorio para el tratamiento de los efluentes de la planta piloto de lácteos y cárnicos de la Universidad Popular del Cesar, sede sabanas*. Tesis para optar al título de ingeniero ambiental y sanitario.
- Cantera, L. (2013) *Automatización del proceso de tratamiento de aguas pluviales por el método de electrocoagulación*. Tesis Ingeniero en Control y Automatización. México D.F.: Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", 147 p.
- Castañeda, D., Chotón, E. (2018). *Estudio de la densidad de corriente y tiempo de residencia en el proceso de electrocoagulación y su influencia en la reducción de Fe_{2+} de solución de drenajes ácidos de mina*.



- CEPAL (2013). *Estudio Económico de América Latina y el Caribe 2013: tres décadas de crecimiento económico desigual e inestable*. Obtenido De: Repositorio digital.
- Chaparro, L.T. (2015). *Drenajes Ácidos de mina. Formación y manejo*. Revista ESAICA, Vol.1 n°1, pp. 53-57, junio 2015.
- Chen, G. (2004) *Electrochemical technologies in wastewater treatment EN: Separation and Purification Technology*. Vol.38 no. 1
- Contreras, Brigitte., García, Jhon (2015). *Análisis de la calidad físico-química del agua en la quebrada el santuario por la explotación de hierro en el municipio de Ubalá – Cundinamarca*.
- Domínguez, J., Flores J. (2016), *Derecho humano al agua y al saneamiento, Jiutepec, Mor., Instituto Mexicano de Tecnología del Agua / El Colegio de México, A.C.* Obtenido de: <https://doi.org/10.24201/edu.v32i3.1748>
- Espigares, M., Gálvez, R., Pérez, J., (1985) *Aspectos sanitarios del estudio de las aguas. Universidad de Granada. Cátedra de Medicina Preventiva y Social*. Recuperado de: http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf
- Del Ángel, M. (1994). *Contribución al estudio de la demanda química de oxígeno*.
- FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. (2015) *Direcciones Estadísticas*. Recuperado de: http://faostat3.fao.org/browse/O*/S
- Ferniza, F. (2017). *Eficiencia de un sistema acoplado electrocoagulación-fitorremediación para la remoción de Pb, Cu, Cd y Zn, presentes en efluentes mineros*.

- Gammons, Ch., Duaine, T., Parker, S., Poulson, S., Kennelly, P. (2010). *Geochemistry and stable isotope investigation of acid mine drainage associated with abandoned coal mines in central Montana, USA*. Chemical Geology 269; pp. 100–112
- Grajales, T. (2001). *Desarrollo de un nuevo concepto de investigación*. Universidad de Montemorelos, México. Enfoques XII, N° 2 (Primavera 2000): 41-64.
- Mayor, V., Agudelo-Tejada, A., García, L., Padilla, L. (2018). *Caracterización de lixiviados como alternativa que contribuya a la mitigación de contaminantes*. Revista ION, 31(1), 59-63. <https://dx.doi.org/10.18273/revion.v31n1-2018010>
- Mercado, D.I., G. González, H. Valencia. 2013. *Remoción de Níquel y DQO presente en aguas residuales de la industria automotriz mediante electrocoagulación*. Revista EIA. Colombia.
- Montero, R., Martínez, M. (2014). *Composición físico-química de aguas ácidas procedentes de dos minas de carbón: lobatera, Estado Táchira, Venezuela*. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, 29(4), 55-66. Recuperado de: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652014000400006&lng=es&tlng=es.
- Morales, N., Acosta, G. (2010). *Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas*. Ciencia e Ingeniería Neogranadina 20, 33–44.
- Morales, S., Palta, G. (2013). *Fitodepuración de aguas residuales domesticas con poaceas: Brachiaria mutica, Pennisetum purpureum y Panicum maximun en el municipio de Popayán, Cauca*. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 11(2), 57-65. Tomado de:



http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S169235612013000200007&lng=en&tlng=es

Oncel, M.S., Muhcu, A., Demirbas, E., Kobya, M. (2013). *Un estudio comparativo de precipitación química y electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de drenaje ácido de carbón.* Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.08.008>.

Pantoja, E. (2012). *Aplicación de la electrocoagulación y floculación sobre el tratamiento del drenaje ácido de minas de carbón.*

Pinzón, E. (2010). *Propuesta técnica a escala piloto para la remoción de color de origen textil, por medio de electrocoagulación para favorecer el proceso de potabilización de agua, en una planta de tratamiento de aguas.*

Red internacional para la prevención del ácido (2014). *La guía GARD.* Recuperado de: <http://www.gardguide.com/index.php/>.

Restrepo, A., Ruiz, A., Garcés, L. (2006). *La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas.*

Romero, J. (2005). *Lagunas de Estabilización De Aguas Residuales.* Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito.

Raffo, E., Ruiz, Edgar. (2014) *Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno.*

Ruiz, P. (2017). *Prototipo de una celda de electrocoagulación abastecida con energía fotovoltaica para tratamiento de aguas residuales en la industria minera.*

Comisión Nacional del Agua (2007). *Estadísticas del Agua en México, 1a edición, CNA, México.*



Sánchez, I. (2000). *Métodos Estadísticos para la Mejora de la Calidad, de la titulación de Ingeniería de Telecomunicaciones*. Universidad Carlos III de Madrid.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WPCF (1998), 18th ed. New York: Public Health Association Inc.

Zaroual, Z., Chair, H., Essadki, A., El Ass, K., Azzi, M. (2009). *Optimizing the removal of trivalent chromium by electrocoagulation using experimental design*, Chemical Engineering Journal, vol. 148, No. 2-3 (May), pp. 488-495.

Zodi, S., Potier, O., Lopicque, F., Leclerc, J. (2010). *Treatment of the industrial wastewaters by electrocoagulation: Optimization of coupled electrochemical and sedimentation processes*. Desalination, vol. 261, No. 1-2 (October), pp. 186-1

ANEXOS.

Anexo A. Punto de muestreo en el Pit sur, mina La Jagua.



Anexo B. Toma de muestras de drenajes acidos mineros en el Pit sur, mina La Jagua



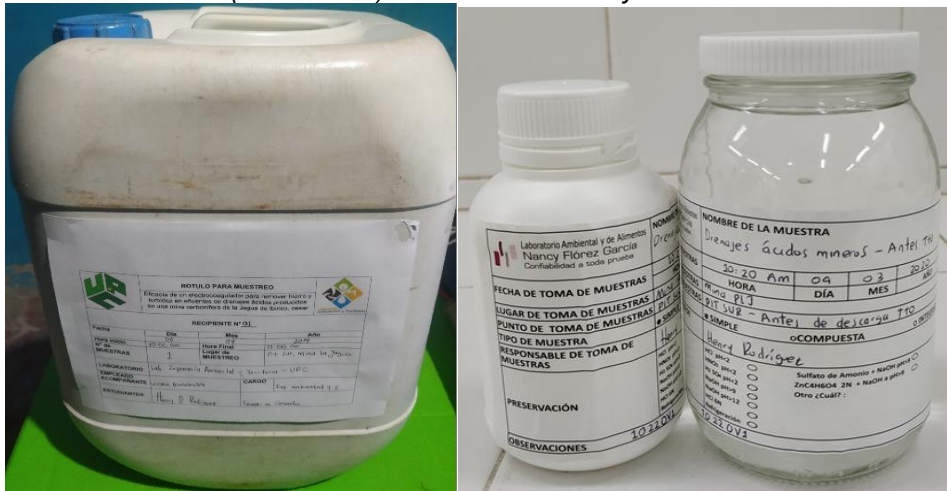
Anexo C. Inspección técnica al PIT sur mina La Jagua.



Anexo D. Formato de rotulo para muestreo

	ROTULO PARA MUESTREO			
	Eficacia de un electrocoagulador para remover hierro y turbidez en efluentes de drenajes ácidos producidos en una mina carbonífera de la Jagua de Ibirico, Cesar			
RECIPIENTE N° 01				
Fecha	Día	Mes	Año	
	06	09	2019	
Hora Inicio	10:00 am	Hora Final	12:00 Pm	
N° de MUESTRAS	1	Lugar de MUESTREO	P.t Sur, mina La Jagua	
LABORATORIO	Lab. Ingeniería Ambiental y Sanitaria - UPC			
EMPLEADO ACOMPAÑANTE	victor fontanilla	CARGO	Ing. ambiental y S.	
ESTUDIANTES	Henry D. Rodriguez		Leiner m Canacho	

Anexo E. Recipientes para el muestreo para Laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria (UNICESAR) Y Laboratorio Nancy Florez Garcia.



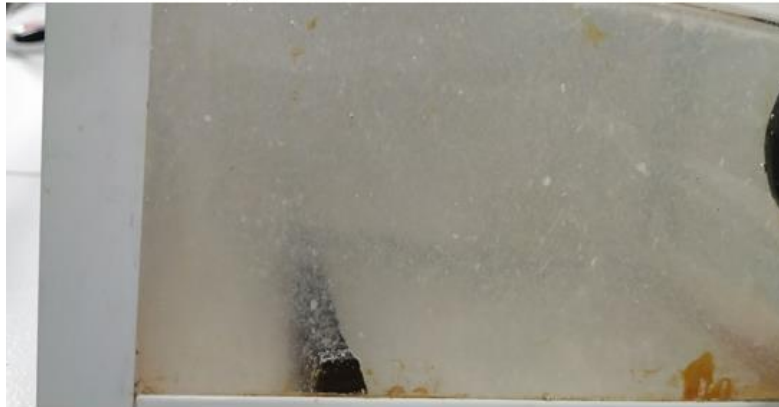
Anexo F. Etapas de la operación del sistema de Electrocoagulación.



DESPÚES DEL TRATAMIENTO



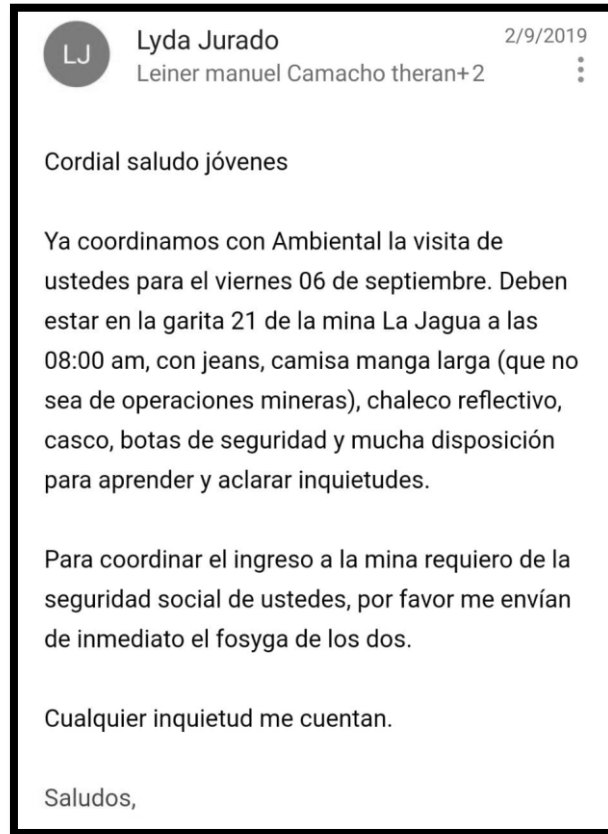
PRECIPITADO FINAL



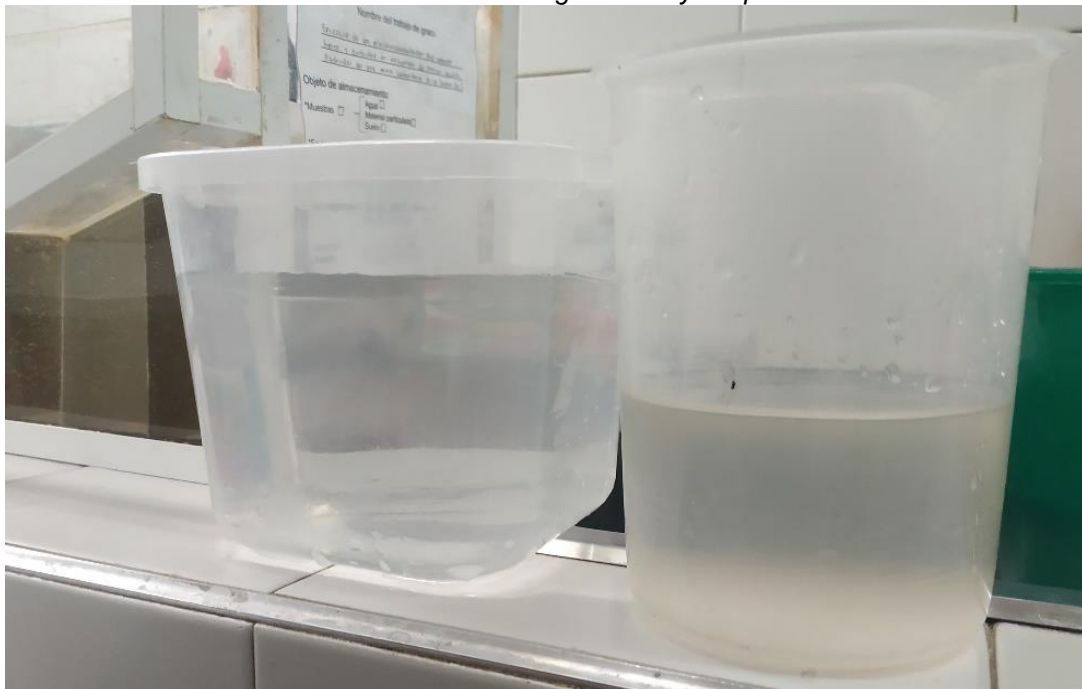
Anexo G. Formato para el registro de datos.

Fecha		Hora Inicio		Hora Final		Hierro (Fe)	Aluminio (Al)
13/03/2020		02:00 pm		05:00 pm			
1		2		3			
10v		15v		20v		6	6
N° de placas							
Tiempo (min)	pH	Conductividad (µS/cm)	Turbiedad (NTU)	Temperatura (°C)	SDT(ppm)		
0	4,36	2363	4,34	19,8	1201		
10	4,61	2344	3,57	22,3	1195		
20	4,65	2330	3,48	23,4	1175		
30	4,71	2318	3,58	24,4	1181		
0	4,36	2412	2,14	20,6	1199		
10	6,35	2327	5,36	20,9	1195		
20	6,51	2317	6,5	21,1	1164		
30	6,25	2306	11,2	23	1159		
0	4,36	2424	2,13	21,4	1201		
10	4,24	2406	2,68	24,7	1193		
20	4,27	2426	3,49	24,5	1195		
30	4,60	2368	3,87	25,9	1173		
FIRMA RESPONSABLES							

Anexo H. Permiso de ingreso a las instalaciones de la mina.



Anexo I. Características visuales del agua antes y después del tratamiento.



Anexo J. Certificado de analisis – Laboratorio Nancy Florez Garcia S.A.S.

Laboratorio Nancy Florez Garcia S.A.S.
Calle 12 No. 10-34 Sabana
NIT: 804006958-0

COD: RD-104 Ver: 08 del 17 de Agosto de 2018

CERTIFICADO DE ANALISIS
N° 31193

INFORMACIÓN DEL CLIENTE
EMPRESA : HENRY DAVID RODRIGUEZ MOYA
DIRECCIÓN : C/DAZ 30A P.30-34 SABANA
CONTACTO : HENRY RODRIGUEZ
CARGO : PARTICULAR

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA
NOMBRE : AGUA SUPERFICIAL
LUGAR DE MUESTREO : LABORATORIO DE INGENIERIA AMBIENTAL UPC
PUNTO DE MUESTREO : ELECTROCOAGULADOR
TIPO DE MUESTRA : SIMPLE
PLAN DE MUESTREO : N.S.
PROC. DE MUESTREO : N.S.

NIJ : 1008124264
CIUDAD : VALLENPALMIRA
TELÉFONO : 3045906905

HORA MUESTRA : 15:00
MUESTREO : 2020/03/11
RECEPCIÓN : 2020/03/11
INICIO ENSAYOS : 2020/03/16
FINAL ENSAYOS : 2020/03/19
INFORME : 2020/03/20

Fisicoquímico				
ANÁLISIS	MÉTODO - TÉCNICA	LCH	FECHA ANÁLISIS	RESULTADO
hierro (mg/L) (A)	SM 3030 A / SM 3111 B - Espectrofotométrico	0,1000	2020/03/16	<0,1000
sulfato (mg SO4/L) (A)	SM 4103-02/4 B - Turbidimétrico	1,0	2020/03/16	1829

NOTA:
Muestra tomada y traída al laboratorio por el cliente.

N.A.: No Aplica N.S.: No Sucesionado (LCH): Límite de cuantificación del método
(A): Acreditado (S): Subcontratado
Todo resultado del laboratorio está respaldado por una ficha que verifica su autenticidad.
Resultado en controlado una vez entregado al cliente.
El resultado aplica únicamente a la muestra recibida y analizada.
No se permite la reproducción parcial de este documento sin autorización expresa del laboratorio.
Cuando se coloque la sigla N.S en la Fecha de Análisis, indica que el Laboratorio Subcontratado no le ha suministrado en el certificado de análisis entregado.
Para los análisis microbiológicos y EBO, la fecha de análisis corresponde a la fecha de inicio de los reactivos. La fecha de finalización cumple en cada caso los tiempos establecidos en el método.
Laboratorio Acreditado por el IDEAM según Resolución N° 0288 de 02 de mayo 2018 por lo cual se renueva y se sustenta la acreditación al LABORATORIO AMBIENTAL Y DE ALIMENTOS NANCY FLOREZ GARCIA de la SOCIEDAD LABORATORIOS NANCY FLOREZ GARCIA S.A.S., para producir información cuantitativa, física, química y biológica para los estudios de análisis ambientales requeridos por las autoridades ambientales competentes y de carácter oficial, relacionada con la salud del medio ambiente y de los recursos naturales renovables.

APROBO
Manuel Peto Benavides
MANUEL PEÑA
TIC 10227
Jefe Fisicoquímica
Fin de Informe

Página 1 de 1

Teléfonos: (5)5842072 Fax: 5703920-3145906908 E-mail: calidad_amb@labnancyflorez.com.co
Carrera 12No. 23C - 72 Esquina - Valledupar

Anexo K. Determinación de pH



Anexo L. Determinacion de DBO₅ de drenaje ácido minero.



Anexo M. Análisis de pH del Precipitado.

