

DISEÑO DE UN PROCESO QUÍMICO PARA LA REMOCIÓN DE EXCESO DE  
NITRATOS PRESENTES EN EL AGUA DE LA FUENTE HÍDRICA DEL RÍO  
SUBACHOQUE.

ANDRÉS DAVID BUSTOS GOMEZ

VICTORIA ANDREA GUÁQUETA VILLALOBOS

Proyecto integral de grado para obtener el título de  
INGENIERO QUÍMICO

Orientador

DIANA MARCELA CUESTA PARRA

Ingeniero Ambiental

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ D.C

2022

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

Nombre

Firma presidente del jurado

---

Nombre

Firma del jurado

---

Nombre

Firma del jurado

Bogotá D.C febrero de 2022

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA**

Consejero Institucional

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA-PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

**Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN**

Vicerrector Administrativo y Financiero

**Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO**

Secretario General

**Dr. JOSÉ LUIS MACÍAS RODRÍGUEZ**

Decana Facultad de Ingeniería

**Ing. NALINY GUERRA PRIETO**

Directora Programa Ingeniería Química

**Ing. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA**

## **DEDICATORIA**

A mis padres Jorge Eliecer Bustos y Jackeline Gómez, quienes me han brindado su paciencia, amor y compromiso en cada etapa de formación de mi vida, quienes me han enseñado a vivir la vida con carácter y decisión, siendo un pilar inamovible lleno de ejemplo y admiración. A ustedes mil y mil gracias por todo lo que han dado por mí hasta el día de hoy, mi anhelo siempre será que estén orgullosos de quien hoy es su hijo, así como yo lo he estado de tenerlos como padres.

***Andrés David Bustos Gómez***

## **DEDICATORIA**

A mi padre José Javier Guáqueta de Dios, quien ha sido madre y padre para mí, queme ha dado todo lo que tengo, y me ha hecho lo que soy, quien soporto mis frustraciones, quien me dio su palabra de aliento cada vez que desistí, quien me motivo hasta el último momento para finalizar esta etapa de mi vida.

Por su cariño y apoyo durante mis años de estudio, por enseñarme tanto, todo de forma amorosa y tan paciente, por siempre ser un ejemplo y ser la mejor persona que conozco, la más honesta y noble, esto nunca fue por mí siempre fue por ti y para ti.

***Victoria Andrea Guáqueta de Dios***

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

A la ingeniería Diana Marcela Cuesta Parra, Directora del proyecto que fue crucial para la realización de este trabajo, por su apoyo durante todo el proyecto, por su ayuda en todas las dificultades que se presentaron, por su voto de confianza, por los conocimientos teóricos y experimentales aportados, y por todo su tiempo, dedicación, entrega, colaboración y compromiso con la realización de cada uno de los objetivos propuestos en este trabajo de investigación, sin los cuales nada de esto hubiera sido posible.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	15
1. MARCO TEORICO	16
1.1 Generalidades de las aguas residuales	16
1.1.1 <i>Reseña histórica</i>	16
1.1.2 <i>Clasificación de aguas residuales</i>	17
1.1.3 <i>Características de las aguas residuales</i>	19
1.1.4 <i>Contaminación en aguas residuales</i>	22
1.2 Nitratos	24
1.2.1 <i>Fuentes antropogénicas de los nitratos</i>	25
1.2.2 <i>Contaminación con nitratos en el agua</i>	25
1.2.3 <i>Nitratos en la salud</i>	26
1.3 Contaminación con nitratos en el río Subachoque	28
1.3.1 <i>Localización</i>	28
1.3.2 <i>Vertientes que alimenta el río Subachoque</i>	30
1.3.3 <i>Fuentes de contaminación del rio Subachoque</i>	31
1.4 Estándares de calidad	31
1.5 Procesos de tratamientos disponibles	33
1.5.1 <i>Intercambio iónico</i>	33
1.5.2 <i>Osmosis inversa</i>	34
1.5.3 <i>Electrocoagulación</i>	36
1.5.4 <i>Procesos biológicos disponibles</i>	39
2. METODOLOGÍA	42



<b>2.1</b>	<b>Análisis bibliográfico de los métodos de remoción</b>	<b>42</b>
2.1.1	<i>Intercambio iónico</i>	42
2.1.2	<i>Osmosis inversa</i>	47
2.1.3	<i>Electrocoagulación</i>	50
<b>2.2</b>	<b>Métodos de caracterización del agua del río Subachoque</b>	<b>57</b>
2.2.1	<i>Nitratos</i>	57
2.2.2	<i>Nitritos</i>	58
2.2.3	<i>Nitrógeno amoniacal</i>	58
2.2.4	<i>Nitrógeno orgánico</i>	59
2.2.5	<i>Nitrógeno total</i>	59
2.2.6	<i>pH del agua</i>	59
2.2.7	<i>Tipo de muestreo</i>	60
<b>2.3</b>	<b>Método de selección para el sistema de tratamiento</b>	<b>62</b>
2.3.1	<i>Matriz PUGH</i>	62
<b>2.4</b>	<b>Caracterización de la muestra</b>	<b>64</b>
<b>2.5</b>	<b>Factores influyentes en el proceso de electrocoagulación</b>	<b>65</b>
2.5.1	<i>Material del electrodo</i>	65
<b>2.6</b>	<b>Método de estimación del costo del sistema</b>	<b>69</b>
2.6.1	<i>Costos de instalación</i>	69
2.6.2	<i>Costos operativos</i>	70
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>72</b>
3.1	<b>Métodos de remoción de nitratos en fuentes hídricas</b>	<b>72</b>
3.2	<b>Caracterización del contenido de nitrógeno en el río Subachoque</b>	<b>76</b>
3.3	<b>Propuesta de un proceso químico para la remoción de exceso de nitratos presentes en la fuente hídrica del río Subachoque</b>	<b>80</b>

<b>3.3.1 Área de interés</b>	<b>82</b>
<b>3.3.2 Caudal de tratamiento</b>	<b>83</b>
<b>3.3.3 Diseño de reactor</b>	<b>87</b>
<b>3.3.4 Densidad de corriente</b>	<b>91</b>
<b>4. PROYECCIÓN DE COSTOS DEL SISTEMA</b>	<b>94</b>
<b>4.1 Costos de instalación</b>	<b>94</b>
<b>4.2 Costo operativo</b>	<b>95</b>
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>98</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>99</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>110</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Hidrografía del Río Subachoque	29
Figura 2. Procesos de fitorremediación	40
Figura 3. Artículos relacionados al método de intercambio iónico y nitratos	43
Figura 4. Artículos relacionados con la remoción de nitratos por intercambio ionico	46
Figura 5. Artículos relacionados al método de osmosis inversa y nitratos	47
Figura 6. Artículos relacionados al método de remoción de nitratos por osmosis inversa	50
Figura 7. Artículos relacionados al método de electrocoagulación y nitratos	51
Figura 8. Artículos relacionados al método de remoción de nitratos por electrocoagulación	54
Figura 9. Artículos relacionados al tratamiento de aguas por electrocoagulación.	56
Figura 10. Ejemplo matriz PUGH	63
Figura 11. Criterios y conceptos de la matriz PUGH	64
Figura 12. El efecto del pH en la eficacia de la eliminación de los nitratos	67
Figura 13. Localización del punto de recolección de la muestra	77
Figura 14. Diseño conceptual de electrocoagulación	81
Figura 15. Distribución interna del reactor	84
Figura 16. Tipo de reactores batch para electrocoagulación	85
Figura 17. Esquema del diseño de electrodos metálicos	90
Figura 18. Disposición de electrodos y orientación de flujo	91

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Quebradas que abastecen al Río Subachoque.	30
Tabla 2. Estándares de calidad según el decreto 1575 de 2011.	32
Tabla 3. Parámetros especificados en el Decreto real 817 de 2015.	33
Tabla 4. Documento toma de muestras Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.	61
Tabla 5. Características del hierro y aluminio	66
Tabla 6. Análisis bibliográfico para el método de intercambio iónico	72
Tabla 7. Análisis bibliográfico para el método de osmosis inversa.	73
Tabla 8. Análisis bibliográfico para el método de electrocoagulación	74
Tabla 9. Matriz de decisión PUGH selección del método de remoción.	75
Tabla 10. Caracterización de la muestra de la fuente hídrica del rio Subachoque	78
Tabla 11. Estudios fisicoquímicos del rio Subachoque.	79
Tabla 12. Extensión geográfica del municipio de Mosquera.	82
Tabla 13. Dimensiones para cada reactor.	86
Tabla 14. Estudio comparativo de remoción de nitratos por electrocoagulación.	87
Tabla 15. Dimensiones de electrodo.	89
Tabla 16. Cantidad inicial de material de electrodo.	95

## RESUMEN

En el presente trabajo de grado se desarrolla como propuesta el diseño de un sistema de tratamiento químico de aguas residuales para eliminación de exceso de nitratos de la fuente hídrica del río Subachoque, siendo así esta fuente que se encuentra contaminada por la influencia antropogénica a lo largo de todo su cauce.

Uno de los contaminantes que mayor impacto genera por sus afectaciones al medio ambiente y a la salud humana es el nitrato, contaminante que se busca reducir para esta fuente hídrica, de manera que tal que se obtenga un grado de aprovechamiento de la misma en función de suplir una necesidad hídrica en una zona geográfica determinada.

Por medio de revisión bibliográfica se plantea la implementación de la tecnología a utilizar, con este fin este estudio repasa algunos de los últimos avances y manejos de la tecnología en la remoción de nitratos por métodos químicos, de manera tal que se propone el proceso más adecuado mediante perspectivas económicas, técnicas y de diseño para aplicación relativa del método, analizando los costos de inversión, operación y de la alternativa propuesta.

Al evaluar la eficiencia de remoción de nitratos se obtiene como resultado el diseño de un proceso químico que alcanza un nivel de remoción de alrededor del 92% de estos, bajo la tecnología de electrocoagulación usando ánodo de hierro y cátodo de aluminio, de tal manera que este método brinda altos niveles de efectividad para la remoción de contaminantes, contribuyendo positivamente a la recuperación y conservación de la fuente hídrica, permitiendo ampliar a una mejor infraestructura hidráulica para el municipio de Mosquera, Cundinamarca.

Finalmente, de ser posible entregar resultados convenientes en cuanto a la disminución de los niveles de nitratos presentes en esta, de modo tal que los términos de recuperación y conservación de la fuente se puedan tener en cuenta para futuros procesos ya que la recuperación de esta fuente permitirá, tener una mejor infraestructura hidráulica para el municipio de Mosquera, Cundinamarca.

**Palabras Claves:** aguas residuales, tratamiento de aguas residuales, caracterización del agua residuales, procedimientos fisicoquímicos.

## INTRODUCCIÓN

Debido a la explotación masiva y posterior consumo de recursos naturales renovables y no renovables, el crecimiento poblacional, el desarrollo tecnológico y la industrialización han llevado al deterioro del medio ambiente; el recurso más importante y uno de los recursos más afectados por el ser humano son los recursos hídricos. [1]

La situación que enfrenta la población mundial debido a los altos niveles de contaminación ha llevado a las autoridades y ciudadanos a dedicarse al cuidado del medio ambiente. El agua, por ser un recurso indispensable para la vida, y al mismo tiempo un elemento central de diversas actividades económicas y sociales, desde mediados del siglo XIX, se encuentra en un estado crítico debido a su uso extensivo en diversas actividades industriales, conduciendo a los graves problemas ambientales actuales. [2]

En las últimas décadas, el incremento poblacional y la industrialización han contribuido al desarrollo y crecimiento alrededor de la sabana de Bogotá [3]. Para uso del presente documento y bajo una delimitación de la zona geográfica de interés, se tiene que Mosquera con una extensión territorial de 107 km<sup>2</sup> ha visto un fenómeno de expansión poblacional de primera mano teniendo en las últimas cuatro décadas un crecimiento poblacional de 823,07%. [4] [5]

En el presente trabajo de grado se propone una alternativa de tratamiento químico de agua, basado en revisiones bibliográficas para el cumplimiento de los parámetros que no están dentro de los rangos permitidos de nitratos en fuentes hídricas, según la caracterización hecha y con el correcto uso de la información recolectada. Se realiza una evaluación de las condiciones y características del agua y se establece una propuesta de proceso químico para su tratamiento.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Diseñar un proceso químico para la remoción de exceso de nitratos presentes en el agua de la fuente hídrica del río Subachoque.

### **Objetivos específicos**

1. Establecer bibliográficamente los métodos de remoción de exceso de nitratos en fuentes hídricas.
2. Analizar las propiedades fisicoquímicas de la fuente del río Subachoque.
3. Proponer un proceso químico para la remoción de exceso de nitratos presentes en la fuente hídrica del río Subachoque.
4. Realizar una estimación de los costos que presenta la producción.

## 1. MARCO TEORICO

### 1.1 Generalidades de las aguas residuales

En este capítulo se presenta una introducción al contexto teórico, que incluye una descripción de las aguas residuales que incluye detalles sobre su clasificación, caracterización, fuentes y principales contaminantes

#### 1.1.1 *Reseña histórica*

En todas las facetas de la existencia humana, desde las necesidades más básicas para la supervivencia hasta la creación de productos y servicios, el agua es esencial. El agua también se utiliza en la fabricación de productos básicos y en la prestación de servicios. Además de ser el líquido más abundante del mundo, es también el recurso natural máspreciado por ser la base de todo tipo de vida en la tierra. Aproximadamente el 97,5% del volumen total de agua en el mundo está formado por agua salina, de la cual el 2,5% es dulce; sin embargo, sólo el 0,26% del agua dulce puede encontrarse en sistemas fluviales, lagos y otros tipos de almacenamiento. [6]

Colombia es uno de los países con más agua del mundo; Sin embargo, teniendo en cuenta el impacto humano sobre diversas fuentes de agua, su disponibilidad es menor, debido a que superan su capacidad de filtración, lo que conduce a una calidad baja, lo que sugiere que la calidad del agua se ha deteriorado. [7]

Según los estudios realizados por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Ordenamiento Territorial en 2004, existen problemas de contaminación en todo el país, especialmente en las zonas urbanas. Se estima que hay aproximadamente 1.300 cuerpos de agua contaminados en el interior del país, principalmente en las ciudades de Bogotá, Medellín, Cali y Sogamoso, donde la calidad de los parámetros físicos y químicos está relacionada con la contaminación de diferentes fuentes de agua, lo que provoca condiciones de hipoxia, esta situación está relacionada con el hecho de que más del 80% de los asentamientos urbanos son abastecidos por recursos naturales como ríos, arroyos, quebradas, etc. Por ser utilizados para diferentes actividades familiares, presentan riesgos potenciales para la población y conducen a que las comunidades sean vulnerables. [7]



### **1.1.2 Clasificación de aguas residuales**

El agua residual es el agua generada por actividades, ya sean domésticas, comunales o industriales, que, tras su explotación, finalmente se almacena en cuerpos de agua de tipo subterráneo, superficial y / o pluvial. [8]

1.1.2.a Agua residual domestica (ARD). Las aguas residuales de las áreas residenciales y de servicio se generan principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas. Contaminan el agua indicando la presencia de sólidos, residuos orgánicos, detergentes, jabón y grasa, los cuales deben ser removidos mediante un proceso.

El tratamiento de aguas residuales domésticas ayuda a reducir la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas [9]; porque, a menudo, su eliminación final se realiza directamente, tanto en cuerpos de agua como en suelo [10]. En algunos países en desarrollo, las aguas residuales domésticas son una de las principales fuentes de contaminación del agua. La descarga de estos desechos en un cuerpo de agua puede alterar severamente los estándares de calidad del agua, matando a los organismos que viven allí y enfermando a quienes consumen el agua [11]. Las aguas residuales domésticas pueden clasificarse en dos subgrupos:

1.1.2.a.i Aguas grises. Es el agua de baños, duchas y lavabos, que está menos contaminada y se maneja fácilmente, y se puede reciclar y reutilizar fácilmente. [12]

1.1.2.a.ii Aguas negras. Son corrientes de agua que se descargan a través de las actividades humanas, que llevan consigo los desechos del inodoro, que pueden existir en un estado intermedio llamado disuelto, suspendido o coloide. Su caudal es menor, es más continuo y es más contaminante. [12]

1.1.2.b Agua residual urbana (ARU). Estas son aguas naturales contaminadas por diferentes sustancias y microorganismos proporcionados por los vertidos de los aglomerados urbanos, el sistema de saneamiento de la unidad utiliza tanto agua de lluvia como agua de drenaje, lo que es similar al funcionamiento de un inodoro, la composición de las aguas residuales urbanas varía significativamente en función de una variedad de factores, como el consumo de agua, el agua industrial que drena las redes urbanas y la contaminación orgánica compuesta principalmente por proteínas, polisacáridos y lípidos, esto significa que las aguas residuales urbanas son biodegradables, lo que significa que pueden ser refinadas mediante el tratamiento biológico; se producen en una gran proporción de zonas urbanas cuando contienen un determinado porcentaje de aguas residuales industriales y no muestran cambios significativos en las características de las aguas residuales, si esto no es el caso, las aguas residuales industriales se denominan aguas residuales mixtas, lo que es comparable con las aguas residuales industriales. [12]

1.1.2.c Agua residual industrial (ARI): Las fábricas utilizan agua para producir sus productos, y esto es necesario porque debe estar en muy buenas condiciones, es decir, debe ser un agua de alta calidad para ser utilizada en sus operaciones. Los parámetros y las concentraciones de las aguas residuales industriales varían en función de la visión y la dirección de la industria. Los vertidos industriales tienen un impacto que no sólo viene determinado por sus características generales, sino también por parámetros de medición como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO) y el contenido de oxígeno orgánico e inorgánico. Los metales pesados, las grasas y los colorantes son sólo algunas de las impurezas que pueden crear grandes dificultades durante el tratamiento de las aguas residuales. Una vez que se utiliza el agua industrial, sigue estando muy contaminada en consecuencia, los empresarios deben instalar plantas de tratamiento del agua en sus negocios para mitigar algunas de las contaminaciones mencionadas anteriormente. [13]

1.1.2.d Agua residual lluvia (ALL). El agua blanca o el agua de lluvia son aguas residuales o de inundaciones, tiene una entrada intermitente y con poca contaminación, su descarga urbana es de 50 a 200 veces mayor que la descarga residencial, comercial e industrial promedio, cuando la lluvia pasa por la atmósfera o lava la superficie y el suelo, las cargas de contaminación se incorporan al agua. [12]

### **1.1.3 Características de las aguas residuales**

Las aguas residuales y su impacto en el medio ambiente se describen en detalle a continuación, junto con los parámetros primarios y los aspectos más importantes a tener en cuenta.

#### 1.1.3.a Análisis físicos del agua

1.1.3.a.i Turbiedad. Cuando la luz es dispersada e interferida por una muestra de agua, la turbidez se manifiesta como cualidades o efectos ópticos, es una propiedad óptica de una suspensión que da lugar a la reemisión de la luz sin atravesar la suspensión, y se mide en micras. Además de la arcilla, los materiales orgánicos e inorgánicos rotos, las bacterias y otras materias en suspensión, la turbidez en el agua puede ser creada por una serie de otras materias en suspensión, que van desde la dispersión coloidal hasta las partículas gruesas, entre otras cosas. Cuando se trata de agua potable y de muchos otros sectores de procesamiento de alimentos y bebidas, es muy importante conocer la medición de la turbidez. Para evaluar el grado de tratamiento necesario, la tasa de filtración más adecuada, la eficacia de la coagulación, la sedimentación y la clarificación, así como para estimar la potabilidad del agua, es necesario calcular su valor de turbidez. [14]

1.1.3.a.ii Temperatura. La precisión de la temperatura es fundamental para diversos métodos de tratamiento y análisis. Para garantizar resultados precisos, se recomienda realizar lecturas de temperatura en el lugar de muestreo; como regla general, esto puede realizarse utilizando un termómetro de mercurio de alta calidad. El termómetro debe inmersarse en agua, preferiblemente mientras el agua se mueve, y las lecturas deben tomarse después de un período de tiempo suficiente para estabilizar el nivel de mercurio. [14]

1.1.3.a.iii Sólidos Totales. En el caso de un líquido, se define como sólido el material que queda tras la evaporación y el secado a 103°C, que comprende todos los componentes presentes en el líquido a excepción del agua. Los sólidos totales son un término que se refiere tanto a los sólidos solubles como a los insolubles en un medio (sólidos en suspensión). La muestra se evapora en un baño de agua sobre un plato previamente pesado, idealmente de platino o porcelana, y luego se seca a 103-105°C para su identificación antes de volver a pesarse. El porcentaje de aumento de peso en comparación con el peso inicial refleja el contenido total de sólidos o el residuo total. [14]

1.1.3.a.iv Grasas y aceites. En la categoría de compuestos escasamente solubles se incluyen las grasas y los aceites, cuando se separan del agua, producen capas brillantes en la superficie del agua que son visualmente poco atractivas; El aceite, la grasa y la cera son los lípidos de mayor importancia en las aguas residuales; las grasas contienen ésteres de ácidos grasos de cadena larga, que son compuestos con largas cadenas de hidrocarburos, a menudo con un grupo de ácido carboxílico en uno de sus extremos. [14]

#### 1.1.3.b Análisis químicos del agua

1.1.3.b.i Demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Medida del oxígeno consumido por los microorganismos durante los cinco días de estabilidad de la materia orgánica biodegradable en condiciones anaeróbicas y a una temperatura de 20°C, las pruebas de DBO son una de las más importantes para determinar la concentración de agua biológica y aguas residuales. En las aguas residuales domésticas, el valor de cinco días representa aproximadamente entre el 65 y el 70% de la oxidación total; en las aguas residuales industriales, el valor de cinco días representa aproximadamente entre el 65 y el 70% de la oxidación total. La DBO, como cualquier prueba biológica, requiere una especial atención durante la aplicación, así como una comprensión de las características esenciales, para obtener valores representativos que sean fiables. La temperatura se elige para determinar el valor de la placa de 20°C y debe mantenerse continuamente a lo largo del periodo de prueba; si la temperatura cambia, se afectará a la velocidad de respuesta del proceso de prueba; como resultado, los resultados no corresponderán al proceso estándar y, por tanto, serán incomparables. [15]

1.1.3.b.ii Demanda química de oxígeno (DQO). Es un elemento de análisis de contaminantes que mide la cantidad de materia orgánica presente en una muestra líquida por oxidación química; su determinación es una medida de la cantidad de materia orgánica presente en una muestra que podría ser oxidada por un agente químico oxidante fuerte; todos los compuestos orgánicos, salvo algunas excepciones, pueden ser oxidados a dióxido de carbono y agua por oxidantes fuertes en condiciones ácidas; La mayoría de los materiales orgánicos pueden ser oxidados hirviendo la muestra en un exceso de una combinación de ácido sulfúrico y dicromato de potasio durante varios minutos. [12]

1.1.3.b.iii pH. Cuando se evalúa la calidad del agua, el pH es un parámetro operativo vital a tener en cuenta [16]. Dependiendo de las características del agua residual a tratar, se requiere un ajuste de pH si es necesario [17]. El agua demasiado ácida disolverá los metales utilizados en las tuberías (plomo, cobre, zinc), para evitar la ingesta de sustancias perjudiciales para la salud, el rango de pH del agua potable debe ser de 6,5 a 8,5; En el caso del agua destinada al consumo humano, un valor muy elevado puede irritar las mucosas, irritar órganos internos e incluso provocar procesos ulcerativos. [16]

1.1.3.b.iv Metales pesados. De acuerdo con la tabla periódica, los metales pesados son elementos químicos con una alta densidad (más de 4 g / cm<sup>3</sup>), un peso atómico y una masa superior a 20, y son tóxicos en cantidades mínimas; El aluminio (Al), el berilio (Be), el cobre (Cu), el hierro (Fe), el manganeso (Mn), el cadmio (Cd), el mercurio (Hg) y el plomo (Pb) son sólo algunos de estos elementos. [18]

En el mundo actual, la grave contaminación por metales de las fuentes de agua en todo el mundo es uno de los problemas medioambientales más graves que existen, debido a la toxicidad de estos metales en las aguas de los ríos, que supone una grave amenaza para la salud de la población, considerando el aumento de las concentraciones de estos minerales en los cuerpos de agua como resultado de diversas actividades humanas, logró la posibilidad de efectos adversos en los diversos ecosistemas que sustentan la vida humana, lo que provoca graves problemas económicos a nivel local y nacional, aumentando los costes de la atención médica y disminuyendo la productividad de los residentes locales. [19]

#### **1.1.4 Contaminación en aguas residuales**

Se considera contaminación del agua el acto de introducir una sustancia o energía directa o indirectamente en un cuerpo de agua que interfiera con su funcionamiento normal y el uso posterior del ecosistema para fines específicos. [20]

1.1.4.a Causas de la contaminación en aguas residuales. La contaminación del suministro de agua puede ser natural o provocada por el hombre. Últimamente la contaminación humana se ha vuelto más importante debido a los avances en el desarrollo industrial y la expansión agrícola. Estas actividades incluyen un mayor consumo de recursos y la consecuente producción excesiva de residuos, que cambia las características de los recursos hídricos y del ecosistema en su conjunto. [21]

Los estudios confirman que el consumo de agua se ha incrementado en un 300% en los últimos 60 años y que solo un pequeño porcentaje es tratado y reutilizado, esto evita que el agua vuelva a la normalidad y siga todo su ciclo de vida. La población y las industrias están involucradas en este problema, industrias que existen por la gran necesidad y la población porque son consumidores y usuarios de los productos producidos, es decir, a la larga, el agua se convierte en un recurso natural no renovable [22]

La contaminación proviene de fuentes constantes y difusas. Los materiales de fuentes difusas se caracterizan por múltiples descargas recibidas por organismos vivos y el acceso al agua es por derrames y fugas. Si bien las fuentes estacionarias se caracterizan por descargas de aguas residuales que ocurren en lugares específicos, esto está directamente relacionado con las aguas residuales industriales (ARI). [21]

1.1.4.b Principales contaminantes en aguas residuales. Las aguas residuales urbanas que se descargan de las zonas residenciales y las obras públicas y las aguas residuales urbanas se recogen en el sistema de alcantarillado. Los principales contaminantes son fósforo, nitrógeno, compuestos orgánicos, materia orgánica y coliforme fecal. [23]

1.1.4.b.i Pesticidas y plaguicidas. Los plaguicidas son sustancias que se utilizan para prevenir, eliminar, repeler o calmar las plagas en su entorno natural [21]. El interés por estos productos se ha trasladado en los últimos años a los metabolitos y a los

productos de degradación hasta ahora, estos productos se han ignorado en gran medida los metabolitos de los pesticidas suelen detectarse en unas mayores concentraciones en las aguas subterráneas que en otros compuestos. [24]

El herbicida más utilizado en el mundo es el glifosato, y su uso en la agricultura ha aumentado drásticamente con el desarrollo de cultivos resistentes al glifosato. [25]

1.1.4.b.ii Productos farmacéuticos. Los productos químicos farmacéuticos son un problema en el agua potable, y las vías más comunes de entrada de medicamentos en el medio ambiente son la orina humana, el vertido de artículos innecesarios y el uso de medicamentos en la agricultura; Se han descubierto varios productos farmacéuticos utilizados en el tratamiento de aguas residuales en las aguas superficiales y subterráneas; estos residuos farmacéuticos entran en el ciclo del agua de diversas maneras, entre ellas: Dado que muchos de estos compuestos no se eliminan adecuadamente a lo largo del proceso de tratamiento, las instalaciones de tratamiento de aguas residuales pueden funcionar como una fuente de estas sustancias químicas en la masa de agua a la que sirven; además que se descargan directamente en el ecosistema una cantidad importante de medicina veterinaria. [25]

1.1.4.b.iii Compuestos “Estilo de vida”. Se ha encontrado cafeína y nicotina en grandes cantidades en las aguas subterráneas contaminadas por las aguas residuales. Las aguas subterráneas contaminadas por estanques impermeables incluían altas cantidades de los edulcorantes artificiales sacarina, ciclamato y sucralosa, según el estudio. [25]

1.1.4.b.iv Aditivos industriales y subproductos. Los compuestos industriales pueden liberarse en el medio ambiente de diversas maneras, lo que supone una serie de riesgos para la salud. Estos compuestos incluyen los disolventes clorados, los hidrocarburos de la gasolina, incluidos los hidrocarburos de múltiples fragancias, el éter de butileno y los combustibles de éter flexible de oxígeno, entre otros. La gran mayoría de estos compuestos industriales están clasificados como contaminantes prioritarios, mientras que algunos productos degradados están clasificados como contaminantes emergentes, según la Agencia de Protección del Medio Ambiente. [25]

1.1.4.b.v Aditivos alimentarios. Se ha informado de la presencia de azúcares como el aspartamo, la sacarina y la sucralosa, así como de otros conservantes, como los parabenos, en las aguas subterráneas; Se reconoce que esta clase de sustancias químicas no ha sido bien investigada en las aguas subterráneas, pero que es de interés y debería incluirse en futuras investigaciones. [25]. Por ejemplo, se emplean ampliamente en el negocio del envasado de alimentos, así como en el tratamiento de suelos y como antioxidantes alimentarios, también se utilizan habitualmente como aditivos plásticos para mejorar la flexibilidad de artículos como bolsas de transfusión de sangre, guantes y calcetines, entre otros. [26]

1.1.4.b.vi Productos para tratamientos de aguas. La desinfección química en el tratamiento del agua potable da lugar a la creación de desinfectantes no deseados, que son perjudiciales para la salud humana, ya que son venenosos, la desinfección de los productos tras su procesamiento es importante porque reduce el riesgo de infecciones patógenas, sin embargo, puede suponer una amenaza para la salud humana debido a los residuos de desinfectante y los subproductos que se forman cuando el desinfectante interactúa con la materia orgánica, así como el bromuro y el yoduro que permanecen en el agua después de que el producto haya sido desinfectado. Además, muchos proveedores han aplicado diversos métodos para garantizar la desinfección final, como la introducción de desinfectantes de uso común (cloro, ozono, dióxido de cloro y cloramina) en las plantas de tratamiento, donde cada grupo puede reaccionar con la materia orgánica disuelta para producir subproductos. Se han encontrado más de 250 subproductos, aunque sólo se ha estudiado en detalle el comportamiento de 20 de ellos. [25]

## **1.2 Nitratos**

Son compuestos solubles que se componen de átomos de nitrógeno y oxígeno combinados, debido a que la facilidad con la que el nitrato ( $\text{NO}_2$ ) se convierte en nitratos ( $\text{NO}_3$ ) en el medio ambiente, el nitrato ( $\text{NO}_2$ ) sólo se encuentra raramente en las fuentes de agua subterránea; Los nitratos son necesarios para el crecimiento de las plantas como resultado, su principal aplicación es como fertilizante, y se produce en grandes cantidades a escala industrial. [27]



### **1.2.1 Fuentes antropogénicas de los nitratos**

En las personas y en los animales se puede descubrir una amplia variedad de nitratos, que a menudo se utilizan en las industrias agrícola y alimentaria como potenciadores de los alimentos, inhibidores del crecimiento microbiano y como contaminantes indeseables. [28]

Por lo tanto, podemos clasificar las fuentes naturales de contaminación por compuestos de nitrógeno en dos tipos: contaminación puntual y contaminación difusa. La contaminación puntual es el tipo de contaminación más grave, las actividades de origen industrial, animal o urbano (desecho industrial, tratamiento de las aguas residuales municipales, limpieza de los vertederos), se consideran la fuente principal de contaminación difusa las actividades agrícolas. [29]

Las aguas residuales industriales o municipales, las fosas sépticas o los residuos de los establos, los excrementos de los animales (incluidas las aves de corral y los peces) y las emisiones de los automóviles son las vías más habituales de entrada de nitrógeno en las masas acuáticas. [30]

El aumento de los niveles de nitrato puede atribuirse a diversas actividades agrícolas, como la aplicación por parte de los agricultores de una cantidad considerable de fertilizantes nitrogenados en sus campos para mantener el crecimiento de los cultivos y aumentar el rendimiento, entre otras. Aproximadamente el 80% del fertilizante no es absorbido por las plantas y acaba en el suelo. [28]

### **1.2.2 Contaminación con nitratos en el agua**

Las concentraciones de nitrato presentes de forma natural en el agua suelen ser de unos pocos miligramos por litro, sin embargo, en el agua subterránea se ha observado repetidamente que se elevan a varios cientos de miligramos por litro, debido al aumento de la actividad agrícola. [28]

Hay dos fuentes principales de nitrógeno en el agua:

1.2.2.a Nitrógeno orgánico. Está provocado por la contaminación orgánica, la mayor parte de la cual es de origen residual, y es perjudicial. En función del tiempo y de la

capacidad de oxidación del medio, este nitrógeno se transforma en nitrógeno amoniacal, nitroso y nítrico, entre otros. Aunque los nitratos pueden dejar de desarrollarse en aguas extremadamente contaminadas, los nitratos pueden aumentar de forma inversa en condiciones anaeróbicas: se producen nitratos, nitritos, amoníaco y nitrógeno gaseoso. [28]

1.2.2.b Nitrógeno inorgánico. La contaminación se debe sobre todo a las actividades agrícolas que provocan la lixiviación de los suelos ricos en nitratos en el suministro de agua. La contaminación por nitrógeno suele ser un problema crónico difícil de eliminar. [28]

Las aguas superficiales contienen nitrógeno como elemento de compuestos orgánicos e inorgánicos; el consumo de compuestos nitrogenados como fertilizantes en las actividades agrícolas es elevado [31]; el uso excesivo de fertilizantes inorgánicos (fósforo y nitrógeno) es una práctica común, debido al desconocimiento de los niveles de nutrientes en el suelo y al deseo de obtener una mejor cosecha y debido a que la tasa de adición de estas sustancias es mayor que la tasa de descomposición, la contaminación del suelo es preocupante. [28]

El uso excesivo de fertilizantes a base de nitrógeno ha suscitado un debate a varios niveles en Mosquera y sus alrededores, donde una aplicación inadecuada puede tener un efecto económico considerable, al tiempo que contribuye indirectamente a los problemas de salud pública relacionados con el consumo de agua.

### **1.2.3 Nitratos en la salud**

Los niveles de nitrato en el agua potable que superan un nivel específico pueden ser perjudiciales para la salud humana. [26], Por lo tanto, el contenido de este trabajo de grado se centra en este contaminante.

El agua embotellada para el consumo se distribuye en algunos países donde los suministros de agua están contaminados con nitratos y nitritos, principalmente a los niños y, en algunos casos, al público en general. [32]

El consumo de agua contaminada con nitratos y nitritos suele ser peligroso para el ser humano porque, como resultado de la acción de estos compuestos sobre el microbiota

intestinal, se pueden generar nitrosaminas, que pueden provocar cáncer por sus efectos cancerígenos en el organismo; En general, los efectos que los nitratos y los nitritos pueden tener en el ser humano están mejor definidos en los bebés y, especialmente, en los lactantes, mientras que la magnitud de los efectos sigue siendo la misma en los adultos, pero esto no se ha demostrado, además, los efectos de los nitratos y nitritos en los seres humanos no se han demostrado en los adultos, la prueba de ello se encuentra en el hecho de que las normas de consumo de estos productos varían de un país a otro[32]

Para los interesados en la absorción de los nitratos y las posibles consecuencias para el ser humano, un aumento de la concentración de estos iones en el agua da lugar al desarrollo de metahemoglobinemia, que es una enfermedad que afecta predominantemente a los bebés menores de seis meses y se caracteriza por una reducción de la capacidad de los glóbulos rojos para transportar oxígeno [33]; El resultado directo de esto que se suministra menos oxígeno a los órganos y tejidos del cuerpo, lo que provoca daños en los tejidos e incluso la muerte en algunos casos. [34]

#### 1.2.3.a Mecanismos de acción en el organismo

1.2.3.a.i Metahemoglobina. Se ha demostrado que el agua contaminada con nitratos que se utiliza para fabricar los envases de los biberones puede inducir cianosis en los bebés como resultado de la producción de metahemoglobina en la sangre del niño, aunque esta intoxicación es inducida por la absorción de nitratos, el hecho de que los nitritos se creen mediante la reducción de los nitratos bajo la acción de las bacterias es realmente la causa de la intoxicación. Tras ser absorbido, el nitrito entra en el torrente sanguíneo y se mezcla con la hemoglobina, responsable del transporte de oxígeno, para crear metahemoglobina, que tiene una barrera reducida para el transporte de oxígeno. La consecuencia es que la capacidad de la sangre para absorber oxígeno disminuye constantemente, lo que acaba provocando una hipoxia interna. Esta intoxicación no se produce en los niños mayores o en los adultos porque hay una mayor acidez en el estómago, lo que impide la proliferación bacteriana en las regiones superiores del intestino y, como resultado, la conversión de nitrato en nitrito no se produce en estos individuos. [28]

Debido a la baja acidez de los estómagos de los neonatos, algunos microbios que poseen enzimas capaces de convertir los nitratos en nitritos podrían desarrollarse y causar daños esto es especialmente cierto en el caso de los bebés prematuros. El efecto de los nitritos sobre la hemoglobina y los glóbulos rojos del feto puede dar lugar a la formación de metahemoglobina. [28]

El color azul de la piel, así como la sangre marrón, son las manifestaciones clínicas de esta enfermedad. Cuando el contenido de nitratos en el agua potable es inferior a 10 mg/L, las verduras son la fuente más común de nitratos, independientemente de la edad del consumidor. Cuando la concentración es superior a 50 mg/L, el agua será la principal causa de contaminación. [28]

### **1.3 Contaminación con nitratos en el río Subachoque**

La red hidrológica del municipio de Subachoque se refiere a la subcuenca del río Subachoque, que cubre un área de 40.086 hectáreas, y forma parte de la red hídrica del río Bogotá, que se encuentra inundado por más de 30 fuentes de agua, sin contar entre ellas, que otras han desaparecido en los últimos años. [35]

#### **1.3.1 Localización**

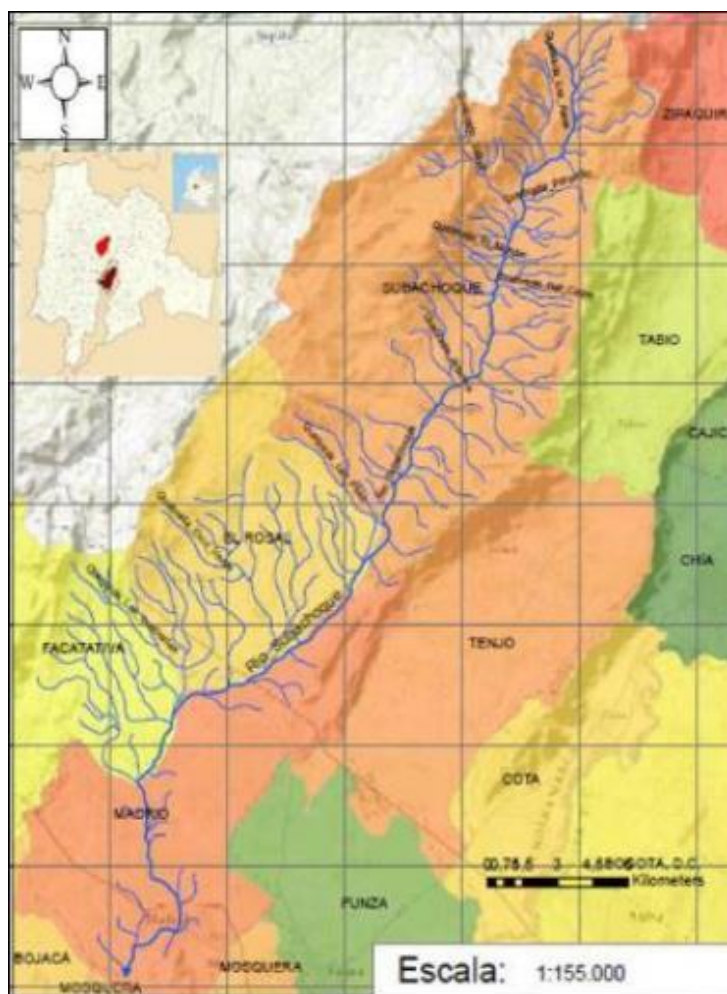
El municipio de Subachoque se encuentra a una latitud N 4°56'0" y una longitud W 74°11'0", y sus límites son los siguientes: al norte, el municipio de Zipaquirá; al sur, los municipios de Rosal y Madrid; al este, los municipios de Tabio y Tenjo; y finalmente, al oeste, los municipios de San Francisco, Pacho y Supatá. A unos 35 kilómetros al noroeste de Bogotá se encuentra la cuenca del río Subachoque, situada en el departamento de Cundinamarca. [36]

En el límite con Zipaquirá, en el páramo de Guerrero, el río Subachoque es una importante fuente de abastecimiento para las empresas de agua y alcantarillado de la cuenca alta del río Bogotá, en el departamento de Cundinamarca, y particularmente de Subachoque, que es donde nace el río, Guamal; más del diez por ciento de la población de la ciudad vive en La Pradera, que se abastece principalmente de agua del río para fines residenciales; Tobal y Rincón Santo, que se abastecen principalmente de agua del río para fines agrícolas; y La Cuesta, la última vía urbana del río, que se utiliza

principalmente para la extracción de grava y limita con el municipio de Madrid Cundinamarca como se evidencia en la figura 1 a continuación. [37]

### Figura 1.

#### *Hidrografía del Río Subachoque*



**Nota.** La figura referencia la ubicación y las diferentes cuencas que alimenta el río Subachoque. Tomado de: IDEAM, Estudio hidrológico : Río Subachoque. [En línea].

Disponible: [http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opacdetail.pl?biblionumber=6824&query\\_desc=su%3A%22RIO%20SUBACHOQUE%20%5BCUNDINAMARCA%2C%20COLOMBIA%5D%22](http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opacdetail.pl?biblionumber=6824&query_desc=su%3A%22RIO%20SUBACHOQUE%20%5BCUNDINAMARCA%2C%20COLOMBIA%5D%22) [Acceso: Sep.11,2021].

### 1.3.2 Vertientes que alimenta el río Subachoque

Situado en la cuenca alta del río Bogotá, Subachoque es un popular destino turístico. Además, hay varios cuerpos de agua en el municipio: las Cascadas del Guamal, que se encuentran cerca del Centro de Inspección del Guamal; la Laguna del Verjón o del Salitre, que se encuentra cerca del Guamal; la Laguna Negra, que se encuentra cerca de Tibagotá; y el Pantano de Arce, que sirve de depósito de agua para el sistema de canales de la ciudad. Además de los arroyos, ríos y lagos, el sistema natural de aguas superficiales urbanas proporciona agua para el sistema de canales de la ciudad, así como para el riego de los cultivos. [38]

**Tabla 1.**

*Quebradas que abastecen al Río Subachoque.*

La Mina	El Tobal	El Charco
Abra	Buenos Aires	La Cabaña
Negra	Pozo Azul	Casa Blanca
El Higuerón	El Piloteo	La Chorrera
La Piñula	El Salitre	Carizal
El Aliso	El Mapa	El Molino
Cañizal	Paramillo	Santa Barbara
La Angostura	Quesero	Los Cerezos
El Alivo	Quebraditas	El Hato
El Aliso	Lomalta	El Cajón
Pino Alto	Charri	La Hierbabuena
El Cedro	Nemice	Tibagota
El Choque		

**Nota.** Diferentes quebradas que abastecen el río Subachoque. Tomado de: Alcaldía Municipal de Subachoque, [En línea]. <http://www.subachoque-cundinamarca.gov.co/> [Acceso: Sep.11,2021].

### **1.3.3 Fuentes de contaminación del río Subachoque**

El aumento de los vertidos sin control ni tratamiento, el incremento de los residuos sólidos y otras prácticas que han ido en detrimento de la calidad y disponibilidad de los recursos hídricos del río Subachoque, entre otras cosas, han provocado que los recursos hídricos del río disminuyan considerablemente su disponibilidad y su calidad. [39]

Las principales fuentes de contaminación son las actividades Humanas, como la siembra de cultivos agrícolas que atribuyen contaminantes orgánicos e inorgánicos, y los procesos naturales como la transformación del material de vegetales que caen en el río. [40]

En los municipios aledaños al río Subachoque, el suelo ha sido afectado por las actividades agrícolas, incluidas extensiones de pastos dedicadas al cuidado de animales vacunados y vacas, aún más grave, este problema está teniendo un impacto negativo en los cuerpos de agua de la zona circundante, como es el caso del río Subachoque, que ha sido afectado por estas actividades desde su inicio. [40]

Se están utilizando diversos agroquímicos para combatir las plagas y aumentar la producción agrícola, y como consecuencia de ello se están generando residuos que pueden entrar en el río a través de procesos naturales de filtración y llenado, alterando las características naturales del río y, en consecuencia, afectando al medio ambiente. El vertido de aguas residuales domésticas por parte de la población y los residuos orgánicos por parte de los animales también contaminan el río, afectando no sólo al ecosistema, sino también a la salud de la población. [40]

### **1.4 Estándares de calidad**

Con el fin de identificar los componentes que influyen en la estructura, composición y dinámica de los ríos existen varios factores que inciden, debido a la gran diversidad es necesario utilizar una variedad de métodos para diagnosticar el estado actual de las aguas, estos estudios involucran parámetros físicos y químicos; como las variables DBO, DQO, pH, fosfatos, entre otros. La realización de estudios utilizando parámetros físicos, químicos y biológicos permite extraer conclusiones firmes sobre la calidad de los cuerpos de agua. [41]

La tabla 2 proporciona datos sobre los límites aceptables para los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de la calidad del agua en Colombia.

**Tabla 2.**

*Estándares de calidad según el decreto 1575 de 2011.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor máximo permisible</b>
pH	6,5 – 9
Temperatura	<35°C
Conductividad	1000 um/cm
DQO	75 mg/L
DBO	5 mg/L
Nitratos	10 mg/L
O <sub>2</sub> disuelto	>4 mg/L
Solidos disueltos Totales	>100 mg/L
Fosfatos	0,5 mg/L

**Nota.** La tabla muestra los parámetros reportados en la normativa colombiana y otras fuentes. Tomado de: Universidad Libre “Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros fisicoquímicos y biológicos”, [En línea]. <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/ambiental/article/view/4593/3916> [Acceso: Ene.25,2022].

Actualmente, la normativa vigente en Colombia en materia de calidad del agua en zonas donde se desarrollan las actividades que implican el uso de la misma, los datos descritos en la tabla 2 están reguladas por el decreto 1575 de 2011. [41]

La normativa sobre contenidos de nitrógeno para aguas de uso agrícola tiene grandes vacíos dentro de la normatividad nacional, por lo tanto, se hace necesario la búsqueda de información internacional, tal que así, se encuentra el decreto real 817 de 2015 de España, el cual contiene una normatividad más profunda sobre la carga máxima permitida de contaminantes como el nitrógeno y sus derivados. Dichos parámetros los



podemos encontrar especificados en la tabla 3.

**Tabla 3.**

*Parámetros especificados en el Decreto real 817 de 2015.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor máximo permisible</b>
Nitratos	25 mg NO <sub>3</sub> /L
pH	6,5- 8,7
Amonio	0,6 mg NH <sub>4</sub> /L
Fosfatos	0,4 mg PO <sub>4</sub> /L

**Nota.** La tabla muestra normatividad para el control de contaminantes en aguas superficiales en España. Tomado de: Agencia estatal boletín oficial del estado “Criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental”. [En línea] <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2015-9806> [Acceso: Ene.25,2022].

## **1.5 Procesos de tratamientos disponibles**

La eliminación del exceso de nitrato del agua potable es una necesidad básica para proporcionar agua potable a la población. Se han utilizado métodos químicos y biológicos para reducir las concentraciones de nitratos en el agua potable con diversos grados de eficacia. Los nitratos se eliminan del agua mediante una variedad de técnicas, como el intercambio iónico selectivo, la osmosis inversa, la electrolisis, la reducción química con hierro granular y la desnitrificación biológica [42]. Sin embargo, sólo se mencionarán los procesos químicos más eficaces y los métodos más eficaces para eliminar los nitratos excesivos.

### **1.5.1 Intercambio iónico**

Esta tecnología, conocida como intercambio de iones, es una tecnología basada en la manifestación que tiene lugar cuando los intercambiadores (sólidos iónicos) se extienden a mezclas líquidas que contienen iones en la solución (electrolito) [43]. Las reacciones

químicas reversibles tienen lugar cuando un ion de una solución se une a otro ion del mismo signo que está unido a una partícula sólida inmóvil, lo que da lugar a una reacción química. Los intercambiadores son sólidos insolubles que tienen intercambiadores de cationes o aniones tanto en la superficie exterior como en la interior. [44]

Es posible eliminar los iones de nitrato del agua contaminada utilizando una columna de intercambio iónico a base de cloruro o bicarbonato; sin embargo, a medida que el proceso avanza y los grupos se unen a los iones de nitrato, la columna se satura, lo que obliga a utilizar una gran cantidad de cloruro de sodio, lo que aumenta el coste del proceso. [45]

Una solución de residuos que contenga nitratos debe ser eliminada del agua una vez que se haya limpiado; sin embargo, esta eliminación implica costes considerables y está sujeta a estrictos requisitos normativos. [46]

### **1.5.2 Osmosis inversa**

La ósmosis inversa es un procedimiento que utiliza una membrana semipermeable para lograr sus resultados. Bajo presión, el agua es empujada a través de una membrana semipermeable, permitiendo que las moléculas de agua fluyan a través de ella, pero manteniendo la mayor parte del material disuelto en el proceso, se puede utilizar para eliminar simultáneamente varios contaminantes (iones, partículas, componentes orgánicos). [47]

El uso de un sistema de alta presión puede lograr un 85% de eficiencia del agua, pero requiere un alto consumo de energía. La ósmosis inversa es una de las formas más caras de suministro de agua centralizado. Solo es rentable cuando la demanda de agua es muy baja o cuando es necesario eliminar muchos contaminantes. La ósmosis inversa requiere una revisión cuidadosa de las propiedades del agua cruda y un tratamiento previo para evitar el deterioro de la membrana. El pretratamiento implica la eliminación de sólidos de una suspensión acuosa. Esto generalmente implica pasar el agua a través de una serie de filtros antes de la ósmosis inversa. [47]

Después de la ósmosis inversa, todos los iones se eliminan del agua, el pH del agua tratada fluctuará si no se controla. Cualquier planta de tratamiento que utilice este sistema debe ajustar el pH y la alcalinidad después del tratamiento para estabilizar el

agua. [48]

Los sistemas de ósmosis inversa suelen estar muy automatizados y se pueden utilizar en casi cualquier lugar, independientemente de la formación del operador. La frecuencia de reemplazo y limpieza de la membrana está determinada por las propiedades de la materia prima, el agua. La limpieza periódica de las membranas utilizadas en ósmosis inversa es fundamental. Los materiales utilizados para la limpieza de la membrana tienen la función de eliminar las impurezas que quedan en la membrana. Después de la limpieza, se utiliza agua tratada para limpiar y reutilizar. [47]

Con el tiempo, el deterioro de la membrana conducirá a una reducción de la eficiencia y a la necesidad de una nueva membrana. La vida útil de la membrana oscila entre los 5 y los 20 años. [49]

Como resultado de este proceso, se debe eliminar una gran cantidad de concentrado (15-50% del volumen de agua). Debido al alto contenido de solutos, especialmente sal, deben tratarse antes de ser vertidos al sistema de alcantarillado. La gestión de residuos de la ósmosis inversa depende de los materiales disueltos en el concentrado. Las propiedades del agua cruda afectan la calidad del concentrado y por lo tanto afectan severamente el costo de eliminación ambientalmente segura. [47]

Las principales variables que afectan la efectividad de esta técnica son el tipo de membrana y la presencia de calcio o iones en la solución, que al encontrarse durante el procesamiento pueden precipitar en la superficie de la membrana provocando obstrucciones y reduciendo su capacidad. Por otro lado, el uso combinado de nanofiltración y ósmosis inversa mejora en gran medida la eficacia de esta técnica, ya que la eliminación de iones divalentes en el agua pasa a la etapa de ósmosis inversa, eliminando así la contaminación de la membrana. [50]

La ventaja principal de utilizar la ósmosis inversa es que puede producir agua de alta calidad independientemente de la calidad del agua cruda. Otros beneficios incluyen la eliminación de múltiples contaminantes, procesos altamente automatizados, funciones fáciles de usar y la idoneidad del sistema para sitios muy pequeños. Entre las principales desventajas de la ósmosis inversa están el alto costo de energía (se debe bombear agua

para arrancar la membrana a alta presión), y otras desventajas importantes que el agua necesita ser tratada antes y después del tratamiento, además de la posibilidad de generar grandes cantidades de residuos. Al procesar, puede haber cambios en el pH del agua y también puede ser necesario ajustar el pH. [47]

### **1.5.3 Electrocoagulación**

La reducción electroquímica es una tecnología de tratamiento de agua prometedora para la gestión de nitratos en el agua potable [51]. Entre las muchas tecnologías de desnitrificación, la electrocoagulación se caracteriza por su simplicidad, facilidad de automatización, alta eficiencia y ahorro de costes. Se ha aplicado eficazmente a varios procesos de tratamiento de agua. [52]

La electrocoagulación es un método electroquímico que usa una corriente eléctrica para eliminar de la solución metales. Los sistemas de electrocoagulación también son eficaces para eliminar sólidos en suspensión, minerales disueltos, taninos y pigmentos. Las cargas eléctricas de las aguas residuales ayudan a mantener los contaminantes suspendidos en la solución. [53]

Los iones y otros portadores de carga son neutralizados por iones de carga opuesta que son proporcionados por electrocoagulación, desestabilización y precipitación en forma estable. [53]

En 2005 se estudió un tratamiento de electrocoagulación de aguas artificiales contaminadas con nitratos y se demostró que tenía una eficacia de eliminación de aproximadamente el 90%, sin embargo, en 2014, se investigó la eliminación de nitratos por coagulación de electrodos de ánodos de hierro y aluminio en tres configuraciones (Al-Al, Fe-Fe y Al-Fe). La remoción de nitrato tuvo los rendimientos más altos (81.5%) y más bajos (62.8%) en la formación de Al-Fe y Al-Al después de 40 min, respectivamente. En otro estudio, en 2016, utilizaron un dispositivo de electrocoagulación continua con electrodos monopolares para eliminar los nitratos y lograron una tasa de reducción del 96%. En 2020, también se investigó la eliminación de nitrato del agua por electrocoagulación utilizando una celda con un ánodo de tubo de enrollamiento direccional horizontal. [54]

La generación continua in situ de coagulante en el agua contaminada es la base del procedimiento. Se ha demostrado que la coagulación elimina una amplia gama de contaminantes del agua, como minerales, arsénico, estroncio, cesio, fosfatos, sulfuros, sulfatos, sulfatos, boro, fluoruro, nitratos, cloro, cadmio, zinc, níquel, mercurio, cobalto, minerales de arcilla y petróleo, demanda química de oxígeno, color y materia orgánica. [53]

La electrocoagulación implica la introducción de corriente en una batería que contiene un ánodo de sacrificio y un cátodo adicional, la corriente provoca la coagulación local en el ánodo. Las especies forman complejos con contaminantes y luego precipitan. a construcción más básica de un reactor de electrocoagulación es una celda con un ánodo y un cátodo, que también se conoce como celda electrolítica, los ánodos aportan iones metálicos al sistema, mientras que los cátodos liberan hidrógeno al medio ambiente, los materiales de los electrodos más frecuentes son el hierro y el aluminio. [54]. Además de desestabilizar las emulsiones del agua contaminada con aceites, grasas e hidrocarburos, el método puede eliminar el color de las aguas residuales municipales, así como producir agua potable extrayéndola de las aguas subterráneas y superficiales. [50]

La electrocoagulación es un método de tratamiento rentable que es sencillo de aplicar, requiere poco equipo y puede escalarse para adaptarse a las necesidades de cualquier planta de tratamiento de aguas residuales de cualquier tamaño. Dado que no se requiere adición de químicos en este proceso, reduce la posibilidad de generación de contaminantes secundarios. Requiere poca corriente y, por lo tanto, puede utilizarse en procesos ecológicos como la energía solar, turbinas eólicas y pilas de combustible. Esta es una tecnología respetuosa con el medio ambiente, ya que los electrones son los reactivos principales y no se requieren reactivos / productos químicos adicionales, por lo tanto, la producción de lodo se reducirá significativamente y, a largo plazo, se eliminarán ciertos productos químicos perjudiciales que se utilizan actualmente como cofactores en los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Este proceso puede desestabilizar eficazmente pequeñas partículas coloidales y producir menos lodos que otros procesos. [53]

El método electroquímico es simple, rápido, económico, fácil de usar y respetuoso con el medio ambiente. Además, el agua pura es potable, clara, incolora e inodoro, con poco o ningún residuo. No hay posibilidad de contaminación secundaria del agua en estas técnicas. [53]

La electroquímica es un importante campo de estudio que abarca una gran variedad de fenómenos. Como resultado de estos eventos, se deben considerar muchos elementos de fundamentos electroquímicos que caracterizan el comportamiento de una celda electroquímica y las reacciones involucradas. Así, se describirán varias características de la investigación que permiten describir el proceso de electrocoagulación como la ley de Faraday y energía libre de Gibbs. [50]

1.5.3.a Ley de Faraday. Las celdas electrolíticas se clasifican como celdas galvánicas inversas, lo que implica que la corriente fluye en el sentido contrario al de una celda galvánica normal, este tipo de celda absorbe energía y las reacciones tienen lugar en la dirección opuesta al flujo de energía. Cuando se trata de la electrocoagulación, las leyes de Faraday sobre la electrólisis guían el proceso, estas leyes de la electrólisis definen la formación de reacciones electroquímicas que se producen con la ayuda de una fuente de energía externa. Este proceso representa un evento electroquímico en el que los procesos electroquímicos son forzados al poner una corriente continua a través del electrolito. [50]

Según las leyes de Faraday, la primera ley establece que la masa de un material creada en un electrodo es exactamente proporcional a la cantidad de corriente eléctrica que pasa por el electrolito y la segunda ley demuestra que la masa de un material disuelto o depositado durante el paso de una cantidad de electricidad es proporcional a la masa electroquímica equivalente de la sustancia. [50]

1.5.3.b Energía libre de Gibbs. Según la termodinámica, las celdas voltaicas presentan procesos espontáneos de oxidación-reducción, sin embargo, como se ha dicho anteriormente, las reacciones de oxidación-reducción en una celda electrolítica se producen de forma no espontánea. Debido a la variación de la energía libre de Gibbs, la termoquímica predice si una reacción será o no espontánea. Esta predicción va acompañada de los siguientes criterios: cuando la energía libre de Gibbs de una

reacción es menor a 0 el criterio de espontaneidad es espontaneo, si es igual a 0 el sistema se encuentra en equilibrio y si es mayor a 0 es no espontaneo. [50]

#### **1.5.4 Procesos biológicos disponibles**

1.5.4.a Fitorremediación. La fitorremediación se caracteriza por ser un método de limpieza estética y pasiva que utiliza el poder de las plantas y la energía solar para tratar una variedad de contaminantes ambientales [55]. Este método implica el uso de plantas para limpiar ambientes contaminados, debido a la capacidad de ciertas especies de plantas para absorber, acumular o tolerar altas concentraciones de contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos y radiactividad. [56]

En esta tecnología, las plantas actúan como trampas o filtros biológicos que ayudan a descomponer los contaminantes y fijar los minerales en el suelo y el agua inmovilizándolos en sus raíces y tallos, o transformándolos en microorganismos para finalmente convertirlos en compuestos menos tóxicos y más estables, como el dióxido de carbono, el agua y las sales minerales. [55]

Entre las ventajas de la fitorremediación se encuentra que es adecuado para desinfectar grandes superficies, así como el bajo costo de implementación y la eficacia ya que algunos procesos de descomposición ocurren más rápido en plantas. En las desventajas se encuentra que el tiempo de procesamiento puede ser muy largo además de que la biodisponibilidad de compuestos o minerales es un factor limitante para la absorción. [56]

Varios procesos dependen de las partes de la planta involucradas o de los microorganismos que contribuyen a la degradación del contaminante, en la figura 2 se describen estos procesos.

**Figura 2.**

*Procesos de fitorremediación.*

<b>Tipo</b>	<b>Proceso involucrado</b>	<b>Contaminación tratada</b>
Fitoextracción	Las plantas se utilizan para concentrar los contaminantes en las partes aprovechables (principalmente la parte aérea).	Varios cuerpos de agua contaminados con cadmio y cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, selenio, plomo y zinc
Rizofiltración	Las raíces de la planta se utilizan para la sedimentación y concentración de contaminantes	Agua contaminada con cadmio, cobalto y cromo, níquel, mercurio, plomo, selenio, plomo, zinc e isótopos.
Fitoestabilización	Las plantas de tolerancia se utilizan para reducir su movimiento y evitar el paso a través de las capas de la tierra o hacia el aire.	Desechos del lago de las minas con fenoles y compuestos cloro.
Fitoestimulación	Las secreciones de las raíces se utilizan para promover el crecimiento de los descomponedores (bacterias y hongos).	Aguas residuales, hidrocarburos de petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, etc.,
Fitovolatilización	Las plantas capturan y modifican los contaminantes o compuestos orgánicos y su liberación a la atmósfera. con sudor	Aguas residuales agrícolas y agua que contiene mercurio, Selenio y disolventes clorados (tetraclorometano y triclorometano)
Fitodegradación	Capturar y conservar plantas acuáticas y terrestres y la descomposición de compuestos orgánicos en subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Aguas residuales agrícolas, municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenzono, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

**Nota.** La tabla presenta los procesos involucrados y los contaminantes que se pueden tratar. Tomado de: Servicio Nacional de Aprendizaje “Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales”, [En línea]. <https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/3250/fitorremediacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Acceso: Ene.26,2022].

1.5.4.b Microalgas. Las microalgas se consideran una alternativa al tratamiento de aguas residuales debido a su capacidad para remover nutrientes y al alto valor comercial de la biomasa generada, estos microorganismos son capaces de eliminar significativamente nitratos, fosfatos y materia orgánica. [57]



Todo el proceso en este punto que se enfoca en eliminar amonio, nitrato y fosfato suele ser 4 veces más costoso que el tratamiento inicial, pero el cultivo de microalgas es una solución elegante debido al uso de nitrógeno y fósforo, el crecimiento y la capacidad de eliminar metales pesados, así como algunos compuestos orgánicos tóxicos, no causan contaminación secundaria. Otros beneficios incluyen la producción de oxígeno y el efecto de limpieza debido al aumento del pH durante la fotosíntesis. [58]

Especies como *Scenedesmus quadricauda*, *Chlorella miniata*, *Chlorella vulgaris* y *Chlorella sorokiniana* se distinguen por su capacidad para eliminar con eficacia los metales pesados de las aguas residuales, así como por su capacidad para prosperar en ambientes contaminados. *C. vulgaris* y *S. dimorphus* son altamente efectivos con un porcentaje de remoción mayor al 95% en el tratamiento biológico de amoníaco y fósforo presente en aguas residuales, similar a *Tetraselmis sp*, *Chlamydomonas sp* y *Nannochloris sp* que son resistentes a altas concentraciones de dióxido de carbono. [59] Finalmente concluyendo el método de remoción por microalgas ha venido surgiendo para diferentes áreas de producción, las microalgas comienzan a aparecer relacionados con la agricultura, los biocombustibles y la investigación de la contaminación de fuentes hídricas, en términos de productividad pesquera, entre otros. [59]

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Análisis bibliográfico de los métodos de remoción

Para tener una referencia clara sobre los procesos y las tecnologías utilizadas para la eliminación de los nitratos presentes en el agua, y teniendo en cuenta que éstos son de naturaleza química, se utilizan bases de datos tales como *Science Direct* y *Redalyc* de las cuales se obtienen como fuente de estudio, análisis y comparación artículos de revisión e investigación que posteriormente permitirán tener un precedente bibliográfico para el desarrollo del estudio sobre la remoción de nitratos, de esta manera la información obtenida brindara un concepto claro para elección del método de remoción para la remoción de nitratos en la fuente hídrica del río Subachoque.

#### 2.1.1 Intercambio iónico

Para el método de eliminación de nitratos por intercambio iónico, se realizó una revisión de la literatura a través de la base de datos de *Science Direct* y Sistema de Información Científica Redalyc, buscando los términos "*ion exchange*" and "*nitrates*" y "*removal of nitrates by ion exchange*" respectivamente en cada base de datos.

Para la consulta en *Science Direct* con las palabras clave "*ion exchange*" and "*nitrates*", se utilizaron filtros como no mayor a los últimos cinco años, artículos de revisión y artículos de investigación, con áreas temáticas de ingeniería e ingeniería química. La búsqueda arrojó un total de 4967 resultados, con el mayor número de artículos publicados este año con 1365 artículos, seguido de 2020 con 1.094 artículos, y el año con el menor número de artículos fue 2017 con 727 artículos. La revista con mayor número de artículos es "Chemical Engineering Journal" con 672 artículos, y la revista con menor número de artículos es "Chinese Journal of Chemical Engineering" con 44 de ellos y archivos de acceso abierto con 260 artículos.

Se tuvieron en cuenta los artículos correspondientes a la búsqueda sobre la cual se seleccionan 9 artículos de los resultados obtenidos, dado que estos son los artículos más recientes y en los últimos 5 años ha habido un incremento en la información publicada sobre este tema, además, en la Tabla 5 se muestran los autores con mayor número de publicaciones. Dos autores destacados: G.Mendow y A. Sánchez, ambos con 5 publicaciones; Seguido por Shoupeng Duan y Tiezheng Tong con 4 publicaciones,

estos dos autores hicieron todas sus publicaciones sobre problemas de intercambio iónico; Los autores anteriores también brindan información valiosa sobre las tendencias y los impactos en el tratamiento de aguas residuales en áreas clave como los procesos químicos y físicos. La siguiente figura muestra el título del artículo, revista publicada, año, autor y palabras clave de los artículos.

**Figura 3.**

*Artículos relacionados al método de intercambio iónico y nitratos.*

<b>Artículo</b>	<b>Revista</b>	<b>Año</b>	<b>Autores</b>	<b>País</b>	<b>Palabras Clave</b>
<i>A novel process for nitrate reduction in water using bimetallic Pd-Cu catalysts supported on ion exchange resin</i>	Revista de Ingeniería Química Ambiental	2017	G. Mendow, A. Sánchez, C. Grosso, CA Querini	Argentina	<i>Nitrates reduction, Pd-Cu, ion exchange resin, continuous process</i>
<i>Integrated ion exchange-based system for nitrate and sulfate removal from water of different matrices: Analysis and optimization using response surface</i>	<i>Process Safety and Environmental Protection</i>	2020	Hassan E. Gomaa, Abdullah A. Alotaibi, Fatma. A. Gomaa, Elham Bajuayfir, Ashfaq Ahmad, Khalid M. Alotaibi.	Egipto	<i>Nitrate and sulfate removal on exchange, taguchi design, water process engineering</i>

<i>methodology and Taguchi experimental design techniques</i>					
Ion exchange purification of a silver nitrate electrolyte	<i>Minerals Engineering</i>	2019	Sami Virolainen, Olli Holopainen, Mikhail Maliarik, Tuomo Sainio	Finlandia	<i>silver, electrolyte, copper, electrorefining, ion exchange, chelating resin.</i>
<i>Synthesis of cation exchange resin-supported iron and magnesium oxides/hydroxides composite for nitrate removal in water.</i>	<i>Chinese Journal of Chemical Engineering</i>	2021	Trung Thanh Nguyen, Vu Anh Khoa Tran, Le Ba Tran, Phuoc Toan Phan, Minh Tan Nguyen, Long Giang Bach, Surapol Padungthon, Cong Khiem Ta, Nhat Huy Nguyen.	Vietnam	<i>iron oxide/hydroxide, magnesium oxide/hydroxide, cation exchange resin, adsorption, environment, nanomaterials.</i>

<i>A combined treatment method of novel Mass Bio System and ion exchange for the removal of ammonia</i>	<i>Chemical Engineering Journal</i>	2019	Salma Tabassum	China	<i>mass bio system (MBS), denitrification, ammonia nitrogen, ion exchange, resin</i>
<i>nitrogen from micro-polluted water bodies.</i>					
<i>Achieving low-cost, highly selective nitrate removal with standard anion exchange resin by tuning recycled brine composition</i>	<i>Water Research</i>	2020	Shoupeng Duan Tiezheng Tong Shaokui Zheng Xueyu Zhang Shida Lia	China	<i>Nitrate, selective ion exchange, groundwater, brine reuse, resin activation.</i>
<i>Comparative study of nanofiltration and ion exchange for nitrate reduction in the presence of chloride and iron in groundwater</i>	<i>Science of The Total Environment</i>	2020	Francisca Labarca Rodrigo Bórquez	Chile	<i>Nanofiltration, ion exchange, groundwater, drinking water, nitrate.</i>

<i>Hybrid nitrate selective resin (NSR-NanoZr) for simultaneous selective removal of nitrate and phosphate (or fluoride) from</i>	<i>Journal of Environmental Chemical Engineering</i>	2020	Hang Dong Chelsey S. Shepsko Michael German Arup K. SenGupta	Estados Unidos	<i>Hybrid ion exchange, selective removal, nitrate, phosphate, fluoride.</i>
<i>impaired water sources</i>					
<i>Removal of nitrate from water by conducting polyaniline via electrically switching ion exchange method in a dual cell reactor: Optimizing and modeling</i>	<i>Separation and Purification Technology</i>	2016	Milad Hojjat Ansari Jalal Basiri Parsa	Iran	<i>Removal of nitrate, electrically switching ion exchange, PANI, response surface methodology</i>

**Nota.** Esta tabla evidencia los artículos relacionados al material consultado en la base de datos Science direct con las palabras clave "ion exchange" and "nitrates".

Para la consulta en Redalyc con las palabras clave "removal of nitrates by ion exchange", se utilizaron filtros como no mayor a los últimos cinco años, en disciplina artículos de ingeniería. La búsqueda arrojó en total 1068 resultados, el mayor número de artículos han sido publicados en el año 2018 con 349 artículos, seguido del año 2019 con 332 artículos publicados y el año con menor cantidad de artículos es este año 2021 con 73

artículos. La siguiente figura muestra el archivo seleccionado como una de las publicaciones más citadas o más relevantes de los mencionados bancos de datos, el título del artículo, la revista en la que fue publicado, año, autor y palabras claves de estos artículos.

**Figura 4.**

*Artículos relacionados con la remoción de nitratos por intercambio iónico.*

Artículo	Revista	Año	Autores	País	Palabras Clave
Preliminary study of the	Revista INGENI	2019	Hedieh Ahmadpari,	Irán	Nitrate removal, Taguchi
process of nitrate removal optimization from aqueous solutions using Taguchi method	ERÍA UC		Seyyed Ebrahim Hashemi Garmdareh, Amir Afarinandeh		method, crushed palm leaves, crushed dears of wheat, beech wood chips

**Nota.** Esta tabla evidencia el artículo relacionado al material consultado en la base de datos Redalyc con las palabras clave “*removal of nitrates by ion exchange*”.

**2.1.2 Osmosis inversa**

Para el método de remoción por osmosis inversa se realizó la revisión bibliográfica a través de la base de datos Science direct, buscando los términos “*Reverse osmosis*” and “*nitrates*”, “*nitrate removal by inverse osmosis*”.

Para la consulta en Science direct con las palabras clave “*reverse osmosis*” and “*nitrates*” no se especificó ningún tipo de filtro debido a la falta de publicaciones, en total se encontraron 32 artículos, 3 de ellos de acceso abierto, la mayoría de ellos eran artículos de investigación con 22 publicaciones, la revista con mayor cantidad de artículos es Desalination. Con los resultados obtenidos se tomaron en cuenta los que coincidían con la investigación y se seleccionaron cinco artículos, a pesar de ser publicados hace más varios años contienen información relevante a la investigación y han sido citados en diferentes documentos en las bases de datos, la siguiente figura muestra el título del

artículo, la revista en la que fue publicado, año, autor y palabras claves de estos artículos.

**Figura 5.**

*Artículos relacionados al método de osmosis inversa y nitratos.*

<b>Articulo</b>	<b>Revista</b>	<b>Año</b>	<b>Autores</b>	<b>País</b>	<b>Palabras Clave</b>
<i>Nitrate removal with reverse osmosis in a rural area in South Africa</i>	<i>Desalination</i>	2003	JJ Schoeman, A. Steyn	Sudáfrica.	<i>Reverse osmosis, Nitrate removal, Brine disposal, Stock watering, Treatment costs</i>
<i>The application of reverse osmosis and nanofiltration to the removal of nitrates from groundwater</i>	<i>Desalination</i>	1999	Jolanta Bohdziewicz, Michał Bodzek, Ewa Wąsik	Polonia	<i>Nanofiltration, Reverse osmosis, Nitrates, Drinking water</i>
<i>Selective nitrate removal from groundwater using a hybrid nanofiltration–reverse osmosis filtration scheme</i>	<i>Chemical Engineering Journal</i>	2015	Razi Epsztein Oded Nir Ori Lahav Michal Green	Israel	<i>Nitrate removal, Drinking water, Nanofiltration, RO, Quality regulations, Brine discharge to sewerage system.</i>



<i>Highly efficient removal of total nitrogen and dissolved organic compound in waste reverse osmosis concentrate mediated by chlorine radical on 3D Co3O4 nanowires anode</i>	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	2021	Zhang Yan, Tang Wenjing, Bai Jing, Li Jinhua, Wang Jiachen, Zhou Tingsheng, Guan Xiaohong, Zhou Baoxue,	China	<i>Reverse osmosis concentrate, chlorine radical, three-dimensional Co3O4 nanowires, electrochemical oxidation.</i>
<i>Effects of Ca<sup>2+</sup> on biological nitrogen removal in reverse osmosis concentrate and adsorption treatment</i>	<i>Journal of Industrial and Engineering Chemistry</i>	2018	Kim Hyun Gu, Kim Sung Su, Kim Sung Chul, Joo Hyun Jong.	Coreadel Norte.	<i>RO concentrate, Aerobic granular sludge, Nitrate, TDS, Calcium.</i>

**Nota.** Esta tabla evidencia los artículos relacionados al material consultado en la base de datos Science direct con las palabras clave “inverse osmosis” and “nitrates”.

Para la consulta en Science direct con los términos “nitrate removal by reverse osmosis”, en filtro tipo de artículos, se seleccionó artículos de revisión y artículos de

investigación, con áreas temáticas de ingeniería e ingeniería química y no mayor a 14 años. La búsqueda arrojó en total 323 resultados, el mayor número de artículos han sido publicados en este año con 57 artículos, seguido del año 2020 con 40 artículos publicados y el año con menor cantidad de artículos fue el 2012 con 7 artículos. La revista con más cantidad de artículos es "Desalination" que cuenta con 51 artículos, la revista con menos artículos es "Chemical Engineering Research and Design" con 2 de estos y archivos de acceso abierto se encontraron 12 artículos.

Con los resultados arrojados se tomaron en cuenta aquellos que concordaran con lo que se está buscando y se seleccionaron 2 artículos, que han sido de las publicaciones más citadas o más relevantes de los mencionados bancos de datos, en la siguiente figura se evidencia el nombre del artículo, revista donde fue publicada, año, autores y palabras claves.

**Figura 6.**

*Artículos relacionados al método de remoción de nitratos por osmosis inversa.*

<b>Artículo</b>	<b>Revista</b>	<b>Año</b>	<b>Autores</b>	<b>País</b>	<b>Palabras Clave</b>
<i>Treatments of stainless steel wastewater containing a high concentration of nitrate using reverse osmosis and nanomembranes</i>	<i>Desalination</i>	2007	Y.-H. Kim, E.-D. Hwang, WS Shin, J.-H. Choi, TW Ha, SJ Choi.	Corea del Sur.	<i>Nitrate, membrane, Stainless steel wastewater</i>
<i>Comparison between nitrate and pesticide removal from ground water using adsorbents and NF and RO membranes</i>	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	2009	Brigita Tepuš, Marjana Simonič, Irena Petričić	Eslovenia	<i>Atrazine, Nitrate, Adsorption, Reverse osmosis, Nanofiltration</i>

**Nota.** Esta tabla evidencia los artículos relacionados al material consultado en la base de datos Science direct con las palabras clave “nitrate removal by inverse osmosis”.

### **2.1.3 Electrocoagulación**

Para el método de remoción por electrocoagulación la revisión bibliográfica se realizó por medio de dos bases de datos (*ScienceDirect* & *Scielo*) la búsqueda “*electrocoagulation*” and “*nitrates*”, “*nitrate removal by electrocoagulation*” y “*water treatment by*

*electrocoagulation*”, las primeras dos búsquedas se realizaron por medio de Science direct y la última por medio de Scielo.

Para la consulta en Science direct con las palabras clave “electrocoagulation” and “nitrates”, primero se pusieron algunos filtros como no mayor a los últimos cinco años, artículos de revisión y artículos de investigación, con áreas temáticas de ingeniería e ingeniería química. La búsqueda arrojó en total 328 resultados, el mayor número de artículos han sido publicados en este año con 125 artículos, seguido del año 2020 con 74 artículos publicados y el año con menor cantidad de artículos fue el 2018 con 50 artículos. La revista con más cantidad de artículos es “Revista de ingeniería química ambiental” que cuenta con 68 de estos, la revista con menos artículos es “Ciencias de la Ingeniería Química” con 1 de estos y archivos de acceso abierto se encontraron 14 artículos.

Con los resultados arrojados se tomaron en cuenta aquellos que concordaran con lo que se está buscando y se seleccionaron de 7 artículos, dado que estos son los artículos más recientes se consideran relevantes además se muestran algunos autores con mayor número de publicaciones relacionados a electrocoagulación como Mohammed Amarine, Mouna Ghazouani, Mouna Ghazouani, en la siguiente figura se evidencia el nombre del artículo, revista donde fue publicada, año, autores y palabras claves.

**Figura 7.**

*Artículos relacionados al método de electrocoagulación y nitratos.*

<b>Artículo</b>	<b>Revista</b>	<b>Año</b>	<b>Autores</b>	<b>País</b>	<b>Palabras Clave</b>
<i>Nitrate removal from groundwater using a batch and continuous flow hybrid Fe-electrocoagulation and</i>	<i>Journal of Environmental Management</i>	2021	Andreas K.Benekos, Foteini E.Tziora, Athanasia G.Tekerle kopoulou, Stavros Pavlou, Yan Qun, Alexandros Katsaounis,	Grecia	<i>Denitrification, Iron electrodes, Ammonium removal, Electrochemical oxidation, Continuous flow</i>

<i>electrooxidation system</i>			Dimitris V.Vayenas		
<i>Nitrate removal from groundwater in Casablanca region (Morocco) by electrocoagulation</i>	<i>Ground water for Sustainable Development</i>	2020	Mohammed Amarine, Brahim Lekhlif, El Mostafa Mliji, Jamal Echaabi	Marruecos	<i>Denitrification, nitrate-contaminated, electrocoagulation, efficiency</i>
<i>Nitrate removal by electrocoagulation process using experimental design methodology: A techno-economic optimization</i>	<i>Journal of Environmental Chemical Engineering</i>	2020	Judicaël Ano, Bi Gouessé Henri Briton, Konan Edmond Kouassi, Kopoin Adouby	Costa de Marfil	<i>Electrocoagulation, Optimization, Nitrate removal, Ammonium generated, Operating cost</i>
<i>Removal of nitrates from water by electrocoagulation using a cell with horizontally oriented Al serpentine tube anode</i>	<i>Journal of Industrial and Engineering Chemistry</i>	2020	MH Abdel-Aziz, ES.Z. El-Ashtoukhy, M. Sh. Zoromba, M. Bassyouni, GH Sedahmed	Egipto	<i>Nitrate removal, Electrocoagulation, Wastewater, Kinetic study, Serpentine tube anode</i>

<i>Evaluation of direct and alternating current on nitrate removal using a continuous electrocoagulation process: Economical and environmental approaches through RSM</i>	<i>Journal of Environmental Management</i>	2019	Elnaz Karamati-Niaragh, Mohammad Reza Alavi Moghaddam, Mohammad Mahdi Emamjomeh, Ebrahim Nazlabadi	Irán	<i>Alternating current, Direct current, Nitrate removal, Operating cost, Response surface method</i>
<i>Nitrate removal by electrocoagulation process using experimental design methodology: A techno-economic optimization</i>	<i>Journal of Environmental Chemical Engineering</i>	2020	Ano Judicaël, Henri Briton Bi Gouessé, Kouassi Konan Edmond, Adouby Kopoin.	Costa de Marfil	<i>Electrocoagulation, Optimization Nitrate removal, Ammonium generated, Operating cost.</i>
<i>Simultaneous removal of nitrate and nitrite using electrocoagulation/floatation (ECF): A new</i>	<i>Journal of Environmental Management</i>	2019	Mouna Ghazouani Latifa Bousselmi Hanene Akrouf	Iran	<i>Electrocoagulation/floatation, Modeling Nitrate/ nitrite removal, Optimization,</i>

<i>multi-response optimization approach</i>					<i>Respons esurface methodology.</i>
---	--	--	--	--	--------------------------------------

**Nota.** Esta tabla evidencia los artículos relacionados al material consultado en la base de datos Science direct con las palabras clave “*electrocoagulation and nitrates*”.

En la siguiente consulta en la base de datos Science direct con los términos “*nitrate removal by electrocoagulation*” con los mismos filtros mencionados anteriormente no mayor a los últimos cinco años, artículos de revisión y artículos de investigación, con áreas temáticas ingeniería química. La búsqueda arrojo en total 311 resultados, el mayor número de artículos han sido publicados en este año con 118 artículos y el año con menor cantidad de artículos fue el 2018 con 48 artículos. La revista con más cantidad de artículos es “Revista de ingeniería química ambiental” que cuenta con 67 de estos, la revista con menos artículos es “Bioquímica de procesos” con 1 de estos y archivos de acceso abierto se encontraron 8 artículos. En esta búsqueda se seleccionaron 3 artículos de los cuales los autores Mouna Ghazouani, Latifa Bousselmi, Hanene Akroun han realizado 3 publicaciones relacionadas al tema de electrocoagulación, las 3 publicaciones en las que ha participado han sido un trabajo en equipo con los tres autores mencionados anteriormente lo cuales están nombrados en la siguiente figura:

**Figura 8.**

*Artículos relacionados al método de remoción de nitratos por electrocoagulación.*

<b>Artículo</b>	<b>Revista</b>	<b>Año</b>	<b>Autores</b>	<b>País</b>	<b>Palabras Clave</b>
<i>Combined electrocoagulation and electrochemical treatment on BDD electrodes for simultaneous removal of</i>	<i>Journal of Environmental Management</i>	2020	Mouna Ghazouani, Latifa Bousselmi, Hanene Akroun.	Túnez	<i>Electrocoagulation, Combined EC-ET, Nitrates, Phosphates, Ammonia by-product, Kinetic</i>

<i>nitrates and phosphates</i>					
<i>Assessment of electrocoagulation based on nitrate removal, for treating and recycling the Saharan groundwater desalination reverse osmosis concentrate for a sustainable management of Albien resource</i>	<i>Journal of Environmental Management</i>	2019	Ismahane Berkani, Mohamed Belkacem, Mohamed Trari, François Lopicque, Kenza Bensadok.	Argelia	<i>Groundwater desalination, Reverse osmosis concentrate treatment, Recycling, Electrocoagulation process, Sustainable Saharan water management</i>
<i>Optimization of nitrogen removal from anaerobic digester effluent by electrocoagulation process</i>	<i>Journal of Environmental Chemical Engineering</i>	2019	Azam Mohammadi, Ali Khadir, Ramin MATehrani	Irán	<i>Nitrogen, Electrocoagulation, Digester, Effluent, Anaerobic, Adsorption</i>

**Nota.** Esta tabla evidencia los artículos relacionados al material consultado en la base de datos *ScienceDirect* con las palabras clave “*nitrate removal by electrocoagulation*”.

La última búsqueda se realizó en la plataforma Scielo con los términos “*water treatment by electrocoagulation*”. La búsqueda arrojó un total de 10 resultados, sin ningún filtro, la mayoría de estos son de Brasil, la mayoría de estos artículos se realizaron en el año 2017. En la siguiente figura están 3 de los artículos que se tuvieron en cuenta que corresponden a lo que se busca con los resultados obtenidos y que han sido de las publicaciones más



citadas o más relevantes de los mencionados documentos en las bases de datos.

**Figura 9.**

*Artículos relacionados al tratamiento de aguas por electrocoagulación.*

<b>Artículo</b>	<b>Revista</b>	<b>Año</b>	<b>Autores</b>	<b>País</b>	<b>Palabras Clave</b>
<i>Electrocoagulation as an alternative treatment for mixed wastewater originated in the dairy and meat processing industry</i>	<i>Tecnura</i>	2021	Yim James Rodríguez Díaz Miguel David Fuentes Guevara Óscar David Beleño Díaz Luis Hernando Montoya Armenta	Colombia	<i>Industrial wastewater, electrocoagulator, number of electrodes, treatment time.</i>
<i>Optimization of electrocoagulation operating parameters applied to the recovery vehicle washing wastewater</i>	Ingeniería Sanitaria y Ambiental	2017	Angelita Aparecida Ribeiro da Silva, Carlos Alberto Paulinetti da Camara, Ilza Lobo, Ieda Spacino Scarmínio, João Carlos Alves	Brasil	<i>water reuse; aluminum electrodes; DQO removal</i>
<i>Application of the electrocoagulation technique on the treatment of wastewaters coming from a</i>	Ingeniería Sanitaria y Ambiental	2017	Aparecido Nivaldo Módenes, Fernando Rodolfo Espinoza-Quiñones, Patricia Hissae Yassue,	Brasil	<i>Experimental planning, color removal, turbidity</i>

<i>poultry slaughterhouse</i>			Thaís Mendes Porto, Paulo Sérgio Theodoro		
-----------------------------------	--	--	--	--	--

**Nota.** Esta tabla evidencia los artículos relacionados al material consultado en la base de datos Scielo con las palabras clave “*water treatment by electrocoagulation*”.

## 2.2 Métodos de caracterización del agua del río Subachoque

El agua en su estado natural es una solución de varios compuestos que se adhieren a ella de acuerdo con los procesos del ciclo hidrológico, así que el agua varía según la composición del suelo, ubicación y otros procesos físicos y químicos [60]. Para ello se efectuaron procedimientos de laboratorio a una muestra de agua evaluando sus características, para poder identificar elementos, compuestos y sustancias presentes en el agua.

Se realizó un análisis externo propiciado por el laboratorio HIDROLAB, quien fue la entidad encargada de proveer la caracterización como resultado de las muestras de agua extraídas del río Subachoque, de modo que utilizaran las técnicas conforme al *standar methods* para la obtención de resultados. A continuación, se describen los métodos de caracterización del agua:

### 2.2.1 Nitratos

Los nitratos en el agua pueden ser difíciles de detectar debido a los complicados procesos a los que se puede acceder y a los restringidos rangos de concentración que proporcionan los distintos enfoques [61]. Los métodos propuestos para la encontrar nitratos en muestras ambientales incluyen el uso de reacciones de nitrificación, oxidación y / o reducción, sin embargo, la mayoría tiene limitaciones importantes, ya que la intensidad del desarrollo del color en los cromatóforos es función del tiempo y la temperatura; Por lo tanto, ambos factores deben controlarse cuidadosamente. [62]

En este estudio se utilizó la metodología de electrodos iónicos selectivos (EIS), este método permite la determinación de nitratos en un amplio rango de concentraciones (0,14 - 14.000 mg / L), y tiene varias ventajas, entre ellas que no requiere pretratamiento de la muestra y que puede ser utilizado sin dificultad en muestras con color o turbidez.

[63]

### **2.2.2 Nitritos**

Los nitritos rara vez se encuentran en cantidades superiores a un miligramo por litro de agua, incluso en fuentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, y sus concentraciones en aguas superficiales y subterráneas suelen ser inferiores a 0,1 mililitros por litro de agua. [62]. Los nitritos, a través de su interacción con las aminas secundarias o terciarias, pueden formar compuestos cancerígenos conocidos como nitrosaminas. Además, al interactuar con los glóbulos rojos, pueden producir metahemoglobina en la sangre, lo que impide que el oxígeno llegue a los tejidos del cuerpo. [47].

Conforme al standar methods, se utilizó el método de colorimetría para determinar concentraciones de nitrito de 10 a 1000  $\mu\text{g} / \text{L}$ . La paleta de colores se basa en la ley de Beer, que establece que la absorción de la luz es proporcional a las características de la sustancia atravesada con concentraciones de hasta 180 g/L a 543 nm si la celda se utiliza a una distancia de un centímetro; Con una célula fotoconductora de 5 cm y un filtro verde, es posible medir concentraciones en el rango de 5 a 50 ng / L; se pueden medir concentraciones mayores diluyendo más la muestra. [62]

### **2.2.3 Nitrógeno amoniacal**

El nitrógeno amoniacal incluye nitrógeno en forma de  $\text{NH}_3$  y  $\text{NH}_4$ , y el amoniaco de las aguas residuales se produce principalmente mediante la eliminación de compuestos orgánicos que contienen nitrógeno y mediante la hidrólisis de urea, también se puede producir como nitrato en condiciones anaeróbicas. [64]

Los dos factores principales que influyen en la elección del método de determinación de amoniaco son la concentración y la presencia de interferencias. En general, la determinación directa de la concentración de amoníaco de forma manual se limita a agua potable, agua superficial pura y diluyentes de nitrógeno residual de alta calidad, y se prefieren las técnicas de destilación y titulación para concentraciones de amoníaco más altas. [64]

#### **2.2.4 Nitrógeno orgánico**

La presencia de una mayor concentración de nitrógeno orgánico en el agua suele estar relacionada con la presencia de residuos domésticos o industriales en el agua. [65]

Mediante el método Kjeldahl, tras eliminar el nitrógeno amoniacal, se determinó el nitrógeno orgánico. Este método se divide en tres etapas: la primera es la digestión de la muestra, seguida de la destilación y, por último, la valoración. Si no se eliminaba el nitrógeno amoniacal en la fase inicial del análisis, se determinaba el nitrógeno total por Kjeldahl. [66]

Este enfoque, que es uno de los más utilizados para la determinación del nitrógeno, sigue siendo un proceso fácil y sencillo a pesar de su amplio uso. [67]. El nitrógeno orgánico puede obtenerse restando el nitrógeno Kjeldahl total del nitrógeno amoniacal total, respectivamente. [66]

#### **2.2.5 Nitrógeno total**

Se calcula sumando los niveles de nitrato, nitrito, nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal recogidos en una estación por el número total de muestras tomadas en esa estación; los componentes constitutivos deben indicarse en miligramos por litro de agua. [68]

El nitrógeno total se determinó utilizando cálculos teóricos después de especificar los parámetros anteriormente mencionados.

#### **2.2.6 pH del agua**

La palabra pH se utiliza para indicar la concentración de iones de hidrógeno en una solución o, más exactamente, la actividad de los iones de hidrógeno en la solución. La fuerza ácida o alcalina de una solución suele expresarse en términos del valor del pH de la misma. Este enfoque puede utilizarse con el agua potable, las aguas superficiales, las aguas residuales residenciales e industriales y la lluvia ácida, entre otras aplicaciones. [69]

Cuando este parámetro se mide con el potenciómetro, un electrodo de vidrio, un electrodo de referencia y un dispositivo de ajuste de la temperatura, se considera que el circuito es totalmente funcional. Cuando los electrodos están completamente sumergidos

en la solución de prueba, el circuito está completo y listo para ser probado. Para medir este parámetro, se utiliza un electrodo de referencia y un dispositivo de corrección de la temperatura. [50]

### ***2.2.7 Tipo de muestreo***

Las muestras se tomaron bajo la modalidad de muestreo simple, correspondiendo este a la toma en un tiempo y lugar determinado, debido a la extensión de la zona de muestreo se pueden evaluar en distintos puntos la muestra, estas representaron la composición de la corriente de agua acorde al momento de su captación. De las principales precauciones a tomar durante el período de muestreo fue tomarlo durante los meses secos del año en el municipio de Mosquera como abril, junio, julio y noviembre [70], cuando no llueve, de esta manera se asegura que la muestra tomada se encontrará con tantos contaminantes como sea posible.

Bajo los diseños de toma de muestras propuestas por el IDEAM se presenta el conjunto de parámetros de interés y sus recomendaciones para este estudio en la siguiente tabla.

**Tabla 4.**

*Documento toma de muestras Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.*

<b>Determinación</b>	<b>Tipo de recipiente</b>	<b>Tamaño mínimo de muestra mL</b>	<b>Tipo de Muestra</b>	<b>Preservación</b>	<b>Almacenamiento regulatorio</b>
Nitrógeno Amoniacal	P, V, FP	500	S,c	Analizar tan pronto como sea posible o agregar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> llevar a pH<2, refrigerar a ≤6°C. Si la muestra posee alto contenido de sólidos, la acidificación puede generar interferencia debido a la posible presencia de Amonio intercambiable presente en ellos, en este caso recolectar una muestra adicional filtrada en campo antes de acidificar.	28d

Nitrato	P, V, FP	100	S,c	Analizar tan pronto como sea posible, refrigerar a $\leq 6^{\circ}\text{C}$	48h (14d para muestras cloradas)
Nitrato + Nitrito	P, V, FP	200	S,c	Agregar $\text{H}_2\text{SO}_4$ llevar a $\text{pH} < 2$ , refrigerar a $\leq 6^{\circ}\text{C}$	28d
Nitrito	P, V, FP	100	S,c	Analizar tan pronto como sea posible, refrigerar a $\leq 6^{\circ}\text{C}$	48h
Nitrógeno Orgánico, Kjeldahl	P, V, FP	500	S,c	Agregar $\text{H}_2\text{SO}_4$ llevar a $\text{pH} < 2$ , refrigerar a $\leq 6^{\circ}\text{C}$	28d

**Nota:** La tabla muestra tiempos y recomendaciones de conservación para muestras de agua bajo la normatividad del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). Tomado de: IDEAM “Instructivo de toma y preservación de muestras sedimentos y agua superficial para la red de monitoreo de calidad del IDEAM”, [En Línea]. Disponible: <http://sgi.ideam.gov.co/documents/412030/35488871/M-S-LC-1004+INSTRUCTIVO+DE+TOMA+Y+PRESERVACION+DE+MUESTRAS+SEDIMENTOS+Y+AGUA+SUPERFICIAL+PARA+LA+RED+DE+MONITOREO+DE+CALIDAD+DEL+IDEAM+v3.pdf/477bbe4a-5825-49c8-9961-10805a3c2288?version=1.0>

[Acceso: nov.11,2021]

## 2.3 Método de selección para el sistema de tratamiento

### 2.3.1 Matriz PUGH

Para la selección del criterio adecuado en propuestas de métodos de remoción como lo son intercambio iónico, osmosis inversa y electrocoagulación se hará uso de la matriz de PUGH.

Cuando se diseña un nuevo producto o se actualiza uno ya existente, esta matriz es una herramienta cuantitativa que le ayuda a comparar opciones. El uso más típico de esta matriz es durante la fase de diseño del producto. El primer paso es identificar los criterios

que se van a evaluar, que en este caso suelen representarse como filas de una matriz. A continuación, se deben identificar los posibles conceptos o necesidades de diseño para lograr los criterios especificados, que estarán en forma de columnas en la matriz. El diseño actual del producto se toma como punto de referencia y se muestra como una columna con la que realizar comparaciones adicionales, así como se muestra en la figura 10. [71]

**Figura 10.**

*Ejemplo matriz PUGH*

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5
Concepto 1					
Concepto 2					
Concepto 3					
Concepto 4					
Concepto 5					

**Nota.** La figura referencia la ubicación y las diferentes cuencas que alimenta el río Subachoque. Tomado de: Gonzales, Rodrigo. PDCA home “Matriz de pugh: ayuda a la toma de decisiones”. [En línea]. Disponible: <https://www.pdcahome.com/2569/matriz-de-pugh-ayuda-a-la-toma-de-decisiones/> [Acceso: Ene.25,2022].

La calificación será +1 si es mejor que el criterio de base o -1 si no lo es, 0 en caso de igual importancia. La puntuación más alta del número total de valoraciones será el seleccionado.

Resumiendo, los valores como ejemplo en la figura 3 encontramos el tercer criterio como el criterio con la puntuación más alta, por lo que la tercera opción será el criterio más importante y el que generará mayor impacto en la organización.



**Figura 11.**

*Criterios y conceptos de la matriz PUGH*

		Criterios				
		Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5
Concepto	Viabilidad	=	1	1	-1	0
	Tiempo de implantación (días)	=	1	1	-1	0
	Costo de desarrollo (€)	=	0	1	-1	0
	Beneficio para empresa (€)	=	-1	1	0	1
	Grado de innovación	=	1	1	0	1
Total		0	2	5	-3	2

**Nota.** La figura referencia la ubicación y las diferentes cuencas que alimenta el río Subachoque. Tomado de: Gonzales, Rodrigo. PDCA home “Matriz de pugh: ayuda a la toma de decisiones”. [En línea]. Disponible: <https://www.pdcahome.com/2569/matriz-de-pugh-ayuda-a-la-toma-de-decisiones/> [Acceso: Ene.25,2022].

## 2.4 Caracterización de la muestra

El agua en su estado natural es una solución de varios compuestos que se adhieren a ella, según los procesos del ciclo hidrológico, el agua cambia según composición del suelo, ubicación y otros procesos físicos y químicos. Para ello se realizaron procedimientos de laboratorio a una muestra de agua evaluando sus características, para poder identificar elementos, compuestos y sustancias presentes en ella.

El día 12 de noviembre del año pasado se tomó una muestra de 1.5 litros de agua proveniente del río Subachoque. Posteriormente se realizó un análisis externo propiciado por el laboratorio HIDROLAB, quien fue la entidad encargada de proveer la caracterización como resultado de las muestras de agua extraídas del río Subachoque, según el Standart Methods edición del 2017, el día 13 de diciembre del mismo año fueron entregados los resultados del informe de laboratorio.

Para la determinación de nitrógeno amoniacal hay dos factores que influyen en la elección del método de determinación de amoniaco y son la concentración y la presencia

de interferencias, se prefieren las técnicas de destilación y titulación, en este caso el amoníaco se tituló con ácido sulfúrico utilizando un indicador mixto de rojo de metilo y azul de metileno. En este mismo estudio se utilizó la metodología de electrodos iónicos selectivos (EIS) para la determinación de nitratos este método permite la determinación de nitratos en un amplio rango de concentraciones (0,14 - 14.000 mg / L), y tiene varias ventajas, entre ellas que no requiere pretratamiento de la muestra y que puede ser utilizado sin dificultad en muestras con color o turbidez, se utilizó el método de colorimetría para determinar concentraciones de nitrito. El parámetro del pH se mide con el potenciómetro, un electrodo de vidrio, un electrodo de referencia y un dispositivo de ajuste de la temperatura. La medición de la conductividad depende de la presencia de iones, es una medida directa que fue determinada por un conductímetro. El nitrógeno kioldal se determinó por medio de la suma de nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal. Mediante el método Kieldal, tras eliminar el nitrógeno amoniacal, se determinó el nitrógeno orgánico y por último el nitrógeno total se determinó utilizando cálculos teóricos después de especificar los parámetros anteriormente mencionados se calcula sumando los niveles de nitrato, nitrito, nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal recogidos en una estación por el número total de muestras tomadas en esa estación que en este caso era solo una.

## **2.5 Factores influyentes en el proceso de electrocoagulación**

### **2.5.1 Material del electrodo:**

Es fundamental que el material del electrodo se elija con cuidado durante el proceso de electrocoagulación, ya que cada mineral tiene propiedades diferentes, esto hace que el proceso sea eficiente o no, los metales más utilizados en la electrocoagulación son el hierro y el aluminio, sin embargo, el material de los electrodos se elige según el tipo de sistema utilizado, para este metal, así como también se utilizan electrodos de cobre, acero o aleaciones de aluminio y magnesio. [72]

**Tabla 5.***Características del hierro y aluminio*

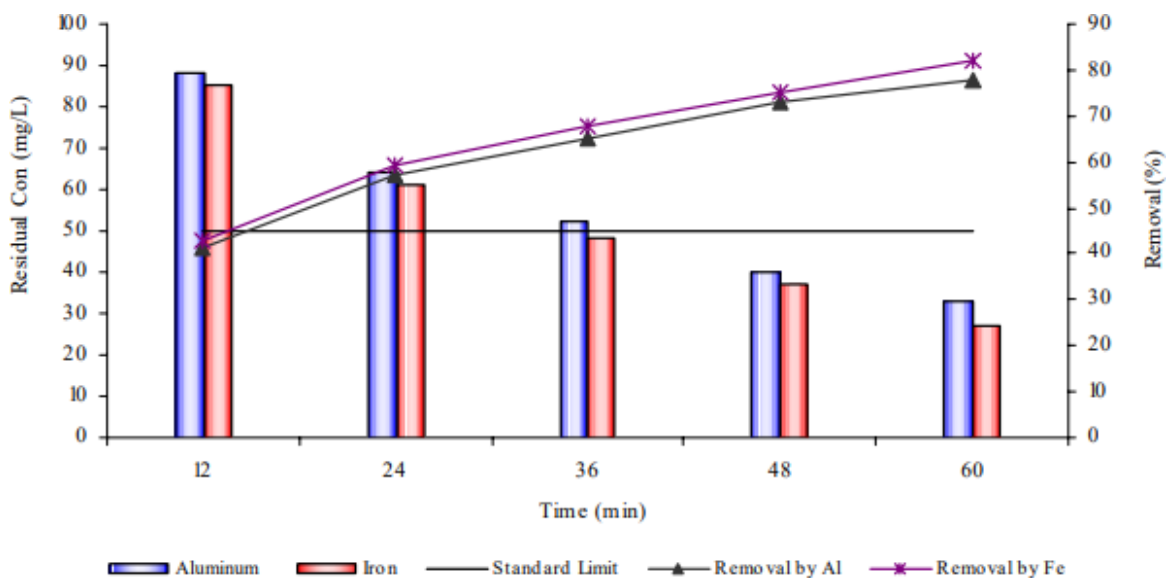
<b>Hierro</b>		<b>Aluminio</b>	
Baja resistencia a la corrosión		Alta resistencia a la corrosión	
Conductividad eléctrica	$1.53 \times 10^7$ s/m	Conductividad eléctrica	$3.78 \times 10^7$ s/m
Resistividad	$8.90 \times 10^{-8}$ $\Omega$ *m	Resistividad	$2.82 \times 10^{-8}$ $\Omega$ *m
Costo (COP)	2800 c/u	Costo (COP)	4500 c/u

**Nota.** Conductividad térmica de los electrodos hierro y aluminio. Tomado de: HyperPhysics “Conductividad térmica” [En Línea]. Disponible: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Tables/thrcn.html> [Acceso: nov.11,2021].

La figura 12 muestra los resultados de un estudio realizado en 2011 en el que se investigó el efecto del material del electrodo en el rendimiento del proceso. Se descubrió que utilizando electrodos de hierro se conseguía una mayor capacidad de eliminación, como puede verse, esto se traduce en menores concentraciones de nitrato residual, menor generación de lodos y mejor eliminación de contaminantes con estos electrodos. Esto puede explicarse por el hecho de que el hierro tiene una mayor densidad que el aluminio.

**Figura 12.**

El efecto del pH en la eficacia de la eliminación de los nitratos.



**Nota.** Representación gráfica de el efecto del tipo de electrodo en la eficiencia de eliminación de nitrato (pH = 7, 20 V, 150 mg / L de nitrato concentraciones iniciales). Tomado de: Departamento de Salud Ambiental, Facultad de Salud Pública, Universidad de Ciencias Médicas de Kerman, “Eficiencia de la electrocoagulación en la eliminación de nitratos de la fase acuosa”, [En Línea]. Disponible:

<https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/62836/1/st11010.pdf> [Acceso: nov.25,2021]

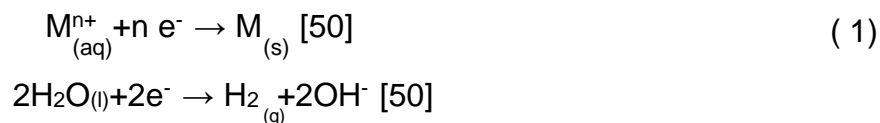
Un estudio en el año 2015 demuestra que el ánodo de aluminio es más eficaz para reducir el nitrato que el hierro; el estudio concluyó que el ánodo de Al reduce el nitrato de manera más eficiente que el ánodo de Fe, Se alcanzó una eficiencia máxima de eliminación de nitratos del 92% para el hierro Al-Fe (ánodo-cátodo) mientras que se logró una eficiencia del 80% para el hierro Fe-Fe (ánodo-cátodo). [73]

Durante el proceso de electrocoagulación se llevan a cabo varios procesos físicos y químicos para eliminar los contaminantes del agua. Cuando se trata de iones positivos y negativos, son los electrodos los que se encargan de enviarlos al ánodo, que a su vez se encarga de proporcionar los iones metálicos que ayudan a eliminar las impurezas del

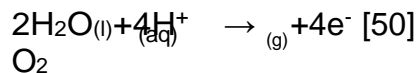
agua [74]. Una reacción redox se produce cuando se introduce una pequeña corriente eléctrica en el agua residual a través de un par de electrodos, estimulando una diferencia de potencial entre ellos, lo que da lugar a dos procesos secundarios, el primero de los cuales es la reducción en el cátodo, donde se produce la conversión de protones del agua en hidrógeno, seguido de la oxidación en el ánodo, donde se generan iones metálicos que son suministrados por el ánodo; [75] Posteriormente, los iones producidos se encargan de desestabilizar las cargas que transportan las partículas contaminantes en el agua, las cuales, al ser neutralizadas, dan lugar a la formación de flóculos contaminantes, los cuales se coagulan. [76]

Comienza con el paso de una corriente eléctrica a través del electrodo, que oxida el metal (M) a la forma catódica (M<sup>n+</sup>) y al mismo tiempo libera agua. A continuación, el agua se reduce a hidrógeno y al ion hidroxilo (OH<sup>-</sup>). El hidróxido del mineral formado actúa como coagulante de las impurezas. Es posible eliminar los contaminantes del hidrógeno creado en el cátodo por coagulación o precipitación después de que el hidrógeno se forme en el cátodo [77]:

Reacciones en el cátodo:

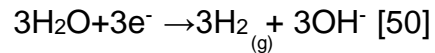
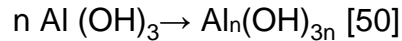
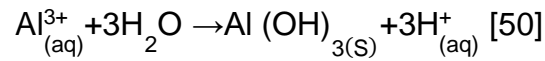


Reacciones en el ánodo:



Basados en la investigación de Noel y Mohán en el año 2015 donde se descubrió que los ánodos de aluminio son más efectivos para reducir el nitrato que el hierro, este estudio se centra en el aluminio actuando como cátodo y el hierro como ánodo.

El proceso electroquímico que ocurre cuando el aluminio actúa como ánodo se ve reflejado en las siguientes ecuaciones:



Como resultado de las reacciones que tienen lugar, se forman iones que son responsables de la inestabilidad de las cargas de los contaminantes en el agua. Una vez neutralizadas las cargas, y eliminados los sistemas que mantienen las partículas en suspensión, se produce la formación de aglomerados, lo que inicia un proceso de coagulación que permite eliminar los contaminantes. [78]

## 2.6 Método de estimación del costo del sistema

Para realizar el análisis financiero del proyecto se debe determinar el coste del mismo en las condiciones de funcionamiento que dan lugar al mayor porcentaje de eliminación de nitrato en exceso, que en este caso corresponden a los costos de instalación sin mano de obra y los costos operativos.

### 2.6.1 Costos de instalación

Están dados mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Costo de instalación} = \text{CiFe} + \text{CiAl} + \text{Fuente} \quad (4)$$

Donde,

CiFe : Corresponde a las cantidades iniciales del electrodo de hierro. CiAl: Corresponde a las cantidades iniciales del electrodo de aluminio. Fuente: Corresponde a la fuente de alimentación

La ecuación para el cálculo de las cantidades iniciales de electrodo se determinó de la siguiente forma:

$$C_{ix} = \left( \frac{n_{el}}{2} (Ae * He * e_e) \right) * \rho_x \quad (5)$$

$n_{el}$ : número de electrodos en el reactor.

$Ae$ : Ancho de los electrodos  $He$ : Altura de los electrodos

$e_e$ : Espesor de los electrodos

$\rho_x$ : Densidad del material del electrodo

### 2.6.2 Costos operativos

Están dados mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Costos operativos} = C_{\text{Energía}} + C_{\text{Electrodo}} \quad (6)$$

Donde,

$C_{\text{Energía}}$ : Corresponde al consumo energético (kWh/m<sup>3</sup>)

$C_{\text{Electrodo}}$ : Corresponde al consumo del electrodo

$C_i$ : Corresponde a los costos iniciales de electrodos (kg/m<sup>3</sup>)

El consumo de energía se determina mediante la siguiente ecuación:

$$C_{\text{Energía}} = \frac{V * I * t}{V_p} \quad (7)$$

Donde,

$V$ : Corresponde al voltaje aplicado a la celda (V)

$I$ : Corresponde a la intensidad de corriente (A)

$t$ : Corresponde al tiempo de proceso (h)

$V_p$ : Corresponde al volumen de agua residual a tratar (m<sup>3</sup>)

El consumo del electrodo viene dado mediante la siguiente ecuación:

$$C_{\text{Electrodo}} = \frac{I * t * M_w}{Z * F * V_p} \quad (8)$$

Donde,

$M_w$ : Corresponde al peso molecular del electrodo

$Z$ : Corresponde al número de electrones en la reacción

$F$ : Corresponde a la constante de Faraday (96487 C/mol)

Y los costos iniciales de electrodos se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$C_{ix} = \left( \frac{n_{el}}{2} (A_e * H_e * e_e) \right) * \rho_x \quad (9)$$

Donde,

$n_{el}$ : número de electrodos en el reactor.

$A_e$ : Ancho de los electrodos

$H_e$ : Altura de los electrodos

$e_e$ : Espesor de los electrodos

$\rho_{Fe}$ : Densidad del material del electrodo



### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 Métodos de remoción de nitratos en fuentes hídricas

A través de la bibliografía, se clasifica la información permitiendo de esta manera tener un criterio de selección para el método de remoción de nitratos sobre la fuente hídrica del río Subachoque; para esto se han seleccionado variables de interés que corresponden a temperatura, presión, % de remoción, selectividad, caudal, concentración y pH. Estas mismas son determinantes como factores de operación que condicionaran el proceso, aumentan o disminuyen la efectividad del mismo, para finalmente obtener un resultado significativo en el tratamiento de remoción de nitratos sobre esta fuente hídrica.

**Tabla 6.**

*Análisis bibliográfico para el método de intercambio iónico*

Artículo	Factores de interés						
	Temperatura (°C)	Presión (atm)	Remoción %	Selectividad	Caudal (mL/h)	Concentración (mg/L)	pH
<i>Bimetallic Pd-Cu catalysts</i>	20-22	1	45	1	480	100	5,3
<i>Taguchi experimental design techniques</i>	-	1	95	0,61	-	33	-
<i>Iron synthesis supported by cation exchange resin</i>	20-40	1	-	0,81	-	50	4-6
<i>A combined treatment method of novel Mass Bio System</i>	28	1	98,7	-	2500	30	-
<i>Standard anion exchange resin</i>	-	1	38	-	-	200	-
<i>Comparative study of nanofiltration and ion exchange</i>	20	5,05	96	-	710000	48	7,2

<i>Hybrid nitrate selective resin</i>	-	1	90	-	-	100	7
<i>Conducting polyaniline</i>	20	1	78	-	-	150	6.5
<i>Taguchi method</i>	22	1	86	-	-	20	7

**Nota.** Esta tabla muestra la clasificación bibliográfica del método de remoción según variables específicas.

**Tabla 7.**

*Análisis bibliográfico para el método de osmosis inversa.*

Artículo	Factores de interés						
	Tempera-tura (°C)	Presión (atm)	Remoción %	Selectividad	Caudal (mL/h)	Concentración (mg/L)	pH
<i>Nitrate removal with reverse osmosis</i>	20	2,2 7	97,8	-	5,10E+0 6	42,5	7
<i>Nanofiltration to groundwater</i>	25	26, 6	98	-	-	100	2-8
<i>Hybrid nanofiltration–reverse osmosis scheme</i>	24	9,8 6	91,6		6,00E+0 5	20,3	7,2
<i>Chlorine radical on 3D Co3O4 nanowires anode</i>							
<i>Effects of Ca<sup>2+</sup> on nitrogen removal</i>	-	3,2	100	-	2000	55	7
<i>Treatments of wastewater nanomembranes</i>	25	4,9 3	27	-	-	1000	9
<i>Comparison between nitrate and pesticide removal using adsorbents and membranes</i>	280	14, 8	94,4	-	-	78,2	7,58

**Nota.** Esta tabla muestra la clasificación bibliográfica del método de remoción

**Tabla 8.***Análisis bibliográfico para el método de electrocoagulación*

Artículo	Factores de interés						
	Temperatura (°C)	Presión (atm)	Remoción %	Selectividad	Caudal (mL/h)	Concentración (mg/L)	pH
<i>Batch and continuous flow hybrid Fe-electrocoagulation and electrooxidation system</i>	25	-	90	-	480	69	7,8
<i>Nitrate removal from groundwater by electrocoagulation</i>	20	-	94,1	-	-	90,11	6,7 9
<i>Removal of nitrates using a cell with horizontally oriented Al serpentine tube anode</i>	30	-	85,5	-	2000	100	7
<i>Economic and environmental approaches through RSM</i>	20	-	76,67	-	4800	150	6
<i>A techno-economic optimization</i>	20	-	82,26	-	-	120	7
<i>Simultaneous removal of nitrate and nitrite using electrocoagulation</i>	20	-	-	-	3700	450	7
<i>Electrochemical treatment on BDD electrodes for simultaneous removal of nitrates</i>	25	-	75	-	1800	350	7

<i>Assessment of electrocoagulation based on nitrate removal</i>	20	-	80	-	1000	200	7
<i>Optimization of anaerobic digester effluent by electrocoagulation process</i>	20	-	66,32	-	-	900	6,8 3

**Nota.** Esta tabla muestra la clasificación bibliográfica del método de remoción según variables específicas.

Con la clasificación de la información, permite realizar una comparativa entre los métodos seleccionados para la remoción de nitratos, además de con dicha información tener una muestra representativa que permite evidenciar el desarrollo de los tres procesos en cuestión. Esta información es el punto de partida para la realización de la matriz PUGH descrita en la tabla 9.

Para la creación de la matriz que se muestra en la tabla 9, los criterios son los métodos de remoción de nitratos propuestos son todos los que tienen relación con los tres métodos y los conceptos.

**Tabla 9.**

*Matriz de decisión PUGH selección del método de remoción.*

		Métodos de remoción		
		Intercambio iónico	Ósmosis inversa	Electrocoagulación
<b>Criterios</b>	Temperatura (°C)	0	0	1
	Presión (atm)	1	- 1	1
	% Remoción	1	1	1
	Selectividad	1	1	0
	Caudal (mL/h)	-1	1	-1
	Concentración (mg/L)	-1	- 1	1
	pH	1	1	1
<b>Total</b>		2	2	4

**Nota.** La denotación de calificación se encuentra escrita en la metodología de la matriz PUGH.

Este método de calificación está netamente ligado a los procesos descritos en la literatura, cada variable delimita de manera considerable el sistema, su tratamiento y acondicionamiento.

De esta manera se busca que el proceso sea eficiente y eficaz para lo cual se tienen diferentes consideraciones.

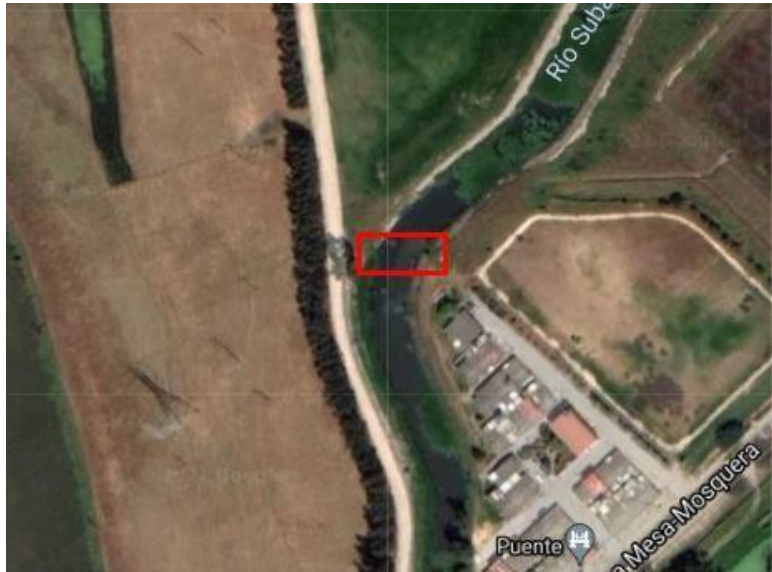
Para finalmente establecer que la electrocoagulación como resultado es ventajosa por su simplicidad, fácil automatización, alta eficiencia y una relación de costo beneficio bastante considerable. [79]

### **3.2 Caracterización del contenido de nitrógeno en el río Subachoque**

El día 12 de noviembre del presente año se tomó una muestra de 1.5 Litros de agua proveniente del río Subachoque; en la figura 13 se muestra la ubicación del punto de donde se realizó la recolección de la muestra se encuentra a una latitud  $4^{\circ}41'06.1''N$  y longitud  $74^{\circ}15'23.7''W$ , en el municipio de Mosquera, Cundinamarca.

**Figura 13.**

*Localización del punto de recolección de la muestra.*



**Nota.** La figura representa el ciclo PHVA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar). Tomado de: Google Maps, “Río Suba, Mosquera Cundinamarca”, [En Línea]. Disponible: <https://www.google.com/maps/place/Mosquera,+Cundinamarca/@4.6846296,-74.2565931,367m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x8e3f77f6d0345135:0x68a03bc533af55ae!8m2!3d4.6802367!4d-74.2296713?hl=es> [Acceso: nov.25,2021]

Posteriormente se llevó a un laboratorio donde se realizaron las pruebas de los parámetros fisicoquímicos: nitrógeno amoniacal, nitratos, nitritos, pH, conductividad, nitrógeno orgánico, nitrógeno total, con un tipo de muestreo simple según el Standart Methods for the examination of wáter and wastewater edición del 2017 cuyos resultados se muestran en la tabla 10.

**Tabla 10.***Caracterización de la muestra de la fuente hídrica del río Subachoque*

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidades</b>
Nitrógeno amoniacal	14,1	mg/ L N
Nitrato	7,8	mg/ L N-
Nitrito	0,010	NO3mg/ L N-
pH	7,01	NO2
Conductividad	1010	unidad
Nitrógeno Kjeldahl	27,2	us/cm
Nitrógeno orgánico	13,1	mg/ L
Nitrógeno total	35,004	Nmg/ L mg/ L N

**Nota.** Esta tabla muestra los resultados del laboratorio obtenidos de la muestra del río Subachoque. Tomado de: HIDROLAB, Informe de ensayo.

El agua se caracteriza por tener una temperatura de 19,9°C, El pH se encuentra en un rango de 7 – 7,01, estos vertimientos presentan un color café oscuro, mal olor y contiendo de solidos sedimentables y suspendidos adicionalmente los parámetros fisicoquímicos se encuentran dentro de los valores mencionados a continuación nitrógeno amoniacal igual a 14,1 mg/L N, nitrato igual a 7,8 mg/ L N-NO3, nitrito menor a 0,010 mg/ L N-NO2, conductividad de 1010 us/cm, Nitrógeno Kjeldahl de 27,2 mg/ L N, nitrógeno orgánico 13,1 mg/ L, y finalmente nitrógeno total 35,004 mg/ L N.

Los niveles de contaminación para el río Subachoque abarcan mucho más que la cantidad de nitratos encontrados por la caracterización fisicoquímica realizada por el laboratorio Hidrolab, en la que encontramos que en comparación a la normativa colombiana con el decreto 2115 de 2007 en comparación a agua potable está muy por encima del límite permitido, remontándonos a normatividad internacional con el real decreto 817 de 2015 para aguas de uso agrícola también encontramos que excede los niveles de parámetros permitidos.

Mas aun encontramos estudios realizados sobre el estado de esta cuenca hídrica para

uso de potabilización en los niveles por encima de la normativa de varios parámetros fisicoquímicos. Este estudio lo encontramos descrito en la tabla 1.

**Tabla 11.**

*Estudios fisicoquímicos del río Subachoque.*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Agua cruda</b>	<b>Valor límite de agua potable</b>
Color	UPC	100	15
Conductividad	μS/cm	956,6	1000
Turbidez	NTU	66,8	2
Alcalinidad total	mg/L	475,2	200
Dureza total	mg/L	90	300
Oxígeno disuelto	mg/L	6	-
pH	-	5,62	6,5-8,5
Material flotante		PRESENTE	AUSENTE
Solidos totales	mg/L	141	200
Solidos suspendidos totales			
<b>Metales</b>			
Cadmio	mg/L	0,02	0,003
Cromo total	mg/L	0,1	0,05
Zinc	mg/L	5	3
Plomo9	mg/L	0,2	0,01
Níquel	mg/L	1	0,02
Cobre	mg/L	10	1
Calcio	mg/L	55	60

**Nota.** Esta tabla muestra los niveles de contaminación alternos a nitrato presentes en el río Subachoque. Tomado de: Evaluación de parámetros físico-químicos del agua en el proceso de potabilización del río Subachoque.



De igual manera se tiene apreciaciones de la CAR sobre lo que corresponde a esta cuenca hídrica, donde se indica la mala calidad del agua corresponde a la falta de tratamientos de las aguas residuales [80]. Esta misma autoridad ambiental pone en evidencia que la mayor actividad económica corresponde a la agricultura, y es esta misma la mayor causante del agotamiento de la calidad hídrica de la zona por su explotación intensiva. [80]

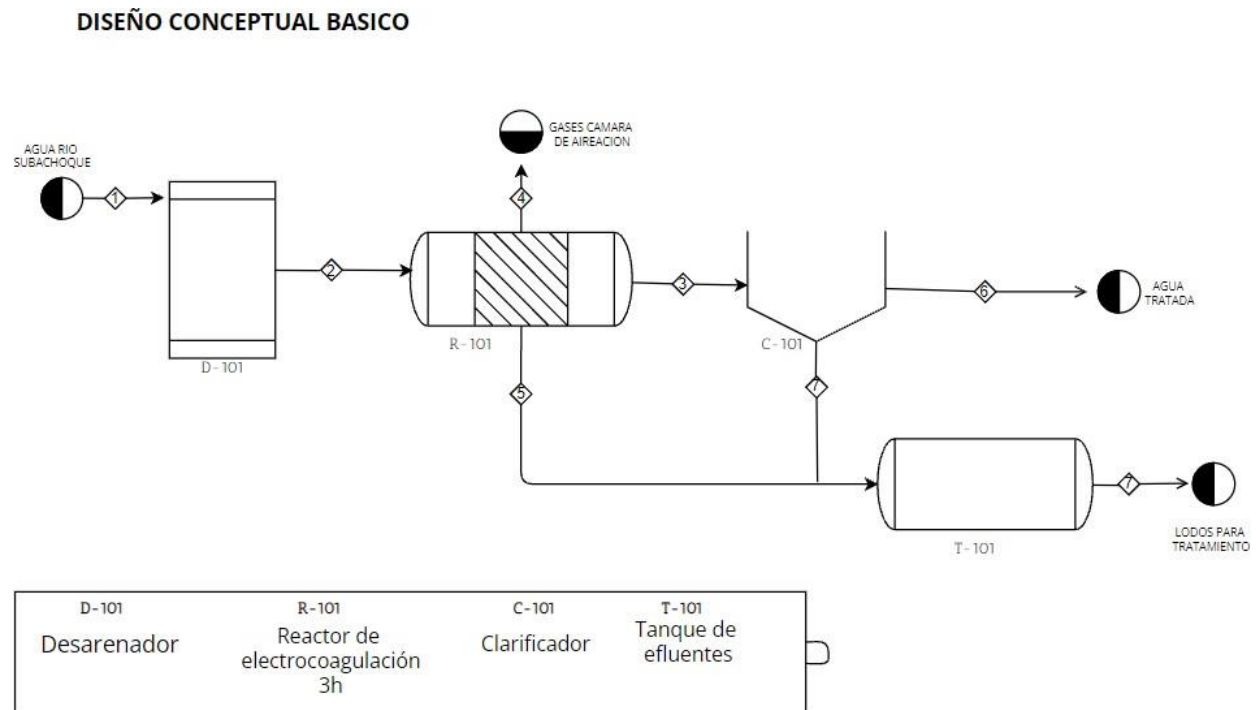
Las condiciones de la cuenca hídrica hacen que el agua proveniente de la misma este catalogada como no apta para la agricultura. [80]

### **3.3 Propuesta de un proceso químico para la remoción de exceso de nitratos presentes en la fuente hídrica del río Subachoque.**

Conforme a la Tabla 9 correspondiente a la matriz PUGH, queda determinado que la tecnología a utilizar es el método electrocoagulación, por lo cual se procede al diseño conceptual básico del proceso que estará sustentado en dos operaciones unitarias ejecutadas en pretratamiento y postratamiento, diseño que estará conceptualizado en la figura 14.

**Figura 14.**

*Diseño conceptual de electrocoagulación.*



**Nota.** La figura muestra el diagrama de proceso para el método de electrocoagulación.

Como operación complementaria para el proceso de electrocoagulación, en la etapa de pretratamiento se utiliza un desarenador, el cual corresponde a un tanque que tiene como objetivo la sedimentación de material particulado y en suspensión por efecto de la gravedad. [81]

Para la etapa de postratamiento se utiliza un clarificador bajo el concepto de producir un efluente con baja cantidad de sólidos suspendidos y generar un lodo espeso en caso de aun tener altos niveles del mismo en este punto de tratamiento, este proceso se ejecuta por de los principios de sedimentación [82]. Con esta última operación se está desplazando aun en mayor proporción el material anódico disuelto en el efluente del reactor y llevándolo a la formación de lodos, esto evita la liberación de grandes cantidades de iones  $Fe^{3+}$  en el agua tratada, evitando su proliferación.

### 3.3.1 Área de interés

Con el fin de delimitar los factores y condiciones de operación para el proceso de electrocoagulación para la remoción de nitratos, se establece que el producto del proceso será suministrado en las zonas rurales aledañas a la cuenca hídrica del río Subachoque en el municipio de Mosquera.

La geografía rural del municipio se encuentra dividida en seis zonas veredales; San Jorge, Siete Trojes, Serrezuelita, San Francisco, San José, Balsillas. La extensión de cada una de estas se encuentra descrita en la Tabla 12.

**Tabla 12.**

*Extensión geográfica del municipio de Mosquera.*

<b>Vereda</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>
San Jorge	2,63
Siete Trojes	0,612
Serrezuelita	9,59
San Francisco	13,01
San José	37,52
Balsillas	35,96

**Nota.** Esta tabla muestra el área en km<sup>2</sup> de cada vereda del municipio de Mosquera.

Dada la ubicación geográfica de la cuenca hídrica del río Subachoque presentada en la Figura 1, y de acuerdo a la ubicación espacial de las veredas del municipio, queda definida la vereda San José como zona de interés.

### 3.3.2 Caudal de tratamiento

Para determinar la cantidad de agua requerida en el proceso, se realiza la estimación a partir de suposiciones que tomaran lugar sobre el área de interés, el caudal de tratamiento viene dado por la siguiente ecuación:

$$C_t = A_i \times R_h \quad (10)$$

C<sub>t</sub>: Caudal de tratamiento.

A<sub>i</sub>: Área de interés.

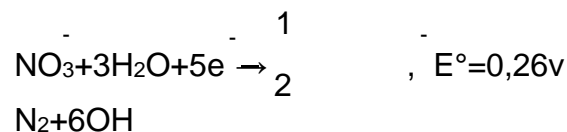
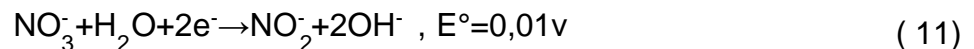
R<sub>n</sub>: Requerimiento hídrico.

Conforme a la zona de interés, el agua como resultado de tratamiento puede ser ampliamente utilizada en el sector de la agricultura, el municipio cuenta con amplias plantaciones de diferentes especies entre las que destacan maíz, papa, repollo, lechuga. [83]. Es así que para fines de este estudio se define como especie de interés el cultivo de la lechuga, y se determina que se suplirá la demanda anual hidrológica del mismo; de modo tal que para la misma tenemos área de 240Ha con una demanda de 600mm/año de agua [83] [84]. Por tanto, queda definido el caudal de tratamiento como:

$$C_t = 240000 \text{m}^2 * 0,6 \frac{\text{m}}{\text{año}}$$
$$C_t = 144000 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$
$$C_t = 144000 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} * \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ día}} * \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ s}} * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}$$

$$C_t \approx 4,57 \frac{\text{L}}{\text{s}} -$$

Para el proceso de electrocoagulación se presentan las siguientes ecuaciones redox:

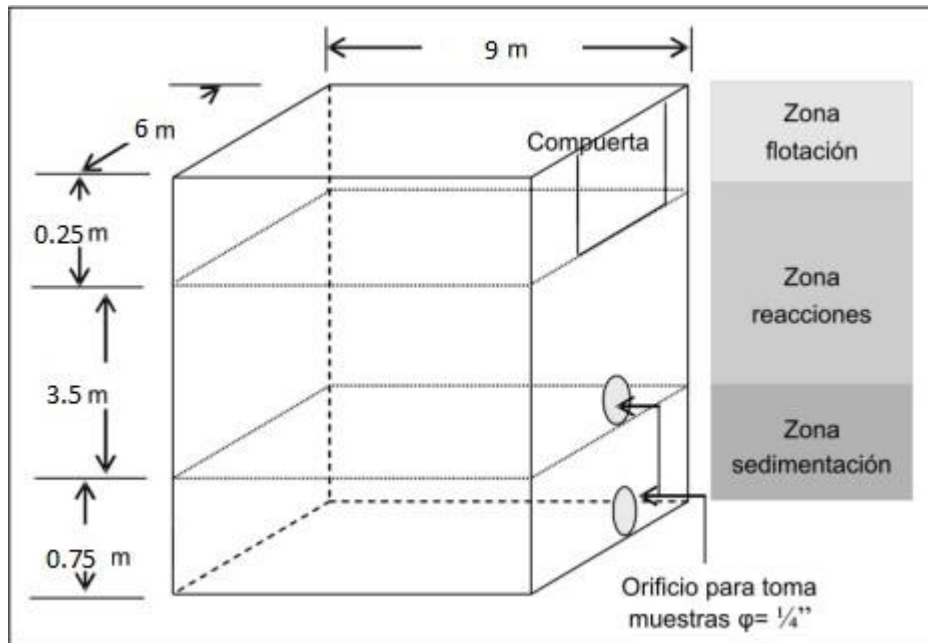


### 3.3.3 Diseño de reactor

Para dimensionar el reactor, se tuvo en cuenta que el proceso de electrocoagulación internamente se desarrolla en tres zonas; flotación, reacción, sedimentación [85]. Por tanto, la distribución interna del reactor está compuesta como lo describe la Figura 15.

**Figura 15.**

Distribución interna del reactor.

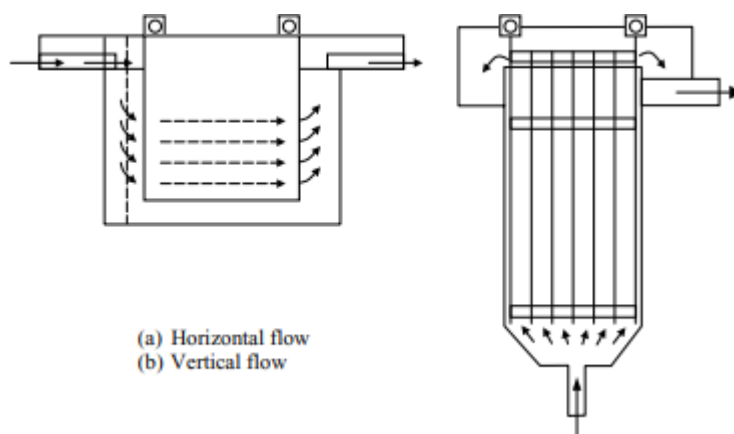


**Nota.** La figura muestra gráficamente las dimensiones y distribuciones de una celda de electrocoagulación. Tomado de:

Con el fin de cumplir con la demanda de caudal de tratamiento diario que corresponde a  $394,85\text{m}^3$ , el proceso de electrocoagulación estará compuesto de dos reactores tipo batch operando en paralelo con la misma descripción de la figura 7. Los reactores tipo batch para sistemas de electrocoagulación presentan una geometría vertical u horizontal [86], tal como lo describe la figura 8.

**Figura 16.**

*Tipo de reactores batch para electrocoagulación.*



**Nota:** Orientación de flujo de alimentación para reactores de electrocoagulación. Tomado de: *“Electrochemical technologies in wastewater treatment”*. [En Línea]. Disponible: [https://www.jpcomplex.ir/content/media/image/2013/08/772\\_orig.pdf](https://www.jpcomplex.ir/content/media/image/2013/08/772_orig.pdf) [Acceso: dic.05,2021]

Los valores de las dimensiones longitudinales para cada reactor se encuentran en la tabla 13 junto con su notación.

**Tabla 13.**

*Dimensiones para cada reactor.*

<b>Dimensiones</b>	<b>Unidad (m)</b>	<b>Notación</b>
Alto	4,5	H
Largo	9	l
Ancho	6	A
Zona floculante	0,25	f
Zona sedimentación	0,75	s
Nivel del agua	4,25	H
Espesor de pared	0,025	e <sub>p</sub>

**Nota.** Esta tabla muestra las dimensiones del reactor de electrocoagulación de acuerdo al volumen de agua a tratar.

A partir de las dimensiones de la tabla 21 se aplican tres ecuaciones:

$$V_t = H * l * a \quad [87] \quad (12)$$

$$V_i = (H - 2e_p) * (l - 2e_p) * (A - 2e_p) \quad [87] \quad (13)$$

$$V_e = h * l * a \quad [87] \quad (14)$$

Donde,

V<sub>t</sub>: Volumen total

V<sub>i</sub>: Volumen interno

V<sub>e</sub>: Volumen efectivo

i. Cálculo para la determinación del volumen total del reactor

$$V_t = 4,5m * 9m * 6m$$

$$V_t = 243m^3$$

ii. Calculo para la determinación del volumen interno del reactor

$$V_i = (4,5m - 0,05m) * (8m - 0,05m) * (6m - 0,05m)$$

$$V_i = 237m^3$$

i. Calculo para la determinación del volumen efectivo del reactor

$$V_e = 4,25m * 8m * 6m$$

$$V_e = 229,5m^3$$

### 3.3.4 Elección del par de electrodos.

La elección del par de electrodos ánodo cátodo, se determinó a partir de estudios reportados en la literatura, descritos en la Tabla 14.

**Tabla 14.**

*Estudio comparativo de remoción de nitratos por electrocoagulación.*

Tipos de agua residual	Electrodos	Óptimas condiciones	NO <sub>3</sub> - Remoción (%)
Agua residual sintética	Al/Al	I= 2.5 A Ci = 200mg/L pH= 9 t= 90 min	88,89
Agua residual sintética	Al/Al	I= 4.5 A Ci = 200mg/L pH= 7 t= 120 min	75,39
Agua residual sintética	Al/Fe	j= 25 mA/cm <sup>2</sup> Ci = 443 mg/L pH= 7 t= 180 min	92
Agua residual sintética	Fe/Fe	j= 25 mA/cm <sup>2</sup> Ci = 443 mg/L pH= 7 t= 180 min	80
RO Agua residual	Al/Al	j= 10 mA/cm <sup>2</sup> Ci = 200mg/L pH= 7	66,59



Agua residual sintética	Al/Al	t= 240 min	77,66
		j= 21 mA/cm <sup>2</sup>	
		Ci = 111 mg/L	
		pH= n.d.	
Agua residual sintética	Al/Al	t= 45 min	73,8
		j= 1.64 mA/cm <sup>2</sup>	
		Ci = 120mg/L	
		pH= 8,73	
		t= 33 min	

**Nota.** Esta tabla hace una comparativa entre los pares de electrodos, demostrando su eficacia en la remoción de nitratos bajo condiciones óptimas de operación. Tomado de: *Journal of Environmental Chemical Engineering*, [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104292> [Acceso: nov. 14, 2021].

Como resultado se seleccionó el par de electrodos Al/Fe por los niveles de remoción de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> presentados donde alcanzan un 92% de efectividad, correspondiendo a Fe como ánodo y Al como cátodo.

Una vez aplicada una diferencia de potencial entre los mismos a partir de una fuente de alimentación dará inicio al proceso de electrocoagulación, dando lugar a la formación de sustancias coagulantes y gases, tal que así se genera la sedimentación de flóculos y la flotación de los lodos al interior del reactor.

Su dimensionamiento viene directamente ligado a las proporciones del reactor presentadas en la tabla 21, las cuales se plantean en base a cuatro ecuaciones:

$$H_e = H - f - s \quad (15)$$

$$A_e = A - 2e \quad (16)$$

$$n_{cel} = \frac{l - 2e}{e_e + d} \quad (17)$$

$$V_e = n_{cel} * H_e * A_e * e_{el} \quad (18)$$

H<sub>e</sub>: Altura de los electrodos

A<sub>e</sub>: ancho de los electrodos

Para hallar las dimensiones del electrodo, es importante conocer ya las dos zonas restantes del interior del reactor, de esta manera las proporciones de los electrodos para la zona de reacción salen por diferencias longitudinales, de esta manera se llega a los resultados expresados en la tabla 15.

El distanciamiento de los electrodos se relaciona de manera directa con la caída de potencial, de esta manera entre mayor es la distancia entre las placas aumenta el consumo de energía. Entre menor es su distanciamiento los gases que se generan electroquímicamente, conducen a altas transferencias de masa, velocidad de reacción alta entre coagulantes y contaminante. [88]

**Tabla 15.**

*Dimensiones de electrodo.*

<b>Dimensiones</b>	<b>Unidad (m)</b>	<b>Notación</b>
Alto	3,5	He
Ancho	6	Ae
Espesor	0,003	e <sub>el</sub>

**Nota.** La anterior tabla muestra las dimensiones del electrodo a usar.

Determinación del número de electrodos en el reactor:

$$n_{el} = \frac{9m - (2 \cdot 0,05m)}{0,003m + 0,03m}$$

$$n_{el} \approx 270 \text{ celdas}$$

Determinación de volumen ocupado por los electrodos:

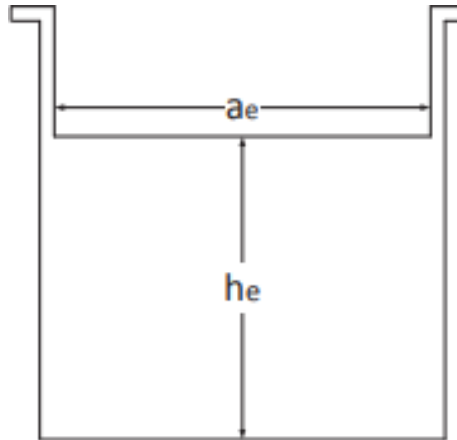
$$V_e = 270 \cdot 3,5m \cdot 6m \cdot 0,003m$$

$$V_e = 17,01m^3$$

Las dimensiones para los electrodos especificadas en la tabla 23, se pueden evidenciar en la figura 9. en la que se observa sus proporciones longitudinales. Bajo estas proporciones estará construida toda la celda de electrocoagulación con una configuración en paralelo de ánodo cátodo.

**Figura 17.**

*Esquema del diseño de electrodos metálicos.*



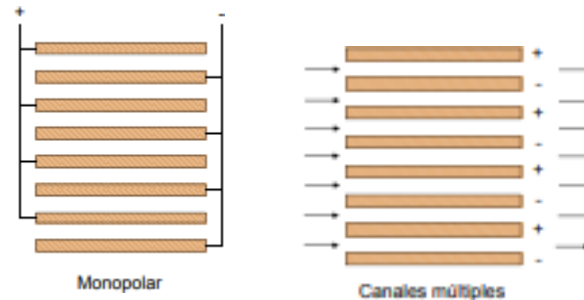
**Nota.** La figura representa la distribución longitudinal de los electrodos. Tomado de: Dimensionamiento de un sistema de electrocoagulación aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas, con y sin radiación de electrones acelerados. [En línea] Disponible: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7062/1/CD-5249.pdf> [Acceso: nov. 16, 2021].

La disposición final de los electrodos está determinada para trabajar de manera monopolar con canales de flujo múltiples, en consecuencia, las celdas de electrocoagulación requieren de un mayor consumo energético, un factor indiferente en función de que el porcentaje de reducción del contaminante es mayor, esto acompañado

de canales múltiples que garantizan el flujo libre de la carga en tratamiento. [86]

**Figura 18.**

*Disposición de electrodos y orientación de flujo.*



**Nota.** La figura representa la configuración de disposición de los electrodos al interior del reactor. Tomado de: Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales, [En línea]. Disponible:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62020825009> [Acceso: nov. 16, 2021].

### 3.3.5 Densidad de corriente

La densidad de corriente delimita la cantidad de hidróxido formado, afectando la cantidad y tamaño de floculo generados, de igual manera tienen una relación directamente proporcional en función de la remoción de contaminantes. [89]

Bajo la literatura y su descripción en la Tabla 19, la densidad de corriente del sistema está definida como  $25\text{mA}/\text{cm}^2$  o lo que es igual a  $250\text{ A}/\text{m}^2$ .

Con la ecuación de densidad de corriente, descrita como:

$$D_{\text{corr}} = \frac{I}{A} \quad [89] \quad - \quad (19)$$

A: Área de electrodo

$D_{\text{corr}}$ : Densidad de corriente

I: Intensidad de corriente eléctrica

Se obtiene el valor de la intensidad de corriente que dará como resultado la cantidad de energía necesaria para la operación del sistema de electrocoagulación.

$$I = D_{\text{corr}} * (H_e * A_e) \quad [89] \quad (20)$$

Cálculo de intensidad de corriente eléctrica del sistema de electrocoagulación.

$$I = 250 \frac{\text{A}}{\text{m}^2} * (6\text{m} * 3,5\text{m})$$
$$I = 5250 \text{ A}$$

Con estos parámetros de diseño definidos queda estipulado bajo la información establecida en la Tabla 16 y Tabla 22 el porcentaje de remoción de nitratos, que oscilara entre un mínimo de 66,32% hasta un máximo de 92%.

Teniendo en cuenta que las condiciones de operación se definieron con respecto al sistema referenciado por Briton [90], se espera que el valor real de remoción este cerca al 92%, cabe resaltar que, aunque la concentración de nitrato no fue la más alta en el punto de muestra el sistema está diseñado para soportar una concentración inicial de hasta 443 mg/L  $\text{NO}_3^-$  Conforme al fundamento de la tabla 20.

Respecto al nivel medio de contaminación por  $\text{NO}_3^-$  encontrado tras el análisis de las propiedades fisicoquímicas de la muestra se resaltan factores importantes:

3.3.5.a El dimensionamiento de caudal de tratamiento inicial está diseñado para suplir una demanda hidrológica en el sector de la agricultura, tras tratar esta fuente hídrica con niveles medios de contaminación por  $\text{NO}_3^-$  se llega a una concentración eficiente para el aprovechamiento de los cultivos, evitando así una posible posterior lixiviación que contamine acuíferos subterráneos.

3.3.5.b La electrocoagulación no es únicamente un método para remoción de nitratos, también cuenta con la ventaja que a su vez está removiendo metales pesados (hierro, níquel, cobre, zinc, plomo, cadmio, mercurio), color, DBO [], por lo cual es un efecto agregado a la implementación del sistema para el tratamiento de la cuenca hídrica del río Subachoque.

3.3.5.c Conforme al apartado b y la concentración presente de  $\text{NO}_3^-$  en la muestra, se puede obtener una caracterización total tras la remoción, tal así, que se pueda comparar con las concentraciones recomendadas para consumo humano establecida por la resolución 2115 de 2007.

## 4. PROYECCIÓN DE COSTOS DEL SISTEMA

La estimación de los costos del proceso incluye los costos de instalación que comprenderán el diseño de equipos eléctricos y los costos iniciales para los electrodos, los costos operativos que incluyen el consumo energético del proceso y la reposición de electrodos durante la operación.

### 4.1 Costos de instalación

Los gastos de instalación incluyen todos los costos asociados a la preparación de la infraestructura y los servicios de acuerdo con las necesidades operativas. Son los que corresponden al valor de las cantidades iniciales de electrodos y la fuente de alimentación representado por la siguiente ecuación:

Costo de instalación=

$C_{iFe} + C_{iAl} + \text{Fuente}$  Cálculo para cantidades iniciales de electrodos.

$$C_{ix} = \left( \frac{n_{el}}{2} (Ae * He * e_e) \right) * \rho_x \quad (21)$$

$n_{el}$ : número de electrodos en el reactor.

$Ae$ : Ancho de los electrodos

$He$ : Altura de los electrodos

$e_e$ : Espesor de los electrodos

$\rho_x$ : Densidad del material del electrodo

$$C_{iFe} = \left( \frac{n_{el}}{2} (Ae * He * e_e) \right) * \rho_{Fe} \quad (22)$$

$$C_{iFe} = \left( \frac{270}{2} (6m * 3,5m * 0,003m) \right) * 7877 \frac{kg}{m^3}$$

$$C_{iAl} = \left( \frac{n_{el}}{2} (Ae * He * e_e) \right) * \rho_{Al} \quad (23)$$

$$Ci_{Fe} = \left( \frac{270}{2} (6m * 3,5m * 0,003m) \right) * 2700 \frac{kg}{m^3}$$

Para la Fuente de alimentación se tomó como referencia el generador “DC current generator balto” [91], que cumple ampliamente con la intensidad de corriente necesaria, el costo de la misma no está especificado, pero se encuentra un valor aproximado de 100,000 USD según Guanoluiza [89].

**Tabla 16.**

*Cantidad inicial de material de electrodo*

Material	Cantidad inicial (Kg)	Precio por Kg	Total
Fe	66993,89	3731	\$ 249.954.203,59
Al	22963,5	4500	\$ 103.335.750,00
<b>Total</b>			<b>= \$ 353.289.953,59</b>

**Nota.** La tabla representa las cantidades iniciales de material necesario para el dimensionamiento de los electrodos.

De esta manera el costo de instalación es igual a:

$$\text{Costo de instalación} = Ci_{Fe} + Ci_{Al} + \text{Fuente}$$

$$\text{Costo de instalación} = 249.954.203,59 + 103.335.750 + 400.000.000$$

$$\text{Costo de instalación} = \$ 753. 289. 953, 59$$

## 4.2 Costo operativo

Los costos operativos son la evaluación los recursos utilizados o los costos requeridos para el proceso. Corresponden al consumo energético del proceso y la reposición de electrodos durante la operación. Se calculan mediante la siguiente ecuación:

**Nota:** No está incluido el costo de mano de obra.

$$\text{Costo operativo} = C_{Energía} + C_{Electrodo}$$

Calculo para el consumo energético el proceso.

$$C_{Energía} = \frac{V * I * t}{V_p} \quad (24)$$



V: Voltaje

I: Intensidad

T: Tiempo

Vp: Volumen Procesado

$$C_{\text{Energía}} = \frac{V \cdot I \cdot t}{V_p} \quad (25)$$

$$C_{\text{Energía}} = \frac{3,76V \cdot 5250A \cdot 3h}{197,49m^3}$$

$$C_{\text{Energía}} = 0,299 \text{ kWh/m}^3$$

Este consumo de energía esta expresado por reactor, para cada metro cubico de agua tratada arrojando un total de:

$$C_{\text{Energía}} = 0,299 \text{ kWh/m}^3 * 733,1531 \frac{\$}{\text{kWh}} \quad [91]$$

$$C_{\text{Energía}} = 219,21 \frac{\$}{m^3}$$

Calculo de desgaste de electrodos:

$$W = \frac{I \cdot t \cdot M_{Fe}}{V_p \cdot Z \cdot F} \quad [78]$$

W: Cantidad de metal disuelto

I: Intensidad de corriente

t: tiempo

MFe: Masa molecular del hierro

Vp: Volumen de agua procesada

Z: Numero de electrodos para la reacción de óxido-reducción

F: Constante de Faraday: 96500 C/mol

$$W = \frac{5250 \text{ A} \cdot 180 \text{ min} \cdot 55,85 \text{ g/mol}}{197,49 \text{ m}^3 \cdot 2 \cdot 96500 \text{ C/mol}}$$

$$W = 1,38 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

Teniendo en cuenta que el valor por tonelada métrica de hierro en Colombia corresponde a \$3'731.000 el valor final de reposición de electrodos es:

$$C_{\text{Rel}} = 1,38 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot 3731 \frac{\$}{\text{Kg}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}$$

$$C_{\text{Rel}} = 5,148 \frac{\$}{\text{m}^3}$$

Con base en la información anterior, los costos de operación son:

$$\text{Costos operativos} = C_{\text{Energía}} + C_{\text{Electrodo}}$$

$$\text{Costos operativos} = 219,21 \frac{\$}{\text{m}^3} + 5,148 \frac{\$}{\text{m}^3}$$

$$\text{Costos operativos} = 224,36 \frac{\$}{\text{m}^3}$$

Por último, dado que el costo total del proceso está en función de la cantidad de agua residual a tratar, el costo del tratamiento de la totalidad del efluente debe determinarse en función de los materiales a utilizar en el proceso de fabricación con dimensiones adecuadas al volumen de agua y de las tarifas energéticas vigentes en el municipio de Mosquera cada mes.

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados de la revisión bibliográfica revelan que el método de electrocoagulación descrito en este trabajo reduce significativamente la cantidad de contaminantes de forma porcentual, dando como resultado un valor máximo para remoción de nitratos de 92%.

El sistema de electrocoagulación promueve la remoción de más de una sustancia contaminante de la fuente de captación, bajo condiciones de operación que garantizan la correcta ejecución de la naturaleza del proceso, para así, liberar fluidos a la atmosfera o bajo la formación de lodos inocuos y compactos.

La caracterización fisicoquímica obtuvo como resultado una concentración de 34,54mg/L  $\text{NO}_3^-$  en la muestra de agua del río Subachoque, sin embargo, el proceso está diseñado para trabajar a concentraciones con niveles más elevado.

El diseño de proceso permitió obtener como resultado un sistema de electrocoagulación con altos niveles de efectividad para la remoción de nitratos, generando un efluente con una carga menor promoviendo una adecuada metabolización de la misma en usos agrícolas, denegando la propagación inadecuada de la sustancia en suelos y acuíferos pertenecientes a este sector económico.

El método de electrocoagulación tuvo un costo total de \$219,212 por metro cubico de agua tratada, según la estimación de costos, se basa en los precios de los materiales y los gastos operativos, siendo la energía la mayor parte debido a las demandas del sistema y las tarifas utilizadas en el municipio de Mosquera.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Organización de las Naciones Unidas, «Decenio Internacional para la acción "El agua, fuente de vida",» 2011. [En línea]. Available: [http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/green\\_economy\\_2011/pdf/info\\_brief\\_water\\_and\\_industry\\_spa.pdf](http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/green_economy_2011/pdf/info_brief_water_and_industry_spa.pdf). [Último acceso: 30 Agosto 2021].
- [2] M. Villanueva, «Universidad Autónoma de Nuevo León,» 2011. [En línea]. Available: <http://eprints.uanl.mx/2923/1/1080211186.pdf>. [Último acceso: 30 Agosto 2021].
- [3] Alcaldía de Mosquera, «Sitio oficial de Mosquera en Cundinamarca Colombia,» 2015 diciembre 20. [En línea]. Available: [https://web.archive.org/web/20151220090018/http://www.mosquera-cundinamarca.gov.co/informacion\\_general.shtml#economia](https://web.archive.org/web/20151220090018/http://www.mosquera-cundinamarca.gov.co/informacion_general.shtml#economia). [Último acceso: 22 Enero 2021].
- [4] C. Population, «Mosquera - Población,» [En línea]. Available: <http://poblacion.population.city/colombia/mosquera/>. [Último acceso: 25 Enero 2022].
- [5] A. d. Mosquera, «Ficha estadística municipal,» *Dirección de Prospectiva y*, 2020.
- [6] UNESCO, «Agua de la vida,» 2003. [En línea]. Available: <https://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/water/WWDR-spanish-129556s.com>. [Último acceso: 30 Agosto 2021].
- [7] U. Hernandez Alvarez, J. Hernandez Pinedo, R. Paternina Uribe y J. Marrugo Negrete, «Water quality assessment in Quebrada Jui, tributary of the Sinú river, Colombia,» *Actualidad & divulgación científica*, vol. 24, nº 1, pp. 2019-2551, Junio 2020.
- [8] L. Mendez, R. Rojas y N. Carrasco, «Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio,» *Instituto de Investigación*

FIGMMG. , 2004.

- [9] S. Arora y A. Kazmi, «The effect of seasonal temperature on pathogen removal efficacy of vermifilter for wastewater treatment,» *Water Research*, vol. 74, nº 2, pp. 88-99, 2015.
- [10] J. Silva, P. Torres y C. Madera, «Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura,» *Agronomía Colombiana*, vol. 16, nº 2, pp. 347-359, 2008.
- [11] L. D. MorilloSemanate, D. Naranjo Tovar, J. Pérez, W. Villacis Oñate, P. Vargas Jentsch y F. Muñoz Bisest, «Remoción de tensoactivos y coliformes en aguas residuales domésticas mediante procesos fenton,» *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, vol. 35, nº 4, pp. 0188-4999, Diciembre 2020.
- [12] A. Trapote Jaume, *Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas*, Segunda ed., Universidad de Alicante, 2013.
- [13] A. Vidales Olivo, M. Y. Leos Magalles y M. G. Campos Sandoval, «Extracción de Grasas y Aceites en los Efluentes de una Industria Automotriz.,» *Conciencia Tecnológica.*, vol. 40, p. 29, Diciembre 2010.
- [14] A. Muños-Cruz, «Caracterización y tratamiento de aguas residuales». Mexico 2008.
- [15] J. A. Romero-Rojas, *Calidad del agua*, 3ª ed., Escuela Colombiana de Ingeniería, 2009.
- [16] E. Pérez-López, «Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica,» *Tecnología en Marcha*, vol. 29, nº 3, Septiembre 2016.
- [17] A. A. Cajigas-Ceron, A. Perez-Vidal y P. Torres Lozada, «Importancia del ph y la alcalinidad en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extraccion de almidon de yuca,» *Scientia Et Technica*, vol. 11, nº 27, Abril 2005.

- [18] L. F. Londoño Franco, P. T. Londoño Muñoz y F. G. Muñoz Garcia, «Los riesgos delos metales pesados en la salud humana y animal,» *Biotecnoloía en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 14, nº 2, p. 145, 2016.
- [19] S. E. Pabón, R. Benítez, S.-V. R. A. y J. A. Gallo, «Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión,» *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 14, nº 27, p. 1, Enero 2020.
- [20] L. Ortega, «Contaminación de las Aguas,» Santiago Grisolia., Alicante, España. ,2015.
- [21] M. G. Chiliquina-Carvajal, «Estudio de la remocion electroquimica de anilina azul BR en aguas residuales industriales mediante la generacion in situ de ion ferrato,»Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2018.
- [22] D. Sánchez, «Calidad del agua en los ríos,» Universidad de Castilla, Castilla. , 2016.
- [23] C. B. Jiménez, J. Durán y J. M. Méndez, «El Agua en México: cauces y encauces,» *Jiménez C., M.L. Torregrosa y L. Aboites (Eds.)*., 2010.
- [24] D. Kolpin, D. Schnoebelen y E. M. Thurman, «Degradados dar una idea de las tendencias espaciales y temporales de los herbicidas en el agua subterránea.,» *Agua Subterránea*, vol. 42, pp. 601-608, 2004.
- [25] G. M.J., A. M. Soto, J. I. Usma y G. O. D., «Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos,» *Producción + Limpia*, vol. 7, nº 2, p. 52, 2012. Vol.7, No.2 - 52•73.
- [26] M. F. Fernandez y N. Olea, «Sustancias químicas y repercusión en la salud.Disruptores endocrinos,» *Congreso Internacional Salud y Hábitat*, 2006.
- [27] W. A. Sigler y J. Bauder, «Nitrato y Nitrito,» *Well Educated*.
- [28] C.-. Blancas-Cabello y E. Hervas-Ramirez, «Contaminacion de las aguas por nitratos y efectos sobre la salud,» *Consejería de Salud*, 2001.

- [29] P. M. e. a. Vitousek, «Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences,» *Ecological Applications*, vol. 7, pp. 737-750, 1997.
- [30] R. Calderón, «Evaluación de la comunidad de macro invertebrados bentónicos y la calidad fisicoquímica del agua en la parte alta de la quebrada El Carracá, del municipio de Los Santos,» Universidad Industrial de Santander, Colombia, 2004.
- [31] E. G. Iman, H. Mohamed, Abdel-Aziz, E.-A. El-Sayed Zakaria y S. Gomaa H, «Electrochemical removal of urea from wastewater by anodic oxidation using a new cell design: An experimental and modeling study,» *Seguridad de Procesos y Protección Ambiental*, vol. 159, pp. 133-145, 2022.
- [32] M. Fernandez y Y. M. Vasquez-Taset, «Origen de los nitratos y nitritos y su influencia en la potabilidad de aguas subterráneas,» *Minería Y geología*, vol. 22, nº3, 2006.
- [33] J. Figueruelo y M. Dávila, «Química física del ambiente y de los procesos medioambientales.,» *España: Reverté*, p. 570, 2004.
- [34] J. Bolaños-Alfaro, G. Cordero-Castro y G. Segura-Araya, «Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela,» *Tecnología en Marcha*, vol. 30, nº 4, pp. 15-27, 2017.
- [35] E. C. Niño-Silva, «Prácticas participativas de cultura ambiental del recurso hídrico entorno al río Subachoque en Cundinamarca Colombia implementadas por la comunidad,» Universidad de Manizales, Bogotá D.C., 2018.
- [36] R. Rosero-Galvis, «Estudio hidrológico : Río Subachoque,» Santafé de Bogotá, Colombia., IDEAM, 2003.
- [37] E. C. Niño Silva, «Prácticas participativas de cultura ambiental del recurso hídrico entorno al río subachoque en Cundinamarca Colombia,» Desarrollo social y humano, Bogotá D.C, 2018.

- [38] EOT, «Esquema de ordenamiento territorial municipio de Subachoque.,» EOT,2001.
- [39] E. C. Niño Silva, «Practicas participativas de cultura ambiental del recurso,» Ridum,Universidad de Manizales, Manizales, 2021.
- [40] M. Daza Rodriguez y D. Patiño Ramirez, «Bioindicacion de la calidad del agua del rio subachoque mediante el uso de microinvertebrados acuaticos y parametros fisicoquimicos como una integracion espacial y temporal,» Universidad DsitritalFrancisco Jose de Caldas , Bogota D.C, 2016.
- [41] L. E. Gualdrón Durán, «Evaluación de la calidad de agua de rios de Colombia,» *Universidad Libre*, 2016.
- [42] K. Jayanga, G. Buddhika, J. Mahesh, S. Madhusa y M. Jagath, «Eliminación de nitratos en agua subterránea potable mediante hierro nano zerovalente en condiciones óxicas,» *Práctica y tecnología del agua*, vol. 15, nº 4, pp. 1146-1143, 2020.
- [43] J. F. Rodriguez Romero, Eliminación De Metales Alcalinos De Polioles Mediante Intercambio Iónico, Cuenca: Universidad de Castilla-La Mancha, Servicio de Publicaciones, 1995.
- [44] M. Jaworski, Desarrollo De Catalizadores Para La Eliminación De Nitratos En AguaDe Consumo Humano, Facultad de Ciencias Exactas, 2012.
- [45] S. Samatya y e. al, «Removal of nitrate from aqueous solution by nitrate selective ion exchange resins.,» *Reactive And Functional Polymers.*, vol. 66, nº 11,p. 1207.
- [46] J. P. Van Der Hoek, W. F. Van Der Hoek y A. Klapwijk, «Nitrate removal from ground water — use of a nitrate selective resin and a low concentrated regenerant,» *Water, Air, And Soil Pollution*, vol. 1, pp. 41-42.
- [47] A. Matei y G. Racoviteanu, «Review of the technologies for nitrates removal fromwater intended for,» *arth Environ.* , pp. 1755-1315, 2021.



- [48] O. d. S. P. A. d. Agua, «Tratamiento y tratamiento de nitratos. Remediación para pequeños sistemas de agua,» *Documento de orientacion*, pp. 309-331, 2018.
- [49] V. Jensen, J. Darby, C. Seidel y C. Gorman, «Tratamiento de agua potable para nitratos,» Informe tecnico , 2012.
- [50] F. Correa, D. Cuesta, A. Melo y L. Sacristan, «Electrocoagulación en la remoción de contaminantes de efluentes provenientes de fertilizantes nitrogenados,» *Fundacion Universidad de America* , vol. 11, nº 2, pp. 109-139, 2018.
- [51] S. Garcia, M. Segura, L. Lanzarini, H. Kiril y P. Westerhoffa, «Electrocatalytic reduction of nitrate: Fundamentals to full-scale water treatment applications,» *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 236, pp. 546-568, 2018.
- [52] I. Linares-Hernández, C. Barrera-Díaz, G. Roa-Morales, B. Bilyeu y F. Ureña-Núñez, «Influencia del material anódico en el rendimiento de la electrocoagulación,» *ChemEng J*, vol. 148, pp. 91-105, 2009.
- [53] E. Bazrafshan, L. Mohammadi, A. Ansari-Moghaddam y A. Hossein, «Heavy metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process— a systematic review,» *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, vol. 13, nº 74, 2015.
- [54] M. Amarine, B. Lekhlif, M. Mliji y J. Echaabi, «Eliminación de nitratos de las aguas subterráneas en la región de Casablanca (Marruecos) por electrocoagulación,» *Elsevier*, vol. 11, 2020.
- [55] S. T. M. G. G. S. J. H. M. Martinez, «Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas,» *Servicio Nacional de Apredizaje*, 2010.
- [56] J. T. Calderon, «Fitorremediación de aguas residuales por hidroponia,» *Instituto Politecnico Nacional*, 2009.

- [57] R. Chambi Apaza, «Eficiencia del uso de microalgas del río Torococha en la remoción de nitratos y fosfatos para el tratamiento terciario de aguas residuales en un fotobiorreactor a escala laboratorio,» *Universidad Nacional de Juliaca*, 2019.
- [58] A. Macedo Riva, «Evaluación de la capacidad de remoción de nitratos y fosfatos de la microalga, *Desmodesmus asymmetricus*, en aguas residuales de Callao,» *Universidad Ricardo Palma*, 2018.
- [59] R. D. Candela Orduz, «Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones.,» *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*, 2016.
- [60] A. p. h. association, «Standard methods for the examination of water and wastewater,» *American water works association and water pollution control federation*, 1998.
- [61] R. Belgrano, V. Colasurdo y O. Diaz, «Selective UV method and reduction with Hydrazine Method in the determination of Nitrate ion in groundwater,» *Quimica nova*, vol. 26, nº 3, 2003.
- [62] M. y. E. A. Instituto de Hidrología, «Determinacion de nitrito en agua por espectrofotometria,» Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - República de Colombia, Bogota D.C., 2009.
- [63] M. Rujaimes Cruzata, «Determinación de iones nitrato, cloruro y cianuro en aguas naturales y residuales empleando electrodos selectivos,» *Universidad Central "Marta abreu" de las villas* , 2016.
- [64] D. Ospina Vasquez, «Validacion de nitrogeno amoniacal por destilacion como continuidad a la estandarizacion de los parametros ejecutados en el laboratorio de aguas de la coporacion autonoma regional del quindio,» *Universidad del Quindio*, rmenia, 2007.
- [65] G. L. Cárdenas Calvachi y I. A. Sánchez Ortiz, «Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la



- [75] Á. Arango, «La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales,» *Lasallista de Investigación*, vol. 2, nº 1, p. 59, 2005.
- [76] A. Restrepo y e. al., «La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamientode aguas.,» *Producción + Limpia*, vol. 1, nº 2, p. 65, 2006.
- [77] F. Prieto Garcia y e. al., «Electrocoagulación: Una Alternativa para Depuración de Lactosuero Residual,» *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales Investigación, Desarrollo y Práctica*, vol. 5, nº 3, p. 65.
- [78] A. Restrepo y e. al., «La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamientode aguas,» *Producción + Limpia*, vol. 1, nº 2, p. 67, 2006.
- [79] M. El azzouzi, K. Haboubi y M. Elyoubi, «Electrocoagulation-flocculation as a lowcost process for pollutants removal from urban wastewater,» *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 117 , p. 614–626, 2016.
- [80] P. ecologica, «Elaboración del diagnostico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrica del rio Bogotá,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac25b19243a8.pdf>. [Último acceso: 27 Enero2022].
- [81] A. Castro y M. R. O. Olivares, «Evaluación del Sistema de Lavado de los Desarenadores Convencional y Dufour Mediante el Cálculo de Volumen Muerto a Través de Modelos Hidráulicos,» *Desarenadores - Modelos Hidráulicos* , 2019.
- [82] C. Fall, J. Loaiza, M. Esparza y L. Martinez, «Evaluación de un clarificador secundario en una planta de tratamiento de aguas residuales,» *Ingenierias* , vol. X,nº 35, 2007.
- [83] J. A. Beltrán Gómez y P. A. Romero Caballero, «Análisis de riesgos para el sectoragrícola en la Sabana de Bogotá durante el periodo 2004 - 2014,» *Ciencia Unisalle*, vol. 1, 2017.

- [84] P. D. A. A. Y. A. V. D. F. E. C. D. C. D. BOGOTÁ, Manual lechuga, Camara de comercio de Bogotá, 2015.
- [85] A. Arango Ruiz y L. Garces Giraldo, «Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea,» *Universidad EAFIT*, vol. 43, nº 147, pp. 56-67, 2007.
- [86] M. Piña Soberanis, A. Martín Domínguez, C. González Ramírez, F. Prieto García, A. Guevara Lara y J. García Espinoza, «Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación,» *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 10, nº 2, 2011.
- [87] L. Pilay Guevara, «Diseño, construcción y caracterización de un reactor de electrocoagulación tipo batch,» *Escuela Politécnica Internacional*, 2018.
- [88] A. Melo, L. Sacristán, F. Correa y D. Cuesta, «Evaluación de la remoción de nitratos por electrocoagulación,» Fundación Universidad de América, Bogotá D.C, 2018.
- [89] L. Guanoluiza Llave, «Dimensionamiento de un sistema de electrocoagulación aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas con y sin radiación de electrones acelerados,» *Escuela Politécnica Nacional*, 2013.
- [90] A. Judicaël, H. B. Bi Gouessé, K. Konan Edmond y A. Kopoin, «Nitrate removal by electrocoagulation process using experimental design methodology: A techno-economic optimization,» *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 8, 2020.
- [91] CODENSA, «Tarifas de energía eléctrica (S/kW/h) noviembre de 2021,» noviembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/espa%C3%B1ol/personas/1-17-1/2021/tarifario-noviembre-2021.pdf>. [Último acceso: 03 Noviembre 2021].
- [92] Degremont, «Water Treatment Handbook,» *Rueil-Malmaison*, vol. 6, 1991.

- [93] S. Arango y A. Lopez, «Tratamiento de aguas residuales del proceso de desengrase de autopartes con fines de re-uso,» *Universidad EAFIT. Facultad de Ingeniería*, p. 122, 2008.
- [94] E. Karamati-Niaragha, M. R. Alavi Moghaddama, M. E. Mohammad y N.Ebrahim, «Evaluation of direct and alternating current on nitrate removal using a continuous electrocoagulation process: Economical and environmental approaches through RSM,» *Journal of Environmental Management*, vol. 230, pp. 245-254, 2019.
- [95] S. E. product, «Generador de corriente Balto 3000A- 30000A,» *International patent pending*, 2020.

## **ANEXOS**

# ANEXO 1

## CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DEL AGUA DEL RIO SUBACHOQUE POREL LABORATORIO HIDROLAB

Informe N°: 202112001816



\* 2 0 2 1 1 2 0 0 1 8 1 6 1 2 3 7 2 7 \*

Informe de Ensayo (SN)

Numero de Ingreso 31149-01

Cliente: FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA

Dirección:

Proyecto: Control Muestras de Aguas de Varios Tipos

Identificación Cliente: Andres David Bustos Gomez

Lugar de Muestreo: Mosquera

Dirección: Calle 12 N° 10 B Int 2

Ciudad / Región: MOSQUERA, Cundinamarca

Instrumento Ambiental:

Punto de Muestreo: Cuenca Río Subachoque

Matriz: Aguas crudas

Término de Muestreo: 12/11/2021 13:00:00

Muestreado por: Cliente

Tipo de Muestreo: Simple.

Recepción Laboratorio: 16/11/2021 11:38:00

Parámetro	Unidades	Resultados	Fecha y Hora Análisis	Ref.Método
Nitrógeno Amoniacal	mg/L N	14,1	16/11/2021 12:44:2	4500-NH3 C (2)
Nitrato	mg/L N-NO3	7,8	16/11/2021 12:00:1	SM 4500-NO3 D (2)
Nitrito	mg/L N-NO2	<0,010	17/11/2021 17:53:3	SM 4500-NO2 B (2)
pH	unidad	7,01(19,9°C)	16/11/2021 16:24:0	SM 4500-H B (2)
Conductividad	us/cm	1010	16/11/2021 16:24:1	SM 2510 B (2)
Nitrógeno Kjeldahl	mg/L N	27,2	16/11/2021 17:59:3	SM 4500 C NH3 B,C(2)
Nitrogeno Orgánico	mg/L	13,1	16/11/2021 16:55:0	
Nitrógeno Total	mg/L N	35,004	13/12/2021 09:37:0	SM 4500-N a (2)

Notas:

(2) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition 2017.

Luz Stella Diaz  
Directora Operativa Suplente

(SN)



\* 3 1 1 4 9 1 3 1 2 V V 1 2 3 7 2 6 \*

Fecha Emisión Informe: 13 de diciembre de 2021

Resultados válidos únicamente para la muestra analizada.  
Prohibida toda reproducción parcial o total de este informe sin autorización del laboratorio.

Autopista Medellín Km 2.5, vía parcelas de Cota Km 1.3 Conjunto de Bodegas AEPL, Bodega N° 3A - Teléfono +57 (1) 5 19 03 85  
31149-01 1/1



## ANEXO 2

### RECOMENDACIONES

El diseño de una celda de electrocoagulación experimental de tipo laboratorio permite redimensionar debido a la obtención de datos experimentales, que permiten establecer relaciones volumétricas y longitudinales entre variables de diseño, a escala industrial.

Es importante establecer un mayor perímetro de muestreo, de modo tal que se obtengan valores representativos de distintos puntos a lo largo de la cuenca hídrica, demostrando así la concentración real de  $\text{NO}_3^-$  a lo largo de la zona, permitiendo identificar si hay factores externos que afecten la concentración en algún punto de muestreo.

Incluir dentro de la caracterización fisicoquímica los valores correspondientes a DBO, DQO, sólidos suspendidos, metales pesados, color. De tal manera que al efectuar la electrocoagulación se midan la calidad de los parámetros y se evalúe su potabilización ampliando así el área de influencia del proyecto.

Se debe realizar un análisis económico que permita una comparación precisa de las variables que condicionan los resultados y su medición, y la posterior comparación con las variables probadas por métodos químicos y biológicos, un estudio para resaltar las ventajas de este proceso.

Se recomienda realizar muestreo compuesto para todas las muestras residuales, excepto para aquellas que solo tengan contenido fecal, la composición del agua varía significativamente con el tiempo. La muestra compuesta no puede usarse para identificar componentes o propiedades que pueden cambiar significativamente durante el almacenamiento; En su lugar, hacer estas determinaciones en cada muestra tan pronto como sea posible después de la recolección, preferiblemente en el sitio de muestreo.